

FISICA E FISICI A PISA NEL '900

a cura di

Vincenzo Cavasinni, Giuseppe Grosso, Paolo Rossi,
Alessandro M. Baldini, Marco Grassi, Marco M. Massai, Gloria Spandre

PISA
UNIVERSITY
PRESS

CIP a cura del Sistema bibliotecario dell'Università di Pisa



Membro Coordinamento
University Press Italiane

In copertina: foto di gruppo in occasione dei settant'anni di Gilberto Bernardini. Archivio Storico della Scuola Normale (1976). (Cortesia: Maddalena Taglioli, Archivista).

© Copyright 2018 by Pisa University Press srl
Società con socio unico Università di Pisa
Capitale Sociale € 20.000,00 i.v. - Partita IVA 02047370503
Sede legale: Lungarno Pacinotti 43/44 - 56126 Pisa
Tel. + 39 050 2212056 - Fax + 39 050 2212945
press@unipi.it
www.pisauniversitypress.it

ISBN ???-??-????-???-?

progetto grafico e impaginazione: 360grafica.it

L'Editore resta a disposizione degli aventi diritto con i quali non è stato possibile comunicare, per le eventuali omissioni o richieste di soggetti o enti che possano vantare dimostrati diritti sulle immagini riprodotte.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi - Centro Licenze e Autorizzazione per le Riproduzioni Editoriali - Corso di Porta Romana, 108 - 20122 Milano - Tel. (+39) 02 89280804 - E-mail: info@cleareadi.org - Sito web: www.cleareadi.org

Indice

Introduzione

Vincenzo Cavasinni, Giuseppe Grosso, Paolo Rossi.....7

LA FISICA A PISA FINO AL 1950

La fisica a Pisa nella prima metà del Novecento

Paolo Rossi 13

Angelo Battelli e Antonio Garbasso: l'ingresso della "Nuova Fisica" a Pisa

Francesco Guerra, Nadia Robotti.....25

La trazione elettromagnetica di Antonio Pacinotti

Claudio Luperini41

Fisici a Roma, fisici a Pisa

Giovanni Battimelli57

LA FISICA DELLA MATERIA

La fisica della materia a Pisa dopo la II guerra mondiale: 1945-1980

Una disciplina da costruire in un Istituto da ricostruire

Giuseppe Grosso77

La nascita della fisica teorica dei solidi a Pisa: 1967-1969

Flavio Toigo 107

Dark Resonances in Pisa

Silvia Gozzini, Ferruccio Renzoni 121

La Nascita della Biofisica nell'Istituto di Fisica di Piazza Torricelli a Pisa

Giuliano Colombetti, Francesco Lenci 125

Andavamo a prendere il caffè da Battellino

Danilo Giulietti..... 135

Fisica teorica della materia condensata alla Scuola Normale Superiore (1980-2000)

Giuseppe C. La Rocca..... 145

LA FISICA SPERIMENTALE DELLE INTERAZIONI FONDAMENTALI

Nascita a Pisa della sperimentazione in “fisica delle particelle elementari” <i>Carlo Bemporad</i>	161
Experimental Particle Physics at Pisa from the Frascati Electron Synchrotron to the Fermilab Collider <i>Giorgio Bellettini</i>	227
1954: da Conversi e Gozzini nuove idee per i rivelatori di particelle <i>Marco Maria Massai, Gloria Spandre</i>	265
Giorgio Salvini and the birth of the National Laboratory of Frascati <i>Susanna Bertelli</i>	287
Experiments at the CERN PS and SPS, and other memories <i>Luigi Di Lella</i>	293
Pisa and the Collider Detector at Fermilab: a History of the Establishment of Precision Physics with a Calorimetric Spectrometer at a Hadron Collider <i>Henry Frisch</i>	317
The role of the Pisa particle physics laboratory in the ALEPH experiment <i>Jacques Lefrançois</i>	337
I fisici pisani oltre la Cortina di Ferro: un'avventura scientifica e umana 1971-1975 <i>Angelo Scribano</i>	353
I primi anni della mia avventura nella fisica delle alte energie <i>Rino Castaldi</i>	369
Some Virgo History by Adalberto Giazotto <i>Diego Passuello, Francesco Fidecaro</i>	413
La nascita della Fisica Medica presso l'Istituto di Fisica dell'Università di Pisa <i>Alberto Del Guerra</i>	423

LA FISICA TEORICA, L'ASTROFISICA E L'INFORMATICA

La fisica teorica a Pisa nel dopoguerra <i>Adriano Di Giacomo</i>	445
Particle-physics phenomenology in and from Pisa. Years 1970-1993 <i>Riccardo Barbieri</i>	455
Astrophysics in Pisa from the 1960s to the 1980s: personal recollections <i>Giuseppe Bertin</i>	465

... e se fossimo davvero figli dei fisici?	
<i>Pierpaolo Degano</i>	481
La Olivetti e l'Istituto di Fisica di Pisa	
<i>Nicola Minnaja</i>	487
Conclusioni	491
Elenco degli Autori	493
Ringraziamenti	501

Introduzione

Vincenzo Cavasinni, Giuseppe Grosso, Paolo Rossi

Il Novecento, per le scienze, e per la fisica in particolare, ha rappresentato un periodo rivoluzionario per le scoperte di nuovi fenomeni e particelle che hanno portato alla definizione di nuovi paradigmi e teorie fisici quali la teoria della relatività, ristretta e generale, e la meccanica quantistica.

Nella prima metà del secolo, nonostante a Pisa abbiano studiato alcuni grandi personaggi, come, per esempio, Enrico Fermi che a Pisa ha scritto i suoi primi lavori, l'attività di ricerca in fisica ha beneficiato solo parzialmente dei grandi sviluppi, teorici e sperimentali, che avvenivano negli altri paesi.

A partire dagli anni cinquanta, grazie anche alla rinnovata capacità di collaborazione internazionale, si pensi, ad esempio al CERN di Ginevra, e all'intraprendenza di alcuni giovani fisici, che, con l'esempio e l'aiuto di maestri come Marcello Conversi e Carlo Franzinetti, hanno rilanciato l'attività di ricerca pisana che si è sviluppata in modo straordinario diventando competitiva rispetto a quella svolta in altre prestigiose sedi europee ed extraeuropee.

Nella fisica delle particelle le attività di ricerca a Pisa hanno toccato punte di eccellenza arrivando negli anni '80 alla scoperta e allo studio dei bosoni intermedi W e Z e, in quelli '90, alla scoperta del quark top. In entrambi gli esperimenti il ruolo dei fisici pisani è stato molto importante. Negli anni '80 è anche partito lo studio di fattibilità di un rivelatore di onde gravitazionali basato su un interferometro a doppio braccio (l'esperimento Virgo, presso Cascina).

La scoperta e lo studio dei bosoni W e Z e lo sviluppo di un interferometro di grande sensibilità sono stati la premessa scientifica necessaria per le fondamentali scoperte avvenute negli ultimi anni: il bosone di Higgs a LHC e le onde gravitazionali con l'esperimento Virgo-Ligo: in entrambe le circostanze il contributo dei fisici pisani è stato determinante.

Parallelamente, anche nei settori della fisica della materia e della fisica teorica Pisa si è messa al passo con il livello delle ricerche svolte in altre università estere.

Dopo la seconda guerra mondiale, quando si trattò di ricostruire l'Istituto di Fisica, grazie ad Adriano Gozzini la fisica sperimentale della Materia conobbe uno straordinario processo di crescita. L'impeto che Gozzini seppe imprimere all'attività di ricerca fin dai primi anni del dopoguerra

fu enorme. I risultati, spesso ottenuti con straordinaria semplicità e pochi collaboratori trovarono riconoscimenti in Italia e all'estero. Gozzini riuscì a riunire un gruppo di ricercatori che avrebbero contribuito a far nascere uno dei più importanti centri di ricerca italiani. Quando poi, dalla seconda metà degli anni '60 venne chiamato a Pisa Franco Bassani, venne colmata una lacuna nella ricerca dedicata alla fisica teorica della materia che da tempo esisteva nell'Istituto di Fisica. Con Bassani e il gruppo di ricercatori raccolti attorno a lui, nasce a Pisa la fisica moderna dello stato solido.

Delle molte e diversificate linee di ricerca sperimentali e teoriche in fisica della materia negli anni del dopoguerra vengono delineati in questo volume solo alcuni tratti importanti e ricordati i ricercatori che hanno poi svolto un ruolo significativo, come leader di indirizzo scientifico, nella costruzione delle radici della tradizione sperimentale e teorica della fisica della materia pisana.

Per quanto riguarda la fisica teorica, il punto di svolta fu segnato nel 1955 dall'arrivo a Pisa di Luigi Aialdo Radicati di Brozolo, che poi nel 1962 passò alla Scuola Normale Superiore. Con lui giunsero a Pisa le problematiche più attuali della ricerca teorica nel campo delle interazioni fondamentali, e in seguito anche in quello dell'astrofisica.

I suoi primi allievi pisani, pur nella diversità dei rispettivi indirizzi e interessi di ricerca, gettarono le basi di una scuola fortemente caratterizzata a livello metodologico e capace di rappresentare nei decenni successivi un importante punto di riferimento nel panorama della fisica teorica nazionale.

Recentemente a Pisa è stato istituito il "Centro Dipartimentale Bruno Pontecorvo" che ha come scopo istituzionale la ricostruzione storico-scientifica della ricerca in Fisica e dei suoi protagonisti.

Il Centro, nell'ambito delle sue attività, nei giorni 7-9 novembre 2017, ha organizzato presso il Palazzo Matteucci, sede storica dell'Istituto di Fisica dell'Università di Pisa, il convegno "Fisica e Fisici a Pisa nel Novecento".

Il convegno ha avuto come principale obiettivo quello di raccogliere i contributi e le testimonianze di quanti, per motivi di ricerca o per diretta partecipazione agli eventi, siano in grado di fornire documentazione relativa alle numerose importanti attività scientifiche svoltesi a Pisa, o in altre sedi ma con il determinante contributo dei fisici pisani.

Il volume, che qui raccoglie queste testimonianze, rappresenta quindi un primo passo verso una sistematica e organica ricostruzione e studio della ricerca scientifica in fisica che, crediamo, potrà anche essere utile a orientare le linee future di sviluppo di questa scienza.

LA FISICA A PISA FINO AL 1950

Nella relazione introduttiva di Paolo Rossi la storia dell'Istituto di Fisica pisano tra la fine dell'Ottocento e l'immediato secondo dopoguerra è sommariamente ricostruita attraverso le biografie scientifiche dei due titolari della cattedra di Fisica sperimentale, Angelo Battelli (dal 1893 al 1916) e Luigi Puccianti (dal 1917 al 1947) e il ricordo dei loro principali collaboratori e allievi.

Il contributo di Nadia Robotti e Francesco Guerra si concentra sulla collaborazione rapidamente sviluppatasi tra Battelli e Garbasso nel 1896 a seguito immediato della scoperta dei raggi X da parte di Roentgen, e sul successivo faticoso sviluppo delle ricerche sulla nuova fisica in Italia.

Non poteva mancare un richiamo, contenuto nel saggio di Claudio Luperini, alle ultime ricerche sulla trazione elettromagnetica effettuate da Antonio Pacinotti (scomparso nel 1912), figura di grande rilievo per la fisica pisana di fine Ottocento, anche se non giunse a creare una vera e propria scuola.

Il saggio conclusivo di Giovanni Battimelli è volto a esplorare i molteplici legami stabilitisi nel tempo tra gli ambienti della ricerca fisica a Pisa e a Roma, e associati a nomi del calibro di Volterra, Fermi, Gatto, Conversi, Salvini e Franzinetti, oltre che alla nascita della CEP e del Laboratorio di Frascati.

La fisica a Pisa nella prima metà del Novecento

Paolo Rossi*

All'alba del XX secolo Pisa è una delle principali sedi italiane per lo studio della Fisica. Nel fondamentale studio di B.J. Reeves è, insieme con Roma, Padova e Torino, una delle poche sedi cui è dedicato un intero specifico e dettagliato capitolo.

La tradizione di ricerca pisana nel campo della Fisica si era avviata intorno al 1840, per volontà del Granduca Leopoldo II, con l'arrivo simultaneo di Ottaviano Fabrizio Mossotti (1791-1863) e di Carlo Matteucci (1811-1868) ed era proseguita con l'attività del loro allievo Riccardo Felici (1819-1902), autore di fondamentali contributi nello studio dei fenomeni di induzione elettromagnetica (legge di Neumann-Felici), ma aveva visto una discontinuità nel 1893 al momento del pensionamento di Felici dopo 34 anni di titolarità della cattedra di Fisica Sperimentale, mancando un erede naturale in quanto i suoi allievi, pur importanti (Pacinotti, Roiti, Bartoli per citare solo i principali) avevano già trovato una diversa collocazione.

Fu quindi chiamato a dirigere l'Istituto (monocattedra, come era a quel tempo la regola) il montefeltrino Angelo Battelli (1862-1916), allievo di Nàccari a Torino, già professore a Cagliari (1889-91) e straordinario a Padova (1891-93) dove però non si profilava la possibilità di ulteriore carriera in quanto la quota degli ordinari (secondo la legge Casati) era ormai stata raggiunta.

Temperamento vulcanico e impegno politico (fu più volte deputato) facevano di Battelli un grande organizzatore, e infatti a lui fu dovuto, nel giro di pochissimo tempo (1894-95) un primo importante allargamento dell'edificio di piazza San Simone (oggi Torricelli), opera costata 15 mila lire dell'epoca e integrata da Battelli con 5 mila lire per l'acquisto delle attrezzature. Un ulteriore intervento del 1908 portò infine l'edificio all'assetto che avrebbe avuto fino alla II Guerra Mondiale, quando fu in parte demolito dai Tedeschi.

Fondamentale fu anche il suo impegno per la fondazione della Società Italiana di Fisica (1897) e per la riqualificazione del *Nuovo Cimento*, che dal 1900 divenne proprietà della Società Italiana di Fisica.

* Dipartimento di Fisica dell'Università di Pisa e Centro Fermi – Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche “Enrico Fermi” – Roma.



Figura 1. (da sinistra) O.F. Mossotti, C. Matteucci e R. Felici.

Ma ciò che qui preme sottolineare sono i contenuti e le caratteristiche della sua opera scientifica, che avrebbe condizionato, anche tramite i suoi allievi, una parte importante dello sviluppo della Fisica pisana, anche oltre i confini temporali di questa relazione.

Battelli fu abile sperimentatore, e dedicò il proprio impegno a una vasta classe di temi, scelti tra quelli che attiravano maggiormente l'attenzione dei fisici dell'epoca, sempre con l'obiettivo di controllare con l'esperienza le ipotesi teoriche presenti nella letteratura, soprattutto grazie a un miglioramento della precisione dei dati raccolti. Prima dell'arrivo a Pisa si era occupato soprattutto di fenomeni termoelettrici (fenomeni Thomson e Peltier), di fisica terrestre (tuttavia con risultati di scarso rilievo) e soprattutto, a partire dal 1887, di proprietà termiche dei vapori. Il relativo insuccesso delle ricerche di fisica terrestre è assai significativo del limite fondamentale della ricerca di Battelli, caratterizzata da una sostanziale mancanza di basi teoriche proprie, per cui quando si muoveva su terreni relativamente inesplorati, non potendo verificare le teorie altrui, faticava a ottenere risultati convincenti.

Teniamo ben presente questo fatto, che si rifletterà anche sull'evoluzione successiva dell'Istituto pisano.

Poco dopo il suo arrivo a Pisa Battelli fu raggiunto da un allievo più giovane di Naccari. Antonio Garbasso (1871-1933), cui nel 1895 fu affidato l'incarico di Fisica Matematica.

La collaborazione Battelli-Garbasso, durata un paio d'anni, fu fondamentale non tanto per gli specifici risultati quanto per il fatto che contribuì a reindirizzare le ricerche verso i fenomeni radiativi che venivano scoperti in quegli anni. Significativo il fatto che a pochi mesi dall'annuncio della scoperta dei raggi X da parte di Röntgen, e prima ancora che i suoi risultati fossero pubblicati, Battelli e Garbasso riuscirono a riprodurre l'esperimento e a farne oggetto di pubbliche conferenze; ma è sintomatico anche il fatto che la loro interpretazione



Figura 2. L'Istituto di Fisica al tempo di Matteucci e Felici e al tempo di Battelli.

del fenomeno fosse completamente errata, in quanto giunsero ad affermare che non potesse assolutamente trattarsi di un nuovo tipo di radiazione elettromagnetica.

A partire dal 1900, grazie alla collaborazione con il suo giovane allievo Luigi Magri (1875-1911), Battelli orientò le proprie ricerche sulle scariche oscillatorie, realizzando apparati sperimentali molto sofisticati e di grandissima precisione, in particolare con il metodo dello specchio rotante.

Un altro importante oggetto di indagine fu tra il 1906 e il 1909 la radioattività, in collaborazione con gli assistenti Occhialini (padre) e Chella. Il trattato *La radioattività* (1909) pubblicato dai tre, ebbe discreta fama per la sua completezza e fu tradotto in francese e in tedesco.

Battelli si occupò anche di sincronizzazione tra immagini e suono nelle proiezioni cinematografiche: il primo esperimento di proiezione con sonoro fu effettuato il 19 ottobre 1906 a Pisa presso il Cinematografo Lumière. Negli ultimi anni Battelli si occupò anche di dinamica del volo aereo, ma in sostanza l'impegno politico sempre più assorbente fece sì che negli ultimi anni la sua attività scientifica andasse sempre più scemando d'intensità e di importanza.

Nel frattempo però non era mai cessato l'impegno didattico, che si concretizzava soprattutto nell'inserire gli studenti degli ultimi anni nella pratica corrente di laboratorio, permettendo loro di affinare le tecniche acquisendo al tempo stesso la conoscenza diretta dei più recenti risultati della ricerca.

Tra i suoi 74 laureati più della metà pubblicarono almeno una nota sul Nuovo Cimento, una non piccola parte trovò una collocazione professionale nell'ambito dell'insegnamento medio superiore, e alcuni meritano di essere ricordati per la loro carriera universitaria: parliamo di Ugo Panichi (1872-1966), mineralogista, professore a Cagliari e Pavia, Luigi Puccianti (1875-1952) professore a Genova e a Pisa, Augusto Raffaele Occhialini



Figura 3. (da sinistra) V. Polara, E. Perucca, R. Brunetti, M. Pierucci.

(1878-1951), professore a Sassari, Siena e Genova, Virgilio Polara (1887-1974) a Catania e Messina, Eligio Perucca (1890-1965) al Politecnico di Torino, Rita Brunetti (1890-1942) a Ferrara, Cagliari e Pavia e Mariano Pierucci (1893-1976) a Modena. Si noti che l'elenco comprende più di un quarto dei titolari di cattedra di Fisica Sperimentale nell'Italia degli anni Trenta.

Oltre i collaboratori già menzionati, merita ricordare alcuni altri studiosi che furono attivi nell'Istituto di Fisica all'epoca della direzione Battelli.

Il lungo elenco degli assistenti e degli aiuti comprende: A. Bartorelli (dal 1893 al 1896), A. Rovida (dal 1894 al 1896), M. Pandolfi (dal 1896 al 1901), L. Magri (dal 1896 al 1904), F. Maccarrone (dal 1901 al 1906), A. Occhialini (dal 1904 al 1916), P. Doglio (dal 1906 al 1910), S. Chella (dal 1907 al 1919), V. Polara (dal 1908 al 1910), O. Bonazzi (dal 1910 al 1919) e T. Collodi (dal 1910 al 1921).

Quanto agli incarichi d'insegnamento dei corsi di Fisica per altri corsi di laurea, ricordiamo a Medicina A. Stefanini fino al 1908 e R. Magini dal 1911, a Farmacia, Agraria e Veterinaria L. Magri dal 1903 al 1911 e S. Chella dal 1912, a Chimica F. Maccarrone dal 1903 al 1906 e A. Occhialini dal 1906 al 1913, quando passò a Fisica tecnologica dopo la morte di Pacinotti.

Di alcuni degli studiosi succitati, che pure non giunsero alla cattedra, si segnalano anche le altre attività. A. Stefanini si occupò di macchine elettriche e soprattutto di acustica fisiologica, e collaborò con Magri nello studio della scintilla. Maccarrone passò presto all'insegnamento secondario ed ebbe una complessa carriera tra Cagliari, Napoli, Palermo, Roma e Siena, e fu Preside e Ispettore ministeriale, concludendo la carriera come Direttore incaricato dell'Istituto di Fisica di Siena nei primi anni Quaranta. Anche Chella e Magini si dedicarono all'insegnamento secondario, pur continuando a svolgere ricerche di fisica e a tenere incarichi di corsi universitari (Chella a Pisa fino al 1952 e Magini a Siena dal 1922 al 1924).



Figura 4. La sede storica (Lungarno Pacinotti) e l'insegna del Cinema Lumière.

Nel 1917 fu chiamato a succedere a Battelli Luigi Puccianti, pisano di nascita, allievo di Battelli e Garbasso, che dopo la laurea (1898) si era trasferito a Firenze dove era rimasto fino al 1915, quando vinse la cattedra e fu chiamato a Genova. Puccianti si era rivelato valentissimo sperimentatore fin dal tempo della preparazione della tesi, incentrata su studi di spettroscopia nell'infrarosso, per effettuare i quali si era costruito pezzo per pezzo tutto lo spettrografo, e in particolare il sistema di torsione per il radiometro di Crookes, del quale andava particolarmente orgoglioso anche a molti anni di distanza.

A seguito delle sue numerose ricerche nel campo della spettroscopia Puccianti, ancor prima di aver ottenuto la cattedra, conseguì una notevole reputazione, anche internazionale. Tra i suoi interessi si deve annoverare anche l'elettrodinamica, e si ricorda la sua strenua opposizione al sistema di unità di misura proposto da Giorgi (che divenne poi il Sistema Internazionale) in quanto a suo parere esso oscurava la sostanziale omogeneità dei campi **B** e **H** e la natura di numero puro del coefficiente μ . Non si trattava di considerazioni peregrine, perché Puccianti le riconduceva all'ipotesi di Ampère sull'origine del magnetismo e quindi alla sostanziale unità dell'origine delle interazioni tra correnti e correnti, tra magneti e magneti e tra magneti e correnti. Fondamentale fu a tale proposito la sua Memoria presentata nel 1914-15 all'Accademia dei Lincei.

Dopo il ritorno a Pisa Puccianti rallentò sensibilmente la propria attività di ricerca: il suo risultato più importante nella stagione pisana fu la proposta di un metodo diretto per la misura della lunghezza d'onda dei raggi X, basato sulle scoperte di Compton e sull'utilizzo di un reticolo di diffrazione a grande angolo di incidenza.

Abbandonata di fatto la ricerca sperimentale, Puccianti continuò tuttavia a dedicarsi con passione all'insegnamento e all'alta divulgazione, e fu prodigo di idee e suggerimenti per i propri allievi e per i colleghi. In tal senso, oltre che continuatore di un modello di ricerca sperimentale in

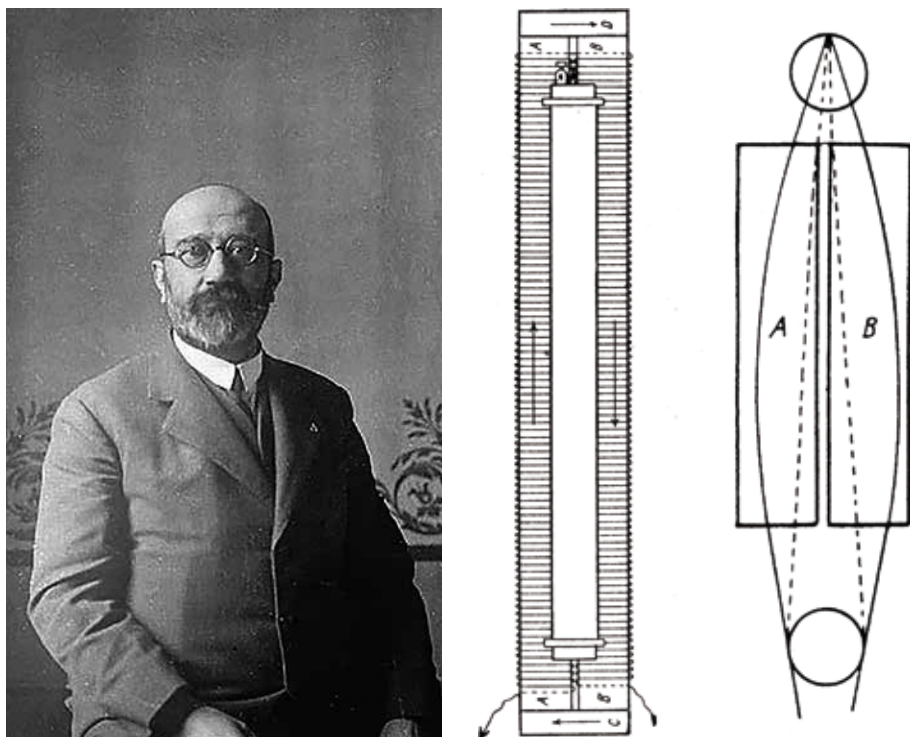


Figura 5. Luigi Puccianti e lo schema della lente magnetica.

larga parte ispirato al modello di Battelli, egli fu anche un vero maestro per una scuola di fisica che lasciò tracce importantissime non soltanto a Pisa, dove la spettroscopia, soprattutto grazie ad Adriano Gozzini (1917-1994), rimase uno dei temi centrali dell'attività di ricerca, evolvendosi poi nella fisica dei laser, ma anche in altre sedi, e in particolare a Firenze, dove grazie al suo allievo Vasco Ronchi (1897-1988) nacque l'Istituto Nazionale di Ottica e all'Accademia Navale di Livorno dove Nello Carrara (1900-1993) avviò lo studio delle microonde e con l'ingegner Tiberio realizzò un prototipo di radar.

A questa lista bisogna certamente aggiungere un contributo seminale di Puccianti alla nuova fisica che andava sviluppandosi in sedi diverse da quella pisana. Ci riferiamo alla fisica dei raggi cosmici, che fece progressi importanti con Bruno Rossi anche grazie all'impiego delle lenti magnetiche suggeritegli proprio da Puccianti. Siamo negli anni 1930-32 a Firenze, e con Rossi collabora anche un giovane allievo di Puccianti, destinato a una brillante carriera: Gilberto Bernardini. E non è la fine della storia, perché le stesse lenti magnetiche ebbero un ruolo essenziale nell'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni del 1944 che può per

molti aspetti essere considerato come l'avvio della fisica delle particelle elementari (Alvarez).

Ma non dimentichiamo che tra i suoi allievi si devono annoverare anche Fermi e Rasetti, e se la genialità di Fermi come teorico non deve certamente nulla all'insegnamento di Puccianti è però difficile dubitare che la pratica di laboratorio, pur a suo tempo odiata ma impostagli da Puccianti per la preparazione della tesi, abbia avuto un importante ruolo formativo per colui che sarebbe poi diventato uno dei maggiori fisici sperimentali del secolo.

I laureati di Puccianti furono almeno 150 (difficile una stima esatta perché si era ormai avviata la pratica della richiesta di tesi in sedi diverse dalla propria), e tra questi ancora una volta è impressionante elencare quanti in seguito conseguirono una cattedra universitaria o un importante ruolo istituzionale. Ricordiamo tra i laureati del periodo 1917-1947:

- Giovanni Polvani (1892-1970), ordinario a Bari (1927-1929) poi a Milano (1929-1969);
- Vasco Ronchi (1897-1988), fondatore e direttore dell'Istituto Nazionale di Ottica (1927);
- Mentore Maggini (1890-1941), direttore dell'Osservatorio astronomico di Collurania dal 1926;
- Nello Carrara (1900-1993) professore all'Accademia Navale dal 1924 al 1954, direttore incaricato a Pisa dal 1947 al 1950, professore a Firenze dal 1956 al 1975;
- Enrico Fermi (1901-1954), ordinario a Roma (1927-1938), Premio Nobel per la Fisica (1938);
- Franco Rasetti (1901-2001) ordinario a Roma (1930-1939), dal 1939 in Canada;
- Francesco Vecchiacchi (1902-1955), ordinario al Politecnico di Milano (1937-1955);
- Giuseppe Bolla (1901-1980) ordinario a Milano (1942-1972);
- Amedeo Giacomini (1905-1979), ordinario a Trieste (1949-1955) poi a Perugia (1955-1975);
- Giovanni Gentile (1906-1942) ordinario a Milano (1937-1942);
- Gilberto Bernardini (1906-1995) ordinario a Bologna (1938-1946), Roma (1946-1964), Scuola Normale Superiore (1964-1977);
- Cosimo Pistoia (1901-1964) (Radiotecnica E.I.A.R.);
- Luigi Solaini (1909-1989), ordinario di Topografia al Politecnico di Milano (dal 1950);
- Nestore Bernardo Cacciapuoti (1913-1979), ordinario a Trieste (1949-1962) e Pisa (1962-1979);
- Giulio Gregoret (1915-1992) ordinario di Misure Elettroniche al Politecnico di Torino (dal 1973);

- Paolo Budinich (1916-2013), ordinario a Trieste (dal 1954);
- Antonino Mura (1916-1957) ricercatore a Milano;
- Antonio Borsellino (1915-1992), ordinario a Genova (1950-1984) poi a Trieste dal 1984;
- Aldo Vespi (1917-2014), preside del Liceo di Pontedera;
- Adriano Gozzini (1917-1994), ordinario a Pisa (1959) e alla SNS;
- Guido Tagliaferri (1920-2000) ordinario a Bari (1960), Milano (1960-1996);
- Mario Verde (1920-1983), ordinario a Torino (1950-1983);
- Donato Palumbo (1921-2011), professore a Palermo, dirigente all'EURATOM (1961-1986);
- Arriguccio Battaglia (1922-1987), ordinario a Pisa (1973-1987);
- Gerardo Alzetta (1923-vivente), ordinario a Pisa (1976-1998);
- Carlo Castagnoli (1924-2005), ordinario a Parma (1959) poi a Torino dal 1961 al 1995;
- Alfonso Merlini (1926-2014), direttore della Physics Division all'EURATOM di Ispra fino al 1991.

Anche in questo caso i cattedratici presenti nell'elenco precedente rappresentano circa un quarto degli ordinari di Fisica in servizio nel 1960 ed entrati in ruolo nel secondo dopoguerra.

Ricordiamo anche i principali collaboratori di Puccianti e le loro attività più significative.

Furono assistenti e aiuti G. Polvani (dal 1919 al 1926), M. Pierucci (dal 1919 al 1931), G. Grazi (dal 1919 al 1924), N. Carrara (dal 1921 al 1924), M. Ciccone (dal 1924 al 1953), L. Allegretti (dal 1929 al 1946), T. Derenzini (dal 1931 al 1961), C. De Donatis (dal 1931 al 1968).

L'incarico dell'insegnamento dei Complementi di Fisica fu affidato dapprima a G. Polvani (dal 1921 al 1925), poi a M. Pierucci (dal 1925 al 1931) e a S. Chella (dal 1931 al 1936). Puccianti tenne per sé il corso di Fisica superiore a partire dal 1926, mentre quello di Fisica teorica passò da G. Gentile (dal 1932 al 1936) a G. Racah (1936-1938) e infine a T. Derenzini, che lo tenne dal 1938 fino al 1955. Il corso di Spettroscopia fu affidato a M. Ciccone a partire dal 1938, e quello di Fisica terrestre a L. Allegretti (dal 1939 al 1942) e in seguito a De Donatis dal 1944. Dal 1942 al 1944 Allegretti tenne il corso di Misure elettriche. Il corso di Fisica per gli altri corsi di laurea, tenuto da Puccianti fino al 1935, passò poi a S. Chella fino al dopoguerra.

Per quanto riguarda la produzione scientifica dei collaboratori nel periodo della loro permanenza a Pisa, ricordiamo gli studi di Polvani sull'effetto fotoelettrico e sull'effetto Hall, gli studi di spettroscopia e di astronomia planetaria di M. Pierucci, le ricerche di M. Ciccone sugli spettri del Berillio, le osservazioni spettroscopiche di Allegretti, alcuni



Figura 6. (da sinistra) E. Fermi, F. Rasetti e N. Carrara all'epoca degli studi universitari.

saggi di Derenzini sulla teoria dell'elettrone e, in collaborazione con De Donatis, sulla riflessione dei raggi X. Furono oggetto di pubblicazione anche i risultati di diverse tesi, tra cui quelle di G. Mayr, di E. Bellisai, di Maggini, Niccolai, Fagioli, Gregoretti e Budinich.

Puccianti fu collocato fuori ruolo il 10 novembre 1947, e la Facoltà, nell'attesa di una soluzione stabile, decise di affidare per incarico l'insegnamento della Fisica sperimentale e la direzione dell'Istituto a Nello Carrara, professore all'Accademia Navale, che gestì la transizione fino al 1950.

Saremmo scarsamente obiettivi se, accanto agli innegabili successi di una scuola, ottenuti anche grazie al costante approvvigionamento di giovani brillanti costituito dal reclutamento degli allievi della Scuola Normale Superiore, non mettessimo in evidenza alcuni limiti sia di metodo, sia di tematiche che un'analisi della produzione scientifica pisana antecedente l'arrivo a Pisa di Conversi nel 1950 rivela con chiarezza.

Abbiamo già parlato della scarsa attenzione per i fondamenti teorici dei modelli fenomenologici che aveva caratterizzato la ricerca e l'insegnamento di Battelli. A Puccianti, che come sopra indicato pure non era totalmente privo di interessi teorici, e che si era anche preoccupato di confutare l'interpretazione anti-relativistica dell'esperimento di Sagnac, si deve tuttavia rimproverare una ben scarsa attenzione per l'evoluzione che stava avvenendo nella fisica, da un lato con la nascita della meccanica quantistica di Schrödinger e Heisenberg e dall'altro con lo straordinario e rapido sviluppo della fisica nucleare, in cui pure l'Italia stava avendo un ruolo assai rilevante grazie al lavoro di Fermi e collaboratori. Questo per non parlare della ricerca in relatività generale, che pure, sempre grazie al lavoro del giovane Fermi, aveva visto a Pisa una prima e straordinaria fioritura.

È bene notare che si tratta di un atteggiamento culturale, e non di mancanza di aggiornamento, come si può verificare da un esame dei programmi dei corsi universitari tenuti a partire dalla seconda metà degli

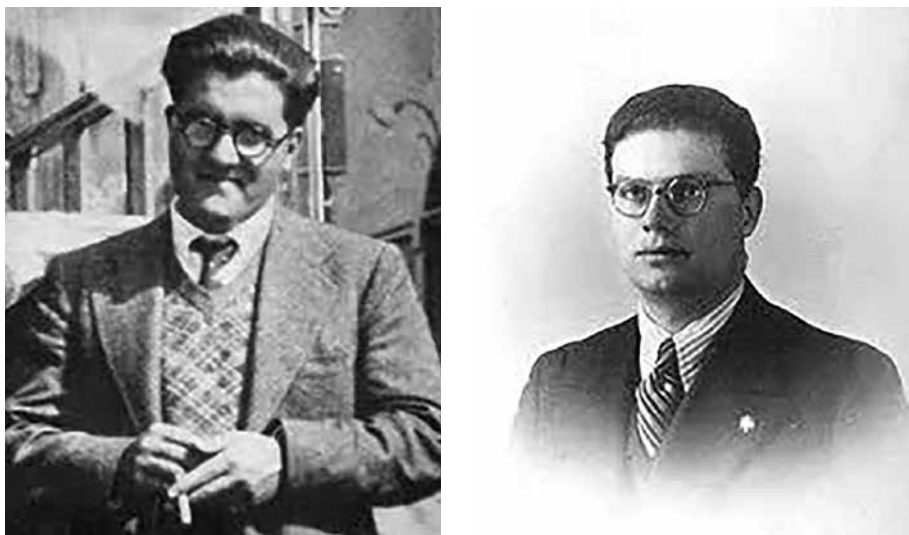


Figura 7. (da sinistra) Giovanni Gentile jr e Giulio Racah.

anni Venti: nel 1927/28 Puccianti nel corso di Fisica Superiore discuteva le idee di de Broglie e l'equazione di Schrödinger, e lo stesso faceva Lazzarino nel corso di Fisica Matematica del 1928/29 (ma i nomi di Heisenberg e Dirac compaiono per la prima volta soltanto nel programma del 1930/31). È significativo che la prima tesi teorica discussa a Pisa sia stata nel 1927 quella di Giovanni Gentile jr (1906-1942), e questo soltanto per cause di forza maggiore, perché il relatore iniziale, lo sperimentale Polvani, era nel frattempo andato in cattedra a Bari.

Ricordiamo che nel 1927 le prime cattedre di Fisica Teorica, tra cui quella di Fermi, andarono a Roma, Milano, Firenze e poco dopo Torino, e soltanto nel 1937 fu chiesta una cattedra per Pisa, che fu poi attribuita a Giulio Racah (1909-1965), tuttavia ben presto espulso (1938) a causa delle leggi razziali. Il corso, che in precedenza era stato tenuto per incarico per quattro anni da Gentile, dopo Racah fu affidato, sempre per incarico, a Tullio Derenzini (1906-1988), che lo tenne per molti anni, fino al 1955, ma non fece mai ricerca e si limitò sempre a un'introduzione alle nozioni di base. La scelta di non coprire l'insegnamento della fisica teorica con un ordinario attivo nel campo, a differenza di ciò che stava avvenendo nell'immediato dopoguerra in tutte le sedi più importanti, da Padova a Bologna e a Pavia (1947) e poi anche a Napoli e Genova (1950) la dice lunga su una "filosofia" della ricerca in fisica che soltanto con l'arrivo a Pisa di Radicati nel 1955 doveva cambiare radicalmente, adeguandosi a un modello che ormai era dato per scontato in tutto il resto del Paese.

Bibliografia

Annuari dell'Università degli Studi di Pisa (1893-1950).

- L. Bonolis, *Fuga dall'Italia fascista: il caso Bruno Rossi*, Sapere, dicembre 2010, pp. 52-61.
- G. Dragoni, *Per una storia della fisica italiana tra la seconda metà dell'Ottocento e la prima Guerra mondiale*, in *La storia delle scienze*, vol. 5 tomo II pp. 306-353, Bramante Editrice, Milano 1989.
- L. Gorgolini (ed.), *Angelo Battelli (1892-1916). L'uomo, lo scienziato, il politico*, Società di Studi Storici per il Montefeltro, San Leo 2004.
- C. Luperini, P. Rossi, *La fisica pisana dal 1861 al 1982* in *L'Università di Pisa dall'Unità a oggi*, Annale CISUI 14-2010, pp. 193-205.
- A. Occhialini, *Notizie sull'Istituto di fisica sperimentale dello Studio pisano*, Mariotti, Pisa 1914.
- L. Puccianti, *Il contributo della scuola di Pisa alla fisica italiana*, SIPS, Roma 1939.
- G. Polvani, *Fisica in Cento anni di ricerca scientifica*, SIPS, Roma 1939.
- G. Polvani, *In memoria di Luigi Puccianti*, Pisa 1955.
- B. Reeves, *Italian Physicists and their Institutions 1861-1911* Harvard thesis 1980.
- C. Romeni, *Storia della fisica in Italia: 1915-1955* in *La storia delle scienze*, vol. 5 tomo II pp. 354-374, Bramante Editrice, Milano 1989.
- P. Rossi, A. La Rana, *Dizionario biografico dei fisici italiani*, Vol. II (in corso di preparazione).

Angelo Battelli e Antonio Garbasso: l'ingresso della “Nuova Fisica” a Pisa

Francesco Guerra*, Nadia Robotti**

Nel 1893 Angelo Battelli (1862-1916), Professore di Fisica Sperimentale dal 1889, dopo un biennio trascorso rispettivamente prima a Cagliari, e poi a Padova, approdava a Pisa come successore di Riccardo Felici (1819-1902) sulla Cattedra di Fisica Sperimentale e sulla Direzione dell'omonimo istituto.

Due anni dopo, nel 1895, arrivava a Pisa, come Professore Incaricato di Fisica Matematica, Antonio Garbasso (1871-1933). Garbasso proveniva da un soggiorno di studio in Germania, prima a Bonn, presso l'istituto diretto da H. Hertz e poi a Berlino presso H.L. von Helmholtz, durante il quale aveva approfondito le basi sperimentali della teoria elettromagnetica della luce, argomento della sua tesi di laurea a Torino (1892).

Tra Battelli e Garbasso nascerà subito una stretta collaborazione scientifica, che durerà per tre anni, fino al trasferimento di Garbasso a Torino nel 1898, motivata da una grande scoperta, avvenuta proprio subito dopo l'arrivo di Garbasso a Pisa, quella dei Raggi X.

In quanto segue, cercheremo di mostrare come questa collaborazione, resa possibile non solo dalle competenze e dagli interessi comuni di Battelli e di Garbasso, ma anche dalla lunga tradizione di ricerca sperimentale sui fenomeni elettromagnetici portata avanti a Pisa da Riccardo Felici (1819-1902) attraverso anche l'acquisizione di ottime attrezzature in questo campo, porterà all'entrata a Pisa della “Nuova Fisica”, ponendo il Regio Istituto di Fisica in una posizione di primo piano, non solo a livello nazionale, ma anche internazionale, su argomenti di frontiera, pur nei limiti della situazione italiana generale.

1. La scoperta dei raggi X

Un settore di ricerca molto sviluppato nella seconda metà dell'Ottocento, nell'ambito dell'elettromagnetismo, era quello dello studio della scarica elettrica nei gas rarefatti. La ragione era dovuta al fatto che con questi

* Dipartimento di Fisica, Università Roma La Sapienza; I.N.F.N. (Roma); Centro Fermi.

** Dipartimento di Fisica, Università di Genova; I.N.F.N. (Genova); Centro Fermi.



Figura 1. Angelo Battelli (1862-1916).



Figura 2. Antonio Garbasso (1871-1933).

studi si sperava di risolvere un grosso problema della fisica del tempo, cioè quello di capire “il segreto dell’elettricità”, ossia la natura dell’elettricità e il rapporto tra l’elettricità e la materia. Questo tipo di studi presentava il grande vantaggio che consentiva di studiare l’interazione tra l’elettricità e la materia nel caso in cui questa era nello stato più semplice, cioè quello gassoso. In più, per lo stato gassoso esisteva una teoria a cui eventualmente fare riferimento, ossia la teoria cinetica dei gas.

Sarà proprio attraverso questa strada che il 7 agosto 1897, J.J. Thomson [3] (1856-1940) scoprirà che i “raggi catodici”, cioè quei “raggi” emessi perpendicolarmente al catodo e sempre presenti nei processi di scarica, erano in realtà particelle, e rappresentavano un primo costituente atomico negativo: l’elettrone, o il “corpuscolo” come lo chiamava Thomson.

Poco prima di questa scoperta, precisamente l’8 novembre 1895, sempre attraverso questo tipo di ricerche, un’altra scoperta sensazionale veniva fatta, questa volta da parte di Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923): quella dei Raggi X.

Röntgen, nel suo laboratorio a Würzburg, stava studiando le proprietà dei “raggi catodici” con un tubo di scarica in cui era stato praticato un vuoto molto spinto (non si conosce se era un “tubo di Crookes” o un “tubo di Lenard”) connesso a una grossa bobina a induzione.

Il tubo era totalmente schermato da un cartone nero e posto in una stanza “completamente buia”. Operando in queste condizioni, Röntgen, l’8

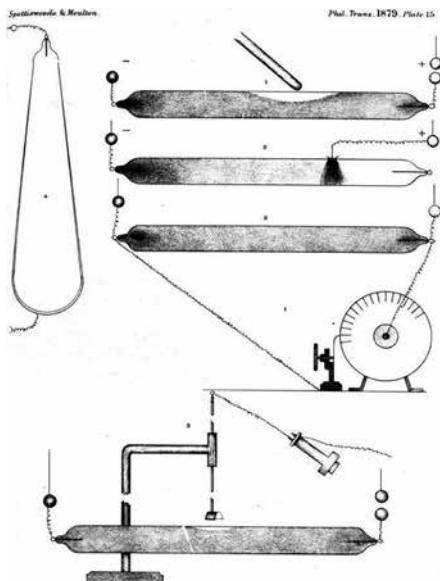


Figura 3. Dispositivi sperimentali per studiare le scariche nei gas rarefatti (W. Spottiswoode, J.F. Moulton, 1879) [1].

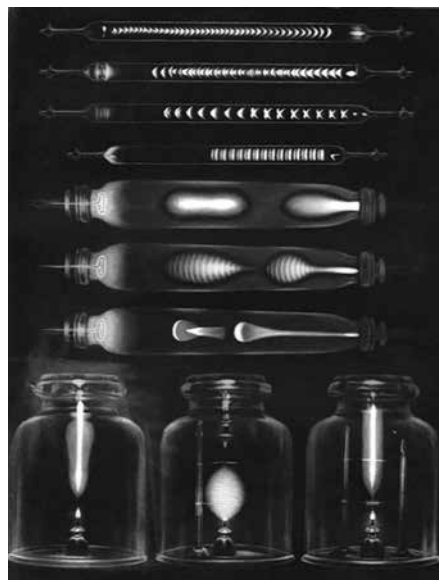


Figura 4. Immagini di fenomeni di scarica in gas rarefatti. (De La Rue, Muller, 1880) [2].

novembre del 1895, scoprì che uno schermo fluorescente di platino-cianuro di bario (che a posteriori si sa essere molto sensibile ai Raggi X) posto nelle vicinanze del tubo, “si illumina brillantemente”, anche a una distanza di 2 metri dal tubo. Poiché il tubo era racchiuso dentro un cartone nero, la fluorescenza vista non poteva essere attribuita alla luce visibile o alla luce ultravioletta proveniente dalla scarica all’interno del tubo, e neppure poteva essere attribuita ai “raggi catodici”, emessi dal catodo, e fuoriusciti dal tubo, poiché era noto che questi “raggi” avevano un cammino libero in aria di soli 10 cm.

Attraverso una prima serie di osservazioni Röntgen giungeva alla conclusione che la fluorescenza era dovuta a una nuova forma sconosciuta di radiazione invisibile, estremamente penetrante (ad esempio poteva passare attraverso «un libro di 1000 pagine o attraverso una lamina di Alluminio spessa 15 mm»), che veniva emessa nel punto di impatto dei raggi catodici con la parete del tubo e che era in grado di impressionare una lastra fotografica. Questa nuova radiazione, che sembrava anche che potesse essere riflessa, ma non rifratta, fu chiamata da Röntgen, «per amore di brevità», Raggi X.

Dopo una serie di verifiche molto puntuali, Röntgen finalmente pubblicava i suoi primi risultati il 28 dicembre 1895 in un articolo dal titolo “*Eine Neue Art von Strahlen (Vorläufige Mittheilung)*” («Un nuovo tipo di raggi (comunicazione preliminare)»), sulla rivista della Società Fisico-medica di Würzburg [5].

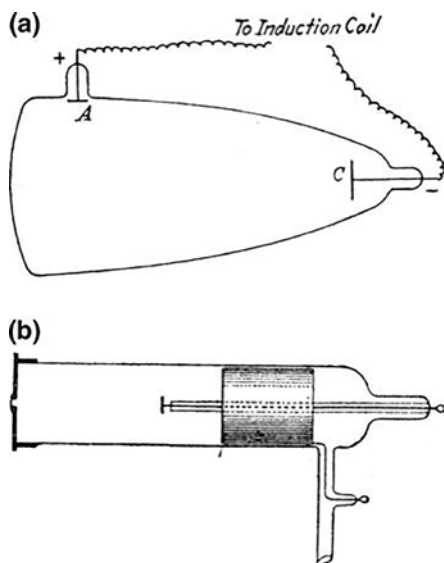


Figura 5. Tubo di Crookes (a); Tubo di Lenard (b) (F.K. Richtmyer, 1934) [4].

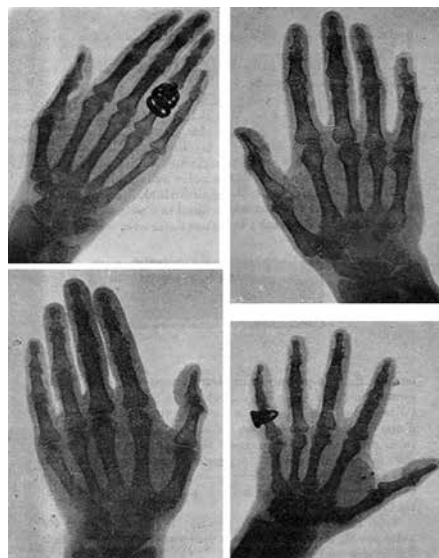


Figura 6. Radiografia della mano destra di William Crookes, sotto a sinistra; e della mano destra di Lord Kelvin, sopra a destra. (S.Thompson, 1897) [6].

Il primo gennaio del nuovo anno 1896 inviava gli estratti a un centinaio di studiosi in Germania e nel mondo, anche in Italia, accompagnati da una decina di fotografie, che non comparivano nell'articolo.

Per questa scoperta a Röntgen verrà assegnato nel 1901 il Premio Nobel per la Fisica, il primo della Storia, con la motivazione: «*in recognition of the extraordinary services he has rendered by the discovery of the remarkable rays subsequently named after him*».

Questi nuovi raggi erano così spettacolari che provocarono un grandissimo interesse in tutto il mondo. Sono famose le prime fotografie ottenute con questi raggi e che mostravano la ormai raggiunta capacità di "fotografare l'invisibile".

Prima ancora che venisse pubblicato l'articolo di Röntgen, in cui veniva comunicata la scoperta, tutti i giornali ne parlarono. Ed è proprio dalla lettura dei "giornali politici" che nascerà l'impresa di Battelli e Garbasso, che potremmo definire alla "conquista dei Raggi X". Pare infatti che Battelli non avesse ricevuto in anteprima il "plico" di Röntgen.

2. Gli esperimenti di Battelli e Garbasso

Come scrivono gli stessi Battelli e Garbasso, nel loro primo articolo, pubblicato sul Nuovo Cimento del gennaio 1896, dal titolo «Sopra i Raggi del Röntgen» [7]:



Figura 7. "Il ponte di Pisa" ("Anno IV, Num.4, Domenica 26 Gennaio 1896").

Appena si seppe dai giornali politici della scoperta fatta dal Röntgen di raggi dotati di proprietà particolari, cercammo di ripetere alcune delle esperienze del fisico tedesco. Siamo riusciti, quasi subito, ad ottenere dei buoni risultati.

Questi risultati, prima ancora di apparire sul "Nuovo Cimento", venivano comunicati da Battelli, sabato 25 Gennaio 1896, in una Conferenza Pubblica, tenuta nell'aula dell'Istituto di Fisica Sperimentale, dal titolo «Sulle esperienze di Röntgen».

I "giornali politici" avevano pubblicato le prime notizie sui nuovi raggi a partire dal 5 gennaio, senza dare naturalmente alcun dettaglio tecnico. È quindi sorprendente che Battelli e Garbasso siano riusciti non solo a riprodurre le esperienze di Röntgen, ma anche ad ottenere nuovi risultati originali nel giro di pochi giorni. Ecco i resoconti della Conferenza che abbiamo trovato in due pubblicazioni settimanali di Pisa: «Il Ponte di Pisa» e «La Provincia di Pisa».

Ecco in figura 7 la riproduzione della prima pagina de "Il ponte di Pisa" [8] in cui troviamo annunciata e riassunta la Conferenza di Battelli. Così troviamo scritto:

... Assistevano alla Conferenza i vari rappresentanti delle autorità cittadine e tutta Pisa eletta, intellettuale che applaudi vivamente l'illustre conferenziere. Alla conferenza furono presentate cinque radiografie molto impressionanti: la mano del prof. Garbasso nella quale l'anello (opaco) e le ossa tutte fino alla prima serie delle ossa carpiane sono di una precisione e di una esattez-



Figura 8. Prima pagina di «La Provincia di Pisa», giovedì 30 gennaio 1896.

za straordinaria... lo scheletro perfettamente visibile di una rana colla spina dorsale traversata da un ago; le ossa della parte posteriore di una cavia dove appare una palla di piombo, che il dott. Barba estrasse durante la conferenza; le membra posteriori di un coniglio che rivelano una frattura nel femore, oltre ad una palla di fucile ivi esistente; finalmente un pezzo anatomico del più grande interesse: la fotografia del dito medio asportato dalla mano di una donna affetta da tubercolosi; è visibile la carie delle falangi e dell'osso metacarpiano, e l'ingrossamento prodotto dal rammollirsi del tessuto osseo all'estremità delle falangi.

Un resoconto altrettanto puntuale ed entusiasta appariva sul settimanale «La Provincia di Pisa». In figura 8 è riprodotta la prima pagina del numero di questo settimanale in cui ampio spazio era stato dato alla Conferenza di Battelli [9].

Così l'articolo sulla Conferenza di Battelli concludeva:

La solennità dell'uditorio, l'importanza dell'argomento, facevano ricorrere la mente alle celebri letture semestrali che i Faraday, i Tyndall, gli Stokes, davano alla società reale di Londra.

Insomma erano bastati a Battelli e a Garbasso soltanto i “resoconti giornalistici” per realizzare a Pisa le prime radiografie!

Comunque il contributo di Battelli e Garbasso andava oltre alla realizzazione di queste immagini.

Come avevano anticipato nella Conferenza e poi esplicitato in modo esteso nell'articolo sul Nuovo Cimento, la loro occupazione principale,

nel breve periodo trascorso da quando avevano appreso della scoperta di Röntgen, non fu solo quella «di fare delle fotografie», ma «di allargare le ricerche sopra le proprietà e la natura dei raggi di Röntgen».

Come prima operazione, stabilirono che tra i vari tubi a vuoto che avevano a disposizione, e che erano in precedenza «destinati a ripetere le esperienze di Crookes» sulle proprietà dei «raggi catodici», quello «a forma di pera» era il più idoneo allo scopo.

Tra i vari apparati che avevano a disposizione per «eccitare il tubo di Crookes» e quindi per creare un fascio intenso di «raggi catodici», esaminarono, in successione, la macchina elettrostatica di Holtz, il rocchetto di Ruhmkorff, e un altro tipo di rocchetto che era servito a Battelli per ripetere, due anni prima, alcune delle esperienze di Tesla. La macchina elettrostatica e il rocchetto di Ruhmkorff mostrarono alcuni inconvenienti, mentre il rocchetto precedentemente usato, ad alta frequenza ed alta tensione, del tipo Tesla, provocava una fluorescenza nel vetro «anche più vivace» e quindi creava dei raggi catodici più intensi. Non solo. I tempi di posa potevano essere ridotti addirittura a soli due secondi. Molto generosamente Battelli e Garbasso fornivano nel loro articolo una descrizione completa dell'apparecchio utilizzato, che non era ancora molto diffuso.

Tra le varie lastre fotografiche disponibili stabilirono che le migliori erano le lastre Lumière, rispetto alle più comuni lastre Cappelli. Infine, cercarono di trovare un metodo per ridurre ulteriormente il tempo di posa, scoprendo che la soluzione era quella di porre uno schermo fluorescente dietro la lastra fotografica.



Figura 9. Tavola riportata nel primo articolo di Battelli e Garbasso sui Raggi X (1896) [10]: A. immagine (1): «rana colla spina dorsale traversata da un ago» (immagine presentata alla Conferenza); Immagine (2): non viene data nessuna informazione; immagine (3): «assenza di rifrazione in presenza di un prisma» (si vede, infatti che il fascio di raggi X non si spezza); immagine (4): «tre dita della mano di una bambina affetta da osteomielite».

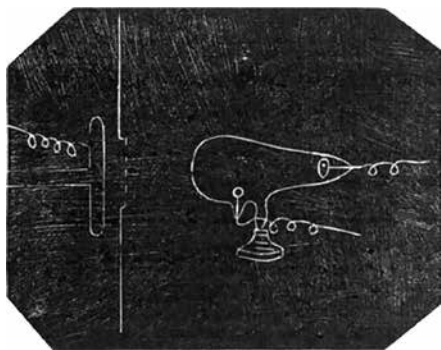


Figura 10. Un tubo a vuoto "a forma di pera" (Battelli, 1896) [11].

Con questa strumentazione, Battelli e Garbasso si misero a studiare varie proprietà dei Raggi X, quali la «trasparenza dei diversi mezzi» rispetto ai raggi X (vedi figura 11) [12] e la connessione tra la fluorescenza del vetro prodotta dall'impatto dei raggi catodici e la produzione di raggi X.

Trovarono anche che molte particolari sostanze minerali, oltre al vetro, se sottoposte alla radiazione catodica, permettevano di ottenere raggi Röntgen

molto intensi. Inoltre, individuarono molte altre sostanze che sotto l'azione dei raggi di Röntgen fornivano una fluorescenza anche più intensa di quella del platino-cianuro di bario. Infine credettero di aver dimostrato "oltre ogni ragionevole dubbio" che i raggi X potevano essere riflessi, mentre non riuscirono a dimostrare la possibilità di rifrazione, confermando così i primi risultati di Röntgen.

I loro dispositivi erano molto semplici e diretti, come mostrano le figure presenti nel loro lavoro.

Successivamente Battelli e Garbasso continuarono le ricerche sui raggi X e sui raggi catodici, producendo altre otto pubblicazioni sul Nuovo Cimento nel periodo 1896-1897, di cui diamo la lista completa:

- A. Battelli, *Sul luogo di emanazione dei raggi Röntgen nei tubi a vuoto*, *Ricerche di A. Battelli*, N.C. III, p. 129, 1896 (Marzo 1896);
- A. Battelli, A. Garbasso, *Sopra un modo per ridurre il tempo di posa delle fotografie eseguite coi raggi Röntgen* N.C. III, p. 167, 1896 (senza data);
- A. Battelli, *Ricerche sulle azioni fotografiche nell'interno dei tubi di scarica* N.C. III, p. 193, 1896 (Aprile 1896);
- A. Battelli, A. Garbasso, *Raggi Catodici e Raggi X - Esperienze ed appunti critici* N.C. III, p. 289, 1896 (maggio 1896);
- A. Battelli, A. Garbasso, *Azione dei raggi catodici sopra i conduttori isolati - Nota di A. Battelli e A. Garbasso* N.C. IV, p. 129, 1896 (Pisa-Torino 1896);
- A. Battelli, *Rapporti tra le azioni fotografiche all'interno e all'esterno dei tubi a vuoto*. N.C. V, p. 169, 1897 (febbraio 1897) [... portare un contributo alla ricerca della natura dei raggi Röntgen...];
- A. Battelli, *Rapporti tra i raggi catodici e i raggi di Röntgen* N.C. V, 386, 1897 (aprile 1897);

- A. Battelli, A. Garbasso, *Azione dei Raggi catodici sopra i conduttori isolati* - Nota 2° di A. Battelli e A. Garbasso, N.C. VI, p. 5 1897 (Pisa luglio 1897).

Riportiamo alcune figure, tipiche dello stile di Battelli e Garbasso, tratte dal lavoro sulle azioni fotografiche all'interno dei tubi di scarica, in cui le pellicole sensibili sono introdotte nei tubi di scarica, secondo varie disposizioni. Altre due figure sono tratte, invece, da due lavori sul legame tra raggi catodici e raggi X. dal lavoro "*Raggi catodici e raggi X*", e da "*Rapporti tra i raggi catodici e i raggi del Röntgen*".

Inoltre Garbasso pubblicò una nota "*Sopra un punto della teoria dei raggi catodici*", sui Rendiconti dell'Accademia dei Lincei [15], presentata da A. Naccari, in cui mostrava che la possibilità di deflettere i raggi catodici non si conciliava con una loro possibile natura ondulatoria.

Battelli, dal canto suo, per raggiungere un più vasto segmento della comunità scientifica internazionale, pubblicava uno dei suoi lavori apparso in italiano sul «Nuovo Cimento» anche in inglese, sulla prestigiosa rivista *Philosophical Magazine*, "*Analogy between the cathodic rays and those of Röntgen*" [16].

Particolarmente significativa è anche una brevissima nota di Battelli e Garbasso "*Sur quelques faits se rapportant aux Rayons de Röntgen*", apparsa sui *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, (seduta 9 marzo 1896). La nota è estratta da una lettera piuttosto risentita inviata a G. Lippmann, dove gli Autori difendevano accanitamente alcuni dei risultati ottenuti nel loro primo lavoro, di cui rivendicavano priorità e rilevanza: «... *Nous sera-il permis de rappeler que, dans un travail publié dans le numéro de janvier du Nuovo Cimento, nous avons déjà, entre autres résultats, signalé les suivants.*».

Complessivamente possiamo rilevare che Angelo Battelli, e il suo giovane collaboratore Antonio Garbasso, subito dopo aver appreso dai gior-

SOSTANZE	Grado di trasparen.	Densità	SOSTANZE	Grado di trasparen.	Densità
Sughero.	4,30	0,24	Golla da falegname.	0,48	1,90
legno d'abete	2,21	0,48	Solfo.	0,47	1,90
legno di noc.	1,50	0,68	Avorio.	0,46	1,92
Paraffina.	1,12	0,90	Gesso.	0,40	2,32
Gomma elastica.	1,10	0,92	Alluminio.	0,38	2,65
Ora.	1,10	0,97	Stallite.	0,35	2,70
Sforina.	0,94	1,06	Vetro.	0,34	2,70
Carbone di legno dolce.	0,90	1,16	Carbonato di calce.	0,33	2,72
Cartone di amianto.	0,80	1,20	Antimonio.	0,126	6,71
Ebanite.	0,80	1,20	Stagno.	0,118	7,16
Cartone ordinario.	0,80	1,24	Zinco.	0,116	7,21
Corno di bua.	0,80	1,30	Stagno puro.	0,112	7,30
Panno di lana bianco	0,76	1,30	Ferro.	0,101	7,86
» » nero.	0,76	1,30	Nickel.	0,065	8,28
Celluloid.	0,74	1,32	Ottone.	0,063	8,40
Uovo di balena.	0,74	1,36	Cadmio.	0,060	8,51
Panno di seta.	0,74	1,40	Rame.	0,084	8,90
» cotone.	0,70	1,48	Bismuto.	0,075	9,82
Carbone di legno duro.	0,63	1,50	Argento puro	0,070	10,53
Amido.	0,63	1,52	Argento lega (800/1000).	0,063	11,08
Zucchero.	0,60	1,50	Piombo.	0,055	11,35
Uovo bianco.	0,56	1,65	Palladio.	0,053	11,40
Magnesio.	0,50	1,87	Mercurio.	0,044	13,60
Carbone coke.	0,48	1,80	Oro.	0,030	19,32
Carbone di storta.	0,48	1,90	Platino.	0,0205	22,50

LIQUIDI.					
Bere solforico.	1,37	0,73	Acido cloridrico.	0,86	1,16
Petrolio.	1,28	0,80	Glicerina.	0,76	1,26
Alcool etilico.	1,22	0,81	Solfuro di carbonio.	0,74	1,29
Alcool amilico.	1,20	0,82	Acido nitrico.	0,70	1,37
Uovo d'oliva.	1,12	0,88	Cloroformio.	0,60	1,52
Benzina.	1,00	0,90	Acido solforico.	0,50	1,84
Acqua.	1,00	1,00			

Figura 11. Trasparenza di vari materiali rispetto ai Raggi X. (Battelli, Garbasso, 1896) [12].

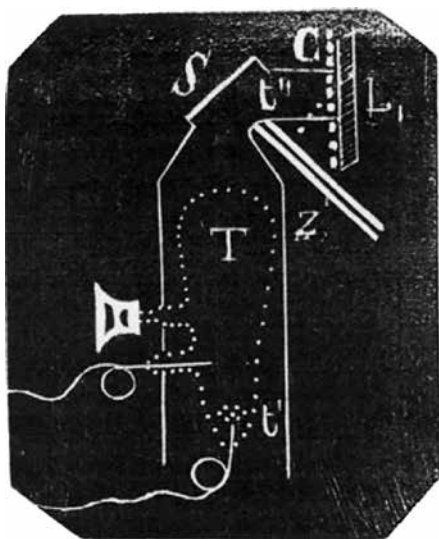


Figura 12. Apparato per lo studio della riflessione dei Raggi X: S è lo schermo riflettente, C è la lastra fotografica, Z è uno schermo aggiuntivo che impedisce ai raggi X di colpire direttamente la lastra (Battelli, Garbasso, 1896) [12].

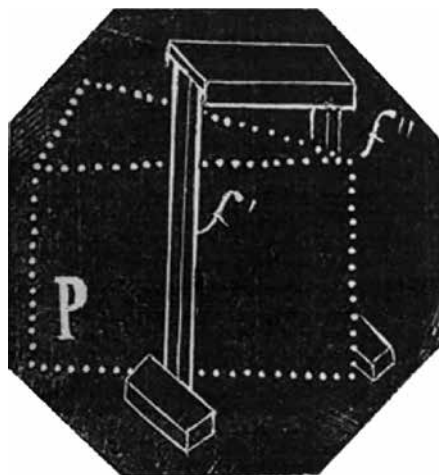


Figura 13. Apparato per lo studio della riflessione dei Raggi X: P è il prisma che dovrebbe produrre la rifrazione; f' , f'' sono due fenditure. Se il raggio, proveniente dal tubo allineato con f' e f'' , è rifratto non arriva in f'' . (Battelli, Garbasso, 1896) [12].

nali l'annuncio della importantissima scoperta fatta da Röntgen, furono immediatamente capaci di inserirsi nella nuova linea di ricerca, non solo riproducendo i risultati già ottenuti, ma ottenendone di nuovi e rilevanti, competitivi a livello internazionale. In questo furono naturalmente aiutati dall'avere un laboratorio ben attrezzato per le ricerche sulle scariche nei gas, e in particolare la disponibilità del rocchetto di Tesla, usato da Battelli per ricerche precedenti.

Consideriamo anche che il periodo era caratterizzato da importantissime scoperte, quali i raggi X (Röntgen, novembre 1895), la radioattività (H. Becquerel, febbraio 1896), l'elettrone nei raggi catodici (agosto 1897, J.J. Thomson). Ci si poteva quindi aspettare un rapido sviluppo di nuova fisica di frontiera a Pisa.

3. Difficoltà nello sviluppo della nuova fisica in Italia

In realtà, dopo la partenza, nel 1899, di Garbasso per Torino, Battelli solo per poco continuerà a occuparsi di problemi connessi con i raggi X e i raggi catodici, questa volta in collaborazione con Stefanini [17]. Anche Garbasso a Torino abbandonerà il campo, dopo un lavoro conclusivo

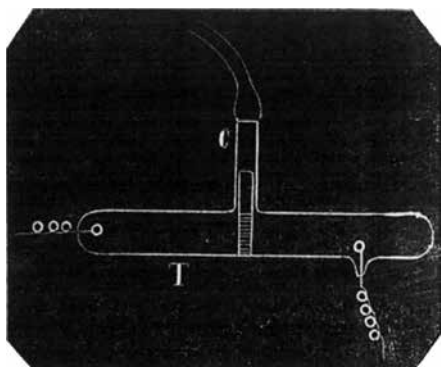


Figura 14. Azione dei raggi X sulle lastre fotografiche (Battelli, febbraio 1897) [13].

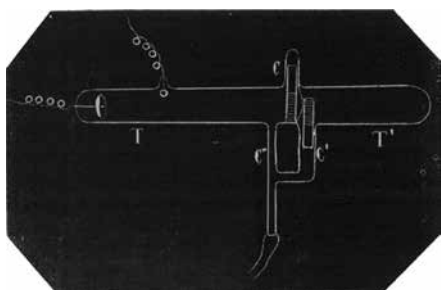


Figura 15. Azione dei raggi X sulle lastre fotografiche (Battelli, febbraio 1897) [13].

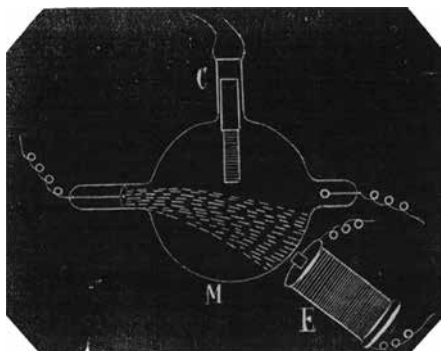


Figura 16. Azione dei raggi X sulle lastre fotografiche (Battelli, febbraio 1897) [13].

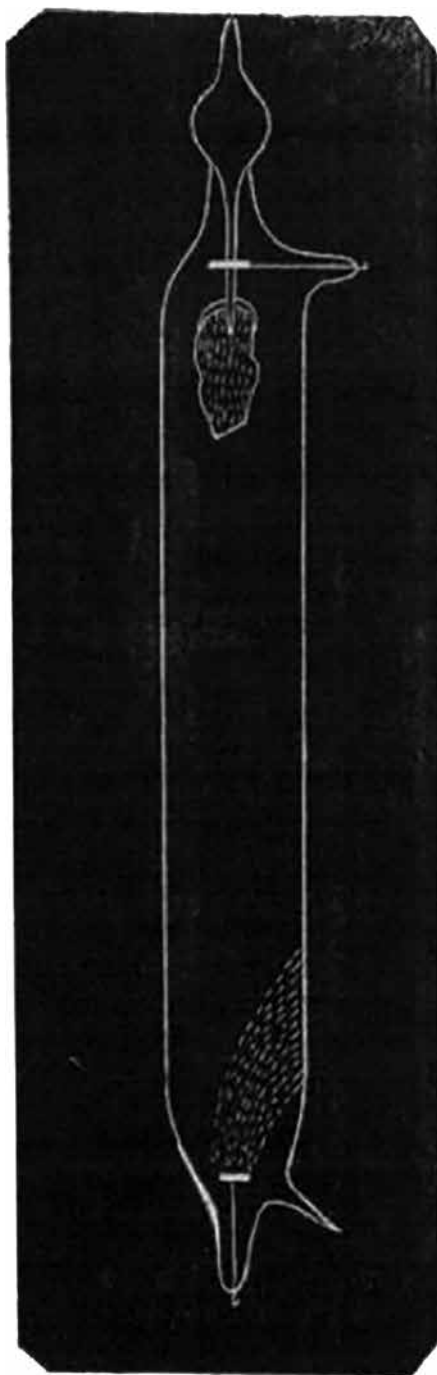


Figura 17. Studi sui raggi catodici (Battelli, Garbasso, maggio 1896) [14].

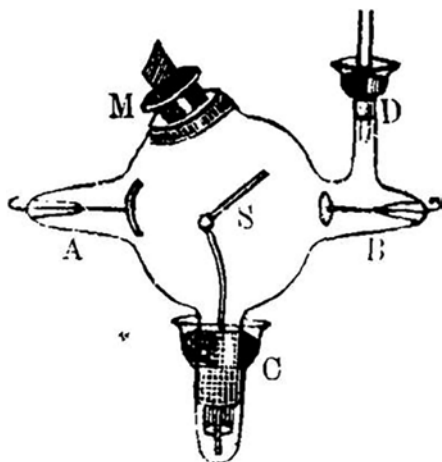


Figura 18. Studi sul rapporto tra raggi catodici e raggi X (Battelli, Garbasso, maggio 1896) [14].

sull'argomento generale *"Su la scarica nei gas"* [18].

Comunque Battelli fu coinvolto anche in ricerche sulla radioattività, per esempio in collaborazione con F. Maccarrone [19], con A. Occhialini e S. Chella, *"Studi di radioattività"* [20], arrivando anche a comporre un trattato, in collaborazione con A. Occhialini e S. Chella, *"La radioattività"* [21] edito da Laterza, 1909, e tradotto l'anno dopo in tedesco e francese.

Quindi, nonostante l'avvio molto promettente e le comprovate potenzialità, una linea generale di ricerca sulla fisica moderna tardò a svilupparsi a

Pisa. Sarebbe complesso fare una analisi completa di questo fenomeno. È certo che la "viscosità" dell'ambiente accademico italiano dell'epoca giocò un ruolo importante.

È istruttivo per esempio seguire i lavori della commissione istruttoria, composta da Blaserna, Morera, Naccari, Righi, Ròiti, per il Premio Reale dato dall'Accademia dei Lincei nel 1906. Assistiamo a un serrato testa a testa tra i due principali concorrenti, Angelo Battelli e Quirino Majorana. Alla fine prevale Battelli. Leggiamo dalla relazione della Commissione la descrizione dei lavori presentati.

«Angelo Battelli. Il Battelli concorre con quattordici lavori che per comodità di analisi si ripartiscono in tre gruppi: A), B), C).

A) Lavori di termologia:

1. densità dell'etere, del solfuro di carbonio e dell'alcool liquidi, sotto la pressione de propri vapori saturi;
2. sul calore specifico dei liquidi che solidificano a temperatura molto bassa.

B) Lavori intorno alle scariche oscillatorie:

1. sulle scariche oscillatorie;
2. la scarica oscillatoria nei fili di ferro;
3. la scarica oscillatoria nei solenoidi con anima di ferro;
4. ricerche sperimentali sulle scariche in solenoidi con anima di ferro;
5. l'isteresi magnetica nel ferro per correnti di alta frequenza;
6. sulle scariche oscillatorie (parte III);

7. ricerche teoriche e sperimentali sulla resistenza elettrica dei solenoidi per correnti di alta frequenza;
8. la scarica elettrica nel campo magnetico.

C) Lavori vari:

1. se le emanazioni radioattive siano elettrizzate;
2. studi di radioattività;
3. sulla natura della pressione osmotica;
4. relazione fra la pressione osmotica e la tensione superficiale.

II. Quirino Majorana. Il Majorana presenta cinque lavori a stampa che contengono i risultati di delicate ricerche sperimentali da lui eseguite per constatare se un corpo trasparente, magnetizzabile, posto in un campo magnetico, acquisti proprietà ottiche analoghe a quelle che costituiscono per i dielettrici in un campo elettrico il ben noto fenomeno di Kerr.

Questi lavori portano i titoli seguenti:

1. su due fenomeni magneto-ottici osservati normalmente alle linee di forze;
2. sul metodo e sulle sostanze da adoperarsi per osservare la birifrangenza magnetica;
3. sulla birifrangenza magnetica e su altri fenomeni che l'accompagnano;
4. sulle rotazioni bimagnetiche del piano di polarizzazione della luce;
5. sulla rapidità con cui si manifesta la birifrangenza magnetica.».

Possiamo notare che le ricerche di Battelli sui raggi X (ben dodici lavori su ricerche di frontiera) non vengono presentate per il concorso, e che le ricerche di radioattività occupano un posto molto marginale. Ma anche Majorana aveva lavorato intensamente sui raggi X e sui raggi catodici, e decide di non presentare questi lavori per il concorso.

Alla fine la Commissione emette le seguenti conclusioni:

Il primo [Battelli] col complesso dei lavori presentati al concorso si rivela sperimentatore originale, abile, ardito. Egli ha trattato questioni svariate e quasi sempre con ottimo successo; perciò la Commissione unanimemente lo giudica degno del premio. Pure degno del premio appare a giudizio unanime della Commissione il concorrente Majorana, i cui lavori si distinguono per accuratezza, precisione e singolare abilità sperimentale. Di fronte a due concorrenti, ciascuno dei quali conseguirebbe il premio qualora non avesse l'altro a competitore, la Commissione ha dovuto decidere se i loro lavori fossero comparabili e potessero quindi essere graduati per merito relativo. Su questo punto la Commissione è stata unanime nel riconoscere che tale comparazione si potesse fare, trattandosi di ricerche eseguite tutte nel campo della fisica sperimentale; e poi nel giudicare superiori per estensione, difficoltà superate, e portata i lavori del Battelli. Quindi la Commissione propone all'Accademia che il Premio Reale per la Fisica sia conferito al prof. Angelo Battelli. Le conclusioni della Commissione, messe ai voti dal Presidente, sono approvate dall'Accademia.

Il concorso si svolge quindi tramite confronto su produzione scientifica “tradizionale” e ben comprensibile alla maggioranza della Commissione, dal momento che i candidati hanno scelto di non presentare i loro risultati su argomenti di “nuova fisica”. Insomma, per l’Italia i tempi non sono ancora maturi per una fisica di frontiera.

Bibliografia

- [1] W. Spottiswoode, J.F. Moulton, VI. *On the sensitive state of electrical discharges through rarefied gases*, *Phil. Trans. R. Soc.*, 170, 1879.
- [2] W. De La Rue, H.W. Muller, *Experimental researches on the electric discharge with the chloride of silver batter*, *Phil. Trans.*, 171, 1880.
- [3] J.J. Thomson, *Cathode rays*, *Phil. Mag.* 44, 293, 1897.
- [4] F.K. Richtmyer, *Introduction to Modern Physics*, McGraw-Hill Book Company, 1934.
- [5] W.C. Roentgen, *Über eine neue Art von Strahlen. Sitzungsberichte der Physik.-med. Gesellschaft zu Würzburg*: 132-141, 1895;
- [6] S. Thompson, *Light visible and invisible: a series of lectures delivered at the Royal Institution of Great Britain*, 1896, New York, Macmillan, 1897.
- [7] A. Battelli, A. Garbasso, *Sopra i raggi del Roentgen - Ricerche sperimentali di A. Battelli e A. Garbasso*, N.C. III, 40, 1896.
- [8] “Il ponte di Pisa”, Anno IV, Num.4, Domenica 26 Gennaio 1896.
- [9] “La Provincia di Pisa”, Anno XXXII, numero 5, giovedì 30 gennaio 1896.
- [10] A. Battelli, A. Garbasso, *Sopra i raggi del Roentgen-Ricerche sperimentali di A. Battelli e A. Garbasso*, N.C. III, 40, 1896.
- [11] A. Battelli, *Sul luogo di emanazione dei raggi Röntgen nei tubi a vuoto*, *Ricerche di A. Battelli* N.C. III, p. 129, 1896 (Marzo 1896).
- [12] A. Battelli, A. Garbasso, *Sopra i raggi del Roentgen-Ricerche sperimentali di A. Battelli e A. Garbasso*, N.C. III, 40, 1896.
- [13] A. Battelli, *Rapporti tra le azioni fotografiche all’interno e all’esterno dei tubi a vuoto*, N.C. V, p. 169, 1897 (febbraio 1897).
- [14] A. Battelli, A. Garbasso, *Raggi Catodici e Raggi X - Esperienze ed appunti critici* N.C. III, p. 289, 1896 (maggio 1896).
- [15] A. Garbasso, *Sopra un punto della teoria dei raggi catodici*, *R. Acc. Lincei*, 5, 250, 1896.
- [16] A. Battelli, *Analogy between the cathodic rays and those of Röntgen*, *Phil. Mag.* vol. XLV, 1897-98 (January-June 1898).

- [17] A. Battelli, A. Stefanini, *Sulla velocità dei raggi catodici e sulla conduttività elettrica nei gas - Ricerche di A. Battelli e A. Stefanini*, N.C. X, p. 324, 1899.
- [18] A. Garbasso, *Su la scarica nei gas*, N.C., 1, 321, 1901.
- [19] A. Battelli, F. Maccarrone, *Se le emanazioni radioattive siano elettrizzate*, Rend. Linc. XIII, 539 (1904); N.C. VII, 259 (1904).
- [20] A. Battelli, A. Occhialini, S. Chella, *Studi di radioattività*, Rend. Linc. XV, 262 (1906), N.C. XII, 281 (1906), Phys. Zeits. VIII, 65 (1907), Journ. de Phys. VI, 899 (1907).
- [21] A. Battelli, A. Occhialini, S. Chella, *La radioattività*, Laterza (1909), edizione tedesca Leipzig J.A. Barth (1910), edizione francese Paris, Gauthier-Villars (1910).

La trazione elettromagnetica di Antonio Pacinotti

Claudio Luperini*

Da vario tempo vado pensando alla balestra elettromagnetica. Il proiettile essendo in ferro può essere accelerato da poli magnetici che gli si trasportino dinanzi¹.

Probabilmente questo appunto autografo di Antonio Pacinotti² mostrato in figura 1 e datato luglio 1887, può essere considerato la prova definitiva che lo scienziato pisano sia stato il primo ad aver pensato a dispositivi che generassero un moto rettilineo sfruttando la forza magnetica.

La prima realizzazione pacinottiana di un dispositivo a trazione elettromagnetica fu il *Viale elettromagnetico*, brevettato nel 1899. Nella richiesta di brevetto, per rimarcare la paternità dell'invenzione, Pacinotti ricorda che già nell'articolo del 1865, in cui descriveva la sua famosa macchinetta, aveva scritto «i poli si possono far muovere nel ferro sottoposto alla magnetizzazione»³.

In seguito, in un articolo de «Il Nuovo Cimento» intitolato *Circa ai Viali Elettromagnetici*, Antonio Pacinotti scrive:

Nella Tribuna illustrata della domenica 24 Giugno, il primo articolo del Corriere militare porta la voce che negli Stati Uniti si facciano esperimenti con

* Dipartimento di Fisica "E. Fermi", Università di Pisa.

¹ Fondo Pacinotti - Archivio A.P. I/146.

² Antonio Pacinotti nacque a Pisa il 17 giugno 1841. Il padre Luigi fu professore di Fisica e poi di Fisica Tecnologica all'Università di Pisa dal 1831 al 1882. Nel 1860, non ancora laureato, Pacinotti ideò e realizzò la famosa *Macchina ad anello* conosciuta come la *Macchinetta di Pacinotti*, la prima dinamo-motore a corrente continua, invenzione dalla quale Gramme trasse larghi spunti per brevettare la sua dinamo, commercializzata nel 1869. Nel 1861 Antonio conseguì la laurea in Matematiche Applicate e dopo essere stato per breve tempo assistente del padre si trasferì a Firenze come aiuto della Cattedra di Astronomia tenuta da Giovan Battista Donati, fino a dicembre 1864, quando si trasferì a Bologna, avendo vinto il concorso per la Cattedra di Fisica e Chimica all'Istituto Industriale e Professionale. Il 30 marzo 1873 Pacinotti fu nominato ordinario di Fisica Sperimentale e direttore del relativo Gabinetto all'Università di Cagliari. Il 15 dicembre 1881 Antonio Pacinotti successe al padre, alla cattedra di Fisica Tecnologica all'Università di Pisa. Morì nella notte fra il 24 e il 25 marzo del 1912. Per la vita di Antonio Pacinotti vedi: Luperini C., *Pacinotti Antonio*, Dizionario Biografico degli Italiani, vol. 80, pp. 159-163, Ed. Treccani, 2014.

³ *Antonio Pacinotti. La vita e l'opera*, a cura della Conf. Naz. Fascista profess. ed artisti, Lischi figli tipografi editori, Pisa 1934, t. I, p. 100.

1884/85 Da vario tempo vado pensando alla
Palestra elettromagnetica

Il proiettile spesso in ferro può essere accelerato
da poli magnetici che gli si trasportano
dinanzi.

Sipoteva dirigere il proiettile in ferro con una
cassa di ottone. Farei una fenditura longitudi-
dinale nella cassa di ottone chiusa da un
regolo di legno munito di molte mollette
che successivamente spregate dal proiettile servirebbero
a stabilire le comunicazioni fra i fili di rame
elettroluminici trasversali di forma opportuna.



Non sarebbe effetto utile.



Figura 1. Autografo di Antonio Pacinotti.

un lanciatore elettro-magnetico somigliante a quel Viale elettro-magnetico del quale mi occupai nell'anno decorso, anche domandandone ed ottenendone un attestato di privativa in Italia, dopo averlo costruito ed alquanto sperimentato. La disposizione che dal corrispondente E.B. della Tribuna viene attribuita ad un non nominato sperimentatore in America, somiglia quella dell'articolo 12 della mia descrizione di privativa. Naturalmente non mi riesce cosa piacevole che, attesa la mia privativa, venga intanto divulgata anche in Italia non come mia, ma come forestiera la idea fondamentale del conseguire dalle azioni elettro-magnetiche direttamente il movimento traslatorio ed il lancio di proiettili. [...]. Pisa, 11 luglio 1900⁴.

Questo articolo anticipa una situazione che si protrarrà attraverso tutto il '900; infatti, se si escludono l'opera di Giovanni Polvani del 1934 e un articolo di Vittorio Boccarda del 1941, le invenzioni dello scienziato pisano che per la prima volta applicano la trazione elettromagnetica sono state completamente ignorate. Nei libri o nei siti internet che trattano dell'evoluzione della trazione e levitazione magnetica e dei lanciatori elettromagnetici, vengono ricordati i nomi di Emile Bachelet, di Robert Goddard e di Kristian Birkeland, ma mai quello di Antonio Pacinotti.

L'idea di Pacinotti è avere un movimento traslatorio indotto da forze magnetiche attraverso una modifica della *calamita trasversale circolare* impiegata nella sua *macchinetta*, una modifica che potremmo definire una "rettificazione" della calamita stessa. Pertanto, come nella *macchinetta* si ha un movimento rotatorio, generato dall'interazione fra correnti elettriche e campi magnetici, in queste nuove macchine le stesse interazioni producono un movimento traslatorio. Se nella *macchinetta* i poli magnetici indotti sulla calamita circolare rimangono fermi nello spazio mentre la calamita ruota, in queste nuove macchine i poli si muovono nello spazio (Pacinotti li chiama "comunicazioni transitali") per produrre il moto rettilineo.

È conveniente quindi ricordare brevemente il funzionamento della *macchinetta*⁵ di Pacinotti (figura 2). Però, anche se essa fu rivoluzionaria come *dinamo*, cioè come macchina in grado di generare, economicamente e con elevato rendimento, corrente continua a tensioni di gran lunga superiori a quelle sino allora ottenute, a noi interessa parlare delle macchine di Pacinotti a trazione elettromagnetica e perciò è più utile vederne il funzionamento come "motore", in quanto la trazione elettromagnetica consiste in un movimento meccanico causato dall'applicazione di una tensione esterna.

⁴ *Il Nuovo Cimento*, Serie 4, Vol. XI (1900), p. 385 (Cfr. Antonio Pacinotti. *La vita e l'opera*, op. cit., t. I, pp. 105-106).

⁵ Le dimensioni dell'apparecchio sono: 40,5 cm (larghezza) per 23,5 cm (altezza) per 29 cm (profondità). Il peso è di 4 kg_p.

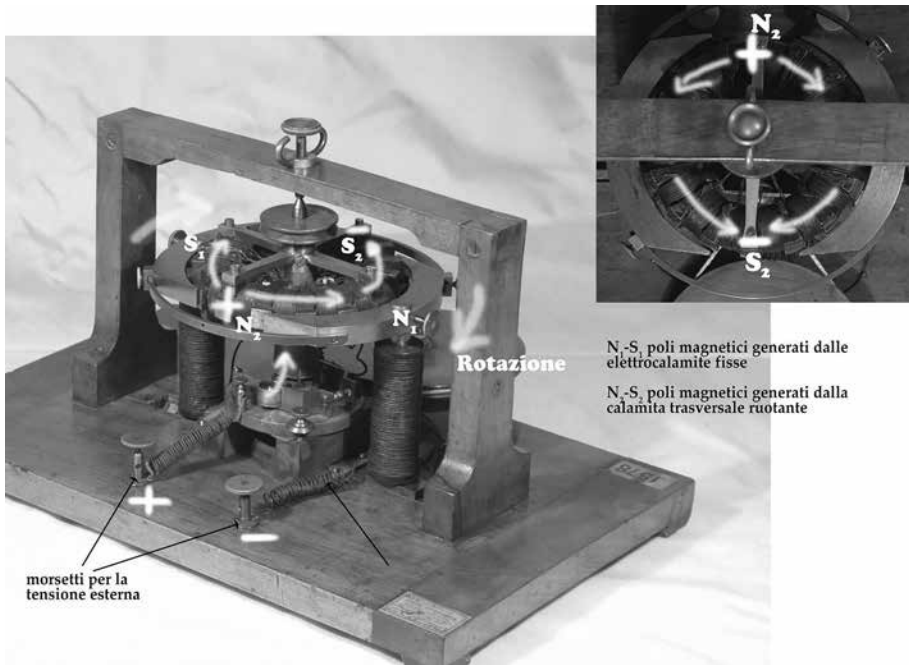


Figura 2. La Macchinetta funzionante come motore.

Applicando⁶ una tensione esterna ai morsetti la corrente attraverso il collettore (figura 3) arriva all'elettrocalamita trasversale⁷ (figura 4) in cui diramandosi (polo positivo) la percorre da ambo le parti per poi ricongiungersi (polo negativo) ed essere raccolta dal collettore e inviata verso un'elettrocalamita fissa (quella a sinistra della figura) e infine al morsetto negativo dopo aver attraversato anche l'altra elettrocalamita fissa. Le due diramazioni che si vengono a formare sull'elettrocalamita trasversale danno vita a poli magnetici opposti (N_2 e S_2) che, dall'interazione con poli delle elettrocalamite fisse (N_1 e S_1) generano un momento della forza che tende a far muovere il rotore (asse su cui sono montati collettore ed elettrocalamita trasversale) in senso orario. Mentre l'elettrocalamita ruota i poli magnetici (N_2 e S_2) si spostano (in senso antiorario) lungo di essa in maniera da rimanere nella

⁶ Una descrizione più ampia delle macchine di Pacinotti si può trovare in C. Luperini e T. Paladini, *Ho costruito il seguente apparecchietto. Antonio Pacinotti, manoscritti e strumenti*, edizioni ETS, Pisa, 2007.

⁷ Antonio Pacinotti denomina la sua elettrocalamita circolare con il nome di "trasversale" in quanto in essa le correnti girano in modo tale da generare un asse magnetico (N_2 - S_2) lungo il diametro, cioè "trasversale".



Figura 3. Il collettore.



Figura 4. La calamita trasversale.



Figura 5. Autografo di Antonio Pacinotti.

stessa posizione nello spazio affinché il momento torcente non si esaurisca e il motore continui a girare. Il funzionamento come “dinamo” è analogo e si ottiene facendo girare la manovella (che si intravede in figura 2), e quindi il rotore, e raccogliendo la corrente ai due morsetti.

1. Macchina elettrodinamica traslatoria detta viale elettromagnetico

La prima macchina a trazione elettromagnetica fu il «Viale elettromagnetico», il cui brevetto⁸ italiano fu depositato da Pacinotti il 21 Febbraio 1899⁹. Antonio aveva iniziato a sperimentarlo l'anno precedente, precisamente il 25 Maggio 1898, in una versione ridotta come si può leggere in un suo quaderno¹⁰ di appunti mostrato in figura 5.

Al punto 18 del suddetto brevetto Pacinotti indica gli usi che potrebbero essere fatti di questo strumento:

Da solo non farei che qualche modello per giocattoli e per le scuole, ma trovando efficace collaborazione, potrebbero farsi applicazioni del Viale elettro-magnetico alla locomozione entro tubi, sulle ferrovie e sopra piani inclinati auto-elettromotori; specialmente se al Governo piacesse, credo che si potrebbe, per esso, col Viale elettro-magnetico sulle navi produrre una arma più difensiva che offensiva¹¹.

Il *Viale elettromagnetico* (lungo 110 cm per un peso di 13 kg_p) mostrato in figura 6 è costituito da 10 rocchetti coassiali sistemati su una base di legno. Ogni rocchetto ha il filo avvolto su un cilindro di ottone cavo ed è isolato dai rocchetti vicini grazie alla presenza di ebanite. Ciascun rocchetto ha un estremo collegato al tubo di ottone su cui è avvolto

⁸ Antonio Pacinotti. *La vita e l'opera*, op. cit., pp. 98-105.

⁹ Il brevetto fu concesso l'11 Agosto 1899.

¹⁰ Fondo Pacinotti - Archivio, Sezione II, quaderno O, pp. 94-95.

¹¹ Antonio Pacinotti. *La vita e l'opera*, op. cit., p. 105.



Figura 6. Il Viale elettromagnetico.

e l'altro estremo è dedicato al collegamento con la tensione. La funzione del Viale è quella di sparare proiettili.

Le connessioni delle bobine tra loro e con la tensione esterna, sono tali che con l'inserimento nel Viale del proiettile, che è formato da una parte conduttrice e una parte ferromagnetica, si innesca una corrente grazie alla parte conduttrice che mette in contatto elettrico le bobine. Questa corrente, a sua volta, genera un campo magnetico il quale “risucchia” in avanti la parte ferromagnetica del proiettile e di conseguenza l'intero proiettile. L'avanzamento della parte conduttrice commuta i contatti fra le bobine in modo da far avanzare il campo magnetico e mantenere l'effetto di “risucchio” che accelera il proiettile. Il confronto con la *macchinetta* porta ad identificare la serie delle 10 bobine con l'*anello rettificato* e il proiettile con il *collettore*.

Nelle figure 7 e 8 viene illustrata la posizione del proiettile in due istanti successivi; nella prima figura è riportato anche un disegno autografo¹² di Pacinotti riguardante le connessioni del *Viale* alla tensione esterna.

2. Macchina traslatoria a laccio elettromagnetico

Pacinotti lavorò alla sua seconda macchina a trazione elettromagnetica nella Primavera del 1899.

A di 28¹³ Abbian provato il laccio vial con elettrocalamita nel carruccio [...] Tuttavia il carruccio corre più velocemente quando la corrente circola anche

¹² Fondo Pacinotti - Archivio, Sezione II, quaderno P, p. 17.

¹³ Aprile.

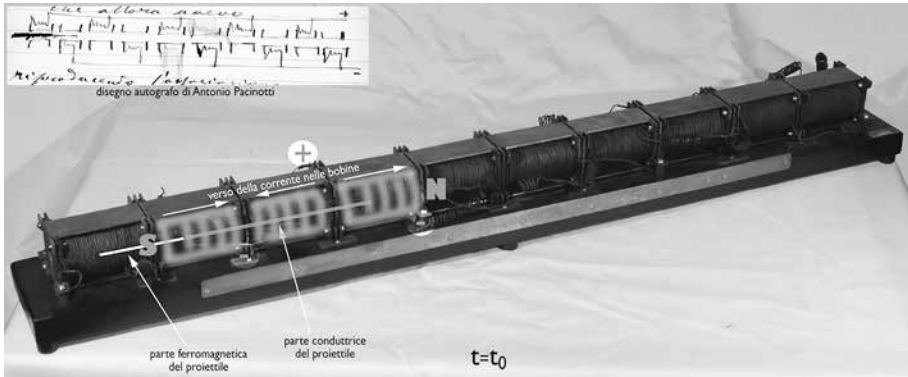


Figura 7. Viale elettromagnetico: posizione del proiettile ad un certo istante t_0 .

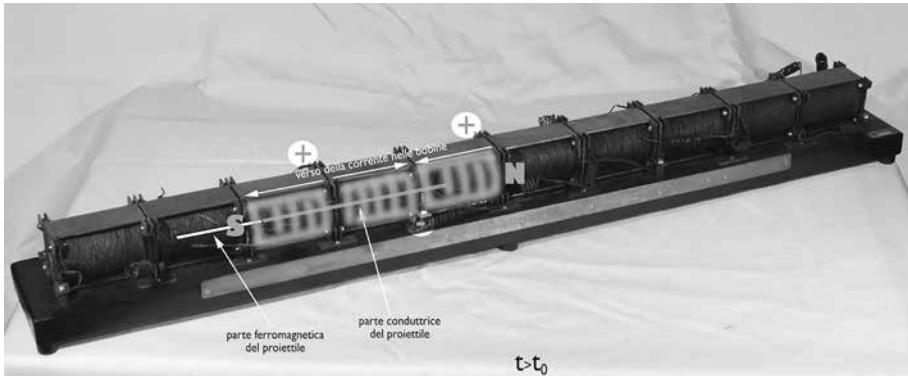


Figura 8. Viale elettromagnetico: posizione del proiettile ad un istante successivo a t_0 .

nel filo della sua elettrocalamita, che quando analogamente alle prove dell'altro ieri la corrente circola soltanto per i rocchetti del laccio viale. A seconda del verso nel quale si fa circolare la corrente nel filo del carruccio rispetto alla direzione che essa ha nei rocchetti del viale il carruccio va per attrazione in un verso, o invece per repulsione va in verso contrario¹⁴.

A di 6 Maggio 1899 La costruzione del Viale elettromagnetico a laccio è ultimato [...] Il carretto stabilisce le comunicazioni trasversali con le sue ruote e porta una elettrocalamita che agisce per repulsione sopra i poli mobili delle due aste del laccio elettromagnetico. Con una corrente di 5 Ampere il carretto rimonta il viale posto in salita e si accelera assai giungendo ad urtare contro l'ancora di una piccola elettrocalamita e staccandola interrompe la corrente. Ridiscende senza corrente ed urtando al basso del viale in due molle comunicanti col filo della piccola elettrocalamita e con la sorgente di elettricità

¹⁴ Fondo Pacinotti - Archivio, Sezione II, quaderno P, p. 39.

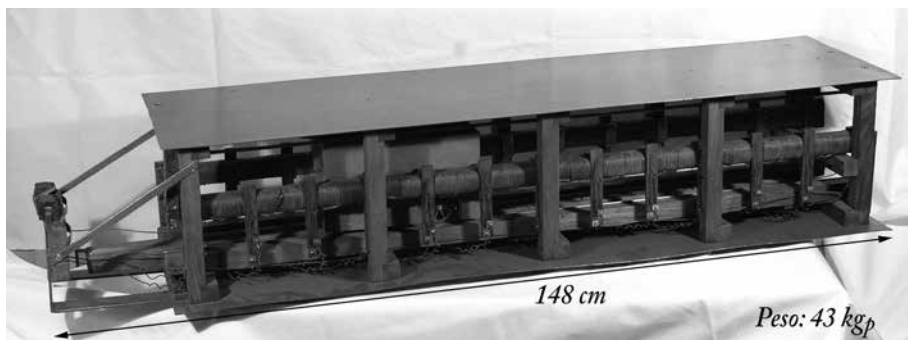


Figura 9. Macchina traslatoria.

ristabilisce la comunicazione e risale e così continua in salita e discesa alternativamente¹⁵.

Si tratta di una macchina che fa uso di un *viale elettromagnetico* costituito da due serie di bobine poste lateralmente ai binari su cui si muove un carrello, la cui funzione è analoga a quella del proiettile nel *Viale elettromagnetico*.

Nella figura 10 è visibile l'interno del carrello con la bobina trasversale posta in serie alle ruote e nella figura 11 sono abbastanza evidenti quattro rotaie: la prima e la terza da sinistra sono divise in sezioni¹⁶.

Nelle due figure 12 e 13 viene schematizzato il funzionamento di questa macchina nel caso che la corrente giri nell'elettrocalamita del carrello in maniera da avere movimento per attrazione magnetica. La tensione viene applicata alle due rotaie non sezionate. Sono le ruote del carrello che mettono in comunicazione queste due rotaie con le sezioni delle altre due; ciascuna sezione è collegata ad un filo delle bobine laterali. Nel disegno i numeri della rotaia di destra, ad esempio, indicano che la sezione corrispondente è collegata al punto con lo stesso numero sulla destra; questi punti numerati rappresentano le viti che stringono a due a due gli estremi dei fili delle bobine. Lo stesso discorso vale per la parte sinistra.

Così la corrente che si instaura in tutto il circuito produce poli magnetici sulle bobine che attirano i poli magnetici che si vengono a creare agli estremi della bobina del carrello, che di conseguenza procede per trazione elettromagnetica. Con l'avanzare del carrello avanzano pure i poli magnetici laterali in modo tale che la trazione non si esaurisca.

¹⁵ Ivi, pp. 40-41.

¹⁶ Vedi nota n. 6.

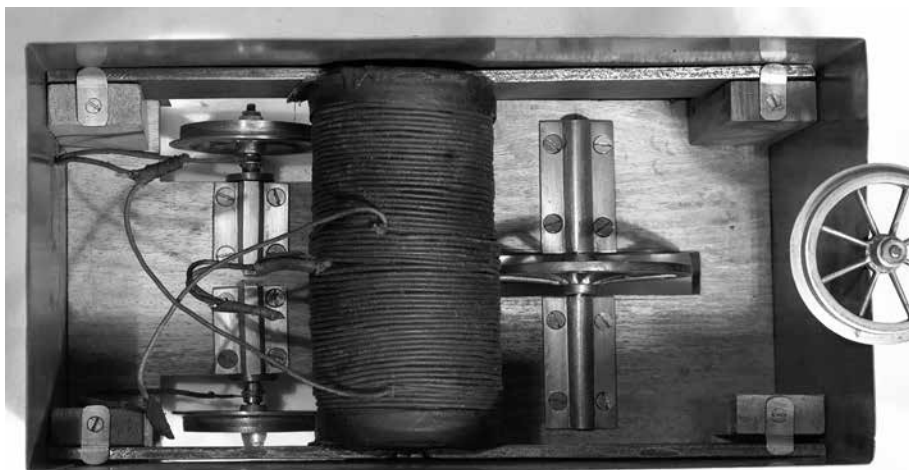


Figura 10. Macchina traslatoria: interno del carrello.

Per questo apparecchio Pacinotti non chiese il brevetto, forse perché non aveva ben chiaro per quale impiego poterlo proporre. È comunque in questa macchina che appare per la prima volta il “laccio elettromagnetico” che non è altro che il prolungamento di alcuni ferromagneti intorno al dispositivo per confinare i campi magnetici affinché non interferiscano con le altre parti del dispositivo.

3. Carro viale elettromagnetico

Il 14 Ottobre 1900 Pacinotti ottenne il brevetto italiano per il “Carro Viale elettro-magnetico”¹⁷. Di questo nuovo modello si legge nei suoi appunti già dal 15 Settembre 1899¹⁸ e poi alla data del 21 Maggio 1900 è scritto:

[...] Ho conseguito utili modificazioni nel carretto viale e nella piccola ferrovia ad esso sottostante. Oggi è stato provato con le nuove disposizioni e correva fortemente anche in salita di circa un grado. [...] Ora l'ottone interposto separa alquanto magneticamente il viale dalla intelaiatura di ferro portante le ruote del carrello, ed il viale mobile non può più dirsi a ceppo ma deve invece dirsi a doppio cintolo magnetico perché i due pezzi di ferro aggiunti chiudono due cintoli magnetici. I poli mobili ora son quattro cioè due fra loro contrari in ciascuno dei due cintoli¹⁹.

¹⁷ Il 31 Dicembre 1900 ottenne il brevetto in Belgio.

¹⁸ Fondo Pacinotti - Archivio, Sezione II, quaderno P, p. 86.

¹⁹ Ivi, pp. 94-95.

Si tratta di un piccolo modellino di carro (figura 14), lungo 61 cm e con un peso di 9.5 kg_p, che può viaggiare su un binario costruito *ad hoc*. Pacinotti ne suggerisce l'uso come macchina particolarmente utile per le ferrovie. Sotto il *Carro* è attaccata una nuova versione del *viale elettromagnetico*; si tratta di un'asta di legno, abbracciata da piccole staffe di ottone, con due serie di bobine poste lateralmente e in numero uguale al numero delle staffe di ottone. Questo *Viale*, insieme alle traversine del binario, parte integrante del brevetto, genera la trazione elettromagnetica che permette il movimento del carro.

Nella figura 15 viene mostrata la posizione reciproca carro-binario ad un certo istante. I poli della tensione esterna sono collegati alternativamente alle traversine del binario le cui parti essenziali sono: una molla e due bobine. La molla porta il livello della tensione a cui è collegata mentre sulle bobine si creano dei poli magnetici dovuti al passaggio della corrente. Quando le staffe di ottone del *viale*, posto sotto al *Carro*, vengono a contatto con le molle del binario, attraverso le bobine del *viale* stesso si instaura una corrente che genera dei poli magnetici come indicato in figura. In questa configurazione i poli magnetici che si formano sia sul binario sia sul *viale* sono tali per cui l'attrazione magnetica fra di essi fa avanzare il *Carro*. Con l'avanzamento del *Carro* cambiano i contatti fra il *viale* e le traversine ma l'effetto della trazione continua, come si può osservare nella figura 16.

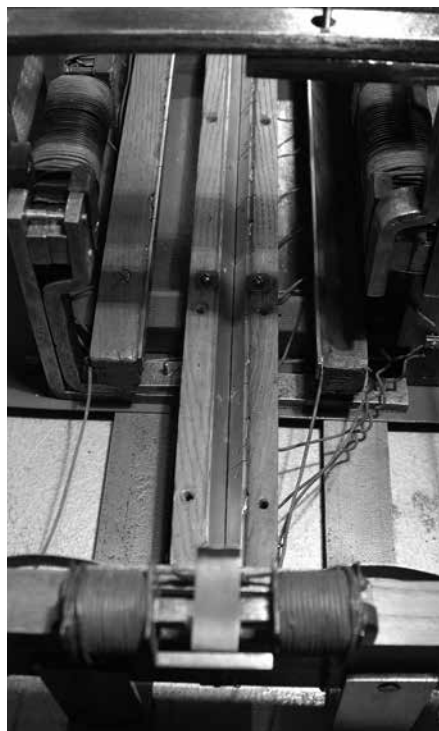


Figura 11. Macchina traslatoria: le 4 rotaie.

4. Carro viale per tranvia

Al punto 12 della richiesta di brevetto per il Carro viale elettromagnetico Pacinotti scrive:

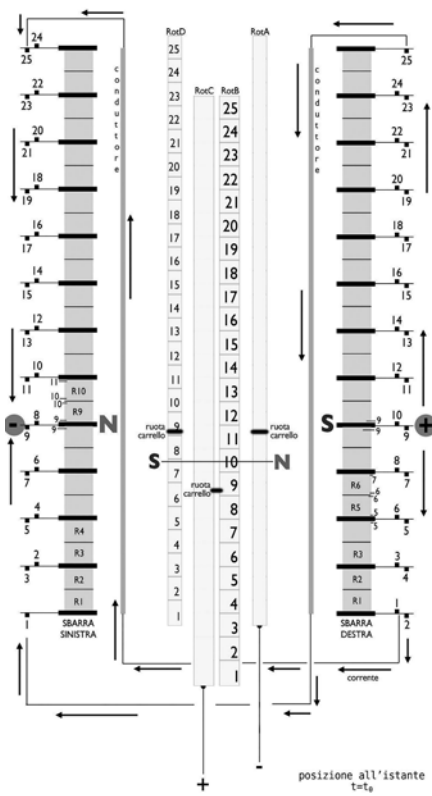


Figura 12. Macchina traslatoria: schematizzazione con posizione del carrello ad un certo istante t_0 .

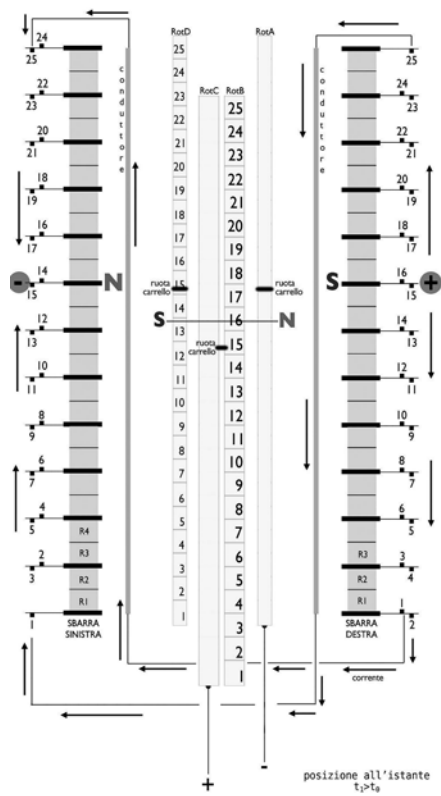


Figura 13. Macchina traslatoria: schematizzazione con posizione del carrello ad un istante successivo a t_0 .

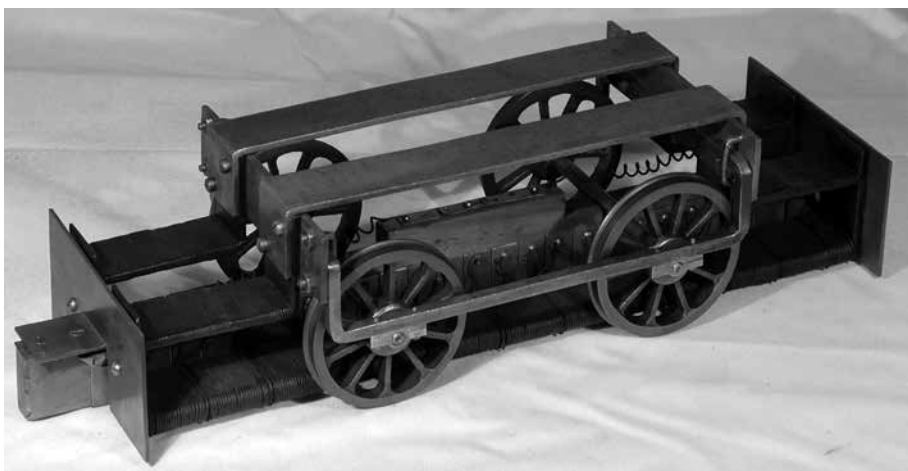


Figura 14. Carro viale elettromagnetico.

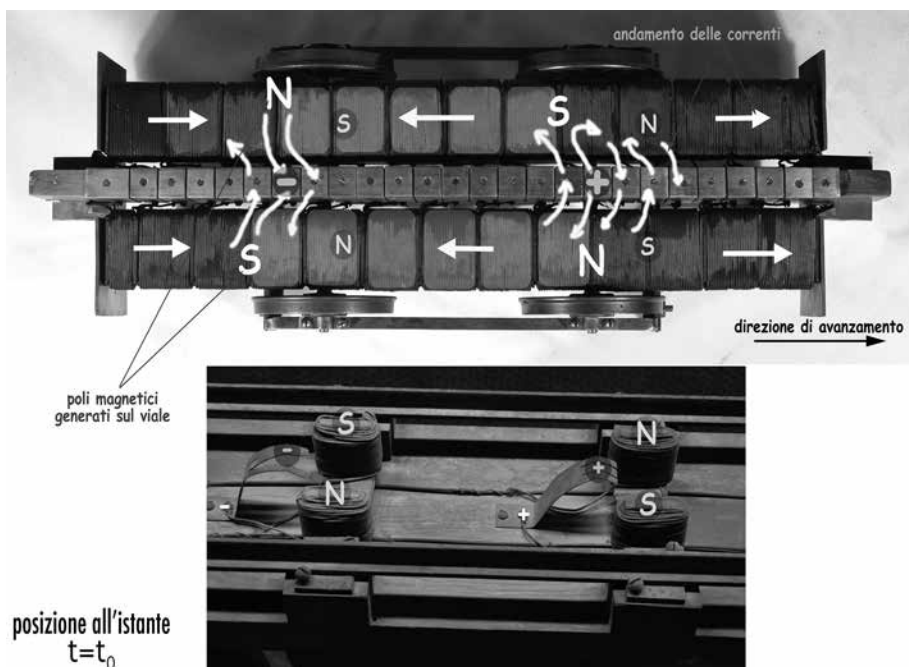


Figura 15. Carro viale elettromagnetico: posizione del Carro sul binario ad un certio istante t_0 .

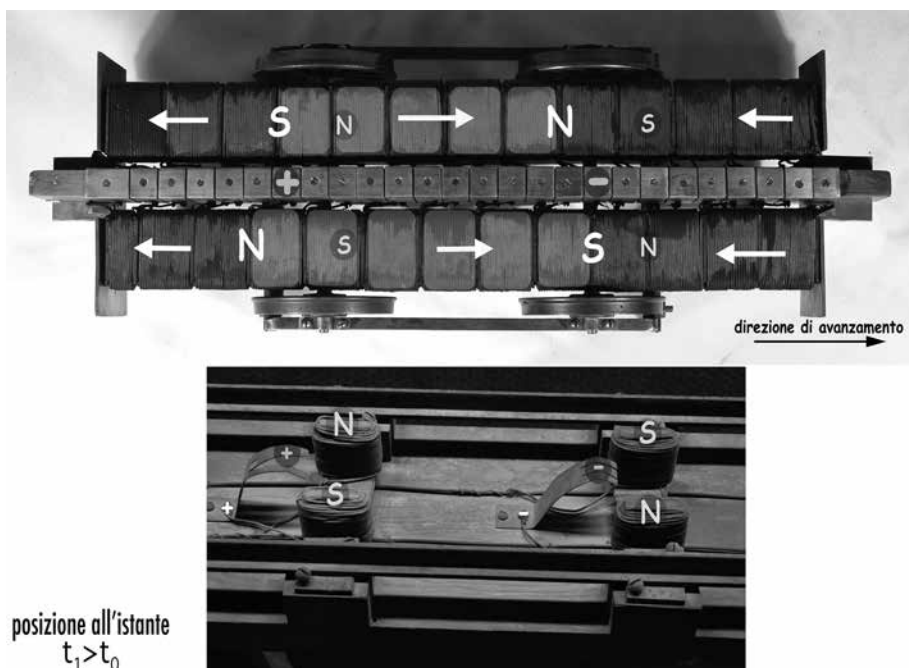


Figura 16. Carro viale elettromagnetico: posizione del Carro sul binario ad un istante successivo a t_0 .



Figura 17. Carro viale per tranvia.

Attualmente ho in costruzione un nuovo modello di carruccio Viale elettro-magnetico, e nel farne i disegni mi sono ingegnato di adottare disposizioni praticabili nella costruzione di tramway. Così per esempio: le molle che in un piano stradale effettive sarebbero gracili ed imbarazzanti, vengono nel nuovo modello sostituite con piccole piastre metalliche rigide; ed invece alcuni poco molleggianti vengono fatti i tasti del commutatore. Di più, il regolo del commutatore sarà portato da viti mobili che spero avranno modo di sollevarlo od abbassarlo, ed anche di farlo avanzare o retrocedere, per disporre il Viale alla stazione o al movimento, allo avanzamento o alla retrocessione del carro²⁰.

Negli appunti dello scienziato si legge:

A dì 3 Settembre 1900. Secondo le idee accennate nella descrizione di complemento Carro viale elettromagnetico è stato costruito un nuovo modello la cui piccola ferrovia invece di molle ha piastre [...] ed il cui carro è sistemato a vettura con sedili e tettoia ecc. Il commutatore ha per tasti rotelle portate da molle²¹.

Pacinotti propose questo modello di carrozza (86 cm di lunghezza per un peso di 20 kg_p), insieme al suo binario, per la realizzazione di una tranvia, insieme ad altri due modelli di carri viale ferroviari in varie richieste di brevetto presentate in Germania, Italia e Inghilterra²².

²⁰ Antonio Pacinotti. *La vita e l'opera*, op. cit., p. 113.

²¹ Fondo Pacinotti - Archivio, Sezione II, quaderno P, p. 113.

²² Pacinotti ottenne il brevetto tedesco il 2 Aprile 1901, quello italiano il 4 Settembre 1902 e quello inglese il 23 Aprile 1903. Le richieste di brevetto scritte in tedesco e in inglese erano la trascrizione del testo della richiesta di brevetto italiana.

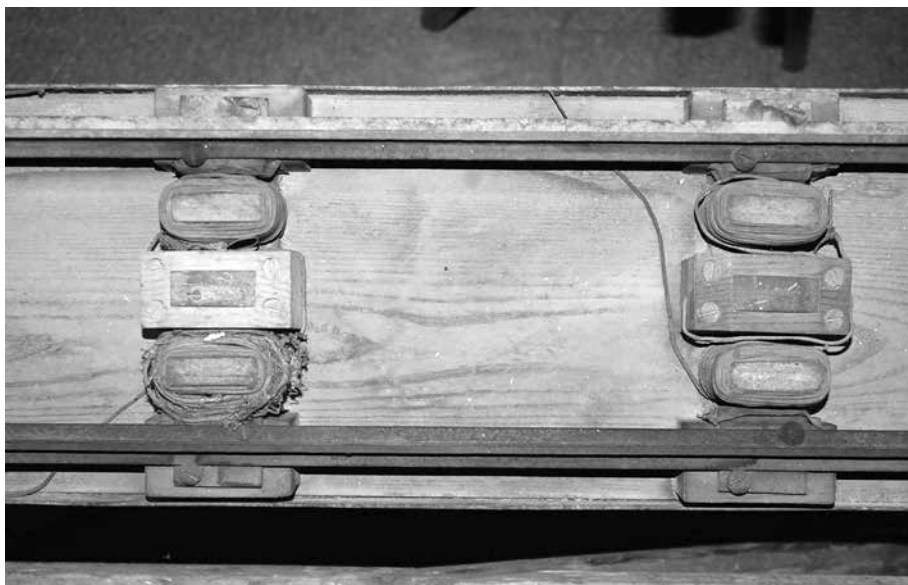


Figura 18. Carro vialo per tranvia: il binario.



Figura 19. Carro vialo per tranvia: la parte sottostante con il vialo.

Il funzionamento²³ è analogo a quello del *Carro vialo*, con qualche perfezionamento nella costruzione del *vialo elettromagnetico*. Anche in questo caso sono le traversine del binario a fare la funzione svolta dal proiettile nel *Vialo elettromagnetico*. Nella figure 18 e 19 sono mostrati rispettivamente il binario e la parte sottostante del *Carro* con il *vialo*.

Gli avvolgimenti del *Viale* della *Tranvia* realizzano rocchetti più corti di quelli del *Carro vialo*, in modo tale che l'asse dei poli magnetici del *Viale* sia quasi parallelo alle traversine: in questo modo diminuisce lo sbandamento laterale della *Tranvia*, e quindi l'attrito fra il binario e le ruote.

²³ Si veda nota n. 6.

Fisici a Roma, fisici a Pisa

Giovanni Battimelli*

Le brevi note che seguono non hanno alcuna pretesa di offrire un quadro esaustivo delle relazioni intercorse nella storia tra gli ambienti della ricerca in fisica a Roma e a Pisa. Molto più modestamente, dirigo l'attenzione su alcuni personaggi importanti di questa intersezione, focalizzando il discorso su due momenti particolarmente significativi: la costruzione dell'humus culturale in cui si afferma la nuova fisica in Italia nella prima parte del secolo scorso, e il periodo del secondo dopoguerra, in cui la ricerca in fisica nel nostro paese acquista caratteri radicalmente nuovi rispetto al passato, perdendo la dimensione strettamente localistica che la aveva caratterizzata fino ad allora.

1. Fisica matematica, fisica teorica: da Volterra a Fermi

Pensando alla associazione tra fisica, Roma e Pisa, il primo nome che viene alla mente è abbastanza naturalmente quello di Enrico Fermi. È una sorta di riflesso condizionato, dovuto alla statura del personaggio e alla vasta letteratura di cui si dispone al riguardo, ma ad una seconda riflessione l'associazione si rivela, per quanto obbligatoria, tutto sommato piuttosto superficiale. È ben vero che Fermi studia e si laurea a Pisa, ma è altresì noto che lì finiscono i suoi rapporti con la città e il suo ambiente scientifico; e la leggenda costruita intorno alla sua figura ha tramandato l'idea che il periodo pisano non sia stato per Fermi un momento particolarmente significativo, la sua formazione essendo stata piuttosto quella di un autodidatta che già da studente si confrontava con i problemi avanzati della ricerca in fisica con un livello di competenza superiore a quello dei suoi professori. C'è certamente, in questa immagine codificata dalla tradizione, qualche punta di esagerazione; e sarebbe interessante indagare più a fondo se e quanto, nella formazione delle capacità di Fermi come fisico sperimentale, non abbia comunque pesato l'influenza di un docente come Puccianti, per quanto quest'ultimo non fosse più, all'epoca della presenza di Fermi alla Normale, particolarmente attivo nella ricerca. Co-

* Dipartimento di Fisica, Università La Sapienza, Roma.

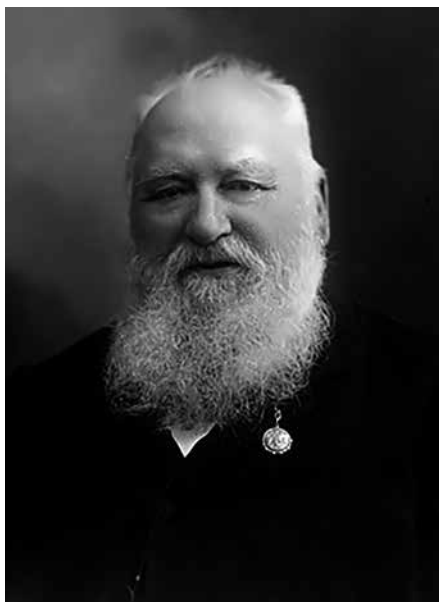


Figura 1. Pietro Blaserna (1836-1918).



Figura 2. Vito Volterra (1860-1940).

munque, partire da Fermi può servire ad introdurre un argomento che ha un certo interesse generale per quanto riguarda l'affermazione in Italia della nuova fisica, e più specificamente della fisica teorica, e che vede un legame stretto tra Pisa e Roma.

Un elemento forte della versione canonica della vicenda scientifica di Fermi è quello secondo cui l'istituzione della prima cattedra di fisica teorica, a Roma nel 1926, sia avvenuta nonostante la forte ostilità ad un simile passo, largamente diffusa nella comunità dei fisici e dei fisici matematici italiani. Anche qui, c'è del vero ad una lettura di prima approssimazione; ma resta allora il problema di capire da dove venga e come si sia consolidato a Roma il terreno culturale e accademico che ha consentito l'operazione, e la relativa apertura verso le nuove frontiere della fisica. Nella vulgata sulla storia di via Panisperna, questo credito viene integralmente assegnato al ruolo di Orso Mario Corbino. Poco si è sottolineato il fatto che Corbino agisce all'interno di un ambiente accademico in cui già molto si è mosso in quella direzione, e in buona misura grazie all'azione di coloro che sono stati i suoi mentori a Roma, il direttore dell'istituto di fisica Pietro Blaserna (figura 1) e, forse in misura ancora maggiore, un fisico formatosi a Pisa, Vito Volterra (figura 2) [1].

Naturalmente, Volterra è usualmente (e giustamente) considerato un matematico. È utile ricordare però che nasce scientificamente come fisico; si laurea in fisica alla Normale di Pisa nel 1882, e già l'anno successivo è

a Pisa sulla cattedra di meccanica razionale, dove resterà fino al 1892. I suoi primi lavori da giovane ricercatore sono lavori di teoria del potenziale, contributi a specifiche questioni di elettromagnetismo, fluidodinamica e ottica: sono cioè precisamente questioni interne a quell'ambito di ricerca che si chiama già *Theoretische Physik* negli istituti di ricerca tedeschi. È la fisica teorica del 1880, quando sono ancora di là da venire i quanti e la relatività. Quando Volterra nel 1900 arriva all'università di Roma, dove non c'è un istituto di matematica e dove i matematici sono regolarmente ospitati presso la Scuola di ingegneria di San Pietro in Vincoli, elegge la sua residenza accademica all'istituto di fisica di via Panisperna, e lì insegna fisica matematica e meccanica celeste. Volterra è con Battelli e Felici uno dei fondatori della Società italiana di fisica nel 1897, e soprattutto è all'interno della Sif l'animatore del «Nuovo Cimento», di cui è direttore dal 1901; grazie alla sua opera la rivista si apre e acquista un certo spessore culturale e scientifico, non solo e non tanto per la qualità dei contributi che i fisici italiani vi pubblicano, quanto perché diventa lo strumento attraverso cui, grazie alle pagine della rassegna curata da persone che Volterra seleziona opportunamente per svolgere questo compito culturale, riporta all'interno della comunità dei fisici italiani le novità conoscitive che stanno emergendo all'estero [2].

Queste persone sono prima Alfonso Sella e poi, quando Sella muore nel 1908, Orso Mario Corbino, che su richiesta di Blaserna e col deciso sostegno di Volterra viene letteralmente strappato dal suo posto di professore a Messina e comandato a Roma sulla cattedra di fisica complementare che era stata istituita nel 1900 per Sella. In particolare Blaserna e Volterra apprezzano di Corbino, oltre alle dimostrate capacità come fisico sperimentale e uomo di laboratorio, l'apertura mentale e la sensibilità alle problematiche di carattere teorico poste dalle novità emergenti nella fisica, apertura e sensibilità che appaiono chiarissime nel discorso inaugurale che Corbino tiene a Roma in apertura dell'anno accademico nel novembre 1909. Chiedersi dove e grazie a quali influenze Corbino abbia sviluppato la sua apertura mentale e la sua peculiare propensione agli aspetti teorici della disciplina consente di individuare un'ulteriore apertura, labile ma significativa, in direzione di Pisa. E' improbabile che ad orientare gli interessi di Corbino verso la dimensione più teorica della fisica sia stato il suo maestro a Palermo, Damiano Macaluso; ma è utile sottolineare che Corbino cominciò gli studi universitari nel 1892 non a Palermo, ma a Catania, dove era stato attirato verso la fisica dalla presenza di Adolfo Bartoli; e andò a Palermo solo l'anno successivo, quando Bartoli lasciò Catania per accettare la cattedra all'università di Pavia. Bartoli si era formato come fisico a Pisa, dove si era laureato nel 1874, e dove aveva acquisito una padronanza della disciplina che gli aveva permesso di vincere i concorsi a cattedra sia in Fisica sperimentale che in Fisica matematica. Non è quin-

di eccessivo ipotizzare che attraverso Bartoli la peculiare commistione di approccio sperimentale e riflessione teorica che sembra aver caratterizzato l'ambiente pisano dell'epoca, come si è già visto nel caso di Volterra, si sia trasferita al giovane Corbino indirizzandone l'orientamento e creando le premesse per la sua attività successiva a Roma a sostegno dello sviluppo della fisica teorica propriamente detta. E già che abbiamo aperto una finestra secondaria (da una Roma ancora futuribile verso una Pisa già trascorsa) è anche il caso di ricordare che, prima ancora dei corsi di Bartoli all'università, a spingere Corbino verso la fisica furono, secondo la sua stessa ammissione, le lezioni di Enrico Stracciati all'Istituto Tecnico di Catania, che Corbino, studente del Liceo, frequentava "furtivamente". Stracciati era stato studente di Bartoli all'Istituto tecnico di Arezzo, poi compagno di studi di Volterra alla Normale di Pisa dove si era laureato a pieni voti nel 1882; e aveva poi ritrovato a Catania, quattro anni dopo, il suo maestro Bartoli, con cui aveva avviato una efficace collaborazione scientifica. Molto più tardi, nel 1928, Corbino, direttore dell'Istituto di via Panisperna, dovendo trovare un sostituto per il posto di assistente di Franco Rasetti in congedo, chiederà e otterrà che l'incarico sia affidato ad Enrico Stracciati, anche lui da tempo spostatosi a Roma e appena andato in pensione dal suo posto di insegnante.

Perché si fosse sentita l'esigenza di istituire una seconda cattedra di fisica è molto chiaramente detto da Michele Cantone nel necrologio scritto alla morte di Blaserna; e non è certo casuale che vi si parli esplicitamente di "fisica teorica", anche se tale non è ufficialmente il nome della nuova cattedra:

... parve al sagace Direttore che fosse da colmare ancora una lacuna insita allo stesso ordinamento ufficiale degli studi fisici in Italia, mancando fra tanti corsi essenzialmente matematici, una cattedra di fisica teorica destinata a svolgere i concetti direttivi della sintesi scientifica con quella estensione che non può essere consentita in un semplice corso di fisica sperimentale destinato agli studenti di medicina o d'ingegneria; e coll'autorità del suo nome riuscì ad ottenere per la Facoltà scientifica di Roma l'istituzione di un insegnamento di fisica complementare, tenuto prima dal Sella, e poi dal Corbino che ha continuato le belle tradizioni del suo predecessore [3].

Negli anni successivi alla chiamata di Corbino a Roma la resistenza sistematicamente opposta dalla Facoltà di Scienze romana ai ripetuti tentativi di farlo rientrare a Messina è un buon indice della stima e della fiducia riposti dall'ambiente scientifico della capitale verso il fisico siciliano. Preside della Facoltà è Volterra, che è anche presidente della Sif tra il 1906 e il 1908; ed è interessante constatare che proprio in questo periodo la sezione romana della società mette in cantiere una serie di eccellenti conferenze pubbliche di fisica in cui si parla di radioattività, quanti, teoria della relatività.

La vicenda della fisica complementare a Roma è utile a ricordare che, quando si commenta l'istituzione di una nuova cattedra, è bene distinguere accuratamente, e considerare separatamente, tre diversi elementi: la denominazione ufficiale del nuovo insegnamento, i contenuti effettivi che sotto tale denominazione vengono impartiti, e il progetto culturale che sottende la sua creazione. Nel caso specifico appare chiara la disponibilità all'apertura mostrata da Volterra, disponibilità che può tradurre in atti concreti grazie alla sua qualità di preside della facoltà.

Su cosa sia all'epoca la fisica matematica, e sui suoi rapporti con la fisica, Volterra ha le idee estremamente chiare. C'è al riguardo un passaggio illuminante del testo da lui scritto in commemorazione di *Poincaré, alla sua morte* nel 1912. Parlando della sua opera scientifica e abbandonando ad un certo punto l'esposizione dei contributi matematici in senso stretto, Volterra passa all'esame dell'opera di *Poincaré* come fisico matematico:

Vi sono due specie di fisica matematica che per antica consuetudine si considerano costituenti un sol ramo di scienza e s'insegnano di solito nei medesimi corsi, sebbene esse siano intrinsecamente diverse...

Un'analisi sottile e delicata è penetrata in vari rami della fisica cercando risolvere in maniera completamente rigorosa alcuni problemi fondamentali e sforzandosi di stabilire proposizioni (come i teoremi di esistenza) le quali dal punto di vista matematico e logico formano la base delle varie teorie. Quest'analisi può dirsi costituire la fisica matematica della prima specie.

Io credo di non ingannarmi affermando che molti fisici considerano questa flora matematica come piante parassite del grande albero della filosofia naturale... [4].

Volterra spiega peraltro come questo disprezzo sia ingiustificato, perché anche da questi problemi tipicamente matematici che emergono nello studio delle proprietà delle equazioni che descrivono i fenomeni nascono spesso risultati intrinsecamente interessanti. E aggiunge:

Ma vi è un'altra fisica matematica intimamente e inseparabilmente legata alla considerazione intrinseca dei fenomeni naturali, tanto che non si potrebbe concepire alcun progresso nel loro studio senza l'aiuto portato dall'analisi matematica che ne costituisce l'essenza. È possibile pensare alla teoria elettromagnetica della luce, alle esperienze di Hertz, al telegrafo senza fili, senza ricordare che fu l'analisi matematica di Maxwell da cui tutto questo insieme di dottrine, di ricerche e di invenzioni è scaturito? [4].

È del tutto evidente che ciò di cui Volterra sta qui parlando, il secondo tipo di fisica matematica, è esattamente quella che altrove già si chiama e viene ufficialmente etichettata come fisica teorica. E nel seguito del discorso, venendo ai contributi di *Poincaré* a questa fisica matematica,

Volterra mostra di controllare e di essere a suo agio su questo terreno, parlando di teoria della relatività, dell'applicazione fatta da Poincaré della teoria dei gruppi per la derivazione della forma definitiva delle trasformazioni di Lorentz, dei suoi contributi alla fisica dei quanti.

Saranno Volterra e Levi-Civita i due commissari di minoranza che voteranno per Fermi nel concorso per la cattedra di Fisica matematica vinto da Giovanni Giorgi nel 1925. E certamente c'è da parte loro deciso appoggio al giudizio della commissione che alla fine dell'anno successivo insedia Fermi sulla prima cattedra italiana di Fisica teorica. E, come ultimo tassello, è ancora utile ricordare il ruolo svolto da Volterra nella sua qualità di referente per l'Italia dell'Education Board della Rockefeller Foundation, che indica chi sono i giovani fisici promettenti da mandare all'estero grazie al programma di borse di studio finanziato dalla fondazione. I cinque fisici italiani che usufruiscono delle borse Rockefeller per studi di perfezionamento in vari istituti europei e americani sono Enrico Fermi, Enrico Persico, Aldo Pontremoli (cioè i tre vincitori del primo concorso di fisica teorica tenuto in Italia), Franco Rasetti ed Emilio Segrè.

Alla luce delle considerazioni precedenti – e della documentazione che le sostiene – appare dunque destituito di fondamento il giudizio espresso (molto tempo fa, va detto) da uno studioso peraltro acuto della storia della scienza italiana come Giorgio Israel:

È ben noto che molte furono del resto le opposizioni alla istituzione di una cattedra di fisica teorica (per lo stesso Fermi) presso l'Università di Roma, e fra queste quella di Volterra [5].

Come emerge chiaramente dai verbali delle riunioni della Facoltà di Scienze, se opposizioni ci furono queste si limitarono al parere contrario del professore di fisica superiore, Antonino Lo Surdo. Sembra piuttosto di poter sostenere a buona ragione che l'originaria formazione pisana come fisico matematico abbia largamente lasciato il segno nella successiva azione di Volterra per preparare adeguatamente il terreno allo sviluppo della nuova fisica teorica.

2. Tra Pisa e Roma negli “anni della ricostruzione”

Nel 1951 si laurea a Pisa con una tesi di fisica teorica Raoul Gatto. La sua è una laurea ‘anomala’ che reca una doppia segnatura, pisana e romana. Formalmente, il suo relatore era Tullio Derenzini, che a Pisa ha tenuto per incarico l'insegnamento di fisica teorica dal 1938, quando Racah fu costretto dalle leggi razziali ad abbandonare la cattedra, vinta l'anno precedente. Di fatto, il suggerimento e la guida per il lavoro di tesi

(*“Ricerca di una giustificazione teorica per i modelli a shell nei nuclei”*) venne da Bruno Ferretti, che insegnava fisica teorica a Roma, e che subito dopo la laurea chiamò Gatto a Roma come assistente. In seguito Gatto occupò la cattedra di fisica teorica a Roma tra il 1971 e il 1975, ma la sua influenza più profonda sull’ambiente romano va fatta risalire agli anni precedenti, prima quando fu in forze al gruppo teorico di Frascati e soprattutto durante il periodo passato a Firenze, quando, nella prima metà degli anni Sessanta, un buon numero di giovani teorici laureatisi a Roma passarono per Firenze a perfezionarsi in quella che alcuni considerano l’unica vera scuola di fisica teorica esistente all’epoca in Italia (figura 3).



Figura 3. Raoul Gatto (1930-2017).

Quando Ferretti da Roma stimolò il lavoro di laurea di Gatto era ormai in cattedra dal 1947, succeduto a Roma a Gian Carlo Wick che aveva lasciato l’Italia per gli Stati Uniti. Già negli anni precedenti, comunque, si erano laureati con lui altri giovani, e non solo in fisica teorica. Il primo, nel 1940, fu Marcello Conversi, con una tesi sui raggi cosmici. Pochi anni dopo, dapprima con Oreste Piccioni (un altro la cui carriera di studi si svolge tra Pisa e Roma: iscritto a Pisa, normalista, nel 1934, Piccioni passò l’anno successivo a Roma e si laureò con Fermi nel luglio 1938) e quindi, dopo la fine della guerra, con la collaborazione aggiunta di Ettore Pancini, Conversi fu uno dei protagonisti di una serie di esperimenti sul comportamento dei mesotroni a fine percorso (in genere collettivamente riassunti sotto la dicitura “esperimento CPP”) che segnarono un punto di svolta nella fisica delle particelle elementari. Al suo arrivo a Pisa nel 1950 era quindi già una figura di spicco nel panorama internazionale della fisica sperimentale. A Pisa Conversi rimase quasi dieci anni, prima di ritornare a Roma sulla cattedra di fisica superiore nel 1959; un periodo cruciale per le vicende della fisica italiana, in cui Conversi fu protagonista di primo piano sotto diversi aspetti. Il risultato principale, sul piano della produttività scientifica, fu la ideazione e realizzazione, in collaborazione con Adriano Gozzini, della prima camera odoscopica, prototipo di tutta una nuova generazione di rivelatori

di particelle [6]. Il primo test del nuovo apparato avvenne con successo a marzo del 1955; un successo largamente dovuto, come lo stesso Conversi sottolinea nella sua ricostruzione, all'incontro costruttivo delle competenze complementari maturate da Gozzini nel piccolo laboratorio di microonde pisano e da Conversi nei precedenti lavori sull'elettronica veloce per lo studio di raggi cosmici. È anche interessante ricordare, per restare nell'ambito circoscritto delle interazioni tra Pisa e Roma, che il perfezionamento dell'apparato fu realizzato ricorrendo, oltre che all'apporto dei due studenti Sergio Focardi e Giampaolo Murtas, alla collaborazione di Carlo Franzinetti, che all'epoca era a Roma a lavorare nel gruppo diretto da Amaldi per la ricerca in raggi cosmici con emulsioni nucleari, e che a Roma aveva fatto esperienza in problemi di rivelatori a scarica nei gas [7].

Il "nuovo tipo di rivelatore di eventi nucleari" fu il punto forte dei contributi presentati dai fisici pisani alla Conferenza internazionale sulle particelle elementari che si tenne a Pisa dal 12 al 18 giugno del 1955, in coincidenza con il 41° Congresso nazionale della Società italiana di fisica, nella cui organizzazione Conversi svolse un ruolo centrale. Nella relazione che ne fece per un giornale locale menzionava un fatto la cui importanza sfuggiva certamente al lettore generico, ma era ben presente ai ricercatori italiani: cioè che i contributi più importanti per la chiarificazione del quadro delle particelle elementari erano venuti «da un gruppo di studiosi che, disponendo della macchina acceleratrice di Berkeley, capace di produrre artificialmente le nuove particelle instabili, hanno potuto effettuare misure in condizioni particolarmente favorevoli rispetto agli altri ricercatori costretti a sperimentare sulle nuove particelle così come esse si presentano, purtroppo assai sporadicamente, nelle interazioni prodotte dalla radiazione cosmica». Un chiaro segnale in tal senso era appena venuto da Roma, dove il gruppo emulsioni in cui lavorava tra gli altri Franzinetti aveva appena trovato una traccia interpretabile come produzione a annichilazione di un antiprotone, senza poter addurre però evidenza conclusiva al riguardo; di lì a poco, l'antiprotone sarebbe stato prodotto in copia e ufficialmente scoperto per l'appunto a Berkeley [8]. E proprio in quei mesi stavano raggiungendo i primi risultati concreti i tentativi fatti dai fisici europei (con la creazione del CERN) e italiani (con l'avvio della costruzione del laboratorio nazionale dell'INFN) per recuperare il distacco sui grandi laboratori americani e i loro acceleratori (figura 4).

In Italia, si era definitivamente compiuta la scelta del sito in cui far sorgere il laboratorio; la designazione di Frascati lasciava aperto così il problema della destinazione dei fondi che l'Università di Pisa e i comuni e le provincie di Pisa, Lucca e Livorno avevano stanziato nel caso che l'area pisana fosse stata prescelta come sede. La storia è nota: la disponibilità di somme non indifferenti per gli standard dell'epoca, la ricerca di una loro destinazione alternativa e i suggerimenti autorevoli avanzati da Fermi durante la scuola estiva di Varenna del 1954 diedero l'avvio all'impresa della

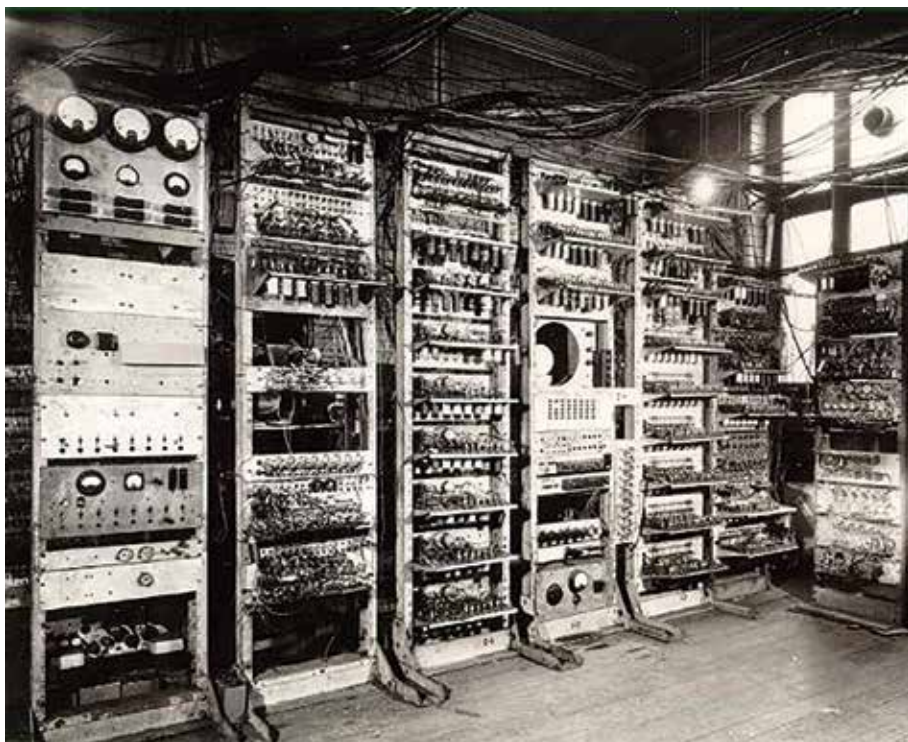


Figura 4. CEP.

Calcolatrice Elettronica Pisana (CEP), uno dei momenti principali delle origini dell'elettronica in Italia. Al termine del corso di Varenna, Fermi scriveva l'11 agosto 1954 al rettore dell'Università di Pisa, Enrico Avanzi:

In occasione del mio soggiorno alla Scuola di Varenna i professori Conversi e Salvini mi hanno accennato la possibilità che l'Università di Pisa possa disporre di una somma veramente ingente destinata a favorire il progresso e lo sviluppo della ricerca in Italia. Interrogato circa le varie possibilità di impiego di tale somma, quella di costruire in Pisa una macchina calcolatrice elettronica mi è sembrata, fra le altre, di gran lunga la migliore. Essa costituirebbe un mezzo di ricerca di cui si avvantaggerebbero in modo, oggi quasi inestimabile, tutte le scienze e tutti gli indirizzi di ricerca. Mi consta che l'Istituto per le Applicazioni del Calcolo, diretto dal professor Picone, ha in corso di acquisto una macchina del genere. Non mi sembra però che questa circostanza diminuisca il bisogno che di tale macchina verrà ad avere un centro di studi come l'Università di Pisa. L'esperienza dimostra che la possibilità di eseguire con estrema speditezza e precisione calcoli elaborati crea ben presto una sì grande domanda di tali servizi che una macchina sola viene presto saturata. A questo si aggiungono i vantaggi che ne verrebbero agli studenti e agli studiosi che avrebbero modo di conoscere e di addestrarsi nell'uso di questi nuovi mezzi di calcolo.

Avanzi rispondeva a Enrico Fermi il 24 agosto:

Sono lieto che i colleghi Conversi e Salvini l'abbiano intrattenuta sulla possibilità di dotare l'Università di Pisa attraverso l'Istituto di Fisica di un apparecchio scientifico di importanza nazionale.

Le sono molto grato della gentile indicazione che sarà tenuta nel massimo conto. Spero che i colleghi Le avranno recato il saluto della Università – la Sua Università – e il mio. Con l'invito di sostare a Pisa se il tempo Glielo potesse consentire, e ciò anche per confortare e avvalorare l'opera dei due giovani e valorosi colleghi che stanno prodigandosi per preparare il congresso nazionale di Fisica del prossimo anno, nell'Istituto ormai risorto dalle rovine della guerra, ove Ella iniziò la Sua vita scientifica, e ove ella è al più tardi atteso – primo tra i primi – quando il congresso si attuerà.

L'invito e il desiderio di Avanzi di avere Fermi nuovamente a Pisa in occasione del congresso del 1955 non poté essere soddisfatto; Fermi morì alla fine del 1954 per il rapido deteriorarsi della sua situazione di salute, di cui le prime avvisaglie si erano avute nell'estate trascorsa in Italia dopo la scuola di Varenna. Ma il suo suggerimento («l'ultimo regalo fatto da Fermi all'Italia», come è stato definito) fu recepito appieno. Ai primi di ottobre Conversi inviava una lettera circolare ai colleghi fisici italiani:

Dopo la scelta di Roma come sede dell'elettrosincrotrone da 1 GeV, io mi preoccupai di studiare come l'offerta pisana potesse essere devoluta a favore di un'altra iniziativa che fosse d'interesse notevole per una larga schiera di studiosi, e, in particolare, per i fisici italiani. Nel luglio scorso, approfittando di trovare riuniti a Varenna numerosi colleghi e fisici stranieri di chiara fama, mi valse del loro consiglio. In particolare fu suggerito dal professor Fermi, di utilizzare la somma ingente offerta dagli enti pisani, per costruire una calcolatrice elettronica del tipo della Illiac, attualmente in funzione alla University of Illinois (Urbana – USA). L'opinione che quella suggerita da Fermi fosse la migliore utilizzazione di una somma dell'ordine di quella stanziata dagli enti pisani, è stata condivisa, poi, da tutti i fisici italiani e stranieri con cui io ho avuto occasione, privatamente, di parlare. E ciò pur tenendo conto del fatto che l'Istituto per le Applicazioni del Calcolo del CNR, diretto dal professor Mauro Picone, disporrà in futuro di una calcolatrice elettronica. Nella lettera che, su richiesta del professor Bernardini e mia, il professor Fermi ha inviato al rettore dell'Università di Pisa per caldeggiare l'impiego della somma disponibile a favore di una calcolatrice elettronica, egli precisa come la «possibilità di eseguire con estrema prontezza e precisione calcoli elaborati, crei ben presto una sì grande domanda di tali servizi che una macchina sola viene ben presto saturata» [9].

Conversi si adoperò, in accordo col rettore Avanzi, per l'implementazione del progetto. Nel 1956 fu istituito presso l'Università di Pisa il Centro di Studi sulle Calcolatrici elettroniche (CSCE), del cui comitato direttivo faceva parte Conversi insieme ad Alessandro Faedo e a Ugo Tiberio.

Il notevole interesse industriale del progetto CEP venne presto intuito da Adriano Olivetti, il quale affidò le iniziative in campo elettronico al figlio Roberto. Questi vide nel Centro pisano un'occasione unica per specializzare ingegneri e tecnici, in vista di un ingresso nella competizione industriale per il calcolo elettronico: un'iniziativa assai lungimirante, se si considera che in quegli anni le calcolatrici meccaniche e le macchine da scrivere Olivetti conoscevano un successo su scala mondiale, ottenendo importanti riconoscimenti sia per la loro qualità che per il loro design. Attraverso una convenzione stipulata dall'Università di Pisa, la Società Olivetti assicurava successivamente al Centro un ulteriore finanziamento e la collaborazione di personale specializzato, distaccato presso il Centro medesimo. Tra le persone messe a disposizione dall'Olivetti figurava l'ingegnere italo-cinese Mario Tchou, dotato di vaste competenze nel campo dell'elettronica, ma soprattutto di grandi capacità manageriali. Egli diede un qualificato contributo al progetto universitario, ma dal 1955 diresse anche il Laboratorio di ricerche elettroniche istituito dall'Olivetti proprio a Pisa.

Per collaborare alla realizzazione della CEP Conversi chiamò a Pisa alcuni giovani ricercatori da Roma: Alfonso Caracciolo di Forino, Sergio Sibani e Elio Fabri. Fabri si era laureato nel 1951 in fisica teorica con Ferretti, e al momento del suo trasferimento a Pisa aveva già al suo attivo dei significativi lavori sulle particelle strane, per i quali aveva avuto lo spunto dagli incontri con Bruno Touschek. Fabri lamentava però il clima scarsamente cooperativo nell'ambiente dei fisici teorici romani, e il fatto che i giovani fossero piuttosto abbandonati a se stessi:

Non mi ricordo ci fossero attività seminariali e neppure un'attività di orientamento; c'era un po' lo spirito che uno dovesse arrangiarsi da sé e se era bravo lo doveva dimostrare così... Secondo me, a Roma mancava nettamente un lavoro d'istruzione dei giovani ricercatori su quali fossero i problemi importanti. Questo mi pare che fosse un limite dell'attività dell'Istituto... Fra i 'capi' che c'erano allora a Roma, quello che più si dava da fare per tenere i giovani in attività ed informati era Edoardo Amaldi, in confronto con altri, come Touschek e Ferretti, che non avevano questa capacità [10].

La CEP fu la prima calcolatrice elettronica digitale di carattere scientifico interamente progettata e costruita in Italia. Inaugurata nel novembre 1961, suscitò interesse in tutto il mondo, venne recensita dalla stampa specializzata e lavorò per dieci anni, ma soprattutto diede i suoi frutti sotto forma di studenti e studiosi, trasformando Pisa in uno dei centri di eccellenza dell'informatica italiana: la sua progettazione e la sua costruzione furono, infatti, fonte di studi ed esperienze che portarono benefici maggiori di quelli ottenuti dall'impiego stesso della macchina. Nel luglio 1962, in seguito a una convenzione tra Università di Pisa e CNR, il CSCE

venne trasferito alle dipendenze di quest'ultimo: era questo il primo passo di una vicenda istituzionale che lo avrebbe portato a diventare l'attuale Istituto per l'Elaborazione dell'Informazione.

Della destinazione da dare ai fondi disponibili in Toscana Fermi aveva discusso a Varenna con Conversi e Salvini, che era professore a Pisa dal 1952. Salvini si era laureato a Milano nel 1942, e nei primi anni del dopoguerra si era occupato di raggi cosmici e al tempo stesso aveva fatto parte del piccolo gruppo di fisici e ingegneri raccolto intorno a Giuseppe Bolla che aveva costituito il Centro Informazioni Studi Esperienze (CISE) con l'intenzione di sviluppare in Italia ricerche volte all'utilizzo a fini civili dell'energia nucleare. Aveva abbandonato però il CISE alla fine del decennio, e un soggiorno prolungato negli Stati Uniti, dove aveva cominciato ad interessarsi di macchine acceleratrici, ne aveva definitivamente orientato gli interessi verso la fisica delle particelle elementari. Vinto il concorso per fisica nel 1951, dopo un breve soggiorno a Cagliari era stato chiamato a Pisa; verso la fine del 1953, quando l'INFN aveva definitivamente approvato l'idea della realizzazione di un laboratorio nazionale dotato di una macchina acceleratrice competitiva, Salvini era stato scelto come la persona che avrebbe dovuto dirigere il progetto.

L'INFN decise di affidare un'impresa come quella e lo studio per essa a una persona giovane e un po' spericolata. Io avevo allora 33 anni, lo proposero a me, mi scelsero, accettai. [...] La decisione fu di scegliere una sede di laboratorio che fosse lontana dalle altre università rappresentate nell'INFN, che fosse indipendente, di costituire per essa un gruppo di un certo numero di persone, di darmi, debbo dire, carta bianca. [...] Il gruppo venne formato seguendo questa idea: decisi che si trattava di una fisica nuova e che la cosa importante era avere persone giovani e intelligenti, molto più di persone che già sapessero. Feci con l'aiuto di Gilberto Bernardini un giro per l'Italia [...] e raccolsi un gruppo di fisici e ingegneri che corrispondono ai nomi di Fernando Amman, Carlo Bernardini, Giordano Diambrini, Mario Puglisi, Giancarlo Sacerdoti e altri. Queste persone divennero poi il nucleo centrale dell'iniziativa insieme ad alcuni professori che avevano all'incirca la mia età, come Ruggero Querzoli, Italo Federico Quercia e Mario Ageno. Così si formò una base, diciamo, di venticinquenni, un piano di trentacinquenni, qualche quarantenne e in cima a tutti c'era Enrico Persico, che è stato il teorico del gruppo e ha diretto la progettazione teorica della macchina [11].

All'inizio del 1954 nacque ufficialmente la Sezione acceleratore: Salvini volle infatti far ratificare dal Consiglio direttivo dell'INFN il fatto che il gruppo incaricato di lavorare all'acceleratore era una Sezione autonoma dell'Istituto, al pari delle altre Sezioni territoriali. Il 30 gennaio ottenne, perciò, un chiaro pronunciamento in tal senso: il Consiglio direttivo dell'INFN stabiliva che «la Sezione acceleratore con sede in Pisa è riconosciuta come sezione autonoma dall'INFN ed avrà vita fino al momento in cui sarà stata costruita la macchina acceleratrice». Pisa si trovò così per

qualche tempo nella paradossale situazione di essere una sottosezione dell'INFN che era però sede di una sezione autonoma dello stesso istituto (sarebbe poi diventata sezione nel 1956).

Il lavoro era inizialmente suddiviso in varie sedi; il grosso dell'attività era concentrato a Pisa, ma il gruppo teorico risiedeva a Roma, così come il gruppo della Sanità, diretto da Ageno, che si occupava del problema dell'inniettore, mentre a Firenze si lavorava all'accelerazione a radiofrequenza in collaborazione con il Centro di Microonde del CNR diretto da Nello Carrara, e a Milano si studiavano modelli analogici in vasca elettrolitica presso il Politecnico. Nel maggio 1955 la Sezione acceleratore si trasferì a Roma, ospite dell'Istituto di Fisica dell'Università, per seguire da vicino i lavori in corso a Frascati di costruzione del complesso edilizio destinato a sede della grande macchina e dei laboratori e servizi annessi. Salvini ottenne il trasferimento della propria posizione di ordinario a Roma, grazie allo sdoppiamento della cattedra di fisica tenuta da Edoardo Amaldi [12], [13].

Il corso di fisica superiore tenuto da Salvini fu affidato per incarico a Elio Fabri, appena giunto da Roma per lavorare al progetto della CEP. Più tardi, quando alla fine del 1958 anche Conversi lasciò Pisa per tornare a Roma, da Roma venne a sostituirlo sulla cattedra di fisica Carlo Franzinetti, che già aveva collaborato alla messa a punto della camera odoscopica [14]. Negli anni successivi Franzinetti svolse un ruolo determinante nel ricostruire a Pisa un solido gruppo di ricerca; Carlo Bemporad, un altro fisico di formazione romana passato poi a Pisa, non esita a sostenere che l'influenza di Franzinetti fu «a suo modo equivalente a quella di Corbino per il gruppo di Roma», soprattutto nel reclutare persone brillanti e nel creare un clima di cooperazione attiva all'interno dell'Istituto [15].

Franzinetti si era laureato a Roma nel 1947; il suo relatore di tesi era stato Bernardo Nestore Cacciapuoti, che si era laureato a Pisa nel 1936. Dopo un breve periodo passato a Palermo, dove Emilio Segrè stava cercando di mettere in piedi un attivo gruppo di ricerca (tentativo vanificato ben presto dalla sua forzata emigrazione negli Stati Uniti a causa della legislazione razziale), Cacciapuoti era entrato a far parte di quel composito gruppo di ricercatori che nei primi anni della guerra si stava raccogliendo a Roma intorno ad Amaldi e alle ricerche sui raggi cosmici sostenute dall'Istituto nazionale di geofisica diretto da Lo Surdo. Tra il 1941 e il 1943 prestò volontariamente la sua opera come docente (uno dei pochi non ebrei), tenendo i corsi di fisica sperimentale presso l'università clandestina organizzata a Roma da Guido Castelnuovo per consentire il proseguimento degli studi ai giovani ebrei espulsi dalle università. Negli anni del dopoguerra svolse una intensa attività nel campo della diplomazia scientifica, lavorando per il Ministero degli Affari Esteri nell'ambito delle Nazioni Unite e della ambasciata italiana a Washington, e come membro dell'ufficio studi dell'UNESCO svolse un importante ruolo di

collegamento tra i fisici italiani (in particolare Edoardo Amaldi) e gli ambienti scientifici internazionali nella fase di ideazione e preparazione del progetto di collaborazione europea che sarebbe sfociato nella creazione del CERN. Tornò poi alla vita universitaria, e nel 1962 rimise stabilmente piede a Pisa, dove si era laureato, sulla cattedra di fisica sperimentale.

Non credo ci siano conclusioni generali da trarre da queste divagazioni attraverso le intersezioni tra la fisica romana e quella pisana, prive di un unico filo conduttore. Può essere interessante chiudere con un paio di citazioni, che valgono come testimonianze individuali, sulla percezione della differenza di ambiente tra Roma e Pisa negli anni sessanta, da parte di alcuni dei fisici pisani che appartengono già alla generazione successiva a quella dei Conversi e dei Salvini:

Era piuttosto la struttura mentale che, al solito, dominava nella zona di Roma: c'era una gerarchia e sono i capi che fanno gli esperimenti... A Frascati, quando c'era da dividere il tempo macchina del sincrotrone, io me le ricordo ancora le epiche battaglie per avere più ore di Salvini!

Devo anche dire che – questa è una cosa più generale di Pisa – ci siamo sempre aiutati anche quando fortemente conflittuali. Cioè, rispetto a Roma, la sensazione che ho è che Pisa sia stato un posto dove la conflittualità non è mai arrivata ad essere distruttiva... Allora l'ambiente di Roma era piuttosto opprimente. Uno doveva dipendere da Salvini, da Amaldi, da Conversi; non si spostava foglia senza che loro intervenissero! Se servivano fondi, a Roma si trovavano in maniera più semplice che non altrove, però, insomma, la libertà era poca.

Quello che voglio dire è questo: a Roma si sono formate persone preparate, alcune molto brave; ma non hanno avuto vere occasioni; sono rimaste irretite da questo insieme di Frascati e dei grandi capi. Noi siamo stati, come dire, 'liberati'. Lo svantaggio è stato quello di essere praticamente autodidatti [16].

Letti insieme alle considerazioni già riportate di Elio Fabri, questi commenti sono utili, più che a pronunciare giudizi storiograficamente fondati, a ricordare l'importanza, nella costruzione di un ambiente scientifico produttivo, del difficile equilibrio da realizzare tra la presenza forte di maestri che sappiano costruire una solida tradizione e indirizzare i giovani alla ricerca, e la capacità degli stessi maestri di lasciare spazio alla libera espressione delle capacità degli allievi senza costruire gerarchie vincolanti.

Bibliografia

- [1] A. Guerraggio, G. Paoloni, *Vito Volterra*, Muzzio, Roma 2008.
- [2] G. Battimelli, *Tra fisica sperimentale e fisica teorica: mutamenti nella fisica italiana del primo Novecento*, Quaderni di Storia della Fisica 18 (2013), pp. 95-105.

- [3] M. Cantone, *Commemorazione di Pietro Blaserna*, Rend. Lincei 5, XXVII, 1918.
- [4] V. Volterra, *Enrico Poincaré*, in *Saggi scientifici*, 1920; ristampa anastatica, Zanichelli, Bologna 1990.
- [5] G. Israel, *Vito Volterra, un fisico matematico di fronte ai problemi della fisica del Novecento*, Rivista di Storia della Scienza 1 (1984), pp. 39-72.
- [6] M. Conversi, *The development of the flash and spark chambers in the 1950's*, Journal de Physique Colloques 43, C8 (1982), pp. 91-99 (Proceedings of the International Colloquium on the History of Particle Physics, Paris, July 21-23, 1982).
- [7] C. Rubbia, *Marcello Conversi*, Rend. Suppl. Acc. Lincei s.9, 2 (1991), pp. 3-24.
- [8] G. Battimelli, D. Falciai, *Dai raggi cosmici agli acceleratori: il caso dell'antiprotone*, in *Atti del XIV e XV Congresso Nazionale di Storia della Fisica (Udine 1993-Lecce 1994)*, a cura di A. Rossi, Ed. Conte, Lecce 1995, pp. 375-386.
- [9] Lettera circolare di M. Conversi, in Roma-Casaccia, Archivio ENEA, pos. 7Z.
- [10] E. Fabri, intervista a cura di L. Bonolis, in C. Bemporad, L. Bonolis (a cura di), *Storie di uomini e quarks. La Fisica Sperimentale a Pisa e lo Sviluppo della Sezione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (1960-2010)*, SIF, Bologna 2012.
- [11] G. Salvini, intervista in G. Paoloni (a cura di), *Energia, ambiente, innovazione: dal CNRN all'ENEA*, Laterza, Roma-Bari 1992.
- [12] G. Battimelli, M. De Maria, G. Paoloni, *L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Storia di una comunità di ricerca*, Laterza, Roma-Bari 2001.
- [13] G. Salvini, *L'uomo, un insieme aperto. La mia vita di fisico*, Mondadori Università 2010.
- [14] M. Conversi, *Ricordo di Carlo Franzinetti*, Archivio Conversi, Dipartimento di Fisica, Università "La Sapienza", Roma, sc. 10, fasc. 82 (dattiloscritto datato Torino, 27/12/1980).
- [15] C. Bemporad, *Ricordo di Carlo Franzinetti (1923-1980)*, comunicazione privata, 2009.
- [16] G. Bellettini, C. Bemporad, dalle rispettive interviste in C. Bemporad, L. Bonolis (a cura di), *Storie di uomini e quarks. La Fisica Sperimentale a Pisa e lo Sviluppo della Sezione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (1960-2010)*, SIF, Bologna 2012.

LA FISICA DELLA MATERIA

La relazione introduttiva di Giuseppe Grosso ricorda i principali aspetti scientifici, i personaggi e le vicende che hanno caratterizzato la nascita e lo sviluppo della fisica della materia a Pisa nell'arco degli anni che vanno dal subito dopoguerra ai pochi decenni successivi. Partendo dalla analisi della nascita di questa disciplina in Europa, agli albori della meccanica quantistica, l'autore analizza il ritardo della sua diffusione in Italia e poi i grandi passi fatti nel dopoguerra da Adriano Gozzini e da Franco Bassani per costruire rispettivamente una scuola sperimentale e una teorica per lo studio moderno della fisica della materia.

Il contributo di Flavio Toigo si sofferma a ricordare il clima e l'ambiente scientifico attorno a Franco Bassani nei suoi anni di permanenza nell'Istituto di Fisica di Pisa, dal 1967 al 1969. L'autore ripercorre i fatti salienti della nascita della fisica moderna dei solidi in Italia e sottolinea quanto l'opera di Bassani sia stata importante in questo processo. I tre anni trascorsi a Pisa sono stati fondamentali per la formazione di una scuola di allievi che negli anni successivi avrebbero dato grande impulso allo sviluppo della fisica teorica della materia.

Silvia Gozzini e Ferruccio Renzoni ripercorrono nel loro contributo le varie fasi di una delle scoperte sperimentali più importanti di Adriano Gozzini e della sua scuola: quella che da allora fu chiamata "dark resonance". Questa scoperta, interpretata successivamente in termini di interferenza quantistica e intrappolamento coerente di popolazione atomica, ebbe un significativo impatto che non si limitò alla fisica atomica ma, come gli autori puntualizzano, continua ad avere un ruolo importante in molti importanti esperimenti recenti.

Degli eventi che hanno portato alla nascita dell'Istituto di Biofisica a Pisa, e del ruolo avuto da Adriano Gozzini nella sua realizzazione è raccontato nel contributo di Giuliano Colombetti e Francesco Lenci. Dopo aver brevemente ricordato alcune importanti personalità che a partire dagli anni '30 del Novecento cominciarono a pensare all'applicazione delle moderne tecniche fisiche per dare un nuovo impulso all'analisi dei problemi biologici, gli autori ripercorrono le vicende della nascita della biofisica in Italia, la storia dell'Istituto di Biofisica di Pisa e dei ricercatori che in esso hanno operato.

Il contributo di Danilo Giulietti ricorda la nascita a Pisa del laboratorio CNR di Fisica Atomica e Molecolare (LAFAM) del quale Adriano Gozzini fu fondatore e successivamente Direttore per molti anni. L'autore ripercorre il clima scientifico di quegli anni, la simbiosi tra le attività nell'Istituto di Fisica e nel LAFAM, l'ambiente informale utile a creare collaborazioni tra i ricercatori, e la pluralità di ricerche che coinvolgevano non solo argomenti di fisica atomica e molecolare, ma riguardavano anche l'attività sperimentale in fisica dei plasmi.

Infine, il contributo di Giuseppe La Rocca presenta l'attività teorica in fisica della materia condensata alla Scuola Normale Superiore dal 1980

al 2000, dopo cioè il ritorno a Pisa di Franco Bassani. L'autore ricorda le numerose collaborazioni che Bassani intraprese, i molti studenti raccolti attorno a lui e le molte linee di ricerca affrontate. La puntuale ricostruzione di La Rocca testimonia anche come l'attività di Mario Tosi ebbe un ruolo rilevante nella costruzione di un importante gruppo di ricerca in fisica teorica della materia in Italia.

La fisica della materia a Pisa dopo la II guerra mondiale: 1945-1980

Una disciplina da costruire in un Istituto da ricostruire

Giuseppe Grosso*

La “Fisica della Materia” è il settore della fisica che coinvolge nel modo più pervasivo il mondo che ci circonda. Come disciplina autonoma, questo campo della fisica si è andato affermando in Italia sostanzialmente dopo la seconda guerra mondiale, ma non è stato esattamente così in altri paesi.

Per meglio capire cosa sia successo in Italia, e in particolare a Pisa, in questo campo della fisica e realizzare quanto lungo e importante fosse il percorso che l'Italia doveva compiere per allinearsi con altre nazioni, vale forse la pena di fare un passo indietro, proprio al periodo che va dalla fine ottocento ai primi decenni del Novecento, per vedere come la fisica italiana si poneva nel contesto dei tentativi moderni di indagare la materia.

Nel linguaggio comune numerose parole sono spesso usate come sinonimi. Ben altre volte però i nomi contano e dietro di essi c'è tutta una storia. Così anche se sono state spesso usate indifferentemente locuzioni come “Fisica dello Stato Solido” o “Fisica della Materia Condensata” o “Struttura della Materia”, dietro queste si sono aggregati temi e filoni di ricerca differenti.

Fino ai primi decenni del '900, lo studio delle proprietà della materia era diviso in settori sostanzialmente separati: dall'ottica all'acustica, alla termodinamica, all'elettromagnetismo, etc... Solo dopo l'avvento delle Statistiche Quantistiche, della Meccanica Quantistica e dei risultati importanti raggiunti nell'interpretazione dei fenomeni sperimentali della materia, questi campi sono stati raccolti sotto il nome di *Fisica dello Stato Solido* e codificati nella importante monografia [1] di F. Seitz *Modern Theory of Solids* del 1940. Negli anni '60 la disciplina fu poi raccolta sotto il titolo *Fisica della Materia Condensata*, e successivamente sotto *Struttura della Materia* per includere liquidi, plasmi, condensati atomici, colloidi, vetri, ecc. Oggi la dizione “Fisica della Materia” coinvolge i più

* Dipartimento di Fisica, Università di Pisa.

diversi campi senza un confine preciso. Un importante e caratterizzante aspetto della Fisica della Materia è legato alle applicazioni tecnologiche attorno alle quali questa fisica è spesso cresciuta: la scienza dei materiali e le nanotecnologie ne sono importanti esempi.

Una visione corretta della storia della Fisica della Materia deve quindi comprendere non solo i risultati della fisica di base, ma anche come, partendo da essi, si siano sviluppate importanti invenzioni, e come le comunità scientifiche e le società civili si siano organizzate per raggiungere obiettivi di sviluppo industriale. Ecco perché in questo campo, nomi diversi sono stati scelti nel tempo per raccogliere e meglio rappresentare aspetti e argomenti differenti.

Subito dopo la scoperta dell'elettrone da parte di Thomson (1897), con i modelli classici di Drude [2] (1900) e di Lorentz [3] (1904) comincia a delinearsi una descrizione in termini microscopici della materia che poi vedrà con l'affermazione della meccanica quantistica (sostanzialmente dal 1926 al 1933) l'inizio dell'indagine moderna per l'interpretazione dei fenomeni fisici dei materiali.

Se, come ben descritto da Hoddeson e Baym [4], nella prima fase di questo processo, i lavori di Pauli [5] (1926) e Sommerfeld [6] (1927) aprirono la strada all'applicazione della statistica di Fermi-Dirac al gas di elettroni liberi, mentre quelli di Bloch [7] (1928) all'applicazione della Meccanica Quantistica per lo studio degli elettroni in un reticolo cristallino, gli anni dal '28 al '33 hanno visto i migliori fisici dell'epoca, da Bethe e Bloch ad Heisenberg, da Peierls a Landau, da Slater a Brillouin, a Wilson, e molti altri, impegnati nella spiegazione di un gran numero di proprietà sperimentali dei solidi, fondando quindi in quegli anni quella che sarebbe stata la moderna teoria quantistica dei solidi. Ciò è testimoniato dalle numerose rassegne pubblicate attorno agli anni '30, che sono state punto di riferimento di corsi universitari in molte Università e centri di ricerca. Solo per citarne alcune sulla teoria quantistica degli elettroni nei metalli ricordiamo quelle di Sommerfeld-Bethe [8] (1933), quella di Peierls [9] (1932), quella di Bloch [10] (1933) e quella di Slater [11] (1934). Ma a partire dal 1933 questo processo tumultuoso di crescita della Fisica Teorica della Materia andava spostandosi dalla Germania agli Stati Uniti d'America e all'Inghilterra. A ciò non furono certo estranei gli avvenimenti politici che in quegli anni percorrevano l'Europa ed in particolare la Germania.

Sul piano metodologico, si va progressivamente affermando con forza la necessità di abbandonare modelli ideali di materiali, e adottare un impegno crescente nell'affrontare sistemi sempre più aderenti alla realtà in un processo di avvicinamento stretto tra teoria ed esperimento. Pioniere in questo fu il lavoro di Wigner e Seitz [12] (1933) sulla struttura a bande del Sodio metallico.

1. Alcune considerazioni sulla situazione della fisica della materia in Italia prima della seconda guerra mondiale

Le vicende della fisica italiana, ed in particolare dei lavori dedicati allo studio della materia, negli anni che hanno preceduto la seconda guerra mondiale, non possono prescindere dall'analisi che emerge dai contributi riportati su *Il Nuovo Cimento* [13]¹.

L'anno 2017 ha visto la ricorrenza del 120mo anniversario della fondazione della Società Italiana di Fisica e della nascita de il Nuovo Cimento organo ufficiale della Società.

Alla costruzione di entrambi gli eventi molto hanno contribuito i docenti dell'Università di Pisa, a partire da Carlo Matteucci, Raffaele Piria, Vito Volterra e molti altri.

L'importanza de *Il Nuovo Cimento* non è limitata al fatto di aver raccolto, almeno fino agli anni '30, la gran parte dei lavori dei fisici italiani, ma di essere stata anche mezzo di informazione e forum per relazioni e numerose testimonianze riguardanti il tessuto culturale scientifico nazionale, i rapporti tra strutture universitarie e ricerca, e la formazione scolastica. È quindi naturale guardare al Nuovo Cimento per avere un primo panorama della Fisica della Materia in quegli anni. Da esso emerge che la tradizione della fisica italiana rivolta allo studio della materia, nei primi decenni del novecento, era sostanzialmente di natura sperimentale. I lavori teorici erano di natura fisico-matematica, focalizzati in genere molto più sugli aspetti algoritmici che all'interpretazione di dati sperimentali, e svolti senza collaborazione con fisici sperimentali.

È comunque di rilievo la produzione sperimentale italiana di fine '800, ne sono un esempio i lavori sull'ottica e sull'elettromagnetismo di Augusto Righi o quelli sui trasformatori di Galileo Ferraris, spesso accompagnati entrambi anche da trattazioni teoriche.

Va notato inoltre che la struttura dei corsi di Laurea privilegiava la formazione sperimentale e gli stessi manuali erano privi delle nuove teorie sviluppate nei primi decenni del '900: bisognerà aspettare il libro di Gratz [14] *Le Nuove Teorie Atomiche e la Costituzione della Materia* quelli di Fermi [15], [16] *Introduzione alla Fisica Atomica e Molecole e Cristalli*, e quello di Castelfranchi [17] *Fisica Moderna*, per avere una trattazione rilevante degli aspetti teorici.

Quando quindi si affacciarono le nuove teorie sulla Relatività e sulla Meccanica Quantistica, molti fisici italiani non riuscirono a contribuire ad esse ma neppure ad apprezzarne pienamente il valore [18]. Mentre lo

¹ G. Giuliani, "*Il Nuovo Cimento: Novant'anni di fisica in Italia 1885-1944*", La Goliardica Pavese, Pavia 1996.

sviluppo della fisica quantistica trovò lontani i matematici, la relatività, invece, li coinvolse maggiormente perché sicuramente più vicina alla loro impostazione di lavoro.

È importante notare che, a differenza di quello che stava accadendo in altre nazioni, soprattutto in Germania, non era stata afferrata la potenzialità che la meccanica quantistica e le statistiche quantistiche offrivano per una trattazione della materia a livello microscopico; tutto ciò portò ad un declino di questo settore della fisica confinandolo ad un approccio di stile ottocentesco.

Puntualmente ciò fu commentato da Emilio Segrè nella sua rassegna storica sulla fisica italiana, presentata al Congresso di Como nel 1977, in occasione della celebrazione degli 80 anni della Società Italiana di Fisica e dei 150 anni dalla morte di Alessandro Volta. Segrè fece notare che dopo Alessandro Volta (1745-1827) si sarebbe dovuto aspettare un secolo per avere con Fermi una nuova straordinaria produzione di Fisica, sebbene i contributi italiani riportati sul Nuovo Cimento testimonino risultati di interesse che in genere seguono però scoperte importanti avvenute altrove.

Quello che era mancato soprattutto ai fisici italiani dei primi decenni del '900 era la capacità di uscire da vecchi schemi di suddivisione della fisica in filoni sostanzialmente separati, trascurando un profondo rinnovamento culturale che li rendesse capaci di nuove scoperte e nuovi indirizzi di ricerca. Se, come notano Giuliani e Marazzini [18] nel caso della relatività le posizioni critiche si basavano su considerazioni di carattere epistemologico-filosofico, il rifiuto di accettare la fisica dei quanti ha inciso particolarmente sui problemi connessi con la struttura della materia tardando grandemente il suo sviluppo. Fatta eccezione per i risultati di Fermi, nei primi decenni del '900 l'Italia non era riuscita a seguire lo sviluppo importante che lo studio della Fisica della Materia aveva avuto in altri paesi, sia sul piano della formulazione intellettuale che su quello dell'assetto istituzionale. Ma la vicenda di Fermi e dei suoi collaboratori di fronte a questi problemi è emblematica, del tutto particolare, e nuova per pragmatismo e capacità di rompere con la tradizione culturale.

2. I primi anni a Pisa dopo la guerra²

Dopo la guerra, quando si trattò di ricostruire l'Istituto di Fisica che i militari tedeschi avevano parzialmente distrutto e saccheggiato nelle dotazioni dei laboratori e della biblioteca, la ricostruzione non assunse solo

² Una ricostruzione della personalità e dell'attività di Adriano Gozzini si può trovare in: E. Arimondo, S. Gozzini and F. Maccarrone Eds. *"Topics in Radiofrequencies and Laser*

il carattere del ripristino dell'esistente, ma grazie ad Adriano Gozzini si rivelò un'operazione di straordinario valore scientifico.

Era l'ottobre del 1945 quando Gozzini, dopo gli anni della guerra, decise di tornare a Pisa per visitare il "maestro" Luigi Puccianti che nel 1940 era stato relatore della sua tesi di Laurea riguardante la spettroscopia infrarossa. Erano intercorsi anni difficili durante i quali, a causa della guerra e della prigionia, Gozzini non aveva più aperto un libro di fisica. L'incontro con il vecchio maestro, come lo stesso Gozzini racconta [19], fu una scena grottesca.

Ciao Gozzini...

Entrato nello studio di Puccianti, dopo cinque anni, Gozzini vede il maestro assorto nella lettura. Puccianti alza la testa, saluta "ciao Gozzini" e si rimette a leggere. Quando dopo una decina di minuti entrano nello studio Gilberto Bernardini e Nello Carrara si ripresenta la stessa scena: "ciao Gilberto", "ciao Nello" e Puccianti continua nella lettura, poi si alza e se ne va. Sembra che il testo così avvincente fosse il manoscritto del libro [20] *Questioni di Fisica* che sarebbe stato pubblicato dalla Sansoni due anni dopo, nel 1947. Si trattava del primo volume, l'unico pubblicato, di una programmata serie di tre, a cura di G. Bernardini, G. Polvani e di G. Gentile Jr. prematuramente deceduto nel 1942.

Dopo alcuni giorni Puccianti offre a Gozzini una posizione di assistente temporaneo in sostituzione di Lamberto Allegretti non più rientrato in Istituto dopo la guerra. Incomincia così l'attività del piccolo gruppo che assieme a Gozzini comprende inizialmente Anna Ciccone, Tullio Derenzini e Cosimo de Donatis.

È ben noto che alla ricostruzione dei laboratori si rivelò utilissimo il deposito di materiale lasciato dalle truppe Americane, a guerra finita, nella località di Tombolo, vicino a Pisa, che poi avrebbe ospitato una sede dell'ARAR (Azienda Rilievo e Alienazione Residuati). Con fondi accantonati da Puccianti, Gozzini poteva acquistare a buon prezzo klystron, magnetron e vari apparati elettronici essenziali anche per i lavori di tesi degli studenti. Per l'eredità culturale di Puccianti ma anche per l'acquisto di questa dotazione sperimentale, il campo di ricerca più promettente sembrava quello della spettroscopia a microonde e della risonanza elettronica paramagnetica (EPR). Si laureano in questo periodo collaboratori che a diverso titolo formeranno il gruppo di ricerca di Adriano Gozzini, tra essi ricordiamo in particolare Gerardo Alzetta e Arriguccio Battaglia.

Spectroscopy" (Società Italiana di Fisica, Bologna 2014); A. Gozzini, "*Microwave physics in Pisa in the fifties*", in *The Origins of Solid-State Physics in Italy: 1945-1960*, Ed. G. Giuliani (SIF, Bologna 1988); J. Brossel "*C'her Monsieur Gozzini*", in *Interaction of Radiation with Matter*, a volume in honor of Adriano Gozzini. Quaderni della Scuola Normale Superiore, Pisa 1987.

Quando nel 1947 Puccianti è collocato fuori ruolo per raggiunti limiti di età, la direzione dell'Istituto e l'insegnamento di Fisica Sperimentale passa a Nello Carrara fino al 1950. Nel 1946 Carrara aveva fondato a Firenze, e lo dirigerà poi fino al 1970, il Centro Microonde del CNR, successivamente rinominato Istituto di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche (IROE). All'inizio degli anni '50 Carrara stipula un contratto tra l'American Air Force (USAF) e il Centro Microonde, per studi sull'utilizzo delle microonde, legati alle trasmissioni radar; Carrara affida al gruppo di Gozzini gli studi riguardanti le proprietà dielettriche dei gas dell'atmosfera, in particolare O_2 e vapori d'acqua, e nel 1951 Gozzini pubblica su *Il Nuovo Cimento* uno studio riguardante la costante dielettrica dei gas [21]. Nello stesso anno Gozzini riporta importanti risultati sull'effetto Faraday nelle sostanze paramagnetiche [22] capendo che nella rotazione di Faraday si presenta una risonanza in prossimità di una banda di assorbimento [23] (effetto Macaluso-Corbino). I risultati sperimentali di Gozzini vengono notati da Kastler che li aveva previsti nel 1949. Comincia così una stretta collaborazione con la scuola francese che durerà per tutti gli anni a venire. Lo stesso effetto Cotton-Mouton previsto da Kastler nel 1950 sarà verificato [23] da Gozzini nel 1953.

Quando nel 1950 Carrara viene chiamato a ricoprire la cattedra di Fisica Superiore a Firenze, Marcello Conversi è chiamato a Pisa, da Roma, sulla cattedra di Fisica Sperimentale e dirigerà l'Istituto di Fisica dal 1951 al febbraio del 1959.

È questo un periodo ricco di risultati per il gruppo di Fisica della Materia raccolto attorno a Gozzini; oltre a Gerardo Alzetta e Arriguccio Battaglia il gruppo comprende ora Erseo Polacco, Giuseppe Fornaca e Mario Iannuzzi. L'attività di ricerca è principalmente focalizzata sulla spettroscopia nella fisica atomica e molecolare nella regione delle microonde, e sulle tecniche ad esse collegate. In particolare, proseguono gli studi sulle costanti dielettriche ed ottiche dei gas, anche sottoposti a pressione, e su diversi effetti magnetoottici.

Nella metà degli anni '50, lo studio per la rivelazione con metodi ottici di tracce di impurezze polari in liquidi non polari portò accidentalmente ad una scoperta importante. Battaglia aveva osservato che una lampada al neon sottoposta alla radiazione di un magnetron si accendeva in condizioni di illuminazione dell'ambiente in cui si svolgeva l'esperimento mentre si spegneva se l'ambiente era in condizioni di buio. Gozzini suggerì allora che ciò poteva essere spiegato dall'effetto fotoelettrico stimolato dalla luce esterna che generava il plasma che poi nella scarica dava origine alla luce emessa dalla lampada. Battaglia notava però che anche in condizioni di buio, ma con magnetron attivo, ogni tanto la lampadina si accendeva, quindi non poteva essere l'effetto fotoelettrico dovuto alla luce esterna, allora Gozzini suggerì che la causa poteva essere una sor-

gente radioattiva vicina o un raggio cosmico che attraversava la lampada a neon. Per derimere questa ambiguità Gozzini pensa di usare un rivelatore Geiger facilmente reperibile nell'Istituto di Fisica, nel laboratorio di Marcello Conversi. Esclusa la presenza di sostanze radioattive, la luce emessa dalla lampada, in condizioni di buio, doveva essere il segnale del passaggio di un raggio cosmico. Nasce così una importante collaborazione tra Gozzini e Conversi, finalizzata alla costruzione di una camera odoscopica [24] nella quale una matrice di piccoli tubi contenenti neon poteva evidenziare il percorso della particella che li attraversava. Di questa vicenda tratta il contributo di Gloria Spandre e Marco Maria Massai in questo volume.

Nel 1959, per un anno, la direzione dell'Istituto passa a L. Radicati e successivamente ad Adriano Gozzini dal 1960 al 1962. Anche in questo periodo sono numerosi i risultati di Gozzini e dei suoi collaboratori: dallo studio dei processi di interazione tra radiazione e materia è scaturita la misura di transizioni a più fotoni tra stati elettronici e l'analisi di processi non lineari. La collaborazione con Adriano Di Giacomo ha consentito di dare una descrizione teorica ai processi a molti fotoni; questi risultati si possono annoverare a buon diritto tra gli studi che hanno dato origine al collegamento tra spettroscopia e ottica non lineare.

Una importante linea di ricerca iniziata nella metà degli anni '60 assieme ad Alzetta [25], ha riguardato la rivelazione del momento angolare portato da una radiazione elettromagnetica polarizzata circolarmente. Per mezzo della torsione meccanica di un filo di quarzo viene dimostrato che può essere rivelato l'assorbimento di momento angolare da parte di un sistema atomico che interagisca con la radiazione elettromagnetica. Questo fu un risultato rilevante con una lunga serie di sviluppi negli anni successivi; solo per citarne alcuni si possono ricordare i lavori fatti assieme a Cesare Ascoli ed Ennio Arimondo [26], e poi quello con Danilo Giulietti e Bruno Zambon [27]. Dei primi anni '60 è anche la dimostrazione sperimentale che è possibile preparare un sistema atomico in ben definiti stati per mezzo dell'assorbimento di luce di data lunghezza d'onda e polarizzazione. Questa idea di "pompaggio ottico" [28] è stata poi fondamentale nella realizzazione del laser. Come conseguenza di questo studio, Gozzini realizzò che era possibile rivelare pompaggio ottico dalla variazione della polarizzazione della radiazione elettromagnetica che si propaga nel sistema atomico, dimostrando così il collegamento tra potere rotatorio magnetico e orientazione atomica. La rilevanza internazionale guadagnata dalla attività di ricerca sperimentale del Gruppo di Fisica della Materia attorno a Gozzini raggiunge un riconoscimento importante quando nel 1960 Polvani, allora presidente della Società Italiana di Fisica, affida a Gozzini l'organizzazione di una scuola estiva, a Varenna, intitolata "Topics in radiofrequency spectroscopy". La

risonanza di tale evento fu grande non solo per la presenza di importanti ricercatori come Kastler, Townes, Cohen-Tannoudi, Brossel, Abragam e altri, alcuni dei quali sarebbero stati presto vincitori di Nobel, ma anche per le discussioni sulla possibilità di realizzare un maser ottico. Nello stesso anno al gruppo di Pisa viene affidata anche l'organizzazione del IX Colloquio AMPÈRE (Atomi e Molecole per gli studi Radio-Elettrici), un appuntamento annuale fondato da Kastler agli inizi degli anni '50, che diverrà occasione di collegamenti scientifici internazionali, e sarà importante per lo sviluppo delle ricerche del gruppo degli sperimentali pisani per gli anni successivi. L'attività sviluppata a Pisa dal gruppo di Fisica della Materia e la reputazione internazionale raggiunta vengono ulteriormente riconosciute con l'istituzione a Pisa, alla fine degli anni sessanta, di due laboratori di fisica applicata del CNR. Nacquero così il laboratorio di biofisica nel quale venivano affrontati, con ricercatori di diversa formazione culturale, e da un punto di vista interdisciplinare, i problemi della biofisica, e un laboratorio di fisica atomica e molecolare. Alla storia e ai risultati di questi laboratori sono dedicati rispettivamente i contributi di Giuliano Colombetti e Francesco Lenci e quello di Danilo Giulietti, nel presente volume.

La direzione del laboratorio di Biofisica, inizialmente assunta da Gozzini, fu successivamente affidata a Alesandro Checcucci. Nel 1980 il laboratorio diventa Istituto di Biofisica del CNR e, dal 2001, appartiene all'Istituto Nazionale di Biofisica del CNR.

Il Laboratorio di Fisica Atomica e Molecolare (LAFAM) fu diretto da Gozzini per oltre un decennio. In seguito il laboratorio fu denominato Istituto di Fisica Atomica e Molecolare (IFAM); dal 1981 al 1984 è nominato Direttore Franco Strumia e, successivamente alla direzione interna di Moreno Vaselli, nel 1995 è nominato direttore Massimo Martinelli. Infine l'Istituto viene denominato Istituto dei Processi Chimico-Fisici (IPCF). Dal 2010 parte del personale dell'IPCF si raccoglie nell'unità operativa di Pisa dell'Istituto Nazionale di Ottica, sotto la direzione di Antonio Giulietti, con la finalità di svolgere ricerche in fisica degli atomi, delle molecole, dei liquidi e dei plasmi. L'unità viene intitolata ad Adriano Gozzini.

Tra i molti altri risultati degli anni '70, è importante ricordare la scoperta di quella che è chiamata "dark resonance", un fenomeno osservato da Alzetta, Gozzini, Moi e Orriols [29] nella radiazione di fluorescenza da un livello eccitato dei vapori di sodio quando la separazione iperfina dello stato fondamentale si accorda con la separazione in frequenza dei modi del laser incidente. Un fenomeno spiegato teoricamente da Arimondo e Orriols [30] in termini di fenomeni coerenti in sistemi a tre livelli. Ad essa e ai numerosi risultati collegati e scoperti successivamente, è dedicato il contributo di Silvia Gozzini e Ferruccio Renzoni, raccolto nel presente volume.

3. L'arrivo a Pisa di Franco Bassani³

Nel 1966, anche su sollecitazione di L. Radicati, viene chiamato a Pisa, da Messina, sulla cattedra di Fisica Teorica, Franco Bassani. È così colmata una lacuna nella ricerca teorica della Fisica della Materia che da tempo esisteva nell'Istituto di Fisica. Rispetto a Gozzini, Bassani era di tutt'altra impostazione, anche se tra loro il sodalizio e l'amicizia durò per il resto della loro vita.

Con Bassani nasce a Pisa la fisica moderna dello stato solido.

Bassani si era laureato a Pavia nel 1952, con Pietro Caldirola. Nel dopoguerra il gruppo dei fisici della materia a Pavia era raccolto attorno a Giulotto e alla sua scuola di spettroscopia sperimentale. Agli inizi degli anni '50 Fausto Fumi si unisce al gruppo dei pavesi dopo essersi laureato in fisica a Genova ed aver trascorso un periodo a Pittsburgh e poi ad Urbana negli Stati Uniti, per lavorare con Frederick Seitz e, a Cambridge, con Nevil Mott. Rientrato in Italia, è proprio a lui che Caldirola indirizza alcuni giovani studenti per iniziare a lavorare nel "nuovo" filone di ricerca della fisica teorica dello stato solido. Tra essi troviamo Fieschi, Bassani, Tosi e Celli. Dopo una prima posizione come Research Associate dal 1954 al 1956, Bassani si trasferisce nel 1959 negli Stati Uniti, all'Argonne National Laboratory, e vi resta fino al 1964 quando viene chiamato a ricoprire la cattedra di Fisica Teorica a Messina. Nel 1966 sarà a Pisa fino al 1969 per poi trasferirsi a Roma e poi, dal 1980 nuovamente a Pisa presso la Scuola Normale Superiore di cui sarà Direttore dal 1995 al 1999 e professore Emerito dal 2005.

Il ruolo svolto da Caldirola e Fumi prima, e da Bassani e Tosi poi (anche Tosi transitò per Messina, Trieste, Roma e dal 1991 affiancò Bassani alla Scuola Normale Superiore), è stato fondamentale per la nascita e lo sviluppo della fisica teorica della materia non solo a Pisa ma in tutta Italia, affrancandola dalla tradizione che essa aveva avuto negli anni precedenti la Guerra.

A Bassani e a Gozzini si deve anche il forte impulso dato alla costruzione di un collegamento istituzionale tra i fisici della Materia in Italia [31], [32].

L'aggregazione dei ricercatori in questo settore, infatti, si è manifestata dapprima nella partecipazione ai congressi della Società Italiana di Fisica e nelle scuole di Varenna, e si è concretizzata poi in richieste coordinate al CNR di gruppi che collaboravano con sezioni INFN. È proprio durante il congresso della SIF, a Bari, nel 1963, che nasce il GISM (Gruppi Italiani

³ Una ricostruzione della personalità e dell'attività di Franco Bassani si può trovare in G. Grosso and G. La Rocca Eds., *Giuseppe Franco Bassani, Uomo e scienziato* (Società Italiana di Fisica, Bologna 2010).

di Struttura della Materia) ad opera di Boato, Careri, Chiarotti, Fieschi, Gondi, Gozzini, Montalenti e Santangelo. Nello stesso anno i rappresentanti del GISM si riunivano a Roma assieme all'allora Presidente del CNR Giovanni Polvani e al Presidente dell'INFN Edoardo Amaldi, per organizzare la nascita di un organo del CNR che coordinasse le ricerche nazionali in fisica della Materia. Il GISM, denominato poi GNSM, Gruppo Nazionale di Struttura della Materia, nasce quindi con delibera del Consiglio di Presidenza del CNR il 17 dicembre 1964, e di esso viene nominato presidente Gianfranco Chiarotti, con consiglio direttivo formato da Bassani, Boato, Fieschi, Giulotto, Gozzini e Montalenti. Importante fu l'azione del CNR per sostenere il GNSM sia con finanziamenti iniziali, che con posizioni permanenti, che con il supporto a scuole dedicate alla formazione di giovani. Merita di essere ricordata tra le altre, la prima scuola di Struttura della Materia svolta a Perugia nel 1966, con la partecipazione dei migliori docenti del settore.

È in questo quadro di collaborazione con il CNR che alla fine degli anni '60 vengono istituiti tre laboratori di fisica applicata della materia, a Parma il MASPEC (Materiali Speciali per l'Elettronica e il Magnetismo), a Pisa il LAFAM (Laboratorio di Fisica Atomica e Molecolare) e a Roma l'IESS (Istituto di Elettronica a Stato Solido).

Tra le molte iniziative intraprese dal GNSM, merita una citazione particolare una in cui Franco Bassani fu particolarmente coinvolto: il progetto per l'utilizzazione della luce di Sincrotrone (PULS) nato nel 1975 quando Amaldi era Presidente del Comitato Nazionale di Scienze Fisiche del CNR.

Intense ed estremamente diversificate sono state sia l'attività scientifica che la formazione di una scuola pisana di allievi di valore che si sarebbero poi affermati in molte università ed istituzioni italiane e straniere.

Tra i temi di ricerca affrontati troviamo varie tecniche per il calcolo degli stati elettronici di semiconduttori del gruppo IV e III-V, le proprietà elettroniche di grafite e composti lamellari, le risposte ottiche dei materiali, regole di somma e ottica non lineare, polaritoni, eccitoni e impurezze nei solidi, le strutture quantistiche a semiconduttore, le nanostrutture, lo studio dei materiali organici e il loro utilizzo con gli inorganici nell'elettronica, lo studio di effetti a molti corpi coinvolgenti elettroni e fononi.

Il libro [33] *Electronic States and Optical Transitions in Solids*, scritto in collaborazione con Giuseppe Pastori Parravicini è tuttora un riferimento classico per chi vuole intraprendere lo studio teorico dello stato solido, così come il libro [34] *Fisica dello Stato Solido* scritto assieme a Umberto Maria Grassano lo è per chi vuole avvicinarsi alle basi di questa disciplina.

Alla attività svolta da Bassani nel periodo pisano dal 1966 al 1969 all'Istituto di Fisica, e in quello dal 1980 al 2010 alla Scuola Normale Superiore, sono dedicati rispettivamente i contributi di Flavio Toigo e Giuseppe La Rocca, nel presente volume.

4. L'eredità di Gozzini e gli sviluppi della Fisica della Materia sperimentale all'Istituto di Fisica di Pisa⁴

Adriano Gozzini trascorse la maggior parte della sua vita scientifica nell'Istituto di Fisica dell'Università di Pisa. L'impeto che seppe imprimere alla ricerca in Fisica della Materia fin dai primi anni del dopoguerra fu enorme. I risultati, spesso ottenuti con straordinaria semplicità e pochi collaboratori trovarono riconoscimenti in Italia e all'estero.

Come accennato nelle sezioni precedenti, e sottolineato anche negli altri interventi raccolti in questo volume, Gozzini riuscì a riunire un gruppo di ricercatori che avrebbero poi contribuito a far nascere uno dei più importanti centri di ricerca italiani in Fisica sperimentale della materia.

Certo questo mio breve intervento non pretende di tracciare la storia completa dell'attività di questo gruppo attivo nell'Istituto di Fisica, ma intende solo delinearne i tratti principali, nella prospettiva di alcune questioni di fisica che per importanza e originalità hanno caratterizzato la loro epoca, e vuole ricordare i ricercatori che hanno poi svolto un ruolo importante come leader di indirizzo scientifico, nella costruzione della tradizione sperimentale della Fisica della Materia pisana. In questo mi limiterò ai filoni di ricerca attivi nell'Istituto di Fisica, sostanzialmente dagli anni '50 agli anni '80, mentre dei laboratori CNR tratteranno altri interventi in questo volume.

Negli anni '50 il piccolo gruppo di ricercatori raccolto attorno a Gozzini era particolarmente attivo nel settore della fisica delle microonde. Di quel periodo ben noti sono i primi studi di Gozzini già citati, sulla costante dielettrica dei gas [21] e sull'effetto Faraday di sostanze paramagnetiche [22] nella regione delle microonde. A questi primi anni risale la collaborazione con Arriguccio Battaglia e con Erseo Polacco.

4.1. Arriguccio Battaglia

Subito dopo la Laurea, Battaglia assume un incarico all'Accademia Navale e poi rientra nell'Istituto di Fisica come assistente straordinario nel 1952. Il primo lavoro [35], fatto assieme a Polacco e Gozzini, conferma sperimentalmente le previsioni di Kastler sull'effetto Cotton-Mouton nella regione delle microonde, attraverso l'analisi della birifrangenza in sostanze paramagnetiche immerse in un campo magnetico statico parallelo al piano dell'onda ma con direzione né parallela né ortogonale al campo magnetico dell'onda, e di grandezza tale da realizzare condizioni di risonanza nel

⁴ Molte notizie qui riportate sono tratte da: A. Gozzini, *Microwave physics in Pisa in the fifties*, in *The Origins of Solid-State Physics in Italy: 1945-1960*, Ed. G. Giuliani (SIF, Bologna 1988); P. Rossi, *La Fisica Pisana dopo la Seconda Guerra Mondiale (1947-1982)* Annali di Storia delle Università italiane – Vol. 14 (2010).

campione. Con Battaglia vengono poi sviluppate tecniche per la misura della dispersione in gas e in vapori [36], ma anche per la stabilizzazione in frequenza di klystron, e per le misure di riflessione, dispersione e assorbimento in gas sottoposti a pressione [37]. Per tutti gli anni '60 Battaglia si sarebbe poi occupato di spettroscopia in gas, in particolare relativamente ad effetti di allargamento e shift di righe di assorbimento nelle microonde in differenti condizioni di pressione, per riprendere poi a collaborare con Gozzini su risonatori Fabri-Perot nelle microonde [38].

4.2. Erseo Polacco

Laureato nel 1952 con una tesi di spettroscopia a microonde finalizzata allo studio dello spettro di rotazione del cianuro di bromo, Erseo Polacco con il primo lavoro sulla birifrangenza magnetica [35] di sostanze paramagnetiche nella regione di risonanza, comincia ad occuparsi di un tema che avrebbe avuto caro negli anni successivi per mettere in evidenza la birifrangenza del vuoto. Assieme a Gozzini, Polacco progetta e realizza un rivelatore a doppia cavità per lo studio della costante dielettrica nelle microonde [39], una tecnica utilizzata negli anni successivi in molte altre applicazioni e tipi di campioni.

A partire dagli anni '60 Polacco, dopo un periodo di ricerca trascorso prima in Francia e successivamente in Inghilterra, inizia ad occuparsi di fisica non lineare studiando transizioni a due fotoni e utilizzando come sorgente un laser di potenza a rubino (il Laser era da poco, nel 1960, stato realizzato da Maiman). Tornato in Italia continua ad occuparsi di misure di ottica e coerenza della luce, assieme ad un gruppo di collaboratori tra cui Giuseppe Fornaca, Salvatore Carusotto e Mario Jannuzzi con il quale aveva già collaborato in Inghilterra [40], [41]. Il contributo di Carusotto, in particolare, basato su calcoli di elettrodinamica quantistica, aveva consentito di mettere in evidenza la relazione tra proprietà statistiche della radiazione e metodi semiclassici per la determinazione della probabilità di assorbimento a due fotoni.

Negli anni '70 Polacco comincia una collaborazione con Zavattini, Torelli e Gorini che lo avrebbe portato nei decenni successivi assieme anche a Salvatore Carusotto, Enzo Campani, e Anna Nobili, ad interessi rivolti a molti aspetti di carattere fondamentale della fisica: a partire da esperimenti di spettroscopia X utilizzando come sonde fasci di muoni e di pioni [42], alla verifica del principio di equivalenza e della "quinta forza" con metodi di interferometria ottica [43], [44], allo studio della birifrangenza del vuoto [45], solo per citarne alcuni.

4.3. Gerardo Alzetta

Laureato sotto la guida di Puccianti nel 1947, con una tesi sull'effetto pelle nei conduttori ferromagnetici, dopo un periodo trascorso nell'industria e uno nell'Istituto di Mineralogia dell'Università di Pisa occupandosi

di diffrazione a raggi X, Gerardo Alzetta entrerà a far parte del “gruppo Gozzini” nel 1958. Nella sua lunga attività di ricerca, Alzetta ha collaborato in vari periodi con quasi tutti i gruppi sperimentali di Fisica della Materia nell'Istituto di Fisica.

Dopo il successo ottenuto con la realizzazione della camera odoscopica utilizzando tubicini riempiti di gas, Gozzini e Franzinetti affidano ad Alzetta il compito di costruire una camera odoscopica a stato solido utilizzando celle elettroluminescenti di solfuro di zinco drogato con rame o manganese. Tale progetto non si realizzò per difficoltà sperimentali ma fu importante perché rappresentò un'esperienza concepita in ambito stato solido invece che con uso dei sistemi a gas abitualmente impiegati; per tale occasione Fieschi e Levialdi contribuirono con la loro esperienza sui cristalli drogati. Nei primi anni '60, Alzetta studia fenomeni di piezoluminiscenza in materiali a base di solfuro di zinco [46], e processi di rilassamento di centri paramagnetici di manganese immersi in cloruro di sodio [47]. Di questo periodo è la collaborazione con Santucci e con Battaglia con il quale continuerà spesso a collaborare anche negli anni successivi.

Dalla seconda metà degli anni '60 Alzetta inizia a lavorare con Gozzini, Arimondo, Allegrini e Ascoli, una collaborazione che si estenderà su vari temi negli anni successivi, sia su sistemi atomici e molecolari che sistemi solidi. I primi lavori sono sulla rivelazione della risonanza magnetica tramite lo studio del momento angolare assorbito dalla radiazione in esperimenti di risonanza paramagnetica [26] esteso poi allo studio delle transizioni a più fotoni [48].

Nei primi anni '70 pur continuando studi di triboluminescenza in cristalli [49] e, assieme a Battaglia di radiometria nelle microonde, si occupa assieme a Luigi Moi di fluorescenza di atomi e molecole [50]. Nella seconda metà degli anni '70 si occupa assieme ad Maria Allegrini, Luigi Moi e lo stesso Gozzini, di trasferimento di energia elettronica nelle collisioni di atomi eccitati [51] e porta a termine due importanti lavori sulle transizioni a radiofrequenza in vapori orientati di sodio [29] e sulle risonanze iperfini in vapori di sodio irraggiati da luce di un laser dye (*dark resonances*) [52], esperimento a cui abbiamo accennato precedentemente. L'importanza ulteriore di quell'esperimento [52] sta anche nell'aver dimostrato come sia possibile risolvere spazialmente una risonanza magnetica.

Numerosi altri risultati vengono ottenuti fino agli anni recenti con la collaborazione anche di Maccarrone, Mango e Fuso, e vanno dall'effetto Frank-Condon, alle transizioni a più fotoni, all'emissione di atomi alcalini indotta da luce, agli effetti di coerenza sui sottolivelli Zeeman nel pompaggio ottico di atomi di rubidio, all'aumento dell'assorbimento dell'effetto Hanle con opportuna configurazione di un fascio laser e un campo magnetico.

4.4. Sergio Santucci

Laureato nel 1959, Sergio Santucci si inserisce nell'area di fisica della materia nei primi anni '60, collaborando con Alzetta e Minnaja nello studio della piezoluminescenza in fosfori di solfuro di zinco[46]; successivamente Santucci svolge gran parte della sua attività di ricerca occupandosi di proprietà magnetiche in materia condensata. Tra i principali temi affrontati troviamo: meccanismi di rilassamento di impurezze magnetiche in matrici solide [47], trattazioni teoriche e sperimentali delle forme di righe di assorbimento causate da effetti di doppia risonanza [53], spettroscopia a due fotoni nella regione delle microonde [54], rivelazione longitudinale della doppia risonanza di spin elettronico [55] e del corrispondente tempo di rilassamento [56], studio di effetti di bistabilità nella risonanza paramagnetica elettronica [57], spettroscopia non lineare ad alta sensibilità per lo studio di moti molecolari lenti [58], risonanze stocastiche in sistemi paramagnetici [59].

Tra i suoi collaboratori negli anni '60 troviamo anche Arriguccio Battaglia e Adriano di Giacomo. Nei successivi anni '70 e '80 il gruppo di ricerca attorno a lui comprende Massimo Martinelli, Pierangelo Rolla, Lucio Pardi, Marco Giordano e Dino Leporini.

Quando Santucci si trasferisce a Perugia come professore ordinario, il suo gruppo si dedica allo studio di materiali di rilevante importanza sperimentale come polimeri, colloidi, cristalli liquidi, e macromolecole.

4.5. Franco Strumia

Dopo essersi laureato nel 1963 discutendo una tesi sul pompaggio ottico di vapori di Sodio, e perfezionato presso la Scuola Normale Superiore nel 1967, sotto la guida di Gozzini, con una tesi riguardante il potere rotatorio dei vapori dei metalli alcalini orientati e sua applicazione allo studio del pompaggio ottico, oggetto successivamente delle pubblicazioni [60] e [61], Franco Strumia inizia una intensa attività di ricerca che lo vede collaborare dalla fine degli anni '60 alla metà '70 con Paolo Violino e Paolo Minguzzi; successivamente rimarranno nel suo gruppo Nadia Ioli, Giovanni Moruzzi, Nicolò Beverini e Augusto Moretti con i quali continuerà a collaborare anche nei decenni successivi. Sono di questi anni i progetti per la costruzione di orologi atomici passando per la realizzazione di filtri iperfini, per tecniche di pompaggio ottico e per il controllo delle linee di risonanza di vapori di metalli alcalini [62], [63], [64]. Si consolida da allora il filone di ricerca sui fasci atomici e sulla costruzione di laser attivi nel lontano infrarosso, funzionali al progetto di realizzare standard di frequenza con orologi atomici usando Calcio o Magnesio [65], in collaborazione con l'istituto INRIM di Torino. A partire dalla metà degli anni '70 si inseriranno nel gruppo di ricerca anche Massimo Inguscio e Mauro

Tonelli [66], [67]. Nella seconda metà degli anni '70, Minguzzi e Tonelli proseguiranno la loro attività indipendentemente mentre si intensifica la collaborazione di Inguscio con il restante gruppo raccolto attorno a Strumia, collaborazione che si protrae sostanzialmente fino a metà degli anni '80. Vengono ancora affrontati temi collegati a Laser pompati otticamente, in presenza di effetto Stark [68], ma anche problemi di ottica con effetto Hanle [69], [70] ed analisi di forme di righe di molecole complesse, con il supporto computazionale di Giovanni Moruzzi [71] per lo sviluppo di software per l'interpretazione degli spettri molecolari. Verso la fine degli anni '80 viene realizzato raffreddamento Laser su campioni di Calcio e Magnesio [72] dando così il via ad una importante linea di ricerca della scuola sperimentale pisana.

Nei decenni successivi l'attività del gruppo continua nel campo della spettroscopia laser su atomi e molecole, su campioni atomici di frequenza, sulle sorgenti laser dal lontano infrarosso all'ultravioletto e sulla spettroscopia laser non lineare.

4.6. Paolo Minguzzi

Paolo Minguzzi si laurea nel 1965 sotto la guida di Adriano Gozzini con una tesi su vapori di alcalini orientati otticamente con il metodo della rotazione della polarizzazione di un fascio di probe. I temi legati al pompaggio ottico, alle misure di rilassamento degli atomi orientati, dovuti a collisioni, e loro dipendenza dalle temperatura, ma anche i fondamenti di teoria della misura e l'interpretazione teorica delle misure di rilassamento, saranno sempre presenti nella sua attività di ricerca successiva. Dopo la laurea, come già ricordato, fino alla metà degli anni '70 fa parte del gruppo sperimentale di spettroscopia atomica e molecolare che annovera anche Strumia, Violino e Beverini. Sono anni di risultati importanti che si possono vedere nei già citati lavori [62], [63] ma anche nel lavoro sul pompaggio ottico di vapori di Litio [73], in quello dove viene misurato il tempo di rilassamento iperfino in vapori di cesio in presenza di collisioni con gas esterni [74], nel lavoro dove vengono proposti metodi ottici per la misura della densità dei vapori d'argento [75], e dove viene proposto come controllare la tunabilità di laser attivi nell'infrarosso tramite effetto Stark [67].

A partire dalla seconda metà degli anni '70 Minguzzi percorre una strada autonoma con un proprio gruppo di ricerca nel quale lavoreranno fino ai primi anni 2000 Mauro Tonelli e Alberto Di Lieto. In questo lungo periodo l'attività è collocata nella spettroscopia atomica e molecolare, utilizzando sorgenti laser, spesso costruite in laboratorio, sia a CO₂ che a centri di colore.

I temi affrontati vanno dalla spettroscopia optoacustica [76] alla spettroscopia ad alta precisione utilizzando l'effetto Stark [77], alla spettroscopia

pia roto-vibrazionale in molecole [78], [79] con il supporto teorico di Giovanni Buffa e Ottavio Tarrini, alle proprietà ottiche di centri di impurezza in cristalli ionici [80], a processi di luminescenza in cristalli drogati con terre rare [81]. A partire dagli anni '80 il laboratorio si specializza in cristalli per applicazioni fotoniche, crescita di monocristalli isolanti per sorgenti laser a stato solido, fibre monocristalline, sorgenti a stato solido da UV a IR e fotodeposizione di nanostrutture per ottica non lineare. Negli anni successivi, Minguzzi intraprende una nuova linea di ricerca, in collaborazione con il Laboratorio di Legnaro, riguardante la misura delle frequenze di transizione e shift isotopici in atomi radiattivi confinati in trappole magnetooptiche per lo studio della violazione di parità atomica [82].

4.7. Ennio Arimondo

Ennio Arimondo si laurea nel 1964 con una tesi sulla rivelazione meccanica della risonanza magnetica, sotto la guida di Adriano Gozzini. Negli anni successivi alla tesi di laurea e al Perfezionamento, conseguito nel 1967, sono i primi lavori dedicati alla risonanza magnetica nei solidi [83], [26], [84]. Negli anni '70 e nei decenni successivi Arimondo raggiunge molti risultati originali in vari problemi collegati alla spettroscopia laser ad alta risoluzione di atomi e molecole [85-89], ma anche ai meccanismi di coerenza atomica, raffreddamento laser [90] e interferenza.

Degli anni '70, è un importante contributo [30] legato alla spiegazione del fenomeno della "riga nera" osservato da Gerardo Alzetta; Arimondo basa l'interpretazione del quenching dell'assorbimento in termini dell'intrappolamento coerente di popolazione, un'idea che avrebbe poi avuto successo in molti altri contesti. A partire dalla seconda metà degli anni Settanta vengono studiati fenomeni ottici non lineari e, successivamente, vengono realizzati esperimenti innovativi, con supporto di teorie, sul comportamento bistabile e caotico nell'interazione laser-materia [91], [92], [93]. Tra i collaboratori di Arimondo in questi anni troviamo Riccardo Mannella, Bruno Zambon e Andrea Fioretti. Accanto a lavori di carattere fondamentale, Arimondo affronta anche temi di carattere applicativo-tecnologico, che vanno dalla trasmissione ottica in buche quantistiche multiple [94], all'ablazione laser [95], alla deposizione di film sottili per mezzo di laser [96], e molto altro. A queste esperienze partecipano anche Maria Allegrini e Francesco Fuso.

Negli anni successivi Arimondo affianca alle linee di ricerca sopra elencate, ricerche pionieristiche sul raffreddamento e confinamento laser di vapori atomici finalizzate in particolare all'ingegneria quantistica, al controllo di atomi ultrafreddi confinati in reticoli ottici, e all'informazione quantistica, ciò costituisce una rilevante parte della produzione attuale del suo laboratorio ove sono impegnati Donatella Ciampini e Oliver Morsch.

4.8. Maria Allegrini

Laureata nel 1969 sotto la guida di Adriano Gozzini, con una tesi riguardante l'osservazione di onde evanescenti nella regione ottica, Maria Allegrini consegue il titolo PhD all'Università di Reading con una tesi riguardante "Polaron Anomalies in the magnetic behavior of the III-V semiconductors".

Negli anni successivi la maggior parte della sua attività di ricerca ha riguardato la spettroscopia Laser di atomi e molecole, ma anche aspetti sperimentali legati a problemi di Fisica della Materia condensata, come ablazione laser di superfici, fotodeposizione Laser, fotoluminescenza di materiali, microscopie ottiche, sistemi nanostrutturati, nanolitografia, ecc..., avendo come principali collaboratori Gerardo Alzetta, Cesare Ascoli, Luigi Moi, Francesco Fuso, e molti altri.

Lo studio sulle onde evanescenti [97], iniziato con la tesi di laurea, sarà il punto di partenza per i successivi risultati sulla microscopia a campo prossimo. Degli anni '70 sono gli studi sulla distribuzione delle energie in collisioni atomiche binarie [98] importanti per le successive interpretazioni di processi di generazione a valanga [51]. Numerosi sono i risultati ottenuti nel campo della spettroscopia ad alta risoluzione [99], la formazione di ioni negativi nella collisione con atomi di Rydberg [100] e la misura della costante di Rydberg con spettroscopia a due fotoni [101]. Gli anni successivi vedranno Maria Allegrini impegnata in molte differenti aree della fisica della materia condensata: solo per citarne alcune, si tratta di studi che vanno dalla microscopia ottica a campo prossimo [102] all'ablazione Laser [103] alla nanoscrittura su materiali polimerici [104] al raffreddamento Laser di atomi e molecole [105] allo studio di effetti gravitometrici sulla terra [106].

5. L'eredità di Bassani e gli sviluppi della Fisica della Materia Teorica all'Istituto di Fisica di Pisa dopo il 1969

Della nascita della Fisica Teorica dei Solidi a Pisa, dei ricercatori formati attorno a Bassani negli anni della sua permanenza a Pisa dal 1967 al 1969 e dei temi di ricerca affrontati è ben stato illustrato dall'intervento di Flavio Toigo riportato in questo volume. È parimenti esaustiva la rassegna che Giuseppe La Rocca ha preparato per questo volume, riguardante il tessuto scientifico creato da Bassani quando torna a Pisa nel 1980, come professore della Scuola Normale Superiore.

Voglio qui fare un breve intervento per analizzare quanto sia stato prodotto in questo settore dal gruppo di ricerca operante nell'istituto di Fisica, sostanzialmente a partire dagli anni '70, dopo la partenza di Franco Bassani per Roma. Il gruppo teorico di Fisica dei Solidi è coordinato

prima da Giuseppe Pastori Parravicini fino al 1991, anno in cui diventa professore Ordinario a Pavia, e poi da me fino ai nostri giorni.

Nei primi anni '70 il gruppo comprendeva Giuseppe Pastori Parravicini, Liana Martinelli, Emilio Doni, Raffaele Resta, Lorenzo Resca e Giuseppe Grosso. Dalla metà degli anni '70 Lorenzo Resca si trasferisce definitivamente alla Catholic University, a Washington D.C., mentre agli inizi degli anni '80 Raffaele Resta si trasferisce a Trieste dove ricopre il ruolo di Professore Ordinario dal 1994.

I temi di ricerca affrontati in quegli anni possono essere classificati in due classi interconnesse: quelli principalmente orientati alla formulazione di nuovi metodi e nuove procedure per il calcolo degli stati elettronici e vibrazionali dei solidi, e quelli maggiormente orientati alla interpretazione o alla previsione di proprietà sperimentali di nuovi materiali, siano essi cristalli perfetti o disordinati, in una, due o tre dimensioni, o cristalli organici.

Volendo dare un sia pur rapido sommario degli aspetti più significativi affrontati in quegli anni, possono essere citati gli argomenti di seguito elencati:

5.1. Teoria dei livelli elettronici nei solidi perfetti

Partendo da un approccio basato sulle funzioni localizzate, in seguito ampiamente confermato sulla base dei moderni concetti di localizzazione, sono stati affrontati i livelli elettronici in grafite [107] e altri composti isostrutturali [108], [109], aprendo un vasto settore di ricerche sui composti lamellari, tuttora di grande attualità dopo la realizzazione dell'esfoliazione di singoli strati atomici di grafite. Notevole attenzione è stata dedicata allo studio dei principi primi di bande di energia ed effetti a molti corpi in cristalli molecolari di particolare interesse biologico quali idrogeno solido [110], [111], ghiaccio [112], metano [113], solidi di gas rari [114] e nell'idruro di litio [115], prototipo dei cristalli ionici. Tale studio è stato possibile per l'introduzione di un nuovo formalismo che utilizza orbitali molecolari localizzati e onde piane per descrivere interazioni e correlazioni tra le unità del cristallo.

5.2. Teoria delle simmetrie e spettroscopia lineare e non lineare

L'utilizzo della teoria dei gruppi per la classificazione degli stati elettronici, per lo studio dell'interazione elettrone-fonone, per l'analisi di molte valli equivalenti in semiconduttori, si è rivelato essenziale agli inizi degli anni '70 per interpretare esperimenti di spettroscopia non lineare, assorbimenti a più fotoni effetti dell'inversione temporale, regole di selezione per transizioni indirette [116], [117].

5.3. Risonanze eccitoniche in atomi, molecole e solidi. Livelli di impurezza

È stata proposta una descrizione realistica degli effetti a molti corpi negli stati eccitati di atomi, molecole e solidi per l'interpretazione di misure spettroscopiche, soprattutto legate all'uso della radiazione di sincrotrone

per gli eccitoni di core, adottando una generalizzazione del formalismo della massa effettiva [118-124].

5.4. Schermo dielettrico in semiconduttori e teoria del funzionale densità

La funzione dielettrica, sia espressa in funzione del vettore d'onda che delle coordinate spaziali, ha numerosissime applicazioni nella fisica dei materiali: dal calcolo degli spettri vibrazionali, alla determinazione di pseudopotenziali schermati, all'interazione elettrone-lacuna nella teoria degli eccitoni, alla determinazione del potenziale delle impurezze. Gli studi proposti in questo campo hanno dimostrato che le equazioni usate per descrivere lo schermo per le impurezze nei metalli possono essere utilizzate con appropriate condizioni al contorno anche per lo schermo dielettrico in semiconduttori [125], [126]. È stato inoltre dimostrato come sia possibile calcolare la risposta dielettrica in un semiconduttore sottoposto ad un campo elettrico uniforme, nel quadro della teoria del funzionale densità [127].

5.5. Metodi di ricorrenza e rinormalizzazione per reticoli, superreticoli e sistemi aperiodici

Basati sul formalismo della funzione di Green, i metodi dello spazio reale come quello di ricorrenza e quello di rinormalizzazione si sono dimostrati di notevole affidabilità in un gran numero di problemi sia nei solidi perfetti [128], ma ancor più in superreticoli, buche quantistiche, superfici [129], sistemi aperiodici e sistemi disordinati. Dal punto di vista metodologico è stata dimostrata l'equivalenza dal punto di vista algebrico dei metodi di rinormalizzazione e ricorrenza, e l'estensione di quest'ultimo a frazioni continue con matrici [130], [131], la relazione col metodo dei momenti [132] e con altri metodi di funzione di memoria.

5.6. Fononi e calcoli di dinamica reticolare. Interazione elettrone fonone e fenomenologia Jahn-Teller e Renner-Teller

È dimostrato [133], [134] che calcoli di dinamica molecolare da principi primi in teoria microscopica lineare possono predire correttamente le energie delle branche fononiche in semiconduttori covalenti e parzialmente ionici al costo di utilizzare matrici dielettriche di dimensioni opportune. È stato inoltre dimostrato che le tecniche di ricorrenza risultano estremamente vantaggiose anche nel caso di sistemi elettronici rilassati e in presenza di effetto Jahn-Teller [135], [136], [137]; tali tecniche sebbene introdotte in letteratura in vari contesti e forme differenti, forniscono una base di descrizione e interpretazione di fenomeni che coinvolgono accoppiamento elettrone-fonone.

Numerosi altri filoni di ricerca sono nati negli anni successivi dalle attività e dai ricercatori sopra elencati. Solo per accennarne alcune meritano di essere ricordate: quelle concernenti trasporto quantistico in nanostrutture, metodi della funzione di Green di non equilibrio per gli stati elettronici in buche quantistiche di semiconduttori, proprietà strutturali, elettroniche, ottiche e di trasporto di cristalli organici e polimeri conduttori, teoria moderna della polarizzazione e fase geometrica quantistica, teoria della polarizzazione in ferroelettrici, teoria generale dello stato isolante della materia, e molto altro.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare Gerardo Alzetta, Paolo Minguzzi e Franco Strumia per le informazioni che mi hanno fornito.

Bibliografia

- [1] F. Seitz, *Modern Theory of Solids*, Mc Graw-Hill, New York 1940.
- [2] P. Drude, *Zur Elektronentheorie der Metalle*, Ann. Phys. (Leipzig) **1**, 566; **3**, 369, 1900.
- [3] H.A. Lorentz, *The motion of electrons in- metallic bodies*, Ned. Akad. Wet. Proceedings of the Section of Sciences **7**, 438, part I; 585 part. II; 684 part III, 1904-1905.
- [4] L. Hoddeson, G. Baym, *The development of the quantum-mechanical electron theory of metals: 1928-1933*, Reviews of Modern Physics **59**, 287, 1987.
- [5] W. Pauli, *Über Gasentartung und Paramagnetismus*, Z. Phys. **41**, 81, 1927.
- [6] A. Sommerfeld, *Zur Elektronentheorie der Metalle*, Naturwissenschaften **15**, 825, 1927.
- [7] F. Bloch, *Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern*, Z. Phys. **52**, 555, 1928.
- [8] A. Sommerfeld, H. Bethe, *Elektronentheorie der Metalle* in Handbuch der Physik (Springer, Berlin) **24/2**, 333, 1933.
- [9] R.E. Peierls, *Elektronentheorie der Metalle*, Ergeb. Exacten Naturwiss. **11**, 264, 1932.
- [10] F. Bloch, *Elektronentheorie der Metalle* in Handbuch der Radiologie, 2nd ed. **VI**, 226, 1933.
- [11] J.C. Slater *Electronic Structure of Metals*, Rev. Mod. Phys. **6**, 208, 1934.
- [12] E. Wigner, F. Seitz, *On the Constitution of Metallic Sodium*, Phys. Rev. **43**, 804, 1933.

- [13] G. Giuliani, *Il Nuovo Cimento: Novant'anni di fisica in Italia 1885-1944* La Goliardica Pavese, Pavia 1996.
- [14] L. Graetz, *Le Nuove Teorie Atomiche e la Costituzione della Materia*, Hoepli, Milano 1924.
- [15] E. Fermi, *Introduzione alla Fisica Atomica*, Zanichelli, Bologna 1928.
- [16] E. Fermi, *Molecole e Cristalli*, Zanichelli, Bologna 1934.
- [17] G. Castelfranchi, *Fisica Moderna*, Hoepli, Milano 1929; Traduzione inglese della prima parte di *Recent Advances in Atomic Physics Vol 1* (J&A Churchill, London 1932).
- [18] G. Giuliani, P. Marazzini, *The Italian physics community and the crisis of classical physics: New radiations, quanta and relativity* (1896-1925), *Annals of Science* **51**, 355, 2006.
- [19] A. Gozzini, *Microwave physics in Pisa in the fifties in The Origins of Solid-State Physics in Italy: 1945-1960*, Ed. G. Giuliani, SIF, Bologna 1988.
- [20] G. Bernardini, G. Gentile Jr. and G. Polvani, *Questioni di Fisica*, Sansoni, Firenze 1947.
- [21] A. Gozzini, *La costante dielettrica dei gas nella regione delle microonde*, *Il Nuovo Cimento* **8**, 361, 1951.
- [22] A. Gozzini, *Sull'effetto Faraday di sostanze paramagnetiche nella regione delle microonde*, *Il Nuovo Cimento* **8**, 928, 1951.
- [23] A. Battaglia, A. Gozzini, E. Polacco, *Birifrangenza magnetica di sostanze paramagnetiche nella condizione di risonanza*, *Il Nuovo Cimento* **10**, 1205, 1953.
- [24] M. Conversi, A. Gozzini, *The Hodoscopic Chamber: a New Instrument for Nuclear Research*, *Il Nuovo Cimento* **11**, 189, 1955.
- [25] G. Alzetta, A. Gozzini, *Un effet mécanique lié à la résonance paramagnétique* in *Electronic Magnetic Resonance and Solid Dielectrics*, Proc. XIIth Colloque Ampère, Bordeaux 1963, R. Servant, A. Charru eds., North Holland, Amsterdam 1964, p. 209.
- [26] G. Alzetta, E. Arimondo, C. Ascoli, A. Gozzini, *Paramagnetic Resonance Experiments at Low Fields with Angular Momentum Detection*, *Il Nuovo Cimento* **52**, 392, 1967.
- [27] A. Gozzini, D. Giulietti, B. Zambon, *Rivelazione meccanica della dispersione paramagnetica*, rapporto tecnico n. 1/76 LAFAM – CNR 1976.
- [28] A. Gozzini, *Il pompaggio ottico*, *Giornale di Fisica* **8**, 243, 1967.
- [29] G. Alzetta, A. Gozzini, L. Moi, G. Orriols, *An Experimental Method for the observation of R.F. Transitions and Laser Beat Resonances in Oriented Na Vapour*, *Il Nuovo Cimento* **36**, 5, 1976.

- [30] E. Arimondo, G. Orriols, *Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping*, Lett. Nuovo Cimento **17**, 333, 1976.
- [31] I. Bonizzoni, G. Giuliani, *La nascita della fisica della materia: 1945-1965*, in *Per una storia della fisica italiana (1945-1965)*, I", Pavia 2002, pp. 1-34.
- [32] G. Chiarotti, *L'ingresso del CNR e la crescita negli anni '60*, in *Atti Del Convegno Nazionale di Struttura della Materia*, Pavia 1982.
- [33] F. Bassani, G. Pastori Parravicini, *Electronic States and Optical Transitions in Solids*, Pergamon Press, Oxford 1975.
- [34] F. Bassani, U.M. Grassano, *Fisica dello Stato Solido*, Boringhieri, Torino 2000.
- [35] A. Battaglia, A. Gozzini, E. Polacco, *Birifrangenza magnetica di sostanze paramagnetiche nelle condizioni di risonanza*, Il Nuovo Cimento **10**, 1205, 1953.
- [36] A. Battaglia, A. Gozzini, *Un appareil pour l'étude de la dispersion des gaz et vapeurs, dans la bande des Hyperfréquences*, Onde Électrique **35**, 500, 1955.
- [37] A. Battaglia, F. Bruin, A. Gozzini, *Microwave apparatus for the measurement of the refraction, dispersion and absorption of gases at relatively high pressure*, Il Nuovo Cimento **7**, 1, 1958.
- [38] A. Battaglia, A. Gozzini and, G. Boudouris, *Experimental study of confocal Fabry-Perot microwave resonators*, Il Nuovo Cimento B **69**, 121, 1970.
- [39] A. Gozzini, E. Polacco, *Méthode pour la mesure de la constante diélectrique des gas dans la bande des Hyperfréquences*, C.R. Acad. Sci. Paris. **237**, 1497, 1953; *ibid.* 1652, 1953.
- [40] G. Fornaca, M. Iannuzzi, E. Polacco, *Two-photon absorption in atomic or molecular systems*, Il Nuovo Cimento **36**, 1230, 1965.
- [41] S. Carusotto, G. Fornaca, E. Polacco, *Two-photon absorption and coherence*, Physical Review **157**, 1207 (1967); *Multiphoton Absorption and Coherence*, Physical Review **165**, 1391, 1968.
- [42] A. Placci, E. Polacco, E. Zavattini, K. Ziock, C. Carboni, U. Gastaldi, G. Gorini, G. Torelli, *Observation of muonic X-rays in hydrogen gas*, Physics Letters B **32**, 413, 1970.
- [43] S. Carusotto, V. Cavasinni, A. Mordacci, F. Perrone, E. Polacco, E. Iacopini, G. Stefanini, *Test of g universality with a Galileo type experiment*, Physical Review Letters **69**, 1722, 1992.
- [44] A. Nobili *et al.*, *The "Galileo Galilei" (GG) project: Testing the equivalence principle in space and on earth*, Advances in Space Research **25**, 1231, 2000.

- [45] D. Bakalov *et al.*, *PVLAS: Vacuum Birefringence and production and detection of nearly massless, weakly coupled particles by optical techniques*, Nuclear Physics B **35**, 180, 1994.
- [46] G. Alzetta, N. Minaja, S. Santucci, *Piezoluminescence in zinc-sulphide phosphors*, Il Nuovo Cimento **23**, 910, 1962.
- [47] G. Alzetta, P.R. Crippa, S. Santucci, *Relaxation of manganese paramagnetic centres in NaCl*, Il Nuovo Cimento B **42**, 100, 1966.
- [48] G. Alzetta, E. Arimondo, C. Ascoli, *Angular-momentum detection of many-photon transitions*, Il Nuovo Cimento B **54**, 107, 1968.
- [49] G. Alzetta, I. Chudachek, R. Scarmozzino, *Excitation of triboluminescence by deformation of single crystals*, Physica Status Solidi (a) **1**, 775, 1970.
- [50] G. Alzetta, A. Kopystynska, L. Moi, *Laser-induced molecular and atomic fluorescence spectra of alkali vapours*, Lettere Al Nuovo Cimento **6**, 677, 1973.
- [51] M. Allegrini, G. Alzetta, A. Kopystynska, L. Moi, G. Orriols, *Electronic energy transfer induced by collision between two excited sodium atoms*, Optics Communications **19**, 96, 1976.
- [52] G. Alzetta, L. Moi, G. Orriols, *Nonabsorption hyperfine resonances in a sodium vapour irradiated by a multimode dye-laser*, Il Nuovo Cimento B **52**, 209, 1979.
- [53] A. Battaglia, A. Di Giacomo, S. Santucci, *Shift and broadening of microwave absorption lines due to double resonance effects*, Il Nuovo Cimento B **43**, 89, 1966.
- [54] F. Chiarini, M. Martinelli, S. Santucci, P. Bucci, *Double-photon transitions in microwave spectroscopy*, Phys. Rev. A **6**, 1300, 1972.
- [55] F. Chiarini, M. Martinelli, L. Pardi, S. Santucci, *Electron-spin double resonance by longitudinal detection: Line shape and many-quantum transitions*, Phys. Rev. B **12**, 847, 1975.
- [56] M. Martinelli, L. Pardi, C. Pinzino, S. Santucci, *Electron-spin double resonance by longitudinal detection. II. Signal dependence on relaxation time*, Phys. Rev. B **16**, 164, 1977.
- [57] M. Giordano, M. Martinelli, L. Pardi, S. Santucci, *Observation of bistability effects in electron paramagnetic resonance experiments*, Phys. Rev. Lett. **59**, 327, 1987.
- [58] M. Giordano, D. Leporini, M. Martinelli, L. Pardi, S. Santucci, *A new non-linear high-sensitivity spectroscopy in the slow molecular motion regime*, Liquid Crystals **3**, 989, 1988.
- [59] L. Gammaitoni, M. Martinelli, L. Pardi, S. Santucci, *Stochastic resonance in paramagnetic resonance systems*, J. Statistical Physics **70**, 425, 1993.

- [60] F. Strumia, *Magnetic rotatory power of optically pumped Na vapour and its application to the study of longitudinal relaxation time and of buffer-gas-pressure broadening of optical lines*, Il Nuovo Cimento B **44**, 387, 1966.
- [61] A. Gozzini, N. Ioli, F. Strumia, *A new method for the study of the diffusion of optically oriented atoms in a buffer gas*, Il Nuovo Cimento B **49**, 185, 1967.
- [62] K. Ernst, P. Minguzzi, F. Strumia, *A paschen-back hyperfine filter for optical pumping*, Il Nuovo Cimento B **51**, 202 (1967); *Hyperfine relaxation in Cs vapour*, Phys. Lett. A **27**, 418, 1968.
- [63] N. Beverini, F. Strumia, *High efficiency hyperfine filter for the caesium resonance lines*, Optics Commun. **2**, 189, 1970.
- [64] N. Beverini, F. Strumia, *On the population inversion between the hyperfine sublevels of Cs*, Optics Commun. **4**, 56, 1971.
- [65] F. Strumia, *A proposal for a new absolute frequency standard, using a Mg or Ca atomic beam*, Metrologia **8**, 85, 1972.
- [66] G. Giusfredi, P. Minguzzi, F. Strumia, M. Tonelli, *Atomic beam measurement of the lifetime of the 3P1 metastable states of Mg and Ca*, Zeit. F. Physik A **274**, 279, 1975.
- [67] M. Inguscio, P. Minguzzi, F. Strumia, *Stark tunability of a CH₃F far infrared laser*, Infrared Physics **16**, 453, 1976.
- [68] M. Inguscio, A. Moretti, F. Strumia, *Electric Field Effects on the Efficiency of Optically Pumped Submillimeter Lasers*, IEEE Journal of Quantum electronics **16**, 955, 1980.
- [69] F. Strumia, *Non Linear Hanle Effect: Optogalvanic Detection and Application to Power Enhancement in Gas Lasers*, Journal de Physique, Colloque **44**, 117, 1983.
- [70] G. Bertuccielli, N. Beverini, M. Galli, M. Inguscio, F. Strumia, *Ramsey fringes in the nonlinear Hanle effect in a metastable atomic beam*, Optics letters **11**, 351, 1986.
- [71] G. Carelli, A. Di Siena, N. Ioli, A. Moretti, G. Moruzzi, F. Strumia, *Assignments of methanol laser lines by frequency measurements and Fourier transform spectroscopy*, Int. J. of Infrared and Millimetric Waves **15**, 619, 1994.
- [72] N. Beverini, E. Maccioni, F. Strumia, G. Vissani, *Laser cooling of Mg and Ca atomic beams*, Frequency Standards and Metrology: Proceedings of the Fourth Symposium, Ancona, 1989.
- [73] P. Minguzzi, F. Strumia, P. Violino, *Optical pumping of lithium vapour*, Optics Communications **1**, 1, 1969.

- [74] N. Beverini, P. Minguzzi, F. Strumia, *Foreign-gas-induced cesium hyperfine relaxation*, Physical Review A **4**, 550, 1971.
- [75] M. Meucci, P. Minguzzi, E. Ansuini, *Measurement of silver vapor density by an optical method*, Zeitschrift für Physik **271**, 299, 1974.
- [76] A. Di Lieto, P. Minguzzi, M. Tonelli, *Sub-Doppler optoacoustic spectroscopy*, Optics Communications **31**, 25, 1979.
- [77] A. Di Lieto, P. Minguzzi, M. Tonelli, *High-precision millimeter-wave spectroscopy with a Stark-sweep method*, Physical Review A **33**, 2109, 1986.
- [78] G. Buffa, A. Di Lieto, P. Minguzzi, O. Tarrini, M. Tonelli, *Pressure broadening of molecular lines in a Stark field*, Physical Review A **34**, 1065, 1986.
- [79] G. Buffa, S. Carocci, A. Di Lieto, P. Minguzzi, F. Quochi, O. Tarrini, M. Tonelli, *Speed dependence of pressure broadening in molecular rotational spectra using a novel technique*, Phys. Rev. Lett. **74**, 3356, 1995.
- [80] P. Minguzzi, F. Pozzi, M. Tonelli, G. Baldacchini, U.M. Grassano, *Optical properties of (F₂+)*H* and F-aggregate centers in NaCl:OH- crystals*, Physical Review B **44**, 12189, 1991.
- [81] R. Micheletti, P. Minguzzi, M.A. Noginov, M. Tonelli, *Up conversion luminescence of Er and Cr in YSGG laser crystals*, J. Opt. Soc. Am.: Optical Physics **11**, 2095, 1994.
- [82] S. Sanguinetti *et al.*, *Accurate measurements of transition frequencies and isotope shifts of laser-trapped francium*, Optics Letters **34**, 893, 2009.
- [83] E. Arimondo, *Angular-momentum detection in magnetic resonance at low fields*, Il Nuovo Cimento B **52**, 379, 1967.
- [84] E. Arimondo, *Angular momentum detection of non-linear phenomena in paramagnetic resonance*, Ann. Phys. **14**, 425, 1968.
- [85] M. Allegrini, E. Arimondo, *Radiofrequency transitions in a dressed atom*, J. Phys. B: Atomic and Molecular Physics **4**, 1008, 1971.
- [86] E. Arimondo, M. Inguscio, P. Violino, *Experimental determinations of the hyperfine structure in the alkali atoms*, Rev. Modern Physics **49**, 31, 1977.
- [87] E. Arimondo, H. Lew, T. Oka, *Deflection of a Na beam by resonant standing-wave radiation*, Physical Review Letters **43**, 753, 1979.
- [88] E. Arimondo, P. Glorieux, *The observation of transients in a CO₂ or N₂O in laser by modulation of an intracavity absorber*, Appl. Phys. Lett. **33**, 49, 1978.
- [89] E. Arimondo, *Submillimeter Lasers in methyl Iodide and its isotopic species*, Reviews of infrared and Millimeter waves **2**, 81, 1984.

- [90] A. Aspect, E. Arimondo, R. Kaiser, N. Vansteenkiste, C. Cohen-Tannoudji, *Laser cooling below the one-photon recoil energy by velocity-selective coherent population trapping*, Physical Review Letters **61**, 826, 1988.
- [91] E. Arimondo, D. Dangoisse, C. Gabbanini, E. Menchi, F. Papoff, *Dynamic behavior of bistability in laser with a saturable absorber*, J. Opt. Soc. America B: Optical Physics **4**, 287, 1987.
- [92] F. Papoff, A. Fioretti, E. Arimondo, G.B. Midlin, H. Solari, R. Gilmore, *Structure of chaos in the laser with saturable absorber*, Phys. Rev. Lett. **68**, 1128, 1992.
- [93] A. Fioretti, L. Guidoni, R. Mannella, E. Arimondo, *Evidence of stochastic resonance in a laser with saturable absorber: Experiment and theory*, J. Statistical Physics **70**, 403 (1993).
- [94] V. Pellegrini, F. Fuso, E. Arimondo, F. Castelli, L.A. Lugiato, G.P. Bava, P. Bernardi, *Nonlinear optical transmission in multiple quantum wells with ridged waveguides: Experiment and theory*, Physical Review A **50**, 5219, 1994.
- [95] S. Amoruso, V. Berardi, A. Dente, N. Spinelli, M. Armenante, R. Velotta, F. Fuso, M. Allegrini, E. Arimondo, *Laser ablation of Pb(Ti_{0.48}Zr_{0.52})O₃ target: characterization and evolution of charged species*, Journal of Applied Physics **78**, 494, 1995.
- [96] A. Iembo, F. Fuso, E. Arimondo, C. Ciofi, G. Pennelli, G.M. Curró, F. Neri, M. Allegrini, *Pulsed laser deposition and characterization of conductive RuO₂ thin films*, Journal of Materials Research **12**, 1433, 1997.
- [97] M. Allegrini, C. Ascoli, A. Gozzini, *Measurements of changes in length by an inhomogeneous wave device*, Optics Communications **2**, 435, 1971.
- [98] M. Allegrini, G. Alzetta, A. Kopystynska, L. Moi, G. Orriols, *On the process of energy transfer induced by collisions between two excited atoms*, Lettere al Nuovo Cimento **31**, 78, 1981.
- [99] M. Allegrini, L. Moi, *New laser-excited bands in Na₂*, Optics Communications **32**, 91, 1980.
- [100] M. Ciocca *et al.*, *Negative-ion formation in Rydberg atom interactions ($n = 740$)*, Phys. Rev. Lett. **56**, 704, 1986.
- [101] F. Biraben, J.C. Garreau, L. Julien, M. Allegrini, *New measurement of the Rydberg constant by two-photon spectroscopy of hydrogen rydberg states*, Phys. Rev. Lett. **62**, 621, 1989.
- [102] M. Allegrini, E. Arpa, C. Ascoli, P. Baschieri, F. Dinelli, C. Frediani, M. Labardi, A. Lio, T. Mariani, L. Vanni, *Scanning probe microscope with interchangeable AFM-FFM and STM heads*, Il Nuovo Cimento D **15**, 279, 1993.
- [103] A. Iembo *et al.*, *In situ diagnostics of pulsed laser deposition of ferroelectric Pb(Ti_{0.48}Zr_{0.52})O₃ on Si*, Appl. Phys. Lett. **63**, 1194, 1993.

- [104] S. Patanè *et al.*, *Near-field optical writing on azo-polymethacrylate spin-coated films*, Optics Communications **210**, 37, 2002.
- [105] R. Horchani, H. Lignier, P. Pillet, D. Comparat, A. Fioretti, M. Allegrini, *Rotovibrational cooling of molecules by optical pumping*, Phys. Rev. Lett. **109**, 183001, 2012.
- [106] M. Allegrini, *et al.*, *A laser gyroscope system to detect the gravito-magnetic effect on Earth*, Journal of Physics **375**, 062005, 2012.
- [107] F. Bassani, G. Pastori Parravicini, *Band structure and optical properties of graphite and of the layer compounds GaS and GeSe*, Il Nuovo Cimento **50**, 95, 1967.
- [108] E. Doni, G. Pastori Parravicini, *Energy bands and optical properties of hexagonal boron nitride and graphite*, Il Nuovo Cimento B **64**, 117, 1969.
- [109] E. Doni, G. Grosso, G. Spavieri, *Band structure and absorption edge of PbI₂*, Solid State Communications **11**, 493, 1972.
- [110] L.A. Gomez, G. Pastori-Parravicini, R. Resta, *Valence band structure and Davydov splittings in solid ortho-hydrogen*, J. Phys. C **6**, 1926, 1973.
- [111] R. Moccia, R. Resta, M. Zandomenighi, *Bound state properties of H₂ from the many-body Green's function method*, Chem. Phys. Lett. **37**, 556, 1976.
- [112] G. Pastori Parravicini, L. Resca, *Electronic states and optical properties of cubic ice*, Phys. Rev. B. **8**, 3009, 1973.
- [113] L. Piela, L. Pietronero, R. Resta, *Electron band structure of solid methane: Ab initio calculations*, Phys. Rev. B **7**, 5321, 1973.
- [114] S. Baroni, G. Grosso, G. Pastori Parravicini, *Hartree-Fock energy levels in solids: application to Argon*, Phys. Rev. B **23**, 6441, 1981.
- [115] G. Grosso, G. Pastori-Parravicini, *Hartree-Fock energy bands by the OPW method: LiH results*, Phys. Status Solidi B **20**, 2366, 1979.
- [116] G. Pastori Parravicini, L. Resca, *Symmetry analysis and electronic states in cubic ice*, J. Phys. C: Solid State Physics **4**, L314, 1971.
- [117] E. Doni, G. Pastori Parravicini, *Selection rules for indirect transitions and effect of time reversal symmetry I.*, J. Phys. C **6**, 2859 (1973); *II. Full-group procedure*, J. Phys. C **7**, 1786, 1974.
- [118] G. Pastori Parravicini, L. Resca, *Short-range interaction in the exciton effective-mass Hamiltonian*, Phys. Letters A **45**, 73, 1973.
- [119] E. Doni, R. Girlanda, G. Pastori Parravicini, *Selection rules for direct creation of biexcitons by giant two-photon absorption*, Solid State Comm. **17**, 189, 1975.
- [120] G. Grosso, L. Martinelli, G. Pastori Parravicini, *Excitons in rare gas atoms and solids*, Solid State Communications **25**, 435, 1978.

- [121] L. Resca, R. Resta, S. Rodriguez, *Core excitons in solid rare gases: Non structural theory*, Phys. Rev. B **18**, 702, 1978.
- [122] S. Baroni, G. Grosso, L. Martinelli, G. Pastori Parravicini, *Valence excitons and inner-shell excitons in gaseous and solid Argon*, Phys. Rev. B **20**, 1713, 1979.
- [123] L. Resca, R. Resta, *Ionized impurity scattering in semiconductors*, Phys. Rev. B **20**, 3254, 1979.
- [124] L. Resca, R. Resta, *Shallow-deep instabilities of donor impurity levels and excitons in many-valley semiconductors*, Phys. Rev. Lett. **44**, 1340, 1980.
- [125] R. Resta, *Thomas-Fermi dielectric screening in semiconductors*, Phys. Rev. B **16**, 2717, 1977.
- [126] F. Cornolti, R. Resta, *Non Linear impurity screening in semiconductors*, Phys. Rev. B **17**, 3239, 1978.
- [127] K. Kunc, R. Resta, *External fields in the self-consistent theory of electronic states: a new method for direct evaluation of macroscopic and microscopic dielectric response*, Phys. Rev. Lett. **51**, 686, 1983.
- [128] P. Giannozzi, G. Grosso, G. Pastori Parravicini, *Theory of electronic states in lattices and superlattices*, La rivista del Nuovo Cimento **13**, 1-80, 1990.
- [129] G. Grosso, S. Moroni, G. Pastori Parravicini, *Electronic structure of the InAs-GaSb superlattice by the renormalization method*, Phys. Rev. B **40**, 12328, 1989.
- [130] G. Grosso, G. Pastori Parravicini, A. Testa, *Continued fractions in the presence of critical points*, Phys. Rev. B **32**, 627, 1985.
- [131] P. Giannozzi, G. Grosso, S. Moroni, G. Pastori Parravicini, *The ordinary and matrix continued fractions in the theoretical analysis of Hermitian and relaxation operators*, Appl. Num. Mathematics **4**, 273, 1988.
- [132] P. Grigolini, G. Grosso, G. Pastori Parravicini, *Dynamic formulation of the moment and the recursion methods*, Solid State Commun. **46**, 881, 1983.
- [133] R. Resta, A. Baldereschi, *Local field effects and zone-center phonons in Si, Ge, GaAs and ZnSe*, Phys. Rev. B **24**, 4839, 1981.
- [134] R. Resta, *Local-field effects and phonon screening in polar semiconductors*, Phys. Rev. B **27**, 3620, 1983.
- [135] L. Martinelli, G. Pastori Parravicini, *Jahn-Teller effect and asymptotic behaviour of the recursion method coefficients*, Phys. Rev. B **37**, 10612, 1989.
- [136] L. Martinelli, M. Passaro, G. Pastori Parravicini, *Optical absorption, magnetic circular dichroism, and reduction factors in the Jahn-Tel-*

ler system E x e: exact solution with the continue-fraction formalism,
Phys. Rev. B **43**, 8395, 1991.

- [137] G. Bevilacqua, L. Martinelli, E.E. Vogel, *Renner-Teller interaction matrices and Green's function formalism*, Adv. Quantum Chemistry **44**, 45, 2003.

La nascita della fisica teorica dei solidi a Pisa: 1967-1969

Flavio Toigo*

1. Premessa

Sembrerà un po' strano che a presentare la nascita della Fisica Teorica dei Solidi a Pisa sia stato chiamato un padovano. L'invito che Giuseppe Grosso mi ha fatto, di ricordare il clima e l'ambiente scientifico nato intorno a Franco Bassani (figura 1) circa cinquanta anni fa, mi ha fatto molto piacere dato il mio forte legame con questo Dipartimento, non solo dal punto di vista scientifico, ma anche affettivo. Proprio in questo palazzo, che ospitava l'Istituto di Fisica, ho incontrato mia moglie, allora borsista nel gruppo di Santucci e Stefanini, che studiavano sperimentalmente i centri di colore negli alogenuri alcalini mediante la risonanza magnetica elettronica. Il grosso magnete utilizzato per tali studi era situato al piano terra dello storico edificio in Piazza Torricelli ed oggi fa bella mostra di sé nell'atrio della nuova sede del Dipartimento di Fisica.

Senza alcuna pretesa di ricostruire la storia del nostro settore scientifico, prima di entrare nel tema richiamato nel titolo di questa mia chiacchierata credo sia opportuno ricordare quale fosse la situazione complessiva della fisica italiana nel primo dopoguerra [1].

È ben vero che la ricerca fisica italiana negli anni trenta aveva raggiunto livelli di eccellenza e di notorietà grazie alle attività delle scuole di Enrico Fermi e di Bruno Rossi nei campi della fisica nucleare e dei raggi cosmici, ma per quanto riguarda la fisica della materia condensata il panorama complessivo era piuttosto arretrato. Infatti le ricerche sperimentali nei campi che sarebbero oggi ricondotti alla fisica dei solidi non erano affiancate in Italia da interpretazioni microscopiche che facessero riferimento alla meccanica quantistica, come invece lo erano negli Stati Uniti fin dalla fine degli anni venti. Per questo motivo, dopo la guerra la fisica italiana poté ripartire ancora con punte di eccellenza in settori della fisica delle particelle e dei raggi cosmici, mentre dovette superare un gap culturale di venti anni nei settori della materia condensata.

Per quanto riguarda la moderna fisica teorica dei solidi nel dopoguerra in Italia, il vero inizio si ha con il ritorno dagli Stati Uniti di Fausto Fumi,

* Professore Emerito, Università di Padova.



Figura 1. Franco Bassani.

che di propria iniziativa aveva trascorso tre anni nel gruppo di Frederick Seitz, prima a Pittsburgh (Pa.) e poi a Urbana (Il.), studiando ed applicando la teoria dei gruppi alla determinazione delle proprietà macroscopiche dei solidi e iniziando lo studio dei difetti nei cristalli. Nel 1951 Fumi fu invitato a Milano da Caldirola, che vi aveva appena vinto la cattedra, per insegnare un corso di meccanica statistica, che era all'epoca quanto di più vicino alla fisica dei solidi fosse previsto nell'ordinamento di studi italiano. Questa chiamata era funzionale al progetto di istituire un gruppo di teoria dei solidi a Milano, che affiancasse quello sperimentale che con Camagni e Chiarotti si andava coagulando a

Pavia intorno a Giulotto. Nella stessa ottica, Caldirola spinse Roberto Fieschi, suo assistente, a collaborare con Fumi su problemi inerenti la fisica dei difetti nei solidi. Successivamente indirizzò verso lo stesso Fumi due studenti del Collegio Ghisleri di Pavia che si erano rivolti a lui per la tesi: Franco Bassani e Mario Tosi. Fieschi perfezionò la sua conversione alla Fisica teorica della Materia condensata con un dottorato in Fisica Statistica con De Groot in Olanda, mentre Bassani completò il suo tirocinio lavorando a Urbana sotto la guida di Seitz, continuando lo studio dei difetti nei cristalli ionici e poi iniziando lo studio della teoria delle bande. Fumi, dopo aver speso un periodo di studio e ricerca a Bristol e a Cambridge collaborando con Mott, si era trasferito come professore a Palermo, seguito da Tosi, anch'egli al rientro da Bristol, per continuare il lavoro sui cristalli ionici. Questo periodo pionieristico per la Fisica Teorica della Materia trovò un riconoscimento definitivo nel 1957, quando Polvani, allora Presidente della SIF, incaricò Fumi, appena richiamato a Pavia, di organizzare a Varenna una Scuola estiva sulla Fisica dei Solidi che vide la partecipazione dei maggiori esperti europei ed il coinvolgimento diretto di Seitz e Mott. Un paio d'anni dopo, Fumi, Bassani e Tosi decisero di tornare negli Stati Uniti, all'Argonne National Lab. (Lemont, Il.) per poter continuare ad alto livello la loro ricerca in fisica teorica dei solidi. Un quarto membro del gruppo, Vittorio Celli, che si era da poco laureato con Bassani stava invece comple-

tando la propria preparazione ad Urbana (Il.). Bassani sarà il primo fisico dei solidi a vincere una cattedra di Fisica Teorica in Italia e nel 1963 sarà chiamato a Messina sul posto di Gianfranco Chiarotti che, dopo aver dato il via ad una attività sperimentale sulle proprietà ottiche dei semiconduttori, si trasferisce a Roma. Fumi, rientra in Italia come Professore, nuovamente a Palermo, nel 1966 e nello stesso anno Tosi prende il posto di Bassani, quando questi si trasferisce a Pisa da Messina.

Parallelamente, negli anni cinquanta la ricerca sperimentale in fisica della materia si era sviluppata in Italia ad opera di piccoli gruppi, sparsi nelle varie università, che preferibilmente stabilivano contatti personali con gruppi stranieri più che collaborazioni tra di loro. La strumentazione per la ricerca era per lo più costruita usando residuati bellici, dato che i finanziamenti diretti erano estremamente esigui e nella maggior parte dei casi erano frutto di collaborazioni locali con ricercatori che lavoravano nei campi meglio finanziati della fisica nucleare e dei raggi cosmici. Questi nel 1951 avevano stabilito un coordinamento all'interno del CNR chiamandolo Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Avendo verificato che tale coordinamento risultava efficace non solo dal punto di vista dei finanziamenti, ma anche per lo sviluppo di collaborazioni scientifiche, durante il congresso della SIF tenuto a Bari nel 1963 alcuni ricercatori in fisica della materia promossero un coordinamento analogo per i gruppi impegnati in questo settore. Nel 1965 il CNR riconobbe formalmente il Gruppo Nazionale di Struttura della Materia (GNSM), cui in breve aderirono tutti i gruppi operanti nelle varie Università. Oltre a coordinare i finanziamenti assegnati alla Fisica della Materia dal CNR e dal Ministero, il GNSM favoriva le collaborazioni scientifiche e dal 1966 promuoveva una Scuola estiva con docenti in larga parte stranieri. Il quadro delle attività in Fisica della Materia in Italia nel 1968, anno del mio arrivo a Pisa e punto di partenza della mia testimonianza diretta in questo simposio, emerge dalla tabella 1 apparsa nel Notiziario n. 3 del GNSM.

2. Perché a Pisa?

Fatta questa breve premessa sullo stato della Fisica della Materia in Italia a metà degli anni '60, e prima di descrivere con qualche dettaglio la nascita della Fisica teorica dei solidi a Pisa, mi sia permesso un breve cenno autobiografico per spiegare la mia partecipazione a quella storia, nonostante la mia "patavinitas" formativa.

Come emerge dalla tabella 1, la ricerca in Fisica della materia a Padova nel 1968 riguardava la fisica delle basse temperature. Il gruppetto di ricercatori (M. Santini, P. Mazzoldi e L. Bruschi) si era formato nel Laboratorio Basse Temperature di G. Careri a Roma, allora punto di riferimento

<i>Tabella 1. Il Gruppo Nazionale di Struttura della Materia (G.N.S.M.) del CNR nel 1968.</i>			
	Sede	Responsabile	Argomenti di ricerca
1	Bologna	Prof. P. Gondi	Difetti reticolari nei metalli e semiconduttori. Tecniche di spettroscopia elettronica
2	Cagliari	Prof. P. Manca	Preparazione e proprietà fondamentali di solidi e semiconduttori
3	Catania	Prof. I.F. Quercia	Fisica dei metalli e degli stati molecolari
4	Ferrara	Prof. A. Drigo	Ferromagnetismo e fisica dei metalli
5	Genova	Prof. G. Boato	Fisica dei metalli e fisica molecolare
6	Casaccia	Prof. A. Paoletti	Proprietà elettroniche dei solidi
7	Ispira	Prof. G. Caglioti	Diffrazione e spettroscopia neutronica
8	Milano	Prof. G.F. Nardelli	Elettroni, fotoni e spettroscopia della materia
9	Milano CISE	Prof. E. Galli	Semiconduttori e materiali speciali per elettronica
10	Milano Poli	Prof. P.A. Bisi	Spettrometria di sistemi atomici con tecniche impulsive
11	Modena	Prof. M. Santangelo	Proprietà ottiche ed elettriche dei cristalli molecolari
12	Napoli	Prof. A. Carrelli	Ferromagnetismo e proprietà ottiche dei solidi e lamine
13	Napoli	Dott.ssa M. Marinaro	Teoria dei molti Corpi
14	Padova	Prof. M. Santini	Basse Temperature
15	Palermo	Prof. F. Fumi	Fisica teorica degli stati aggregati
16	Palermo	Prof. M.U. Palma	Proprietà degli stati condensati a varie temperature
17	Parma	Prof. G. D'Ascola	Risonanze magnetiche
18	Parma	Prof. R. Fieschi	Magnetismo e proprietà dielettriche
19	Parma	Prof. A. Levialdi	Proprietà magnetooptiche, elettroluminiscenza. Preparazione di semiconduttori
20	Pavia	Prof. L. Giulotto	Risonanze magnetiche in solidi e liquidi e proprietà ottiche di isolanti e semiconduttori
21	Pisa	Prof. F. Bassani	Teoria dei livelli elettronici nella materia allo stato solido
22	Pisa	Prof. A. Gozzini	Struttura della materia
23	Roma	Prof. P. Bordoni	Proprietà meccaniche dei solidi
24	Roma	Prof. G. Careri	Fisica molecolare e superfluidi
25	Roma	Prof. G. Chiarotti	Semiconduttori e proprietà ottiche dei solidi
26	Roma Ingegneria	Prof. D. Sette	Ultrasuoni e struttura della materia
27	Torino "G. Ferraris"	Prof. G. Bonfiglioli	Luminescenza cristallina
28	Torino	Prof. G. Montalenti	Proprietà ferromagnetiche e magnetiche della materia
<i>Da "Notiziario GNSM, anno III n. 3 - Ottobre 1968".</i>			

internazionale per lo studio sperimentale delle proprietà dell'elio superfluido. Con grande apertura culturale, A. Rostagni, direttore dell'Istituto di Fisica e uno dei promotori dell'INFN nel 1951, C. Villi, che dopo qualche anno da Presidente dell'INFN ne avrebbe assicurato il finanziamento diretto da parte del Ministero e N. Dallaporta, professore di Fisica teorica, decisero di creare le condizioni perché accanto al gruppo sperimentale nascesse anche un gruppo di ricerca teorica in Fisica della Materia. A tal fine mi fu proposta una tesi sulle eccitazioni elementari nell'Elio superfluido, sotto la guida congiunta di M. Tonin (teorico di particelle) e P. Mazzoldi (sperimentale sull'Elio), con la prospettiva di lasciare Padova dopo la laurea per andare ad imparare il mestiere di teorico della materia condensata da qualche parte, prima in Italia e poi, se il piano funzionava, all'estero. Fu così che alla fine del 1967 cominciai a guardarmi intorno per decidere come proseguire la mia formazione dopo la laurea.

Come si vede dalla tabella 1, le unità dell'allora GNSM dove la parola "teoria" entrava esplicitamente nella definizione degli argomenti di ricerca erano poche. Dopo una breve, ma ponderata riflessione insieme con N. Dallaporta, che evidentemente apprezzava molto il curriculum di Bassani essendo stato membro della Commissione che lo aveva "ternato" e M. Santini che conosceva Bassani fin dai tempi in cui erano insieme studenti a Pavia, concorsi per una borsa di studio del CNR da usufruire a Pisa.

Le ragioni di questa scelta possono esser motivate brevemente da queste considerazioni:

- Franco Bassani, primo Professore ordinario di Fisica Teorica in Italia a lavorare in Fisica dello Stato Solido si è da poco trasferito a Pisa da Messina e quindi è motivato nella preparazione di un gruppo di allievi che lo affianchi nella ricerca;
- il suo recente arrivo richiama a Pisa giovani e collaboratori da molte altre sedi;
- Bassani è impegnato in un settore di punta della fisica teorica dei solidi: lo studio dei livelli elettronici nei solidi;
- durante i suoi anni di permanenza negli U.S., ad Urbana e ad Argonne, ha introdotto e sviluppato metodi e tecniche innovative per il calcolo delle bande in solidi reali;
- Bassani ha numerosi legami scientifici con eminenti ricercatori, sia italiani (Fieschi, Fumi, Tosi, Celli), che stranieri, tra i quali F. Seitz e J. Schrieffer;
- la presenza di Bassani e degli studiosi stranieri che egli invita per l'anno sabatico, insieme con i continui scambi tra Università e Scuola Normale fanno di Pisa l'ambiente più stimolante in Italia per gli sviluppi teorici della materia condensata.

Arrivai quindi a Pisa nella primavera del 1968, trovando l'ambiente che mi ero aspettato, con Bassani attivamente impegnato nella costruzione di un gruppo, affiancato da collaboratori già affermati e con vari giovani apprendisti.

3. Il gruppo di Bassani a Pisa 1967-69: I collaboratori

Bassani era arrivato a Pisa, alla fine del 1966, accompagnato da Giuseppe Pastori Parravicini che, laureatosi a Milano con Fieshi e Levialdi, aveva usufruito di una borsa di studio a Messina nell'anno precedente. Insieme avevano applicato [2] la teoria dei gruppi allo studio delle proprietà ottiche e delle bande della grafite e di altri composti lamellari (GaS e GaSe) usando il metodo tight binding in un approccio semiempirico e mostrando come la presenza della simmetria d'inversione fosse responsabile per il comportamento semimetallico della grafite, al contrario di altri composti lamellari come GaS e GaSe che sono semiconduttori.

Tra i collaboratori vi erano anche tre affermati ricercatori coi quali Bassani aveva collaborato negli Stati Uniti e che stavano usufruendo di un anno sabatico a Pisa: J.E. Robinson, L. Liu e T.O. Woodruff.

Nel 1967 J.E. Robinson aveva tenuto un corso di teoria formale dello scattering per la scuola di perfezionamento in Fisica, fornendo agli studenti delle dispense manoscritte molto apprezzate che mi sono state utilissime durante tutta la mia carriera.

Insieme con J.E. Robinson, R.S. Knox e J.R. Schrieffer, che qualche anno dopo sarà insignito del premio Nobel per la teoria BCS della superconduttività, nel 1962 Bassani aveva introdotto una correzione alla densità di energia di scambio degli elettroni nei metalli, che tenesse conto degli effetti di schermaggio [3]. Questo lavoro si inserisce nel filone di ricerca che, a partire dal modello statistico degli atomi, introdotto indipendentemente da Thomas [4] e Fermi [5] nel 1927, mira a determinare le proprietà di un sistema di elettroni a partire dalla conoscenza della loro densità. Questa linea di pensiero troverà pieno fondamento nel teorema di Hohenberg e Kohn [6] nel 1964 ed è alla base di tutti i moderni calcoli da principi primi delle proprietà della materia condensata.

Anche con L. Liu la collaborazione di Bassani risaliva ai tempi della sua presenza ad Argonne. In particolare, insieme avevano iniziato lo studio degli effetti dell'interazione spin-orbita sulle bande dello stagno grigio, determinando le masse efficaci delle buche e degli elettroni al centro della zona di Brillouin [7]. Di L. Liu ricordo il corso della scuola di perfezionamento nel quale ho imparato i fondamenti della teoria

degli effetti a molti corpi nei solidi e gli elementi di base della teoria BCS. Questi nuovi argomenti ampliavano ai fermioni le conoscenze dei sistemi condensati che avevo acquisito studiando per la mia tesi di laurea le proprietà dell' He^4 , bosonico. Entrambe sarebbero state alla base della mia attività di ricerca, in particolare negli ultimi quindici anni della mia carriera quando le ho applicate allo studio teorico della fisica degli atomi ultrafreddi, sia bosonici che fermionici. Il citato lavoro in collaborazione tra Bassani e L.Liu poggiava sul metodo delle onde piane ortogonalizzate (OPW), introdotto negli anni quaranta, ma da poco applicato nel calcolo esplicito dell'energia degli stati elettronici nei semiconduttori. Durante la sua permanenza ad Urbana, F. Seitz aveva fatto incontrare Bassani con T.O. Woodruff, che era uno dei più esperti del metodo, avendolo analizzato ed applicato criticamente al calcolo dei livelli energetici e delle funzioni d'onda elettroniche al centro della zona di Brillouin [8].

L'interazione con Woodruff e l'analisi profonda del metodo OPW aveva ispirato Bassani e Celli [9], ed altri, nella costruzione di potenziali modello che, inseriti nelle equazioni delle bande, descrivano in maniera semplice l'effetto della presenza degli elettroni di "core". Questi rimangono praticamente inalterati quando gli atomi si avvicinano per formare un cristallo, e generano il potenziale nel quale vivono gli elettroni di valenza che partecipano ai legami chimici e quindi caratterizzano il materiale.

È proprio l'ortogonalità degli stati di valenza agli stati di core che permette una trattazione quasi perturbativa dell'interazione coulombiana tra gli elettroni che vivono nei due tipi di stati.

4. Il gruppo di Bassani a Pisa 1967-69: Gli apprendisti

Dopo il suo arrivo, Bassani raccolse intorno a sé un nutrito gruppo di giovani apprendisti:

- 1967: Alfonso Baldereschi (figura 2), studente della Normale, si laurea con Bassani e continua a lavorare con lui come perfezionando;
- 1967: Erio Tosatti (figura 3), laureatosi a Modena con una tesi in particelle, dopo un periodo a Roma come borsista, su suggerimento di Chiarotti concorre ed ottiene una borsa di perfezionamento alla Normale. Ne usufruisce lavorando con Bassani e L. Liu;
- 1967: Liana Martinelli (figura 4), laureatasi a Modena con V. Bor-tolani, vince una borsa del CNR per lavorare a Pisa nel gruppo di Bassani.



Figura 2. Alfonso Baldereschi.



Figura 3. Erio Tosatti.

Sempre nel 1967, entra in tesi Emilio Doni, mentre G. Pastori-Parra-
vicini, incoraggiato da Bassani, si trasferisce a Urbana (Il.) per lavorare
con F. Seitz.

Nel 1968 E. Doni si laurea ed entra nel gruppo come borsista.

Dopo aver completato a Padova una tesi sull'Elio 4 superfluido, nella
primavera dello stesso anno anch'io arrivo a Pisa con una borsa del CNR,
per lavorare nel gruppo di Bassani. In effetti, pur seguendone le lezioni
alla Scuola di perfezionamento e partecipando ai quasi quotidiani incon-
tri scientifici con gli altri apprendisti, non collaborerò mai direttamente
con Bassani. A Pisa lavorerò principalmente con Woodruff, che seguirò
al suo ritorno alla Michigan State University. In seguito, rientrato in Italia,
avrò invece strette collaborazioni con M.P. Tosi e V. Celli.

Il 1969 è l'ultimo anno di Bassani a Pisa, ma la sua attrazione sui gio-
vani fisici, continua a crescere.

All'inizio dell'anno viene a Pisa da Messina Raffaello Girlanda (figura
5), con una borsa della Regione Siciliana. Rimarrà a Pisa per tutta la du-
rata del Corso di perfezionamento e continuerà a lavorare con Bassani,
nel frattempo trasferitosi a Roma.

Alla fine del 1969 si laureano gli ultimi suoi due allievi di questo pe-
riodo pisano: Michele Cini (figura 6) e Raffaele Resta (figura 7), mentre
Massimo Altarelli, studente a Roma, prende contatti ed inizia il lavoro di
tesi con Bassani che si sta trasferendo alla Sapienza.



Figura 4. Liana Martinelli.



Figura 5. Raffaello Girlanda.

5. Il gruppo di Bassani a Pisa 1967-69: i temi di ricerca

Durante questo triennio furono numerosi e vari i temi di ricerca sui quali gli apprendisti poterono esercitarsi, stimolati dal confronto continuo con Bassani e collaboratori. Nel seguito riporto un breve elenco degli argomenti maggiormente approfonditi in quel periodo:

- F. Bassani e G. Pastori-Parravicini: effetti delle simmetrie sulla struttura a bande e proprietà ottiche di grafite e composti lamellari GaS e GaSe [2]. Il metodo del “tight binding semiempirico” sviluppato in questo lavoro è ancora usato come primo approccio allo studio degli stati elettronici di solidi e nanostrutture complesse;
- F. Bassani e A. Baldereschi: effetti magneto-ottici nei solidi [10]. La previsione della formazione di livelli di Landau in vicinanza di punti sella nelle bande elettroniche e la conseguente modifica delle regole di selezione per le transizioni ottiche permise di suggerire nuovi esperimenti per la determinazione della struttura dei punti critici delle bande e delle relative masse efficaci mediante misure ottiche in presenza di campi magnetici;
- F. Bassani e E. Tosatti: stati elettronici nella grafite e loro relazione con gli spettri di perdita di energia di elettroni e con l'anisotropia delle proprietà ottiche della grafite [11], [14].

L'analisi dei coefficienti di Fresnel sviluppata in alcuni lavori trova applicazione per il loro calcolo in tutti i materiali altamente



Figura 6. Michele Cini.



Figura 7. Raffaele Resta.

anisotropi. Inoltre la determinazione dell'anisotropia della risposta dielettrica della grafite è alla base del calcolo di un accurato potenziale di interazione tra grafite ed atomi di gas rari che spiega vari fenomeni di fisisorbimento;

- L. Liu e E. Tosatti: effetti delle impurezze sulla mobilità elettronica in semiconduttori a gap nullo; proprietà dielettriche dello Sn [15], [16];
- L. Martinelli [17]: Studio di potenziali modello (modellizzazione di pseudopotenziali non-locali) per il calcolo di bande, fononi e potere termoelettrico degli alcalini;
- F. Bassani e R. Girlanda [18]: transizioni ottiche a due fotoni nei solidi in presenza di campo magnetico;
- T.O. Woodruff e F. Toigo: Studio dei rotoni in He II [19] e loro possibile polarizzazione. Studio della risposta del liquido di elettroni.

La vitalità del gruppo e la sua crescita culturale era anche sostenuta dalla fitta rete di collaboratori da ogni parte d'Italia che manteneva stretti legami con Bassani e che quindi permetteva a noi apprendisti di apprezzare argomenti di ricerca sui quali non eravamo al momento direttamente impegnati.

A titolo di esempio voglio solo ricordare:

- da Cagliari, F.M. Aymerich: proprietà elettro-ottiche [20];
- da Palermo, G. Vetri: livelli di impurezza nei solidi [21];

- da Messina, C.S. Giuliano e R. Ruggeri: formulazione di potenziali modello [22], [23];
- da Napoli, G. Iadonisi e B. Preziosi: Struttura a bande e livelli di impurezza nei semiconduttori [24];
- dal Cairo via SNS: A.R. Hassan. Transizioni a due fotoni nei semiconduttori [25].

Ovviamente erano continui i seminari, per i quali Bassani invitava ricercatori da ogni parte d'Italia, non solo teorici, ma anche sperimentali alla frontiera della ricerca. In particolare ricordo le bellissime relazioni di Andrea Frova, che insieme con Chiarotti aveva iniziato in Italia lo studio dei semiconduttori mediante metodi elissometrici, allestendo laboratori prima a Pavia, poi a Messina ed infine a Roma. Fu allora che potei apprezzare come i calcoli a bande potessero trovare validazione sperimentale dalle misure delle proprietà ottiche e, viceversa, queste dessero informazioni sulle proprietà microscopiche dei solidi. Altri seminari dei quali conservo ricordo a distanza di mezzo secolo furono quelli di F. De Martini sugli esperimenti di eccitazione coerente di polaritoni in semiconduttori.

Bassani manteneva contatti anche con ricercatori che operavano nell'industria. Ricordo seminari sui metalli liquidi da parte di M. Omini, allora ricercatore nei laboratori FIAT a Torino e sul rilassamento dielettrico nei materiali polari da parte di E. Fatuzzo, allora ricercatore presso il laboratori della Ferrania, poi 3M, a Savona. La sinergia con la Scuola Normale permetteva poi di assistere a conferenze di prestigiosi ricercatori stranieri. Fu in occasione di un seminario sul liquido di elettroni da parte di David Pines, col quale Bassani aveva interagito ad Urbana, che nacque l'interesse per la risposta dielettrica che mi avrebbe tenuto impegnato per quasi un decennio.

6. Il gruppo di Bassani a Pisa 1967-69: la diaspora

Alla fine del 1969 Bassani si trasferisce a Roma ed i giovani che avevano iniziato sotto la sua guida la formazione attraverso la ricerca prendono strade diverse:

Tosatti va a Roma, prima come aviere e poi come ricercatore CNR. Nel 1981 sarà chiamato dalla SISSA come Professore Ordinario di Struttura della Materia.

Baldereschi va a Urbana e poi ai Bell Labs. Nel 1981 diventa Professore Ordinario di Struttura della Materia all'Università di Trieste. Nel 1989 diventerà Professore Ordinario anche al Politecnico Federale di Losanna, col quale aveva collaborato fin da metà degli anni '70.

Io seguo Woodruff a M.S.U. e nel 1971 torno a Padova; sarò chiamato come Professore Ordinario sulla cattedra di Struttura della Materia nel 1987.

R. Girlanda completa la Scuola di Perfezionamento a Pisa, ma già dalla fine del 1971 è professore incaricato a Messina, dove diventerà Professore Ordinario di Struttura della Materia nel 1997.

E. Doni serve la patria come artigiere. Ritorna in gruppo a lavorare a tempo pieno nel 1971, diventando Ricercatore CNR.

Rimane a Pisa: L. Martinelli, che diventerà Professore Associato nel 1980.

Nel 1971 torna da Urbana (Il.) G. Pastori-Parravicini ed assume il coordinamento del gruppo fino al 1991, quando diventa Professore Ordinario a Pavia.

Poco dopo entreranno nel gruppo L. Resca (1971), ora alla Catholic University a Washington D.C. e G. Grosso (1972), dal 2001 Professore Ordinario di Fisica della Materia qui a Pisa.

Spero che queste brevi note contribuiscano a mettere in luce il ruolo di Bassani nella formazione a Pisa, di una scuola che darà impulso al successivo sviluppo della Fisica Teorica della Materia Condensata in varie sedi in Italia. Bassani continuerà per oltre un trentennio ad esser punto di riferimento per giovani teorici non solo italiani, prima a Roma e poi dal 1980 di nuovo a Pisa, alla Scuola Normale. Altri potranno riferirne meglio di me.

Bibliografia

- [1] La premessa si basa essenzialmente sulle due interviste orali, a F. Fumi e a G.F. Bassani, raccolte da G. Belloni nel 1982 e conservate nell'archivio digitale dell'American Institute of Physics, consultabili su: https://www.aip.org/history/programs/niels-bohr-library/oral-histories/****, dove **** = 4619 per Fumi e **** = 4482 per Bassani.
- [2] Bassani F., Pastori-Parravicini G., *Band Structure and Optical Properties of Graphite and of the Layer Compounds GaS and GaSe*, Il Nuovo Cimento, **L B**, 1967, pp. 95-128.
- [3] Robinson J.E., Bassani F., Knox R.S., Schrieffer J.R., *Screening corrections to the Slater-exchange potential*, Phys. Rev. Lett., **9**, 1962, pp. 215-217.
- [4] Thomas L.H., *The calculation of atomic fields*. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1927, **23**, pp. 542-548.
- [5] Fermi E., *Un metodo statistico per la determinazione di alcune proprietà dell'atomo*, Rendiconti Lincei, **6**, 1927, pp. 602-607.
- [6] Hoehenberg P., Kohn W., *Inhomogeneous electron gas*, Phys. Rev. **136**, 1964, p. 864-871.
- [7] Bassani F., Liu L., *Electronic Band Structure of Gray Tin*. Phys. Rev. **132**, 1963, pp. 2047-2050.
- [8] Woodruff T.O., *Application of Orthogonalized Plane-Wave Method to Silicon Crystals*, Phys. Rev **103**, 1956, pp. 1159-1166.

- [9] Bassani F., Celli V., *Energy Band Structure of solids from a perturbation on the "empty lattice"*. Journal of Physics and Chemistry of Solids **20**, 1961, pp. 64-75.
- [10] Baldereschi A., Bassani F., *Landau levels and magneto-optic effects at saddle points*. Phys. Rev. Letters **19**, 1967, pp. 66-68.
- [11] Bassani F., Tosatti E., *Optical Constants of anisotropic materials from energy loss experiments*, Physics Letters A **22**, 1968, pp. 446-7.
- [12] Greenaway D.L., Harbeke G., Bassani F., Tosatti E., *Anisotropy of the optical constants and the band structure of graphite*, Phys. Rev. **178**, pp. 1340-1348 e (1970) (Erratum) Phys. Rev. B, **1**, 1969, p. 942.
- [13] Tosatti E., *Anisotropy of optical constants and electron energy loss*, Il Nuovo Cimento B Series 10, **63**, 1969, pp. 54-69.
- [14] Tosatti E., Bassani F., *Optical constants of graphite*, Il Nuovo Cimento B Series 10, **65**, 1970, pp. 161-173.
- [15] Liu L., Tosatti E., *Dielectric Constant and mobility of a Doped Zero-Gap Semiconductor*, Phys. Rev. Lett. **23**, 1969, pp. 772-774.
- [16] Liu L., Tosatti E., *Dielectric enhancement and mobility of Sn*, Phys. Rev. B **178**, 1970, pp. 1340-1348.
- [17] Martinelli L., *Thermoelectric power, band structure and phonon frequencies of Na from the pseudopotential model*, Il Nuovo Cimento B Series 10, **70**, 1970, pp. 58-72.
- [18] Bassani R., Girlanda R., *Two-photon transition in solids in a magnetic field*, Optics. Communications **1**, 1970, pp. 358-362.
- [19] Toigo F., *Calculation of the roton-roton contribution to the viscosity of liquid He II*, Il Nuovo Cimento B Series 10, **62**, 1969, pp. 103-108.
- [20] Aymerich F., Bassani F., *Effect of the electric field on interband transition at critical points away from the center of the Brillouin zone*. Il Nuovo Cimento Series 10, **56**, 1968, pp. 295-310.
- [21] Vetri G., Bassani F., *Crystal field splittings of rare-earth ions in the f^6 configuration*, Il Nuovo Cimento Series 10, **55**, 1968, pp. 504-524.
- [22] Giuliano C.S., Ruggeri R., *A new model potential for alkali ions*, Il Nuovo Cimento Series 10, **61**, 1969, pp. 53-68.
- [23] Giuliano C.S., Ruggeri R., *Model potential for Rb^+ and Cs^+* , Il Nuovo Cimento **2**, 1969, pp. 817-820.
- [24] Bassani F., Iadonisi G., Preziosi B., *Band structure and impurity states*, Phys. Rev. **186**, 1969, pp. 735-746.
- [25] Bassani F. Hassan A.R., *Two-photon transitions at saddle points in semiconductors*, Optics Communications **1**, 1970, pp. 371-374.

Dark Resonances in Pisa

Silvia Gozzini^{*}, Ferruccio Renzoni^{**}

1. From optical pumping to dark resonances

The possibility to manipulate the state of atoms and molecules with laser light has reached an impressive level of accuracy. The exchange of linear and angular momenta between atoms and photons allows to prepare any wanted atomic quantum state, and engineering of collective multi-particle states is experiencing very rapid progress. The history of this research field begun in the fifties, when Alfred Kastler in Paris and Adriano Gozzini in Pisa established a strong human and scientific relationship which led to the development of an intense activity in the field of atomic physics. A few milestones on the path leading to the current exquisite ability to manipulate atomic states can be easily identified. The first milestone is undoubtedly the demonstration of optical pumping, with the transfer of angular momentum from the light to an atomic vapor leading to the polarization of the latter. The discovery of dark resonances in Pisa in the 1970s naturally represents, in our view, the next milestone on the road of quantum state manipulation. The pioneering discovery that an atom could be prepared in a superposition state decoupled from the light has had a profound impact on the field of atomic physics and a long lasting legacy, as this brief note aims to illustrate.

2. The discovery of “dark lines”

The observation of dark resonances was first reported in 1976 by the experimental group led by Adriano Gozzini, which included Gerardo Alzetta, Luigi Moi and Gaspar Orriols. Unexpected sharp interruptions of the fluorescence – “dark lines” as they were named at that time – were observed along the path of a multimode laser beam propagating through a sodium vapor in the presence of a magnetic field with a gradient along the beam propagation axis (figure 1). The appearance of dark lines was

^{*} Istituto Nazionale di Ottica del CNR, Pisa.

^{**} Department of Physics and Astronomy, University College, Londra.

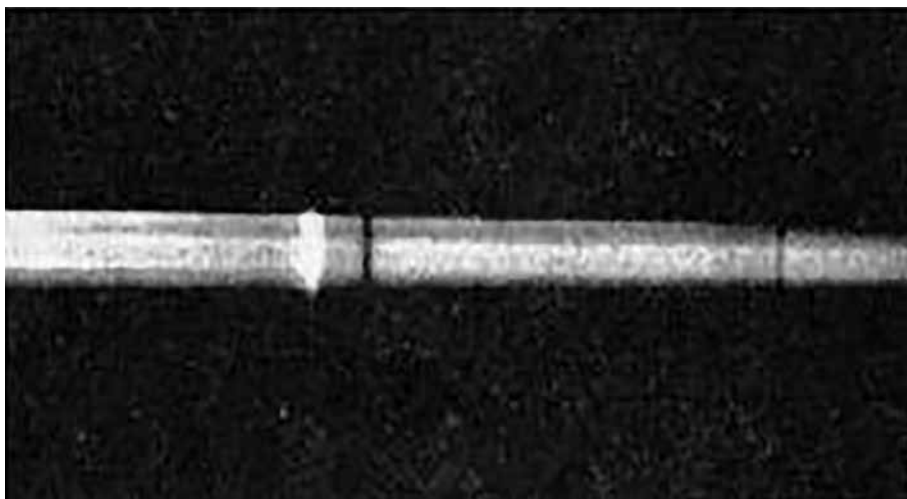


Figure 1. Multimode laser beam path through a sodium vapor in the presence of an inhomogeneous magnetic field. Sharp “dark lines” are clearly visible, corresponding to preparation of the atomic state in a non-absorbing superposition of ground state sublevels. Copyright © Società Italiana di Fisica. Reproduced with kind permission of Società Italiana di Fisica, from: Alzetta G., Gozzini A., Moi L., and Orriols G., Nuovo Cimento B 36, 5 (1976).

attributed to the matching of the frequency difference between two laser modes with the splitting between two hyperfine state sublevels; due to the inhomogeneity of the magnetic field the condition was fulfilled in a very sharp region, resulting in the spatially resolved effect.

Shortly after its discovery, the observed effect was explained by Arimondo and Orriols in terms of quantum interference between the optical transitions driven by the different modes of the laser. Thus the effect corresponded to the existence of a ground state superposition which, due to quantum interference, did not absorb laser radiation. Such a non-absorbing superposition was later named “dark state” and the effect termed “coherent population trapping” (CPT) precisely to indicate that the atomic population was effectively “trapped” in a state, given that the laser was not able to extract population from it. Due to the fact that the vapor in the coherent superposition state becomes transparent, in experiments detecting the transmission of the radiation the effect is termed Electromagnetically Induced Transparency (EIT).

3. A long legacy

The discovery of dark resonances represented a turning point in the ability to prepare atomic states, and constituted a new resource for sensing and metrological applications. The list of applications and techniques

which emerged from the discovery of dark resonances would be too long to be reported here, and only a few representative developments will be mentioned.

The so called “Stimulated Raman adiabatic passage” (STIRAP) was a first development which made use of dark states. It was found that by using time dependent laser fields one could engineer a time-dependent dark state. This allowed the robust transfer of population from a given ground state sublevel to a wanted one, without populating the excited state, thus suppressing spontaneous emission, a major obstacle in quantum state manipulations. STIRAP has seen a rapid growth in applications, and has become a standard tool in atomic physics. STIRAP is also a key mechanism in quantum memories of light, with the state of the photon mapped on atomic matter and later retrieved using STIRAP-like mechanisms.

Dark states also played an important role in the development of laser cooling, with the so-called velocity selective coherent population trapping (VSCPT). This was a major milestone in the race to ultra-cold temperatures. In VSCPT atoms cooled by the lasers are prepared in a dark state, so to be protected from heating effects from spontaneous emission. This allowed for the first time to laser cool atoms below the recoil limit. While VSCPT was replaced by other laser cooling mechanisms as a practical tool in standard cold atom experiments, it represented a hallmark in the history of laser cooling as it demonstrated the ability to break the photon recoil limit.

Another peculiar application we like to mention is the control of the refractive index of the atomic medium. In particular, by tailoring the non-linear response of a CPT atomic vapor, “slow light” is obtained. Electromagnetically Induced Transparency in an ultra-cold gas of sodium atoms was shown to lead to a very steep variation of refractive index with probe frequency resulting in an observed reduction of the pulse propagation velocity up to 17 m/s.

The interest of coherent population trapping goes beyond the traditional academic boundaries, and dark resonances were soon identified as a useful resource for practical devices. Indeed, their sub-natural linewidth is of great interest in magnetic sensing and optical clocks. CPT atomic magnetometers and atomic clocks have been realized and are still experiencing continuous development.

The number of applications in which dark states play a central role is large and in continuous growth: from cavity QED to molecular Bose-Einstein condensates, to quantum dots, to name a few. The applications we briefly discussed refer to some of the early ones, which had a long lasting impact. Many more will certainly come.

4. Conclusions

The year 1976 marked the discovery of dark lines by the experimental group of Adriano Gozzini at the C.N.R. Laboratory of Atomic and Molecular Physics of Pisa. An unexpected phenomenon was observed, and interpreted shortly after in terms of destructive quantum interference: dark states and coherent populations were born. It turned out to be a major milestone in atomic physics, whose legacy continues up to today.

References

- Affolderbach C., Stähler M., Knappe S., Wynands R., *An all-optical, high-sensitivity magnetic gradiometer*. Appl. Phys. B **75**, 605, 2002.
- Alzetta G., Gozzini A., Moi L., and Orriols G., *An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour*. Nuovo Cimento B **36**, 5, 1976.
- Arimondo E., Orriols G., *Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping*. Lett. Nuovo Cimento **17**, 333, 1976.
- Aspect A., Arimondo E., Kaiser R., Vansteenkiste N., and Cohen-Tannoudji C., *Laser Cooling below the One-Photon Recoil Energy by Velocity-Selective Coherent Population Trapping*. Phys. Rev. Lett. **61**, 826, 1988.
- Belfi J., Bevilacqua G., Biancalana V., Dancheva Y., and Moi L., *All optical sensor for automated magnetometry based on coherent population trapping*. J. Opt. Soc. Am. B **24**, 1482, 2007.
- Hafiz M.A., Coget G., Yun P., Guérandel S., de Clercq E., and Boudot R., *A high-performance Raman-Ramsey Cs vapor cell atomic clock*. J. Appl. Phys. **121**, 104903, 2017.
- Hau L.V., Harris S.E., Dutton, Z., Behroozi C.H., *Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas*. NATURE **397**, 594, 1999.
- Oreg J., Hioe F.T., and Eberly J.H., *Adiabatic following in multilevel systems*. Phys. Rev. A **29**, 690, 1984.
- Vanier J., *Atomic clocks based on coherent population trapping: a review*. Appl. Phys. B **81**, 421, 2005.
- Vitanov N.V., Rangelov A.A., Shore B.W., Bergmann K., *Stimulated Raman adiabatic passage in physics, chemistry, and beyond*. Review of Modern Physics **89**, 015006, 2017.

La Nascita della Biofisica nell'Istituto di Fisica di Piazza Torricelli a Pisa

Giuliano Colombetti*, Francesco Lenci*

1. Premessa

Fin dagli anni trenta e quaranta del secolo scorso, soprattutto grazie allo sviluppo della meccanica quantistica, diversi illustri fisici furono attratti dalla grande sfida culturale e scientifica di cercare di applicare le nuove scoperte della Fisica all'analisi dei fenomeni biologici, utilizzando sia i concetti fondamentali sia le apparecchiature speciali che s'intuiva avrebbero potuto essere realizzate basandosi su quei principi.

Tra gli altri, furono conquistati da questa curiosità intellettuale Niels Bohr, Erwin Schroedinger e, soprattutto, Max Delbrueck (figura 1), che davvero si dedicò "professionalmente" alla Biofisica e nel 1969 ottenne – assieme ad A.D. Hershey (figura 2) e S.E. Luria (figura 3) – il Premio Nobel per la Fisiologia e la Medicina per la scoperta dei meccanismi di replicazione e della struttura genetica dei virus.

Il problema della vita è certamente affascinante, ma tutt'altro che semplice da risolvere. Le difficoltà sono infatti legate non tanto alla comprensione del singolo fenomeno, che spesso può essere analizzato ed interpretato fin nei dettagli quanto alla visione complessiva di tutti i singoli eventi, che le tecniche fisiche consentono di studiare, e delle loro interazioni.

Un esempio di successo significativo a molti livelli: nel 1967 Wald ottenne il Premio Nobel per la Fisiologia per aver scoperto e caratterizzato, con tecniche spettroscopiche relativamente semplici (una geniale anticipazione delle tecniche di *flash photolysis*, ottenuta congelando e poi riscaldando lentamente i campioni), i cambiamenti molecolari causati dall'assorbimento di luce da parte del pigmento che funziona da fotorecettore nei nostri occhi, la rodopsina.

Insieme all'applicazione delle moderne tecniche fisiche però, anche l'applicazione estensiva di tecniche relativamente semplici basate sulla teoria classica dell'elettricità consentirono di aprire la strada alla comprensione di una larga varietà di problemi biologici, quali quelli legati

* CNR Istituto Biofisica Pisa.



Figura 1. Max Delbrück.

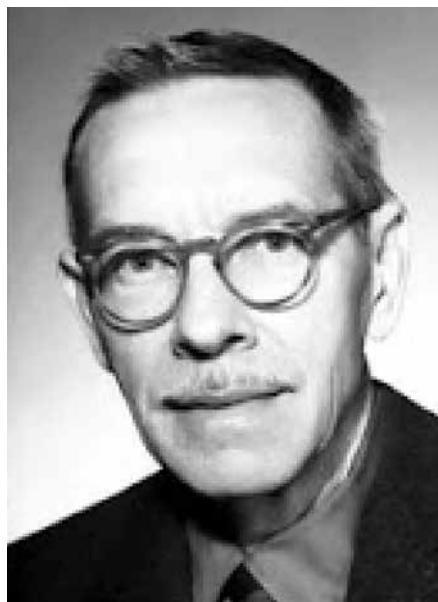


Figura 2. Alfred D. Hershey.

alla eccitabilità delle membrane cellulari, base stessa di tutti i fenomeni di percezione sensoriale e di fondamentali processi biologici, a partire dal battito cardiaco. Per i loro studi di elettrofisiologia sulla conduzione nervosa, che univano appunto misure elettriche a una modellizzazione matematica ancora oggi valida, Eccles, Hodgkin e Huxley ebbero, infatti, il premio Nobel per la Fisiologia nel 1963 e, nel 1991, Neher e Sakmann ebbero anch'essi il Nobel per la Fisiologia per la messa a punto di un raffinato sistema sperimentale, detto *patch-clamp*, che consente di studiare singoli canali di membrana (quelle strutture molecolari di natura essenzialmente proteica che consentono agli ioni necessari per la vita della cellula di essere scambiati fra essa e il mondo esterno).

Nel corso degli anni è nato un linguaggio prima comune e poi “autonomo”, sono nate riviste specializzate, si sono cominciati a formare scienziati specializzati in questa nuova branca del sapere, al confine fra tante discipline (fra le quali non si possono dimenticare la matematica e la biomatematica), che ha permesso di ottenere considerevoli progressi nello studio del mondo vivente a partire da metodologie e tecniche proprie della Fisica (quali, per fare qualche esempio, le spettroscopie ottiche e magnetiche, le microscopie innovative, le tecniche di analisi ed elaborazione dei segnali, le simulazioni matematiche avanzate, l'optoelettronica e la fotonica, la modellistica e la nano-ingegneria molecolare).

Si può schematicamente dire che tutte le attività di ricerca in Biofisica, siano esse teoriche o sperimentali, hanno come obiettivo comune la comprensione della correlazione struttura-funzione nei fenomeni biologici in termini dei processi fisici che ne sono alla base, riconoscendo, d'altra parte, che sistemi e processi biologici sono intrinsecamente complessi, con proprietà strutturali e funzionali che non sono semplicemente deducibili dalle caratteristiche delle loro componenti elementari e che, in molti casi, derivano dalla natura non lineare dei processi coinvolti (fenomeni che non sono legati alla loro causa da una semplice relazione lineare)¹.



Figura 3. Salvador E. Luria.

In questo contesto, nel quale l'approccio è essenzialmente a livello molecolare e le metodologie tendono a utilizzare sempre di più le conoscenze della Fisica moderna (spettroscopie risolte nel tempo, nanomotori, microscopie innovative, imaging), il ruolo degli studi di biofisica è destinato a diventare sempre più importante, sia per la ricerca di base (per esempio, per una più profonda conoscenza dei meccanismi fisico-chimici alla base dei processi molecolari) che per la ricerca applicata (per esempio, per lo sviluppo di sistemi diagnostici più sensibili e sempre meno invasivi).

Il quadro delle problematiche più attuali nel panorama biofisico internazionale può essere facilmente desunto dalle tematiche discusse nei più importanti congressi (per esempio quelli della American Biophysical Society e dell'International Union for Pure and Applied Biophysics, della European Biophysical Societies' Association, della SIBPA) e dalle aree di interesse delle più prestigiose riviste (quali, ad esempio, l'European Biophysics Journal, il Quarterly Review of Biophysics, il Biophysical Journal).

¹ Cfr. P.W. Anderson "More is different" (Science, 1972) = Si al riduzionismo - No al costruzionismo.

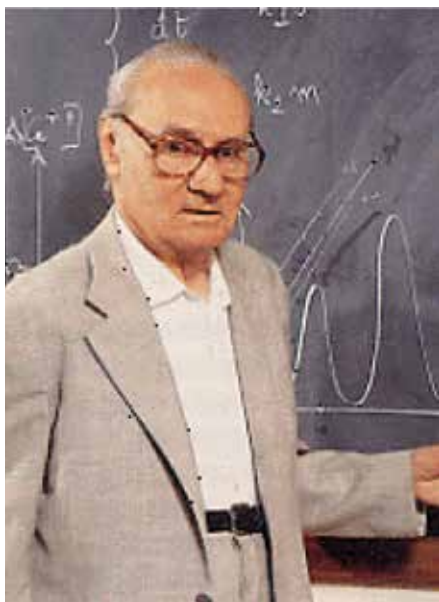


Figura 4. Mario Ageno.



Figura 5. Giovanni Polvani.

2. La biofisica in italia

Fin da subito il dopoguerra, anche in Italia l'attenzione dei fisici nei confronti della Biologia andò ben oltre una curiosità di tipo culturale (Mario Ageno (figura 4) nel 1946 tradusse in italiano il libro di Schroedinger *Cos'è la vita?*) e comportò sia impegno fattivo nell'attività di ricerca che coraggio e lungimiranza intellettuali nella fondazione di scuole di pensiero.

In particolare nel CNR, durante la Presidenza di Giovanni Polvani (figura 5), quando fu varato il programma delle Imprese, si costituirono gruppi in cui ricercatori di diversa estrazione culturale (fisici, biologi, chimici) affrontavano da un punto di vista interdisciplinare i problemi della biofisica, cominciando ad elaborare nuovi approcci metodologici.

Alla fine degli anni '60 del secolo scorso, scienziati lungimiranti e di grande autorevolezza scientifica come Carlo Franzinetti (figura 6) ed Adriano Gozzini (figura 7) prima ed Alessandro Checcucci (figura 8) dopo a Pisa, Antonio Borsellino a Genova, Eduardo Caianiello a Napoli, Mario Ageno e Giorgio Careri a Roma, letteralmente inventarono e crearono gruppi di lavoro, forse a volte un poco improvvisati e scientificamente avventurosi, ma animati da grande entusiasmo e spirito di intraprendenza nei quali ricercatori di diversissima estrazione culturale (fisici, biologi, chimici, matematici, ingegneri, medici) s'impegnavano ad affrontare in maniera interdisciplinare i problemi della Biofisica.



Figura 6. Carlo Franzinetti con Bruno Pontecorvo.

Adriano Gozzini, sperimentatore raffinatissimo e iniziatore della spettroscopia a microonde in Italia, trasferì nel suo interesse per la Biofisica, e trasmise ai suoi allievi, quella capacità di improvvisare (nell'immediato dopoguerra mise in piedi un laboratorio di spettroscopia a microonde unico in Italia, confrontabile con i migliori laboratori stranieri, approfittando dello smantellamento delle apparecchiature militari americane, acquistando pezzi di apparecchiature radar ai mercatini) e quell'amore per la semplicità e la chiarezza, unite ad una eleganza difficilmente eguagliabile, che avevano reso il suo gruppo di ricerca sulla spettroscopia un punto di riferimento di livello internazionale, anche per premi Nobel come A. Kastler, C.H. Townes, N. Bloembergen.

Antonio Borsellino, nel 1950 Direttore dell'Istituto di Fisica Teorica di Genova, negli anni 1960 realizzatore, assieme ad Augusto Gamba e Guido Palmieri, con la tecnologia delle valvole elettroniche, del PAPA (Programmatore Automatico e Analizzatore di Probabilità, di fatto uno dei primi neurocalcolatori che dette avvio alla ricerca sulle Reti Neurali), si dedicò, sempre facendo scuola, a campi diversi della cibernetica e della biofisica, anche come sperimentale, senza mai perdere il connotato di fisico teorico di grande classe.

Edoardo Caianiello, fondatore dell'Istituto di Cibernetica di Napoli, sosteneva che la ricerca è un atto creativo che difficilmente può essere compiutamente programmato e che in ogni programma deve esserci un



Figura 7. Adriano Gozzini.

“grano di pazzia” (e ricordiamo bene che in molti dei progetti di ricerca di quegli anni di “grani di pazzia” ce ne erano, e non pochi). Furono anni di tumultuoso rigoglio culturale e scientifico in tutto il Paese, nei quali la produzione di conoscenze, l’impegno nella ricerca di base portava anche a risultati “istituzionali” di grande e duraturo pregio.

Pensiamo sia significativo e non casuale che l’esigenza di interdisciplinarietà ed integrazione scientifica, imposte dalla natura stessa delle problematiche biofisiche e dalla varietà delle tecniche sperimentali e teoriche che debbono essere utilizzate, venisse pienamente soddisfatta proprio dalle strutture di ricerca del CNR. E quello della Biofisica non è un caso isolato (anche se particolarmente significativo per una profonda mancanza di “cultura biofisica”, come la chiamava Giorgio Careri, nel mondo accademico italiano di quegli anni): il CNR è stato il terreno culturale ed organizzativo nel quale oltre alla Biofisica, altre scienze di frontiera sono nate e si sono sviluppate (le Scienze dell’Informazione, la Biologia Molecolare, la Geotermia, le Neuroscienze e le Scienze della Cognizione, la Struttura della Materia, per non citarne che alcune).

A Pisa, Genova e Napoli nascevano i Laboratori del CNR che sarebbero poi stati tra gli Istituti di riferimento per la ricerca Biofisica nel contesto nazionale ed internazionale.

A Milano, grazie agli interessi scientifici ed alle iniziative di Erasmo Marrè e di Sergio Tonzig, problemi fondamentali della fisiologia delle

piante venivano affrontati con i metodi della moderna biofisica, biochimica e fisiologia cellulare.

Adriano Buzzati Traverso, su iniziativa del quale erano stati avviati a Pavia – nel 1959 – i primi studi sugli effetti biologici delle radiazioni (che aprirono anche la strada agli studi sull'origine della vita e l'evoluzione prebiotica), assieme ad Alfonso Maria Liquori ispirava e guidava innovativi e brillanti approcci integrati agli studi nel campo della genetica molecolare, della biologia molecolare e della biofisica. Il successo di queste attività trovò poi, nel 1962, coronamento nella fondazione del Laboratorio Internazionale di Genetica e Biofisica del CNR di Napoli da parte dello stesso Adriano Buzzati Traverso.



Figura 8. Alessandro Checcucci.

Nel 1974, Pietro Omodeo, allora all'Università di Padova, preoccupato di far conoscere all'ambiente scientifico italiano le opportunità che la Biofisica offriva per lo sviluppo della biologia moderna, collaborava con Antonino Borsellino, Arnaldo Vecli e altri studiosi a promuovere e fondare la Società di Biofisica Pura e Applicata, ancora oggi attiva e prolifica di iniziative scientifiche, culturali e di formazione.

Più tardi, nel 1980, anche a Palermo nascevano, anche grazie ai suggerimenti ed al sostegno di Edoardo Amaldi, le prime attività di ricerca in Biofisica nel CNR.

3. La biofisica in piazza Torricelli a Pisa

Il primo gruppetto di ricerca dedicato alla Biofisica nacque a Pisa negli anni 60, come “Sezione di Pisa dell'Impresa di Cibernetica”. A metà degli anni 60 si costituì il Gruppo Nazionale di Cibernetica (GNC) del CNR, al quale afferivano strutture universitarie e CNR, tra queste, la sezione di Pisa. E nella seconda metà degli anni 60 cominciarono a laurearsi in Biofisica i primi studenti di Fisica: Anna Maria Columbu (detta Pilar), Giuliano Colombetti e Francesco Lenci. Nel 1969 la Sezione di Pisa venne costituita Laboratorio



Figura 9. Erseo Polacco.

per lo Studio delle Proprietà Fisiche di Biomolecole e Cellule (un lungo nome per indicare “Biofisica”), abbreviato in La.F.Bi.C., il Presidente del Consiglio Scientifico essendo un esigente maestro come Mario Ageno.

I Laboratori erano previsti essere valutati dopo cinque anni di attività, e poi confermati o dismessi a secondo del risultato della valutazione. In quegli anni si costituì nel CNR anche il Gruppo Nazionale di Cibernetica e Biofisica (GNCB), al quale, come nel caso del GNC, afferivano strutture universitarie e i tre Laboratori di Pisa, Genova e Napoli, oltre ad altre strutture CNR. Nel 1980 il Laboratorio venne definitivamente confermato e istituito come Istituto di Biofisica.

Primo Direttore del La.F.Bi.C. fu Alessandro Checcucci, con l’aiuto e l’appoggio determinante di Adriano Gozzini. Il “gruppo” era costituito da due giovani laureati (Giuliano Colombetti e Francesco Lenci, perché Anna Maria Columbu aveva lasciato la ricerca per dedicarsi – con un successo straordinario – all’insegnamento), due ricercatori già esperti, Cesare Ascoli e Donatella Petracchi, un tecnico meccanico, Lamberto Favati ed uno elettronico, Leonardo Vanni. Dopo Checcucci la direzione del laboratorio passò ad Erseo Polacco (figura 9).

Le attività di ricerca erano sostanzialmente due: lo studio, tramite spettrometria EPR, dei radicali liberi indotti da radiazione ionizzante in biomolecole, soprattutto amino acidi, con la collaborazione e la guida preziose di Sergio Santucci e Gherardo Alzetta, e lo studio della neurofisiologia e neurobiologia del *Limulus*, in collaborazione con Giuseppe Moruzzi, Lamberto Maffei e Giuseppe Gestri.

In un secondo momento venne dedicata attenzione ai processi di trasferimento di energia e ai fenomeni di fotosensibilizzazione, principalmente con tecniche di spettroscopia di assorbimento e fluorescenza. Erano intanto “entrati” nel La.F.Bi.C. anche Michele Barbi, Carlo Frediani e Romano Ferrara.

Come accadeva in quasi tutti i gruppi in quegli anni, la strumentazione veniva costruita “in casa”. Il banco a microonde e tutta l’elettronica dello spettrometro EPR e il fluorimetro per lo studio dei processi foto-

sintetici erano stati assemblati da Lamberto e Leonardo, con l'aiuto e la collaborazione di tutta l'officina dell'Istituto di Piazza Torricelli e degli elettronici, Sigg. Sassu e Francesconi.

Per un lungo tempo aveva lavorato nel La.F.Bi.C. anche Gernando Petracchi, un geniale fisico in pensione, che, in collaborazione con Giuseppe Falcone, si era dedicato allo studio degli effetti dei campi magnetici sulla crescita batterica.

4. La situazione attuale

Nonostante le difficoltà e le divergenze che spesso hanno compromesso lo spirito di collaborazione tra CNR ed Università, nel caso della Biofisica, grazie soprattutto al Gruppo Nazionale di Cibernetica e Biofisica, gli scambi di idee, il livello di coordinamenti, i rapporti scientifici sono sempre stati intensi e fruttuosi, favorendo così il dispiegarsi di attività scientifiche e di formazione.

Oggi gli oggetti di studio dei biofisici (in tutti gli Enti ed Università) vanno dalle proteine e acidi nucleici alle strutture sopramolecolari, dalle cellule nervose alle piante superiori, dai microrganismi (fotosintetici e non) alle cellule in coltura, queste ultime isolate dagli organismi più diversi. I ricercatori e le strutture coprono argomenti e metodologie complementari ad ampio raggio e ciò permette un approccio integrato e multidisciplinare affrontato con metodi moderni, che garantiscano una lettura dei processi biologici in grado di superare interpretazioni puramente descrittive.

Molti dei problemi affrontati sono gli stessi problemi in organismi anche molto diversi, il che dimostra, se ancora fosse necessario, che i problemi rilevanti nello studio della struttura, funzione ed evoluzione dei viventi sono della stessa natura (anche se su differenti scale di complessità) sia nei microrganismi, che nelle piante e negli animali superiori, inclusa la specie umana.

5. Una nota personale

Siamo dei privilegiati: abbiamo avuto Maestri di scienza e di vita, abbiamo vissuto la vita dell'Istituto di Fisica non come "passanti", ma come membri di una comunità, tutta sempre sotto lo sguardo vigile e severo del Sig. Otello Serraglini. Al terz'anno avevamo la chiave dell'Istituto e della Biblioteca, potevamo "disturbare" i nostri professori per farci spiegare quello che non avevamo capito senza timore, abbiamo vissuto con entusiasmo i primissimi anni del Movimento Studentesco (dal 1964 in poi), le occupazioni dell'Istituto e de La Sapienza con grandi speranze. Adesso...

Andavamo a prendere il caffè da Battellino

Danilo Giulietti*

1. Introduzione

La prima volta che lo vidi me lo indicarono dicendo: «vedi, quello è un professore che è stato papabile per il Nobel». Era Adriano Gozzini che stava andando a prendere l'ennesimo caffè da Battellino. Io ho avuto il privilegio di essere stato un suo allievo e di aver respirato quell'aria di produttivo disordine, pieno di sempre nuove idee, molta passione e povera strumentazione, spesso acquistata da un rigattiere divenuto proverbiale in Piazza Torricelli: il Sig. Cavaciocchi. In queste poche pagine vorrei ricordare quel clima scientifico e come nei decenni seguenti si siano sviluppate alcune linee di ricerca, il cui il seme fu gettato allora.

2. I laureandi del LaFAM

Nei primi anni '70 molti di noi erano in cerca di una Tesi di Laurea, o vi stavano già lavorando. In Piazza Torricelli, dove avevamo seguito la maggior parte dei corsi (quelli di Analisi erano tenuti parte in Sapienza, parte in un'aula a cui si accedeva da via dei Mille, Laboratorio I e II in un capannone vicino al Palazzo Ricci) l'attività sperimentale prevalente era quella della Struttura della Materia, in cui figura di indiscusso riferimento era Adriano Gozzini (figura 1).

Il sabato mattina Gozzini faceva gli esami di Struttura della Materia, affiancato da Gerardo Alzetta e/o Arriguccio Battaglia. L'esito dell'esame era alquanto incerto, nel senso che poteva prevedere domande non solo sul programma, ma anche relative a qualche specifico esperimento, che in quel momento Gozzini stava seguendo. Gli esami erano per Gozzini un modo per stabilire un contatto diretto con gli studenti che stavano concludendo il corso di Laurea in Fisica, individuando fra essi quelli che sarebbero stati i suoi più giovani collaboratori. Fu appunto così che Fulvio Cornolti, Mauro Lucchesi, Francesco Giammanco, Paola Bicchi, io stesso

* Dipartimento di Fisica dell'Università e INFN, Pisa, Italy.

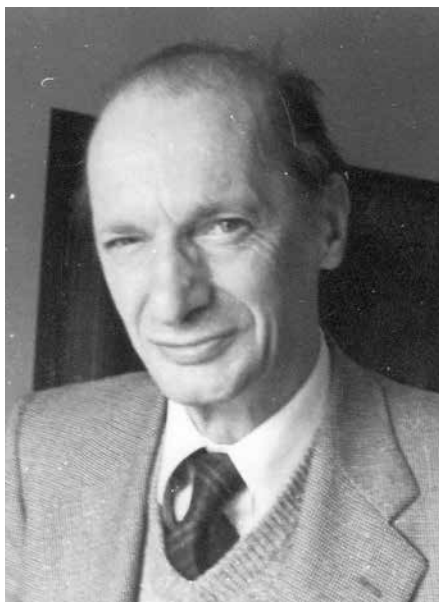


Figura 1. Adriano Gozzini.

ed altri ancora, di cui ho dimenticato il nome, ma non il volto, ci trovammo sulla strada di Gello, dove allora si trovava il laboratorio fondato da Gozzini: il LaFAM.

Una caratteristica del Laboratorio di Fisica Atomica e Molecolare (LaFAM) era la pluralità delle linee di ricerca in esso attivate, che andavano dalla spettroscopia atomica e molecolare in diverse bande di frequenza (r.f., m.o., ottica) all'ottica non-lineare, dal pompaggio ottico alle proprietà dielettriche dei liquidi, dalla calorimetria al potere emissivo dei metalli, dalla realizzazione dei primi sistemi laser alla radioastronomia. Questa vastissima gamma di attività si ampliava ulteriormente se si considerano anche le attività connesse allo svolgimento delle

tesi di laurea di indirizzo didattico. Queste ultime erano talvolta assai originali, come quella ad esempio che si proponeva di mettere in evidenza il ruolo della forza di gravità nella crescita di una pianta. In quel caso l'apparato sperimentale consisteva semplicemente in un cerchione di bicicletta, messo in rotazione costante lungo un asse verticale, sul quale erano saldati piccoli contenitori riempiti di terra in cui germogliava un fagiolo. Uno di questi contenitori si trovava proprio sull'asse di rotazione. Il germoglio di quest'ultimo contenitore si sviluppava verticalmente, mentre gli altri nella direzione opposta alla risultante dell'accelerazione gravitazionale e di quella centrifuga.

3. Il LaFAM

Il LaFAM (figura 2) era collocato in tre palazzine di due piani, lungo la via di Gello, nell'immediata periferia di Pisa. Al primo impatto quegli ambienti, di civile abitazione, ma adattati alle esigenze di un laboratorio scientifico, risultavano al tempo stesso un po' strani e familiari. Come se a casa propria uno vedesse installato in sala da pranzo un laser ad Argon, un magnete per EPR in cucina e nel bagno le vasche per lo sviluppo ed il fissaggio delle carte fotografiche, il proiettore e tutto l'armamentario di un laboratorio fotografico.



Figura 2. Il LaFAM.

I tecnici avevano un ruolo centrale nel LaFAM, in quanto le attività, tutte di carattere sperimentale, dipendevano fortemente dalla loro abilità nel realizzare parti cruciali degli apparati che venivano di volta in volta progettati. Erano tornitori, meccanici, elettronici, vetrai dalle grandi capacità, molto appassionati del loro lavoro, che vedevano inserito in progetti scientifici sui quali i ricercatori erano intensamente impegnati. Alcuni di loro, in particolare i tecnici del vetro, avevano delle abilità così rare che venivano loro richieste da parte di ricercatori di altri laboratori italiani o esteri per la realizzazione di parti fondamentali di specifici apparati sperimentali. Un evento annuale, che coinvolgeva tutto il Laboratorio, era la “cena dei trucioli”. In genere veniva organizzata in un ristorante di Volterra (la cui specialità era la cacciagione) in occasione della vendita dello scarto di materiale metallico, prodotto nelle lavorazioni al tornio o alla fresa. Molti tecnici erano in effetti accaniti cacciatori, all’occasione anche pescatori o cercatori di tartufi.

In generale, aldilà di questi ed altri eventi conviviali, l’atmosfera che si respirava al LaFAM era assai gradevole, almeno per noi giovani laureandi. L’ambiente, decisamente informale, consentiva di sviluppare un’efficace collaborazione fra i vari piccoli o piccolissimi gruppi impegnati sulle differenti esperienze. La collaborazione era necessaria anche perché alcune strumentazioni importanti (oscillografo con memoria, voltmetro digitale, gaussmetro, generatore di forme d’onda, lock-in, Fabry-Perot,...) erano uniche e quindi dovevano girare fra i gruppi che se ne servivano a turno.



Figura 3. Adriano Gozzini con Alfred Kastler (a sinistra) ed altri illustri fisici.

La strumentazione non era molto ricca ed aggiornata. Una parte di essa proveniva dallo smantellamento di materiale bellico giacente nella vicina base di Camp Darby. Il tramite era un personaggio, divenuto “mitico” in Piazza Torricelli: il Sig. Cavaciocchi. Egli veniva frequentemente a trovare Gozzini in “Palazzina”, mostrando un suo catalogo o direttamente componenti ottiche, elettroniche o per micro-onde, che tirava fuori da un borsone di pelle.

La “Palazzina” era il “quartier generale” del LaFAM. Si trovava (e tuttora si trova) in Piazza Torricelli, a lato del vecchio Dipartimento di Fisica, all’inizio di via Galvani. Lì Gozzini aveva il suo studio, dove faceva gli esami e riceveva una quantità di persone che, per i motivi più vari, lo contattavano o erano in relazione con lui (figura 3).

Questo era l’ambiente scientifico e umano in cui noi laureandi, poi giovanissimi ricercatori ci muovevamo. Era un modo un po’ “hobbistico” di concepire l’attività di ricerca, nel senso che essa non era indirizzata su uno specifico tema o forzatamente imbrigliata da un progetto che ne definiva i limiti, ma si sviluppava sulla base delle sempre inaspettate risposte che la Natura ($\Phi\upsilon\sigma\iota\varsigma$) ci dava quando essa era interrogata attraverso un esperimento. Alcune rilevanti linee di ricerca presero il via in quegli anni in maniera alquanto casuale. Fu il caso ad esempio della bistabilità ottica, della così detta “riga nera”, dei plasmi prodotti da laser.

La maggior parte del nostro tempo la passavamo in laboratorio, essendo dei fisici sperimentali, ma eravamo abituati ad analizzare noi stessi

i dati raccolti e ad interpretarli sulla base della teoria. Seguendo l'approccio tipico di Gozzini, questa interpretazione teorica si basava principalmente sulla stima degli ordini di grandezza dei fenomeni osservati. Seguiva poi un lavoro interpretativo più accurato, che talvolta richiedeva il contributo di "teorici di professione". Ci rivolgevamo in quel caso ad Adriano Di Giacomo o a Luigi Picasso. Se poi la "matematica" si faceva per noi troppo difficile... c'era pur sempre Ennio De Giorgi!

4. IFAM e IPCF

Alla fine di quel decennio "pioneristico" molte cose cambiarono nel laboratorio a partire dal suo nome, che divenne IFAM (Istituto di Fisica Atomica e Molecolare) e successivamente IPCF (Istituto per i Processi Chimico-Fisici). Anche la direzione cambiò divenendo dai primi anni '80 appannaggio di ricercatori CNR. Tuttavia le molte ed eterogenee idee di ricerca che Gozzini aveva disseminato si svilupparono attraverso le attività dei diversi gruppi che andavano formandosi. L'evoluzione di queste linee di ricerca era quasi sempre legata all'"imprinting" che ciascuno di noi aveva avuto durante lo svolgimento della Tesi di Laurea, alla disponibilità della strumentazione e naturalmente alle "affinità elettive" che andavano sviluppandosi fra di noi. Fu il caso ad esempio di Mauro Lucchesi e mio.

5. Potere emissivo dei corpi a basse temperature

Entrambi avevamo utilizzato dei laser durante il lavoro di tesi [1], [2]. Mauro un Laser a Rubino impulsato per studi sulla pressione di radiazione; io un Laser ad Argon in continua per spettroscopia molecolare. Per motivi contingenti queste due attività si erano arrestate, mentre c'era per noi la possibilità di sviluppare un'idea di Gozzini per la determinazione del potere emissivo dei corpi a basse temperature. Attraverso la misura della frequenza di risonanza di una cavità cilindrica a microonde si potevano rilevare variazioni della lunghezza di sottili lamine campione illuminate sotto vuoto e da queste desumere il valore del potere emissivo della loro superficie [3]. Con Mauro facemmo molto lavoro sull'argomento, fino a concepire un esperimento che consentiva di determinare la costante di Stefan-Boltzmann, mediante una tecnica calorimetrica [4]. Un piccolo cilindro realizzato con un sottile lamierino di rame, scaldato sotto vuoto mediante un fascetto di luce, veniva successivamente lasciato raffreddare per irraggiamento. Confrontando le costanti tempo di raffreddamento con e senza un piccolo foro praticato sul cilindro, si poteva risalire alla

costante di Stefan-Boltzmann. La superficie del foro (inferiore all'1% della superficie del cilindro), emettendo come un Corpo Nero, contribuiva al raffreddamento per radiazione del cilindro molto più della superficie totale del cilindro stesso! Con quell'esperimento concludemmo la nostra attività sul potere emissivo dei corpi. Tuttavia le competenze, anche teoriche, che avevamo acquisito sulle proprietà dei metalli, assieme a quella che avevamo da tempo sui lasers ci diedero l'opportunità di inserirci in un'altra attività presente all'interno del LaFAM, relativa all'interazione laser-plasma.

6. Plasmi ed onde d'urto

Questa attività era nata per caso durante la Tesi di Laurea di Francesco Giammanco [5], incentrata sull'emissione indotta a due fotoni in una transizione elettronica del Mercurio. In questo genere di esperimenti, quando si focalizzava la radiazione di un laser Rubino impulsato all'interno di una cella di vetro contenente il vapore atomico che si stava studiando, si osservava un'emissione di radiazione con spettro continuo proveniente dalla finestra d'ingresso e d'uscita della cella. Questa radiazione fu presto attribuita all'emissione di Bremsstrahlung del plasma prodotto alla superficie delle finestre ottiche della cella [6]. Con Mauro Lucchesi ci inserimmo in questa nascente attività sui plasmi prodotti da laser, mettendo su una sofisticata diagnostica per la mappatura tridimensionale della densità del plasma, risolta nel tempo [7]. Essa consisteva in un sistema d'interferometria olografica, che si avvaleva di un laser a Rubino, doppio impulso, la cui durata era di circa 30ns, mentre la distanza temporale fra i due impulsi poteva variare da poche decine di ns fino a centinaia di μ s. In questa maniera si poteva seguire l'evoluzione di onde d'urto implosive, riflesse dalle superfici sferiche di un apparato appositamente realizzato e verificare il loro effetto nell'ulteriore riscaldamento del plasma originariamente generato [8].

7. Interazione laser-plasma

Lo studio delle onde d'urto prodotte nei gas attraverso la subitanea formazione di un plasma mediante la focalizzazione di un impulso laser di potenza si protrasse a lungo, estendendosi ai fenomeni non-lineari che si sviluppano durante l'interazione laser plasma, come il Self-Focusing, la generazione di armoniche, le instabilità parametriche ed altri ancora [9], [10]. Questa crescente attività vide, a partire dai primi anni '90, il coinvolgimento di numerosi studenti (poi divenuti preziosi collaboratori), prove-

nienti dal corso di Ottica Quantistica appena attivato, nel quale una buona parte del programma era incentrata proprio sull'interazione laser-materia ad alte intensità. Ma il vero e proprio salto di qualità avvenne con i primi Progetti Europei, nei quali ci trovammo coinvolti: GAUSEX [11] e SILASI [12], che ci aprirono definitivamente ad una collaborazione Europea (Ecole Polytechnique, RAL, Darmstadt University of Technology...).

8. Accelerazione degli elettroni nei plasmi

In particolare alcuni fortunati esperimenti condotti presso il Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) dell'Ecole Polytechnique reindirizzarono casualmente la nostra attività. Al LOA potevamo disporre dei primi laser ad impulsi ultra-corti (35fs) di grande potenza (10TW). Con essi volevamo studiare quei processi di assorbimento che si possono produrre durante l'interazione laser-plasma, quando i gradienti di densità all'interfaccia plasma-vuoto sono particolarmente ripidi ($\approx 100\text{\AA}$). L'esperimento andò molto bene [13], anche se i nostri rivelatori mostravano un insolito rumore di fondo, assai pronunciato. Ci venne il sospetto che potessero essere degli elettroni energetici, che, incidendo sulle pareti della camera da vuoto, emettevano radiazione X mediante Bremsstrahlung. In effetti in un successivo esperimento, nel quale ci eravamo dotati di strumentazione adatta a rivelare elettroni energetici, rivelammo elettroni da molte decine di MeV [14]. Non volendo stavamo aprendo un nuovo capitolo nella Fisica dell'interazione laser-materia ad altissime intensità: l'Accelerazione Laser-Plasma (LPA) di elettroni e ioni. L'interpretazione del fenomeno fu presto consolidata: gli impulsi laser ultra-corti (decine di fs), di altissima intensità ($I > 10^{18} \text{W/cm}^2$) eccitano, tramite le forze ponderomotrici, onde elettroniche di plasma, il cui campo elettrico, decine di migliaia di volte superiore a quello utilizzabile nei grandi acceleratori (CERN), è in grado di accelerare elettroni, portandoli a centinaia di MeV su lunghezze di accelerazione di pochi millimetri.

9. PLASMONX

I risultati di questi esperimenti destarono grande interesse nel mondo scientifico. Il Direttore dei Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) organizzò un paio di seminari in cui i risultati ottenuti al LOA furono presentati e discussi. Dopo un primo momento d'incredulità, l'INFN decise di realizzare presso i LNF un laboratorio dedicato a questa innovativa Tecnica di Accelerazione. Nasceva così il Progetto Strategico PLASMONX (PLASma acceleration and MONochromatic X-ray production), con il quale l'INFN

si dotava fra l'altro del più potente laser Italiano (300TW) e fra i più potenti al mondo (nel 2005!) per sviluppare la LPA e correlate, innovative sorgenti di radiazione X-gamma [15].

Tramite PLASMONX l'INFN entrava da protagonista nei più vasti progetti Europei ELI (Extreme Light Infrastructure) [16] e HiPER (European High Power laser Energy Research facility) [17] e successivamente EUPRAXIA (European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications) [18].

Ma questa è un'altra storia...

Bibliografia

- [1] M. Lucchesi, (1973). Tesi di Laurea: *Impulso dei fotoni in un mezzo dielettrico trasparente*. Relatore: G. Fornaca.
- [2] D. Giulietti, (1973). Tesi di Laurea: *Fluorescenza molecolare di Na₂K₂, NaK indotta da radiazione laser*. Relatore: A. Gozzini.
- [3] D. Giulietti, A. Gozzini, M. Lucchesi, R. Stampacchia, *A calorimetric technique for measuring total emissivity of solid materials and coatings*, J. Phys. D.: Appl. Phys. **12**, 2027, 1979.
- [4] D. Giulietti, M. Lucchesi, L. Galgani, *A calorimetric method for the measurement of the Stefan-Boltzmann constant*, Nuovo Cimento, **74B**, 187, 1983.
- [5] F. Giammanco, (1973). Tesi di Laurea: *Emissione stimolata a due fotoni e Scattering Raman anti-Stokes in vapori di Hg*. Relatori: A. Giulietti, G. Fornaca.
- [6] F. Giammanco *et al.* *Optical signals produced in transparent dielectric surfaces irradiated by laser pulses below damage threshold*, Optics Comm. **10**, 46, 1974.
- [7] A. Giulietti, D. Giulietti, M. Lucchesi, M. Vaselli, *Converging shock on laser plasma: density profiles by holographic interferometry*, Optics Comm. **47**, 131, 1983.
- [8] F. Cornolti, A. Giulietti, D. Giulietti, M. Lucchesi, M. Vaselli, *Plasma shape and shock structure in a laser spark at low gas density*, Optics Comm., **57**, 249, 1986.
- [9] D. Giulietti, G.P. Banfi, I. Deha, A. Giulietti, M. Lucchesi, L. Nocera, Chen Ze Zun, *Second harmonic generation in underdense plasma*, Laser and Particle Beams **6**, 141, 1988.
- [10] D. Giulietti, V. Biancalana, D. Batani, A. Giulietti, L. Gizzi, L. Nocera, E. Schifano, *Three half harmonic generation in an inhomogeneous plasma: evidence for plasmon propagation*, Nuovo Cimento **13**, 845, 1991.

- [11] TMR European Networks *Generation and Application of Ultra-Short X-ray Pulses* (GAUSEX, Contract N.ERBFMRXCT960080).
- [12] European TMR-Network on. *Superintense Laser Pulse-Solid Interaction*. No.ERBFMRX-CT96-0043 <http://www.physik.tu-darmstadt.de/tqe/silasi/>.
- [13] D. Giulietti, L. Gizzi, V. Biancalana, T. Ceccotti, P. Audebert, J.P. Geindre, A. Mysyrowicz, *Reflection and transmission of high intensity femtosecond pulse focused on very thin plastic foils*, p. 331, *Ultrafast processes in spectroscopy*, Edited by O. Svelto, Plenum Press, New York, 1996.
- [14] D. Giulietti, M. Galimberti, A. Giulietti, L.A. Gizzi, R. Numico, P. Tomassini, M. Borghesi, V. Malka, S. Fritzler, M. Pittman, K. Ta Phouc, A. Pukhov, *Production of ultracollimated bunches of multi-MeV electrons produced by 35fs laser pulses propagating in exploding foil plasmas*, *Physics of Plasmas* **9**, 3655, 2002.
- [15] D. Giulietti, E. Breschi, M. Galimberti, A. Giulietti, L.A. Gizzi, P. Koester, L. Labate, P. Tomassini, P. Martin, T. Ceccotti, P. De Olivera, P. Monot, M. Borghesi, L. Romagnani, S. Kar, S. Bertolucci, M. Calvetti, A. Schiavi, O. Willi, *High brightness laser induced multi-MeV electron/proton sources*, *Int. Journal of Modern Physics* **22**, 3810, 2007.
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Extreme_Light_Infrastructure.
- [17] <http://www.hiper-laser.org/>.
- [18] <http://www.eupraxia-project.eu/>.

Fisica teorica della materia condensata alla Scuola Normale Superiore (1980-2000)

Giuseppe C. La Rocca*

Come allievo della Scuola Normale Superiore prima e poi come ricercatore, ho avuto il privilegio di conoscere personalmente quasi tutti i personaggi che hanno animato le attività in fisica teorica della materia condensata condotte presso la Scuola nell'ultima parte del secolo scorso. Mi scuso innanzitutto con loro, che ricordo con stima ed affetto grandi, se nella breve panoramica che sto per fare non potrò analizzare adeguatamente i loro tanti meriti scientifici, limitandomi a menzionare le principali linee di ricerca che si sono sviluppate ed intrecciate fruttuosamente in quegli anni. Il mio sarà un contributo privo di pretese di rigore storico e completezza (in particolare, le citazioni di specifici lavori hanno una mera valenza esemplificativa), condotto in gran parte sulla scorta della mia memoria.

Bassani, arrivato alla Scuola nel 1980, e Mario Tosi (figura 1), che gli si affianca nel 1991, sono certamente i protagonisti principali del grande sviluppo della disciplina in quegli anni. Una caratteristica accomuna i moltissimi allievi, di nuova e vecchia leva, e i colleghi provenienti da ogni parte d'Italia e del mondo che ruotano intorno a loro: sebbene ciascuno sia concentrato sul proprio progetto, tutti condividono la stessa passione per la ricerca e si sentono partecipi di uno sforzo comune.

Bassani, chiamato da Roma per iniziativa di Luigi Radicati di Brozolo, ritrova a Pisa molti altri amici e collaboratori; in particolare, convince a trasferirsi alla Scuola nel 1985 Adriano Gozzini (figura 2) che fonda il Laboratorio Polvani in via della Faggiola. Hanno così inizio le attività sperimentali che a partire dalla fisica atomica e molecolare cara a Gozzini presto si estenderanno anche alla fisica dei solidi e, segnatamente, alle nanostrutture a semiconduttore.

Nell'arco di tempo dal 1980 al 1991, sono presenti alla Scuola come professori associati Renato Colle, attivo in chimica fisica e computazionale, e il teorico di fisica della materia condensata Giancarlo Calvanese Strinati, chiamato da Roma nel 1986 per iniziativa di Bassani. Molti fra amici e collaboratori di Bassani si alternano per visite più o meno lun-

* Scuola Normale Superiore, Pisa.



Figura 1. Franco Bassani (a destra), Mario Tosi (a sinistra) e Gabriele Giuliani.

ghe presso la Scuola; tra questi, Antonio Quattropani dal Politecnico di Losanna e Sergio Rodriguez dalla Purdue University. In questo ambiente ricco di stimoli, si forma un nutrito gruppo di nuovi allievi di Bassani, tra cui l'autore, e si sviluppano sotto la sua guida varie tematiche di ricerca le cui radici si possono ricondurre alla teoria delle bande elettroniche esposta nel trattato ormai classico "Electronic states and optical transitions in solids" pubblicato da Franco Bassani e Giuseppe Pastori-Parravicini per i tipi della Pergamon Press nel 1975.

Un primo filone di ricerca è quello delle proprietà ottiche non-lineari in sistemi atomici e a stato solido al quale collaborano giovani normalisti quali Giovanni Vignale (Bassani e Vignale 1982) e colleghi di Bassani sia teorici, in particolare Quattropani (Quattropani e Bassani 1983), sia sperimentali (Pribram *et al.* 1983). Intanto, i primi allievi formati alla Scuola da Bassani iniziano a dare il proprio contributo soprattutto nel nuovo campo delle nanostrutture a semiconduttore: Lucio Claudio Andreani, Francesco Tassone e Alfredo Pasquarello pubblicano una serie di lavori sugli stati elettronici, eccitonici e polaritonici destinati ad essere referenze di riferimento imprescindibili (Andreani, Pasquarello *et al.* 1987; Andreani, Tassone *et al.* 1991; Quattropani, Andreani *et al.* 1986). Anche le proprietà elettroniche ed ottiche di cluster metallici vengono studiate col contributo di Giovanni Bachelet (Bachelet *et al.* 1983) e Franco Cocchini (Cocchini *et al.* 1985); nè vengono trascurate le proprietà di bulk, in par-



Figura 2. Adriano Gozzini (a destra), Franco Bassani (a sinistra) e Roberto Fieschi.

ticolare con lavori sulla magneto-ottica con Rodriguez (Bassani, La Rocca *et al.* 1988) e sui polaroni con Giuseppe Iadonisi (Iadonisi *et al.* 1989).

Giancarlo Calvanese Strinati sviluppa proprie linee di ricerca sulla fisica di sistemi complessi in presenza di disordine e di interazioni a molti corpi (Strinati, Castellani e Dicastro 1989; Strinati, Castellani, Dicastro e Kotliar 1991), e col suo allievo Enrico Arrigoni su sistemi magnetici (Arrigoni e Strinati 1991). Renato Colle porta avanti ricerche di carattere computazionale sull'energia di correlazione elettronica (Colle e Salvetti 1983), e con Stefano Simonucci, allievo della Scuola, sull'emissione Auger (Colle, Simonucci *et al.* 1988) (figura 3).

Nel 1991, il personale di ricerca in fisica teorica della materia condensata presso la Scuola si amplia con la presa di servizio come ricercatori di Paolo Giannozzi dal Politecnico di Losanna e dell'autore dal Max Planck Institut di Stoccarda, ma soprattutto con la chiamata di Mario Tosi da Trieste. L'anno dopo prende servizio come professore associato Fabio Beltram che succederà poi a Gozzini alla guida del laboratorio Polvani.

Come già aveva fatto Bassani, anche Mario Tosi dà vita ad una scuola di nuovi allievi e attira a Pisa per visite ricorrenti molti collaboratori, quali Norman March dall'Università di Oxford e Zehra Akdeniz dall'Università di Istanbul. Molti dei filoni di ricerca coltivati da Tosi nascono dalla fisica dei liquidi su cui assieme a March ha pubblicato nel 1976 l'influente testo "Atomic dynamics in liquids" per i tipi della Macmillan Press (figura 4).



Figura 3. Festa per i 60 anni di Franco Bassani.



Figura 4. Festa per i 72 anni di Mario Tosi.

Una prima linea di ricerca riguarda i liquidi ionici (Tatlipinar *et al.* 1992), i metalli liquidi vicini al punto di congelamento (March e Tosi 1999) e, con l'allieva Valentina Tozzini, i cristalli ionici vicini alla fusione (Tozzini e Tosi 1995). Un altro tema caro a Tosi è la fisica del gas di elettroni a cui dà contributi fondamentali assieme ai suoi allievi Sergio Conti, Riccardo Nifosi e Marco Polini (Bohm *et al.* 1996; Davoudi *et al.* 2001; Nifosi *et al.* 1998). Nel campo sono anche attivi i ricercatori del Forum-INFN, di cui Tosi dirige la sezione pisana, e in particolare Saverio Moroni (Moroni *et al.* 1995).

A partire dal 1995, quando i primi condensati di Bose-Einstein (BEC) di gas atomici ultrafreddi sono realizzati sperimentalmente, anche l'attenzione dei teorici si rivolge nuovamente a questi peculiari stati della materia e dalla Scuola vengono contributi fondamentali nel campo, grazie soprattutto a Tosi e ai suoi giovani allievi e postdoc, quali Anna Minguzzi, Marialuisa Chiofalo e Patrizia Vignolo (Chiofalo e Tosi 2000; Holland *et al.* 1997; Minguzzi e Tosi 1997; Vignolo *et al.* 2000), ma anche ad altri giovani normalisti, quali Fabio Pistolesi (Pistolesi e Strinati 1996), Chiara Menotti (Menotti *et al.* 2001) e Iacopo Carusotto (Carusotto e La Rocca 2000).

Nel decennio 1991-2000, giovani ricercatori del Forum-INFN e del gruppo di Bassani, con l'apporto di Vladimir Agranovich (figura 5) spesso in visita presso la Scuola dall'Istituto di Spettroscopia dell'Accademia delle Scienze Russa, sviluppano temi di ricerca legati alla fisica dei solidi e, in particolare, dei semiconduttori. Importanti contributi nel campo delle bande elettroniche e delle proprietà ottiche e vibrazionali vengono dati da Stefano de Gironcoli (Schorer *et al.* 1994), Jean-Marc Jancu (Jancu *et al.* 1998), Franco Buda (Buda *et al.* 1996), Angelo Bifone (Bifone e Bassani 1994), Reinhard Scholz (Scholz *et al.* 1997), Vincenzo Savona (Savona *et al.* 1994) e Paolo Giannozzi (Baroni e Giannozzi 1992; Giannozzi e Baroni 1994); nel campo delle eterostrutture a semiconduttore da Rosen Atanasov (Atanasov *et al.* 1994), Denis Basko (Basko *et al.* 1999), De Andrada e Silva (De Andrada e Silva *et al.* 1997) e Alessandro Tredicucci (Bassani, Czajkowski *et al.* 1995); nel campo dell'ottica non-lineare da Sandro Scandolo (Bassani e Scandolo 1991) e Valerio Lucarini (Bassani e Lucarini 2000) (figura 6).

Moltissimi sono gli eventi, di grande e piccola taglia, organizzati nel ventennio 1980-2000 dai teorici di materia condensata attivi presso la Scuola. Tra i "piccoli" eventi, vorrei qui ricordare a titolo esemplificativo il workshop Forum - INFN organizzato da Franco Buda e Paolo Giannozzi nel 1997 su Computer simulations of systems of biological interest, un ambito di ricerca divenuto oggi di grandissimo interesse. Tra i "grandi" eventi, spicca la settimana General Conference of the Condensed Matter Division della Società di Fisica Europea (figura 7) organizzata da Franco Bassani, Giuseppe Grosso, Giuseppe Pastori-Parravicini e Mario Tosi



Figura 5. In piedi: Vladimir Agranovich (a destra) e Robert Knox; seduti: Franco Bassani (a destra) e l'autore.



Figura 6. In piedi: Valerio Lucarini (l'ultimo laureando seguito personalmente da Franco Bassani); seduti (di spalle, da sinistra a destra): Liana Martinelli, Franco Bassani e Giuseppe Grosso.

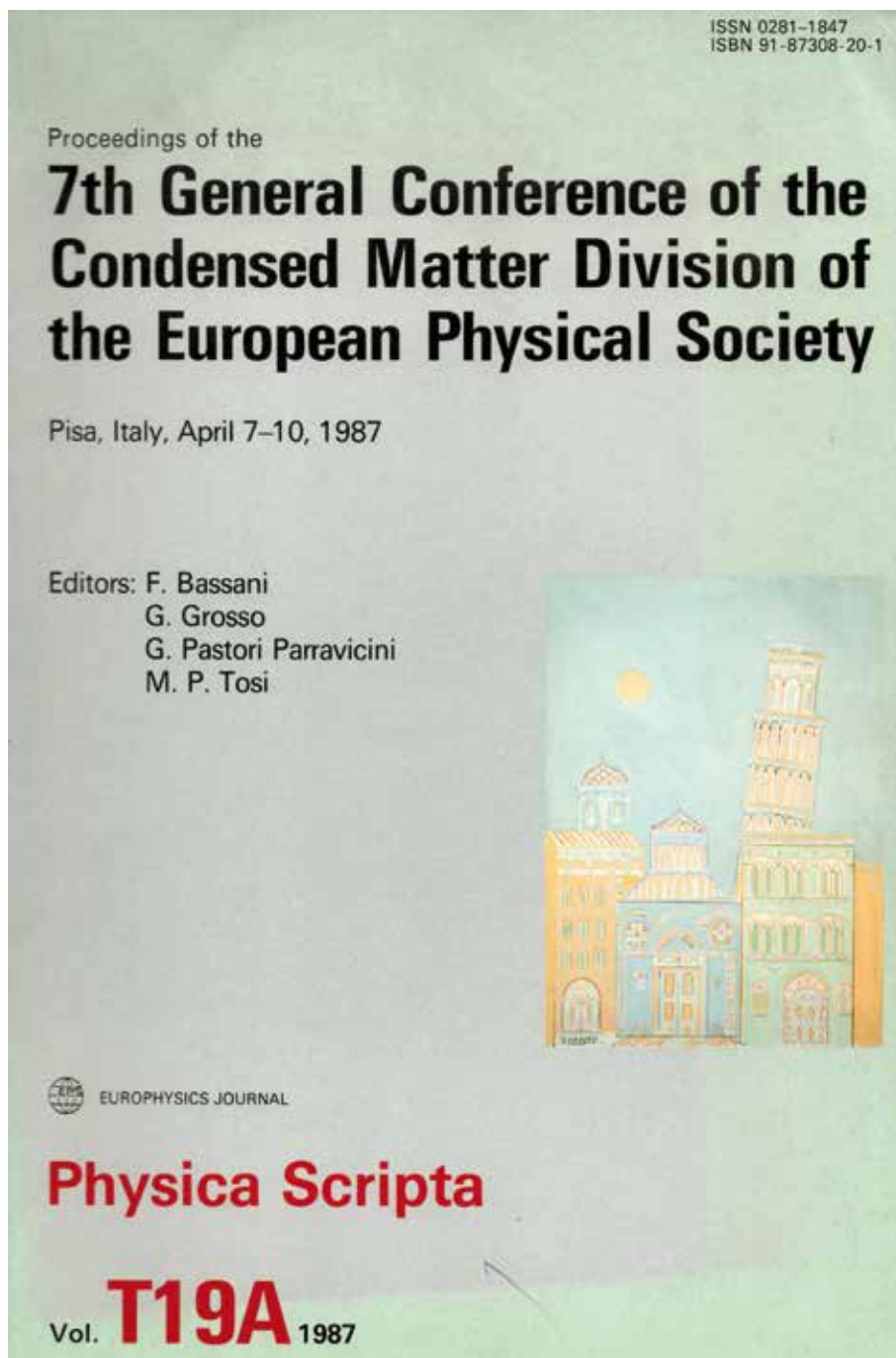


Figura 7. Proceedings della settima General Conference of the Condensed Matter Division della Società di Fisica Europea.

presso l'Università di Pisa e la Scuola Normale Superiore nel 1987, a testimoniare l'assoluta autorevolezza internazionale della scuola pisana in fisica teorica della materia condensata.

Franco Bassani e Mario Tosi non hanno mai sottovalutato l'importanza che i propri allievi condividessero gli interessi scientifici e mantenessero i contatti anche se anagraficamente e geograficamente distanti. Questo ha permesso ai più giovani di imparare più facilmente ed ai meno giovani di essere costantemente stimolati. Per chi come me ha avuto il privilegio di vivere quegli anni è stata un'esperienza indimenticabile, e continua ad esserlo anche ora che i nostri Maestri non sono più con noi.

Bibliografia

- Andreani, LC, A Pasquarello e F Bassani, *Hole subbands in strained Ga-As-GaAlAs quantum-wells: exact solution of the effective-mass equation*, Physical Review B, vol. 36, 1987, pp. 5887-5894.
- Andreani, LC, F Tassone e F Bassani, *Radiative lifetime of free-excitons in quantum-wells*, Solid State Communications, vol. 77, 1991, 641-645.
- Arrigoni, E e GC Strinati, *Doping-induced incommensurate antiferromagnetism in a Mott-Hubbard insulator*, Physical Review B, vol. 44, 1991, pp. 7455-7465.
- Atanasov, R, F Bassani e VM Agranovich, *2nd-order nonlinear optical susceptibility of asymmetric quantum wells*, Physical Review B, vol. 50, 1994, pp. 7809-7819.
- Bachelet, GB, F Bassani, M Bourg e A Julg, *Surface and size effects on the electronic states of small metallic clusters*, Journal of Physics C-Solid State Physics, vol. 16, 1983, pp. 4305-4320.
- Baroni, S e P Giannozzi, *Towards very-large scale electronic-structure calculations*, Europhysics Letters, vol. 17, 1992, pp. 547-552.
- Basko, D, GC La Rocca, F Bassani e VM Agranovich, *Forster energy transfer from a semiconductor quantum well to an organic material overlayer*, European Physical Journal B, vol. 8, 1999, pp. 353-362.
- Bassani, F, G Czajkowski e A Tredicucci, *Polaritons in anisotropic semiconductors*, Zeitschrift fur Physik B, vol. 98 1995, pp. 39-47.
- Bassani, F, GC La Rocca e S Rodriguez, *Inversion asymmetry and hole magneto-optics in zincblende semiconductors*, Physical Review B, vol. 37, 1988, pp. 6857-6867.
- Bassani, F e V Lucarini, *Asymptotic behaviour and general properties of harmonic generation susceptibilities*, European Physical Journal B, vol. 17, 2000, pp. 567-573.

- Bassani, F e S Scandolo, *Dispersion relations and sum rules in nonlinear optics*, Physical Review B, vol. 44, 1991, pp. 8446-8453.
- Bassani, F e G Vignale, *Two-photon transitions in two-electron systems*, Nuovo Cimento D, vol. 1, 1982, pp. 519-539.
- Bifone, A e F Bassani, *A tight-binding model for the optical-properties of Au55-clusters*, Zeitschrift fur Physik D, vol. 29, 1994, pp. 73-80.
- Bohm, HM, S Conti e MP Tosi, *Plasmon dispersion and dynamic exchange-correlation potentials from two-pair excitations in degenerate plasmas*, Journal of Physics-Condensed Matter, vol. 8, 1996, pp. 781-797.
- Buda, F, HJM deGroot e A Bifone, *Charge localization and dynamics in rhodopsin*, Physical Review Letters, vol. 77, 1996, pp. 4474-4477.
- Carusotto, I e GC La Rocca, *Modulated optical lattice as an atomic Fabry-Perot interferometer*, Physical Review Letters, vol. 84, 2000, pp. 399-403.
- Chiofalo, ML e MP Tosi, *Output from Bose condensates in tunnel arrays: the role of mean-field interactions and of transverse confinement*, Physics Letters A, vol. 268, 2000, pp. 406-412.
- Cocchini, F, F Bassani e M Bourg, *Model calculation of the optical properties of metallic particles in a dielectric medium*, Surface Science, vol. 156, 1985, pp. 851-858.
- Colle, R e O Salvetti, *A general method for approximating the electronic correlation-energy in molecules and solids*, Journal of Chemical Physics, vol. 79, 1983, pp. 1404-1407.
- Colle, R, S Simonucci e TO Woodruff, *Auger emission from the LiF molecule*, Physical Review A, vol. 38, 1988, pp. 694-700.
- Davoudi, B, M Polini, GR Giuliani e MP Tosi, *Analytical expressions for the charge-charge local-field factor and the exchange-correlation kernel of a two-dimensional electron gas*, Physical Review B, vol. 64, 2001, p. 153101.
- De Andrada e Silva, E, GC La Rocca e F Bassani, *Spin-orbit splitting of electronic states in semiconductor asymmetric quantum wells*, Physical Review B, vol. 55, 1997, pp. 16293-16299.
- Giannozzi, P e S Baroni, *Vibrational and dielectric properties of C-60 from density-functional perturbation-theory*, Journal of Chemical Physics, vol. 100, 1994, pp. 8537-8539.
- Holland, MJ, DS Jin, ML Chiofalo e J Cooper, *Emergence of interaction effects in Bose-Einstein condensation*, Physical Review Letters, vol. 78, 1997, pp. 3801-3805.
- Iadonisi, G, F Bassani e GC Strinati, *Polaronic effects on exciton-states*, Physica Status Solidi B, vol. 153, 1989, pp. 611-622.

- Jancu, JM, R Scholz, F Beltram e F Bassani, *Empirical spds* tightbinding calculation for cubic semiconductors: General method and material parameters*, Physical Review B, vol. 57, 1998, pp. 6493-6507.
- March, NH e MP Tosi, *Generalized Stokes-Einstein relation for liquid metals near freezing*, Physical Review E, vol. 60, 1999, pp. 2402-2403.
- Menotti, C, JR Anglin, JI Cirac e P Zoller, *Dynamic splitting of a Bose-Einstein condensate*, Physical Review A, vol. 63, 2001, p. 023601.
- Minguzzi, A e MP Tosi, *Linear density response in the random-phase approximation for confined Bose vapours at finite temperature*, Journal of Physics-Condensed Matter, vol. 9, 1997, pp. 10211-10223.
- Moroni, S, DM Ceperly e G Senatore, *Static response and local-field factor of the electron-gas*, Physical Review Letters, vol. 75, 1995, pp. 689-692.
- Nifosi, R, S Conti e MP Tosi, *Dynamic exchange-correlation potentials for the electron gas in dimensionality $D = 3$ and $D = 2$* , Physical Review B, vol. 58, 1998, pp. 12758-12769.
- Pistolesi, F e GC Strinati, *Evolution from BCS superconductivity to Bose condensation: Calculation of the zero-temperature phase coherence length*, Physical Review B, vol. 53, 1996, pp. 15168-15192.
- Pribram, JK, GL Koos, F Bassani e JP Wolfe, *Resonant two-photon absorption by exciton-polaritons in evaporated CuCl films*, Physical Review B, vol. 28, 1983, pp. 1048-1055.
- Quattropani, A, LC Andreani e F Bassani, *Quantum-theory of polaritons with spatial dispersion: exact solutions*, Nuovo Cimento D, vol. 7, 1986, pp. 55-69.
- Quattropani, A e F Bassani, *Two-photon transitions in positronium*, Physical Review Letters, vol. 50, 1983, pp. 1258-1260.
- Savona, V, F Bassani e S Rodriguez, *Near-infrared transitions in iron-based diluted magnetic semiconductors*, Physical Review B, vol. 49, 1994, pp. 2408-2417.
- Scholz, R, M Schreiber, F Bassani, M Nisoli, S De Silvestri e O Svelto, *Subpicosecond vibronic dynamics in KBr F centers*, Physical Review B, vol. 56, 1997, pp. 1179-1195.
- Schorer, R, G Abstreiter, S De Gironcoli I, E Molinari, H Kibbel e H Presting, *Inplane Raman scattering of (001)-Si/Ge superlattices*, Physical Review B, vol. 49, 1994, pp. 5406-5414.
- Strinati, GC, C Castellani e C Dicastro, *Kinetic-equation for strongly disordered systems: noninteracting electrons*, Physical Review B, vol. 40, 1989, pp. 12237-12254.
- Strinati, GC, C Castellani, C Dicastro e G Kotliar, *Kinetic-equation for strongly disordered systems: interacting electrons*, Physical Review B, vol. 44, 1991, pp. 6078-6089.

- Tatlipinar, H, Z Akdeniz, G Pastore e MP Tosi, *Atomic size effects on local coordination and medium-range order in molten trivalent metal chlorides*, Journal of Physics-Condensed Matter, vol. 4, 1992, pp. 8933-8944.
- Tozzini, V e MP Tosi, *Vibrational and elastic properties of alkali-halides near melting*, in Philosophical Magazine B, vol. 72, 1995, pp. 577-588.
- Vignolo, P, A Minguzzi e MP Tosi, *Exact particle and kinetic-energy densities for one-dimensional confined gases of noninteracting fermions*, Physical Review Letters, vol. 85, 2000, pp. 2850-2853.

**LA FISICA SPERIMENTALE
DELLE INTERAZIONI FONDAMENTALI**

La relazione di Carlo Bemporad ripercorre le principali tappe della nascita a Pisa, negli anni '50, della fisica sperimentale delle particelle, resa possibile grazie alla presenza di Marcello Conversi, Carlo Franzinetti e Giorgio Salvini e dai loro allievi. Vengono ricordati i primi esperimenti agli acceleratori: ai sincrotroni di Frascati e Desy, al cosmotrone di Brookhaven e al protosincrotrone del CERN. Bemporad discute poi, arrivando fino agli anni '90, gli esperimenti effettuati senza acceleratori: con i raggi cosmici, in caverna e nello spazio, e con i neutrini sia generati da reattori nucleari che provenienti dal cosmo.

Giorgio Bellettini racconta il grande sviluppo degli esperimenti agli acceleratori a partire degli anni '60: dai primi esperimenti con gli elettrosincrotroni di Frascati e Daresbury, a quelli sullo scattering elastico di protoni al protosincrotrone del CERN, alla ricerca di risonanze al laboratorio di Protvino (URSS), alla scoperta della J/Psi a Brookhaven e SLAC, e la sua conferma avvenuta al collisionatore e^+e^- Adone di Frascati. Bellettini passa poi a presentare gli esperimenti agli anelli di collisione per protoni del CERN con le misure delle sezioni d'urto protone-protone e antiprotone-protone e la produzione di coppie di muoni. Infine Bellettini ricorda le prime misure di vite medie di mesoni con charm nell'esperimento FRAMM, e l'esperimento NA31/NA48 per la misura della violazione di CP nel decadimento del mesone K neutro.

Il contributo di Marco Maria Massai e Gloria Spandre è dedicato alla collaborazione tra Marcello Conversi e Adriano Gozzini sulla "camera a luminescenza" e sui primi sviluppi e applicazioni di rivelatori di tracce basati su camere a gas a ionizzazione.

Susanna Bertelli illustra le attività di Giorgio Salvini per la realizzazione dell'elettrosincrotrone di Frascati e il contributo fornito dai pisani alla sua costruzione.

Luigi Di Lella espone i suoi ricordi sulle esperienze di giovane fisico negli anni '50 e, in particolare, si concentra sul contributo dei fisici pisani negli esperimenti che li hanno visti come suoi collaboratori: scattering su protoni polarizzati al protosincrotrone del CERN, UA2 al collisionatore protone-antiprotone del CERN con lo studio dei bosoni W e Z, e la ricerca di oscillazioni tra neutrini muonici e neutrini tau nell'esperimento NOMAD al CERN.

Henry Frisch illustra, con toni vivaci, la nascita dell'esperimento CDF al collisionatore protone-antiprotone del Fermilab, negli anni 80, e l'impatto determinante dei fisici pisani sia nella fase di progettazione che in quella di realizzazione del calorimetro adronico e del rivelatore di vertice di precisione: SVX/SVT, determinanti per la scoperta del quark top negli anni '90.

Jacques Lefrançois ripercorre le prime fasi dell'esperimento Aleph al CERN con l'importante contributo dei fisici pisani che furono tra i fon-

datori di Aleph e, negli anni '80, contribuirono in maniera determinante alla costruzione del calorimetro adronico e del rivelatore di vertice. Lefrançois ricorda anche i primi risultati ottenuti da Aleph nella misura del numero di famiglie di neutrini e nella fisica del leptone tau.

Angelo Scribano ricorda l'avventurosa esperienza dei fisici pisani, oltre la cortina di ferro, agli inizi degli anni '70 presso il protosincrotrone di 70 GeV di Protvino, e i suoi risultati nella ricerca di risonanze mesoniche neutre.

Rino Castaldi ripercorre, con accenti personali e anche con aneddoti, il suo ingresso nella fisica delle particelle elementari: a partire dalle prime misure di fotoproduzione di mesoni vettoriali a Desy, alla misura della sezione d'urto totale protone-protone e delle coppie di muoni agli anelli di accumulazione di protoni al CERN, alla misura della sezione d'urto totale al collisionatore p-pbar del CERN, e all'esperimento SLD al linear collider e^+e^- di SLAC.

La relazione di Diego Passuello e Francesco Fidecaro riporta l'intervento che Adalberto Giazotto ha voluto svolgere in occasione della presentazione della prima rivelazione di onde gravitazionali nel 2016. Vengono descritti la nascita e lo sviluppo, negli anni '80, del progetto Virgo presso Cascina, dando conto anche delle difficoltà iniziali incontrate nel portare avanti una iniziativa di quelle dimensioni. Sono poi descritti gli sviluppi sperimentali (il super attenuatore) necessari a portare la sensibilità di Virgo a limiti che rendessero accessibili le misure di fisica.

Alberto Del Guerra ci ricorda come sia nata a Pisa negli anni '70 la fisica medica: dalle prime applicazioni in medicina nucleare, alla radiologia digitale, alle applicazioni di tomografia ad emissione di positroni (PET) avvalendosi anche delle tecnologie più avanzate della fisica di base. La scuola di specializzazione in fisica sanitaria, istituita a Pisa, per la prima volta in Italia, nel 1981, ha rappresentato il riconoscimento ufficiale della disciplina che ora vanta a Pisa un gruppo numeroso di ricercatori con una qualificata attività di ricerca interdisciplinare.

Nascita a Pisa della sperimentazione in “fisica delle particelle elementari”

Carlo Bemporad*

Vengono esaminate le fasi iniziali della “Fisica Sperimentale delle Particelle Elementari” a Pisa e se ne segue brevemente lo sviluppo fino a circa gli anni '80. Una attenzione particolare viene data agli “Esperimenti senza Acceleratori” e a quelli di “Fisica dei Neutrini”, eseguiti mediante raggi cosmici, a reattori o ad acceleratori (esperimenti afferenti alla Commissione Scientifica II). Ciò rispecchia la ben nota ripartizione delle attività dell'INFN fra le varie Commissioni Scientifiche Nazionali. La fisica afferente alla Commissione Scientifica II verrà seguita dai suoi inizi fino a tempi a noi più prossimi.

La “Fisica della Particelle” non ha certo avuto origine a Pisa, ma è piuttosto da ricollegarsi con le attività del gruppo formatosi a Roma intorno ad Enrico Fermi¹.

Altre attività seminali sono state quelle relative agli studi sui raggi cosmici, iniziati e potenziati in Italia principalmente ad opera di Bruno Rossi, Gilberto Bernardini ed altri a Firenze, Milano, Torino, Padova. Nel dopoguerra alcune di queste attività proseguirono nei nuovi laboratori dei Sabbioni e della Testa Grigia (1948). Con la creazione dell'INFN nel 1951 questo Istituto provvide ad una coordinazione delle ricerche, inizialmente fra il 1951 e il 1952. Un primo riordino dell'Istituto portò alla creazione delle sezioni di Roma, Firenze, Padova, Milano, Torino. Nel 1954 fu istituita a Pisa la “Sezione Sincrotrone”, poi trasferita a Frascati. Finalmente nel 1956 furono aggiunte le nuove sezioni di Bologna e Pisa. Questo ritardo, fra l'istituzione delle prime sezioni INFN e l'aggiunta della sezione di Pisa, rispecchia in qualche modo la scarsa presenza di Pisa nelle attività legate alla “nuova fisica”.

Risulta quindi sorprendente l'esplosivo sviluppo e sempre maggiore radicamento a Pisa delle iniziative riguardanti la “Fisica delle Particelle”.

Uno dei fattori che ha facilitato il potenziamento della “Fisica delle Particelle Elementari” in ambito nazionale e quindi anche a Pisa, è stata l'intelligente politica dell'INFN nello stabilire le sue sezioni presso le principali università del Paese; questo è stato, in un certo senso, più im-

* Professore Emerito Università degli Studi di Pisa.

¹ Dovute alla lungimiranza e alle iniziative di Orso Mario Corbino.

portante della nascita dei Laboratori Nazionali, maggiormente legati alla gestione delle macchine acceleratrici o, precedentemente, alla gestione delle strutture legate alle ricerche sui raggi cosmici. La simbiosi fra le Università e l'INFN se da un lato metteva a disposizione degli Istituti di Fisica universitari importanti risorse finanziarie e strumentazione specifica per la ricerca, gli istituti universitari mettevano a contatto con l'INFN un grande numero di studenti selezionati ed interessati a questo campo di studi.

Il brusco cambiamento di passo, verificatosi a Pisa, è da ricondursi alla temporanea presenza nell'università toscana di alcuni ricercatori, provenienti da altre istituzioni: Marcello Conversi (dal 1951 al 1959), Giorgio Salvini (1952-1955), Carlo Franzinetti (1955-1962); presenze quindi limitate nel tempo, specie se confrontate con quella di Luigi Puccianti (dal 1917 al 1947) il bravo fisico del periodo prebellico [1].

Questi nuovi professori chiamati a Pisa portavano un bagaglio di conoscenze e di contributi ben riconosciuti in un contesto internazionale; i loro collegamenti con i migliori ricercatori operanti nel campo sarebbero risultati preziosi per le nuove leve in formazione.

Credo sia utile esaminare brevemente le caratteristiche di questi personaggi.

1. Marcello Conversi [2]

Laureato a Roma durante la guerra nell'istituto nel quale erano presenti Edoardo Amaldi, Gilberto Bernardini, Gian Carlo Wick e brevemente Fermi, aveva eseguito il famoso esperimento "Conversi, Pancini, Piccioni" che dimostrò la natura leptonica del mesone μ [3], [4]. Il profondo significato del risultato dell'esperimento fu messo in luce da Fermi; Luis Alvarez, nella sua relazione al Nobel, lo considera come l'iniziatore della moderna fisica delle particelle. Per la realizzazione di questo esperimento e la necessaria separazione fra mesoni positivi e negativi, furono utilizzate le lenti magnetiche ideate da Luigi Puccianti, professore a Pisa; la "teoria" relativa al loro funzionamento fu sviluppata da Gian Carlo Wick [5]².

Dopo la guerra Conversi passò alcuni anni negli Stati Uniti eseguendo esperimenti di raggi cosmici, ad alta quota e su aerei, con sistemi di contatori Geiger. Chiamato a Pisa, in un Istituto nel quale la fisica più moderna era praticamente assente, si può ben dire che egli ne sia stato l'iniziatore, avvalendosi anche di studenti eccezionali. Furono eseguiti esperimenti, al laboratorio della Testa Grigia, sulla componente nucleonica dei raggi cosmici [6], poi una ricerca, nel laboratorio dei Sabbioni,

² Bruno Rossi fu il primo ad impiegarle in esperimenti di raggi cosmici.

di una particella di 550 m_e precedentemente segnalata dal fisico russo Alihanian e rivelatasi inesistente [7], [8].

Importantissima successivamente la collaborazione con Jack Steinberger per una prima esposizione di una camera a bolle ad idrogeno presso il Cosmotrone di Brookhaven, di cui si parlerà estesamente in seguito. Ma uno dei maggiori contributi di Conversi durante la sua stagione pisana, prima del trasferimento a Roma, è stata l'invenzione, insieme ad Adriano Gozzini, dei "Flash Tubes". Questo dispositivo tracciante, una "Camera Odoscopica", è stato un importante precursore delle Camere a Scintilla; è stato impiegato in molti studi sullo sviluppo di sciami cosmici estesi da parte del gruppo di Kiel in Germania e del gruppo di Durham in Inghilterra [9], [10]. Una sua applicazione è stata più recentemente realizzata da un gruppo di Pisa operante ad ADONE [11].

Una importante funzione fu svolta da Conversi nel periodo della costruzione del primo calcolatore elettronico italiano, quello realizzato a Pisa su suggerimento di Fermi; Conversi fu chiamato a presiedere (fra il 1955 e il 1969) il Comitato Direttivo del CISE (Centro Studi Calcolatori Elettronici), dal quale poi nacque l'Istituto per l'Elaborazione dell'Informazione del CNR.

2. Giorgio Salvini

Le prime ricerche di Giorgio Salvini (figura 1) furono nel campo dei raggi cosmici, nel periodo 1944-1952; a Milano sino al 1949, e poi negli Stati Uniti.

Durante il suo periodo pisano Giorgio Salvini si dedicò completamente alla formazione del Gruppo Sincrotrone, al progetto di questa prima macchina italiana e agli sviluppi tecnici ad essa necessari. Non ebbe perciò modo di impegnarsi nelle ricerche in fisica delle particelle elementari, alle quali potè di nuovo dedicarsi a Frascati con il nuovo sincrotrone appena avviato. Salvini e tutto il Gruppo Sincrotrone si trasferirono a Roma e Frascati (1954) appena ebbe inizio la costruzione della macchina.

A Pisa Salvini svolse attività di docente sia presso l'Università che presso la Scuola Normale; attraverso i concorsi di ammissione alla Scuola Normale contribuì a selezionare alcuni validi fisici che formarono il primo nucleo pisano di ricercatori in fisica delle particelle (figura 2).

3. Carlo Franzinetti

Subito dopo la guerra Carlo Franzinetti (figura 3) collaborò con Cecil Frank Powell presso l'Università di Bristol; poté quindi impadronirsi della "Tecnica delle Emulsioni Nucleari". Tornato in Italia, formò a Roma un



Figura 1. Sopra: Inaugurazione del calcolatore CEP (1951). In prima fila: Giovanni Gronchi di spalle, Marcello Conversi, Giuseppe Cecchini, Alfonso Caracciolo. Sotto: Partenza per gli Stati Uniti, Giorgio Salvini, Giorgio Ghigo, Carlo Bernardini, Gianfranco Corazza.(1961).



Figura 2. Foto dei normalisti, della Classe di Lettere e della Classe di Scienze, alla SNS nel 1957. In prima fila in basso e a sinistra sono riconoscibili Italo Mannelli e Vittorio Silvestrini, al centro Carlo Rubbia. Archivio Tristano Bolelli, SNS. (Cortesia: Maddalena Taglioli, Archivist).



Figura 3. Ernesto Corinaldesi e Carlo Franzinetti alla cena in onore di Adriano Gozzini, neoprofessore a Pisa (1959). (Cortesia: Silvia Gozzini).

gruppo di emulsioni in collaborazione con Edoardo Amaldi, Carlo Castagnoli, Augusta Manfredini, Giustina Baroni ed altri. Franzinetti fu uno dei coordinatori di una prima grande collaborazione internazionale formata per esporre emulsioni ai raggi cosmici, a grande altezza mediante palloni areostatici, la famosa esposizione G-Stack, con la quale poterono essere prodotte e studiate particelle di vario tipo: pioni, mesoni K, Iperoni [12]. I palloni furono lanciati da vari porti del mediterraneo raggiungendo tipicamente altezze fra i 25 e i 30 Km. Carlo Franzinetti e Giacomo Morpurgo scrissero un primo importante lavoro sulle proprietà delle particelle strane [13]. È qui opportuno citare due lavori di rassegna, da parte di Charles Peyrou e Luisa Bonolis, riguardanti l'impatto della ricerca mediante raggi cosmici sulla fisica delle particelle [14], [15].

A Roma Franzinetti, in collaborazione con Bella, cercò di sviluppare la tecnica degli Spark Counters, iniziata da Keuffel, per il possibile tracciamento di particelle; lo studio, benché interrotto, fu un passo importante verso la realizzazione delle camere a scintilla. A Pisa, Franzinetti, come esperto dei meccanismi di scarica nei gas, poté dare contributi allo sviluppo dei Flash Tubes di Conversi e Gozzini.

Splendido docente, uomo dai vasti interessi, a Pisa Carlo Franzinetti e il biologo Giovanni Moruzzi cercarono di formare gruppi misti di ricerca comprendenti sia fisici che biologi, dando inizio a una pionieristica scuola

Demonstration of Parity Nonconservation in Hyperon Decay

F. Eisler, R. Plano, A. Prodell, N. Samios, M. Schwartz, J. Steinberger (Columbia U. & Brookhaven), P. Bassi, V. Borelli, G. Puppi, G. Tanaka P. Woloschek, V. Zoboli (Bologna U.), M. Conversi, P. Franzini, I. Mannelli, R. Santangelo, V. Silvestrini (Pisa U.), D.A. Glaser, C. Graves, M.L. Perl (Michigan U.) [Hide](#)

1957

Phys.Rev. 108 (1957) 1353-1355

Also in "Bologna 1984. Proceedings. Fifty years of weak-interaction physics" 600-601

DOI: [10.1103/PhysRev.108.1353](https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1353)

Conference: [C84-05-26](#), p.600-601

Figura 4. Articolo sulla violazione della parità.

di biofisica. Franzinetti è stato importantissimo nel programmare ed attuare sistematicamente una "sprovvincializzazione" della ricerca pisana quasi obbligando tutti i giovani ricercatori a passare dei periodi all'estero ed adoprando a trovare le opportune collocazioni; i contatti con l'estero erano certamente iniziati durante la direzione di Marcello Conversi (figura 1), ma in maniera meno sistematica. Di conseguenza Luciano Bertanza passò un periodo presso il laboratorio di Brookhaven, Italo Mannelli passò dei periodi presso l'MIT e Brookhaven, Paolo Franzini andò all'Università di Columbia, Giorgio Bellettini passò un periodo al CERN nel gruppo di Giuseppe Cocconi, Carlo Bemporad passò un periodo presso la Tufts University di Boston e il Cambridge Electron Accelerator. I rapporti di collaborazione fra le istituzioni ospitanti e Pisa continuarono spesso ben oltre il periodo di permanenza all'estero.

Come già ricordato la moderna fisica delle particelle trovò in Marcello Conversi il suo iniziatore in ambito pisano. Durante i primi anni di direzione e subito dopo l'invenzione della camera a bolle da parte di Glaser (1952), Giuseppe Martelli, assistente di Conversi, e Luciano Bertanza appena laureato, iniziarono una attività sperimentale volta a sviluppare piccole camere a bolle a liquido pesante. Alcuni lavori sulla termodinamica dei liquidi pesanti e sulla costruzione delle camere furono pubblicati a quel tempo [16], [17].

Dopo il periodo di ricerca mediante raggi cosmici, nei laboratori della Testa Grigia e dei Sabbioni, è nella collaborazione con Jack Steinberger e la partecipazioni ai lavori centrati sull'uso di una delle prime camere a bolle a idrogeno liquido, esposta al Cosmotrone di Brookhaven, che si consolidò (circa 1958) a Pisa un gruppo di "camera a bolle" composto dai primi eccezionali allievi di Conversi: Paolo Franzini, Italo Mannelli, Carlo Rubbia, Vittorio Silvestrini, Luigi di Lella e nel tempo alcuni altri [18] (figura 2).

Importanti risultati emersero da queste iniziali attività: la dimostrazione della non conservazione della parità nei decadimenti iperonici [19] (figura 4), la determinazione degli spin della Λ^0 e della Σ^- [20], la misura della vita media di Λ^0 , Θ^0 , Σ^- [21].

Per una bibliografia completa degli esperimenti del gruppo di camera a bolle si rimanda al lavoro di Bigi e Flaminio: *Activities and publications of the Pisa Bubble Chamber Group; (1953-1988)* [18].

Primakoff effect and π^0 lifetime

G. Bellettini, C. Bemporad, P.L. Braccini (Pisa U. & INFN, Pisa), L. Foa (INFN, Florence)

1965 - 32 pages

Nuovo Cim. 40A (1965) no.4, 1139-1170

DOI: [10.1007/BF02824673](https://doi.org/10.1007/BF02824673)

Figura 5. Articolo sulla misura della vita media del π^0 .

Una piccola camera a bolle a ciclo rapido (5 espansioni al secondo), costruita interamente a Pisa, fu utilizzata in un esperimento presso il sincrotrone nazionale. Servì a determinare la polarizzazione del protone di rinculo nella fotoproduzione di mesoni π^0 in idrogeno [22], [23].

La necessità di analizzare un numero sempre crescente di eventi e la necessità di aumentare la precisione delle misure, spinse il gruppo di camera a bolle pisano ad impegnarsi nella costruzione di vari proiettori in successione: *Frankenstein*, *mangiaspago*, ecc. collegandoli poi on-line (1965) con il nuovo computer CEP costruito a Pisa; questo fu poi sostituito da un IBM-1800 (1968). La costituzione del Centro Nazionale Analisi Fotogrammi (CNAF) a Bologna e la disponibilità del suo *Flying Spot Digitizer* spostò a Bologna, per Pisa e per molti altri gruppi italiani, l'esecuzione delle misure di precisione degli eventi. Le nuove attività coinvolsero molto nuovo personale, fisici, ingegneri, tecnici, *scanners*. Citandone alcuni: Roberto Pazzi, Paolo Lariccia, Gianni Gennaro, Piero Salvadori, Roberto Ruberti, Carlo Guidi, Luciano Zaccarelli, Roberto Bertelli. Il lavoro svolto resta documentato da una ricchissima serie di articoli e da una serie di dettagliate note interne; per un esame completo si rimanda di nuovo al lavoro di Bigi e Flaminio [18].

Dagli anni '70 fino al termine della fisica perseguita mediante camera a bolle (1987), Pisa condusse molti esperimenti in grandi collaborazioni, centrate tutte sul CERN, utilizzando prima la camera a idrogeno da 81 cm di Saclay, poi la camera a idrogeno da 2 m (1973) ed infine la grande camera europea BEBC (1974); furono usati sia riempimenti di idrogeno che di deuterio liquidi. Le prime misure riguardarono l'annichilazione di antiprotoni con produzione di stati mesonici [24], poi esperimenti di diffusione o di interazione di mesoni K^- [25], infine, con BEBC, esperimenti per lo studio di particelle *charm* prodotte da fasci di neutrini, poi esperimenti per lo studio delle interazioni di corrente carica e di corrente neutra con neutrini e antineutrini [26], [27], infine esperimenti sulle possibili oscillazioni neutriniche [28].

L'inizio della sperimentazione con elettronica e rivelatori a Pisa è certamente dovuta alla iniziativa di Carlo Franzinetti, in coincidenza con la costruzione del Sincrotrone e con la volontà di iniziare una speri-



Figura 6. Il gruppo di Pisa durante l'esperimento al sincrotrone. Da sinistra: Pierluigi Braccini, Alberto Bechini, Carlo Betti, Antonio Mariotti, Lorenzo Foà, Carlo Bemporad, Giorgio Bellettini, il direttore dei LNF Italo Federico Quercia, l'operatore del sincrotrone Ed Grادل.

mentazione di Pisa a Frascati. Franzinetti, impegnato in esperimenti con camera a bolle, non partecipò alla sperimentazione al Sincrotrone, ma creò le condizioni perché questa avvenisse, preoccupandosi, per prima cosa, della assunzione a Pisa di alcuni giovanissimi fisici provenienti da altre istituzioni: Giorgio Bellettini e Carlo Bemporad da Roma e Lorenzo Foà "prestato" inizialmente da Firenze ed infine trasferitosi a Pisa. Fu così possibile la preparazione contemporanea di alcuni esperimenti: un piccolo esperimento di elettrodinamica sulla annichilazione di positroni in volo, condotto da Pierluigi Braccini, Arnaldo Stefanini, Gabriele Torelli, Romana Torelli Tosi e l'ospite rumeno Ion X. Ion [29]; un esperimento per la misura dell'"Effetto Primakoff", suggerito dal teorico Giacomo Morpurgo [30] e condotto da Giorgio Bellettini, Carlo Bemporad, Pierluigi Braccini e Lorenzo Foà [31], [32], (figura 5), (figura 6), assai impegnativo, anche dal punto di vista costruttivo, sia riguardo alla meccanica che all'elettronica.

Sempre a Frascati, Bellettini, Bemporad, Braccini e Foà condussero un esperimento per lo studio della fotoproduzione su idrogeno di pioni neutri nella regione della seconda risonanza pione-nucleone [33]. Tutte queste attività ebbero un inizio, di studio, attività di laboratorio e costruzione degli apparati, fra il 1961 e 1962; implicarono molti sviluppi tecnici: la costruzione di contatori di Čerenkov integrali, di una prima elettronica veloce a semiconduttori, di uno speciale bersaglio a idrogeno liquido.

Credo sia utile mettere in evidenza una delle caratteristiche di queste iniziative (sia per gli esperimenti di elettronica e rivelatori, ma anche in parte per gli esperimenti di camera a bolle): erano portate avanti da giovani tutti intorno ai 25 anni di età, quindi da poco laureati e provvisti di scarsa esperienza..., per una sperimentazione all'elettrosincrotrone nazionale, a quella che era allora la macchina più performante, in energia e intensità. Per la visione ed apertura di Carlo Franzinetti è stato possibile a Pisa quanto non sarebbe stato possibile ad esempio a Roma, un centro assai più strutturato: una totale libertà di iniziativa e azione affidata a dei giovanissimi, contando più sulla loro volontà di emergere e cimentarsi, che sulla loro esperienza precedente. Bisogna inoltre anche dire che la fisica delle particelle italiana era stata centrata sulla sperimentazione con raggi cosmici e quindi, i fisici italiani intorno al sincrotrone, a parte qualche rara eccezione, erano digiuni di sperimentazione ad acceleratori e si trovavano comunque ad affrontare problemi imprevisi, dovuti alla "grande" energia ed intensità della nuova macchina.

Un'altra caratteristica della sociologia pisana è stata l'"apertura al mondo" a partire dalla "sprovvincializzazione", voluta sempre da Franzinetti, con le permanenze, quasi imposte, dei ricercatori pisani in altri laboratori. Il fatto poi che, a differenza di Roma, Pisa non avesse un acceleratore sotto casa, ha reso questa caratteristica internazionalizzazione più o meno permanente, come confermato dalle varie proposte di esperimenti, iniziative e collaborazioni nelle quali Pisa è stata sempre più coinvolta all'estero.

Ma le collaborazioni presso i laboratori esteri hanno costretto i fisici pisani a passare fuori sede molto del loro tempo, certamente quello durante i periodi di montaggio e di esecuzione degli esperimenti, riducendo il contributo nella didattica universitaria, ma mantenendo Pisa sempre aggiornata sui progressi scientifici e tecnologici del campo. Bisogna anche notare ed esser grati ai fisici dei gruppi di camera a bolle che, pur coinvolti in collaborazioni internazionali, hanno sempre avuto una presenza in sede ben maggiore di quella possibile ai fisici impegnati in esperienze con elettronica e rivelatori; questo ha permesso un loro prezioso impegno nella didattica della quale hanno costituito lo "zoccolo duro...".

Come già accennato, molte delle attività svolte in Italia dal primo nucleo di sperimentatori in Fisica delle Particelle furono alternate con permanenze individuali presso laboratori esteri. Si passò poi ad una seconda serie di esperimenti, col coinvolgimento dei fisici pisani in iniziative per lo più basate in laboratori esteri mediante collaborazioni internazionali: CERN, DESY, SERPUKHOV, DARESBURY; ciò ha inizialmente caratterizzato Pisa nella comunità facente capo all'INFN.

Dato il notevole numero di esperimenti della seconda fase, la trattazione sarà necessariamente molto più succinta.

Italo Mannelli e parte del gruppo di camera a bolle iniziarono (1965) prima a Brookhaven [34], poi al CERN e successivamente a Serpukhov una

serie di esperimenti, non più di camera a bolle, in varie collaborazioni con Saclay, Karlsruhe, Wien, CERN, Serpukhov [35], [36], [37], [38], [39]]. Le misure riguardarono processi di diffusione o produzione di risonanze mesoniche, iniziati da π , a varie energie, usando anche bersagli di idrogeno polarizzato.

Gherardo Stoppini si trasferì a Pisa (1964) con parte del suo gruppo di Roma. Sempre in collaborazione con Edoardo Amaldi fu portata avanti la sperimentazione al Sincrotrone con esperimenti di elettroproduzione [40]. Le ben note vicende legate al 1968 e le grandi difficoltà che resero assai problematica la prosecuzione del lavoro nei laboratori nazionali, fecero decidere parte del gruppo: Marcello Giorgi, Arnaldo Stefanini, Alberto Del Guerra, Adalberto Giazotto, ad approfittare dell'avvio del sincrotrone di Daresbury per portare le esperienze di elettroproduzione in Inghilterra [41], [42].

Carlo Bemporad, Pierluigi Braccini e Lorenzo Foà decisero trasferirsi a DESY (1965), dove era stato appena avviato il nuovo sincrotrone da 6 GeV di energia, per eseguire una misura della vita media del mesone η mediante l'effetto Primakoff [43]; fu anche svolta un'altra misura di vita media del π^0 e uno studio dei decadimenti del mesone ϕ^0 . Dopo un periodo passato individualmente al CERN, Carlo Bemporad iniziò con un nuovo gruppo una serie di esperimenti presso l'anello di accumulazione $e^+ + e^-$ ADONE di Frascati (1971). Furono misurate le caratteristiche della risonanza J/Ψ e furono sistematicamente ricercate altre risonanze strette [44], [45].

Giorgio Bellettini, dopo un periodo passato al CERN nel gruppo di Cocconi, iniziò una serie di esperimenti ai quali si associarono Lorenzo Foà e Pierluigi Braccini al termine degli esperimenti a DESY (1970) [46]. Seguì un esperimento all'anello di accumulazione ISR del CERN (1972), nel quale, fra molte altre cose, fu dimostrata la inaspettata risalita della sezione d'urto pp ad alte energie [47].

Una cerimonia tenuta presso la Scuola Normale per il settantesimo compleanno di Gilberto Bernardini ha fornito l'occasione per una foto di gruppo nella quale compaiono, insieme a molti altri, alcuni dei protagonisti delle attività fin qui riportate (figura 7).

Riporto anche un elenco delle persone riconosciute nella foto, sperando di non aver fatto errori. Ordine all'incirca: dall'alto verso il basso e da sinistra a destra.

MARTINUS VELTMAN, GIAN CARLO WICK, PIETRO MENOTTI, LYMAN SPIZER, Porzione di LUIGI RADICATI DI BROZOLO, MARIA ITALA FERRERO, GIUSEPPE PIERAZZINI, GIAN CARLO PUPPI, ENNIO BERTOLUCCI, ARNALDO STEFANINI, RAUL GATTO, ALBERTO DEL GUERRA, ANGELO SCRIBANO, ADALBERTO GIAZOTTO, JOHN BELL, Porzione di CARLO BEMPORAD, MARCELLO GIORGI, MARIO CALVETTI, CARLO RUBBIA (nobel), GIUSEPPE FIDECARO, ITALO MANNELLI, MARIA FIDECARO, GIGI ROLANDI, GENARO BROSCO, GIAMPAOLO GORINI, EMILIO ZAVATTINI, UGO AMALDI, LORENZO FOA, EMILIO PICASSO, PIERLUIGI BRACCINI, RAFAEL ARMEN-

TEROS, GIACOMO MORPURGO, DANIELE AMATI, STEFANO FANTONI, T.D. LEE (nobel), GIORGIO BELLETTINI, JOHN ADAMS, LUCIANO BERTANZA, GIORGIO SALVINI, CARLO FRANZINETTI, LEON LEDERMAN (nobel), EDWIN GOLDWASSER, GILBERTO BERNARDINI, MARCELLO CONVERSI, NESTORE BERNARDO CACCIAPUOTI, BRUNO ROSSI, SERGIO FUBINI.

4. La Ri-nascita degli Studi sulla Radiazione Cosmica e i Laboratori del Gran Sasso

Causa di tutto ciò è stata la crescente consapevolezza della interdisciplinarietà fra vari campi di fisica: la Fisica delle Particelle, la Fisica della Radiazione Cosmica, l'Astrofisica, la Cosmologia, ecc.

Il problema dell'origine e dell'accelerazione dei raggi cosmici era ancora largamente aperto, specie per le altissime energie, ben oltre quelle raggiungibili mediante gli acceleratori. I raggi cosmici, che avevano permesso in tempi passati molte delle scoperte in fisica delle particelle, mantenevano ancora una loro capacità di esplorazione.

Si parlava di una possibile ricerca e identificazione di sorgenti della radiazione cosmica.

Si cominciavano a dibattere i problemi relativi alla "Materia Oscura" e all'"Energia Oscura" con l'ipotesi di nuove particelle ad es.: WIMPS, neutralini, monopoli, ecc.

Alcuni dei nuovi esperimenti per la ricerca di eventi rari, potevano essere condotti esclusivamente in condizioni di "silenzio cosmico", cioè l'abbattimento dei fondi mediante gli schermaggi naturalmente realizzati negli esperimenti sotterranei. Esempi iniziali furono le esperienze estere volte a mettere in evidenza il decadimento del protone, previsto dalle teorie GUT.

Altre motivazioni, che si sono andate precisando nel corso degli anni, erano legate all'"Astrofisica dei Neutrini". Forse i neutrini, con la loro bassa capacità di interazione, avrebbero potuto permettere una maggior comprensione del funzionamento del sole (e di altre stelle) aprendo una finestra osservativa sulle zone più interne delle fornaci stellari. Si ipotizzava la enorme emissione di neutrini nel caso di fenomeni rari come l'esplosione di alcuni tipi di supernove.

È interessante notare come negli stessi corsi universitari si iniziasse ad introdurre materiale riguardante i raggi cosmici ed argomenti di astrofisica. Un intero corso specifico di "Fisica Astroparticellare" fu per la prima volta tenuto nel 2002³.

³ Recentemente e forse più correttamente "Fisica Astroparticellare" è frequentemente sostituito da "Fisica Cosmoparticellare"...



Figura 7. Foto di gruppo in occasione dei settant'anni di Gilberto Bernardini. Archivio Storico della Scuola Normale (1976). (Cortesia: Maddalena Taglioli, Archivist).



Figura 8. Una delle prime visite agli scavi per il laboratorio del Gran Sasso; Antonino Zichichi conduce la marcia... (1982).

L'occasione per il passaggio dalle parole ai fatti fu colta dall'INFN, su iniziativa di Antonino Zichichi, allora Presidente dell'ente, quando iniziò lo scavo del traforo del Gran Sasso (circa 1982); si riuscì a pianificare la costruzione e il finanziamento, da parte del governo, di un laboratorio sotterraneo al centro del tunnel. La realizzazione dei Laboratori del Gran Sasso ha posto l'INFN all'avanguardia delle ricerche eseguibili in un laboratorio sotterraneo, un grande successo quindi. Spiace dire che, come molte iniziative legate ai lavori pubblici italiani, la realizzazione della autostrada A24 Roma-Sulmona-Giulianova, è stata condotta in condizioni di scarsa trasparenza, aumento dei costi, dissipazioni di denaro pubblico. Ancora oggi, percorrendo l'autostrada, si notano difetti di costruzione, impiego di materiali scadenti, ecc.

Ma sul successo, anche in campo internazionale, del Laboratorio del Gran Sasso, non ci sono dubbi! (figura 8).

5. L'Esperimento MACRO

L'INFN organizzò (1983) a Saint Vincent, a Frascati e all'Aquila dei congressini tematici relativi al Gran Sasso. In ambito pisano, invitammo Giuseppe Cocconi a tenere alcune stimolanti lezioni sulla fisica dei raggi

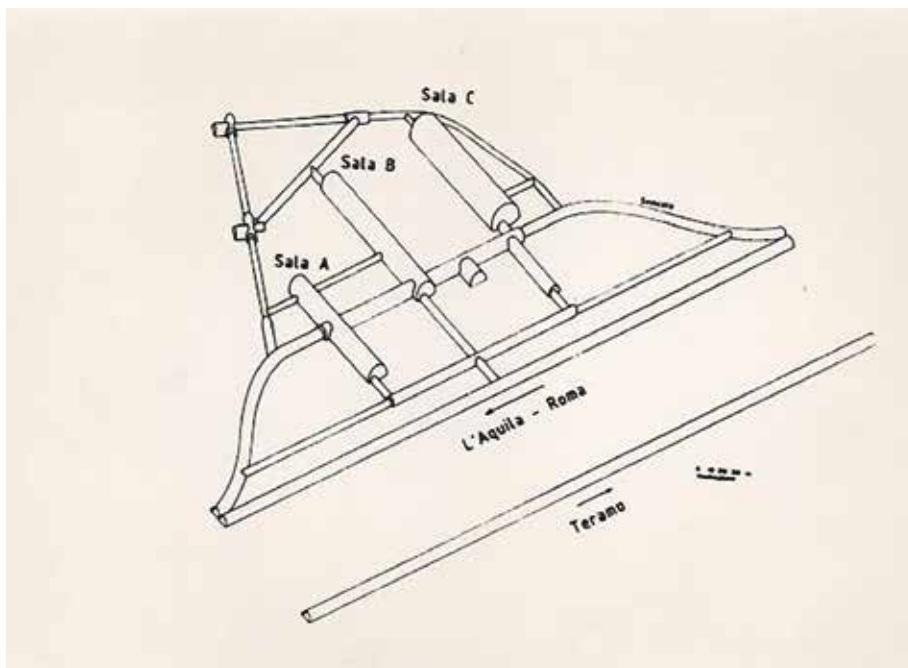


Figura 9. Schema del laboratorio sotterraneo. MACRO ha occupato la sala B.

cosmici. Si formò un piccolo gruppo di persone interessate a questi argomenti e si prese contatto con Enzo Iarocci dei Laboratori di Frascati per il progetto MACRO. L'iniziale gruppo pisano comprendeva: Carlo Angelini, Alessandro Baldini, Carlo Bemporad, Anne Marie Cnops, Enzo Flaminio, Gianrossano Giannini, Roberto Pazzi. La collaborazione MACRO comprese inizialmente circa una metà di istituzioni italiane e circa una metà di istituzioni statunitensi: Bari, Bologna, Caltech, CERN, CNR, Drexel, LNF, Indiana, Michigan, Pisa, Roma, Texas A&M, Torino, Virginia Tech, circa 70 fisici. La proposta per MACRO fu messa a punto nel 1984 [48] (figura 9).

Gli scopi dichiarati di MACRO erano: la ricerca dei Monopoli Magnetici, l'Astronomia Neutrinica (Sorgenti di neutrini di alta energia, Neutrini da collassi stellari, Oscillazioni dei neutrini), lo studio dei Muoni Cosmici (Muoni singoli, multipli, Muoni da sorgenti di raggi gamma di alta energia), la ricerca di Particelle Esotiche.

Il programma è stato eseguito con successo. MACRO, un apparato modulare in sei supermoduli, ha iniziato le misure col suo primo SM nel 1989, il sesto SM è entrato in funzione nel 1991, MACRO ha terminato le sue misure alla fine del 2000 (figure 10, 11 e 12).

MACRO, legato all'avvio del Laboratorio del Gran Sasso, è stato la prima impresa italiana su larga scala relativa alla "Fisica Cosmoparticella-



Figura 10. MACRO durante la costruzione del primo supermodulo.



Figura 11. La collaborazione su MACRO completata (1991).

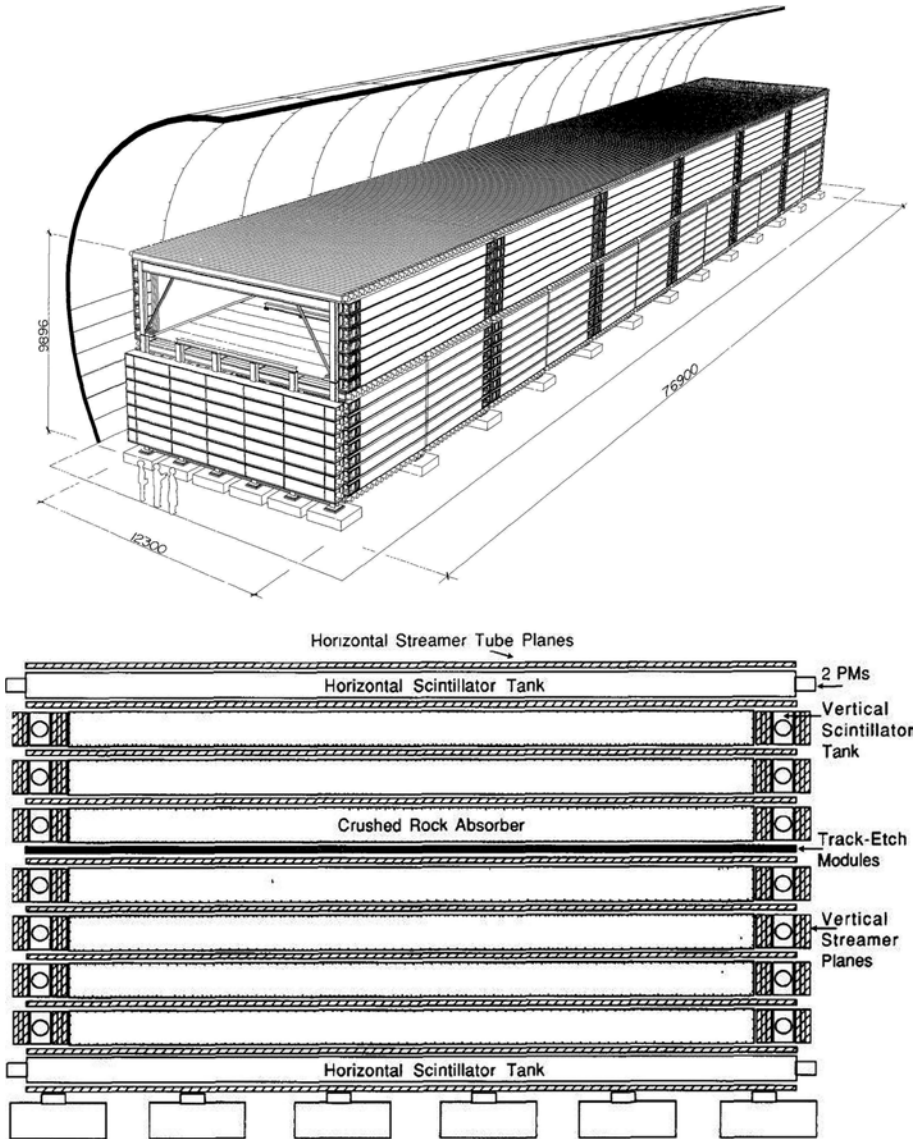


Figura 12. MACRO illustrato in forma schematica.

re”. Esperimenti su alcune tematiche relative ai raggi cosmici erano stati precedentemente eseguiti; in Italia MACRO è stato preceduto da NUSEX nel traforo del Monte Bianco; nel mondo ricordiamo gli esperimenti per la ricerca del decadimento del protone previsto dalle teorie GUT (uno dei temi anche di NUSEX) quali SOUDAN (1983), IMB (1982), KAMIOKA (1984). Va ricordato che la ricerca dei monopoli magnetici è legata a

quella del decadimento del protone, i monopoli sono infatti previsti agire da catalizzatori dei decadimenti.

Gli inizi di MACRO, come per ogni grande impresa, sono stati abbastanza faticosi. Al primo nucleo composto dai Laboratori Nazionali di Frascati e dalle sezioni di Bologna, Roma, Pisa, si aggiunsero alcune altre istituzioni, fino al momento della sottomissione della proposta all'INFN. Non ricordo in dettaglio come fosse diviso il lavoro; ricordo solo le grandi linee: tutto il rivelatore tracciante, basato sui tubi a *streamer*, sarebbe stato costruito dai LNF (coadiuvati da altre istituzioni per le parti delle alte tensioni, dell'elettronica di lettura, del sistema di trigger); i contatori a scintillazione avrebbero dovuto essere progettati e costruiti a Pisa; Bologna avrebbe dovuto costruire uno dei sistemi di ricerca dei monopoli magnetici, basato sul loro tracciamento in fogli di vari tipi di plastiche. Tutto ciò dovette essere ridiscusso quando si prospettò l'ingresso di una grande collaborazione di circa sei università americane coordinate dal Barry Barish. La prospettata internazionalizzazione del laboratorio e dell'esperimento era certamente ben vista da tutti noi, ma le discussioni fra i gruppi italiani e quelli statunitensi furono assai complesse e accese. Questo fu certamente legato al modo di presentarsi degli americani, coordinati da Barish. Barry Barish, bravissimo fisico, come si rivelò ampiamente anche durante l'esperimento, seguendo un copione americano assai diffuso nel modo di condurre le trattative internazionali, si comportava come se il Gran Sasso fosse "terreno di conquista", irritando molti fra gli italiani. Una parte del gruppo di Torino decise perfino di ritirarsi dalla collaborazione... Io stesso presi in considerazione una rinuncia a quell'impegno, pensando ad altre possibilità, in questo, devo dire, frenato da mio collega Gianrossano Giannini, che evidentemente teneva veramente molto a MACRO. Io, da buon responsabile, operante per il bene di tutti, inghiottii il rospo e si procedette... Non ho mai capito bene perché gli americani avessero scelto quel tipo di comportamento; ritengo che uno spirito eccessivamente competitivo sia un po' nel DNA dei fisici statunitensi. Bisogna anche notare che, mentre fino ad allora erano stati i fisici italiani a partecipare a sperimentazioni presso acceleratori americani, era la prima volta che una grande collaborazione USA proponeva di venire a fare un esperimento in Italia! Al di là della politica e della diplomazia, agli effetti pratici si arrivò alla decisione di dividere in due la costruzione di MACRO: tutta la parte tracciante sarebbe stata responsabilità italiana, tutta la parte basata sui contatori a scintillazione sarebbe stata responsabilità americana. Questo pose Pisa in una posizione ibrida, in quanto la ricerca dei collassi stellari gravitazionali, il tema dichiarato di maggior interesse per Pisa, era ovviamente basato sull'uso dei contatori a scintillazione che Pisa non avrebbe potuto costruire. Fu però sottoscritto un accordo per il quale Pisa avrebbe avuto una specie di monopolio

sul tema della rivelazione dei neutrini da collasso stellare gravitazionale. L'accordo, scritto su un pezzaccio di carta da me e Barish alla presenza di Enzo Iarocci, fu affidato a Enzo Iarocci; il pezzo di carta non fu più rivisto e il patto non fu rispettato! Questo perché nel 1987 furono per la prima volta rivelati i neutrini emessi dalla supernova SN1987A dagli esperimenti IMB e KAMIOKA (con MACRO non ancora in funzione) e gli americani vollero allora duplicare, contrariamente agli accordi, tutta una elettronica di rivelazione dei collassi, parallela a quella costruita da Pisa.

Bisogna dire che durante l'esperimento le cose procedettero in modo ragionevole e con animi più rilassati. Pisa non costruì i contatori, ma partecipò utilmente al loro progetto anche mediante misure sui prototipi. Il gruppo pisano progettò e costruì un ottimo sistema di rivelazione dei *burst* di neutrini da collasso e così via... Come risulterà dal seguito, i contributi del gruppo di Pisa furono sempre di grande qualità, tali da imporsi alla stima di tutta la collaborazione; e infine le relazioni sul campo con i fisici americani e con Barish furono in generale assai soddisfacenti; la collaborazione funzionava! (figura 13).

Vale la pena di elencare le più importanti caratteristiche di MACRO.

Protetto da uno spessore di roccia equivalente di almeno 3200 m.w.e. (metri di acqua equivalente). Occupante un volume di $75.6 \times 12 \times 4.8 \text{ m}^3$. Contenente 290 contatori a scintillazione, ognuno di $11.9 \times 0.75 \times 0.26 \text{ m}^3$. Considerando i contatori a scintillazione contenuti nella parte superiore chiamata ATTICO, la massa totale installata di scintillatore era di 560 tonnellate. Tubi a *streamer* per un totale di circa 31200 fili. Strato di plastica per la rivelazione dei monopoli circa 920 m^2 . I muoni singoli raggiungenti MACRO erano circa 700/h. Gli eventi di neutrino rivelati nel caso dell'esplosione di una supernova al centro della galassia sarebbero stati circa 125.

A MACRO sono stati dedicati circa 15 anni della nostra vita, mi sembra quindi opportuno che per un impegno così lungo non siano solo riportati i problemi costruttivi, le misure, i risultati, ma anche notizie più generali su questa avventura: come l'abbiamo vissuta...

E di avventura si è trattato, diversa dalla installazione di un esperimento, in genere di molto minor durata, sul *floor* di uno dei tanti acceleratori frequentati precedentemente.

È stato il primo grande esperimento di "Fisica senza Acceleratori", l'iniziatore di una serie di esperimenti di questo tipo sia per Pisa che per l'INFN.

Va detto che questo tipo di ricerca fisica richiede il formarsi di una nuova cultura. Sì, in MACRO c'era la fisica dei muoni di grandissima energia, si usavano contatori a scintillazione, *streamer tubes* e elettronica come negli esperimenti ad acceleratori, ma... la nuova cultura era quella delle tante nuove tematiche di tipo astrofisico. Dal punto di vista sperimentale poi l'impatto maggiore era con misure a bassi livelli di fondo, la



Figura 13. Permanenze del gruppo di Pisa al Fiordigigli.

necessità di una conoscenza approfondita della radioattività ambientale e dei modi di controllarla.

Ne siamo divenuti buoni specialisti e ciò è stato utile anche in esperimenti successivi.

Alla proposta di esperimento contribuì inizialmente un gruppo francese con base al CERN, sotto la leadership di Paul Musset, ben noto fisico, fra i costruttori di Gargamelle, la grande camera a bolle a liquido pesante, e fra gli scopritori delle correnti neutre. I francesi però obiettavano all'uso dell'acronimo MACRO, in quanto giudicato imbarazzante⁴.

Musset morì in un incidente di montagna poco dopo la scrittura della proposta, all'età di 52 anni, *et al.* alla quale è certamente sconsigliabile iniziare a fare scalate impegnative nelle alpi... In conseguenza della sua scomparsa tutto il gruppo francese si ritirò dall'esperimento e MACRO si chiamò MACRO...

Un episodio iniziale, certamente assai meno grave, ma che mi riguardava personalmente, avvenne durante uno dei primi viaggi da Pisa al Gran Sasso. Avevo una nuovissima auto, una Fiat UNO che mi abbandonò sul grande raccordo anulare nei pressi di Roma, un sabato pomeriggio. La macchina era sotto garanzia, ma non avevamo possibilità di soccorso stradale e dovevamo rientrare a Pisa; dovemmo quindi affidarci ai poi famosi "Falchi del Raccordo Anulare", un gruppo di meccanici che percorreva continuamente il raccordo alla ricerca di cadaveri di auto, per poi trasportarli in una loro officina. Ero in compagnia di Gianrossano Giannini e dovemmo fermarci in un albergo fino al giorno dopo, quando la macchina ci fu restituita, pagando un prezzo esorbitante (e ovviamente non più in garanzia).

Le macchine private furono poco dopo sostituite da un pulmino Fiat DUCATO. Non fu facile ottenerlo dall'INFN e durante i tanti anni di uso le regole riguardo all'affidamento di mezzi ai gruppi sperimentali cambiarono frequentemente, sempre complicandosi. Dopo uno o due anni il DUCATO ci venne anche rubato proprio mentre parcheggiato in Aquila città; per fortuna era assicurato e poté essere sostituito rapidamente.

Non pensiate che MACRO fosse nato sotto una cattiva stella, tutt'altro, ma certo durante un esperimento così lungo, era inevitabile collezionare vari e diversificati incidenti. Visto che ci sono, continuo sul tema. Un incendio! Durante la costruzione dell'apparato una grande quantità di residui cartacei e di cartoni era stata accumulata sotto l'edificio (elettronica, computer e sala conteggio) in fondo alla galleria B. Le istruzioni erano che in caso di incendio si dovesse abbandonare al più presto la galleria in quanto questa veniva invasa da un gas anticombustione irrespirabile;

⁴ "macrò" significa "magnaccia" proprio in francese...

c'erano pochi secondi per abbandonare i luoghi dopo l'allarme. Vale la pena di notare che se il gas veniva scaricato il suo ripristino avrebbe richiesto tempi molto lunghi, dell'ordine dei mesi. L'incendio scoppiò perché un automezzo tranciò un cavo ad alta corrente giacente sul pavimento in prossimità del deposito dei cartoni. Avremmo dovuto fuggire immediatamente, ma Gianrossano Giannini afferrò un estintore e riuscì a estinguere l'incendio prima che il gas venisse scaricato. L'episodio fu tenuto un po' nell'ombra, dato che non avevamo rispettato le regole... Io però scrissi la nota interna MACRO 4/86, *Proposte, ad uso della collaborazione MACRO, per alcune norme di sicurezza...*

Non sempre le iniziative di Gianrossano erano lodevoli. Ad esempio: volle installare un dispositivo acustico segnalante la registrazione di ogni evento dell'esperimento (un'emissione sonora ogni qualche secondo); venivano emessi suoni diversi a seconda della tipologia dell'evento. All'inizio era divertente, ma poi "il mostro" continuava ad imperversare la notte, tutte le notti, impedendo anche un breve appisolamento durante le lunghe veglie.

Approfitrando di una assenza di Gianrossano l'oggetto fu fatto sparire. Gianrossano protestò, ma dovette cedere.

Va precisato che dopo alcuni anni, fu possibile controllare l'esperimento direttamente dalle sedi decentrate dell'INFN quindi il lavoro notturno in galleria non fu più necessario. Naturalmente c'erano anche persone in turno nella zona dei laboratori che avrebbero potuto eseguire interventi in caso di necessità urgenti. Credo che MACRO sia stato uno dei primi esperimenti controllabili in modo remoto.

Altri eventi rimarchevoli, legati a cause ambientali, furono dovuti ad alcune intense nevicate; in genere avevano luogo verso la fine dell'inverno. Ci successe di restare bloccati in albergo, il Fiordigigli a Fonte Cerreto, vicino alla stazione della funivia (allora non ancora ricostruita e riattivata), fino all'arrivo degli spazzaneve; ma quando questo succedeva bisognava aspettare assai..., c'era tutta la regione montana da ripulire, un lavoro di due giorni almeno.

Una di queste intense nevicate iniziò mentre eravamo al lavoro nel tunnel; ci avvertirono e pensammo bene di fare ritorno in albergo. Il tunnel autostradale, con i lavori ancora in corso, aveva il manto stradale non asfaltato ed era scarsamente illuminato. Quando raggiungemmo l'uscita non si vedeva assolutamente niente: un muro bianco impenetrabile e neve in caduta. Chissà perché avessero però chiusa la sbarra di ingresso al tunnel, bianca e totalmente invisibile! Ci andammo a sbatter contro, per fortuna a velocità non troppo alta. Il parabrezza, (guidava il solito Gianrossano), si infranse ed io mi ritrovai la sbarra a pochi centimetri dal mio naso. Anche la risalita all'albergo non fu semplice.

Ho esaurito la lista delle "disgrazie"? Forse no. Ce ne fu una che, per così dire, si dimostrò distribuita nel tempo. Le centinaia di contatori a

scintillatore liquido erano costruiti assai bene in una spessa plastica; contenevano circa due tonnellate di scintillatore ognuno. Nel corso dei mesi e degli anni, alcuni contatori iniziarono a gocciolare molto lentamente, in genere dalle estremità. La cosa era imbarazzante; si formavano delle piccole pozze di liquido maleodorante e ormai c'erano anche visitatori in giro. Si iniziarono a vedere dei recipienti di raccolta del liquido; furono anche unificati come tipologia: erano di latta, della capienza di qualche litro. Ci fu rivelato che erano di produzione USA ed erano ex contenitori di patatine fritte. Ci siamo sempre chiesti chi fosse costretto a mangiarne via via il contenuto...

La regione del Gran Sasso e la zona dell'Aquila erano certamente inusuali come collocazione di un laboratorio e di esperimenti di fisica. Quali erano le mie impressioni? L'Abruzzo mi apparve bellissimo e interessante. Nonostante l'autostrada, in parte ancora in costruzione, la regione era ancora abbastanza isolata, lontana e non semplice da raggiungere. Venendo dalla Toscana si entrava in un luogo di caratteristiche ben diverse; che in un Paese, tutto sommato relativamente poco esteso, si avesse anche una tale diversificazione, era per me sorgente di meraviglia. Non mi riferisco solo al diverso ambiente naturale, ma anche alle caratteristiche storiche, ancora, a guardar bene, percepibili: una terra, la Toscana col ricordo dei suoi liberi comuni, e l'Abruzzo, a lungo parte di un grande regno con feudi, feudatari e sparsi castelli. Il carattere della popolazione mi appariva quello associabile ad una civiltà largamente contadina; forse mi colpì come un po' rozzo e schivo; col tempo emerse invece la sensazione di una diffusa gentilezza e di un alto senso dell'ospitalità. Lo stacco era più percepibile se, come mezzo di trasporto, si usava la corriera Roma-L'Aquila. Dalla stazione Termini alla stazione Tiburtina, poi l'attesa della corriera. Salendo sul mezzo si entrava già un po' in Abruzzo; bastava guardarsi intorno fra i pendolari condividenti con me il tragitto. E poi il lungo percorso in salita fino all'Aquila. All'Aquila non era finita; per raggiungere Fonte Cerreto, vicino al paesino di Assergi ed ai Laboratori, bisognava affidarsi ad un altro raro mezzo, talvolta sostituito, per disperazione, da un taxi. L'Albergo Fiordigigli⁵ a Fonte Cerreto, ad alcuni chilometri dal laboratorio, è stato per molti anni la nostra base logistica; non solo per noi, ma per molti altri gruppi INFN. È stato anche un esempio della già menzionata ospitalità abruzzese; il personale era veramente molto amichevole e pieno di attenzioni. L'atmosfera era un po' quella di un rifugio di montagna. In genere raggiungevamo il Fiordigigli alla fine di una lunga giornata nel laboratorio sotterraneo; col buio si percorreva la strada nel bosco, talvolta incontrando una volpe solitaria, abbacinata

⁵ Questo nome poetico era semplicemente quello dei proprietari...

dai fari del pulmino. Una rapida cena e poi a nanna; si mangiava bene e alcuni dei piatti appresi in quei soggiorni sono entrati a far parte dei miei menu familiari⁶. Nell'albergo talvolta avemmo dei cori di montagna poiché veniva anche usato per delle riunioni conviviali del Club Alpino Aquilano...

Dopo cena era usuale fare una passeggiata digestiva lungo la strada risalente a Campo Imperatore. Allontanandosi dalle luci di Fonte Cerreto e in assenza di luna, si piombava in un buio totale, e attraverso l'aria cristallina si potevano ammirare degli incredibili cieli stellati e una via lattea ormai invisibile in altre località più inquinate.

Benché la nostra presenza in Abruzzo sia stata tanto lunga, presi dal lavoro, abbiamo fatto ben poco turismo; per esempio: non sono mai più risalito sul Gran Sasso, che pure avevo frequentato da adolescente. Io un po' di turismo l'ho voluto fare, ma allora non sovrapposto al lavoro, in occasioni di vacanze. Molti dei paesini della zona: Paganica, Rocca Calascio, Assergi, Santo Stefano di Sessanio, Bominaco e poi più distanti: Castelli, Teramo, Sulmona, hanno begli ambienti naturali e ci sono interessanti monumenti, chiese, castelli.

L'Aquila, specie quella notturna, l'abbiamo frequentata. A me piaceva aggirarmi nella parte storica, chiese, piazze, palazzi, respirando nel freddo invernale l'odore della legna bruciata nei camini. In compagnia, abbiamo frequentato i buoni ristoranti. Talvolta di giorno, prima di ripartire per Pisa, facevamo incetta di dolci, salumi e vini: il "Parrozzo", i torroni delle sorelle Nurzia, le mortadelle di Campotosto, un po' di zafferano e perché no, del Montepulciano d'Abruzzo, davvero non male.

Noi durante l'esperimento abbiamo passato quasi tutto il tempo nel laboratorio sotterraneo; il laboratorio esterno è divenuto agibile durante la nostra permanenza, ma è stato utilizzato solo dall'amministrazione, dagli uffici tecnici, dai pochi fisici dipendenti del laboratorio, e alcune stanze, certo poco frequentate, religiosamente riservate ad Antonino Zichichi, al Presidente dell'INFN, ecc.

Le prime prove dei contatori a scintillazione e alcune misure preliminari di radioattività sono state da noi fatte in un camion-laboratorio, di proprietà di Frascati, stazionato nel tunnel autostradale. Erano ancora in corso gli scavi delle sale sperimentali e, di tanto in tanto, venivano fatte esplodere mine che ci costringevano a metterci rapidamente al riparo. La temperatura era molto bassa ovunque, molto rumore, camion e macchine in spostamento nel tunnel buio, spesso con luci difettose. C'era dappertutto una grande quantità d'acqua e si sguazzava con gli stivaloni di protezione. Ci sono voluti anni e il completamento di MACRO per

⁶ Ad esempio: Le Linguine Tonno e Limone.

avere un ambiente un po' più caldo e liberato dall'acqua⁷. Naturalmente avevamo alcuni vantaggi: eravamo protetti dai raggi cosmici e stavamo in un ambiente con radioattività molto ridotta...

Per molti anni, durante la costruzione di MACRO, abbiamo raggiunto il laboratorio sotterraneo con un percorso ad ostacoli. Era in funzione un solo tunnel autostradale, non ancora aperto al pubblico e con fondo stradale non ancora asfaltato. Era percorso da grossi mezzi come camion e escavatrici, spesso con fari e luci di posizione in dubbie condizioni; percorrere il tunnel era quindi abbastanza pericoloso. Più tardi, quando l'autostrada l'Aquila-Teramo fu aperta, con i due tunnel funzionanti in direzioni apposte, il percorso per raggiungere il laboratorio sotterraneo divenne più lungo. Infatti eravamo costretti a percorrere tutto il primo tunnel da Assergi verso Teramo, sbucando sul lato teramano; si doveva poi percorrere una bretella, alla quale avevamo il permesso d'accesso, che permetteva di ripercorrere parte del secondo tunnel verso l'Aquila fino a raggiungere l'ingresso al laboratorio; si facevano parecchi chilometri; ciò prendeva tempo e le operazioni di immissione in autostrada richiedevano molta attenzione...

Durante la durata dei lavori, sia per l'autostrada che per il laboratorio, il numero di fisici in giro, per la costruzione dell'esperimento o per delle misure preliminari, era decisamente piccolo rispetto al numero degli operai. Quindi, con apprezzata ospitalità abruzzese, gli operai cominciarono ad invitarci per il fine settimana a quelli che furono chiamati "Pecora Party", all'esterno del laboratorio sotterraneo. Erano dei semplici raduni dove veniva arrostita una pecora, forse c'era anche un po' di formaggio e certo del vino, e si chiudeva la settimana piacevolmente. La pecora non era semplice da digerire, ma l'elettricista del cantiere produceva e metteva a disposizione un liquore a base di genziana, capace di far digerire anche i sassi.

Durante l'esperimento organizzammo alcune visite universitarie ai laboratori. Lo scopo era quello di render nota la nostra attività sperimentale ed anche di allettare qualche potenziale laureando.

Tipicamente si iniziava con una visita ai Laboratori di Frascati, con lo svolgimento di alcune lezioni introduttive seguite dalla vera e propria visita. Ci si spostava poi al Gran Sasso con sistemazione in albergo, seguita, il giorno dopo, da alcune lezioni nel laboratorio esterno e dall'effettiva visita a tutti gli esperimenti in corso. Fummo accolti anche dal Centro Spaziale del Fucino per le comunicazioni via satellite. Poi offrimmo una serata di osservazioni astronomiche dall'osservatorio di Collurania, sul

⁷ L'acqua era sempre molto vicina. Il rivestimento delle sale sperimentali la convogliava ai lati e la nascondeva.

versante teramano del Gran Sasso⁸: Luna, Saturno, nebulose varie. La gita era ovviamente condita da pranzetti e cene. Il tutto era per noi piacevole, ma certo abbastanza faticoso; fra l'altro tenere a freno dei diciottenni ansiosi anche di divertirsi in modi più terreni (poco disponibili vicino al Gran Sasso), ci ha messo talvolta in stati d'ansia... Comunque dei laureandi si sono effettivamente associati a noi.

Una visita che coronò la costruzione di MACRO fu quella di Bruno Pontecorvo e di alcuni fisici russi che lo accompagnavano. Pontecorvo era per tutti noi una figura mitica. Era uno dei "Ragazzi di via Panisperna" e allievo di Fermi; fu successivamente il fisico che ebbe un ruolo determinante nello sviluppo della fisica dei neutrini. Io l'avevo già incontrato in un'altra occasione, ma vederlo sul tetto di MACRO e potergli illustrare l'esperimento mi fece certo molto piacere. Forse però la visita fece il maggior effetto sui membri più giovani del gruppo di Pisa.

6. I Monopoli Magnetici

Passo ad esaminare brevemente i risultati ottenuti da MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory).

La motivazione principale e dichiarata dell'esperimento era la ricerca dei monopoli magnetici di grande unificazione nella radiazione cosmica, in un grande intervallo di massa e di velocità; questa fu perseguita mediante varie tecniche (contatori a scintillazione, tubi a *streamer*, tracciatori a fogli di plastica).

Il limite superiore stabilito da MACRO per il flusso di monopoli è ancora imbattuto dopo circa 20 anni [49].

7. Neutrini da Collassi Stellari Gravitazionali

Questa era la tematica principalmente al centro degli interessi pisani. Si noti bene che abbiamo cominciato ad occuparcene nel 1983, ben prima della esplosione della SN1987A e della rivelazione dei neutrini da parte di KAMIOKA II e IMB3; sfortunatamente nel 1987 MACRO non era ancora in funzione... Le esplosioni di SN galattiche con emissione di neutrini rivelabili sulla terra sono ahimè molto poche, forse fra i 2 e i 10 eventi per secolo! Bisogna quindi avere fortuna e negli undici anni di raccolta dati di MACRO la nostra non è stata sufficiente. Tuttavia il sistema di rivelazione da noi progettato e messo in funzione aveva

⁸ Diretto dal pisano prof. Vittorio Castellani.

molti aspetti innovativi e ha certo avuto qualche impatto sui progetti successivi [50].

Le caratteristiche essenziali nella emissione dei neutrini da una SN al centro della galassia sono: una durata di emissione di circa 10 s, neutrini (e antineutrini di tutti i sapori) emessi in uno spettro continuo di energia media 10 MeV, un centinaio di eventi dovuti a ν_e previsti e completamente ricostruiti in MACRO. Un evento è per definizione la rivelazione del positrone dalla reazione $\text{antiv}_e + p \rightarrow e^+ + n$, seguito da dall'emissione di un γ dalla reazione $n + p \rightarrow d + \gamma$ $E_\gamma = 2.2$ MeV, essendo i protoni contenuti nello scintillatore di tipo $(\text{CH}_2)^n$. Il tempo medio di cattura del neutrone prodotto è ≈ 200 μs . Il sistema di acquisizione deve essere capace di registrare tutti gli eventi della raffica neutrinica.

Fu deciso di progettare un circuito, asservito ad ogni contatore, capace di ricostruire e di registrare gli eventi. Il circuito, ideato da Gianrossano Giannini, fu realizzato con il contributo di tutto il gruppo, ma con il particolare impegno di Marco Grassi e Roberto Pazzi⁹. Era un compatto e complesso modulo CAMAC "multistrato", uno dei primi realizzato di quella complessità e prestazioni (figura 14).

Ho ritrovato la chiara e succinta descrizione delle sue proprietà e funzioni e mi sembra opportuno riportarla [51] (figura 15).

Come emerge dalla descrizione, dopo la rivelazione dell'evento primario la soglia in energia di acquisizione viene abbassata a 1 MeV per 800 μs , in modo tale da rivelare il fotone da 2.2 MeV derivante dalla cattura neutronica. Mentre i ≈ 10 MeV dell'evento primario sono al di sopra delle energie raggiunte dalla radioattività ambientale, nella zona dei 2.2 MeV la radioattività è ben presente e rappresenta il principale contributo al fondo.

PHRASE, controllabile da calcolatore anche in remoto da Pisa, ha funzionato perfettamente. Credo di non essere ingiusto dicendo che ha surclassato il parallelo sistema americano ERP, che, fra l'altro, ha sempre dovuto dipendere, per le sue calibrazioni e la definizione della scala di energie, dai dati elaborati da PHRASE.

La costruzione del sistema PHRASE è stata una importante e indovinata realizzazione, veramente all'avanguardia di quanto si faceva nel campo, ma, oltre all'*hardware*, il *software* messo a punto per ottimizzare le sue prestazioni è stato una importante parte del suo successo e della qualità dei dati. Un esperimento di lunghissima durata deve, lungo il suo percorso, garantire una estrema stabilità di comportamento, una buona equilibratura L/R dei fotomoltiplicatori di ogni contatore, una buona ricostruzione on-line degli eventi in posizione e tempo e, soprattutto, una buona misura dell'energia rilasciata nel contatore. Dopo vari studi, indi-

⁹ L'importante aiuto tecnico fu fornito da Fabio Gherarducci e Aldo Tazzioli.

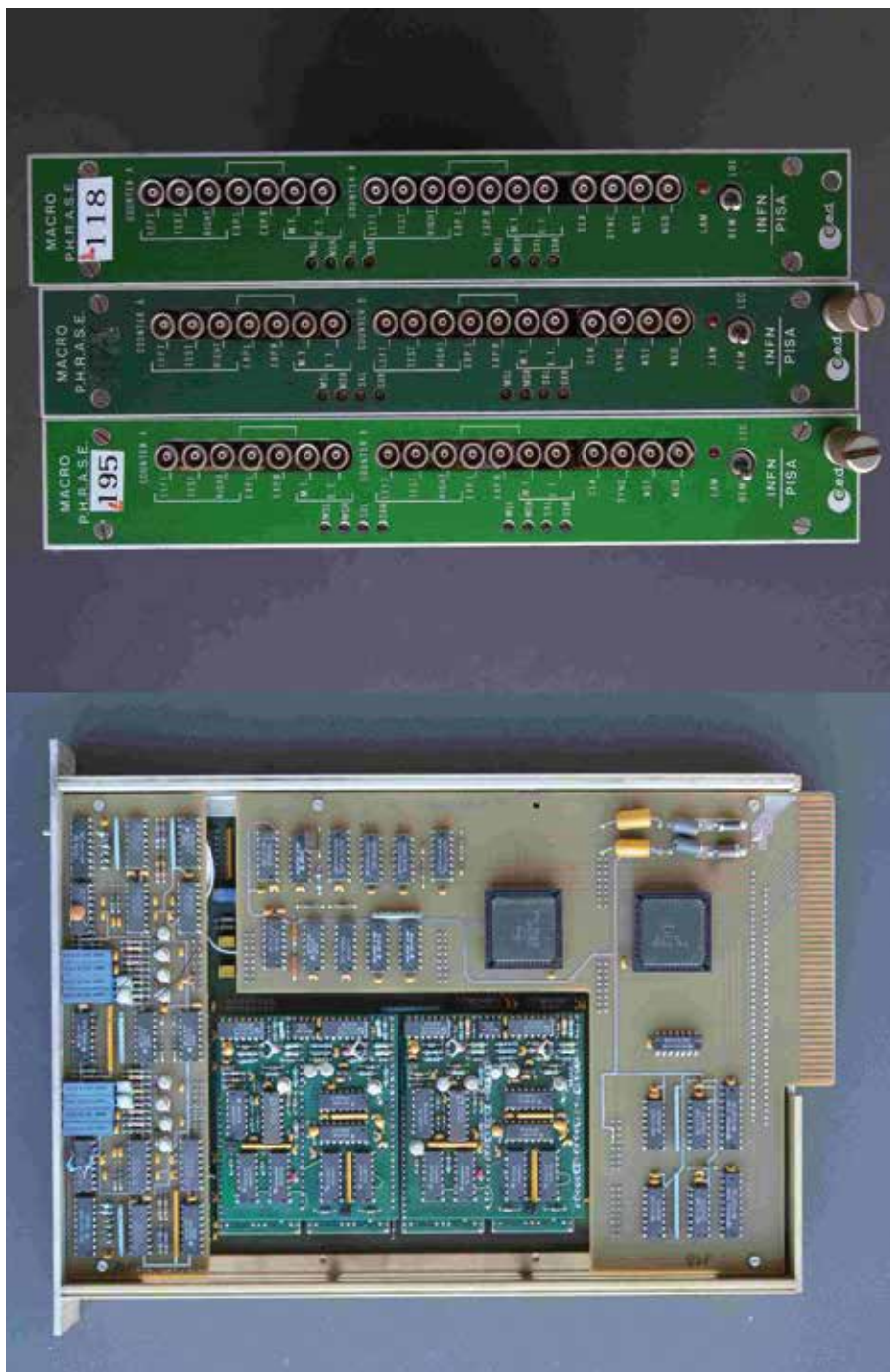


Figura 14. I frontali e le "viscere" del modulo PHRASE (≈ 1987). (foto: cortesia di Giuseppe Fausto).

PHRASE FUNCTIONS AND DESIGN

"PHRASE" (Pulse Height Recorder And Synchronous Encoder), is a CAMAC circuit designed to record pulse shapes at high sampling speeds (100 MHz); actually the name reminds also that by putting together time WORDs a PHRASE is obtained.

Each circuit has two sections: "COUNTER A" and "COUNTER B"; each section deals with a single MACRO counter.

For each counter, the signals from the photomultipliers are sent to the "LEFT" and "RIGHT" inputs of a PHRASE section.

PHRASE performs the following functions:

It gives an output trigger signal (Energy Trigger) when a threshold condition is satisfied on the energy released by an event in a MACRO counter. This is hardware accomplished by compensating for the counter light attenuation properties, and by discriminating on analog signals proportional to event energies.

It digitizes and stores pulse shapes if an Energy Trigger was generated. The circuit, while waiting to be read out by CAMAC, can store a maximum of fifteen events, occurring within up to ~1 second.

The time of each event, associated with the Atomic Clock time, is measured with high precision (about 1.6 ns) and stability. The time difference between the counter photomultiplier pulses is also measured with the same high accuracy.

After each Energy Trigger, the circuit energy threshold is lowered to a second and independently presettable value during a so called special time; during this time interval, that we choose to be ~500 μ sec (although it could be ~1 sec), other events may be collected and stored.

Figura 15. Le prestazioni di PHRASE.

viduammo nella riga γ di radioattività naturale del ^{208}Tl con $E_\gamma = 2.62$ MeV un riferimento energetico, sempre a disposizione, che permetteva la sicura definizione della "scala di energia" di ogni contatore. Un esempio di spettro in energia della radioattività misurata in un contatore di MACRO, nel quale emerge la riga del Tallio, è mostrato in figura 16.

Il nostro collega Roberto Pazzi, ahimè scomparso, ha per anni seguito, con pazienza certossina e giorno per giorno, questo tipo di calibrazione

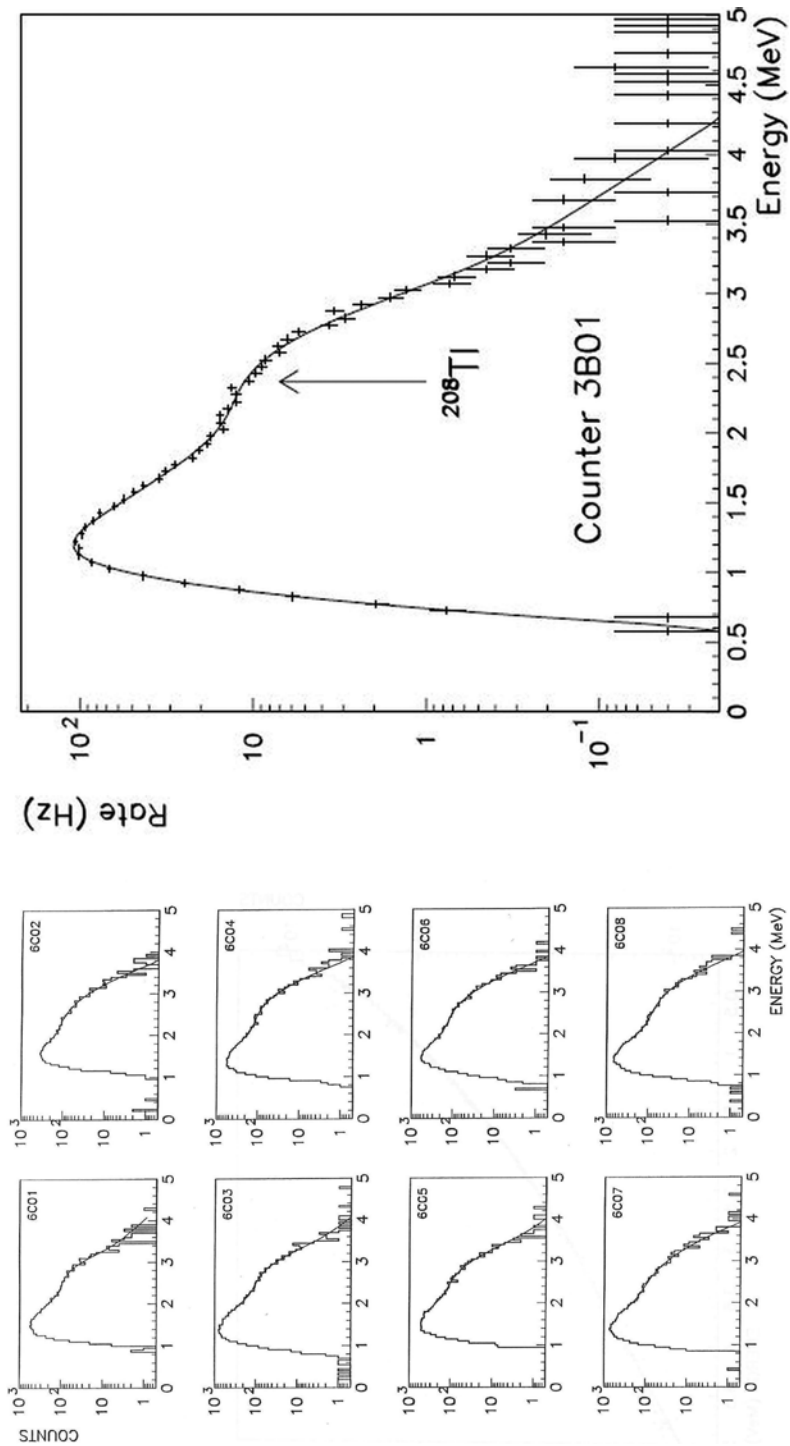


Figura 16. La riga a 2.62 MeV del ^{208}Tl come misurata in alcuni contatori a scintillazione di MACRO.

per i circa 300 contatori a scintillazione dell'esperimento, assicurando la qualità dei dati al nostro e ad altri gruppi della collaborazione¹⁰.

Visto che il sistema PHRASE era in grado di riconoscere on-line l'esplosione di una supernova e di rivelarne i neutrini, il relativo monitor fu connesso ad un sistema di allarme che, tramite un telefono cellulare, in realtà all'epoca una valigetta di discreto volume, era sempre al seguito di uno di noi, a turno. L'allarme ci avrebbe permesso di avvisare gli astronomi per una loro osservazione della supernova nel visibile. Ottenere il permesso dell'INFN per l'uso del telefono cellulare non fu impresa facile... In figura 17 è mostrato il monitor e la lettera che il Presidente dell'INFN, Luciano Maiani, scrisse al direttore della sezione di Pisa, Giuseppe Pierazzini, per autorizzare il telefonino per MACRO. Qualche allarme fasullo, necessitante ulteriore analisi, ci raggiunse nel tempo.

Altro importante risultato fu l'aver individuato un metodo per dimostrare la capacità e l'efficienza di MACRO e PHRASE nell'individuare gli eventi da collasso, cioè l'evento primario associato al positrone e l'evento secondario associato alla cattura ritardata del neutrone (questo in attesa di un reale collasso...). Il metodo faceva uso di una sorgente Am/Be emettente un γ da 4.4 MeV ed un neutrone correlato, ambedue rivelati nello scintillatore [52] (figura 18).

La zona del laboratorio sotterraneo occupata dal MACRO era a bassa radioattività naturale, questo sia per il tipo di roccia che per il pavimento ed i rivestimenti in cemento, del tipo a bassa radioattività. Tuttavia la radioattività presente costituiva un fondo importante di γ , alle basse energie di interesse per la rivelazione dei collassi stellari; inoltre i contatori a scintillazione dell'esperimento non erano in alcun modo schermati e protetti. Si cominciò a considerare un qualche modo di ridurre i fondi di radioattività. Decidemmo pertanto di fare una prova su una scala significativa, sovrapponendo al pavimento sotto l'apparato uno schermo di protezione. Questa fu davvero una bella avventura! Decidemmo che lo schermo dovesse riguardare 10 m dei circa 100 m di lunghezza di MACRO ($\approx 120 \text{ m}^2$) e per realizzare tale schermo decidemmo di usare centinaia di tavole di legno (un materiale a basso Z, con radioattività naturale molto minore della roccia e del cemento). Dove mai procurarsi le tavole? Riuscimmo a chiederle in prestito per alcuni giorni ad un grosso cantiere dell'Aquila, per la cronaca: gestito da un ramo della famiglia Fiordigigli, nostri albergatori, ma anche imprenditori. Le tavole furono portate in galleria e restava ora il problema di inserirle sotto MACRO. Era una impresa per fisici non claustrofobici, dato che lo spazio fra l'apparato e il cemen-

¹⁰ Successivamente fu usato anche un altro metodo di calibrazione, basato sulla misura della velocità di conteggio della radioattività al di sopra di una prefissata soglia in energia.

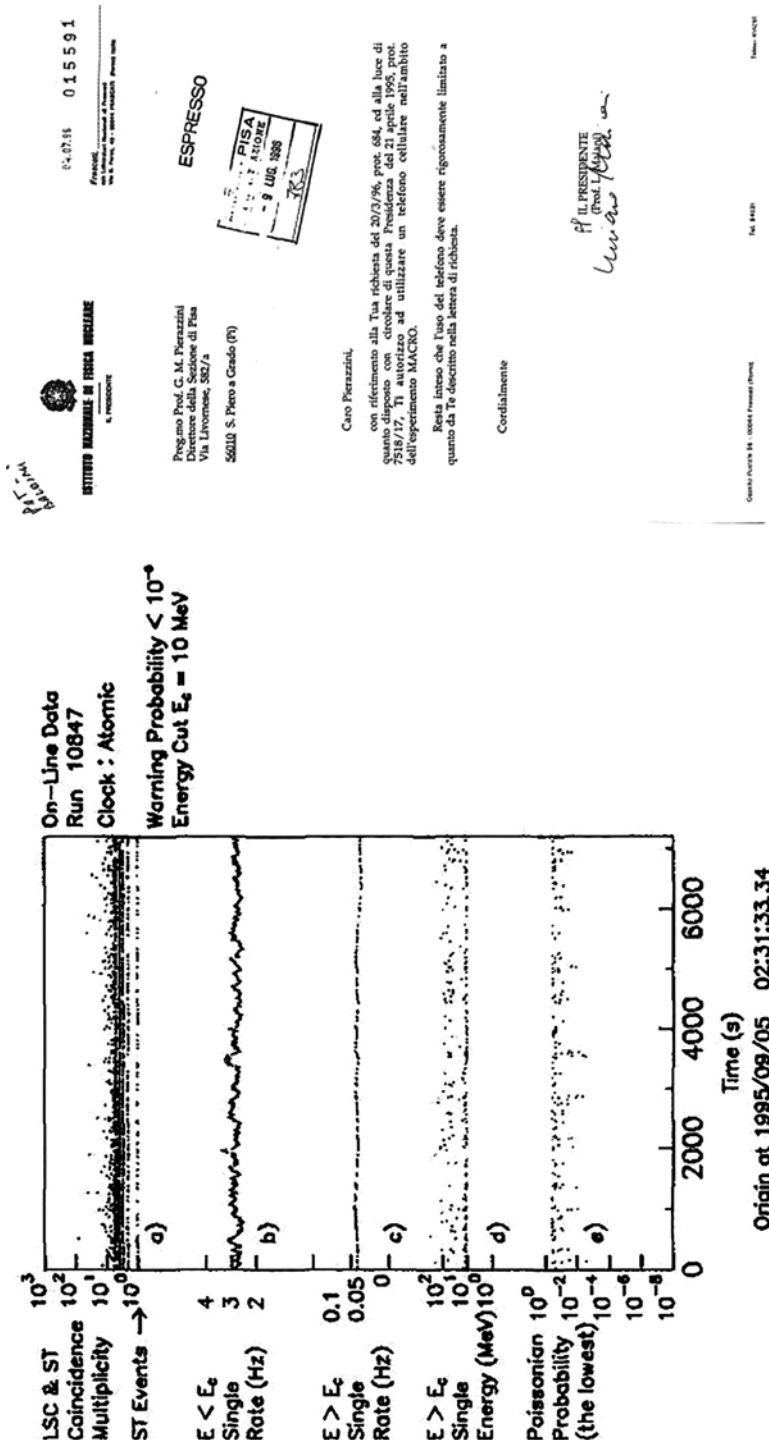


Figura 17. Il monitor on-line dei collassi e la lettera di Maiani autorizzante l'uso del telefonino.

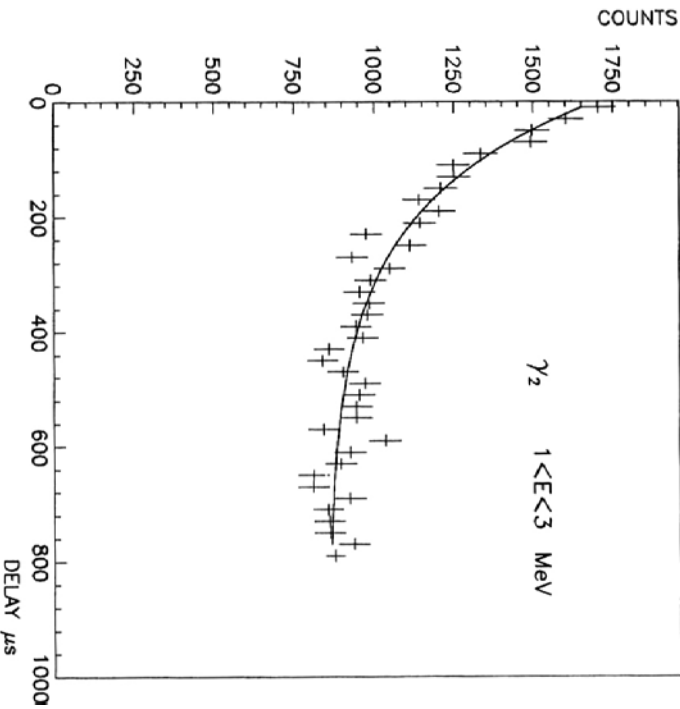
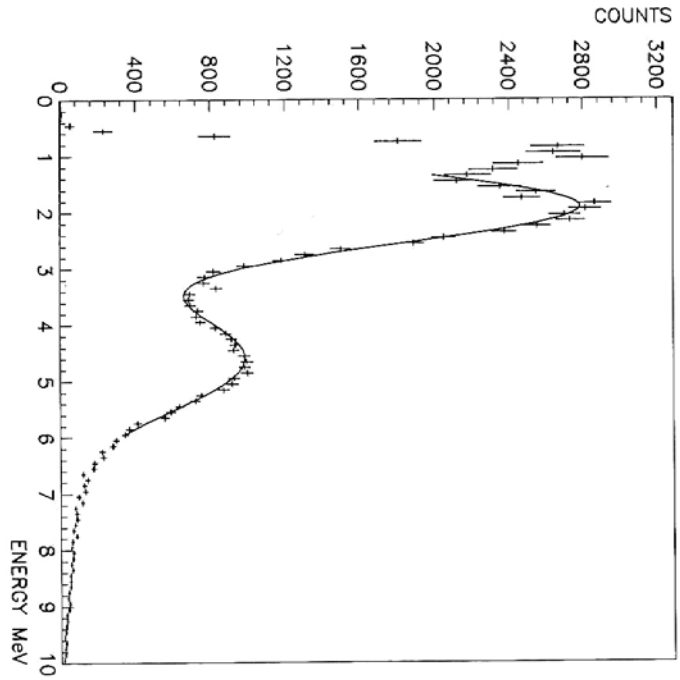


Figura 18. La risposta dei contatori alla sorgente di Am/Be. Sono visibili la riga a 4.4 MeV e quella a 2.2 MeV dovuta alla cattura del neutrone nello scintillatore. La figura di destra rende evidente la correlazione temporale fra le due righe, mostrando il ritardo dell'evento secondario rispetto all'evento primario.

to del pavimento era inferiore al metro. Carlo Bemporad e Alessandro Baldini provvidero alla bisogna, alla debole luce di torce elettriche e fra la polvere; mi sembra di ricordare che ciò prese due giorni... Le misure mostrarono una cospicua riduzione della radioattività registrata da MACRO nella zona coperta dalle tavole. Presentammo i risultati alla collaborazione, ma infine fu deciso di non produrre l'enorme schermaggio che sarebbe stato necessario per tutto l'apparato, dato il costo e le difficoltà di realizzazione¹¹.

Altro sviluppo interessante, tentato per la rivelazione dei neutrini da collasso, fu quello associato alla ricerca di acqua pesante (per circa 100 tonnellate). Ciò avrebbe permesso lo studio delle reazioni di corrente neutra e una maggiore comprensione della emissione dei diversi tipi di neutrino nei collassi stellari. Un primo tentativo fu il rivolgersi al Canada. Il Canada ha alcuni reattori che usano l'acqua pesante come moderatore e inoltre ne sono produttori. L'acqua pesante era all'epoca usata nell'esperimento canadese SUDBURY, permettendo i suoi strepitosi risultati. A noi, non canadesi, richiesero dei prezzi proibitivi, sia per una vendita, che per un prestito temporaneo¹². Poi cominciammo a cercare in Russia. All'inizio sembrava che qualcosa si potesse ottenere. Ospitai a Pisa due ben noti fisici russi: Lev Mikaelyan e Sergei Fayans, con i quali iniziammo a trattare. Erano persone simpaticissime e con Lev avemmo poi una lunga e piacevole collaborazione nel successivo esperimento CHOOZ. La trattativa non andò a buon fine; la Russia aveva difficoltà economiche crescenti e cominciava a vendere i suoi beni ad alto prezzo. Davanti alle richieste, crescenti nel tempo e non direttamente dipendenti da Mikaelyan e Fayans, dovemmo rinunciare. Peccato però!

Provammo a ripiegare sull'uso di carbonio (che emette una riga da 15.1 MeV da una reazione indotta da correnti neutre); ma anche questo progetto era assai complesso e difficilmente compatibile con la struttura di MACRO.

In relazione al tema dei collassi e come prova di un buon clima di lavoro italo-americano durante l'esperimento, inserisco un episodio interessante: Barry Barish di Caltech e responsabile del gruppo americano, inviò a Pisa per qualche mese una sua dottoranda, Kate Scholberg, perché imparasse ad utilizzare i dati del sistema PHRASE. Ospitammo Kate e le rendemmo la permanenza la più piacevole possibile. Kate completò poi la sua tesi di dottorato (1996) utilizzando anche i dati di PHRASE. La cosa notevole è che la Scholberg ha sempre continuato a lavorare nel campo delle supernove e dei loro neutrini e, più in generale, in fisica dei

¹¹ Si sarebbe probabilmente trattato di una grande vasca contenente acqua per una altezza di una quarantina di centimetri.

¹² Anche l'acqua pesante in SUDBURY era in prestito...

neutrini, divenendone una specialista. È ora professore presso la Duke University. Dopo la visita di Kate, fu Fabrizio Cei a recarsi, per circa sei mesi, presso Greg Tarlè, membro di MACRO e professore alla Università del Michigan. Fabrizio aveva appena terminata la sua tesi di dottorato sulla ricerca dei collassi stellari gravitazionali, la prima tesi di “Astroparticelle” presentata a Pisa, poi pubblicata dalla Scuola Normale [53].

8. Le Oscillazioni Neutriniche ed altra fisica

Oltre ai temi relativi ai collassi stellari gravitazionali e alla ricerca dei monopoli magnetici di grande unificazione, MACRO ha potuto fornire alcuni rilevanti risultati: ha raccolto un gran numero di eventi dovuti ad interazione di neutrini, in particolare di quelli provenienti dal basso, ed ha fornito una chiara prova delle oscillazioni neutriniche [54], in accordo, ma con risultati di minor qualità, di quelli ottenuti da SUPERKAMIOKANDE. Ha fornito informazioni sulla distribuzione in energia e sulla composizione in massa dei raggi cosmici primari [55], ha ricercato sorgenti puntiformi di raggi cosmici [56], ha messo in evidenza delle differenze stagionali nel flusso sotterraneo dei raggi cosmici [57]. Ha posto limiti sul flusso di particelle esotiche quali WIMPs e neutralini [58].

Mi piace metter in evidenza un risultato per me affascinante: l’aver misurato, per la prima volta, una diminuzione dell’intensità dei raggi cosmici in corrispondenza dell’assorbimento da parte della luna [59]; l’“Ombra della Luna”!, vista da un rivelatore sotterraneo. Non è stata solo una curiosità...; la misura ha permesso di conoscere quale fosse la risoluzione angolare di MACRO nel determinare la direzione di provenienza di un muone cosmico; ciò è di ovvio interesse nella ricerca di sorgenti puntiformi di raggi cosmici.

Come già accennato MACRO è stato il primo ambizioso esperimento in fisica “Astroparticellare” nel quale Pisa abbia fatto un notevole investimento. Molti altre iniziative sono nate a Pisa successivamente. È difficile dire quale sia il momento nel quale un esperimento abbia inizio; si comincia a pensarci, a fare studi preliminari, ma se l’iniziativa è ambiziosa, la ricerca di una collaborazione, di finanziamenti per delle prove, fino alla scrittura di una proposta più impegnativa, può richiedere molto tempo. Mi sembra che l’effettivo “inizio” debba identificarsi con la data di sottomissione di una proposta ufficiale. Esaminerò gli esperimenti afferenti alla Commissione Scientifica II, nei quali vi sia una partecipazione dell’INFN di Pisa. Un elenco di iniziative, (quelle più propriamente di “Cosmoparticelle” sono asteriscate), con la loro approssimativa data di inizio, è il seguente:

- ***MACRO: 1983;

- ***VIRGO: 1989 (IRAS 1985);
- GAL: 1992;
- PVLAS: 1994;
- ***CLUE: 1995;
- NOMAD: 1996;
- CHOOZ: 1998;
- ***GLAST/FERMI: 2001;
- ***MAGIC: 2002;
- ***AMS2: 2002;
- ***ANTARES: 2006;
- ***NEMO: 2006;
- GINGER;
- ***CALET;
- ***CREAM;
- AXIONS;
- ...

Mi sembra interessante far notare che, in maniera assolutamente non pianificata, Pisa, patria di Galileo, si è trovata a fare alcuni esperimenti in fisica della gravitazione. Mi riferisco a MACRO (1989) e alla sua ricerca dei collassi stellari gravitazionali, a GAL (1992) e alla ricerca di una possibile violazione della universalità di g (indipendenza dalla composizione del corpo in caduta libera), e finalmente all'esperimento VIRGO (figura 19) per la ricerca delle onde gravitazionali (2003). Un nuovo progetto, GINGER, in sviluppo ora a Pisa e al Gran Sasso, riguarda il tentativo di misura terrestre dell'effetto Lense-Thirring.

9. Il Progetto VIRGO

L'iniziativa in Italia degli studi per la rivelazione di onde gravitazionali con metodi interferometrici è certamente dovuta a Adalberto Giazotto [60], un fisico con una preparazione abbastanza fuori dall'ordinario; infatti Giazotto, che ha a lungo partecipato ad esperimenti di alte energie a Frascati, Daresbury, CERN, è anche padrone di una notevole cultura di tipo teorico.

Gli studi di Giazotto per la realizzazione di un interferometro di grandi dimensioni e capace di raggiungere le basse frequenze risalgono ai primi anni '80¹³. Bisogna notare che Pisa non aveva alcuna preceden-

¹³ I progetti per interferometri di grandi dimensioni sono stati sviluppati nello stesso periodo anche negli Stati Uniti.



Figura 19. L'interferometro e il laboratorio nella piana di Cascina.

te esperienza nel campo della rivelazione delle onde gravitazionali; gli esperimenti esistenti, condotti esclusivamente con antenne a barra, erano invece già in corso a Roma, Padova, Legnaro, Frascati nel 1982; Edoardo Amaldi ne è stato l'iniziatore in Italia. Quindi Giazotto si è trovato a dissodare un terreno che, per quel che riguarda gli interferometri a Pisa ed in Italia, era sostanzialmente vergine. Il puntare immediatamente ad un obiettivo ambizioso, per le dimensioni e la sensibilità dell'interferometro, era certo per Giazotto frutto della sua precedente esperienza nel campo della alte energia, dove le dimensioni e le tecnologie usate negli esperimenti erano assai avanzate. Bisogna notare che, a differenza di altre iniziative, lo sviluppo di prototipi di minori dimensioni non avrebbe permesso il raggiungimento delle sensibilità minime necessarie alla rivelazione di eventi astrofisici.

La prima sperimentazione volta alla riduzione del rumore sismico a basse frequenze fu associata alla iniziativa IRAS (1984), che portò all'invenzione e allo sviluppo dei "Superattenuatori" (1987) da parte del gruppo comprendente allora Raffaele Del Fabbro, Angela Di Virgilio, Adalberto Giazotto, Hans Kautzky, Vinicio Montelatici, Diego Passuello [61] (figura 20).

L'inizio di una collaborazione italo/francese con Alain Brillet, da tempo interessato alla rivelazione interferometrica delle onde gravitazionali, portò infine alla scrittura della proposta congiunta VIRGO (1989) che l'INFN e i presidenti Nicola Cabibbo e Luciano Maiani presero in seria considerazione. Una prima espressione di interesse da parte dell'INFN e del francese CNRS fu firmata nel 1991; l'approvazione del progetto VIRGO fu infine firmata dagli stessi enti nel 1994. I tempi così lunghi per raggiungere l'approvazione erano in parte dovuti alle difficoltà logistiche e alla necessità di espropriare terreni per la costruzione del laboratorio e dell'interferometro nei dintorni di Cascina, ma anche alla complessità del progetto, al volersi assicurare pienamente della sua realizzabilità.

Dalle prime idee (1980), alla proposta (1989), alla approvazione del progetto (1994), al termine della costruzione (2003), ad una prima entrata in funzione (2007): si tratta di un lasso di tempo lunghissimo; rappresenta una frazione importante di una vita umana; richiede doti di dedizione, impegno, resistenza, indubbiamente legate agli aspetti di un progetto tanto ambizioso, ma che ha finito per richiedere straordinarie qualità agli stessi sperimentatori proponenti. Si tratta probabilmente della più complessa iniziativa nata e infine realizzata a Pisa. I particolari accordi di collaborazione che legano VIRGO agli interferometri americani LIGO e il trionfo della scoperta delle onde gravitazionali (2016) sono il coronamento di un lungo impegno e l'inizio di una nuova fase nelle ricerche astrofisiche [62].

I segnali ottenuti dai due interferometri di LIGO, cioè "La Scoperta delle Onde Gravitazionali", sono mostrati in figura 21.

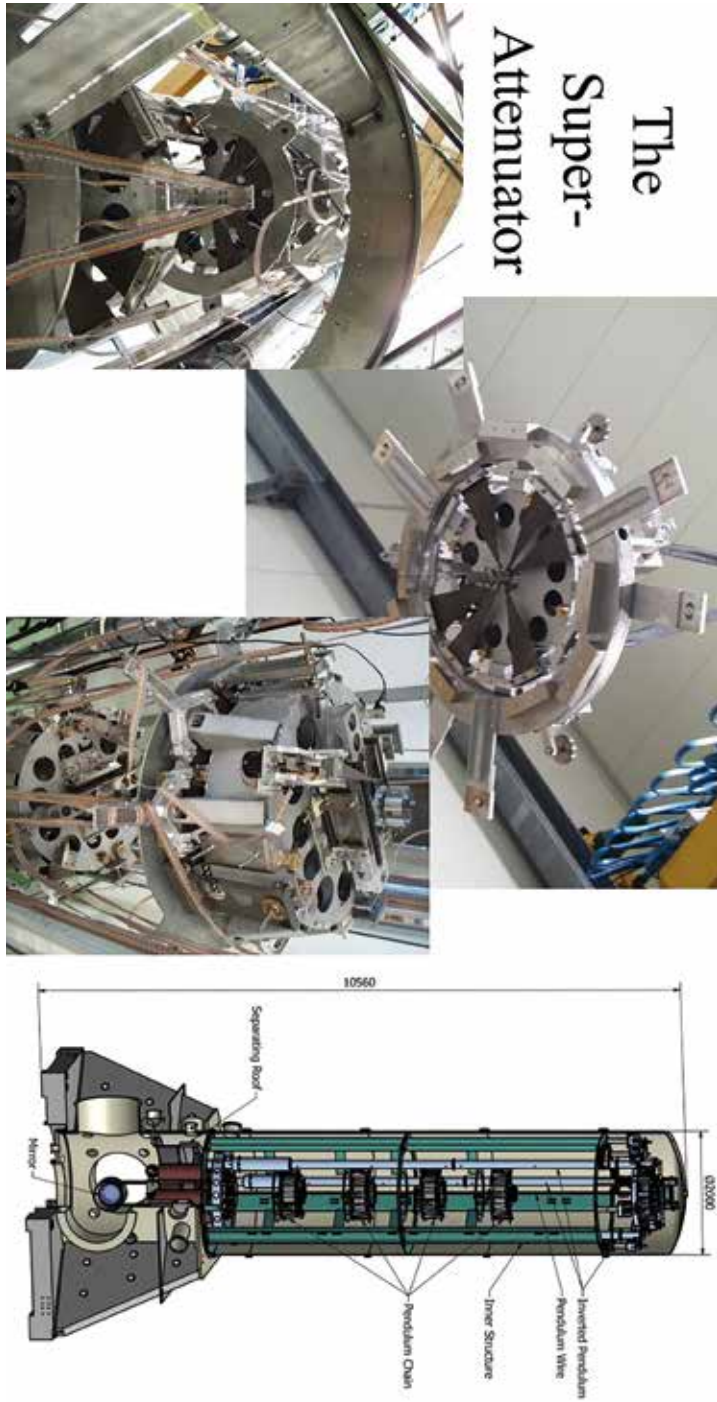


Figura 20. Il superattenuatore, dettagli e insieme schematico.

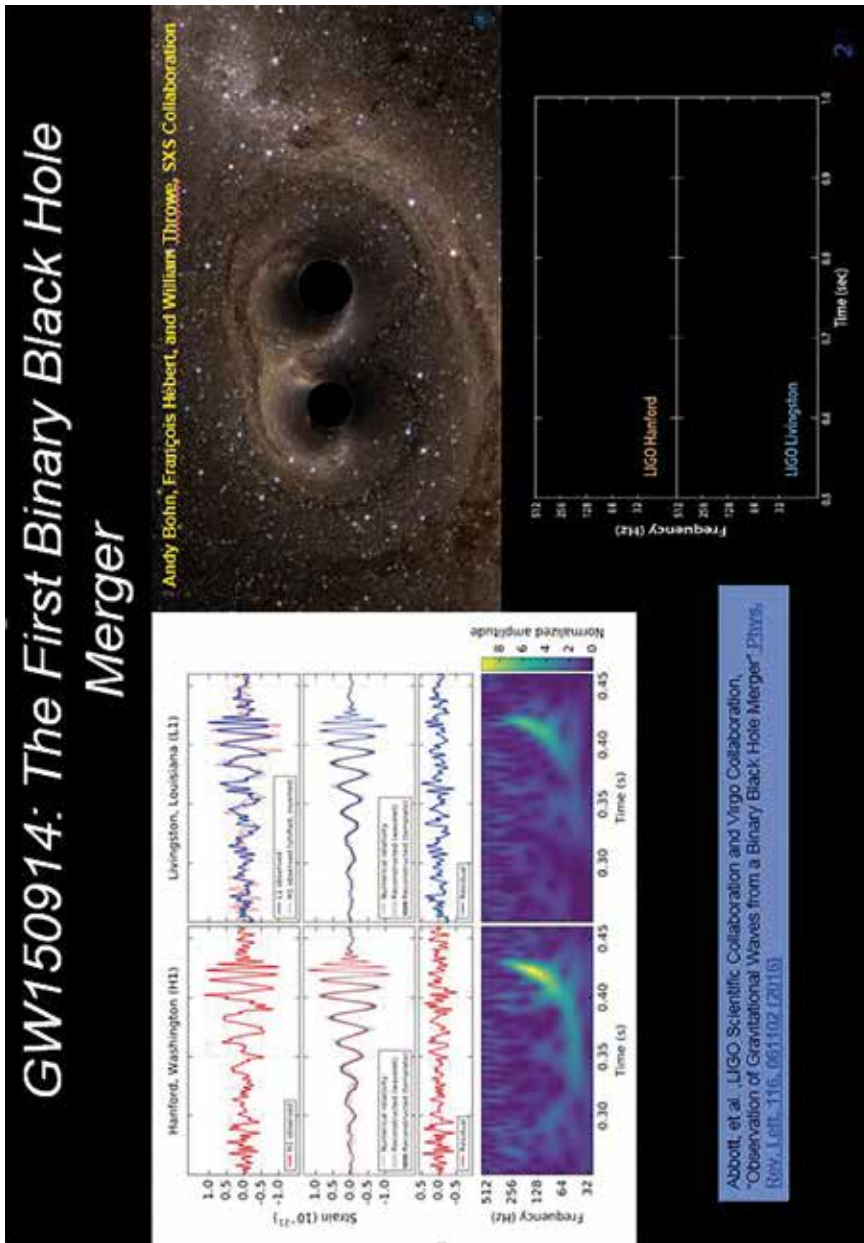


Figura 21. I segnali dal collasso gravitazionale di due buchi neri, ottenuti dai due interferometri di LIGO.

ADVANCED VIRGO, con la sua aumentata sensibilità, è rientrato in funzione dall'estate del 2017 (figura 22).

A mio parere, fra i tanti progressi in fisica delle particelle ottenuti con il contributo pisano, la scoperta delle onde gravitazionali è probabil-



VIBRATION ISOLATION

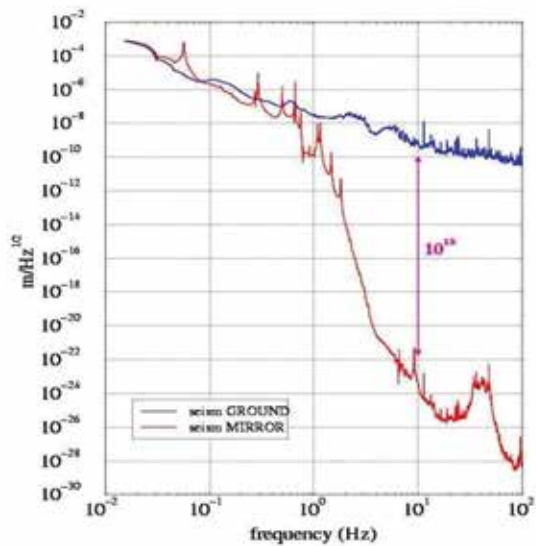
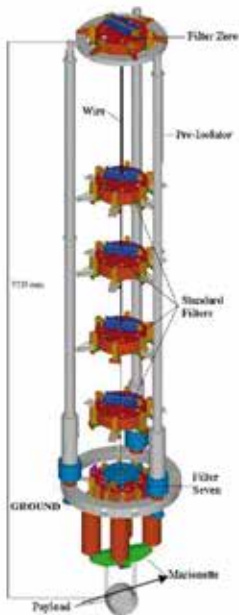


Figura 22. In alto: Il tubo a vuoto relativo ad un braccio dell'interferometro. In basso: Il superattenuatore e la sensibilità attesa per ADVANCED VIRGO.

mente quello di maggiore importanza. Negli ultimi cento anni la nostra conoscenza dell'universo ha fatto progressi grandiosi. Siamo in grado di esplorare strutture e corpi celesti a distanze sempre più grandi e a tempi sempre più remoti. Ciò è stato ottenuto utilizzando una varietà di mezzi: lo spettro elettromagnetico, dalle microonde ai gamma di altissima energia, i neutrini, i raggi cosmici. Le onde gravitazionali completano questo quadro e promettono di estendere ulteriormente le nostre conoscenze. In un tempo assai breve, dopo il raggiungimento delle sensibilità di disegno, si è potuto osservare, per così dire in diretta, la fusione di due grandi buchi neri, poi il collasso di un sistema binario di stelle di neutroni e ci sono ora indizi di coincidenze fra un evento rivelato tramite onde gravitazionali e l'emissione di un *gamma ray burst*. Le osservazioni di fenomeni cosmici mediante segnali multipli è una delle maggiori speranze di progresso per l'astrofisica; le onde gravitazionali completano i mezzi osservativi già a nostra disposizione; l'indagine astrofisica si basa ora su tutte e quattro le interazioni fondamentali.

Non va taciuto il fatto che la prima rivelazione di onde gravitazionali ha fornito una grande prova della validità della relatività generale a regime di campi gravitazionali ultra intensi. Questa prova non poteva che venire dall'osservazione di catastrofi cosmiche come appunto la fusione di due buchi neri. Fino a tempi relativamente recenti è stato usuale e possibile provare la validità delle teorie fisiche mediante esperimenti di laboratorio, ripetuti e migliorati nel tempo. Ciò è evidentemente impossibile per la relatività generale in regime di campi intensi. Che la natura ci abbia fornito un modo di controllare in dettaglio le previsioni dei calcoli analitici e dei calcoli numerici riguardanti la relatività generale ha del miracoloso!

Mi appare opportuno mostrare un confronto fra il costo totale di VIRGO (INFN+CNRS) e quello di molte altre importanti iniziative ed esperimenti. È interessante notare come nel campo della fisica astroparticellare si siano potuti raggiungere risultati assai importanti con costi tutto considerato modesti (figura 23).

10. Il Progetto FERMI/GLAST

L'esplorazione astrofisica ha utilizzato i fotoni, in un vasto intervallo di energie, come "messaggeri" preferenziali; i più diretti concorrenti per il raggiungimento di distanze estreme, sono i neutrini ed ora anche le onde gravitazionali. Ma sono i fotoni che per ora permettono il raggiungimento di alte statistiche, elevate risoluzioni energetiche ed angolari, grande angolo solido di osservazione.

L'esperimento FERMI, piazzato dalla NASA ad un'altezza di 550 Km, segue una serie di precedenti telescopi spaziali: HUBBLE, CHANDRA,

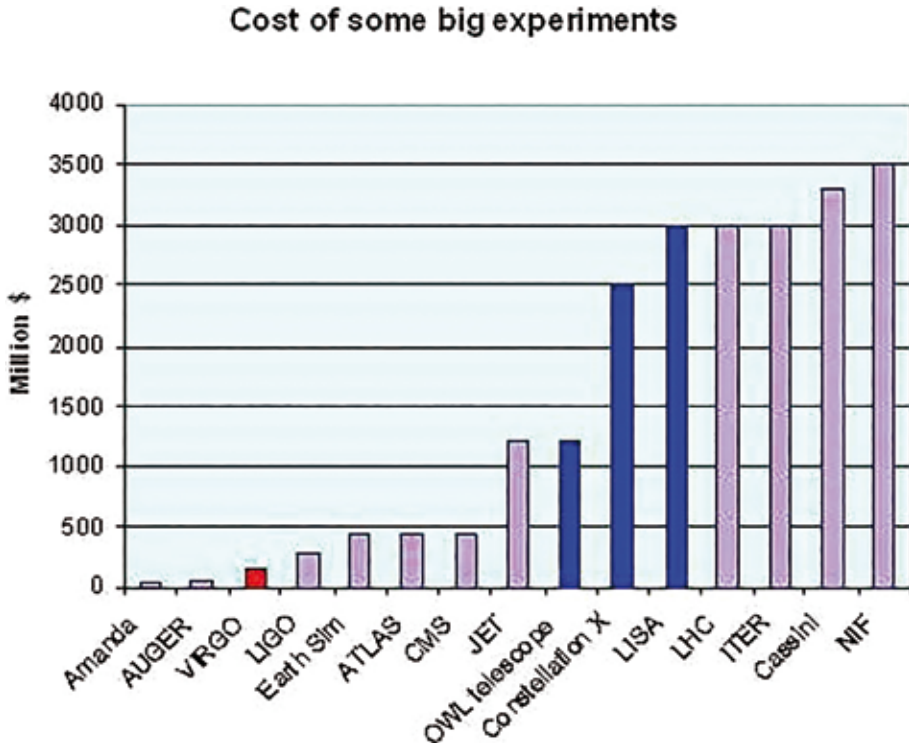


Figura 23. Il costo totale di VIRGO (INFN e CNRS) confrontato con quello di altre importanti iniziative e esperimenti; (da *The Gravitational Voice*, January 2007, P. La Penna).

EGRET, ecc. ed è quello che in questo momento è attivo. La determinante partecipazione di Pisa in questa impresa riguarda principalmente la parte denominata *Large Area Telescope (LAT)* [63], basata sulla tecnologia dei rivelatori al silicio, inizialmente ampiamente sviluppata a Pisa. Il LAT copre le energie dei gamma comprese fra 20 MeV e 300 GeV. Uno schema del LAT è mostrato in figura 24 insieme ad uno schema del modo di rivelazione dei gamma.

FERMI ha prodotto una ricchissima quantità di dati, ad esempio: delle dettagliate mappe in raggi gamma del cielo [64] (figura 25), mappe della distribuzione di *Gamma-Ray Bursts (GRB)* [65] (figura 26), scoperta di *pulsars* e *supernova remnants* emettenti gamma [66], la scoperta delle enormi “Bolle di FERMI” [67] (figura 27) associate alla regione del centro galattico e, probabilmente, la recente rivelazione di un GRB in coincidenza con uno degli eventi gravitazionali di LIGO.

La missione spaziale IXPE, in studio avanzato, potrebbe completare le esplorazioni di FERMI con la misura della polarizzazione della radiazione gamma [68], [69].

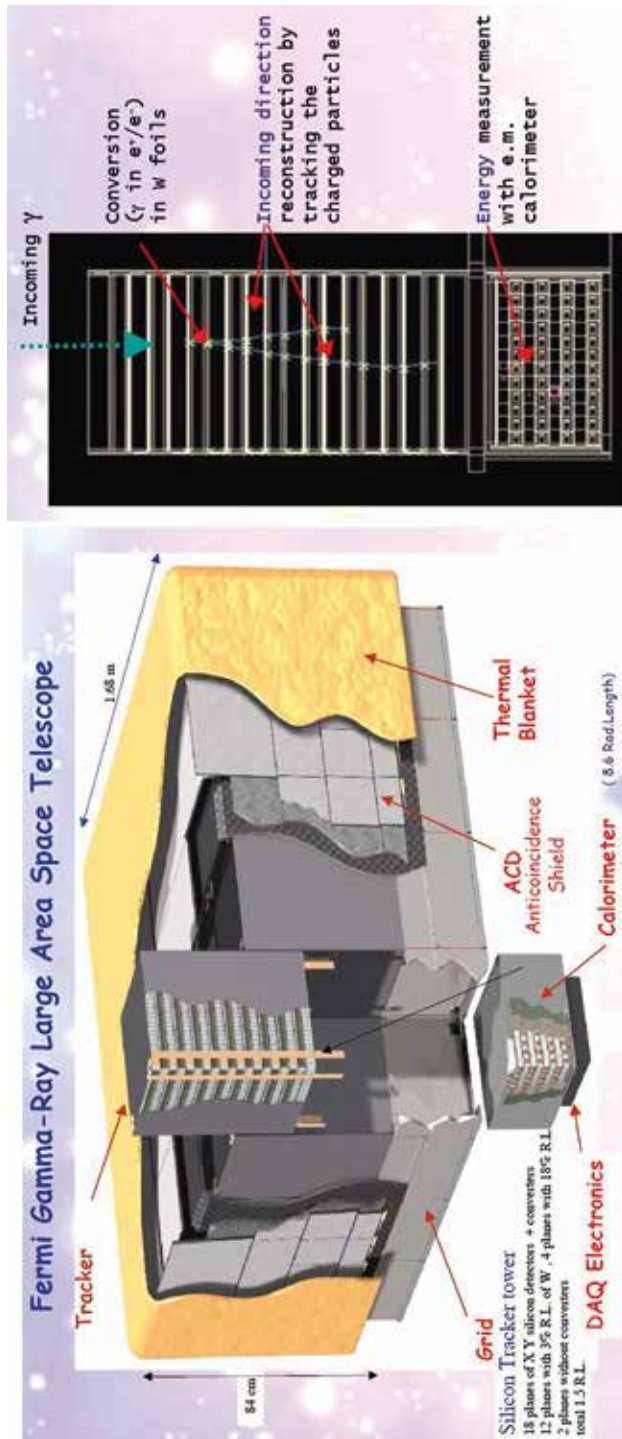


Figura 24. Uno schema del LAT (Large Area Telescope) per Raggi Gamma di FERMI. A destra: Uno schema del modo di rivelazione dei gamma.

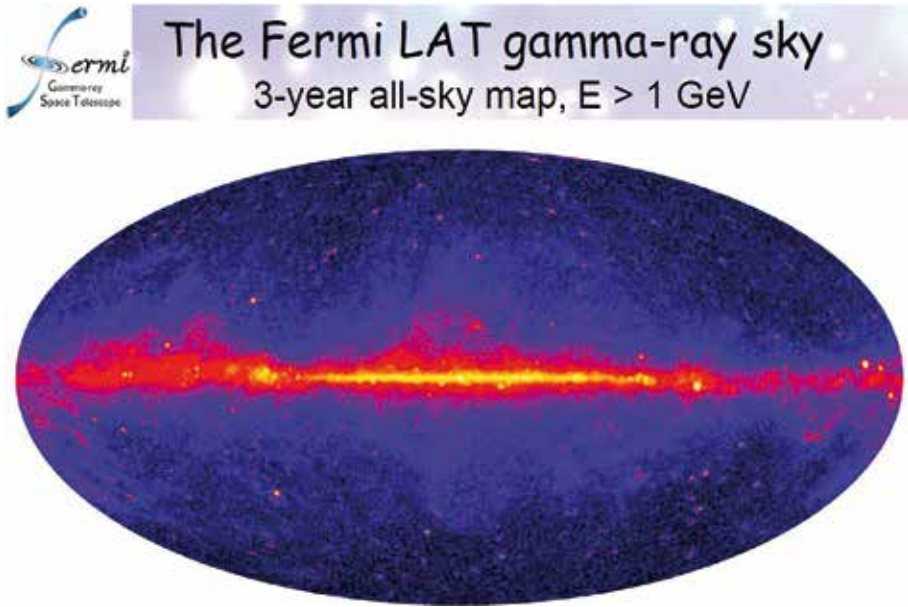


Figura 25. Una mappa in raggi gamma del cielo, osservata da FERMI.

11. Il Telescopio MAGIC

MAGIC (*Major Atmospheric Gamma Imaging Čerenkov Telescope*) (figura 28) è uno strumento terrestre di nuova generazione, con uno specchio di 234 m^2 , costruito nelle Canarie e sensibile a Gamma con $E_{\text{gamma}} > 30 \text{ GeV}$. Telescopi Čerenkov, quali HESS e HEGRA, sono stati costruiti ed hanno operato precedentemente; uno: CLUE [70], è stato costruito da un gruppo di Pisa. Le caratteristiche innovative di MAGIC [71] hanno permesso lo studio di nuclei galattici attivi (AGN) quali AGN 1ES 2344+514 e AGN 1ES1959+650, di Markarian 421 [72] e della *Crab Nebula* [73].

12. L'esperimento PVLAS

Questo esperimento, veramente molto difficile, intrapreso circa nel 1994 e basato su una iniziale proposta di Enrico Iacopini e Emilio Zavattini [74], intendeva mettere in evidenza l'“Anisotropia del Vuoto” sotto l'azione di un forte campo magnetico; poiché il vuoto può fluttuare in coppie virtuali $e^+ + e^-$, queste possono essere polarizzate dalla presenza del campo magnetico, causando quindi una asimmetria. L'esperimento è tuttora in corso e, negli anni, alcuni ricercatori pisani, esperti di ottica, vi sono stati coinvolti: Erseo Polacco e Salvatore Carusotto.

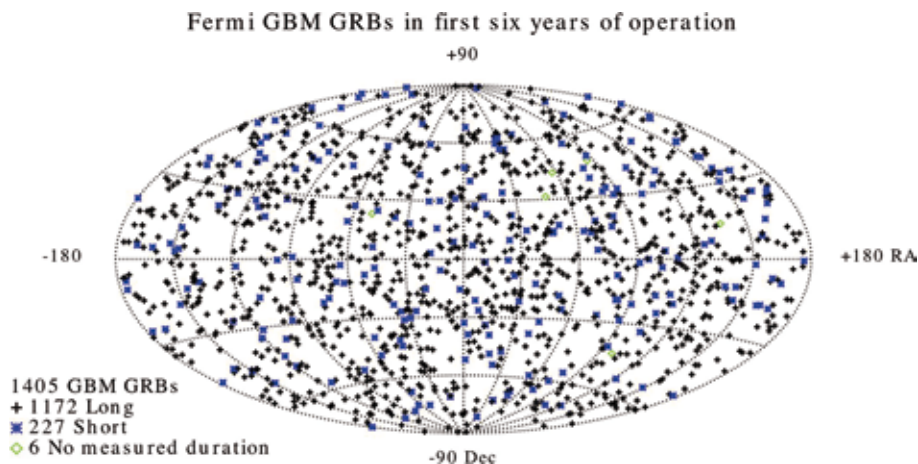


Figura 26. Una mappa celeste dei GRB, osservata da FERMI.

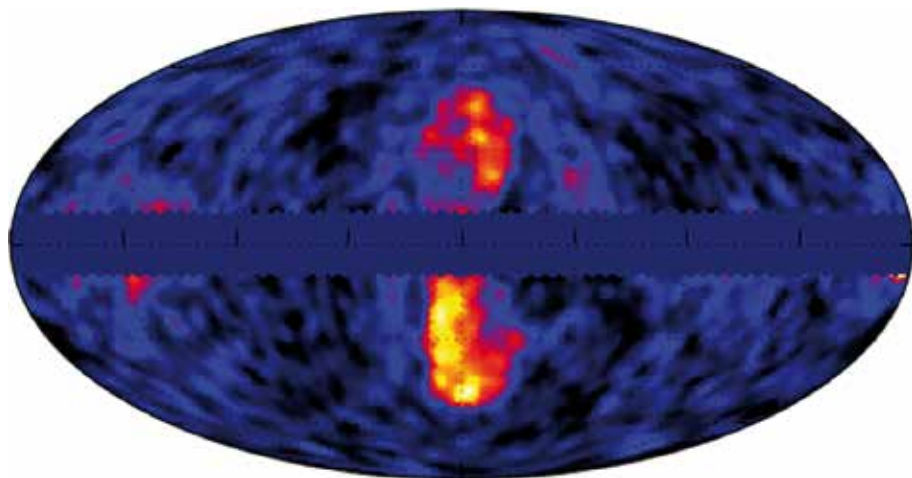


Figura 27. Le gigantesche "Bolle di Fermi" nella regione del centro galattico.

Data la difficoltà delle misure, la riduzione degli errori sistematici ha preso tempi lunghissimi e sfortunatamente è anche stato pubblicato un falso segnale. Ora l'apparato, dopo esser stato completamente ridisegnato, ha fornito misure e risultati affidabili [75]; la sensibilità dell'esperimento risulta però ancora insufficiente di circa un fattore 10, a mettere in evidenza il segnale predetto dalla teoria. La cosa sorprendente è che recentemente si è avuta una osservazione indiretta della anisotropia del vuoto mediante la misura della polarizzazione della luce emessa da una stella di neutroni [76]; inoltre l'esperimento ATLAS ha messo in evidenza il processo correlato: la diffusione luce-luce [77].



Figura 28. I telescopi di MAGIC.

13. Lo spettrometro magnetico ALPHA (AMS)

Questo apparato, montato sulla stazione spaziale internazionale, nella sua seconda fase di funzionamento ha potuto utilizzare una calorimetro elettromagnetico progettato e costruito a Pisa (2002). L'esperimento, indagante principalmente la quantità di antimateria presente nell'universo, ha determinato, con elevata precisione, i flussi di e^+ , di e^- [78] di protoni [79] ed elio [80] nella radiazione cosmica.

14. Il Telescopio ANTARES

ANTARES [81] è il primo telescopio sottomarino operante nel Mediterraneo ad una profondità di circa 2500 m. È costituito da 12 stringhe verticali, equipaggiate ognuna con 25 fotomoltiplicatori. L'esperimento ha misurato il flusso e lo spettro dei muoni atmosferici [82] e dei ν_μ [83] in un grande intervallo di energie. L'ambizioso progetto NEMO, il naturale successore di ANTARES, è attualmente in un avanzato stato di sviluppo.

Negli anni le iniziative in fisica cosmoparticellare si sono succedute numerose, ad es., oltre agli esperimenti già citati, gli esperimenti CALET, sulla stazione spaziale internazionale, e CREAM mediante lancio di palloni in Antartide. Anche il campo della fisica dei neutrini è stato ampiamen-

te esplorato, ad es. mediante gli esperimenti NOMAD e CHOOZ. Visto che NOMAD sarà trattato da Luigi di Lella durante questo congressino sulla storia della fisica a Pisa [84], sembra opportuno riportare anche notizie sull'esperimento CHOOZ.

15. L'esperimento CHOOZ

Le prime discussioni sull'esperimento avvennero quando era ancora in corso MACRO al Gran Sasso; richiesero solo qualche breve viaggio negli USA e a Parigi. Poi ci fu tutta la fase di disegno e preparazione delle apparecchiature, con frequenti viaggi per lo più a Parigi. Il montaggio e l'esecuzione dell'esperimento avvenne invece nel villaggio di Chooz, vicino a Givet, prossimo alla frontiera Franco-Belga, nella regione *Champagne-Ardennes*.

Di CHOOZ ho parlato con dovizia in "Storie di Uomini e Quarks" [85] e non voglio qui discuterne la fisica e ripetermi. È stato un importante esperimento, ben condotto e con buoni risultati molto apprezzati; i principali sono riportati nelle pubblicazioni: [86], [87], [88]. Vale forse la pena di citare una realizzazione tecnica, ad opera di Alessandro Baldini, Marco Grassi e Donato Nicolò, una vera "prima", non citata altrove: lo sviluppo di un trigger di secondo livello capace di ricostruire in maniera molto rapida l'energia e la posizione di ogni evento, il tutto basato su una *neural network* implementata in un processore parallelo¹⁴ [89].

Nel periodo dell'esperimento io sono sempre stato ospitato nel *Chateau d'Aviette*, che il Consiglio Regionale delle Ardenne e il suo presidente, senatore Jacques Sourdille, ci avevano messo a disposizione. L'origine della cosa era stata la visita al Laboratorio del Gran Sasso fatta da tutti i membri del Consiglio in pulman dalla Francia. Li portammo in visita a MACRO e offrimmo loro un buon rinfresco. Si erano poi messi in testa di cenare nell'albergo sul Gran Sasso, quello dove era stato prigioniero Mussolini. Il segretario del senatore aveva visto sulla carta che l'albergo era vicinissimo al laboratorio; e lo era, ma in linea d'aria... Per raggiungerlo, con loro sgomento, dovemmo fare almeno una trentina di chilometri su una pessima strada di montagna; per tutto il viaggio la moglie del senatore, una materna e simpatica signora, non fece altro che chiedermi informazioni sulle famiglie nobili italiane! Figurarsi! Arrivammo a tarda sera, ma la cena fu molto piacevole. Alla fine, eravamo tutti ormai leggermente brilli, il senatore si alzò e da vecchio volpone politico si rivolse ai membri del Consiglio dicendo: "... ora voi non mi negherete l'uso del castello d'Aviette per questi nostri ospiti...". Detto fatto vennero iniziati

¹⁴ Il CNAPS/VME della Adaptiv Solutions.



Figura 29. Chateau d'Aviette.

i lavori di restauro e trasformazione e dopo circa sei mesi il castello col suo bellissimo parco ci fu messo a disposizione. L'edificio, donato al Consiglio Regionale, era ridotto in pessimo stato e inizialmente non sapevano bene cosa farne. Per noi fu una pacchia! Non avevamo l'uso del torrione dove si era installata la famiglia del guardiano la cui moglie si occupava delle pulizie. Noi facevamo cucina; avevamo colleghi francesi esperti in cucina francese e vini, gli italiani se la cavavano bene ed erano particolarmente richiesti per gli spaghetti e il caffè; c'erano poi i russi che bevevano come spugne, ma di tanto in tanto facevano anche dei buoni *borsch*. Tutti diffidavano degli americani in cucina; gli si lasciò fare solo dei *cheese cakes*. Nel castello erano presenti circa dieci persone per volta, secondo le necessità dell'esperimento. L'edificio (figura 29) era in collina, immerso in un grande parco secolare e degradante verso la Mosa.

C'erano querce e faggi, ma anche molti alberi da frutta, un po' inselvatichiti, ma ancora produttivi, mele in particolare. Davanti all'ingresso del castello si apriva una grande terrazza panoramica, dove, meteo permettendo, digerivamo e prendevamo il caffè (figura 30). Il tempo era spesso brumoso e spesso piovoso. Tuttavia ricordo che, al termine di una buona cena, i nostri colleghi francesi decisero di traversare la Mosa a nuoto, andata e ritorno; per la verità non erano tipi particolarmente atletici e noi li guardavamo un po' inorriditi e sorpresi per questa "follia" ah questi "Galli!". Si buttarono, attraversarono, ritornarono... e tutto si svolse bene, a



Figura 30. Una buona parte della collaborazione CHOOZ davanti all'ingresso del castello.



Figura 31. Il forte di Charlemont dominante Givet.

parte il fatto che furono morsi non è ben chiaro da che, forse da pesci. La zona collinare del castello era coperta da fitti boschi, ricchissimi di frutti durante i mesi estivi; ma c'erano dappertutto dei gran cartelli che diffidavano dal mangiarli perché diffusori di una pericolosa malattia provocante cisti negli organi interni, potenzialmente mortali!...

Parlando più in generale della regione limitrofa, la trovo bella, ma non ridente e piuttosto scura. Givet è contornata da grandi cave di ardesia, non so quanto ormai importanti, ma scure certamente. Tutta la zona di frontiera, anche in passato, era fortificata; a Givet c'è il grandioso *Fort de Charlemont* (figura 31), costruito circa nel 1550 da Carlo V per difendere i paesi bassi spagnoli dai francesi.

Zona di frontiera significa letteralmente che è sempre stata in guerra, con perdite territoriali da una parte e dall'altra, non solo nel 1500, ma in una infinità di guerre dai tempi antichi a quelli recenti.

Nel secolo XIX e parte del XX le Ardenne sono state importanti perché ricche di miniere di carbone e poi sede di industrie pesanti. Queste attività sono quasi scomparse e la regione si è impoverita. Pur nel relativamente breve periodo passato nella regione abbiamo visto varie attività chiudersi a Givet, comprese una biblioteca, un negozio di libri e uno di cioccolata...

Completamente diversa la situazione nelle Ardenne Belge, al di là della frontiera. Le Ardenne da quella parte sono una zona di grande turismo e di villeggiatura per i belgi, quindi una zona ricca e molto curata, in netto contrasto con la parte francese. La parte belga l'abbiamo molto frequentata; era vicina e la birra dei conventi era da sogno! Tutte le volte c'era da sottoporsi, con il nostro pulmino italiano, a delle ispezioni

doganali accurate; fra l'altro la frontiera a Givet è considerata la porta di ingresso della droga in Francia... Tutto questo terminò improvvisamente e in modo per noi incomprensibile, da un giorno all'altro; scomparsi i doganieri dalle due parti, le barre, le garitte, ecc. Ci fu poi spiegato che era entrato in funzione il trattato di Schengen!

Dimenticavo di dire che proprio all'inizio dell'esperimento, il senatore Sourdille, presidente della regione, ci portò in pullman a fare un giro per la *Champagne-Ardenne*, partendo dalla cittadina di *Charleville-Mézière*, antico feudo dei Gonzaga di Nevers, patria di Rimbaud, dove si tiene il festival della marionetta. Durante il percorso il senatore ci illustrò tutti i progetti economici della regione, le industrie attive, i lavori idraulici, gli edifici pubblici in costruzione, ecc. Io rimasi sbalordito dalle conoscenze estremamente dettagliate di Sourdille e pensai che fosse invidiabile avere un politico così padrone degli argomenti riguardanti il suo collegio elettorale. Lessi poi che Sourdille, in origine un chirurgo oculista, aveva avuto una carriera di tutto rispetto, sia durante la guerra, resistente e rifugiato in Inghilterra con de Gaulle, poi a lungo medico in Africa; successivamente iniziò una carriera politica nel partito gollista. Era decisamente qualcuno che conosceva il fatto suo e che, in particolare, vedeva come di grande interesse il contributo che noi potevamo dare al progresso della regione. Di qui tutte le facilitazioni che mise in atto per il nostro esperimento.

Per associazione di idee e sempre in tema di visite, mi viene in mente la prima visita ufficiale che facemmo al sito della centrale di CHOOZ (figura 32): c'erano i responsabili della collaborazione, parecchi colleghi italiani, francesi e americani; c'era pure il senatore Sourdille e alcuni dirigenti della centrale. Fummo portati in giro dappertutto e per visitare certe parti dovemmo cambiarci di abito e calzature ed indossare particolari tute. Questo avveniva spostandosi da uno stanzone all'altro, in zone maggiormente controllate, alle quali si poteva accedere attraverso speciali porte di sicurezza. C'era quindi una fase supposta breve, fra la svestizione e la vestizione con la tuta, nella quale si doveva rimanere in mutande e maglietta. La cosa imprevista è che il sistema di sicurezza si bloccò e dovemmo rimanere in mutande per un bel pezzo prima di poter proseguire. Era tutto molto ridicolo e leggermente imbarazzante. Anche imbarazzante il fatto che un sistema di sicurezza si bloccasse così...

Ritorno alla nostra vita quotidiana nel castello. Piacevole era il relax serale intorno al caminetto, aiutato spesso da una bottiglia di vino francese (figura 33).

L'interno dell'edificio era vietato ai fumatori; il divieto era associato all'apparizione di sigarette accese nel vano delle finestre; dietro una sigaretta appariva di solito Lev Mikaelyan, fumatore a catena di sigarette russe, puzzolenti. Nella figura 34 si può vedere Lev Mikaelyan e Carlo



Figura 32. Veduta aerea della centrale di CHOOZ. A destra, sotto la montagna c'è l'ingresso alla caverna dell'esperimento.



Figura 33. Al castello: relax serale. Nella foto, da sinistra: Rick Steinberg, Chuck Lane, Henry Sobel.

Bemporad a colloquio. Lev, uno degli anziani del gruppo russo, era un bravissimo fisico, esperto in reattori ad un livello da noi mai raggiunto. Probabilmente aveva vissuto la prima fase di costruzione dei reattori russi con Kurchatov. Il problema era che difficilmente si riusciva a parlare con lui di un tema di fisica diverso... Era simpatico però ed è stato nostro ospite a Pisa quando cercavo di ottenere dai russi un grande quantitativo di acqua pesante per MACRO.

Non rinuncio a mostrare l'interno di CHOOZ, con l'"uovo" contenente lo scintillatore al gadolinio, coperto dai fotomoltiplicatori (figura 35); a lato si vede il logo dell'esperimento, accettato fra varie proposte; ma gli italiani, maestri nel design, non potevano non vincere la gara...

All'inizio di CHOOZ commisi un'ingenuità, dovuta alla ovvia inesperienza. La centrale si era brevemente fermata per un guasto e noi avevamo bisogno di misurare i fondi dell'esperimento, cioè quello che si contava quando la centrale era spenta. Ma per fare la misura occorreavano molte ore. Telefonai quindi al controllo della centrale e parlando con uno degli ingegneri chiesi che l'interruzione fosse prolungata per alcune ore. Mi trattò a pesci in faccia! Noi potevamo usare i neutrini perché loro non sapevano che farne, ma quanto a fermare la centrale ero uno sconsiderato. Venni dopo a sapere che l'elettricità prodotta in un giorno corrispondeva a molti milioni di euro, quindi fermare la centrale per la richiesta di un fisico ospite era fuori questione; anzi: "Come mi permettevo di disturbarlo!".



Figura 34. Al castello: Lev Milaelyan, fumante, a colloquio con Carlo Bemporad.



Figura 35. La parte centrale di CHOOZ. Il simbolo dell'esperimento; lo avevamo disegnato noi pisani...

Fu una magra che ovviamente non venne ripetuta. Mi viene qui da dire che l'esperimento con i suoi successi, spesso riportati dalla stampa, nazionale e locale, deve aver contribuito a rivalutarci assai.

La zona delle Ardenne è sempre stata attraversata da guerre, da quella dei trenta anni (Rocroi è vicina a Givet), alle guerre di Luigi XIV, alla guerra franco-prussiana, alla prima ed alla seconda guerra mondiale. Tutto il territorio è pieno di cimiteri militari, qualcuno ben tenuto, altri un po' trascurati. Ne visitai due o tre e ne rimasi impressionato; io, docente universitario, sempre a contatto con i giovani, vedevo il risultato di infinite stragi di ventenni. Quando me ne capitò l'occasione convinsi i miei colleghi, ricercatori, neolaureati, laureandi a visitare con me uno dei più grandi di questi luoghi. Mi sembrò che anch'essi fossero profondamente colpiti. Quale migliore lezione a favore di una Europa unita, senza più guerre!

Girare per le Ardenne può servire a riaffermare l'appartenenza ad una comune patria europea. Ricordo che, nelle vicinanze di Dinant, la prima cittadina belga oltre frontiera, andai a visitare con i miei colleghi un piccolo museo. Il curatore ci portò un po' in giro; gli dissi che venivamo da Pisa e iniziammo a parlare di Dante e di Arrigo VII del Lussemburgo. Si entusiasmò e cominciò a recitare in italiano lunghi e pertinenti passi della Divina Commedia; confesso che restammo tutti piacevolmente sorpresi.

Dinant è una graziosa cittadina, attraversata dalla Mosa e da un certo traffico di chiatte mercantili. È la patria di Adolphe Sax, l'inventore del saxofono e il primo avamposto belga, provenendo da Givet, nel quale apprezzare delle birre superlative! Sulla strada da Givet a Dinant si costeggiava un lungo roccione sul quale aveva trovato la morte in un incidente alpinistico Alberto I del Belgio, appassionato scalatore. Durante la nostra permanenza ci lanciammo anche in esplorazioni più lunghe. Visitammo il villaggio di Redu con le sue molte decine di rivenditori di libri usati in varie lingue, per noi una interessante scoperta, qualcosa che si è poi diffusa anche altrove. Altra visita interessante fu quella a Boullion, il feudo ed il castello di Goffredo di Buglione, in una zona piuttosto bella (figura 36).



Figura 36. Il castello di Godefroid de Bouillon.

Goffredo era il nipote della Contessa Matilde di Toscana; divenne capo della prima crociata perché era un importante gentiluomo fiammingo, ma anche perché parlava molte lingue e poteva tenere a bada quel coacervo di uomini di diversa provenienza. Per finanziare la crociata decise di impegnare il suo castello, cedendolo al vescovo di Liegi. Il Vescovo se lo tenne perché Goffredo, dopo aver espugnato Gerusalemme ed essere stato nominato Protettore del Santo Sepolcro (non aveva voluto essere nominato Re), vi morì nel 1100 a quaranta anni. Quando visitai Gerusalemme ero intenzionato a trovarne la tomba, ma scoprii che era stata distrutta. Comunque: io lavoravo a CHOOZ, a due passi da Bouillon, ed ero andato a presentare i risultati dell'esperimento a Gerusalemme, in aereo... Certo Godefroid de Bouillon aveva avuto una vita più movimentata e io lo considero un uomo in qualche modo "moderno", il CEO di una delle prime multinazionali...

Bruxelles cominciammo a frequentarla quando finalmente venne attivato un collegamento aereo low-cost fra Pisa e Bruxelles-Charleroi. Poi affittavamo un'auto e proseguivamo per Givet, finendola con gli estenuanti viaggi in pulmino fra Pisa e CHOOZ; ci volevano ben due giorni, ma all'inizio dovevamo anche portare del materiale. Bruxelles è veramente una città magnifica, che ovviamente non descriverò. Nei frequenti viaggi era divenuto prassi acquistare per i parenti scatole delle famose *pralines* belghe e anche molti manufatti di "arazzo": custodie per occhiali, borse e similia.

Durante l'esperimento convinchemmo il presidente dell'INFN, Luciano Maiani, a venire a visitare CHOOZ; venne, stette quasi sempre attaccato al telefonino, ma infine partecipò alla presentazione ufficiale dell'esperimento che feci in francese davanti ai rappresentanti della regione, a quelli di *électricité de France* e degli enti scientifici INFN e IN2P3; un bell'impegno, credo apprezzato.

A CHOOZ ricevemmo altre visite di tipo più professionale. Prima quella della televisione francese che girò un documentario sull'esperimento, poi la visita di alcuni colleghi cinesi, quelli che ora stanno facendo l'esperimento di Daya Bay. A distanza di circa 20 anni dal nostro, il loro esperimento ha avuto un grande successo. Il governo cinese ha fatto un colossale investimento su Daya Bay. A CHOOZ i cinesi erano venuti per proporci di collaborare. Lavorare in Cina però non appariva come molto allettante per i miei colleghi; anche i francesi lasciarono cadere la proposta. La cosa ebbe un seguito: durante un congresso, mi sembra a Helsinki, venni contattato dal presidente dell'Accademia delle Scienze cinese, che mi propose di nuovo una collaborazione per Daya Bay e gli esperimenti di neutrino in Cina. Ma a quel punto avevamo cominciato a investire su MEG a Zurigo. A posteriori gli esperimenti cinesi sono risultati dei capolavori, da premio Nobel. Certo, il merito va ai cinesi; gli italiani avrebbero potuto partecipare, ma in un ruolo probabilmente di minor rilievo. Daya Bay ha e avrà una parte importante nella "storia della fisica". Il fatto che si fossero dati da fare per contattarci lo apprezzammo; era la prova che avevamo conquistato una certa notorietà e stima da parte dei colleghi, con un esperimento ben condotto e di costo ben più modesto.

16. Gli esperimenti "Galileiani" a Pisa

Vorrei ora ritornare agli esperimenti riguardante il campo gravitazionale, che ho precedentemente chiamato di tipo "galileiano", nei quali Pisa si è trovata coinvolta. Il Progetto VIRGO è già stato ampiamente trattato.

L'esperimento GAL [90], iniziato nel 1992, ha indagato la validità dell'universalità di g studiando la caduta dei gravi con un apparato facente uso di moderni metodi ottici. Si è cercato di mettere in evidenza una eventuale dipendenza di g dalla composizione del grave in caduta. Il risultato: l'universalità di g non appare violata.

Un nuovo progetto è ora in fase di studio per la misura dell'effetto Lense-Thirring mediante l'esperimento di laboratorio GINGER [91], [92]. Si tratta di un sistema di giroscopi laser di grande area col quale si vogliono mettere in evidenza le modifiche previste dalla relatività generale per il campo gravitazionale di un corpo in rotazione rispetto al campo dello stesso corpo non ruotante. Misure su prototipi sono già da tempo in corso.

17. Conclusioni

Quando si esamina un lungo periodo storico, come si è tentato di fare in questo scritto, riveste un certo significato il riconoscere come si sia modificato nel tempo il peso dei vari tipi di sperimentazione fisica.

Durante i primi anni cinquanta gli esperimenti erano essenzialmente dedicati allo studio dei raggi cosmici; solo qualche misura di fisica nucleare ha fatto uso di acceleratori elettrostatici.

Dopo l'entrata in funzione del sincrotrone nazionale a Frascati nel 1959 ci fu una concentrazione di esperimenti intorno a quella macchina, l'inizio in Italia della fisica con acceleratori; contemporaneamente iniziarono gli esperimenti di camere a bolle con esposizioni anche presso acceleratori americani. Molti degli esperimenti negli anni seguenti furono eseguiti ad energie crescenti presso il CERN, presso acceleratori europei in Francia, Germania, Inghilterra, Russia e presso macchine americane.

Uno spostamento verso tematiche di fisica non richiedenti l'uso di acceleratori avvenne a Pisa con la proposta VIRGO e con l'avvio dell'esperimento MACRO presso il Laboratorio del Gran Sasso. Il periodo successivo ha visto una continuità nella realizzazione di importanti progetti presso il CERN e presso FERMILAB, ma anche l'esecuzione di esperimenti per un rinnovato studio della radiazione cosmica, di misure presso reattori nucleari, di esperimenti spaziali.

L'evoluzione verificatasi a Pisa ha portato ad un crescente impegno in esperimenti "non ad acceleratori", che riguardano ora un 40% dei fisici della sezione, mentre un 60% dei fisici sono tuttora impegnati in misure ad acceleratori.

Non sono ovviamente in grado di predire il futuro a lungo termine..., né sono in grado di predire quale sarà il ruolo dello studio delle "interazioni fondamentali", dizione forse oggi più appropriata che non la fisica delle particelle elementari, rispetto ad altri campi di fisica quali la "struttura della materia", la "fisica medica", ecc. L'evoluzione della fisica è determinata dalle nuove scoperte, dalle possibilità legate ai progressi tecnici, da nuovi interessi, dalla evoluzione della stessa società. Quindi anche se "Il futuro ha un cuore antico", citando Carlo Levi [93], non ci resta che attivamente operare ed ogni tanto cercare di avere una visione più ampia di quanto ci circonda.

Ringraziamenti

Marco Grassi, giovanissimo al tempo di MACRO, ha condiviso con me ed altri alcune delle avventure descritte in questo scritto. Gli sono grato per aver presentato, in qualità di Direttore della Sez. INFN di Pisa, alcune parti del presente materiale durante il Congressino "Fisici e Fisica a Pisa nel Novecento".

Bibliografia

- [1] C. Luperini, P. Rossi, *La Fisica pisana dal 1861 al 1982*, Annali di Storia delle Università italiane, Volume 14, 2010.
- [2] C. Rubbia, Marcello Conversi, *Commemorazione tenuta nella seduta del 21 Aprile 1990*, Rend. Suppl. Acc. Lincei.
- [3] M. Conversi, E. Pancini, O. Piccioni, *On the Disintegration of Negative Mesons*, Phys.Rev.71, 209, 1947.
- [4] M. Conversi, *The period which preceeded and led to the 1946 discovery of the leptonic nature of the "mesotron": Some personal recollections*, Proceedings of the International Symposium on the History of Particle Physics, FERMILAB May 28-31, 1980.
- [5] G. Bernardini *et al.*, *Researches On the Magnetic Deflection of the Hard Component of Cosmic Rays*, Phys.Rev.68, 109, 1945.
- [6] M. Conversi *et al.*, *Sul rapporto tra i numeri di neutroni e di protoni e su alcune proprietà della componente nucleonica a 3500 m s.l.d.m.*, Nuovo Cimento. X 898, 1953.
- [7] M. Conversi *et al.*, *Dispositivo atto a selezionare nella radiazione cosmica eventuali particelle di massa intorno a 550 m_e*, Nuovo Cimento XII 130, 1959.
- [8] M. Conversi *et al.*, *Ricerca sulla esistenza di particelle di massa intorno a 550 m_e nella radiazione cosmica*, Nuovo Cimento XII 148, 1959.
- [9] M. Conversi, *The "Hodoscope Chamber": a New Instrument for Nuclear Research*, Nuovo Cimento II, 189 1955.
- [10] M. Conversi *et al.*, *A New Type of Hodoscope of High Spacial Resolution*, Suppl. Nuovo Cimento IV 234, 1956.
- [11] C. Bemporad *et al.*, *Investigation and Improvement of "Flash Tube Hodoscope" Properties*, International Conference on Instrumentation, INFN/TC-73/3 234, 1973.
- [12] E. Amaldi *et al.*, *Report on the Expedition to the Central Mediterranean for the Study of Cosmic Radiation*, CERN/16, 1952.
- [13] C. Franzinetti, G.Morpurgo, *An introduction to the physics of the new particles*, Suppl. Nuovo Cimento 6, 469, 1957.
- [14] Ch. Peyrou, *The Role of Cosmic Rays in the Development of Particle Physics*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00222361>, 1982.
- [15] L. Bonolis, *I signori dei raggi cosmici. Dai laboratori terrestri alla fisica nello spazio*, La Fisica della Scuola XLIV, 4 Supplemento, 2011.
- [16] L. Bertanza, G.Martelli, A.Zacutti, *Some Measurements on Overheated Liquids*, Nuovo Cimento XI, 250, 1954.

- [17] L.Bertanza, G.Martelli, A.Zacutti, *Operation Conditions of a Bubble Chamber*, Nuovo Cimento X, 487, 1955.
- [18] A. Bigi, V.Flaminio, *Activities and publications of the Pisa "Bubble Chamber Group" (1953-1988)*, unpublished, 2004.
- [19] F. Eisler *et al.*, *Demonstration of Parity Nonconservation in Hyperon Decay*, Phys. Rev. 108, 1353, 1957.
- [20] F. Eisler *et al.*, *Experimental Determination of the Λ^0 and Σ^- Spins*, Nuovo Cimento X, 222, 1958.
- [21] F. Eisler *et al.*, *Lifetime of Λ^0 , Θ^0 and Σ^-* , Nuovo Cimento X, 150, 1958.
- [22] L. Bertanza *et al.*, *A Rapid Cycling Bubble Chamber*, Nuclear Instruments 9, 403, 1960.
- [23] L. Bertanza *et al.*, *A Bubble Chamber Experiment to Measure the Polarization of the Recoil Proton in the Photoproduction of π^0 Mesons from Hydrogen*, Nuovo Cimento XIX, 853, 1961.
- [24] A. Bettini *et al.*, *Annihilation Into Pions of the antiproton-neutron System from Antiprotons at Rest in Deuterium*, Nuovo Cimento X, 642, 1967.
- [25] L. Bertanza *et al.*, *Study of the Reactions $K_L^0 p \rightarrow \Lambda^0 \pi^+ \pi^0$ and $\Sigma^0 \pi^+$ in the c.m. Energy Range 1490-1700 MeV*, Nucl. Phys. B110, 1, 1976.
- [26] D. Allasia *et al.*, *Measurement of the ratios of antineutrino-n to antineutrino-p charged current cross sections at high energies*, Phys. Lett. 107B, 148, 1981.
- [27] L. Bertanza *et al.*, *Measurement of the neutral current coupling constants in neutrino and antineutrino interactions with deuterium*, Phys. Lett. 133B, 129, 1983.
- [28] C. Angelini *et al.*, *New experimental limits on $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations*, Phys.Lett. 179B, 307, 1986.
- [29] P.L. Braccini *et al.*, *Annihilation in Flight of 800 MeV Positrons*, Nuovo Cimento XXIX, 1215, 1963.
- [30] G. Morpurgo, *Theory of the Coulomb Photoproduction of π^0 at High Energy on the Determination of the π^0 Lifetime*, Nuovo Cimento XXXI, 569, 1964.
- [31] G. Bellettini *et al.*, *Primakoff Effect and π^0 Lifetime*, Nuovo Cimento XL, 1139, 1965.
- [32] G. Bellettini *et al.*, *A Precision Detector for High-Energy Neutral Pions*, Nuovo Cimento XLIV A, 946, 1966.
- [33] G. Bellettini *et al.*, *Single- π^0 Photoproduction from Hydrogen Around the "Second Resonance"*, Nuovo Cimento XLIV A, 239, 1966.
- [34] I. Mannelli *et al.*, *$\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ Charge-Exchange Scattering at High Energy*, Phys. Rev.L. 14, 408, 1965.

- [35] P. Bonamy *et al.*, $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ polarization at 5.9 and 11.2 GeV/c, Phys.Lett. 23, 501, 1966.
- [36] P. Bonamy *et al.*, Measurement of the polarization parameter in the reaction $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ and $\pi^- + p \rightarrow \eta + n$ at 5.9 and 11.2 GeV/c, Nucl.Phys. B16, 335, 1970.
- [37] W.D. Apel *et al.*, Results on the production cross-sections $\pi^- + p \rightarrow$ neutrals and $\pi^- + p \rightarrow \chi^0 + n$ at 3.8, 6, 8 and 12 GeV/c, Phys. Lett. 46B, 459, 1973.
- [38] Serpukhov-CERN Collaboration, Observation of a Spin 4 Neutral Meson with 2-GeV Mass Decaying in $\pi^0 \pi^0$, Phys.Lett. 57B, 398, 1975.
- [39] W.D. Apel *et al.*, Study of the reaction $\pi^- + p \rightarrow \omega + n$ at 3, 8, 6 and 8 GeV/c, Phys. Lett. 55B, 111, 1975.
- [40] M. Balla *et al.*, A measurement of pion electroproduction cross-section near threshold, Lett. Nuovo Cimento 1, 247, 1969.
- [41] D.R. Botterill *et al.*, The total cross-section for π^+ electroproduction on hydrogen near threshold, Phys.Lett. 45 B, 405, 1973.
- [42] A. Del Guerra *et al.*, The pion form-factor at a timelike momentum transfer of approximately 1/fermi-squared from π^+ electroproduction at threshold, Phys.Lett. 50 B, 487, 1974.
- [43] C. Bemporad *et al.*, Experimental Determination of the eta lifetime by the Measurement of the Primakoff Effect, Phys.Lett. 25B, 380, 1967.
- [44] C. Bacci *et al.*, Preliminary Result of Frascati (ADONE) on the Nature of the New 3.1-GeV Particle Produced in $e^+ e^-$ Annihilation, Phys.Rev. Lett. B33, 1408, 1974.
- [45] G. Barbiellini *et al.*, Search for J/Psi Like Resonance Below 3-GeV in $e^+ e^-$ Annihilation, Phys.Lett. 64B, 359, 1976.
- [46] M. Borghini *et al.*, Measurement of the polarization parameter in $\pi^+ + p$ elastic scattering at 10, 14 and 17.5 GeV/c and for $t > 2$ GeV/c-squared, Phys.Lett.36B., 493, 1971.
- [47] S. Amendolia *et al.*, Measurement of the total proton proton cross-section at the ISR, Phys.Lett.44B., 119, 1973.
- [48] The MACRO Coll., A Large Area Detector Dedicated to Monopole Search, Astrophysics, and Cosmic Ray Physics at the Gran Sasso Laboratory, Servizio Documentazione dei LNF, 1984.
- [49] The MACRO Collaboration, Final results of magnetic monopole searches with the MACRO experiment, Eur.Phys.J. C25, 511, 2002.
- [50] The MACRO Collaboration, Search for stellar gravitational collapses with the MACRO detector, Eur.Phys.J. C37, 265, 2004.
- [51] Pisa MACRO Group, PHRASE, MACRO Internal note 17/89, August 1989.

- [52] A. Baldini *et al.*, *The use of the reaction ${}^9\text{Be}(\alpha, \gamma n){}^{12}\text{C}$ to determine the energy scale and the efficiency at low energies of stellar collapse neutrino detectors*, Nuclear Instruments A305, 475, 1991.
- [53] Fabrizio Cei, *Search for Neutrinos from Stellar Gravitational Collapse with the MACRO Experiment at Gran Sasso*, Tesi di perfezionamento, Scuola Normale Superiore, 1996.
- [54] The MACRO Collaboration, *Measurements of the atmospheric muon neutrino oscillations, global analysis of the data collected with the MACRO detector*, Eur.Phys.J. C36, 323, 2004.
- [55] The MACRO Collaboration, *High energy cosmic ray physics with underground muons in MACRO I and II*, Phys.Rev. D56, 1407 and 1418, 1997.
- [56] The MACRO Collaboration, *Search for cosmic ray sources using muons detected by the MACRO experiment*, Astropar.Phys. 18, 615, 2003.
- [57] The MACRO Collaboration, *Seasonal variations in the underground muon intensity as seen by MACRO*, Astropar.Phys. 7, 109, 1997.
- [58] The MACRO Collaboration, *Limits on dark matter WIMPs using upward-going muons in the MACRO detector*, Phys. Rev. D60, 082002, 1999.
- [59] The MACRO Collaboration, *Observation of the shadowing of cosmic rays by the moon using a deep underground detector*, Phys. Rev. D59, 012003, 1999.
- [60] A. Giazotto, *Interferometric detection of gravitational waves*, Physics Reports 182, 365, 1989.
- [61] R. Del Fabbro *et al.*, *Three-dimensional seismic super-attenuator for low frequency gravitational wave detection*, Physics Letters A124, 253, 1987.
- [62] B.P. Abbott *et al.*, *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. 116, 061102, 2016.
- [63] W.B. Atwood *et al.*, *The Large Area Telescope on the FERMI Gamma-Ray Space Telescope Mission*, Astrophysical Journal 697, 1071, 2009.
- [64] F. Acero *et al.*, *FERMI Third Source Catalog*, Astrophysical Journal Suppl. 218, 23, 2015.
- [65] M. Ackermann *et al.*, *The first FERMI Large Area Telescope Gamma-Ray Burst Catalog*, Astrophysical Journal Suppl. 209, 11, 2013.
- [66] A.A. Abdo *et al.*, *The second FERMI Large Area Telescope Catalog of gamma-ray pulsars*, Astrophysical Journal Suppl. 208, 17, 2013.
- [67] M. Ackermann *et al.*, *The spectrum and morphology of the FERMI Bubbles*, Astrophysical Journal 793, 64, 2014.
- [68] P. Soffitta *et al.*, *Astronomical X-ray polarimetry based on photoelectric effect with microgap detectors*, Nuclear Instruments A469, 164, 2001.

- [69] M.C. Weisskopf *et al.*, *The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE)*, Proceedings of SPIE 9905, 990517-1, 2016.
- [70] D. Aleksandreas *et al.*, *The CLUE experiment operating with 4 telescopes in La Palma*, Nuclear Instruments A409, 488, 1998.
- [71] J. Aleksic *et al.*, *The major upgrade of the MAGIC telescopes*, Astroparticle Physics 72, 61, 2016.
- [72] J. Albert *et al.*, *Observations of MKN 421 with the MAGIC Telescope*, Astrophysics J. 663, 125, 2007.
- [73] J. Aleksic *et al.*, *Measurement of the Crab Nebula spectrum over three decades in energy with the MAGIC telescopes*, Journal of High Energy Astrophysics 5-6, 30, 2005.
- [74] E. Iacopini, E. Zavattini, *Experimental method to detect the vacuum birefringence induced by a magnetic field*, Phys. Letters B 85, 151, 1979.
- [75] F. Della Valle *et al.*, *The PVLAS experiment: measuring vacuum magnetic birefringence and dichroism with a birefringent Fabry-Perot*, Eur.Phys.J. C 76:2, 2016.
- [76] R.P. Mignani *et al.*, *Evidence for vacuum birefringence from the first optical polarimetry measurement of the isolated neutron star RXJ1856.5-3754*, Mon. Notices Royal Astron. Soc. 465, 492, 2017.
- [77] The ATLAS Coll., *Evidence for light-by-light scattering in heavy-ion collisions with the ATLAS detector at the LHC*, Nature Physics 13, 852, 2017.
- [78] M. Aguilar *et al.*, *Precision Measurement of the $e^+ + e^-$ Flux in Primary Cosmic Rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*, Phys. Rev. Letters 113, 30221102, 2014.
- [79] M. Aguilar *et al.*, *Precision Measurement of the Proton Flux in Primary Cosmic Rays from Rigidity 1 GV to 1.8 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*, Phys. Rev. Letters 114, 171103, 2015.
- [80] M. Aguilar *et al.*, *Precision Measurement of the Helium Flux in Primary Cosmic Rays of Rigidities 1.9 GV to 3 TV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*, Phys. Rev. Letters 115, 211101, 2015.
- [81] J.A. Aguilar *et al.*, *ANTARES: the first undersea neutrino telescope*, Nuclear Instruments A656, 11, 2011.
- [82] J.A. Aguilar *et al.*, *Measurement of the atmospheric muon flux with a 4 GeV threshold in the ANTARES neutrino telescope*, Astroparticle Physics 33, 86, 2010.
- [83] S. Adrian-Martinez *et al.*, *Measurement of the atmospheric ν_μ energy spectrum from 100 GeV to 200 TeV with the ANTARES telescope*, Astroparticle Physics 35, 634, 2012.

- [84] L. Di Lella, in *Congressino "Fisici e Fisici a Pisa nel Novecento"*, novembre 2017.
- [85] C. Bemporad, L. Bonolis (a cura di), *Storie di Uomini e Quarks*, Ed. Società Italiana di Fisica, 2012.
- [86] M. Apollonio *et al.*, *Search for neutrino oscillations on a long baseline at the CHOOZ nuclear power station*, European Physics Journal C27, 331, 2003.
- [87] M. Apollonio *et al.*, *Determination of neutrino incoming direction in the CHOOZ experiment and supernova explosion location by scintillator detectors*, Physical Review D61, 012001, 2000.
- [88] D. Nicolò, *Search for neutrino oscillations in a long baseline experiment at the CHOOZ nuclear reactors*, Tesi di Perfezionamento, Scuola Normale Superiore, 1999.
- [89] A. Baldini *et al.*, *The neural-network-based second-level trigger developed for the Chooz experiment*, Nuclear Instruments A389, 141, 1997.
- [90] S. Carusotto *et al.*, *g-universality test with a Galileo's type experiment*, Nuovo Cimento 111B, 1259, (1996).
- [91] A. Di Virgilio *et al.*, *A Laser gyroscope system to detect the Gravitomagnetic effect on Earth*, International Journal of Modern Physics D19, 2331, 2010.
- [92] N. Beverini *et al.*, *Measuring general relativity effects in a terrestrial lab by means of laser gyroscopes*, Laser Physics 24, 074005, 2014.
- [93] C. Levi, *Il futuro ha un cuore antico*, Edizioni Einaudi, 1956.

Experimental Particle Physics at Pisa from the Frascati Electron Synchrotron to the Fermilab Collider

Giorgio Bellettini*

Around 1960, when the 1 GeV Frascati Electron-synchrotron, the first Italian particle accelerator, started operating, the Pisa Physics Department hosted just a handful of smart graduate students looking around. Among their teachers were Giorgio Salvini, Marcello Conversi, Carlo Franzinetti, Luigi Radicati. With time, the community has grown enormously. Now it includes world-famous scientists, and has produced results which will stay forever in the physics books.

Carlo Franzinetti, a young experimental physics professor who had been called to Pisa in those years, urged everybody to be ambitious, to do new and interesting experiments. With me he was very clear.

I had collaborated with him for a few months in early 1957 in the nuclear emulsion group of Edoardo Amaldi, to analyze antiproton interactions in emulsions exposed to the bevatron beam. Carlo moved to the Pisa chair soon that year, but we got to know each other well enough in the meantime. I guess that he liked my enthusiastic and aggressive style of doing physics. This must be why in 1959, when an assistant professorship position became available at the Physics Institute, he called me and proposed to leave the INFN staff position in Rome and take that university position in Pisa. However, the condition was to start some experiment with counters and electronics, at the newly born 1 GeV Frascati electro synchrotron.

I made it clear to him that I had no experience at all in electronics. Not only this was not being acquired in my on-going experiment, but my Laurea courses in Pisa had not included electronic detectors, and my Laurea work had been on magnetic quadrupole resonances of molecules, nothing to do with electronics. Carlo was very clear: «I do not care, learn it!». It was the take or leave condition.

I accepted, and started reading books and asking around. In particular, I exploited the help of Luigi Di Lella, a friend of the Scuola Normale years, who was at CERN working with counters and fast electronics. I

¹ Dipartimento di Fisica e INFN Pisa.

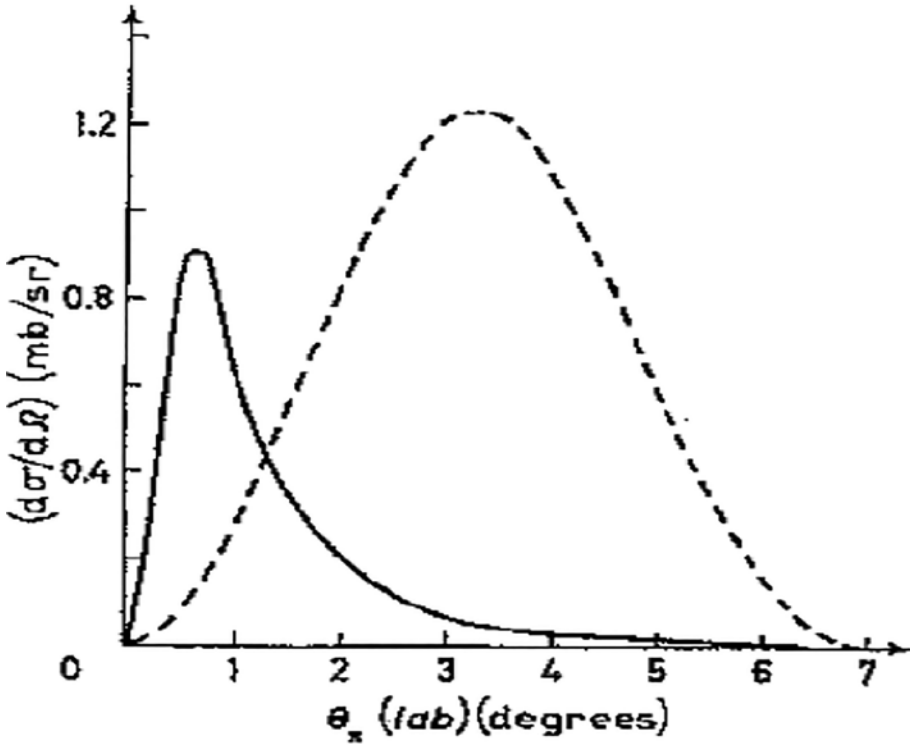


Figure 1. Angular dependence of the forward π^0 photoproduction cross section in the Frascati experiment. The Primakoff peak at $\theta \approx \mu^2/2E^2$ (μ = neutral pion mass) dominates at $\theta = 1^\circ$.

still remember his private lectures on transmission cables and on shapers and discriminators, and on fast coincidence circuits. His help and his hand written notes were very important for me to design my first experiment.

1. The π^0 lifetime experiment

When in Pisa, I had to find an experiment which would make Carlo Franzinetti happy enough. In conversations with him, a very interesting phenomenon was mentioned that had been recently predicted by Henry Primakoff and still needed an experimental confirmation. One could measure the $\gamma\gamma\pi^0$ coupling, and with it the π^0 lifetime, by measuring the forward π^0 photoproduction on nuclei. Close to $\theta = 0$, due to the coupling of the incident photon with a quasi-real target photon of the nucleus field, electroproduction dominates over coherent nuclear production. These cross sections are shown in figure 1.

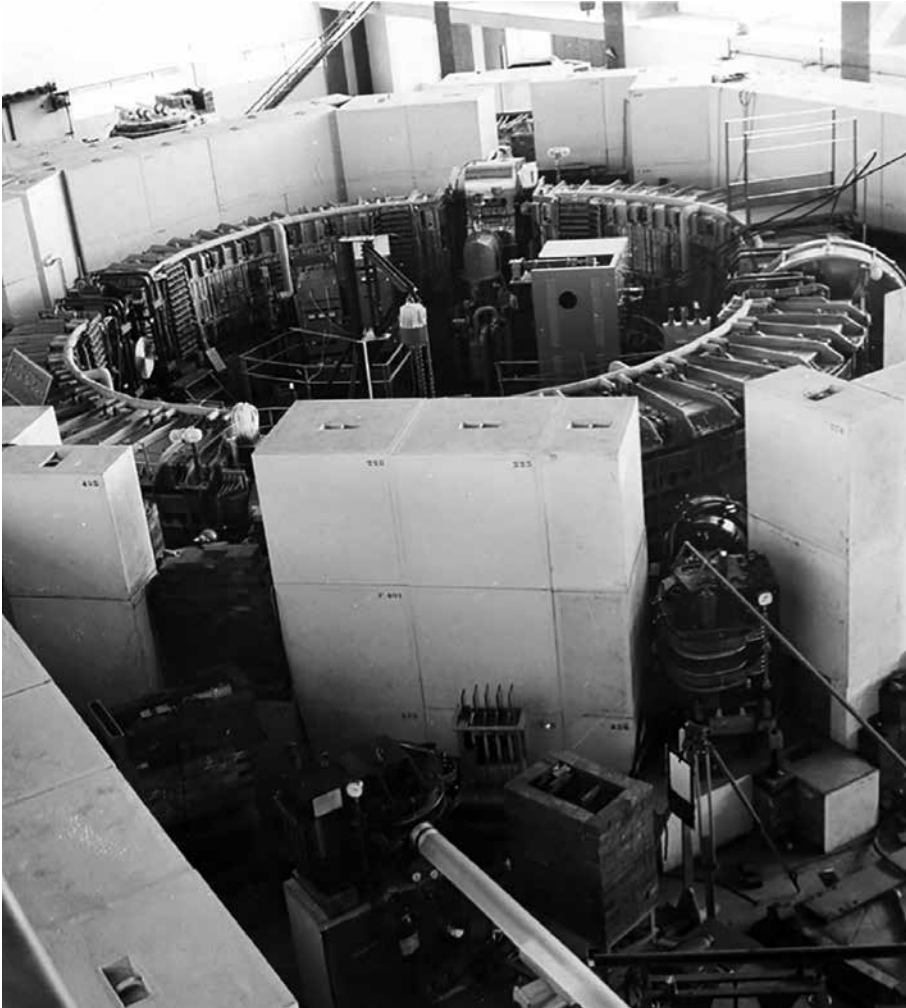


Figure 2. The Frascati electron synchrotron. The top energy of the bremsstrahlung beam was 1000 GeV.

At the Frascati synchrotron (figure 2) we used a bremsstrahlung beam with $E_{\gamma, \text{max}} \approx 1 \text{ GeV}$. The detector was designed by our small group, Pierluigi Braccini, Carlo Bemporad, Lorenzo Foà and myself under the supervision of Edmond “Ted” Bellamy. Ted was a UK professor who had been invited by Carlo Franzinetti to spend a six months sabbatical in Pisa. He was experienced in experimenting with photon beams at the electro synchrotron of Glasgow. Ted performed with us a simple measurement of π^0 photoproduction [1], and next with a generous friendly attitude helped us to design a nice π^0 detector with appropriate coverage and



Figure 3. The Pisa photoproduction group in front of the Frascati synchrotron building. From left to right: Pier Luigi Braccini, Alberto Bechini, Carlo Betti, Antonio Mariotti, Lorenzo Foà, Carlo Bemporad, Giorgio Bellettini, Italo Federico Quescia (lab. Director), Eddy Gradl (Machine Operation Director) (courtesy of Carlo Bemporad).

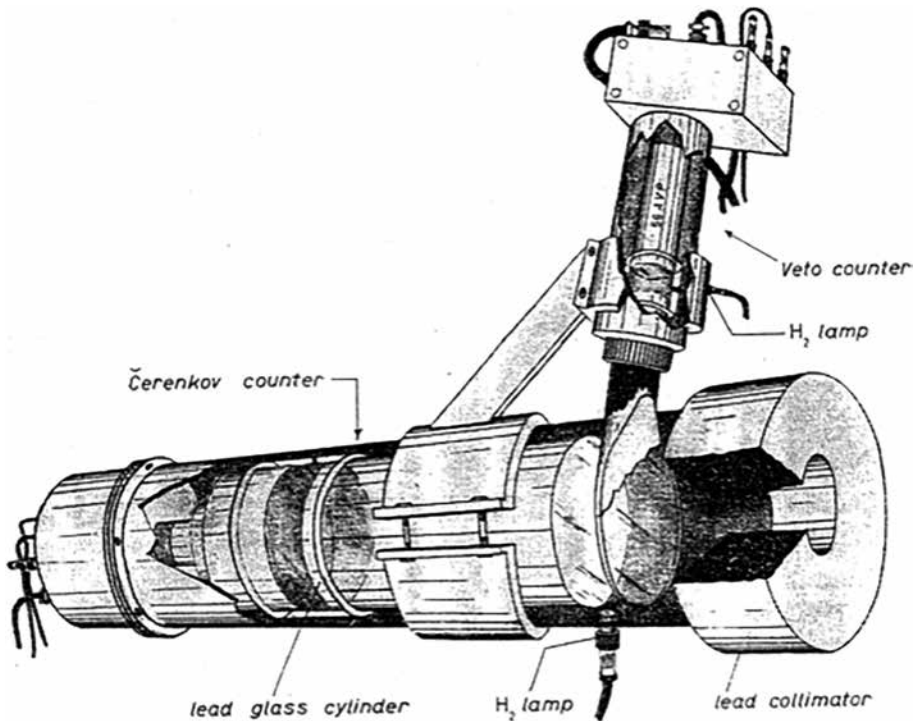


Figure 4. The photon detector of the Primakoff Effect experiment.

good enough photon energy resolution to be able to put the Primakoff effect in evidence.

The experimental group is shown in the picture of figure 3, which shows also our smart and dedicated technicians, Alberto Bechini, Antonio Mariotti and Carlo Betti.

We built 8 elegant lead glass detectors (figure 4), which were to point to the source target in a daisy-like array as shown in figure 5. The symmetrical support of the 10 counting channels of the experiment is shown in figure 6. For the trigger of that experiment we used solid state electronics designed by Carlo Bemporad, that he introduced at Frascati (figure 7).

The simple layout of the experiment is shown in figure 8. The pulse heights of counter pairs were displayed in correlation plots where events from π^0 decay were separated from background as seen in figure 9.

It turned out that the counter pair arrangement was well tuned to scan in a few runs the narrow angular region of interest around the forward direction. Figure 10 shows the cross section measured by some couple of pairs, where an excess of rate below $\theta \leq 1^\circ$ is observed, as expected from the Primakoff effect.

By fitting the cross-section in term of a nuclear and of a Primakoff component the π^0 lifetime was derived, finding $\tau = (0,74 \pm 0,105)10^{-16}$ sec [2]. By reading the particle data book in 2003 I noticed that our result had not been used in working out the best lifetime value from the weighted average of all previous experiments. I enquired with the Editor, and I was told that very old experiments were not used in the average because of the difficulty of determining their systematic errors.

This can be questioned but is understandable. As a consolation, on comparing our result $\tau = (0,74 \pm 0,105) \cdot 10^{-16}$ s. with the PDG number $\tau = (0,84 \pm 0,06) \cdot 10^{-16}$ s. I am pleased to note their excellent consistency.

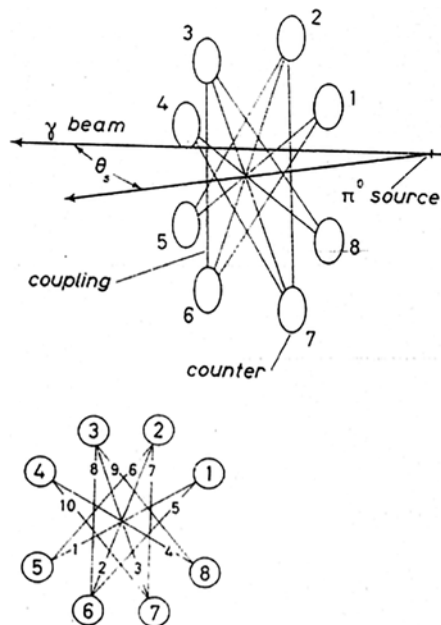


Figure 5. The 10 counting channels of the Primakoff experiment. The forward region of interest was covered at once by recording center and off-center coincidences.

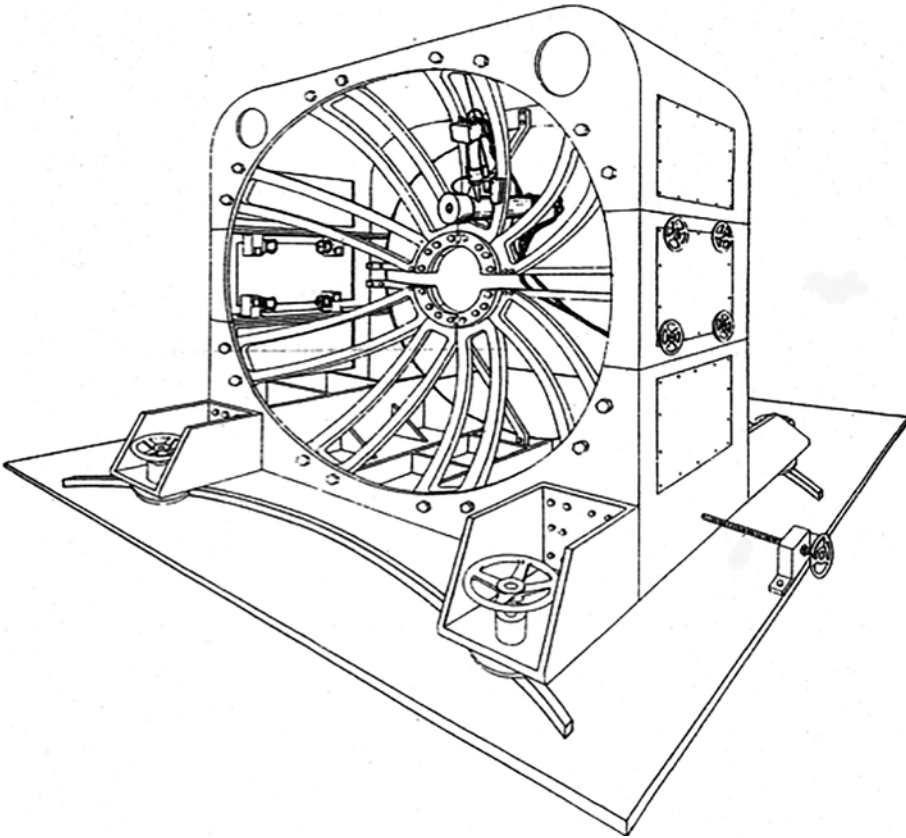


Figure 6. The support frame arranging the counters around the beam line.

2. The η lifetime experiment

While we were analyzing the π^0 data at Frascati, it was discovered that the $\gamma\gamma$ width of the η meson was large, of the order of 40%. This made it possible to measure its lifetime by exploiting the Primakoff effect, very much as for the π^0 . The measurement would be made at higher incident photon energies, around 5 GeV, where the kinematics still allowed a fair separation from nuclear production. I presented a proposal to move the Frascati detector to the Cambridge electron accelerator, but the proposal was not approved. I presented again the same proposal at DESY in Hamburg, and we were approved. The new experiment took a couple of years to build and I moved to CERN in the meanwhile. The experiment was performed at DESY in 1966 by Carlo Bemporad, Pier Luigi Braccini and Lorenzo Foà, in collaboration with the German colleagues Klaus Lubelsmeyer and David Schmitz. The Frascati detector was rearranged as



Figure 7. Members of the photoproduction group in front of the experiment electronics. From left to right: Lorenzo Foà, Pierluigi Braccini, Claudio Cerri, Antonio Mariotti, Carlo Betti (courtesy of Carlo Bemporad).

Volume 18, number 3

PHYSICS LETTERS

1 September 1965

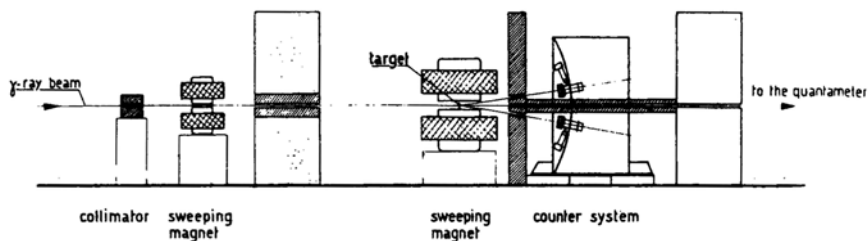


Figure 8. Layout of the Frascati photoproduction experiment.

shown in figure 11 (courtesy of Carlo Bemporad). The η events could be clearly separated from background (figure 12) and the Primakoff peak stood up very clear in the data (figure 13). The result $\Gamma_{\gamma\gamma} = (1,21 \pm 0,26)$ KeV was published in 1967 [3]. That result is about 3 standard deviations above the PDG value of the total η with, $\Gamma_{\eta} = (1,18 \pm 0,11)$ KeV. This mismatch was due to a systematic error induced by using a nuclear production model which later turned out to be inaccurate.

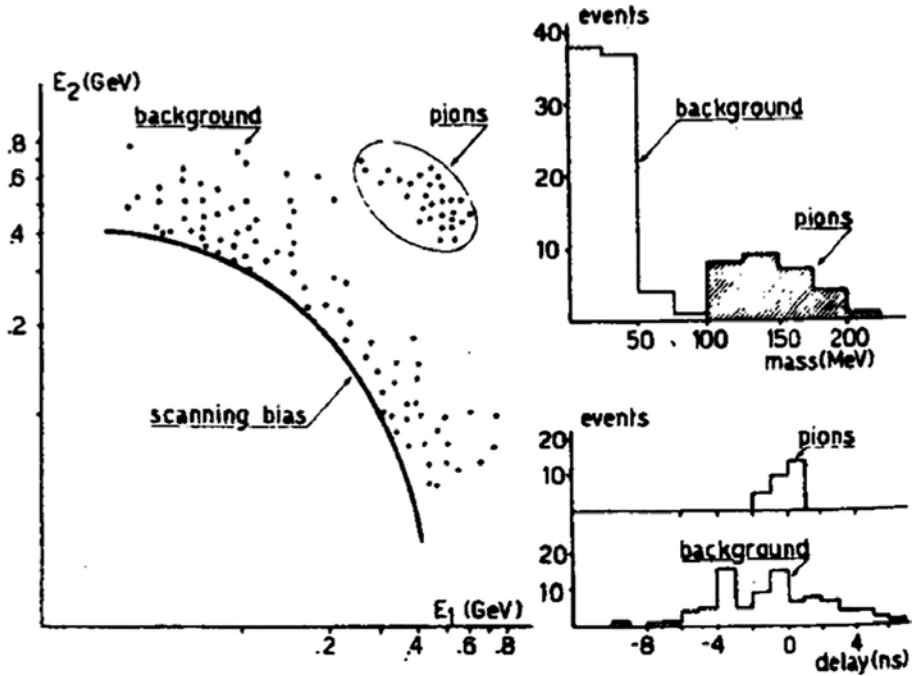


Figure 9. Correlated pulse heights of coincident photon pairs, by which the π^0 events were signaled.

3. Polarized proton scattering

I spent two years at CERN performing elastic hadron scattering with different beams and targets in Giuseppe Cocconi's group. When I came back to Pisa in 1967, I proposed to my former colleagues of the Frascati photoproduction group, Pier Luigi Braccini and Lorenzo Foà, to start an experiment at CERN in collaborations with the group headed by Luis Dick, for a set of measurements of elastic scattering of hadrons on polarized target. We would abandon photoduction experiments performed as an independent group, and move to hadron physics experiments as hosts of a larger group in a foreign (as we felt at that time) laboratory. The detectors and the electronics owned by the group would not be usable any more, and a different physics had to be learned. That was a big decision for us.

In a letter to Lorenzo Foà (courtesy of Pier Luigi Braccini), after describing the complexities of an experiment of elastic scattering on polarized protons in a solid target, I wrote (in Italian) «The experiment is difficult, there are problems to be solved. But I am convinced that if somebody on earth can do it, we are the ones». This shows an amazing confidence on our skills.

Another significant statement found in that letter is on CERN as a host laboratory: «CERN can employ more young physicists than then we can have... Personal career? Each one of you has more prospects at CERN than at Frascati.».

Carlo Franzinetti and Gherardo Stoppini fully agreed and supported the move. The Frascati endeavor was terminated, a new group (Pierluigi Braccini, Giorgio Bellettini, Lorenzo Foà, Tarcisio Del Prete, Paolo Laurelli, Giulio Sanguinetti, Marisa Valdata) was formed and moved to polarized elastic scattering at the CERN PS. In that collaboration we went through some tension but eventually we managed to work well. At that time, some CERN scientists felt like big bosses. On the other hand, we were accustomed to independent and to build our own detectors and electronics. To be able to provide a significant hardware contribution to the experiment, we proposed to build at Pisa the fast electronics of the experiment. Luis Dick did not trust that we could reach the same reliability of the commercial NIM electronics. Our electronics, shapers, discriminators, coincidence units, was a twin copy of the commercial one. It costed much less to us because it was assembled for free by our technicians. The CERN group had enough money to purchase the electronics on the market, but it was not easy for them to refuse such an in-kind contribution. We agreed that our electronics would be checked by the CERN Electronics shop, to provide the same timing and pulse height resolution as the commercial one and the same long-term stability against temperature fluctuations and mechanical shocks as the commercial one. After extensive tests, our units passed perfectly all tests. In a group meeting, Luis Dick accepted that our electronics would be used. We proudly installed it in one day.

However, on the following morning I walked through the counting room and discovered that all our equipment had been removed and that the commercial NIM electronics was back on the racks. I was furious, rushed to the Division Director and declared that we would leave the

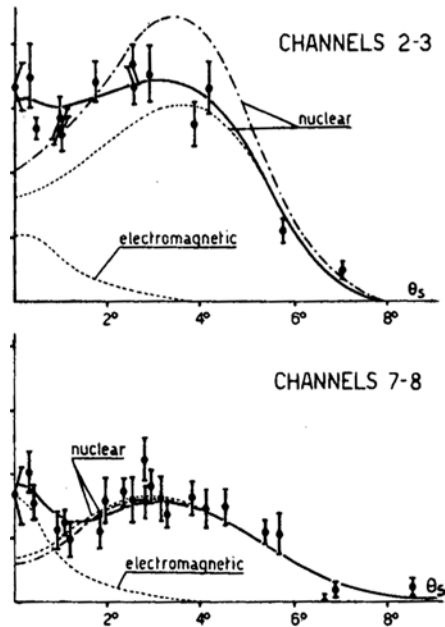


Figure 10. Angular cross sections measured by two counter pairs.

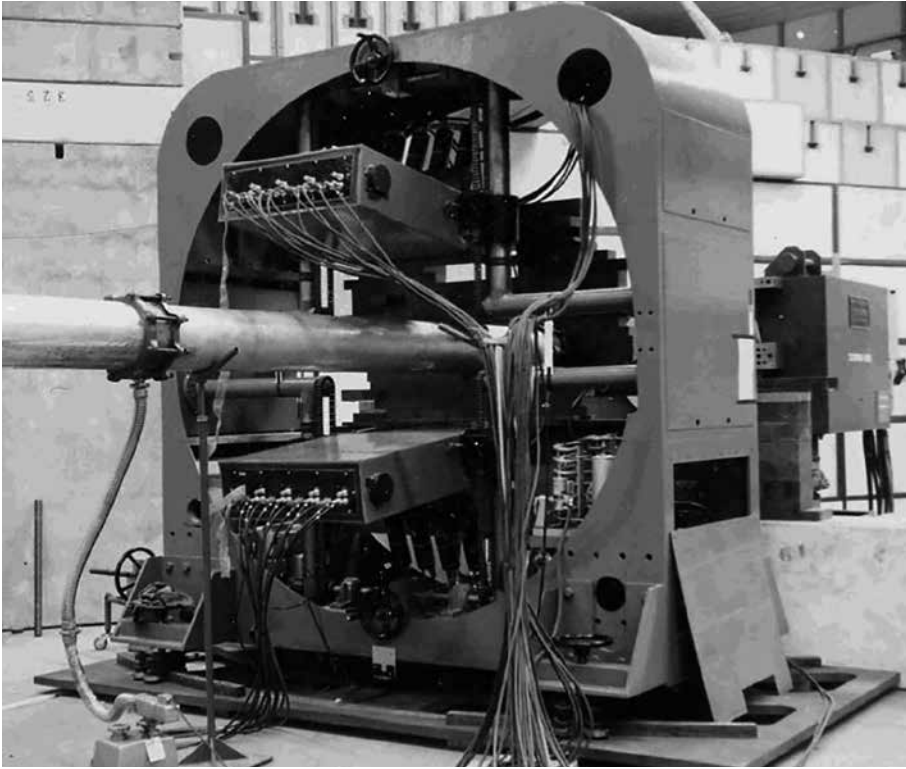


Figure 11. The photon pair detector at DESY.

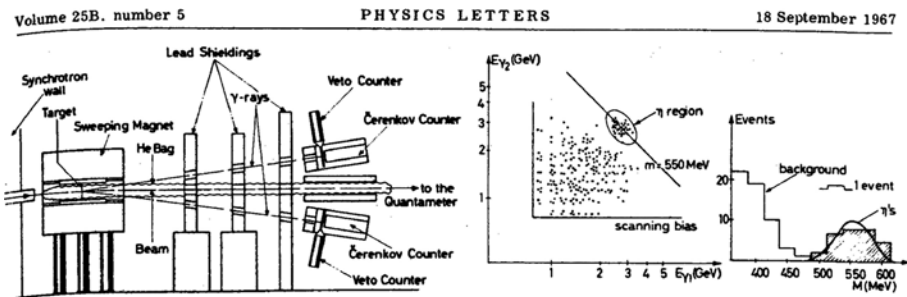


Figure 12. Layout (left) and signal observation (right) in the $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ experiment at NINA.

Collaboration if our electronics would not be placed back. Eventually, this was accepted and the crisis was overcome and forgotten. Among the technicians who made that excellent job Marcello Givoletti, who later started the very successful CAEN company, had the leading organizing and operation role.

A publication reporting some results of that period is in Ref 4.

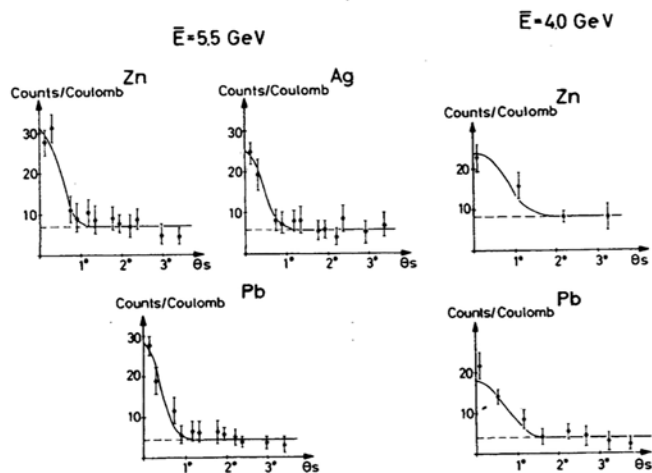


Figure 13. The forward Primakov peaks in the $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ angular distribution at NINA.



Figure 14. Members of the NINA electroproduction experiment in the counting room. From left to right, Adalberto Giazotto and Piero Salvadori standing, Alberto Del Guerra and Marcello Giorgi sitting.

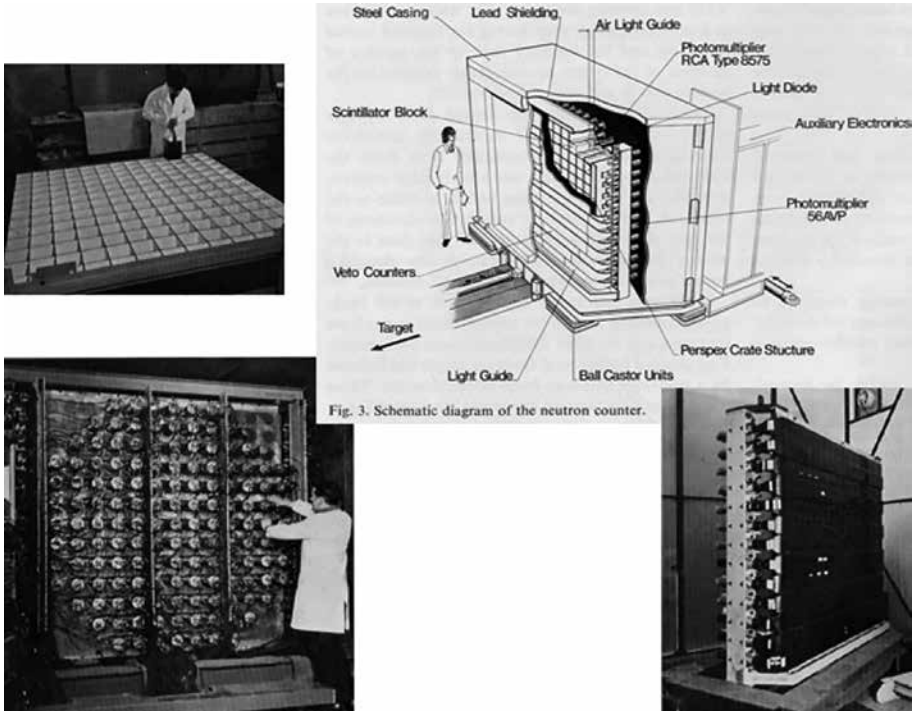


Figure 15. The neutron detector built by the Pisa group for the NINA pion photoproduction experiment in 1967.



Figure 16. A TNE meeting at Protvino. Seen close from the the back are Franco Sergianpietri, Claudio Cerri, Rino Castaldi (INFN observer) and Vincenzo Flaminio.

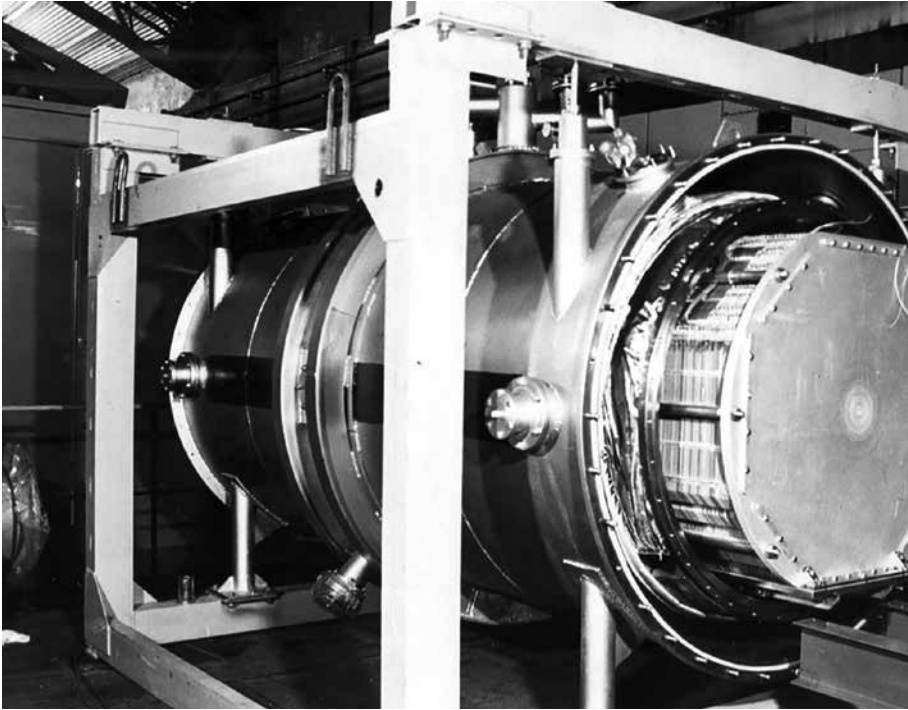


Figure 17. The TNE liquid argon calorimeter built by Claudio Cerri and Franco Ser-gianpietri.



Figure 18. The 3.0 GeV e^+e^- ADONE collider.

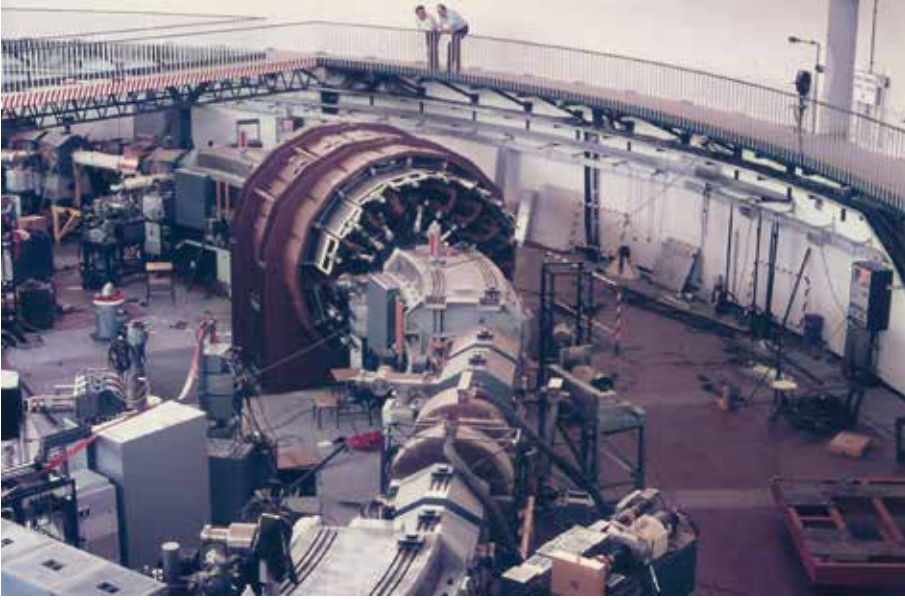


Figure 19. The Barion-Antibaron experiment on the Adone ring.

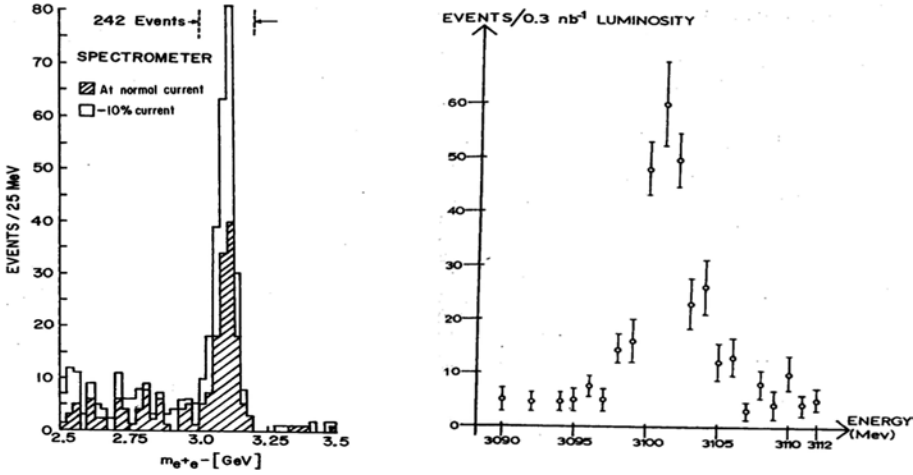


Figure 20. The Frascati J/ψ observation in 1974 (right, as seen by the $\gamma\gamma$ detector), compared to the BNL J discovery peak (left).

4. Pion form factor experiment in the UK

In those years several other initiatives were taking place. A group was organized at the NINA electron-synchrotron of Daresbury in the UK by Gherardo Stoppini for a pion electroproduction experiment, $e^-p \rightarrow e^-\pi^+n$ for measuring

the pion form factor. Members of that group Adalberto Giazotto, Alberto Del Guerra, Marcello Giorgi, together with the group technician Piero Salvadori, are shown in figure 14. Arnaldo Stefanini, not seen in the picture, was another group member. The neutron detector, pictured in figure 15, was the important piece of hardware contributed by Pisa. Neutrons were detected by scattering in thick plastic scintillator bars at the end of the spectrometer. This detector can be considered as the precursor of many high-quality hadron detectors, primarily calorimeters, built later by Pisa experimentalists.

A publication signed by the Pisa Scientists, A. Del Guerra, A. Giazotto, M. Giorgi and A. Stefanini, reporting a measurement performed by the experiment, is in Ref. 5.

5. The Russia campaign

The aggressive temper of the young particle experimentalists at that time in Pisa is also shown by the adventure in Russia boldly tackled by Ennio Bertolucci, Italo Mannelli, Giuseppe Pierazzini, Angelo Scribano, Franco Sergianpietri, Lucio Vincelli, to propose an experiment at the new 70 GeV proto-synchrotron which started operating in 1970 at the laboratory of Protvino near Serpukhov. That accelerator had the record high energy at the time, and that was enough for the “Pisans” to decide to go there to search for some new massive particle. The hard work and living conditions of the place did not discourage them, rather acted as a real challenge. Once again, all hardware for the NICE experiment, a search of new neutral resonances in the reaction $\pi^- p \rightarrow X^0 n$, was built in-house and moved to Protvino. I visited that group a couple of times, and enjoyed and admired the friendly atmosphere created by the Italians merging with the local people. This experiment will be described in the report by Angelo Scribano.

After the completion of the X^0 experiment, two Pisa physicists, Claudio Cerri and Franco Sergianpietri, extended their stay beyond 1967 and were

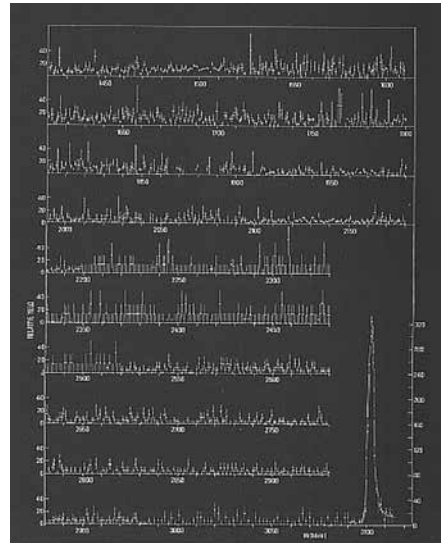


Figure 21. The search for narrow resonances down to 2 GeV below the J/ψ made at Adone after the discovery of the new particle.

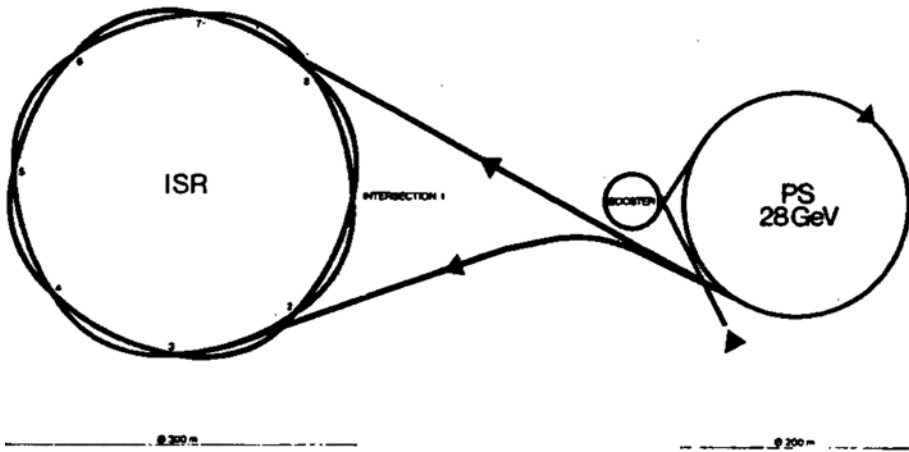


Figure 22. Scheme of the ISR with the PS injector.



Figure 23. Picture of one of the ISR interaction region, with the two beams crossing at an angle of 15° .

joined by Vincenzo Flaminio to collaborate in the TNE (Tagged Neutrino Experiment), for which they built in 1978 a state-of-the art liquid argon calorimeter. Figure 16 shows the Italians during a meeting of the TNE group, and figure 17 is a picture of the calorimeter. That instrument initiated a long and extremely successful profession of Franco in developing cold heavy liquid calorimeters, that still are producing great physics today (year 2018).

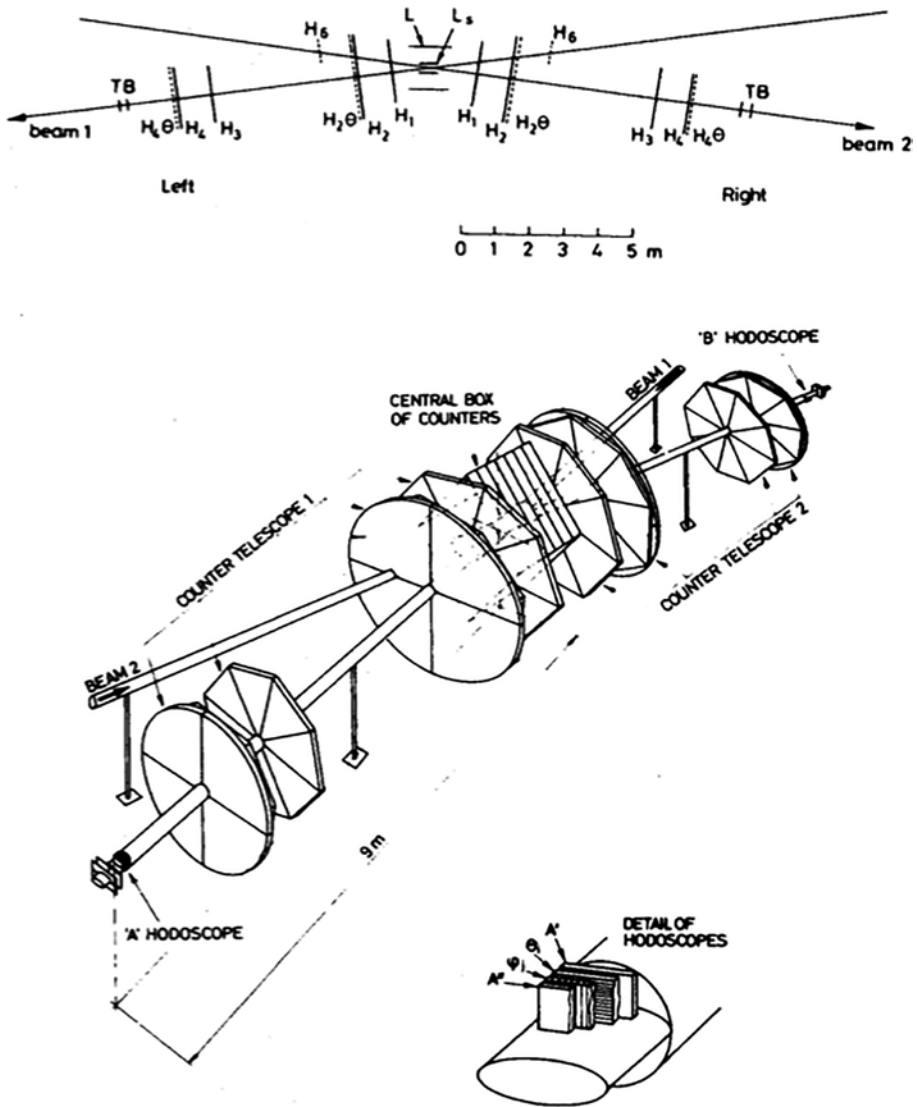


Figure 24. Schematic layout of R801, the Pisa-Stony Brook experiment at the ISR.

6. The november revolution

In the night of November 11, 1974, in the dorm of the Frascati laboratory I was waked by a call from the USA. It was Sau Lan Wu, my collaborator in the R209 experiment at the ISR and distinguished member of the Sam Ting group performing an experiment at Brookhaven on electron pair production at masses in the GeV range.

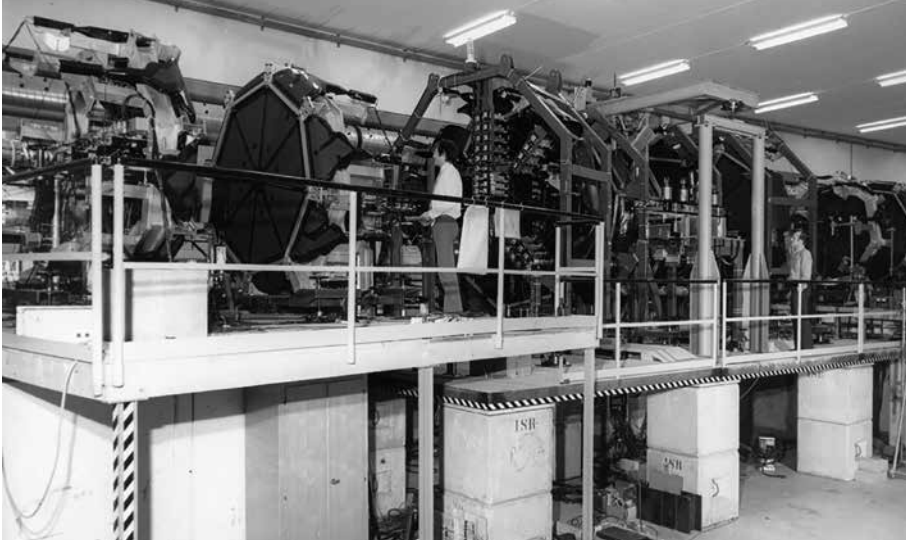


Figure 25. Picture of R801 on the ISR intersection (1973).

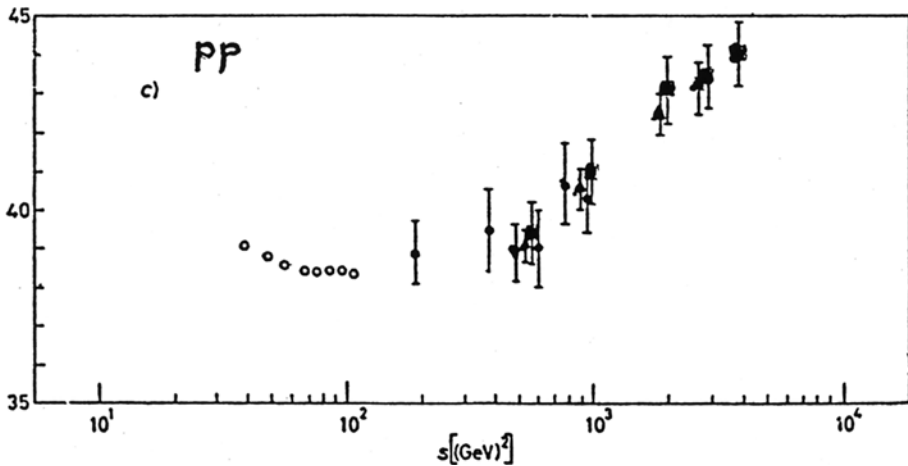


Figure 26. Results of repeated total pp cross section measurements of R801, as a function of cms energy.

«We have discovered a new particle decaying into e^+e^- !» «What is so special about it?» «It is very heavy and very narrow.» «How heavy?» «About 3.1 GeV. It is seen also at SPEAR by Mark 1». The question was quickly raised whether we could see it also at Frascati.

We had an e^+e^- collider, Adone, running since several years at Frascati, whose nominal top energy was 3.0 GeV. Most of the time we were running it at 2.8 GeV, slightly below the nominal energy, to avoid stress-

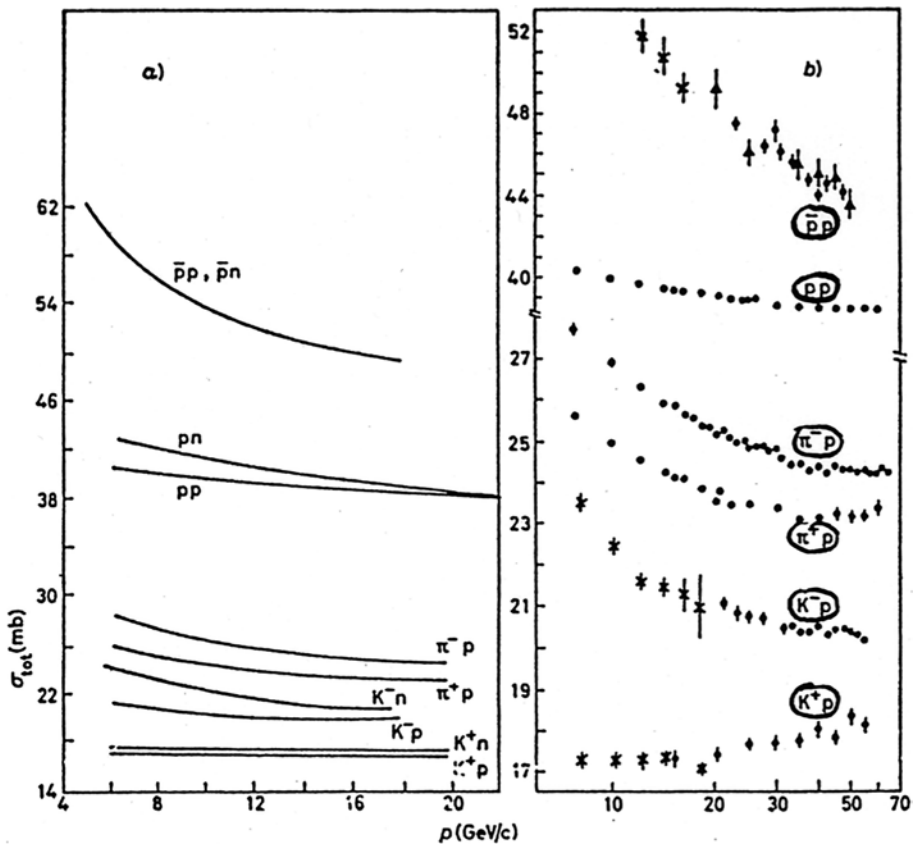


Figure 27. Compilation of hadron total cross section data as known in 1973, as functions of beam momentum against fixed targets. Left, model fits. Right, available data.

ing the collider magnets. One of the experiments around the ring, the so-called barion-antibarion experiment, was run by a collaboration of Frascati, Istituto Superiore di Sanità, Naples with the Pisa group of Carlo Bemporad, Mario Calvetti, Flavio Costantini, Paolo Lariccia. A picture of Adone is shown in figure 18. The Barion-Antibarion detector was a cylindrical tracker in a magnetic solenoid aligned along the ring, shown in figure 19.

The following week was a hectic time at Frascati. I urged the Adone group to try to increase the machine energy to reach 3.1 GeV. That was quickly done and in two days the resonance was found. The experiments took data for a couple of more days, and the groups wrote and handed to me a joint paper reporting their observations. I spent hours on the phone with the US reading the paper to Sau Lan who kindly edited it locally and submitted it promptly to PRL. The paper appeared in print seven days

MEASUREMENT OF THE TOTAL PROTON-PROTON CROSS-SECTION AT THE ISR[☆]

S.R. AMENDOLIA, G. BELLETTINI*, P.L. BRACCINI, C. BRADASCHIA,
R. CASTALDI**, V. CAVASINNI, C. CERRI*, T. Del PRETE,
L. FOA*, P. GIROMINI, P. LAURELLI, A. MENZIONE,
L. RISTORI, G. SANGUINETTI, M. VALDATA,

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa

Istituto di Fisica dell'Università, Pisa

Scuola Normale Superiore, Pisa, Italy

G. FINOCCHIARO, P. GRANNIS*, D. GREEN, R. MUSTARD and R. THUN
State University of New York, Stony Brook, New York, USA

Received 23 February 1973

Figure 28. The first Pisa-Stony Brook total cross section paper (ref. 7).

after we knew of the discovery, on September 18th, on the same PRL issue and third in line with the BNL and the SLAC discovery papers.

The only other existing electron-positron collider with enough energy to see the J was Doris, a 4.5 GeV collider at DESY. DORIS was a recently built machine and could see the new particle only one week after Frascati.

The resonance peak, as measured by the $\gamma\gamma$ detector and reported in the Adone publication [6], although not as strong as the J discovery peak, stands up very clearly above the background (figure 20).

After October 1974 a search for narrow resonances with 10 MeV steps below the J/ψ was made at Adone in a few months with null result (figure 21). On the bottom right the new particle is shown for comparison.

7. Proton-proton interactions at the ISR

Around 1970 the hadron collider era began with the start of operation of the ISR, a proton-proton collider with two rings hosting opposite rotating beams which intersected with each other at an angle of 15°. There were 8 intersections around which experiments could be arranged. A scheme of the storage rings with the PS collider is shown in figure 22. A picture of an intersection region is shown in figure 23. The beams were injected in bunches at half the desired collision energy, which could reach 62 GeV. They were debunched to get continuous proton currents and stored for hours to allow measurements to be performed.

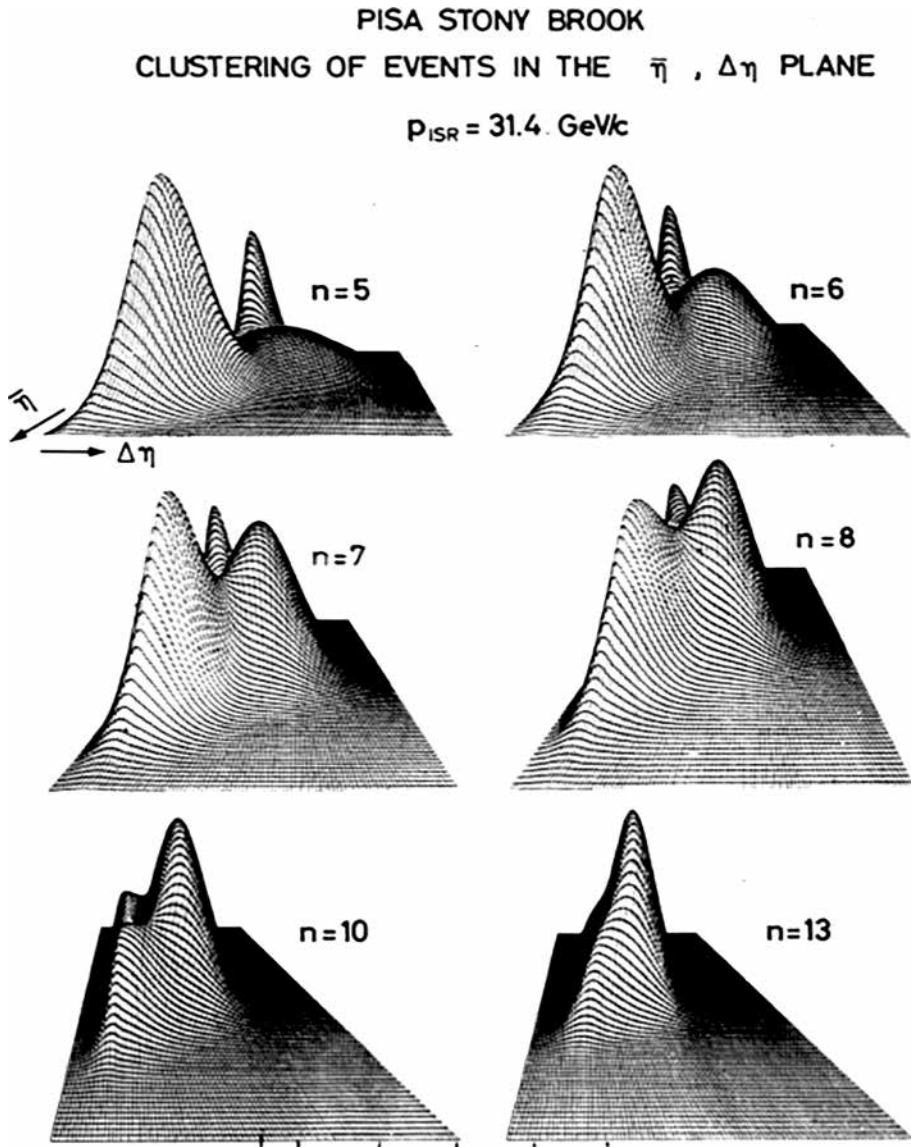


Figure 29. Evidence for proton diffraction in low multiplicity forward events in R801. Tracks group at small angles in a two-dimensional azimuth-pseudorapidity plot.

The first experiment approved at the ISR was R801, which was proposed by a Pisa group in collaboration with a group of the University of Stony Brook in New York. The main purpose was to measure the total proton-proton cross section. That was not an easy job because it could not be done as in fixed target experiments by measuring the absorption

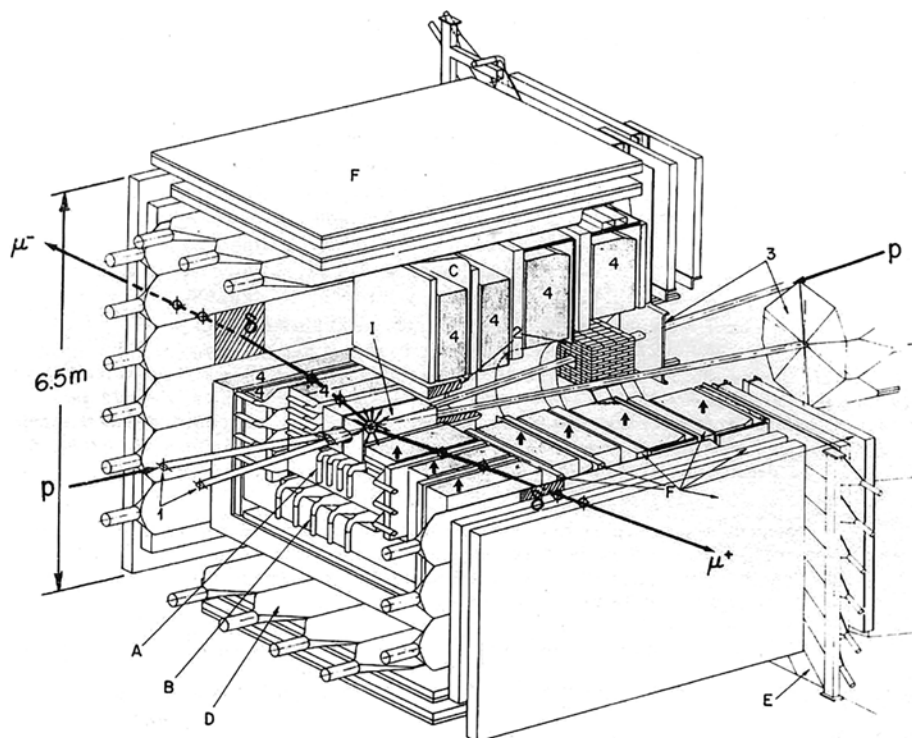


Figure 30. The muon spectrometer of R209.

through a stationary target. Some new method had to be invented. We chose to measure the total interaction rate and the machine luminosity, and take the ratio. The total cross section was derived according to its own definition.

This method is ideal and simple in principle, but is difficult in practice. A nearly-full coverage detector was built with layers of plastic scintillator counters split in azimuthal and polar angular bins, as shown in figure 24. A picture of the detector installed in area 8 is shown in figure 25. The design aimed to preserve the natural shape of the events, with forward spectrometers recalling the geometry of the counter arrangement of the Primakoff effect experiment at Frascati.

That was the first 4π detector at a hadron collider. Its construction and operation required a cyclopean effort by the Pisa group. The remarkable hardware skill of many of our physicists, to be later confirmed in many important construction projects, was demonstrated during that effort. The Stony Brook group did not have a key role in the design and construction of the detector, but his smart physicists were important in running the experiment and analyzing the data. Their group leader, Gui-

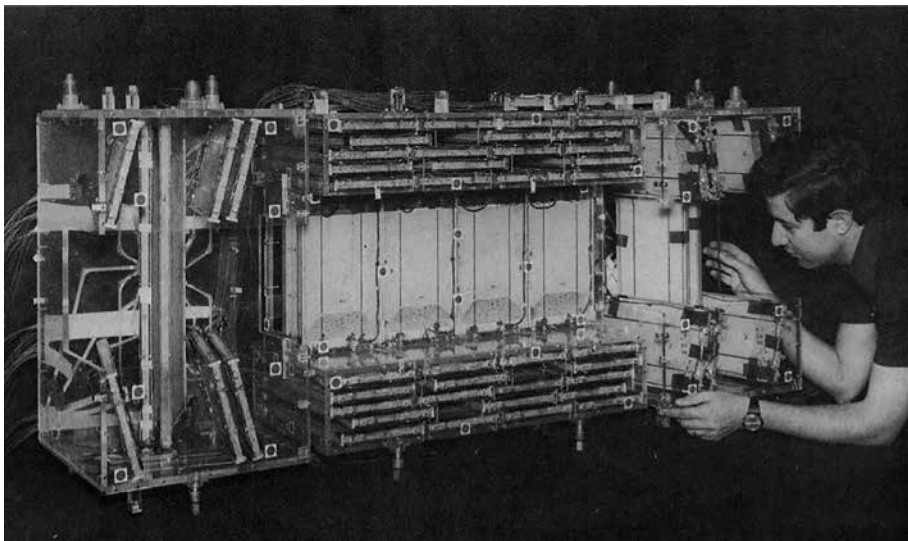


Figure 31. Picture of half of the R209 vertex detector, showing the large-angle and forward-angle telescopes of planar drift chambers.

do Finocchiaro, was extremely skilled in fast electronics and was instrumental in setting our electronics in stable data-taking conditions.

Since the detector coverage could not be extended within the beam pipe, the total interaction rate had to be obtained by extrapolating the rate of contained very forward elastic and inelastic events to compute the rate of lost events within the beam pipes, which turned out to be a few percent. Similarly, the loss of events at large angles was estimated by extrapolation and found to be negligible. The collider luminosity was a separate problem, and was measured either by measuring the vertical distributions of beam protons at the intersection, by means of the beam interactions with the residual gas in the vacuum pipes, or by sweeping the beams one across the other vertically (the “Van Der Meer method”). The cross section could be measured at several energies between 22 and 63 GeV c.m.s. energy with errors of about 2%, and a clear increase with energy was observed (ref. 7). Since this came to a great surprise, the measurements were repeated several times in different running conditions as reported in figure 26.

The reason for the surprise was that at that time, model fits (figure 27, left) of the available hadronic total cross section data (figure 27, right) brought to believe that with increasing energy all hadronic cross sections would reach energy independent values, in the energy region of “asymptotia”. The unexpected behavior observed at the ISR was acknowledged as a real discovery. Unfortunately, over even today this growth

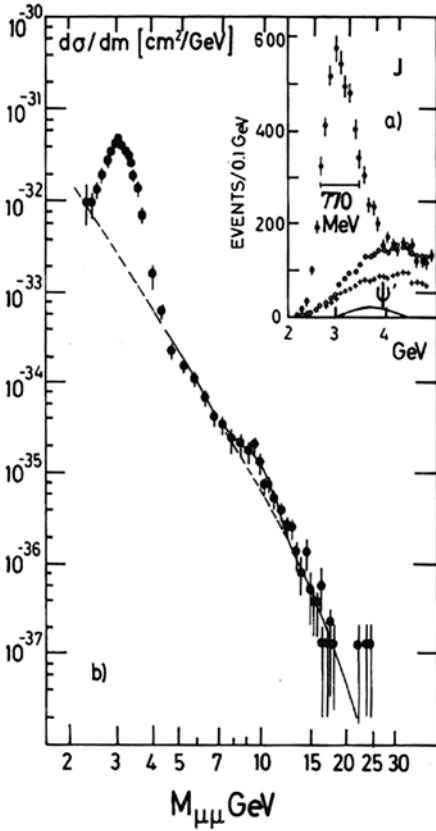


Figure 32. The $\mu\mu$ pair mass spectrum measured by R209, showing a large J/ψ production. At about 9 GeV, an unresolved structure indicates the presence of the Υ family.

has not yet been interpreted in terms of fundamental principles or of dynamical properties of strong interactions. It proves that the range of strong interactions increases with energy, by amounts that can be quantified phenomenologically with optical models.

The authors of the discovery paper, 15 Pisa and 5 Stony Brook authors, Ref. 7, are acknowledged in figure 28. The same result was obtained at the same time by a Rome CERN group, who measured the forward elastic scattering cross section extrapolated to zero angle, removed the contribution by the squared real part and applied the optical theorem and express the squared imaginary part in terms of the total cross section [8].

The wide coverage of the Pisa-Stony Brook with a detector split in θ, φ bins allowed the Collaboration to measure many interesting correlations among prongs of inelastic collisions. A particularly appealing picture

of small angle diffraction was found (figure 29). Downstream both beams the track at the smallest angle (likely to be the scattered primary) was removed. In events of small multiplicity, in a two-dimensional plot of track azimuth versus pseudorapidity, the remaining tracks grouped in bumps at a small angle. Those bumps, clearly remnants of fragmented primaries, were named “le puppe” within the Collaboration [9].

After R801, the Pisa group had two more experiments approved at the ISR. The first one was R209, in collaboration with a strong MIT group within a CERN-Harvard-Frascati-MIT-Naples-Pisa Collaboration, to measure large mass muon pair production. The second one was R210+R211, a total proton-antiproton cross section measurement performed later with a modified Pisa-Stony Brook detector.

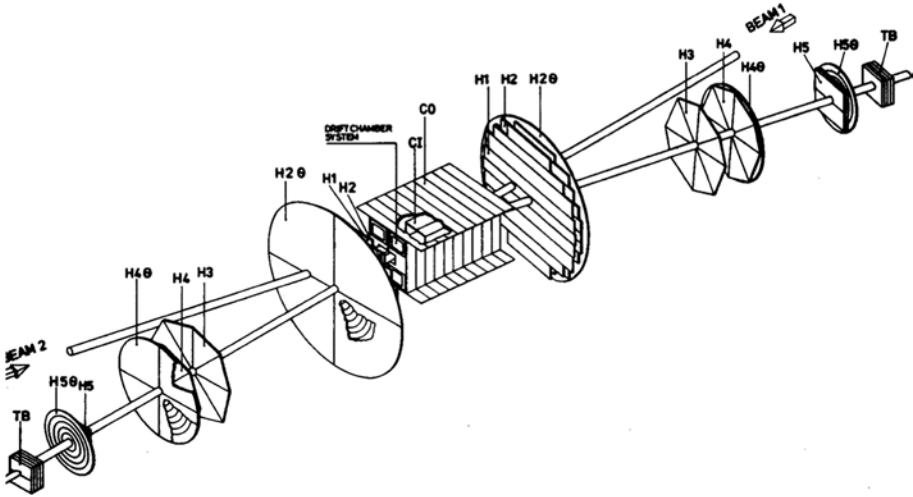


Figure 33. Layout of the CERN-Naples-Pisa-Stony Brook collaboration for the total antiproton-proton cross section measurement (1983).

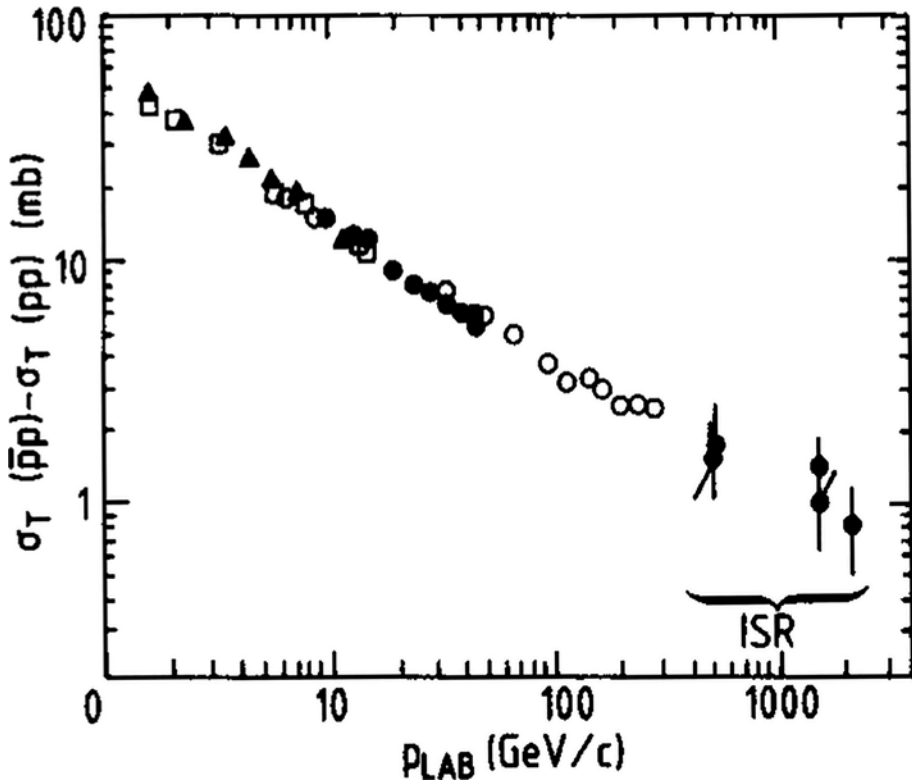


Figure 34. Difference $\sigma_T(\bar{p}p) - \sigma_T(pp)$ at ISR energies, plotted versus the equivalent beam energy in a fixed target experiment.



Figure 35. Picture of the NA1 spectrometer in the CERN North area (1983).

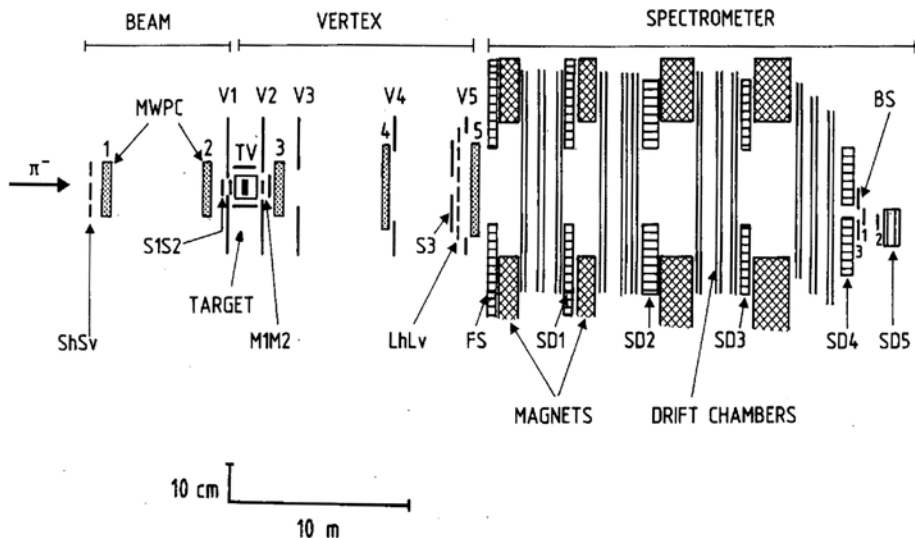


Figure 36. Schematic layout of the NA1 spectrometer.

The R209 detector is sketched in figure 30. Muons were momentum analyzed by drift chambers in a large-coverage magnetized iron absorber. A central drift chamber tracked the associated charged particles. The experiment was performed in the late seventies, in the hope to discover new particles decaying into a muon pair, possibly the intermediate neutral Z boson, and to explore the μ -pair production dynamics by means of the features of the associated charged particles. The strong Pisa group of this experiment comprised Giorgio Bellettini, Pier Luigi Braccini, Raffaello Carrara, Rino Castaldi, Vincenzo Cavasinni, Franco Cervelli, Tarcisio. Del Prete, Paolo Laurelli, Marco Maria Massai, Mauro Morganti, Giulio Sanguinetti, Marisa Valdata-Nappi, and Cristina Vannini. As the initiator of the collaboration with MIT, I was listed as a member of the group, but I do not deserve recognition for more than that because during the construction and running of the experiment I was fully absorbed by pushing new research programs at Frascati. The Pisa group built and operated the central detector, which surrounded the interaction region with an assembly of planar drift chambers with bi-dimensional readout. figure 31 shows half a detector during assembly, with Paolo Laurelli at work.

The ISR energy being by far not enough to produce the Z, the goal that R209 could obtain was observing for the first time at the ISR, the Υ family in the mass spectrum of the pairs, as seen in figure 32 [10] and a measurement of a jet of charged particles recoiling against high transverse momentum muon-pairs interpreted as a first experimental evidence of gluons [11].

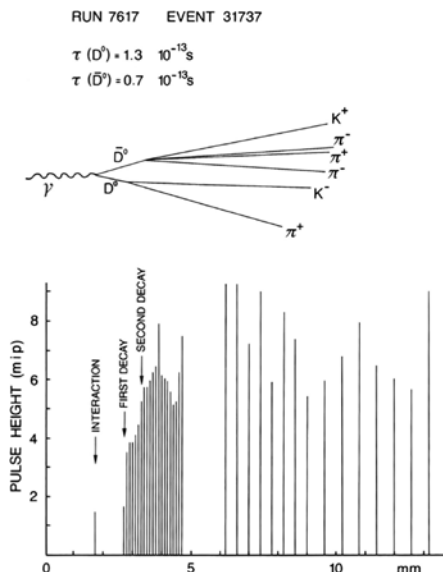


Figure 37. Illustration on how the decay positions of the photoproduced D mesons were detected by the pulse height jumps in the “living” germanium target.

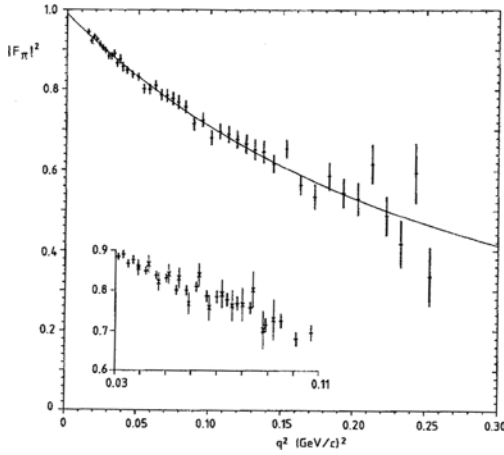
The last experiment of the fruitful Pisa campaign at the ISR was R210 and its second phase, which ran in 1983 in the area 2 previously occupied by the R210 spectrometer. For that experiment a CERN-Naples-Pisa-Stony Brook Collaboration was organized, comprising Giovanni Carboni, Vincenzo Cavasinni, Tarcisio Del Prete, Mauro Morganti and Marisa Valdata from Pisa. They moved to area 2 the 4π scintillation counter system of R801, and performed a total cross section measurement with one of the ISR beams turned into an antiproton beam. The setup (figure 33) was very similar to that of R801, except that the central counter box was replaced by the R210 drift chamber box (figure 31).

The results of that measurement are shown in figure 34 [12].

As simple and perhaps expected as it may seem, that result had a very significant impact on the evolution of hadron collider physics. It implies that to discover new phenomena possibly appearing in hadronic interactions at very high energy, proton-proton collisions can be as effective as antiproton-proton collisions. Being a high luminosity proton-proton collider much simpler and also cheaper than an antiproton-proton one, the antiproton-proton colliders were soon abandoned in the rush for high energy.

8. Pisa at the new cern SPS

After R801 the Pisa ISR group split into two branches. A large fraction of the community left the ISR and moved to the north area of CERN to perform a fixed target experiment, NA1, within a Frascati-Milan-Pisa-Trieste-Southampton-Westfield College collaboration. The NA1 Pisa physicists were Salvatore Roberto Amendolia, Giovanni Batignani, Ennio Bertolucci, Luciano Bosio, Carlo Bradaschia, Mauro Dell’Orso, Franc-



S.R. Amendolia, G. Batignani,
F. Bedeschi, E. Bertolucci, D. Bettoni,
G. Bologna, L. Bososio, C. Bradaschia,
M. Budinich, A. Codino, M. Dell'Orso,
B. D'Ettorre Piazzoli, M. Enorini,
F.L. Fabbri, F. Fidecaro, L. Foà,
E. Focardi, A. Giazotto, M. Giorgi,
F. Laurelli, F. Liello, G. Mannocchi,
P.S. Marrocchesi, A. Menzione,
E. Meroni, L. Moroni, E. Milotti,
P. Picchi, F. Ragusa, L. Ristori,
L. Rolandi, S. Sala, L.Satta, A. Scribano,
P. Spillantini, A. Stefanini, R. Tenchini,
G. Tonelli, G. Triggiani. A. Zallo

Figure 38. Pion form factor measured in the NA7 experiment.



Figure 39. The K^0 decay vacuum channel of NA31 in the CERN North Area.

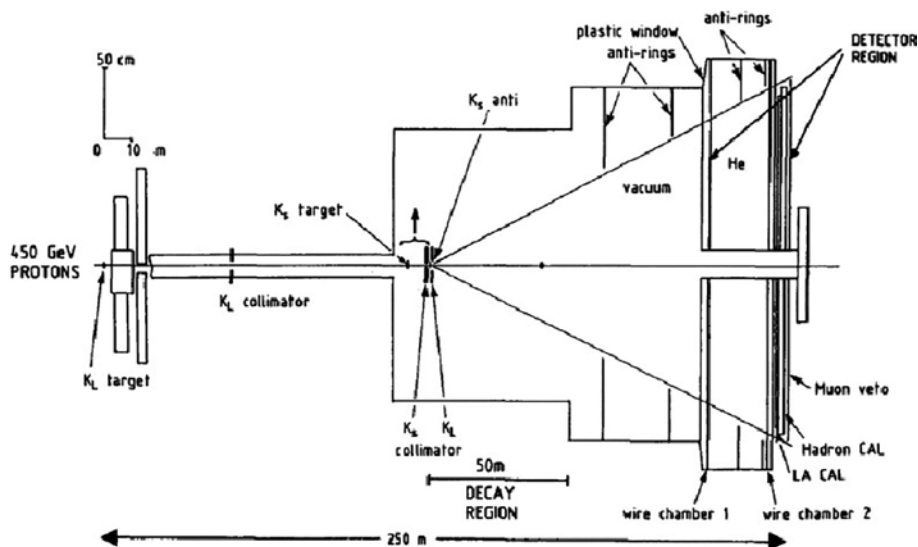


Figure 40. Layout of the NA41 experiment (not to scale).

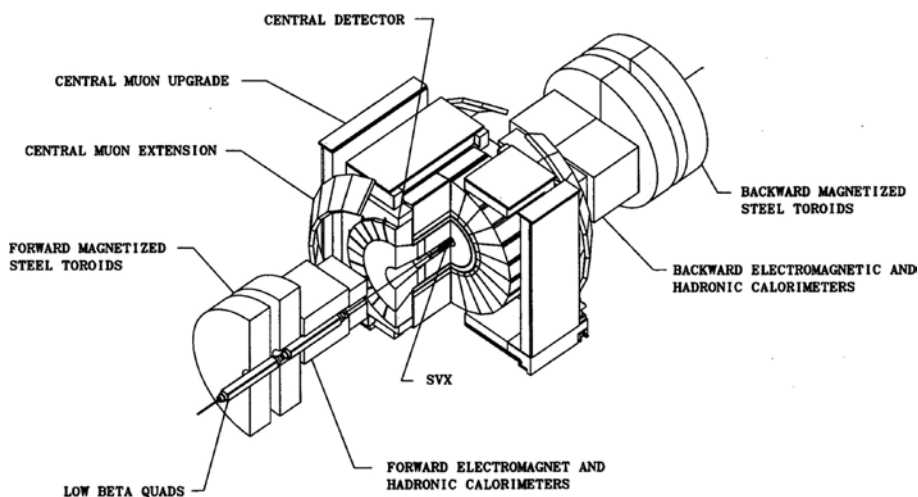


Figure 41. Artistic drawing of the CDF detector during run1 (1988-1995).

esco Fidecaro, Lorenzo Foà, Ettore Focardi, Paola Giannetti, Adalberto Giazotto, Marcello Giorgi, PierSimone Marrocchesi, Aldo Menzione, Luciano Ristori, Angelo Scribano, Guido Tonelli, Giuseppe Triggiani. In addition, a few more “former Pisans” were parked elsewhere, Luigi Rolandi and Arnaldo Stefanini at Trieste, Roberto Tenchini at Bedford (UK). The detector was a magnetic spectrometer operated on photon or hadron beams, with multiple magnets interspersed with scintillation counters

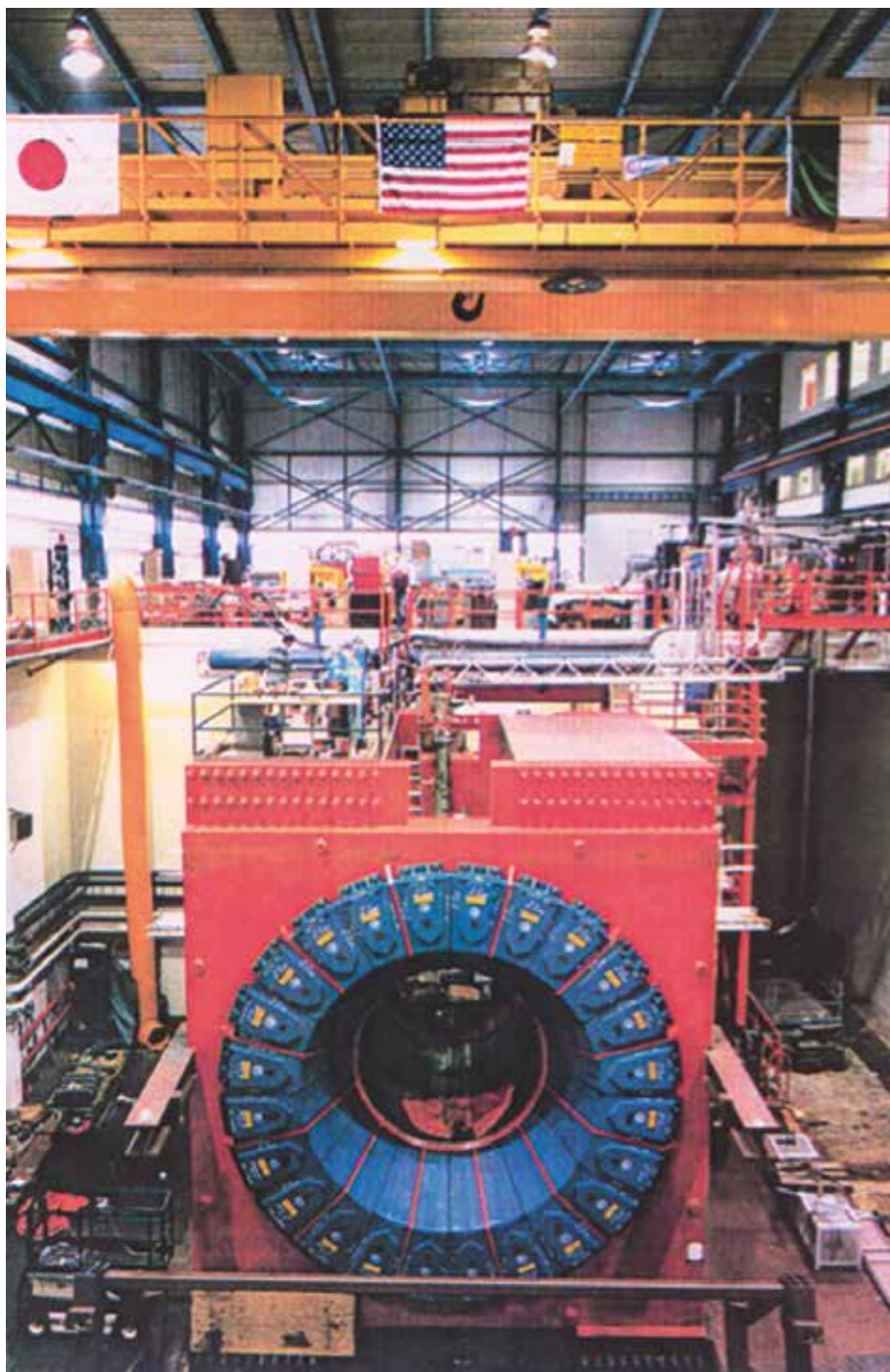


Figure 42. Picture of the central solenoid of the CDF detector in 1985.

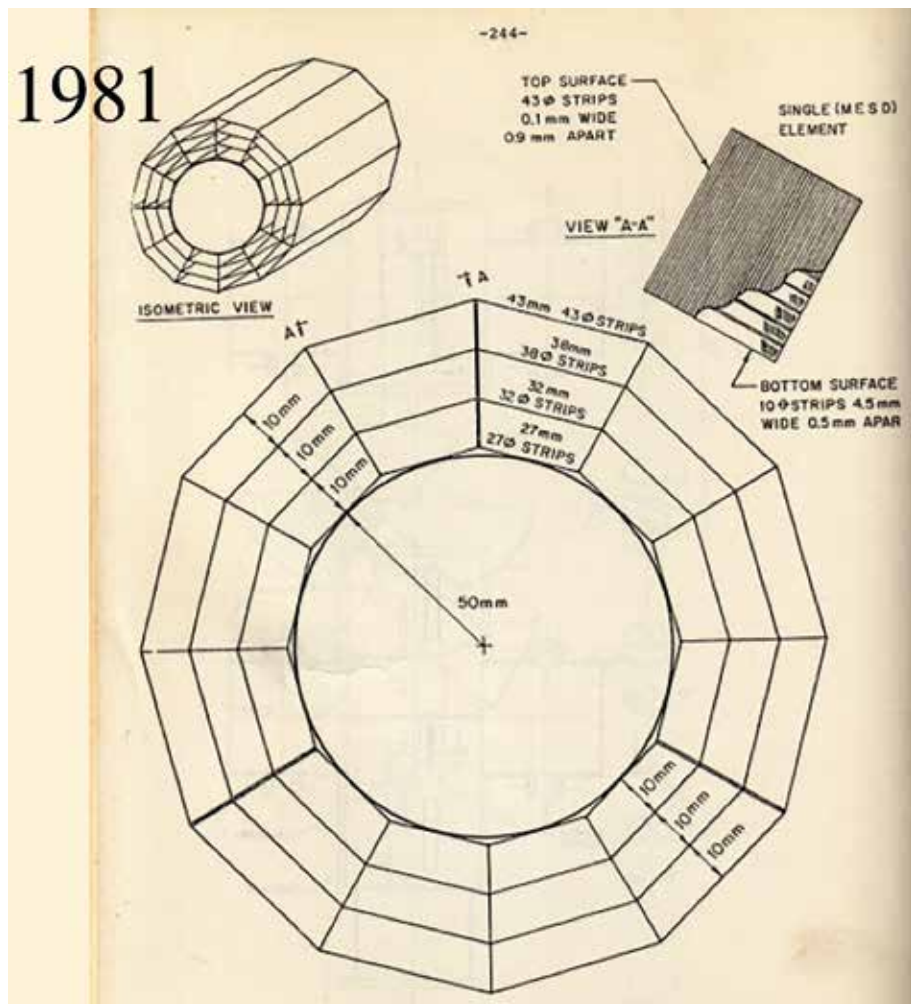


Figure 43. Sketch of the silicon vertex detector in the 1981 CDF Design Proposal.

and drift chambers where forward-produced particles were tracked. The experiment was nicknamed "FRAMM", hinting to studying forward fragmentation of beam particles. A picture of the spectrometer taken in the North Area in 1983 is shown in figure 35. A schematic layout is shown in figure 36.

In 1981-1984 the FRAMM measurements included detailed studies of forward production of charmed hadrons. The first silicon tracking detectors, a technology for which Pisa is now duly famous, were developed for FRAMM and were essential for tagging the forward produced charmed hadrons. figure 37 illustrates the principle applied to photo-

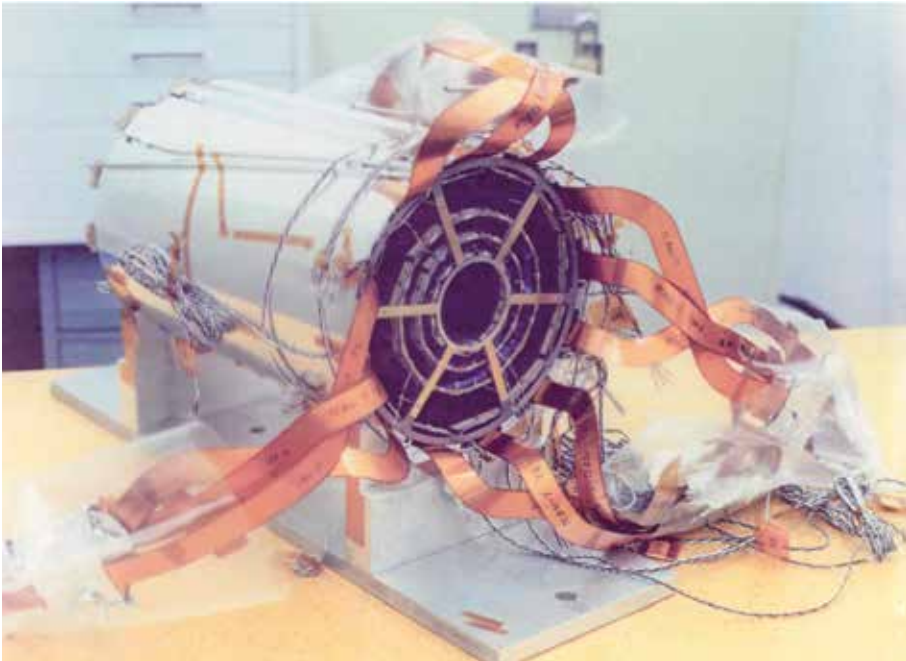


Figure 44. Picture of 1/2 of the 1992 version of the CDF silicon vertex detector.

PETRA/PEP	> 22 GeV/c ² in 1984	(95% c.l.)
TRISTAN	> 26 GeV/c ² in 1988	
SLC	> 41 GeV/c ² in 1989	
LEP	> 45 GeV/c ² in 1989	
UA1	> 50 GeV/c ² in 1990	
UA2	> 69 GeV/c ² in 1990	
CDF	> 70 GeV/c ² in 1990	
UA2 and CDF	> 77 GeV/c ² in 1991	

Figure 45. Lower limits to the top quark mass obtained before discovery.

production of D-meson pairs. A live germanium target, with a telescope of surface barrier detectors, detected first the interaction star where the neutral D-mesons were generated, and later the points where the charged tracks generated in D-decays were born. These were among the first-ever such silicon detectors used in particle physics experiments, to be used later also in the first vertex detector of CDF at the Fermilab Tevatron.

is shown in figure 40. By using a movable target to produce K_S at the entrance of the decay channel, K_L and K_S runs were studied alternatively. Charged and neutral pions produced in the decays were detected by trackers and absorbing detectors at the end of the channel, including a liquid Krypton sampling calorimeter. In 1996 NA31 obtained an evidence to 3.5σ for $Re(\epsilon'/\epsilon) > 0$ [13], which was not confirmed by the competing E731 experiment at Fermilab whose result was consistent with zero. Eventually, direct CP violation was established by the second generation NA48 experiment, with which the KTeV experiment at Fermilab fully agreed. The NA48 result proved direct CP violation in K^0 decay to 6.7σ , i.e. $Re(\epsilon'/\epsilon) = (14.7 \pm 2.2) \cdot 10^{-4}$. Over the time, members of the Pisa NA31-NA48 group have been Luciano Bertanza, Armando Bigi, Roberto Casali, Claudio Cerri, M. Cirilli, G. Collazuol, Flavio Costantini, Luigi Di Lella, N. Double, Riccardo Fantechi, L. Fiorini, Sergio Giudici, G. Lamanna, Italo Mannelli, Giuseppe Pierazzini, Marco Sozzi.

In the early eighties another experiment was started that has contributed enormously to the prestige of Pisa in HEP, the collider detector experiment at Fermilab (CDF). This experiment shall be extensively reviewed in a future occasion, but will be also mentioned at the end of this report.

In 1981 a Pisa-Frascati group signed a Design Proposal for a full-coverage magnetic detector (CDF) to operate at the Tevatron Collider recently approved at Fermilab, to collide antiprotons on protons at 2 TeV cms energy. The proposal was written by a US-Japan-Italy collaboration. There were 16 Italian, 15 Japanese and 56 American authors. Twelve Italian authors were from Pisa: myself, Franco Bedeschi, Ruggero Bertani, Luciano Bosisio, Carlo Bradaschia, Raffaele Del Fabbro, Ettore Focardi, Marcello Giorgi, Aldo Menzione, Luciano Ristori, Angelo Scribano, Guido Tonelli, and four from Frascati, Sergio Bertolucci, Marco Cordelli, Paolo Giromini, Amedeo Sermoneta. A sketch of the 1989 detector is shown in figure 41. A 1985 picture of the newly built central body of the detector shows the American, Japanese, Italian flags. (figure 42).

The 1981 Design Proposal included a drawing of a silicon vertex detector, (figure 43), that was proposed insistently by the Pisa group based on the expertise gained on that technology by his NA1 contingent. That detector was installed during the 1988-1992 shutdown and had a key role in the discovery of the top quark in 1995. A picture of a half of it, to be shipped to Pisa to be preserved in the university archives, is shown in figure 44.

The scientific results of CDF covered many areas and played a major role in HEP for many years from the end of the past century. Evidence for the top quark with mass of about 175 GeV was announced by CDF in 1994 [14], and the discovery was announced by CDF and D0 in 1995. The long

effort spent at several labs before the discovery is illustrated by figure 45, which summarizes the failed searches in the years 1984-1991. Figure 46 shows a CDF event of the Evidence paper, which is a text book example of how a $t\text{-}\bar{t}$ event should look like in the dilepton decay channel. This picture illustrates the powerful contribution given by the silicon vertex detector to the discovery, by means of secondary vertex tagging.

10. Concluding remark

At the end of this report, I want to express my strong congratulations to the Organizers of this event. I welcomed this meeting, very much.

After the end of the second world war, experimental HEP grew fast and did very well in Pisa. What happened should be clearly described and remembered. The future will be in the hands of new young people. Knowing our old achievements will be instructive for them and will challenge them to do at least as well. This will be possible only if accurate records of the past are preserved.

Acknowledgments

Several colleagues helped me in preparing this talk. I am especially grateful to Vincenzo Cavasinni who advised me along the entire process and solved for me unsurmountable editing problems. Valuable information and profound comments on NA31 and its extensions were provided by Italo Mannelli. Angelo Scribano and Rino Castaldi helped me in collecting information on the campaign of the Pisa group at Serpukhov. I appreciated the detailed information on BaBar at PEP2 sent to me by Marcello Giorgi and by Francesco Forti. Flavio Constantini sent to me patiently the correct picture of the Barion-Antibarion detector at Adone.

References

- [1] G. Bellettini, P.L. Braccini, L. Foà, e. H. Bellamy, *The Photoproduction of Neutral Pions from Hydrogen in the Forward Direction, for Photon Energies between 550 MeV and 1050 MeV*, Nuovo Cimento 29, 1195, 1963.
- [2] G. Bellettini, C. Bemporad, P.L. Braccini, L. Foà, *A Measurement of the π^0 Lifetime via the Inverse Decay Process*, Phys. Lett. 18, 333 1965.
G. Bellettini, C. Bemporad, P.L. Braccini, L. Foà, *Primakoff-Effect and π^0 Lifetime*, Nuovo Cimento 40, 1139 1965.

- [3] C. Bemporad, P.L. Braccini, I. Foà, K. Lubelsmeyer, D. Schmidz, *Experimental determination of the η lifetime by the measurement of the Primakoff effect*, Phys. Letters B, Vol. 25, Issue 5, 1967.
- [4] M. Borghini, L. Dick, *et al.* (G. Bellettini, P.L. Braccini, T. Del Prete, L. Foà, P. Laurelli, G. Sanguinetti, L. Valdata) *Measurement of the polarization parameter in π^+p elastic scattering at 10, 14 and 17.5 GeV/c and for $|t| \leq 2 \text{ (GeV/c)}^2$* , Physics Lett. B 36, issue 5, 1971, pp. 493-495.
- [5] A. Del Guerra, A. Giazotto, M. Giorgi, A. Stefanini, *Mesurements of Threshold π^+ Electroproduction at Low Momentum Transfer*, Nuclear Physics B99, 1975, pp. 253-286.
- [6] C. Bacci *et al.* *Preliminary Results at Frascati (Adone) on the Nature of the New 3.1 GeV Particle Produced in e^+e^- Annihilation*, Phys. Rev. Letters 33, 1975, pp. 1408-1409.
- [7] S.R. Amendolia *et al.* *Measurement of the Total Proton-Proton Cross Section at the ISR*, Physics Letters 44B, 119, 1973.
- [8] U. Amaldi *et al.*, *High Energy Proton-Proton Total Cross Section at the ISR*, Physics Letters 44B, 116, 1973.
- [9] G. Bellettini, *Results from the Pisa-Stony Brook ISR Experiment*, Published in AIP Conf.Proc.15, 1973, pp. 9-46,.
- [10] D. Antreasyan *et al.*, *Measurement of Dimuon Production at the ISR*, Phys. Rev. Lett. 45:863, 1980.
- [11] D. Antreasyan *et al.*, *Associated hadronic production in muon-pair events at the CERN Intersecting Storage Rings*, Nucl. Phys B199, 365, 1982.
- [12] M. Ambrosio *et al.*, *Measurement of the Proton-Antiproton Total Cross Section at the ISR*, Physics Letters 108B, 145, 1982.
- [13] First evidence for direct CP violation, NA31 Collaboration, Phys. Lett. B 206 169-176, 1988.
- [14] A. Abe *et al.*, *Evidence for Top Quark Production in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$* , Phys. Rev. Letters 1994, pp. 73-2.

1954: da Conversi e Gozzini nuove idee per i rivelatori di particelle

Marco Maria Massai*, Gloria Spandre**

1. Introduzione

Molte scoperte di fisica delle particelle, come in altri campi della scienza, sono state possibili grazie allo sviluppo di nuovi strumenti e tecniche sperimentali.

Fin da quando Roentgen scoprì i raggi X, nel novembre del 1895, e Henri Becquerel una radiazione sconosciuta emessa da un sale di uranio, uno dei problemi più urgenti e difficili da risolvere per i fisici fu quello di costruire apparecchiature idonee alla rivelazione e alla misura di tipi diversi di radiazione e superare l'utilizzo di un mezzo di rivelazione assai lento com'era la lastra fotografica.

Già nel 1897 Marie Curie era riuscita a misurare l'intensità della radiazione emessa da un minerale di uranio, la pechblenda, per mezzo di un elettrometro, una semplice camera a ionizzazione, e un cristallo di quarzo, le cui proprietà piezoelettriche erano state scoperte dal marito Pierre. La carica elettrica creatasi nel quarzo compensava, in un dato tempo, quella generata dalla radiazione nella camera a ionizzazione.

Pochi anni dopo, agli inizi del Novecento, fu messo a punto il "Contatore di Geiger" che, perfezionato successivamente, nel 1928, da Walther Müller risultò lo strumento maggiormente usato non solo in fisica sperimentale ma anche in dosimetria, protezione radiologica, industria, ecc...

Si trattava di un sottile tubo metallico, riempito di un gas a bassa pressione, lungo il cui asse era teso un filo, anch'esso metallico, isolato dal tubo. Applicando una differenza di potenziale sufficientemente elevata tra tubo e filo si generava un campo elettrico in grado di convogliare la carica elettrica rilasciata nel gas dal passaggio della particella ionizzante verso il filo e, in prossimità di questo, innescare un processo di moltiplicazione a valanga.

* Dipartimento di Fisica, Università di Pisa.

** INFN Sezione di Pisa.

Purtroppo il Geiger-Müller poteva contare solo le particelle ionizzanti ma non identificarle o misurarne l'energia. Idoneo a rivelare la radioattività naturale, anche se con bassa efficienza, si mostrò presto inadeguato ad affrontare le nuove imprese che la fisica del nucleo, e dei raggi cosmici, richiedeva.

Nei primi anni trenta furono studiate altre possibili geometrie e nel 1949 J. Warren Keuffel [1] sviluppò un contatore a gas a facce piane parallele in cui poté osservare il formarsi di una scarica al passaggio di una particella ionizzante. La diversa geometria degli elettrodi, rispetto al contatore Geiger-Müller, permetteva tempi di sviluppo della scarica assai più veloci: pochi nanosecondi invece delle decine di microsecondi.

Furono F. Bella e Carlo Franzinetti, nel 1953, i primi a fotografare le scariche che si formavano al passaggio dei raggi cosmici in un rivelatore alla Keuffel [2]. Per poter osservare anche la posizione delle scariche sul piano del rivelatore, i due costruirono un primo prototipo con un elettrodo semitrasparente, costituito da una lastra di pirex lavorata otticamente sulla quale erano stati evaporati 100 micron di rame. Le scariche risultarono ben visibili a occhio nudo ma non sufficienti da impressionare la pellicola fotografica e tuttavia i risultati ottenuti confermarono la possibilità di utilizzare il "contatore a scintilla" negli esperimenti sui raggi cosmici.

In seguito Paul-Gerhard Henning e Enrich Bagge migliorarono le prestazioni del contatore di Keuffel mettendo diversi elettrodi in parallelo e rendendo più intensa la scarica mediante un condensatore [3].

In quegli stessi anni veniva sviluppata la prima camera odoscopica "a luminescenza", o "flash chamber", frutto della preziosa collaborazione di Adriano Gozzini e Marcello Conversi, all'epoca entrambi professori all'Università di Pisa.

Fu proprio combinando la tecnica del voltaggio impulsato utilizzata da Gozzini-Conversi [4] con il contatore a facce piane parallele di Keuffel che Cranshaw e de Beer, nel 1955, riuscirono a ridurre il problema delle scariche spurie, cioè non connesse con l'evento ionizzante, a meno dell'1% [5].

Il passo successivo sarebbe stato la realizzazione di un rivelatore in cui il passaggio di una particella ionizzante nel gas veniva visualizzato come una "traccia" e fotografato; analogamente a quanto già avveniva nelle "camere a bolle" ma con tempi di recupero assai inferiori.

Finalmente nel 1958, i giapponesi Shuji Fukui e Sigenori Miyamoto [6] riuscirono a superare i limiti riscontrati nei rivelatori precedentemente costruiti, realizzando il primo esempio perfettamente funzionante di "camera a scintilla" o, come da loro battezzata, di "camera a scarica", che non solo assicurava una precisa determinazione della traiettoria di una particella ma anche di sciame di particelle che attraversavano contemporaneamente il rivelatore. Ancora però la traccia, visualizzata attraverso la formazione di una "linea di scintille", doveva essere fotografata.



Figura 1. Melvin Schwartz vicino alla grossa camera a scintilla.

In pochi anni vennero sviluppati sistemi di tracciatura, anche molto estesi.

Fu proprio con una grande camera a scintilla che Melvin Schwartz, Leon Max Lederman e Jack Steinberger scoprirono, nel 1962, il neutrino μ (ν_μ) (figura 1).

Nell'esperimento all'acceleratore di Brookhaven visualizzarono le lunghe tracce dei mesoni μ prodotti nell'interazione di corrente carica del ν_μ con gli atomi del gas che costituiva il riempimento della camera e mostrarono che da un fascio di neutrini muonici non venivano mai prodotti elettroni [7].

La "camera a scintilla" era divenuta uno strumento prezioso nelle mani dei fisici delle Alte Energie e questo grazie anche al lavoro pionieristico di Gozzini-Conversi [8], [9].

2. La “camera a luminescenza” di Gozzini-Conversi

Nell'autunno del 1954, nel suo laboratorio all'Istituto di Fisica, in Piazza Torricelli, Gozzini stava studiando l'interazione della radiazione elettromagnetica generata da un magnetron¹ con le impurità polari presenti in un liquido ultra puro, non polare: il cicloesano.

L'idea di Gozzini era di usare un impulso di radiazione e.m. di potenza sufficientemente elevata da mettere in moto, a causa della loro carica elettrica, gli ioni presenti nel liquido. Il trasferimento di energia che si verificava nelle collisioni con le molecole del liquido avrebbe provocato un aumento locale della temperatura e conseguentemente una variazione dell'indice di rifrazione in quel punto. Questo cambiamento poteva essere evidenziato attraverso la diffusione che tale differenza di indice di rifrazione produceva su un fascio di luce incidente. Un tubo fotomoltiplicatore posto all'esterno della cella di vetro contenente il liquido e in direzione ortogonale al fascio di luce doveva rivelare tale diffusione.

L'apparato sperimentale era mantenuto completamente al buio in modo da poter osservare la luce eventualmente diffusa lateralmente.

L'esecuzione dell'esperimento fu affidata al giovane ricercatore Arrigo Battaglia, il quale preparò la cella con il liquido, il fascio di luce bianca, il fototubo e il potente magnetron che produceva impulsi della durata di circa 1 microsecondo. Battaglia aveva controllato preventivamente il funzionamento del magnetron con il metodo standard della lampadina al neon di cui era nota la proprietà di accendersi spontaneamente se avvicinata ad una sorgente di onde e.m. abbastanza potente. Al buio, tuttavia, il neon non si accendeva ma emetteva solo, sporadicamente, lievi bagliori inizialmente trascurati.

Convinto che il magnetron non funzionasse più, Battaglia riaccese la luce, ispezionò l'apparecchio e notò che il neon si accendeva. Ripeté quindi l'esperimento al buio ottenendo nuovamente il risultato precedente.

Tra i giovani del gruppo fu allora, scherzosamente, formulata la legge: “i magnetron al buio funzionano male”.

Interpellato sullo strano fenomeno Gozzini comprese subito che era la luce a generare nel neon, per effetto fotoelettrico, elettroni liberi i quali venivano accelerati dal campo elettrico delle microonde e producevano, per collisione con gli atomi del gas, un processo di moltiplicazione a valanga con emissione di luce.

Il perché il neon non si illuminasse al buio era stato facilmente spiegato!

¹ Magnetron e klystron erano, nel primo dopoguerra, facilmente reperibili come residuati bellici della demolizione di radar militari.

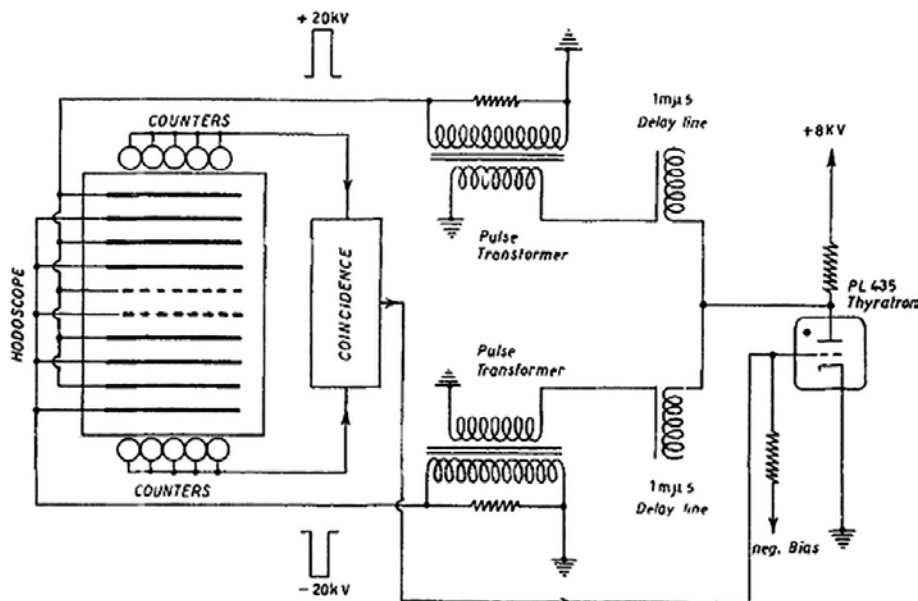


Figura 2. Schema del sistema di "trigger" usato per generare due impulsi di polarità opposta.

La misteriosa e debole accensione del neon, che avveniva al buio in modo casuale e che nessuno aveva più considerato, attirò invece l'attenzione di Gozzini il quale intuì l'esistenza di un secondo, differente, meccanismo di produzione di elettroni liberi nel gas. Gozzini discusse il fenomeno con Marcello Conversi, noto studioso di particelle elementari e all'epoca direttore dell'Istituto di Fisica. Entrambi arrivarono a concludere che in assenza di luce, e quindi di emissione fotoelettrica dalle pareti del bulbo di vetro, non vi potevano essere elettroni liberi all'interno del gas a meno che non fossero prodotti, per ionizzazione, dall'interazione dei raggi cosmici con gli atomi del neon. Se la ionizzazione veniva prodotta in coincidenza con l'impulso del magnetron allora si poteva innescare il processo di moltiplicazione a valanga durante il quale vi era emissione di luce.

Era necessario quindi disporre di rivelatori in grado di segnalare il passaggio di raggi cosmici in coincidenza con l'accensione della lampadina. Vennero utilizzati dei tubi Geiger con i quali Conversi svolgeva i suoi esperimenti. I due scienziati stimarono un "rate" (ν) di particelle, che attraversavano il bulbo al neon, dell'ordine di 1/sec e un tempo di "ricombinazione" (τ), per i ~10 elettroni liberati nel gas da una particella al minimo di ionizzazione, assai inferiore a 1 sec. La probabilità di un bagliore della lampadina in presenza di un breve ma potente impulso a radiofrequenza risultava pertanto molto piccola ($\nu\tau \ll 1$), in accordo con quanto da loro osservato.



Figura 3. Foto della prima camera odoscopica costruita a Pisa.

La conferma che erano proprio i raggi cosmici a produrre le rare accensioni della lampadina portò rapidamente allo sviluppo un nuovo tipo rivelatore per la visualizzazione delle tracce di particelle, una specie di “camera a nebbia” elettronica veloce anche se di minore risoluzione spaziale.

2.1. La prima camera odoscopica

Conversi descrive così il lavoro di collaborazione con Gozzini [4]:

Rapidamente costruimmo e montammo tutto ciò che era necessario per provare la nostra idea, in particolare usando per la generazione dell'impulso di alta tensione due trasformatori di un modulatore per radar che fornivano impulsi rettangolari fino a 20 kVolt, 2 μ s di durata, montati in 'push-pull' (figura 2), in modo da ottenere fino a 40 kVolt (e quindi campi elettrici fino a

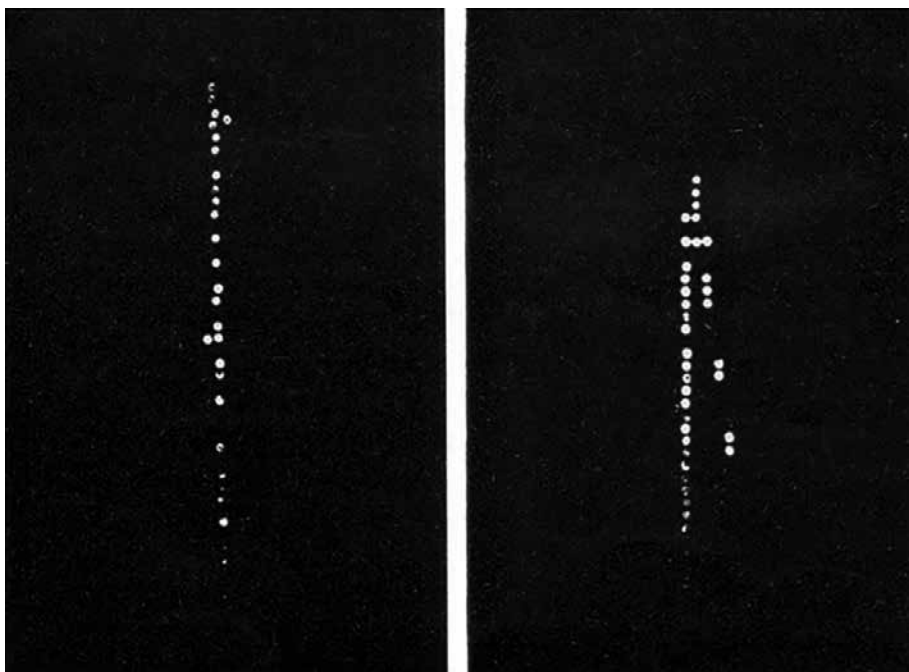


Figura 4. Prime tracce di raggi cosmici, rispettivamente una particella carica (presumibilmente un muone) ed una particella neutra che ha interagito con uno degli elettrodi di alluminio, ottenute con la camera odoscopica di Gozzini-Conversi.

circa 10 kVolt/cm) tra ogni coppia successiva di piastre. La prima prova venne effettuata con successo il 25 marzo 1955 utilizzando tubi di vetro di 1.5 cm di diametro riempiti con argon spettroscopicamente puro a mezza atmosfera di pressione (figura 3).

Fu un'esperienza indimenticabile poter osservare immediatamente le tracce dei mesoni μ dei raggi cosmici come una sequenza di 'flash' lungo una linea retta e innescati in coincidenza con i contatori Geiger e verificare che nessun tubo si illuminava quando l'impulso di alta tensione veniva applicato a caso. Il lavoro proseguì con l'aiuto di due studenti, Sergio Focardi e Giampaolo Murtas, e di Carlo Franzinetti che invitammo ad unirsi a noi in questa impresa. I tubi di argon vennero sostituiti con tubi al neon di 0.65 cm di diametro e fu quindi possibile fotografare per la prima volta mesoni μ dei raggi cosmici e sciami elettromagnetici (figura 4).

A tutti gli effetti la camera di Gozzini-Conversi può essere considerata il precursore di tutti i rivelatori visualizzanti utilizzati successivamente negli esperimenti agli acceleratori con fasci di particelle ad alta energia.

Tuttavia la scoperta di un particolare evento implicava, in quegli anni, l'esame di milioni di fotografie di camera a bolle o camera a scintilla: un processo molto lento e laborioso, inadatto per lo studio di eventi rari.

3. Un rivelatore a gas da Nobel

La rivoluzione nelle tecniche di rivelazione si ebbe con l'avvento degli amplificatori a transistor e del computer.

La possibilità di avere un più alto grado di 'automazione' degli esperimenti e di poter usufruire di una conoscenza più veloce dei dati in acquisizione, attirò l'interesse della comunità dei fisici delle Alte Energie.

Così, nel luglio del 1962, fu organizzata al CERN una Conferenza Internazionale sulla Strumentazione dove si dibatté su nuove tecniche di rivelazione, e relativa elettronica di lettura, che non prevedessero l'utilizzo del supporto fotografico. Da quell'incontro, e da quelli che seguirono, scaturirono molte interessanti proposte come le "camere a scintilla" digitali in cui i piani degli elettrodi erano sostituiti da fili nei quali fluiva la corrente indotta nella scarica. La lettura del segnale in corrente permetteva di localizzare il punto in cui la scarica si era verificata e quindi il cammino della particella. Per ricostruire la coordinata lungo il filo con grande accuratezza George Charpak propose il metodo della divisione di carica tra le correnti che fluivano dal punto in cui era verificata la scarica verso i lati opposti del filo [10].

Pochi anni dopo, nel 1968 Charpak sviluppò un nuovo e potente tipo di rivelatore: la "camera proporzionale a multifili" (o MultiWire Proportional Chamber) [11].

Si trattava di una camera formata da un piano di fili indipendenti (anodi), posti tra due elettrodi anch'essi piani, i catodi, e immersi in un'atmosfera composta da un gas nobile più un idrocarburo ("quencher"). Applicando una differenza di potenziale di qualche kV tra il piano dei fili e gli elettrodi, egli mostrò che ciascun filo lavorava come un contatore proporzionale indipendente fino a separazioni tra i fili di circa 1 mm. Il campo elettrico che si generava era infatti pressoché uniforme su tutto il volume del gas, ma si intensificava in prossimità di ciascun filo, cioè a distanze dell'ordine del suo diametro, come in un classico contatore proporzionale.

Con il primo prototipo ottenne una risoluzione temporale inferiore a 400 nanosecondi e una velocità di conteggio per filo dell'ordine di 250 kHz [10]. Una delle principali caratteristiche risultò subito essere la possibilità di utilizzare il segnale che si formava sui fili anodici come segnale di "trigger". In seguito i piani catodici furono sostituiti con piani di fili paralleli ed equidistanti, senza che si osservasse un particolare degrado della configurazione elettrostatica. Ricostruendo il baricentro della distribuzione di carica indotta sui fili catodi fu possibile misurare le coordinate X e Y della posizione di incidenza della particella ionizzante che attraversava il rivelatore.

Le proprietà mostrate da questo rivelatore lo resero particolarmente utile nella ricostruzione di eventi ad alta molteplicità e alto "rate".

Fin dall'inizio le ricerche vennero rivolte allo studio e all'ottimizzazione della miscela di gas (efficienza, invecchiamento, velocità di diffusione) e dell'elettronica di lettura (velocità, basso rumore, "multi-hits").

Per l'invenzione e lo sviluppo di questo tipo di rivelatore Charpak ricevette il premio Nobel per la Fisica nel 1992.

4. L'esperienza pisana con i rivelatori a gas

La velocità con cui potevano essere registrate le tracce di particelle, l'alta risoluzione spaziale ed energetica e il basso costo di realizzazione, resero la camera proporzionale a multifili, e le sue successive implementazioni, uno strumento indispensabile negli esperimenti di fisica delle particelle ma anche in applicazioni nel campo della medicina e dell'industria.

Il primo contatto con questa nuova classe di rivelatori, a Pisa, lo ebbe Carlo Bemporad, negli anni a cavallo tra il 1960 e il 1970, quando partecipò alla costruzione e test del primo sistema di sette camere proporzionali (figura 5) per un esperimento di dissociazione diffrattiva al Proto Sincrotrone del CERN. Il sistema serviva per definire spazialmente il fascio e misurare il momento delle particelle incidenti [12]. Il sistema si mostrò particolarmente affidabile e capace di operare ad alti flussi di particelle, con efficienza anche per tracce multiple superiore al 99% e risoluzione spaziale sotto il millimetro.

4.1. L'esperimento barione-antibarione a Adone

Dal 1969, a Frascati, era in funzione Adone, un anello di accumulazione per elettroni e positroni che raggiungeva l'energia di 3 GeV nel centro di massa, all'epoca la maggiore al mondo. Vennero realizzati complessi apparati sperimentali che impiegavano le nuove tecniche di rivelazione come le camere a fili. Il risultato più importante degli esperimenti di prima generazione fu l'osservazione di una abbondante produzione di mesoni π e K emergenti dall'annichilazione e^+e^- . Tuttavia per l'incapacità di distinguere tra tipi di mesoni e l'insufficiente copertura angolare fu necessario allestire una seconda generazione di esperimenti con apparati tecnologicamente più avanzati.

Una collaborazione di fisici dei Laboratori Nazionali di Frascati, dell'INFN di Napoli e di Pisa e dell'Istituto Superiore di Sanità, propose l'esperimento barione-antibarione per studiare la produzione di coppie protone-antiprotone e, più in generale, di altri stati adronici.

Il sistema era caratterizzato da una simmetria cilindrica intorno alla regione di collisione dei fasci e^+e^- (figura 6) e utilizzava grossi scintillatori liquidi, camere a scintilla con lettura magnetorestrittiva e migliaia di "flash-tubes" (figura 7), i famosi 'tubicini' di Gozzini-Conversi, opportunamente

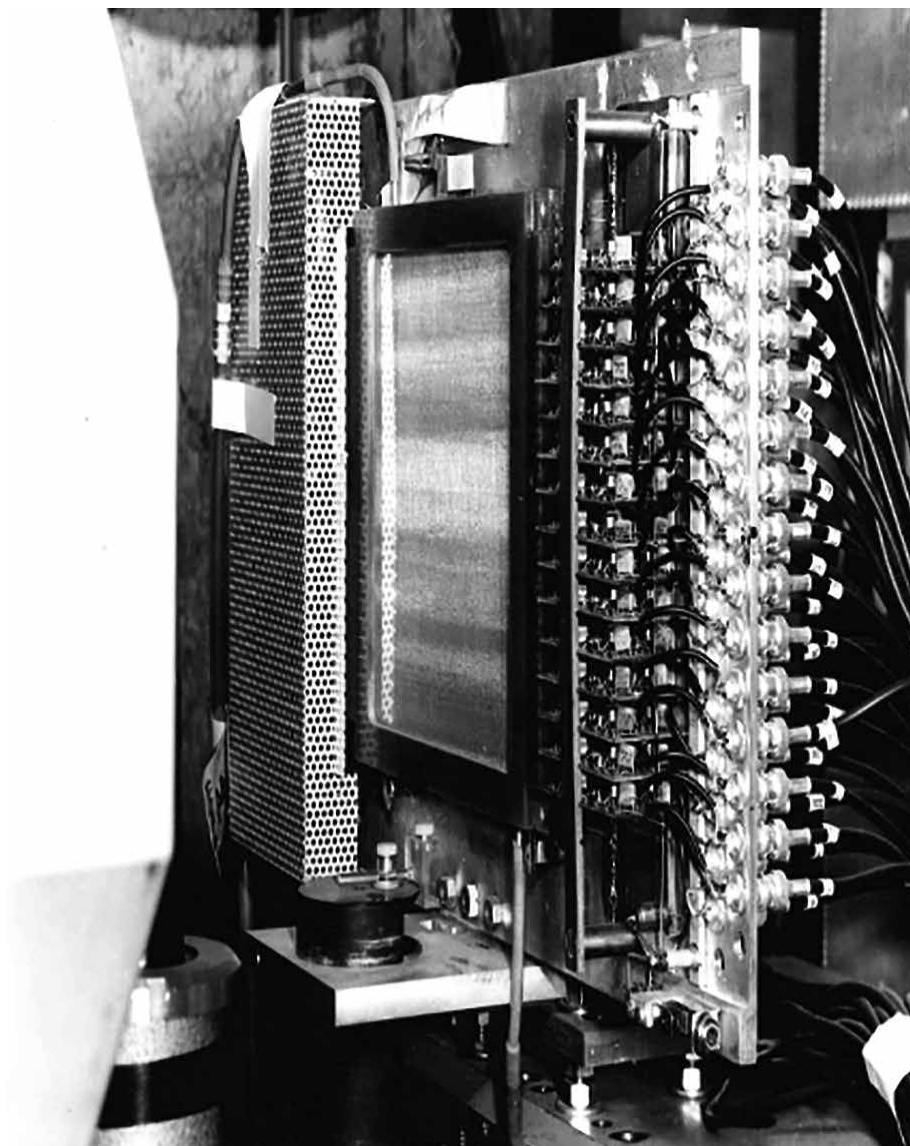


Figura 5. Foto del sistema di camere proporzionali. Area utile circa 18x18 cm (archivio Bemporad).

sviluppati per adattarsi alle nuove esigenze di rapidità di risposta e velocità di acquisizione [13]. Ormai i rivelatori visualizzanti potevano essere accoppiati all'elettronica di lettura, automatizzando e velocizzando la presa dati.



Figura 6. L'esperimento barione-antibarione ad Adone (archivio Bemporad).

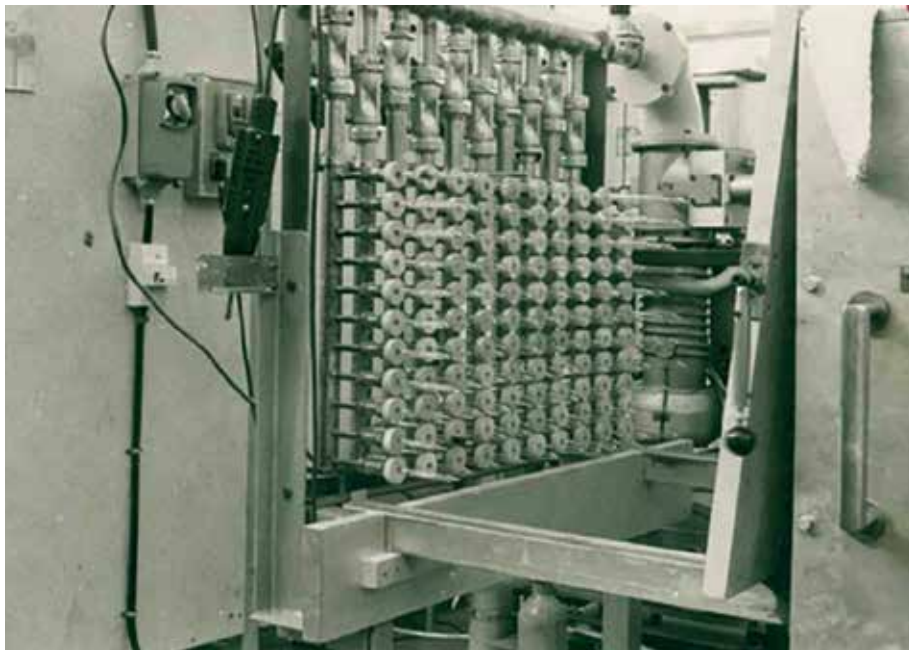


Figura 7. Il sistema di riempimento dei "tubicini" dell'esperimento barione-antibarione (archivio Bemporad).

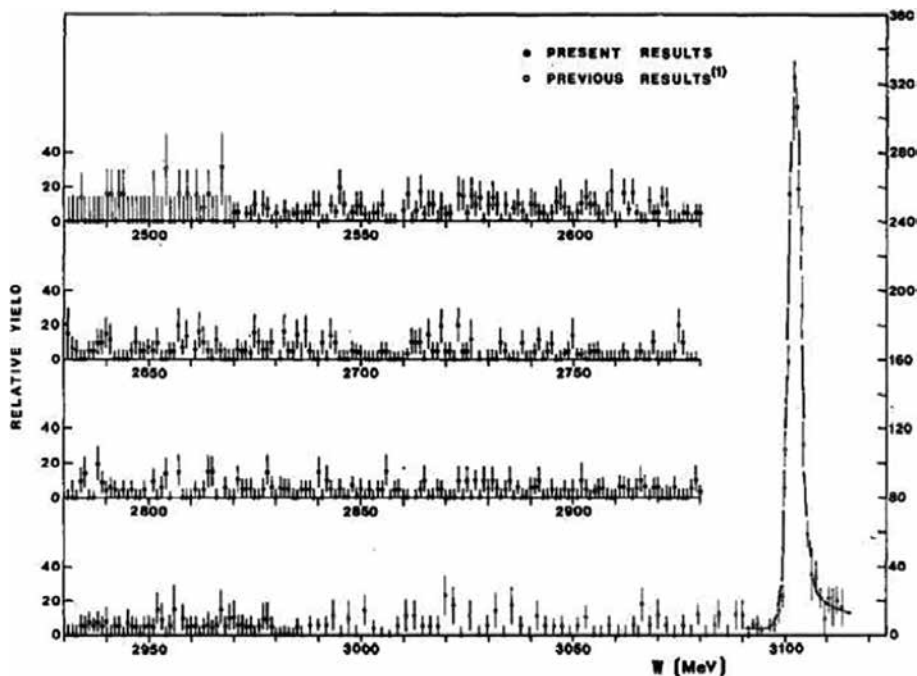


Figura 8. Conteggi di produzione multiadronica in funzione dell'energia totale dei fasci di Adone. A 3100 MeV si osserva il picco di produzione della J/Ψ .

Insieme a Bemporad, i ricercatori di Pisa che vi parteciparono erano Mario Calvetti, Flavio Costantini e Paolo Lariccia.

Nel 1974, l'esperimento barione-antibarione, insieme agli altri due esperimenti presenti su Adone, $\gamma\gamma 2$ e MEG (Magnet Experimental Group), prese parte alla scoperta della J/Ψ .

La massa della nuova particella (~ 3.1 GeV), appena scoperta da Burton Richter a Stanford e Samuel Ting a Brookhaven, era di poco superiore all'energia massima nominale di Adone per questo, appresa la notizia, l'allora direttore dei Laboratori Nazionali di Frascati, Giorgio Bellettini, chiese di tentare di alzare l'energia massima fino al valore necessario per osservarla. L'operazione riuscì e in meno di due giorni anche gli esperimenti ad Adone confermarono la J/Ψ (figura 8) [14].

4.2. L'esperimento R-209 agli ISR del CERN

In una "camera a deriva di elettroni" (drift chamber) il punto in cui viene rilasciata la ionizzazione primaria viene determinato dalla misura del tempo che intercorre tra il passaggio della particella attraverso il volume

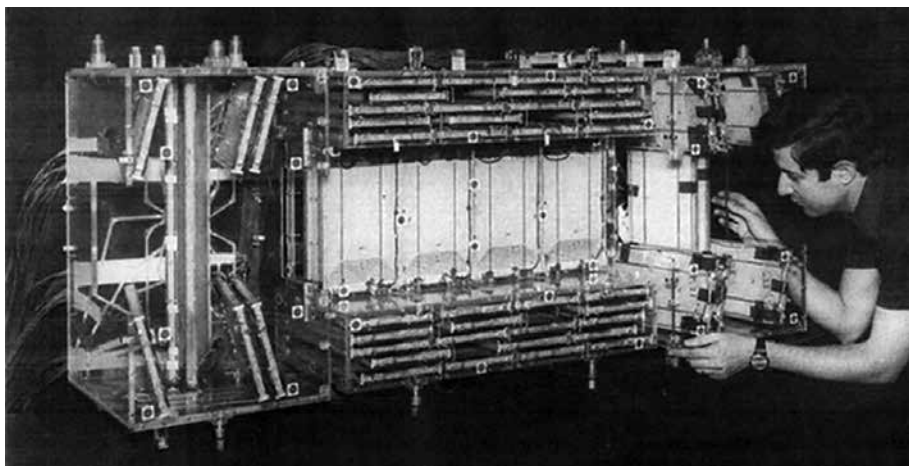


Figura 9. Metà del rivelatore di vertice di R-209 assemblato in laboratorio.

del rivelatore e la comparsa di un segnale sull'elettrodo (anodo) verso cui si muovono gli elettroni di ionizzazione, nota la velocità di deriva.

Questo concetto fu subito chiaro a Charpak che, nel 1969, insieme a Tullio Bressani studiò il funzionamento della 'drift chamber' [15]; ma furono Albert Heinrich Walenta e Joachim Heintze a costruire, l'anno seguente, il primo prototipo funzionante [16].

Un primo utilizzo massiccio di queste camere si ebbe nel 1978 da parte del Gruppo ISR di Pisa che realizzò un sistema di 136 camere a deriva per il rivelatore di vertice (figura 9) dell'esperimento R-209 all'Intersecting Storage Rings del CERN.

L'esperimento aveva lo scopo di ricostruire la massa invariante di coppie di muoni prodotte in interazioni protone-protone e l'associata distribuzione di adroni.

Il sistema di camere era in grado di misurare, con eccellente risoluzione spaziale, le coordinate del vertice di interazione, la direzione dei due muoni e le direzioni degli adroni prodotti in associazione con i muoni, fino ad un angolo di $\sim 10^\circ$ rispetto alla linea dei fasci [17].

La sezione d'urto in funzione della massa del sistema dimuonico misurata nell'esperimento R-209 è riportata in (figura 10) dove è ben visibile il picco della J/Ψ .

I prototipi furono sviluppati a partire dal 1975. La configurazione dell'esperimento imponeva la minimizzazione degli spazi morti, la risoluzione dell'ambiguità destra/sinistra e la lettura della seconda coordinata.

Fin dall'inizio le ricerche si diressero nella direzione di studiare e ottimizzare la miscela di gas (efficienza, invecchiamento, velocità di diffusio-

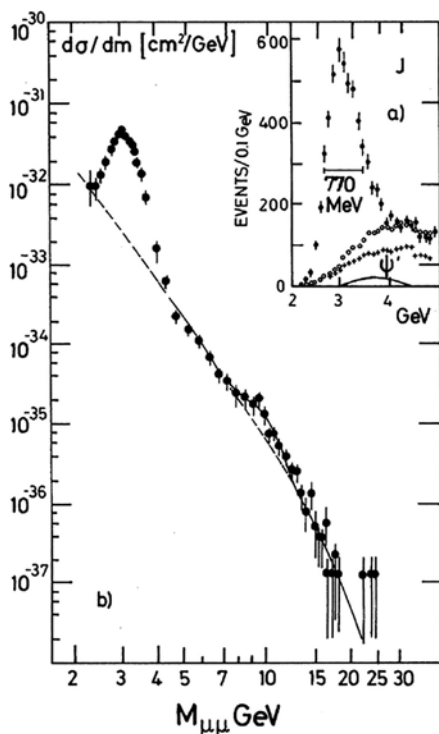


Figura 10. Sezione d'urto in funzione della massa dei due muoni. Si osserva chiaramente a 3 GeV il picco della J/ψ e una piccola gobba in corrispondenza della ψ [18].

ne), di sviluppare nuove linee di ritardo e migliorare l'elettronica di lettura (velocità, basso rumore,...).

Un parametro cruciale fu la verifica dell'uniformità del campo elettrico che poteva essere deformato dalla presenza di elettrodi necessari per portare l'alimentazione ad alta tensione ai catodi. Anche la linea di ritardo, posta immediatamente sotto la coppia di 'sense wires', poteva generare distorsioni nel campo che avrebbero potuto limitare l'efficienza di rivelazione e la risoluzione spaziale.

4.3. L'esperimento NA1 al SPS del CERN

NA1 (FRAMM) è stato un esperimento condotto al Super Proton Sincrotrone del CERN dal 1975 al 1992. Lo scopo dell'esperimento era lo studio della generazione, indotta da fotoni, di bosoni scalari e vettoriali, nonché di adroni contenenti il

quark Charm. Inoltre, l'attenzione era focalizzata sulla spettroscopia di nuove particelle massive nei canali di decadimento adronici [19]. Portavoce della collaborazione era Lorenzo Foà.

L'apparato sperimentale utilizzava diversi piani di camere a fili per ricostruire le tracce delle particelle deflesse dal campo magnetico (figura 11).

In particolare, il gruppo di Pisa si era occupato della costruzione e test del sistema di camere a 'drift' (figura 12) per lo spettrometro in avanti [20]. Tutte le camere erano equipaggiate con linee di ritardo parallele ai 'sense wires' per la misura simultanea di entrambe le coordinate spaziali (x , y). Questo tipo di lettura consentiva inoltre di risolvere il problema dell'ambiguità destra-sinistra di ciascun 'hit'. La linea di ritardo veniva letta da entrambi i lati in modo tale da avere un'informazione ridondante sulla posizione di ogni punto della traccia.

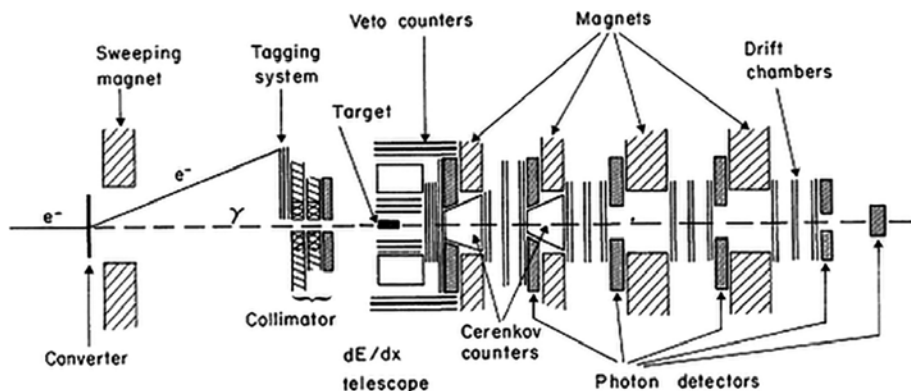


Figura 11. Schema dell'apparato sperimentale di NA1.

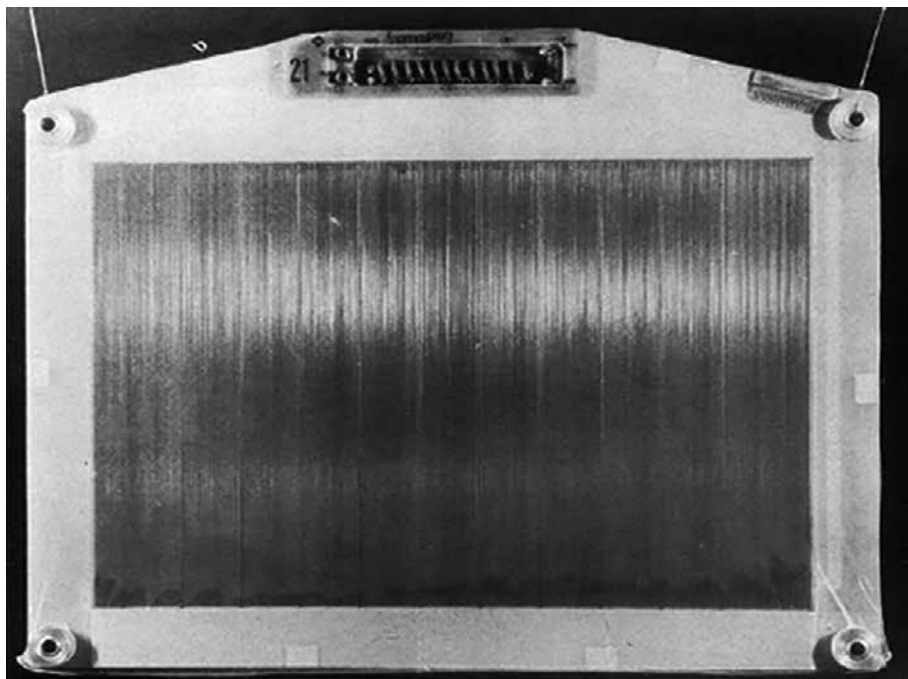


Figura 12. Foto di una camera a drift di NA1.

4.4. Dalla Fisica delle Alte Energia alla Fisica Medica

Alla fine degli anni '70 dietro suggerimento di Gherardo Stoppini si costituì a Pisa un gruppo sperimentale di Fisica Medica, allora si chiamava Fisica Sanitaria, che faceva capo ad Alberto Del Guerra. Il gruppo era formato da due giovani assistenti, Ronaldo Bellazzini e Guido Tonelli, a

cui in seguito si aggiunse Marco Maria Massai, e due laureandi, Massimo Ragadini e Gloria Spandre.

Il gruppo iniziò un'intensa attività di sviluppo di rivelatori proporzionali multifili (MWPC) per applicazioni in campo biologico e medico, nei laboratori INFN di San Piero a Grado [21].

Le caratteristiche di alta risoluzione spaziale, sensibilità e velocità di risposta rendevano questo tipo di rivelatore lo strumento ideale per la ricostruzione di mappe di radiodensità in campioni bio-medici. Tra le prime applicazioni infatti vi fu proprio la proposta di usare una MWPC per fare autoradiografie digitali non distruttive su campioni di cellule umane marcate radioattivamente. Le cellule venivano esposte all'azione di radiazione UV (2600 Å) che induceva dei danni nella catena del DNA. Successivamente veniva aggiunto alla coltura un precursore della sintesi del DNA, la timidina, marcato con carbonio-14 ($E_{\max} = 156 \text{ keV}$). Solo le cellule in grado di riparare la sequenza di DNA danneggiata dalla luce UV risultavano radioattive. La MWPC permetteva di ricostruire, in breve tempo, la distribuzione di radioattività nel campione di cellule (figura 13) e di isolare le colonie "mutanti" [22], [23], preservandone la sopravvivenza e la capacità di replicarsi. Lo studio era stato condotto in collaborazione con Angelo Abbondandolo e Stefania Bonatti dell'Istituto di Mutagenesi e Differenziamento del CNR.

Fu l'inizio di un lungo periodo di collaborazione con biologi e medici durante il quale vennero sviluppati rivelatori proporzionali a multifili con sensibilità sempre crescente per adattarsi all'utilizzo di traccianti fisiologici, come il trizio, assai più economici del carbonio-14 ma emittenti β^- di più bassa energia ($E_{\max} = 18 \text{ keV}$). Furono raggiunte sensibilità di 0.1 Bq/cm^2 ($\sim 3 \text{ pCi/cm}^2$).

Le MWPC costruite dal gruppo di Fisica Medica furono utilizzate in diversi programmi di ricerca [24], [25]; in particolare per:

- l'identificazione, in colture di cellule normali, di cellule di Xeroderma Pigmentoso, una rara malattia genetica caratterizzata da un'elevata fotosensibilità con conseguente predisposizione allo sviluppo di neoplasie cutanee [26];
- la mappatura del consumo regionale di deossiglucosio nel muscolo cardiaco, in relazione ad un evento ischemico indotto nel miocardio attraverso la stenosi di una coronaria (autoradiografia digitale, (figura 14) [27], [28];
- la misura del contenuto minerale delle ossa in un campione di donne. Una precisa determinazione di quest'ultimo e della sua densità sono di fondamentale importanza nella diagnosi precoce dell'osteoporosi e di altre patologie a carico del sistema scheletrico [29], [30].

Lo sviluppo delle MWPC per applicazioni mediche e la collaborazione con il gruppo di Victor Perez-Mendez, del Lawrence Laboratory di

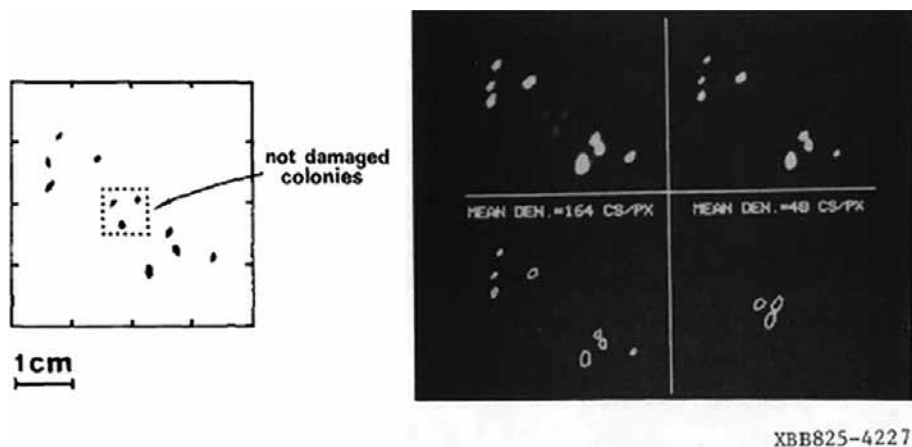


Figura 13. In alto posizione delle colonie di cellule nel campione; in basso ricostruzione della mappa di radiodensità e seguente elaborazione dei dati.

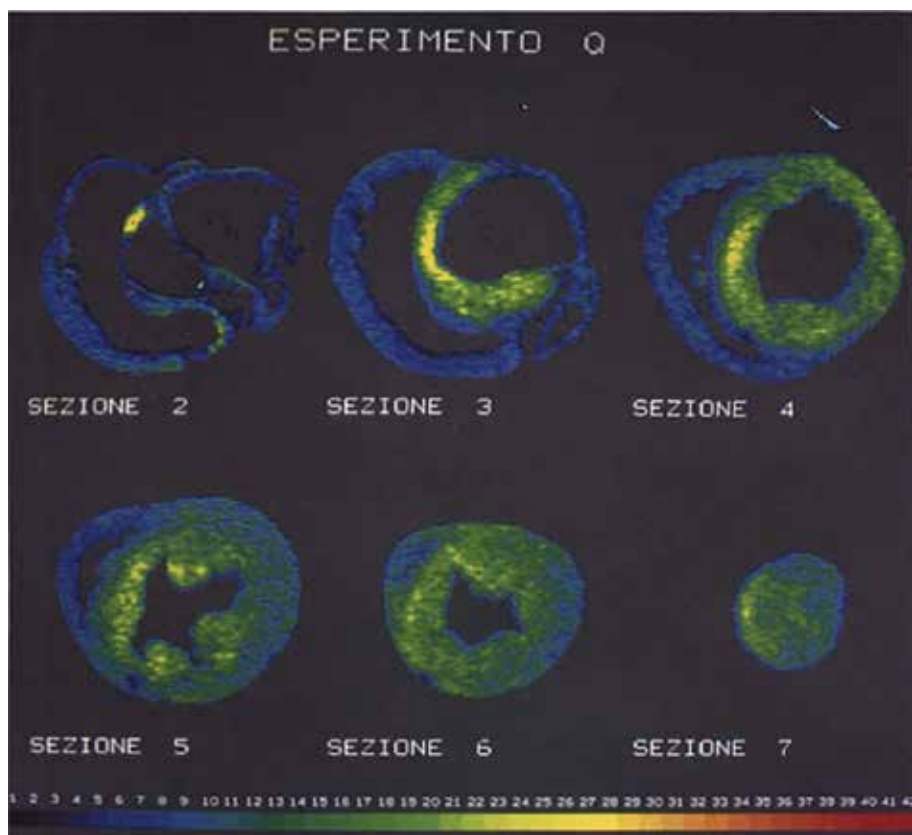


Figura 14. Mappe del consumo regionale di ^3H -deossiglucosio ottenute in autoradiografia digitale con una MWPC.

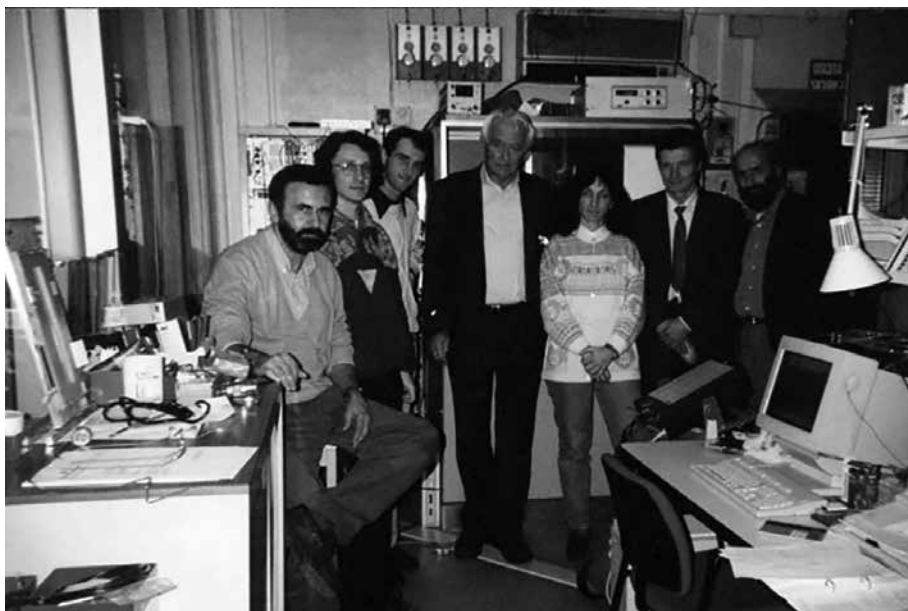


Figura 15. George Charpak con il gruppo MSGC nel laboratorio di San Piero a Grado.

Berkeley, ha portato alla costruzione del primo prototipo di “camera a emissione di positroni (PET)” [31], [32].

Parte del gruppo di Fisica Medica, inclusi i due autori di questo articolo, è passato in seguito a sviluppare rivelatori a gas e a stato solido per esperimenti di fisica delle alte energie e fisica astroparticellare, senza dimenticare tuttavia possibili applicazioni anche in campo diagnostico-medico, come la mammografia digitale.

Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare Silvia Gozzini e Carlo Bemporad per il prezioso materiale fornito e le interessanti discussioni e ricordare con affetto George Charpak per averli onorati di una visita, diversi anni fa, nel laboratorio del gruppo MSGC (MicroStrip Gas Chamber) a San Piero a Grado (figura 15).

Bibliografia

- [1] Keuffel J.W., *Parallel-Plate Counters*. Review of Scientific Instruments, 20, 1949, pp. 202-208.

- [2] Bella F., Franzinetti C., *Spark Counters*. Il Nuovo Cimento, vol. 10, n. 10, 1953, 1461-1480.
- [3] Henning P-G, *Die Ortbestimmung geladener Teilchen mit Hilfe von Funkenzaehlern*, Atomkernenergie, 2, 81, 1957 and Allkofer O.C., Henning P-G, Bagge E., Schmieder L., Atomkernenergie, 2.88, 1957.
- [4] Conversi M. (1982). *The development of the flash and spark chambers in the 1950's*. Journal de Physique Colloques, 43 (C8), 91-99.
- [5] Cranshaw T.E., de Beer J.F. *A Triggered Spark Counter*. Il Nuovo Cimento, vol. 5, 1957, pp. 1107-1116.
- [6] Fukui S., Miyamoto S., *A New Type of Particle Detector: The Discharge Chamber*. Il Nuovo Cimento, vol. 11, 1959, pp. 113-115.
- [7] Danby G., Gaillard J.M., Goulianos K., Lederman L.M., Mistry N., Schwartz M., Steinberger J., *Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos*. Physical Review Letters, Vol. 9, n. 1, 1962, pp. 36-44.
- [8] Conversi M., Gozzini A., *The "Hodoscope Chamber": a New Instrument for Nuclear Research*. Il Nuovo Cimento, vol. 2, n. 1 (C8), 1955, pp. 189-191.
- [9] Conversi M., Focardi S., Franzinetti C., Gozzini A., Murtas P., *A New Type of Hodoscope of High Spatial Resolution*. Suppl. Nuovo Cimento, vol. 4, 1956, pp. 234-237.
- [10] Charpak G., Favier J., Massonet L. *A New Method for Determining the Position of a Spark in a Spark Chamber by Measurement of Currents*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 24, 1963, pp. 501-503.
- [11] Charpak G. *et al.* *The Use of Multiwire Proportional Counters to select and Localize Charged Particles*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 62, Issue 3, 1968, pp. 262-268.
- [12] Bemporad C., Beusch W., Mellissinos A.C., Schuller E., Astbury P., Lee J.G. *Performance of a system of proportional wire chambers*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 80, Issue 2, 1970, pp. 205-212.
- [13] Bemporad C., Calvetti M., Costantini F., Guidi C., Lariccia P., *Investigation and improvement of "Flash Tube Hodoscope" properties*. INFN/TC-73/3, 1973, pp. 1-14.
- [14] Bacci C. *et al.*, *Preliminary Result of Frascati (ADONE) on the Nature of a New 3.1 GeV Particle Produced in e^+e^- Annihilation*. Physical Review Letters, Vol. 33, Issue 23, 1974, pp. 1408-1410.
- [15] Bressani T., Charpak G., Rahm D., Zupančič Č. *Filmless spark and streamer chambers*. Proc. Int Seminar (Dubna, April 15-18), 2, 75, 1969.
- [16] Walenta A.H., Heintze J., Schürlein B. *The multiwire drift chamber, a new type of proportional wire chamber*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 156, Issues 1-2, 1971, pp. 181-186.

- [17] Braccini P.L. *et al.*, *A modular drift-chamber vertex detector at the CERN ISR*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 92, Issues 3, 1974, pp. 373-380.
- [18] Antreasyan D. *et al.* *Measurement of Dimuon Production at $\sqrt{s} = 62$ GeV*. Physical Review Letters, vol. 45, n. 11, 1980, pp. 863-866.
- [19] FRAMM Collaboration, *Photoproduction of vector and scalar bosons. Status report on NA1 Experiment*. CERN/SPSC/79-112, SPSC/M 203, 1979, pp. 1-62.
- [20] Amendolia S.R. *et al.* *A set of drift chambers built for the FRAMM-NA1 spectrometer*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 176, 1980, pp. 461-468.
- [21] Bellazzini R., Del Guerra A., Massai M.M., Ragadini M., Spandre G., Tonelli G., *A MWPC with a cathode coupled delay line read-out as radioactivity detector for DNA repair studies*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 190, 198, pp. 627-638.
- [22] Bellazzini R. *et al.*, *DNA-repair deficient cells identification with a multiwire proportional chamber*. Physics Letters, vol. 92A, n. 3, 1982, pp. 154-156.
- [23] Bellazzini R. *et al.*, *Electronic autoradiography of living human cells with a MWPC*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 204, 1983, 517-523.
- [24] Bellazzini R., Del Guerra A., Massai M.M., Spandre G., *Biomedical applications of MWPCs for digital imaging of soft β^- emitters*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 217, 1983, pp. 93-96.
- [25] Angelini F., Bellazzini R., Brez A., Massai M.M., Torquati M R., *Digital imaging with advanced gaseous detectors developed at Pisa University*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. A269, 1988, pp. 430-435.
- [26] Abbondandolo A., Bonatti S., Bellazzini R. *et al.*, *Direct screening of Living Mammalian Cell Colonies for Identification of DNA Repair Deficient Mutants by a Multiwire Proportional Chamber*. Radiation Environmental Biophysics, Vol. 21, 1982, pp. 109-121.
- [27] Bellazzini R. *et al.*, *Digital imaging of regional glucose metabolism of the heart with a MWPC*. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, N. 1, 1983, pp. 1-3.
- [28] Coppini G., Valli G., Camici P., L'Abbate A., Bellazzini R., Massai M.M., Spandre G., *Digital autoradiography: Film and Electronic Multitracer Techniques for Heart Imaging*. IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. MI-3, N. 1, 1984, pp. 25-33.
- [29] Angelini F., Bellazzini R., Brez A., Massai M.M., Montesi M.C., Torquati M.R., *Measurement of bone density of the calcaneum with a new*

imaging area detector. Proc. SPIE, Science and Engineering of Medical Imaging, Vol. 1137, 1989.

- [30] Angelini F., Bellazzini R., Brez A., Massai M.M., Torquati M.R., (1989). *Bone densitometry with a high-speed, high-resolution MWPC*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 283, Issue 3, 423-430.
- [31] Del Guerra A., Lim B.C., Lum G.K., Ortendahl D., Perez-Mendez V., *Medical Positron Imaging with a Dense drift Space MultiWire Proportional Chamber*. IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. MI-1, N. 1, 1982, pp. 4-11.
- [32] Perez-Mendez V., Schwartz G., Nelson W.R., Bellazzini R., Del Guerra A., Massai M.M., Spandre G., *Further improvements in the design of a positron camera with dense drift space MWPCs*. Nuclear Instruments and Methods, Vol. 217, 1983, pp. 89-91.

Giorgio Salvini and the birth of the National Laboratory of Frascati

Susanna Bertelli*

This section is devoted to the figure of Giorgio Salvini, at that time Professor at the University of Pisa, and to the chronicle, as reported by his memories, of the main stages that brought to the realization of the National Laboratory of Frascati, animated by people working in different Italian sites of the National Institute for Nuclear Physics.

1. Physics in Italy during the fifties

The decade 1953-1963 constituted a fertile period for the physics research in Italy as it was decided to build an electron accelerator unique for intensity and energy, hosted in a dedicated national facility, and to form and prepare people who worked on this project. The accelerator achieved performance records and several experimental setups were developed producing the world's best science results, laying the technological foundation for further progress. The heredity of Enrico Fermi and his collaborators after the war, was carried on by Edoardo Amaldi whose intent was to unify under a single entity the application and the fundamental research fields of nuclear and particle physics, focused on cosmic rays experiments and accelerators [1]. Meanwhile in Europe, starting from 1949, scientists agreed in creating a nuclear physics laboratory and the result was the foundation of CERN in 1954 [2]. The first accelerator of CERN, the 600 MeV Synchrocyclotron, was built in 1957 followed by the 28 GeV Proton Synchrotron in operation in 1959.

Between 1945 and 1950 the physicists of the main Italian universities collaborated to create a community to coordinate the existing study centres in Padua, Rome, Milan, Turin and the Testa Grigia laboratory at Cervinia. At this aim, in 1951 the National Institute for Nuclear Physics (INFN) was founded and Gilberto Bernardini was elected president. Bernardini in 1953 proposed to build an electron accelerator in the energy range 500-1000 MeV [3] and

* Università di Ferrara - Laboratori Nazionali di Frascati – INFN.

professor Giorgio Salvini of the Pisa University was entrusted with the direction of the work and he constituted a group of physicists and engineers for the study and the project of the machine [1]. In the preparatory phase the group was hosted by the INFN sites in Pisa.

The diffusion of proton accelerators like those in Saclay and CERN and the idea of promoting an original machine in energy and intensity motivated the choice of an electron machine. For the constitution of the team, Salvini bet on young researchers. The team was composed by people aged between 23 and 26 and they had been formed and prepared under the supervision of Bernardini, Amaldi, Persico for the theoretical project, Quercia as coordinator of the electronic and the radiofrequency sectors, Tagliaferri who directed the vacuum system and Ageno expert in nuclear machines.

2. The synchrotron project started

2.1. Division of tasks and Frascati selected as Lab site

As reported by Salvini [4] the planning and the preliminary studies started in Pisa. The period from November 1953 and the end of 1954 was devoted to the “*irreversible decisions*” concerning the characteristics of the machine and the configuration of the lab site.

Having foreseen that there were cultural forces to fuse together, I decided to get together engineers and physicists just born to build the machine. To build and to help each other, i wanted with us the most brilliant collaborators and I personally went to search for them among the universities. No matter if they knew or not about accelerators.

The technicians were recruited from the industries. The whole personnel was selected and trained to create a solid and expert structure for the project of the machine and the realization of the experimental apparatus. During the summer of 1953 Salvini and Bernardini went in the US to visit the accelerator facilities. Thanks to the collaboration with W.Panofsky and R.Wilson and being aware of the capabilities of the Italian industries, it was decided to build an electron synchrotron and to increase the energy up to 1000 MeV. Many INFN sites in different cities were involved in the construction of the machine.

The Pisa group was devoted to the study of the magnet, magnetic measurements, vacuum, electronics and controls [4]. The team of researchers working in Rome focused on the theory and the Health Institute (Rome) worked on the injection and the injector. The Florence group worked on the radio frequency acceleration whereas in Milan the



Figure 1. The personnel moving from Pisa to Frascati (<http://w3.lnf.infn.it/multimedia/>).

research on electrolytic tank models were carried on. In April 1954, the location of the synchrotron laboratory was established to be Frascati. The science centre in Frascati was born as a inter-university facility with independent laboratories and services.

2.2. The Lab construction

During the year 1955 the Accelerator Division, team and equipment, moved to Rome in the Physics Institute of the University. Meanwhile in Frascati, the construction work started from the realization of the liquefactor and the synchrotron blocks.

In this period the work was focused on the optimization of the magnet, the magnetic field measurement system, the radiofrequency acceleration system and the vacuum system. The following year was dedicated to the characterization of the magnet carried out in collaboration with



Figure 2. The Lab site in construction, on the left the building that hosts the synchrotron is showed (<http://w3.lnf.infn.it/multimedia/>).



Figure 3. The electron synchrotron is displayed, 1958 (<http://w3.lnf.infn.it/multimedia/>).

the group of researchers in Genova, meanwhile the hydrogen and helium liquefactor have been installed to study the photon-nucleon interaction.

By the end of 1957 the magnet of the synchrotron was installed, the injection system and the Cockcroft Walton injector were optimized, the vacuum system was completed and the radiofrequency cavity was realized.



Figure 4. The storage ring AdA is shown, 1961 (<http://w3.lnf.infn.it/multimedia/>).

3. The electron synchrotron in operation and AdA project

The Cockcroft Walton injector was substituted by a Van de Graaff of higher energy and several tests have been performed up to 300 MeV before the second cavity had been installed in February 1959 reaching 1 GeV electron beam energy and an intensity 4-6 times higher with respect to the existing similar synchrotrons. As the machine development was completed, the experiments started the operation in May 1959. The experiments were mainly dedicated to two research streams [5]. One concerned the different methods of producing photons in electron-nuclei scattering. The electron beam was used to product four photon beams, in particular one of them was polarized and this constituted a peculiarity of the machine at that time, since polarized photons simplifies the phenomenological interpretation of the photon-nucleon interaction. Between 1960 and 1964 several experiments focused on coherent Brehmsstrahlung were performed leading to the tuning of a new method to produce high energy polarized photon beams.

The other research stream was related to the investigation of the proton structure and the new mesons. Among the results obtained, there was the discovery of the eta meson decay in two photons contributing to the development of the SU_3 theory.

Before leaving the direction of the laboratory, Salvini approved the AdA project. AdA (Anello di Accumulazione) namely storage ring is the

first matter-antimatter storage ring proposed as a feasibility study by Bruno Touschek that is the starting point of a revolution in the field of accelerators. This prototype consists in a 1.5 m diameter ring able to accelerate two beams (electrons and positrons) up to 250 MeV. This energy is sufficient to create a muon pair in the annihilation process. AdA successfully showed the possibility of using a new approach in studying high energy Physics through matter-antimatter head-on collisions.

This report illustrates the main phases of the construction of first National facility in Italy dedicated to nuclear physics research under the guide of Giorgio Salvini. The project involved several research centers in Italy and young people was formed in the accelerator research and construction fields. In the first years of activity, the facility hosted the 1 GeV electron synchrotron that provided important results for the production of photon beams and the first matter-antimatter storage ring AdA that opened the doors to modern accelerators.

References

- [1] Valente, V., *Strada del sincrotrone km 12*, Imprimenda Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, 2007.
- [2] Cern, <https://timeline.web.cern.ch/timelines/The-history-of-CERN>.
- [3] Battimelli, G., *L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Storia di una comunità di ricerca*, Laterza 2001.
- [4] Salvini, G., *L'elettrosincrotrone e i Laboratori Nazionali di Frascati*, Zanichelli Bologna, 1962.
- [5] Salvini, G., *L'uomo, un insieme aperto*, Mondadori Università, 2010.

Experiments at the CERN PS and SPS, and other memories

Luigi Di Lella*

1. Introduction

In this article I first describe the beginning of my career as an experimental physicist when I was still a student at the University of Pisa and Scuola Normale Superiore (Section 2, corresponding to the “other memories” in the title). In the following sections, I describe three experiments, all performed at CERN in collaboration with groups from Pisa: an experiment to study elastic scattering from polarized protons using hadron beams of several GeV from the Proton Synchrotron (PS); the last phase of the UA2 experiment at the CERN proton-antiproton collider (SS); and an experiment to study neutrino oscillations using neutrinos from the 450 GeV Super Proton Synchrotron (SPS).

2. First steps in particle physics (1958-59)

I became interested in particle physics sometime in the early months of 1958, while I was in my 3rd year of physics, after attending a seminar by Prof. Radicati on parity violation, which had been discovered in the previous year. I was impressed by the clever and elegant way to detect the angular asymmetry of electrons from muon decay by rotating the muon magnetic moment in a magnetic field, thus turning the angular asymmetry into a time modulation of the electron signal from a single detector in a fixed position [1]. So, after finishing my examinations, in July 1958 I approached Marcello Conversi, who led the experimental particle physics group in Pisa, and I asked him if he would accept me in his group and eventually assign me a thesis subject to obtain a physics degree (the Italian “Laurea”). He gave me a favourable response and invited me to spend the summer learning about particle detectors by helping on an on-going cosmic ray experiment.

* CERN.

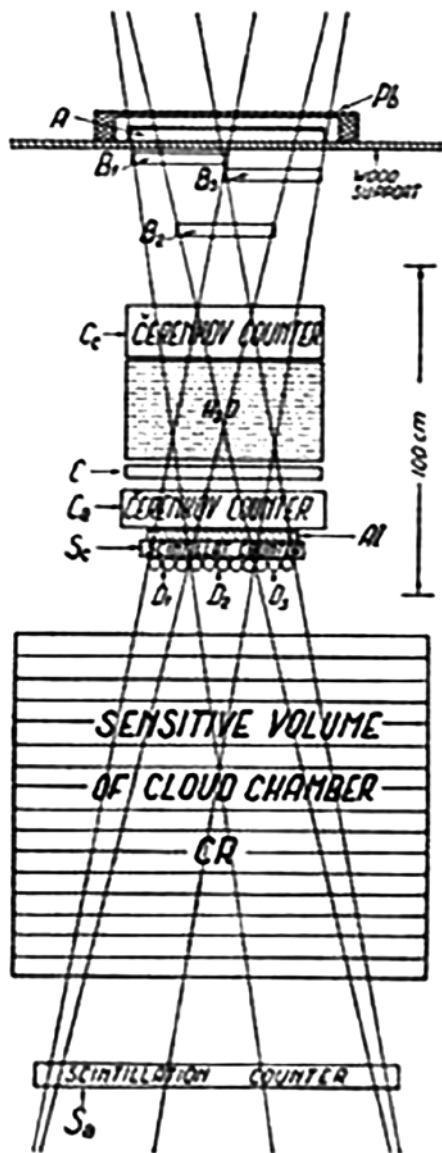


Figure 1. The 1958 detector of the Milan – Pisa collaboration to search for new charged particles with mass $\sim 550 m_e$ in the cosmic radiation.

The experiment was being carried out by a Milan – Pisa collaboration at the Sabbione Cosmic Ray Laboratory, 2550 m above sea level (a.s.l.) in the Italian Alps, close to the Swiss border. This experiment was a search for charged particles with mass ~ 550 electron masses (m_e), whose existence had been reported [2] from a cosmic ray experiment in the Armenian Caucasus (former USSR) at 3200 m a.s.l. The 1958 configuration of the Milan – Pisa detector [3] is shown in figure 1.

Only particles coming to rest in the multi-plate cloud chamber were selected by the trigger using the bottom liquid scintillation counter S_a as a veto, and their mass was determined by the simultaneous measurement of their ionization in the liquid scintillation counter S_c (see figure 1) and residual range in the 17 0.3 cm thick plexiglas plates contained in the cloud chamber. Additional particle identification was provided by the two water Čerenkov counters C_c and C_a which were used to identify particles stopping in the cloud chamber: while light particles (pions or muons) would produce Čerenkov light in both counters and protons in neither one, particles with mass $\sim 550 m_e$ were expected to emit Čerenkov light only in the top counter C_c .

Data taking finished at the end of 1958. No particle with mass consistent with 550 me was observed [3], to be compared with 25 expected par-

ticles assuming that the results reported by the experiment in the Armenian Caucasus [2] were correct.

The design and construction of the Milan – Pisa detector, and the analysis of early data from 1957, had been the subject of Carlo Rubbia's thesis. Photos of Marcello Conversi and Carlo Rubbia are shown in figure 2.

During the month of September 1958 Marcello Conversi and his group wrote a proposal [4] for an experiment to measure the longitudinal polarization of neutrons emitted by μ^- capture in Mg nuclei at the CERN 600 MeV Synchrocyclotron (SC). These neutrons, produced by the reaction $\mu^- + p \rightarrow \nu + n$, were predicted by the V – A theory have 100% longitudinal polarization. The choice of Mg as the μ^- stopping material was a compromise between the fraction of μ^- captures ($\sim 50\%$ in Mg) and the neutron depolarization from final-state interaction with the other nucleons. This experiment, which was approved by the CERN Experimental Committee at the end of 1958, became the subject of my thesis to obtain a physics degree from the University of Pisa. The proposed apparatus is shown in figure 3.

Negatively charged muons from the CERN SC are brought to rest in the Mg target T (see figure 3) and the longitudinal polarization of neutrons emitted by μ^- capture in Mg is transformed into transverse polarization by precessing the neutron magnetic moment in the static field generated by the dipole magnet M. The transverse polarization so obtained is then measured by a polarimeter, which consists of a high-pressure He_4 scintillation counter and two liquid scintillator neutron detectors, denoted as L and R in figure 3. For 100% transverse polarization, a large right – left asymmetry is expected from $n - \text{He}_4$ elastic scattering at large angles (around $\sim 135^\circ$).

The He_4 counter where neutron scattering occurs uses the scintillation properties of high-purity helium in the far UV region. The design of this counter [5], built in the mechanical workshop of the Pisa Physics Institute, is shown in figure 4. It consists of a stainless steel vessel with a thick glass window, filled with spectroscopically pure helium at 100



Figure 2. (Left) Marcello Conversi in a 1976 photo; (Right) Carlo Rubbia in a 1957 photo.

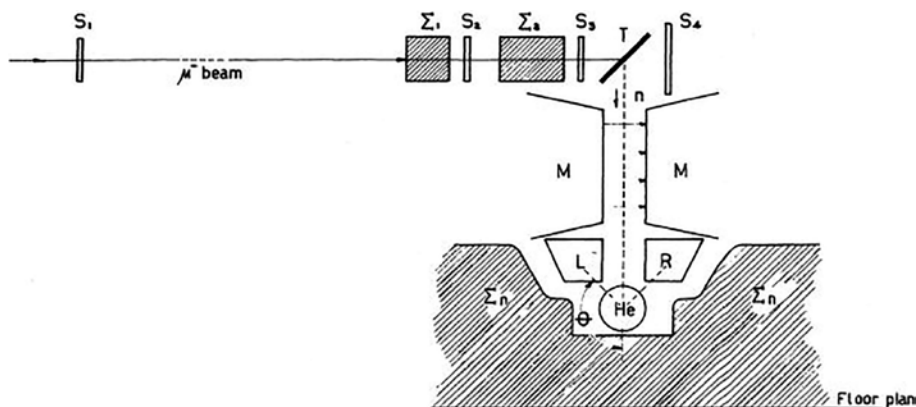


Figure 3. Side view of the apparatus to measure the neutron longitudinal polarization from μ^- capture.

atmospheres. The inner walls of the counter are first coated with MgO, and further coated by a suitable wave-length shifter which is also deposited onto the glass window. The scintillation light is thus shifted into the visible band and is collected by a photomultiplier tube. The energy of neutrons undergoing scattering in the He_4 counter, and then detected by the L or R counters, is determined to $\pm 10\%$ by measuring the He_4 signal amplitude. A Po210 α - source is mounted inside the vessel to continuously monitor the counter response.

In the early months of 1959 Marcello Conversi moved to the University of Rome. His collaborators (at that time, A. Egidi, C. Rubbia and M. Toller) also moved to Rome, while I remained in Pisa because I was still a student there. So I began a life of commuter (by train) between Pisa, where I still followed courses and had to pass exams, and Rome, where the group had the laboratory. During one of this trips to Rome I took with me in my suitcase the He_4 counter filled with 100 atmosphere helium.

During the summer 1959 the He_4 counter and the associated liquid scintillator neutron detectors were tested using 14 Mev neutrons from the D - T reaction at a 200 keV Cockroft - Walton accelerator which had been built in the 1930s on the 6th floor of the Advanced Institute for Public Health (Istituto Superiore di Sanità) in Rome.

Sometime near the end of 1959 the physics interest of the group shifted from the measurement of the longitudinal neutron polarization from μ^- capture to the search for neutrinoless μ^- capture: $\mu^- + \text{Cu} \rightarrow e^- + \text{Cu}$. This "forbidden" process was expected to occur mainly coherently on Cu, resulting in the emission of a mono-energetic electron of ~ 105 MeV, which was much easier to detect than measuring the neutron po-

larization (before the discovery of the second neutrino in 1962, the absence of “forbidden processes”, such as $\mu \rightarrow e + \gamma$ decay or the neutrinoless μ^- capture, was a puzzle). Luckily for me, the work which I had done on the preparation of the experiment to measure the neutron polarization from μ^- capture was deemed sufficient to obtain a degree in physics. I received my degree at the end of November 1959 and then I joined the rest of the group at the University of Rome.

To my knowledge, the longitudinal polarization of neutrons from μ^- capture has never been measured, neither at CERN nor elsewhere.

3. High-energy scattering on polarized protons (1967-1971)

A target containing polarized protons suitable for particle physics experiments had been developed in Saclay at the end of the 1950s by Abragam and collaborators [6]. It was brought to CERN in 1962, to be used in an experiment to measure the Ξ^- parity relative to the proton by measuring the sign of the right – left asymmetry in the process $K^- + p \rightarrow K^+ + \Xi^-$. This was deemed to be an important measurement in those years because hadrons (mesons and baryons) were being classified into SU(3) multiplets, with all particles in the same multiplet having the same spin and parity.

The target consisted of an LMN crystal (chemical formula $\text{La}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) cooled to 1°K in a 1.8T magnetic field. A ~70 GHz microwave applied to the crystal produced ~70% polarization of the free protons, which could be reversed by a slight change (~0.24%) of the microwave frequency. The fraction of free, polarized protons in the LMN crystal was only 1/16.

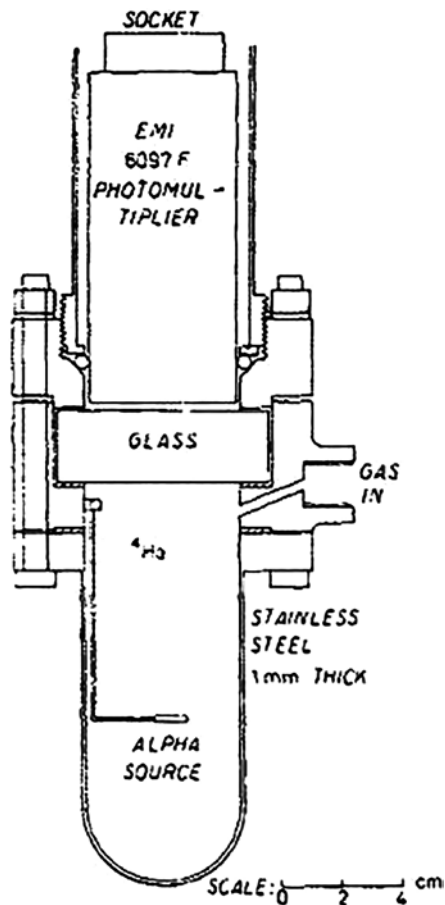


Figure 4. Details of the He_4 counter [5].

The experiment to measure the relative Ξ^- – proton parity ended in 1963 producing only marginal results which were never published. A program to measure polarization effects in high-energy scattering at the CERN PS was then started, initially motivated only by the presence at CERN of the polarized target and of a strong support group led by Michel Borghini, who had joined CERN from Saclay.

Elastic scattering of spin-0 mesons, such as pions, on polarized protons gives rise to an additional term in the differential cross-section:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)_0 (1 + \vec{P}_0 \cdot \vec{P}_T) \quad (1)$$

where $(d\sigma/dt)_0$ is the differential cross-section on unpolarized protons, t is the square of the four-momentum transfer, $\vec{P}_T$ is the target polarization, and $\vec{P}_0$ is the so-called polarization parameter, given by:

$$\vec{P}_0 = \frac{2\text{Im}(f^*g)}{|f|^2 + |g|^2} \cdot \frac{\vec{k}_i \times \vec{k}_f}{|\vec{k}_i \times \vec{k}_f|} \quad (2)$$

where $\vec{K}_i$ ($\vec{K}_f$) is the initial (final) momentum in the centre-of-mass system, and f, g are the so-called non-spin-flip and spin-flip scattering amplitudes, respectively, both functions of t . The parameter to be measured, is a vector perpendicular to the scattering plane. Both its magnitude and direction can be determined with negligible systematic uncertainties by measuring the rate of scattered particles in a fixed-position detector for the two directions of the target polarization (see Eq. 1).

Before the start of the experiments, qualitative theoretical arguments based on the relation between the elastic scattering amplitude and the total cross-section, suggested that P_0 should be zero at high energies because of the large number of inelastic channels. First results by a CERN – Orsay (IPN) collaboration on π^- scattering at 6, 8 and 10 GeV reported [7] P_0 values between 0.2 and 0.1 in the forward peak ($-t < 0.6 \text{ GeV}^2/c^2$), decreasing with increasing beam energy. These results were interpreted in the framework of the Regge-pole model as resulting from the interference of the Pomeron non-spin-flip amplitude with the ρ -pole spin-flip-amplitude [8].

Following these results, the study of high-energy scattering on polarized protons became an important activity in particle physics, and elastic scattering experiments using polarized proton targets were started also at the Alternating Gradient Synchrotron (AGS) of Brookhaven National Laboratory (BNL), and on the charge-exchange reaction $\pi^- + p \rightarrow p^0 + n$ at CERN.

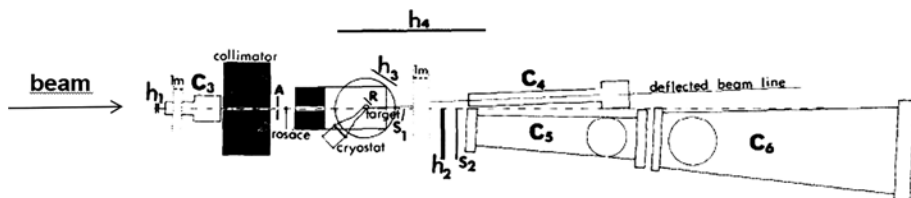


Figure 5. The CERN – Orsay – Pisa apparatus to measure elastic scattering from polarizes protons.

Additional predictions of the Regge-pole model were that should have opposite directions for π^+ and π^- , and it should be zero at $-t \approx 0.5 \text{ GeV}^2/c^2$, where the ρ -pole amplitude vanishes [8]. Both these results were consistent with the early measurements from the CERN-Orsay collaboration [7], [9].

In 1967 a new experimental program to measure high-energy elastic scattering on polarized protons was started at CERN. It used two major technical advancements:

- a method to slowly extract the circulating proton beam into a ~ 1.5 s long spill had been developed at the CERN PS, allowing the production of secondary beams from external targets in the newly built East Experimental Hall with much higher intensity than beams used in previous experiments which were derived from internal targets;
- a new polarized target consisting of 95% butanol (C_4H_9OH) and 5% water was developed [10], becoming operational in 1969. It reached 65% polarization and contained 25% free, polarized protons, four times more than in the LMN target used in the previous experiment.

A group from Pisa (G. Bellettini, P.L. Braccini, T. Del Prete, L. Foà, P. Laurelli, G. Sanguinetti and M. Valdata) joined the CERN – Orsay collaboration. The layout of the experimental apparatus, which was installed in the PS East Hall, is shown in figure 5.

The angle of the scattered particle was measured by the scintillator hodoscope h_2 , while the angle of the recoil proton was measured by hodoscopes h_3 and h_4 . Furthermore, incident and scattered particles were identified using threshold gas Čerenkov counters C_1 to C_5 (the upstream C_1 and C_2 are not visible in figure 5). The Pisa group designed and built counters C_5 and C_6 (see figure 5).

The experiment took data between 1967 and 1970. The polarization parameter P_0 in $\pi^\pm - p$ and $p - p$ elastic scattering was measured [11], [12], [13] at 6, 10, 14 and 17.5 GeV for $-t < 2 \text{ GeV}^2/c^2$, and also in $K^\pm - p$ and $\bar{p} - p$ scattering [11], [14] at 6, 10 and 14 GeV for $-t < 1 \text{ GeV}^2/c^2$.

Scattering on the free, polarized protons was distinguished from scattering on bound protons by coplanarity and by the measured opening

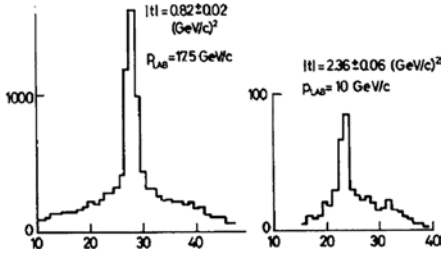


Figure 6. Opening angle (degrees) between scattered particle and recoil proton.

angle between the scattered particle and the recoil proton, as shown in figure 6.

Figure 7 displays the measured polarization parameter [12] in $\pi^\pm - p$ scattering at 10, 14 and 17.5 GeV as a function of $|t|$. The simple Regge pole model that had fitted the previous data did not give an acceptable fit to

these new, more precise measurements. Reasonable fits could still be obtained by adding contributions from additional Regge trajectories, at the cost of adding at least two arbitrary fitting parameters for each trajectory.

An additional test of the Regge pole model was provided by studies of the charge-exchange reaction $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$. Data taken with an unpolarized hydrogen target, both at the AGS [15] and at CERN [16], had been successfully fitted by a simple Regge pole model with only one trajectory (the ρ -meson), which described quantitatively the observed energy dependence of the differential cross-section and the shrinking of the forward peak with increasing energy [8]. This model predicted that the polarization parameter should be zero, because the two amplitudes f and g (see Eq. 1) from the same Regge trajectory have the same phase.

To verify this prediction, an experiment was performed at the CERN PS by a Saclay – Orsay – Pisa collaboration [17] (the Pisa group consisted of I. Mannelli, F. Sergiampietri and L. Vincelli). The apparatus is shown in figure 8. The two photons from π^0 decay were detected by a spark chamber equipped with Pb plates (denoted as SC in figure 8), while the outgoing neutron was detected by two arrays of 16 scintillation counters (denoted as NC-L and NC-R in figure 8). The experiment took data at beam energies of 5.9 and 11.2 GeV. Figure 9 displays the measured polarization parameter [17] as a function of $-t$.

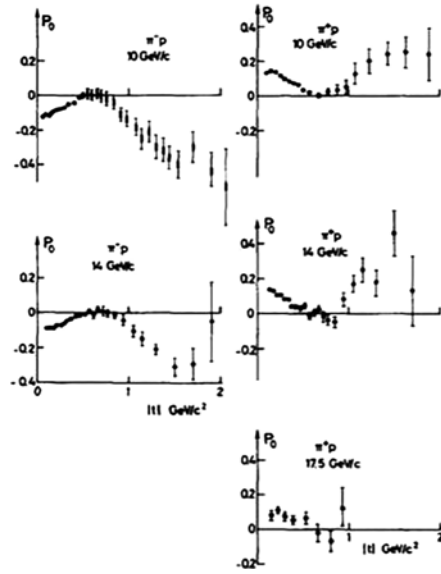


Figure 7. P_0 vs. $|t|$ for $\pi^\pm p$ elastic scattering at 10, 14 and 17.5 GeV.

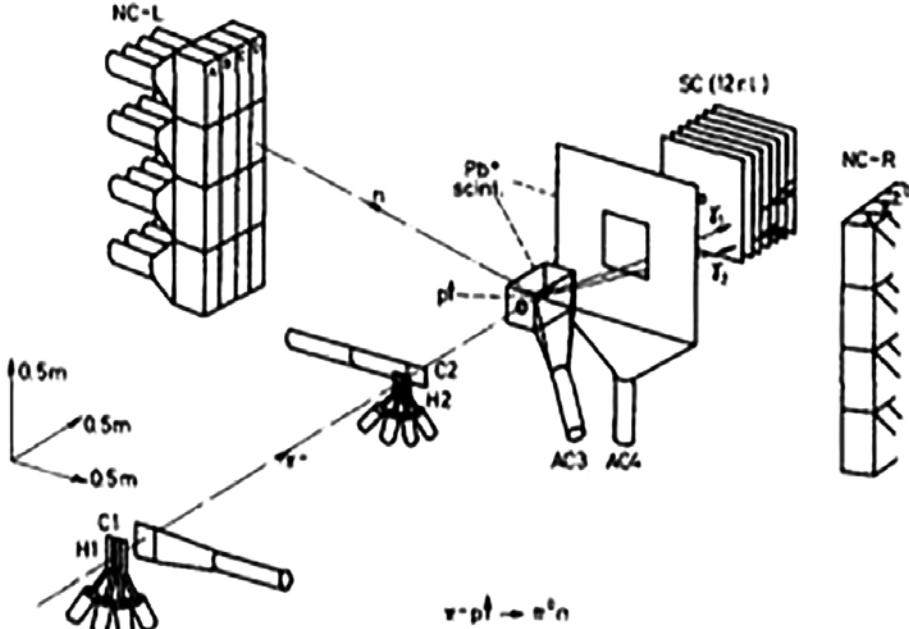


Figure 8. Schematic view of the experimental apparatus to study the $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ reaction on polarized protons. The polarized target cryostat and magnet are not shown.

Averaging over the interval $0.04 < -t < 0.24 \text{ GeV}^2/c^2$, one obtained $\langle P_0 \rangle = +0.160 \pm 0.035$ at 5.9 GeV, and $\langle P_0 \rangle = +0.140 \pm 0.045$ at 11.2 GeV, in disagreement with the predictions of a Regge pole model with only one trajectory. Adding a second trajectory associated with a hypothetical ρ' -meson would give rise to polarization effects which decrease rapidly with the beam energy E (faster than $1/E$), again in disagreement with the experimental results. More elaborate models with a larger number of free parameters would be needed to explain these results.

Because of the results of the experiments on elastic scattering and πp charge-exchange with polarized proton targets, by the end of the 1960s these experiments, and the use of Regge pole models to describe two-body processes at high energy, had lost most of the initial interest. At the same time, new, unexpected phenomena had been discovered, such as the violation of CP symmetry in K^0 -meson decay [18], and the presence of electrically charged, point-like constituents of protons and neutrons [19]. Also, it was demonstrated that the unified electroweak theory with spontaneous symmetry breaking (the so-called Higgs mechanism) was a renormalizable theory [20]. All of these results changed the focus of particle physics in the late 1960s – early 1970s, leading to the formulation of the Standard Model as it is known today.

Table 1. CERN proton – antiproton collider operation (1981-1990).

Year	Collision Energy (GeV)	Peak luminosity ($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Integrated Luiminosity (cm^{-2})
1981	546	$\sim 10^{27}$	2×10^{32}
1982	546	5×10^{28}	2.8×10^{34}
1983	546	1.7×10^{29}	1.5×10^{35}
1984-85	630	3.9×10^{29}	1.0×10^{36}
1987-90	630	3×10^{30}	1.6×10^{37}

4. The UA2 experiment at the CERN proton-antiproton collider

Table 1 shows the operation of the CERN proton – antiproton collider ($S\bar{p}pS$) from its first operation in the last months of 1981 to its shut-down in 1990.

In the 1981 run the production of hadronic jets at high transverse momentum (p_T) was observed [21]. It was followed in the 1982 run by the first observation of the W boson through its leptonic decay to electron by the UA1 [22] and UA2 [23] experiments. Then, in the 1983 run, the decay of the Z boson to electron or muon pairs was observed by UA1 [24], and to electron pairs by UA2 [25].

In the two following years (1984-85), with the UA1 and UA2 detectors practically unchanged, the $S\bar{p}pS$ total centre-of-mass energy, $\sqrt{s}$ was increased to from 546 to 630 GeV. By the end of the 1985 run, the UA1 experiment had recorded 290 $W \rightarrow e\nu$, 33 $Z \rightarrow e^+e^-$, 57 $W \rightarrow \mu\nu$ and 21 $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ events [26], while UA2 had recorded samples of 251 $W \rightarrow e\nu$ and 39 $Z \rightarrow e^+e^-$ events [27] (UA2 had no muon detector).

During the years 1986-87 the antiproton source was improved by the addition of a second ring, called Antiproton Collector and built around the existing Antiproton Accumulator (AA), as shown in figure 10. The AC had a much larger acceptance to single $\bar{p}$ pulses from the PS, thus increasing the $S\bar{p}pS$ peak luminosity by almost one order of magnitude (see table 1). The UA2 detector was also upgraded with new forward calorimeters to provide full angular coverage to both electrons and hadrons and a new central tracker was built. Figure 11 shows a photo of the upgraded UA2 detector.

In the first years of $S\bar{p}pS$ operation, from 1981 to 1985, the UA2 detector had been equipped with full calorimetry (both electromagnetic and hadronic) between 40° and 140° with respect to the beam direction, only electromagnetic calorimeters between 20° and 37.5° , and no detector at all under 20° . The new, “hermetic” calorimeters (see figure 12) greatly im-

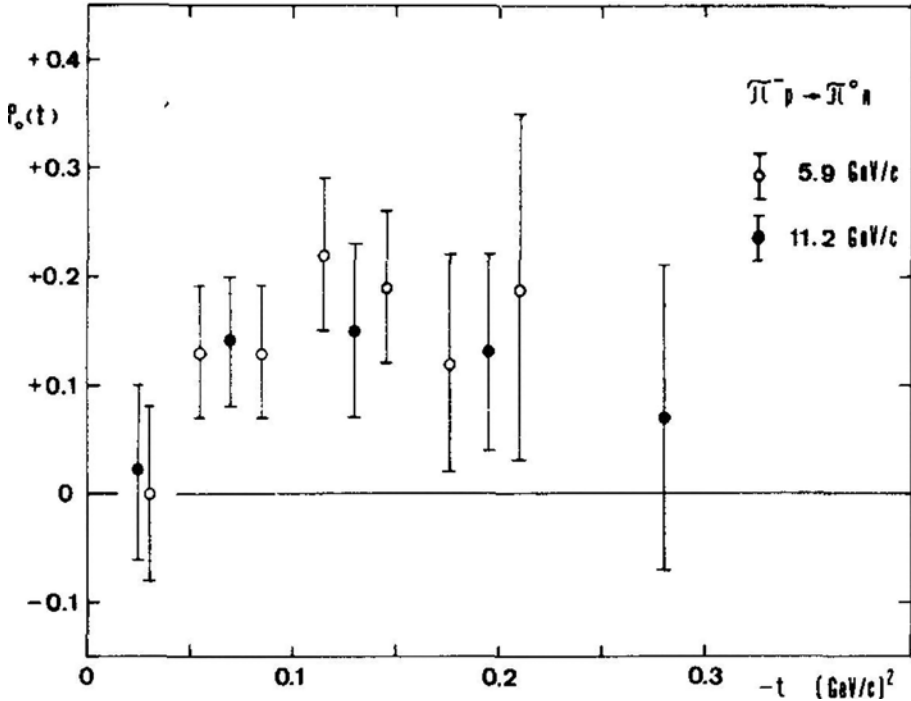


Figure 9. P_0 vs. $|t|$ for $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ at 5.9 and 11.2 GeV.

proved the UA2 capability to measure the missing transverse momentum (p_T^{miss}), a quantity which had been invaluable in detecting outgoing, high- p_T neutral particles escaping direct detection, such as neutrinos from $W \rightarrow e\nu$ decay.

The upgraded UA2 detector included a new central tracker (see figure 12) consisting of the following items:

- two layers of Silicon pad detectors for dE/dx measurement;
- a drift chamber (Jet Vertex Detector, denoted as JVD in figure 12);
- a Transition Radiation Detector (TRD) for electron identification;
- a Scintillating Fiber Detector (SFD) consisting of scintillating fibers read out by image intensifiers and CCDs and including a “preshower” detector (a 1.5 radiation length thick Pb converter followed by additional layers of scintillating fibers).

Several new groups joined the UA2 collaboration, among which a group from Pisa which designed and built the JVD chamber [28]. The sensitive volume of this cylindrical detector was 1 m long with a radius between 40 and 123.8 mm with respect to the beam axis. It was subdivided into 16 independent azimuthal sectors, each consisting of 13 sensitive layers (see figure



Figure 10. The CERN antiproton source after 1986: the Antiproton Collector (AC, outer ring) and the Antiproton Accumulator (AA).

13). The space resolution in the transverse plane was 0.18 mm, while charge division between the two ends of a sense wire provided a measurement of the longitudinal coordinates with a precision of 2.5 mm. The two-track separation was ~ 2 mm. The geometry of one JVD sector is shown in figure 13.

One of the main physics goals of the 1987-90 runs was the discovery of the top quark. At $\sqrt{s} = 630$ GeV this was only possible if the decay $W^+ \rightarrow t\bar{b}$ followed by the semileptonic decay of the t -quark to $b e^+ \nu$ (and charge-conjugate decays). These events were expected to have two hadronic jets (from the $b\bar{b}$ pair), an electron and sizeable p_r^{miss} from the undetected neutrino. Furthermore, their rate could be reliably predicted from the measured W production rate and its branching ratio for $t\bar{b}$ decay which could be calculated as a function of the top mass, m_{top} . For m_{top} close to the W mass value, or larger, top production is dominated by $t\bar{t}$ -pair production from gluon-

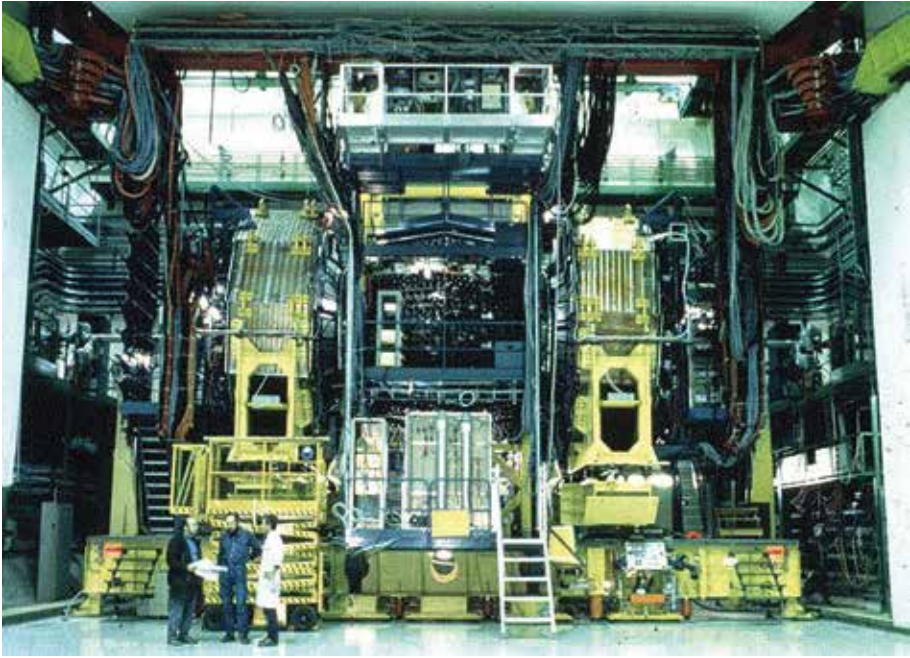


Figure 11. The upgraded UA2 detector (1987-1990).

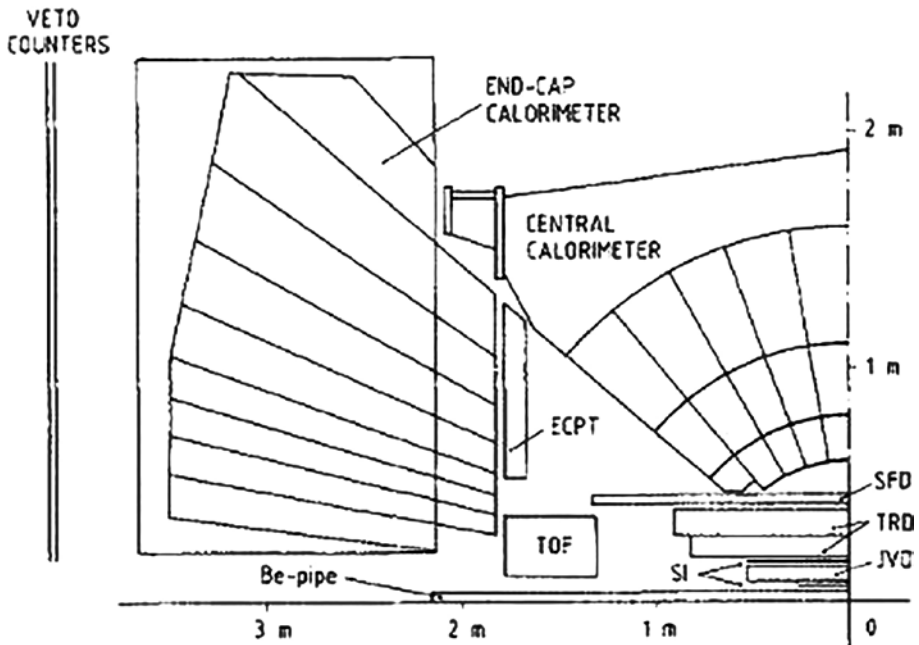


Figure 12. Schematic longitudinal view of one quadrant of the upgraded UA2 detector (1987-1990).

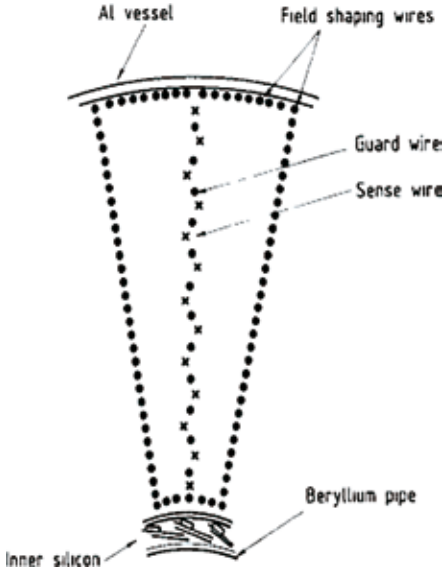


Figure 13. Geometry of one JVD sector.

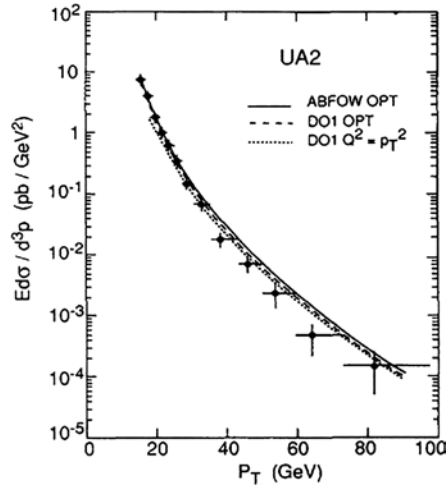


Figure 14. Invariant cross-section for prompt photon production vs. p_T . The curves are next-to-leading order QCD calculations with three different structure functions.

gluon fusion or quark-antiquark annihilation, two QCD processes having cross-sections too small to be observed at the $S\bar{p}pS$ energy.

Six events consistent with $W^+ \rightarrow t\bar{b}$ decay, followed by t -decay to an electron or a muon, had been reported [29] by UA1 in 1984, suggesting $30 < m_{top} < 50 \text{ GeV}/c^2$, but they were not confirmed by the additional 1984-85 data. From the data collected during 1988-89 UA2 reported no evidence for such events [30], implying $m_{top} > 69 \text{ GeV}/c^2$ at 95% confidence. The top quark was finally discovered [31] in 1994 by the CDF experiment at the Fermilab collider ($\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$) with a mass $m_{top} \approx 175 \text{ GeV}/c^2$.

Another physics goal of the 1987-90 $S\bar{p}pS$ runs was the search for physics beyond the Standard Model. Much excitement had been generated in 1984 following the UA1 observation [32] of unexpected events with large p_T^{miss} and one high- p_T hadronic jet. The initial interpretation [33] of these events, named “monojets”, was high- p_T production of a pair of new particles predicted by Super-Symmetry (SUSY), of which one was the lightest, electrically neutral SUSY particle escaping detection and the other gave rise to the observed hadronic jet. These events were finally interpreted as due to backgrounds from several Standard Model processes involving QCD corrections to W or Z production, or $W \rightarrow \tau\nu$ decay followed by τ hadronic decays. However, searches for SUSY particles, and also for particles predicted by other extensions of the Standard Model, received much attention during the last years of $S\bar{p}pS$ operation. In particular, the UA2 collaboration performed searches for SUSY partners of the electron and W

($\tilde{e}$ and $\tilde{W}$) [34], for $\tilde{q}$ and $\tilde{g}$ [35], for charged Higgs scalars [36], for scalar “leptoquarks” [37], and for quark compositeness [38]. All of these searches gave negative results. Until now, no physics beyond the Standard model has yet been discovered.

The UA2 experiment also provided improved measurements of W and Z production cross-sections [39] and p_T distributions [40]. A special study with valuable contributions

from the Pisa group was the measurement of single and double prompt photon production at high p_T . In this study [41], [42] the background from hadronic jets containing unresolved photons from π^0 decay was reduced by isolation criteria, and the fraction of prompt photons in the final sample was estimated from the measured conversion probability in the 1.5 radiation-length thick preshower detector located in front of the electromagnetic calorimeter. Figure 14 shows the invariant cross-section for prompt photon production as a function of transverse momentum. These data were used to extract the gluon structure function of the proton [43].

An original contribution from the Pisa group was the first direct measurement of the $W - \gamma$ coupling [44]. This analysis was performed by selecting events with a high- p_T electron, a high- p_T photon and large p_T^{miss} , as expected from $W \rightarrow e\nu\gamma$ decay. The selection required $p_T > 10$ GeV/c for the electron, $p_T > 4.5$ GeV/c for the photon and $p_T^{\text{miss}} > 20$ GeV/c. In addition, the transverse mass of the $e\nu$ pair, M_T , calculated using the electron transverse momentum vector, the p_T^{miss} vector and their azimuthal separation, was required to be larger than 40 GeV/c². A total of 16 events were selected, with an estimated background of 6.8 ± 10.0 events, giving a signal of $9.2^{+5.2}_{-3.2}$ events, in agreement with Standard Model expectations.

In the last years of collider operation the upgraded UA2 detector collected 2065 $W \rightarrow e\nu$ and 251 $Z \rightarrow e^+e^-$ events [45]. Figure 15 shows the transverse mass distribution of the $e\nu$ pairs from W decay, while figure 16 shows the invariant mass distribution of the e^+e^- pairs from Z decay (for $W \rightarrow e\nu$ decays the longitudinal component of the neutrino momentum along the beam axis cannot be measured at hadron colliders and only the $e\nu$ transverse mass can be used). These samples were used to measure precisely the mass ratio m_W/m_Z , because the systematic uncertainty on the mass scale associated with the calorimeter calibration (of the order of 1% in UA2) largely cancels in this ratio.

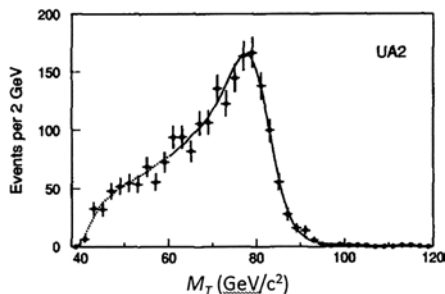


Figure 15. Transverse mass distribution of $e\nu$ pairs for 2065 $W \rightarrow e\nu$ decays. The curve is a best fit using m_W as a free parameter.

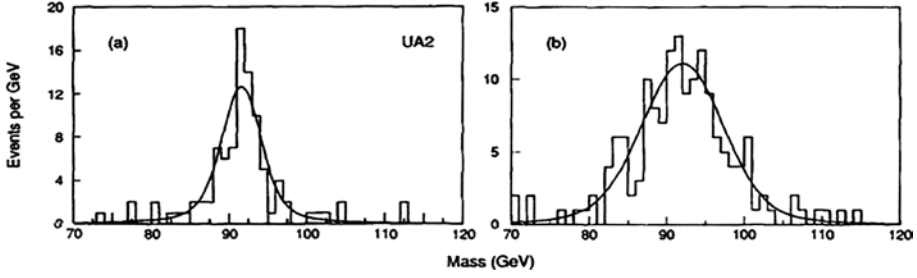


Figure 16. e^+e^- pair invariant mass distribution for (a) 95 events with both electrons falling in the calorimeter fiducial region; (b) 156 events with one electron falling outside the fiducial region. The curves are best fit using m_z as a free parameter.

The best fits to the distributions of figure 15 and figure 16 gave:

$$m_w/m_z = 0.8813 \pm 0.0036 \pm 0.0019.$$

where the first error is statistical and the second one is a small systematic uncertainty which takes into account a possible calorimeter non-linearity.

By 1991 a precise measurement of m_z from LEP experiments had become available [46], $m_z = 91.175 \pm 0.021$ GeV/c². Multiplying this value with the ratio m_w/m_z measured by UA2 provided a determination of m_w with a precision of 0.46%:

$$m_w = 80.35 \pm 0.33 \pm 0.17 \text{ GeV}/c^2.$$

This value was used to obtain bounds on the top quark mass. As shown by Veltman [47], within the frame of the Standard Model m_w depends quadratically on the top quark mass through electroweak radiative corrections from virtual fermion loops (and also, to a much smaller extent, on the mass of the Higgs boson, not yet known at that time).

As illustrated in figure 17, the combined UA2 + LEP m_w value gave:

$$m_{\text{top}} = 160^{+50}_{-60} \text{ GeV}/c^2.$$

suggesting a heavy quark top well before its discovery [31] (the present world average is [48] $m_{\text{top}} = 173.21 \pm 0.51 \pm 0.71$ GeV/c²).

5. The NOMAD experiment

In 1992 the GALLEX experiment on solar neutrinos reported [49] the observation of a ν_e “deficit” of ~50% also for low-energy solar neutrinos ($E_\nu < 0.8$ MeV). These neutrinos are the dominant component of the solar

neutrino spectrum, hence their flux can be predicted with small uncertainties from the measured Sun luminosity. The GALLEX result strengthened the hypothesis that neutrinos oscillate and, therefore, have non-zero masses.

Theorists had already suggested that the third neutrino (ν_τ), with a mass between 10 and 70 eV/c², could be the main component of hot dark matter in the Universe [50], [51]. It was also speculated that large neutrino mixing angles are theoretically implausible, therefore one should search for $\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillations with small mixing angles [51].

Two experiments to search for $\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillations were performed at CERN in the 1990s, both using the wide-band neutrino beam from the SPS:

- CHORUS, which used a neutrino target consisting of 800 Kg of nuclear emulsion. It aimed at detecting τ production and subsequent decay by observing the τ -decay vertex at an average distance of ~ 1 mm from the ν_τ interaction point;
- NOMAD (Neutrino Oscillation Magnetic Detector), which aimed at detecting τ production using the different final-state configurations expected for ν_τ Charged-Current (CC) interactions with respect to ν_μ , ν_e CC and Neutral-Current (NC) interactions.

One of the main kinematic criteria used by NOMAD to separate ν_τ CC from ν_μ or ν_e CC interactions was the measurement of the p_τ^{miss} vector expected from the presence of one or two undetected neutrinos from τ -decay. To this purpose, it was necessary to measure the momenta and energies of all secondary particles produced in neutrino interactions. Figure 18 shows the NOMAD detector, which included trackers, calorimeters and a Transition Radiation Detector (TRD) for electron identification [52]. Given the average ν_μ energy (~ 24 GeV) and the distance between the beginning of the beam decay tunnel and the front of the NOMAD detector (~ 700 m), the experiment was sensitive to $\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillations with $\Delta m^2 > 1$ eV², reaching maximal sensitivity at $\Delta m^2 \approx 100$ eV².

The main components of the NOMAD detector were:

- the neutrino target, consisting of 144 drift chamber planes made of light, low-Z material (average density ~ 0.1 g/cm³), for a total mass

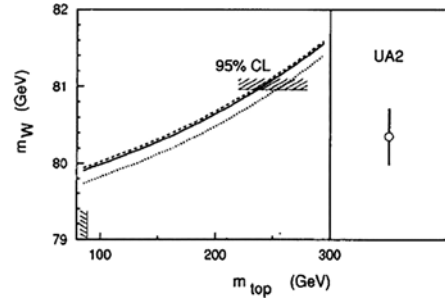


Figure 17. m_W versus m_{top} . The curves are Standard Model predictions for fixed m_Z (as measured at LEP) for different values of the Higgs boson mass: 50 GeV/c² (dashed curve); 100 GeV/c² (solid curve); 1000 GeV/c² (dotted curve). The data point is the combined UA2 + LEP m_W value (see text).

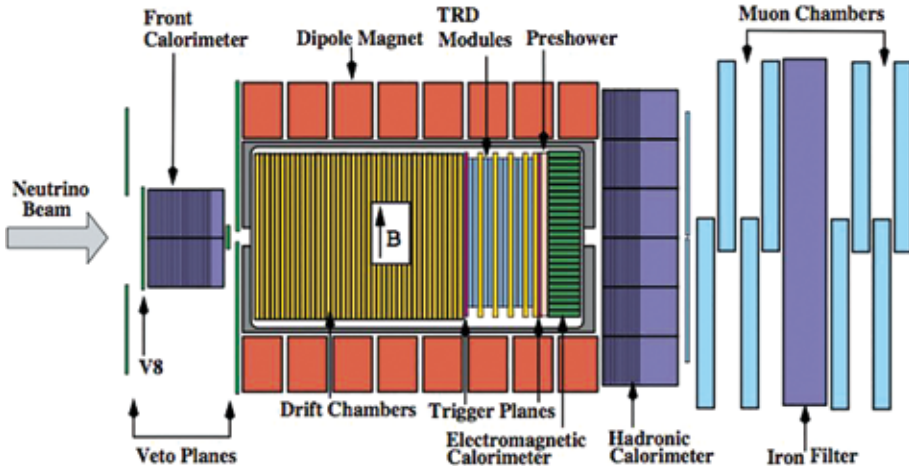


Figure 18. Top view of the NOMAD detector.

of ~ 2700 kg and a total thickness of ~ 1 radiation length (X_0). These chambers were mounted inside a dipole magnet with a magnetic volume of $3 \times 3 \times 7$ m and a field of 0.4 T (this magnet had been used by the UA1 experiment at the $S\bar{p}pS$;

- a Transition Radiation Detector (TRD) to identify electrons;
- an electromagnetic calorimeter, preceded by a preshower detector, to measure electron and photon energies;
- a hadronic calorimeter;
- muon chambers, consisting of drift tubes, to identify muons.

The electromagnetic calorimeter [53] was designed and built by groups from INFN, Italy, which included a group from Pisa, in collaboration with I.N.R., Moscow. It consisted of 875 Pb-glass Čerenkov counters $19 X_0$ thick, arranged in 35 rows of 25 counters. This detector was placed inside the magnetic field volume, so each counter had to be equipped with photo-sensitive devices capable of working in a magnetic field. The Pisa group undertook the task of solving this problem: the final solution was based on commercially available two-stage photomultiplier tubes (photo-tetrodes), with gain ~ 40 , oriented to 45° with respect to the magnetic field direction, as shown in figure 19. The energy resolution of the electromagnetic calorimeter, as measured using electron beams of known energies [54], was found to be $\sigma_E/E = 0.032/\sqrt{E} \oplus 0.01$ (E in GeV).

The NOMAD experiment took data between 1994 and 1998. For a total of 5×10^{19} protons on target, 1.04×10^6 events with an identified μ^- were reconstructed, corresponding to 1.35×10^6 ν_μ CC interactions. The event sample contained also $\bar{\nu}_\mu$ 3.4×10^4 CC, 2.1×10^4 $\bar{\nu}_e$ CC, 2.3×10^3 ν_e CC, and 4.85×10^5

NC interactions. Figure 20 shows typical ν_μ CC and ν_e CC events, as reconstructed by the NOMAD detector.

The analysis of this event sample gave no evidence for $\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillations. Figure 21 shows the region of the Δm^2 vs. $\sin^2(2\theta)$ plane excluded by this result [55]. These oscillations were discovered [56] in 1998 by the SuperKamiokande experiment in Japan, with $\Delta m^2 \approx 2.5 \times 10^{-3}$ (eV/c²)², a value only accessible to long baseline experiments, and large mixing angle, $\sin^2(2\theta) > 0.82$. Today we also know that the upper limit on the sum of the neutrino masses derived from various cosmological measurements [57] does not exceed 0.675 eV/c². Hence the theoretical speculations that had prompted the search for $\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillations at CERN in the early 1990s were wrong.

The Pisa group gave major contributions to a search for $\nu_\mu - \nu_e$ oscillations (this work was the subject of A. De Santo's doctoral thesis at the University of Pisa). Interest in this search had arisen in the second half of the 1990s following the evidence for $\bar{\nu}_\mu - \bar{\nu}_e$ oscillations reported [58] by the LSND short baseline experiment at Los Alamos, with an oscillation probability of $\sim 0.3\%$ for $\Delta m^2 > 0.03$ (eV/c²)². Given the two independent Δm^2 values allowed by three neutrinos, $\Delta m^2 \approx 7.5 \times 10^{-5}$ (eV/c²)² driving the solar ν_e oscillation, and $\Delta m^2 \approx 2.5 \times 10^{-3}$ (eV/c²)² driving the $\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillation, the LSND result implied the existence of a fourth, sterile neutrino.

In the NOMAD experiment a possible signal from $\nu_\mu - \nu_e$ oscillations was expected to appear as an excess of ν_e CC events above the background from the natural ν_e content of the beam, which mainly originated from K^+ , K_L^0 and muon decay. Precise calculations of the neutrino fluxes [59] predicted a flux ratio $\nu_e/\nu_\mu = (1.02 \pm 0.04) \times 10^{-2}$, and also different energy spectra, with $\langle E(\nu_\mu) \rangle \approx 24.3$ GeV, and $\langle E(\nu_e) \rangle \approx 36.4$ GeV, with energy-dependent systematic uncertainties between 4% and 7%.

No evidence for $\nu_\mu - \nu_e$ oscillations was found in this analysis [60]. Figure 22 shows the region of the Δm^2 vs. $\sin^2(2\theta)$ plane excluded by this result. There is still a small region where the LSND result is not excluded.

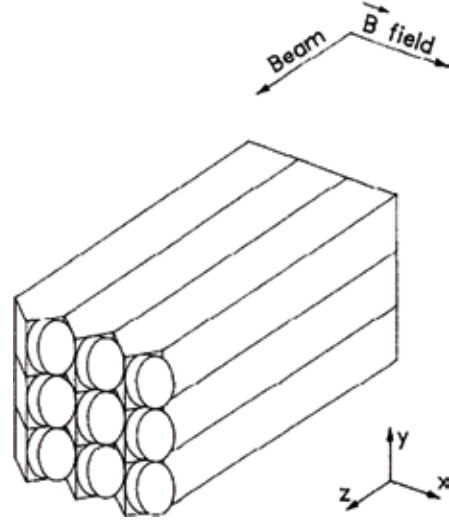


Figure 19. Schematic view of some Pb-glass counters with phototetodes.

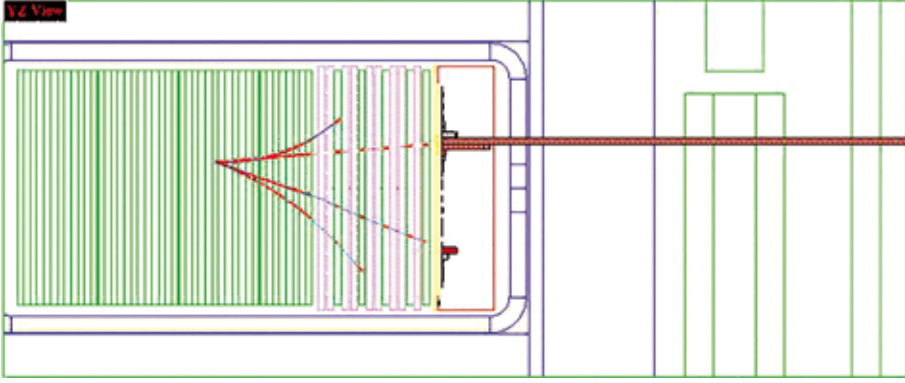


Figure 20. Top: a typical ν_μ CC interaction with the μ^- track segments visible in the muon detector. Bottom: a typical ν_e CC interaction showing the large energy deposited by the electron in the electromagnetic calorimeter.

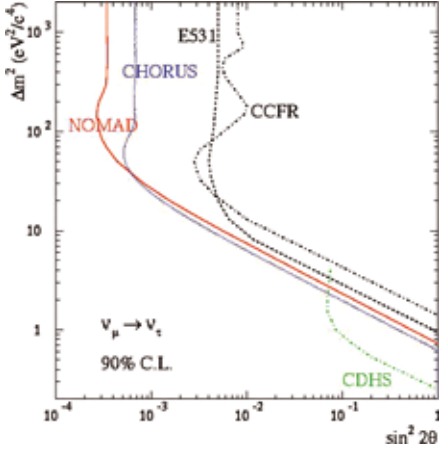


Figure 21. Contours outlining the 90% C.L. region in the $\Delta m^2 - \sin^2(2\theta)$ plane excluded by NOMAD for $\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillations, together with limits reported by other experiments.

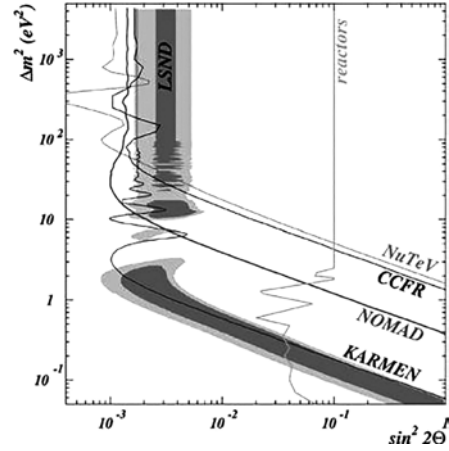


Figure 22. Contours of the excluded regions for $\nu_\mu - \nu_e$ oscillations in the $\Delta m^2 - \sin^2(2\theta)$ plane. The shaded areas represent regions allowed by the LSND result [58].

Today, more than two decades from the LSND result [58], the possible existence of a sterile neutrino is still an open question.

Because of the reconstruction quality of neutrino events in the NOMAD detector, which was similar to that of bubble chambers, and of the large event samples, it was possible to repeat measurements which bubble chamber experiments had already performed in the previous decades using much smaller event samples. These included studies of the general features of ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ CC interactions [61]; studies of strange particle production in ν_μ CC interactions [62], including measurements of Λ [63] and $\bar{\Lambda}$ [64] polarization,

and of the spin alignment of the K_{892}^* - meson [65]. Strange particle production was also studied in neutrino NC interactions [66].

Searches were also made for various exotic particles which had either been reported with marginal evidence in some experiments, or suggested by theoretical speculations. They include axions, or axion-like particles [67], with mass values up to ~ 40 eV/c²; “pentaquark” states decaying to a proton and a K_s - meson [68]; and sterile neutrinos mixing with ν_τ and decaying to an ordinary neutrino and an e^+e^- pair in the NOMAD detector [69]. These searches provided no evidence for these particles.

The Pisa group had a leading role in the study of Bose – Einstein correlations (BEC) in ν_μ CC interactions [70], which predict an enhancement of the number of identical boson pairs ($\pi^+\pi^+$, $\pi^-\pi^-$) emitted close to one another in phase space. In this study, which was the subject of A. Lupi’s doctoral thesis at the University of Pisa, BEC effects were investigated by looking at the ratio

$$R(Q) = \frac{N(\pi^+\pi^+) + N(\pi^-\pi^-)}{N(\pi^+\pi^-)}$$

as a function of $Q = |\vec{p}_1 - \vec{p}_2|$, where $\vec{p}_1$ and $\vec{p}_2$ are the momentum vectors of the two pions. Figure 23 displays $R(Q)$ as a function of Q , showing clearly the increase of $R(Q)$ as $Q \rightarrow 0$, as expected from BEC. The curve in figure 23 is a fit to the data using the Goldhaber parametrization [71], which depends on three free parameters. One of these parameters is the so-called pion source radius, R_G . The best fit gives $R_G = (1.01 \pm 0.05^{+0.09}_{-0.06}) \times 10^{-13}$ cm.

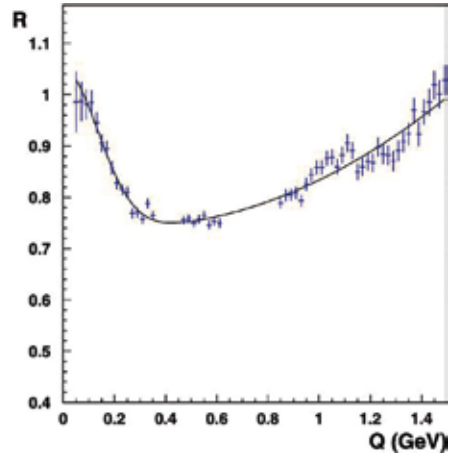


Figure 23. Bose - Einstein correlation effects in ν_μ CC events (see text).

6. Conclusions

In this article I have presented only a small fraction of the many contributions to particle physics given by physics groups from Pisa in the second half of the 1990s. As described elsewhere in this book, physicists from Pisa

have taken part in experiments at almost all accelerators in the world and also at a nuclear reactor. All these experiments were at the forefront of particle physics when they were performed, often requiring the use of new, innovative detector technologies, some of which were developed in Pisa.

Last but not least, these experiments have also been the training ground for new generations of physicists.

References

- [1] R.L. Garwin, L.M. Lederman, M. Weinrich, *Phys. Rev.* 105 (1957) 1415.
- [2] A.I. Deriagin, *et al.*, *Soviet Phys. JETP* 4 (1957) 817.
- [3] M. Conversi, *et al.*, *Phys. Rev.* 114 (1959) 1150.
- [4] M. Conversi, *CERN/SC/5372 A* (document available from CERN Archives).
- [5] C. Rubbia, M. Toller, *Nuovo Cim.* 10 (1958) 410.
- [6] A. Abragam, M. Borghini, *Compt. Rend.* 248 (1959) 1803.
- [7] M. Borghini, *et al.*, *Phys. Lett.* 21 (1966) 114.
- [8] R.J.N. Phillips, W. Rarita, *Phys. Rev.* 139 (1965) B1336.
- [9] M. Borghini, *et al.*, *Phys. Lett.* 24B (1967) 77.
- [10] S. Mango, Ö. Runólfsson, M. Borghini, *Nucl. Instr. Meth.* 72 (1969) 45.
- [11] M. Borghini, *et al.*, *Phys. Lett.* 31B (1970) 405.
- [12] M. Borghini, *et al.*, *Phys. Lett.* 36B (1971) 493.
- [13] M. Borghini, *et al.*, *Phys. Lett.* 36B (1971) 497.
- [14] M. Borghini, *et al.*, *Phys. Lett.* 36B (1971) 501.
- [15] I. Mannelli, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 14 (1965) 408.
- [16] A.V. Stirling, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 14 (1965) 763.
- [17] P. Bonamy, *et al.*, *Phys. Lett.* 23 (1966) 501.
- [18] J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch, R. Turlay., *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964) 138.
- [19] M. Breidenbach, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 23 (1969) 935.
- [20] G. 't Hooft, *Nucl. Phys.* B35 (1971) 167.
- [21] M. Banner, *et al.* (UA2 Collaboration), *Phys. Lett.* B118 (1982) 203.
- [22] G. Arnison, *et al.* (UA1 Collaboration), *Phys. Lett.* B122 (1983) 103.
- [23] M. Banner, *et al.* (UA2 Collaboration), *Phys. Lett.* B122 (1983) 476.
- [24] G. Arnison, *et al.* (UA1 Collaboration), *Phys. Lett.* B126 (1983) 398.
- [25] P. Bagnaia, *et al.* (UA2 Collaboration), *Phys. Lett.* B129 (1983) 130.

- [26] V. Albajar, *et al.* (UA1 Collaboration), *Z. Phys.* C44 (1989) 15.
- [27] R. Ansari, *et al.* (UA2 Collaboration), *Phys. Lett.* B186 (1987) 440.
- [28] F. Bosi, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.* A283 (1989) 532.
- [29] G. Arnison, *et al.*, *Phys. Lett.* B147 (1984) 493.
- [30] T. Åkesson, *et al.*, *Z. Phys.* C46 (1990) 179.
- [31] F. Abe, *et al.*, *Phys. Rev.* D50 (1994) 2966.
- [32] G. Arnison, *et al.*, *Phys. Lett.* B139 (1984) 115.
- [33] H. Baer, John Ellis, D.V. Nanopoulos, X. Tata, *Phys. Lett.* B153 (1985) 265.
- [34] T. Åkesson, *et al.*, *Phys. Lett.* B238 (1990) 442.
- [35] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B235 (1990) 442.
- [36] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B280 (1992) 137.
- [37] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B274 (1992) 507.
- [38] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B257 (1991) 232.
- [39] J. Alitti, *et al.*, *Z. Phys.* C47 (1990) 11.
- [40] J. Alitti, *et al.*, *Z. Phys.* C47 (1990) 523.
- [41] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B263 (1991) 544.
- [42] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B288 (1992) 386.
- [43] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B299 (1993) 174.
- [44] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B277 (1992) 194.
- [45] J. Alitti, *et al.*, *Phys. Lett.* B276 (1992) 354.
- [46] J. Carter, in *Proc. Joint Lepton-Photon Symp. & Europhys. Conf.* (World Scientific 1992), Vol 2, p. 3.
- [47] M. Veltman, *Nucl. Phys.* B123 (1977) 89.
- [48] C. Patrignani, *et al.* (Particle Data Group), *Chinese Physics C*, 40 (2016) 100036.
- [49] P. Anselmann, *et al.*, *Phys. Lett.* B285 (1992) 376.
- [50] H. Harari, *Phys. Lett.* B216 (1989) 413.
- [51] J. Ellis, J.L. Lopez, D.V. Nanopoulos, *Phys. Lett.* B292 (1992) 189.
- [52] J. Altegoer, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.* A 404 (1998) 96.
- [53] D. Autiero, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.* A 373 (1996) 358.
- [54] D. Autiero, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.* A 387 (1997) 352.
- [55] P. Astier, *et al.*, *Nucl. Phys.* B611 (2001) 3.
- [56] Y. Fukuda, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 81 (1998) 1562.
- [57] C. Patrignani, *et al.*, (Particle Data Group), *Chinese Physics C*, 40 (2016) 100390.

- [58] C. Athanassopoulos, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 77 (1996) 3082.
- [59] P. Astier, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A* 515 (2003) 800.
- [60] P. Astier, *et al.*, *Phys. Lett. B* 570 (2003) 19.
- [61] J. Altegoer, *et al.*, *Phys. Lett. B* 445 (1999) 439.
- [62] P. Astier, *et al.*, *Nucl. Phys. B* 621 (2002) 3.
- [63] P. Astier, *et al.*, *Nucl. Phys. B* 588 (2000) 3.
- [64] P. Astier, *et al.*, *Nucl. Phys. B* 605 (2001) 3.
- [65] A. Chukanov, *et al.*, *Europhys. J. C* 46 (2006) 69.
- [66] D. Naumov, *et al.*, *Nucl. Phys. B* 700 (2004) 51.
- [67] P. Astier, *et al.*, *Phys. Lett B* 479 (2000) 371.
- [68] O. Samoylov, *et al.*, *Europhys. J. C* 49 (2007) 499.
- [69] P. Astier, *et al.*, *Phys. Lett B* 506 (2001) 27.
- [70] P. Astier, *et al.*, *Nucl. Phys. B* 686 (2004) 3.
- [71] G. Goldhaber, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 3 (1959) 181; *Phys. Rev.* 120 (1960) 300.

Pisa and the Collider Detector at Fermilab: a History of the Establishment of Precision Physics with a Calorimetric Spectrometer at a Hadron Collider

Henry Frisch*

This is a personal and admittedly US-centric attempt to summarize the foundational impact of the Pisa CDF Group on the conceptual design, construction, and early operation of the CDF Detector at Fermilab. I have tried to go back to original documents where possible.

1. The Impact of Pisa: Three Themes

The formation and operation of the Collider Detector Facility, as it was initially named, at Fermilab, spanned the development of the modern picture of particle physics. Here I focus on three themes to discuss the impact of the Pisa/Frascati group. Harder to quantify, but most important, is the force of the senior Pisa members towards the goal of a building an innovative world-class detector in a chaotic and unfunded context, described here at the outset:

1. the leadership role of Pisa in the innovative designs of the CDF tracking and calorimeter systems, and the subsequent construction;
2. the seminal development of precision mass measurements at hadron colliders using a magnetic spectrometer with precise tracking followed by projective calorimetry (aka ‘E/p’, where ‘E’ is the calorimeter energy measurement and ‘p’ is the tracking momentum measurement);
3. the essential role of Pisa hardware in the discovery of the top quark and the extensive and path-breaking results on B-physics.

In addition, Pisa played an essential role in leadership, management, and drive. CDF was a wonderful experience, and among the many wonderful groups, if I had to single out one that made the largest contribution to the exceptionally high standards, creativity, technical know-how, and collegiality of CDF, it would be Pisa.

* Enrico Fermi Institute and Physics, Department, University of Chicago.

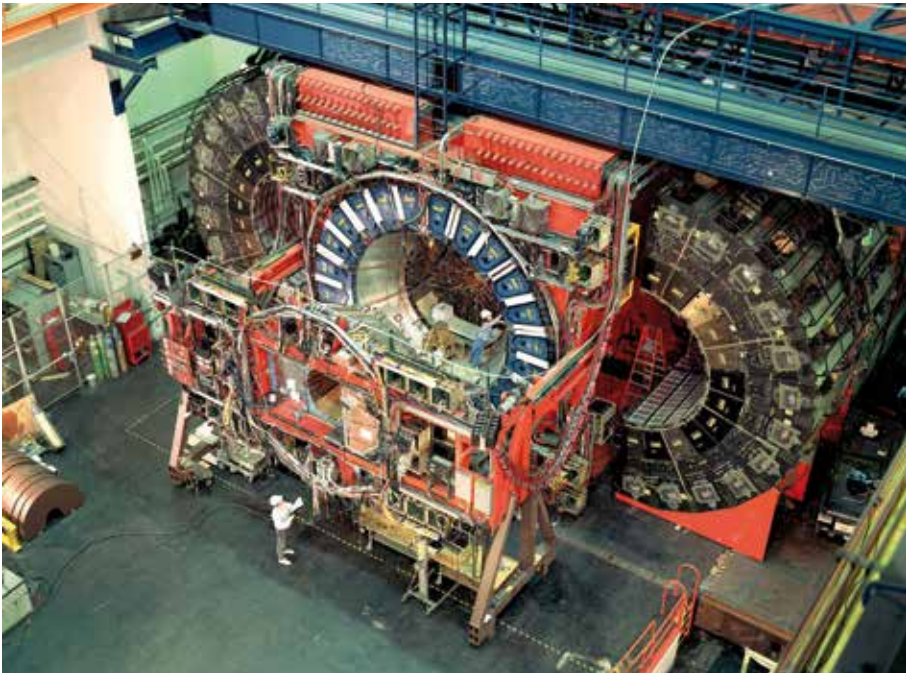


Figure 1. The CDF Detector with the calorimeter arches open.

Figure 2 shows a CDF event display of a beams-eye view of a pair of top quarks decaying into W-bosons and b-quark jets. The Pisa group made key contributions to the sophisticated trigger system that selected the event for recording, to the calorimeters that measured the (missing) transverse momentum carried off by the neutrino in the leptonic decay of a W boson, and the silicon vertex detector that allowed identification of the b-quarks, which are an essential part of the signature of top quark production and decay.

2. The Path to Precision Electroweak and Flavor Physics at Hadron Colliders

The founding of CDF was followed by a remarkable evolution in sophistication and precision of detectors and techniques at the hadron colliders at Fermilab and CERN since the pioneering experiments at the ISR and $S\bar{\nu}pS$. Pisa played a crucial leadership role in this evolution.

The following steps and the initial context provide an outline for my talk. Understanding the intellectual and political context is essential to appreciating the intellectual and collaborative role of the Pisa/Frascati group in the ultimate success of the Tevatron Collider program:

1. the start of high- P_T physics (in the US): Bjorken, Feynman, Cronin;

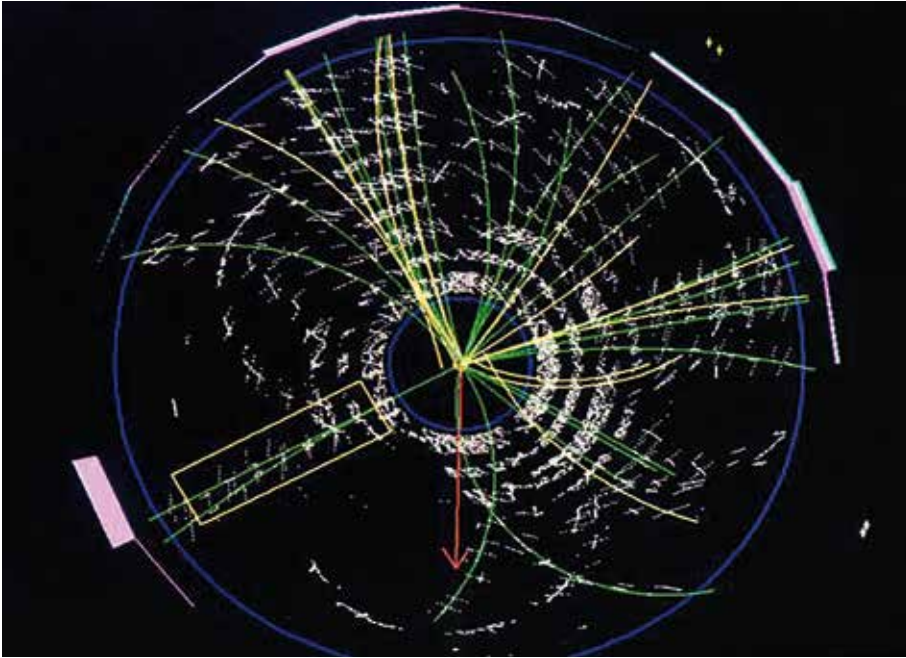


Figure 2. A beams-eye view of a pair of top quarks decaying into W-bosons and b-quark jets. The combination of a precise measurement of track momentum followed by a sign-independent measurement of the energy deposited pioneered high-precision measurements in complex events at hadron colliders.

2. the chaotic road to the choice of $\bar{p}p$ collisions in the Tevatron;
3. Cronin starts the Collider Experiment Dept.: ZGS-MR (pp), MR ($\bar{p}p$), Tevatron ($\bar{p}p$);
4. Collider Detector: Giorgio Bellettini, Pisa MOUs;
5. the development of precision measurements at a hadron collider: calorimeter behind a precision tracking system: the E/p method;
6. the silicon Vertex Detector (SVX), Silicon Vertex Tracker (SVT) real-time tracking, vertex-selected triggering;
7. CDF (Pisa) footprint on hadron collider detector development;
8. W and Z precision mass measurements; top quark discovery; B_s mixing, development of Higgs and BTSM search strategies.

3. Hard Parton Scattering- 1971: Bjorken, Feynman and Field, Cronin

The title page of a seminal paper from the summer of 1971 by Bjorken, Berman, and Kogut that still reads remarkably well is shown in figure 3. The title is 'Inclusive Processes at High Transverse Momentum'; the

Inclusive Processes at High Transverse Momentum*

S. M. Berman, J. D. Bjorken, and J. B. Kogut†

Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 5 August 1971)

We calculate the distribution of secondary particles C in processes $A + B \rightarrow C + \text{anything}$ at very high energies when (1) particle C has transverse momentum p_T far in excess of 1 GeV/c, (2) the basic reaction mechanism is presumed to be a deep-inelastic electromagnetic process, and (3) particles A , B , and C are either leptons (l), photons (γ), or hadrons (h). We find that such distribution functions possess a scaling behavior, as governed by dimensional analysis. Furthermore, the typical behavior even for A , B , and C all hadrons, is a power-law decrease in yield with increasing p_T , implying measurable yields at NAL of hadrons, leptons, and photons produced in 400-GeV $p\bar{p}$ collisions even when the observed secondary-particle p_T exceeds 8 GeV/c. There are similar implications for particle yields from e^+e^- colliding-beam experiments and for hadron yields in deep-inelastic electroproduction (or neutrino processes). Among the processes discussed in some detail are $ll \rightarrow h$, $\gamma\gamma \rightarrow h$, $lh \rightarrow h$, $yh \rightarrow h$, $yh \rightarrow l$, as well as $hh \rightarrow l$, $hh \rightarrow \gamma$, $hh \rightarrow W$, and $W \rightarrow h$, where W is the conjectured weak-interaction intermediate boson. The basis of the calculation is an extension of the parton model. The new ingredient necessary to calculate the processes of interest is the inclusive probability for finding a hadron emerging from a parton struck in a deep-inelastic collision. This probability is taken to have a form similar to that generally presumed for finding a parton in an energetic hadron. We study the dependence of our conclusions on the validity of the parton model, and conclude that they follow mainly from kinematics, duality arguments à la Bloom and Gilman, and the crucial assumption that multiplicities in such reactions grow slowly with energy. The picture we obtain generalizes the concept of deep-inelastic process, and predicts the existence of "multiple cores" in such reactions. We speculate on the possibility of strong, nonelectromagnetic deep-inelastic processes. If such processes exist, our predictions of particle yields for $hh \rightarrow h$ could be up to 4 orders of magnitude too low, and for $yh \rightarrow h$ and $hh \rightarrow \gamma$ up to 2 orders of magnitude too low.

Figure 3. The title page of the 1971 seminal paper by J.D. Bjorken, S. Berman, and J. Kogut that lays out the landscape of hadron collider physics: parton parton scattering, Drell-Yan annihilation, and W/Z boson production. This was the physics in which CDF was founded to explore and discover.

paper describes scattering, lepton pair production, and W and Z production, and to a large extent still describes the main thrust in HEP today.

Figure 4 shows the prevailing view of particle production from that era, which was an extrapolation from low P_T of an exponential, typically quoted as:

$$e^{-6P_T}, \text{ and their predicted power law deviations above the prediction.}$$

Presciently, Jim Cronin and Pierre Piroué submitted a proposal to Fermilab in 1970 to measure the spectrum of inclusive particle production at high P_T : electrons, muons, identified hadrons (pi, K, and proton and their antiparticles), as well as short-lived new particles. This was approved and became experiment E100, in the Proton Lab.

Figure 5 shows the first results on inclusive hadron production at high P_T at Fermilab by E100, showing the clear deviation from the naive exponential prediction, and, strikingly, the energy-dependence of the cross-section at high P_T . However, due to delays in bringing the Fermilab machine online, the CERN ISR collider beat us to the punch, sadly, and barely.

However the interpretation of the 'excess' and energy-dependence of high- P_T particle production as two-body parton scattering was not yet agreed on. Figure 6 shows a telegram from Feynman to Rick Field after Feynman and Cronin talked about the high P_T particle production results

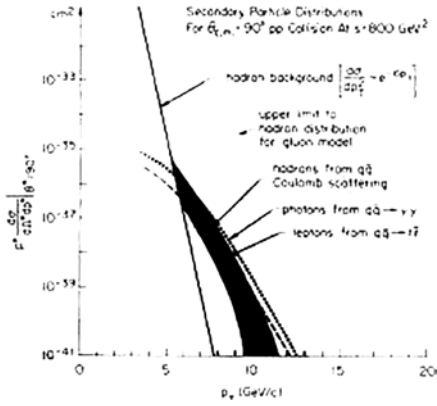


Figure 4. Predictions of high- P_T particle spectra from parton-parton scattering from the 1971 paper of Berman, Bjorken, and Kogut. The later designs of the CDF calorimeter tower geometry and calorimetric trigger were influenced by the single particle measurements at CERN and Fermilab as the properties of jets were still hotly debated at the time of the start of CDF.

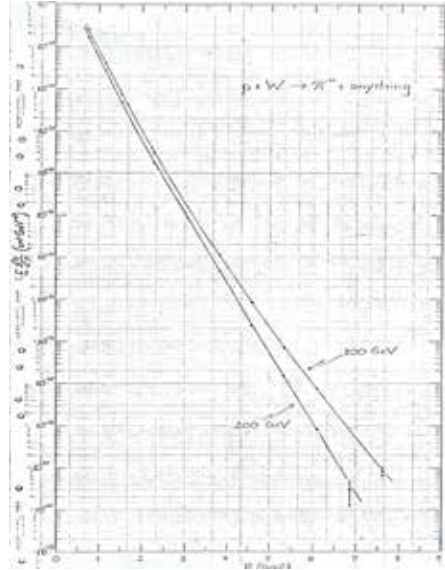


Figure 5. The first measurements of inclusive hadron production at high P_T at Fermilab by the Fermilab Experiment E100, with Jim Cronin and Pierre Piroué as spokesman. Cronin later became Head of the Collider Detector Department, preceding the CDF Technical Design Report and later proposal.

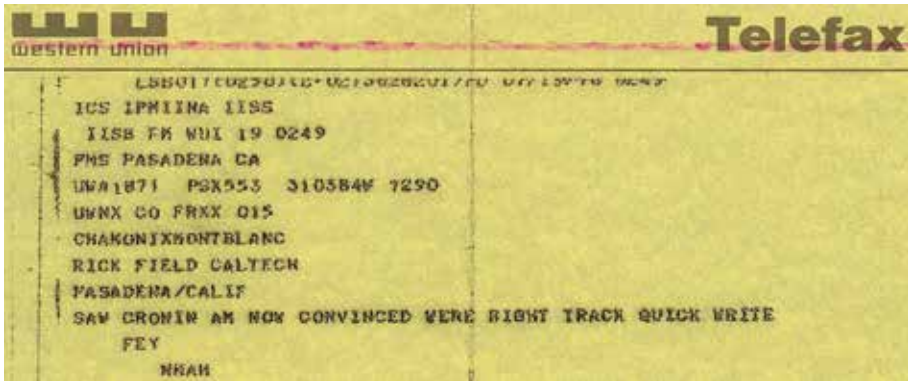


Figure 6. A July 1976 telegram from Feynman in France to Rick Field at CalTech, urging Rick to write up their work on parton-parton scattering followed by parton fragmentation being the source of the high- P_T particles (Courtesy of R. Field).

in France. The telegram is excited, frankly, about the observation of parton scattering, with its consequent $1/P_T^4$ dependence, followed by parton fragmentation to give the observed $1/P_T^8$ at Fermilab.



Figure 7. Jim Cronin, the Head of the new Fermilab Colliding Beam Department. Cronin started the first designs for the detector and measurements in the MR tunnel.

4. The Chaotic Start of a Collider Program at Fermi-lab

With the initiatives of Rubbia and others at CERN the pressure grew on Fermilab toward a collider. Bob Wilson appointed Jim Cronin as Head of a new department, the Fermilab Colliding Beam Department. Cronin started a design for the detector, and started some basic measurements of particle flux in the MR tunnel. Figure 8 is from the memo announcing the start of the Department.

Unfortunately a rational approach didn't work at Fermilab, partly because of the Federal HEPAP-determined funding constraint on accelerator construction, partly because of personnel, and partly because of organizational structure. Figure 9 shows the announcement of Cronin's resignation.

Some background is in order to understand the chaotic situation and the impact the international collaborators from Pisa/Frascati and Japan had in fashioning a successful program out of the initial conditions. The Main Ring (MR) accelerator was not well-suited as a collider. With remarkable foresight Wilson had made provisions for the superconducting Tevatron ring in the tunnel, mounted below the MR. However, there were a number of competing facility proposals: PEP at SLAC, Isabelle at BNL, and CESR at Cornell. The HEPAP panel held Sub-panel meetings at Woods Hole in 1974 (Weisskopf, Chair), 1975 (Low, Chair), and 1977 (Sandweiss, Chair) to evaluate and prioritize the proposals. The panels proved that they could differentiate, although with the sign wrong: we approved PEP and Isabelle for construction, leaving the (successful!) Tevatron and CESR to be funded by other means.

Figure 11 illuminates the lack of consensus on what to do. Among the options for the accelerator were colliding the Main Ring with the Argonne ZGS (yes, really) for proton-proton collisions. The estimates of achievable luminosities for several of the options disagreed by or-

- 12 -

DEPARTMENT OF COLLIDING BEAM EXPERIMENTS

A meeting was held at Fermilab on November 17 to discuss various possibilities for the organization of work on colliding beam experiments. In accordance with some of the ideas which were discussed at that meeting a Colliding Beam Experiments Department has now been set up. Professor James Cronin of the University of Chicago has agreed to head this new department.

The department is to be a center for a number of activities directed toward planning for the exploitation of pp and $\bar{p}p$ colliding beams in the present Main-Ring tunnel. Financial restrictions prevent adding very many

Figure 8. A memo announcing the start of the Fermilab Colliding Beam Department, with Jim Cronin as Head.

milab 12epnt

- 17 -

Dec. '77

REORGANIZATION OF COLLIDING BEAMS RESEARCH

The Colliding Beam Experiments Department, originally headed by Jim Cronin, has now been disbanded. In its place there will be a Colliding Detector Facility (CDF) Department within the Research Division, a Colliding Beam (CB) Group in the Accelerator Division, and an Antiproton Cooling (AC) Group in the Accelerator Division.

Figure 9. A memo announcing the end of the Fermilab Colliding Beam Department. The path to a realistic collider with an adequate luminosity, built on a credible schedule, and a sophisticated detector adequate for the remarkable physics potential was not clear, and Cronin had resigned.

ders-of-magnitude. The options for the detector were equally all over the map; one proposal had a detector in a pit barely big enough to hold it, but on cables so that it could be raised for access.

That a technically sound and exceptionally successful solution came out of the chaos was due to a number of remarkable people and the very

F. R. Huson
4/26/78

OPTIMISTIC COLLIDING BEAM SCHEDULE

Craig Moore	May 78	Eq.	Beam to cooling ring.
		Oper.	
Stan Ecklund Lee Pondrom	Aug. 78	AIP	B0 colliding beam area (pit).
Jim Griffin Jim Bridges	Oct. 78	Oper.	Test rf bucket bunching in Main Ring (~ 10 to 1).
Jim Griffin Gil Nicholls	Oct. 78	Oper.	High harmonic cavity.
Don Young Fred Mills	Oct. 78	AIP	Cool protons.
Peter McIntyre		GPP	
Ed Gray		Oper.	
		Eq.	
Don Young Fred Mills Jim Griffin	Dec. 78	Oper.	RF in cooling ring - accumulate 10^{10} protons.
Bruce Chrisman Don Edwards Stan Snowdon George Chadwick	Dec. 78	Oper.	Extract 100-GeV protons at F17, target for p production.
Carlos Hovvat Keith Meisner	Jan. 79	Oper.	10^7 protons in Booster - acceleration and deceleration - H in Booster - quick reversing of GMPS.
Bruce Brown Craig Moore Dave Johnson	Jan. 79	AIP	Cooling ring to Booster connection.
Stan Ecklund	Feb. 79	GPP	Low β in Main Ring and B0.
		Oper.	
		Equip.	
Bruce Chrisman Bruce Brown Don Edwards Stan Snowdon	Feb. 79	AIP	P's to Booster and Cooling Ring - 10-GeV protons to Main Ring in reverse line and circulating at 10 GeV.
		Equip.	
Stan Pruss	Mar. 79	Oper.	Main Ring vac. $< 5 \times 10^{-9}$ torr.
Stan Ecklund	Mar. 79	Oper.	Luminosity lifetime at 250 GeV > 3 hours.
Roy Rubinstein	Mar. 79	AIP	Main Ring abort - both directions.
Don Young et al.	Mar. 79	Oper.	P's cooled, accumulated and injected into M.R.
Stan Ecklund Lee Pondrom	June 79	AIP	Finish B0 colliding beam area.
Stan Ecklund John Dinkel	July 79	Eq.	Circulating protons in reverse direction in Main Ring at 250 GeV.
Stan Ecklund	Oct. 79	Eq.	Test kissing scheme in Main Ring.

Notes to: Those listed above
Accel. Div. Group Ldrs.
R. R. Wilson

May 15
May 14-16

Figure 10. An April 1978 "Optimistic Colliding Beam Schedule" for $\bar{p}p$ collisions in the Main Ring, with first collisions planned for 18 months later. This was optimistic in many ways.

strong staff and attitude at the Lab. Key elements were Wilson's plans for a superconducting ring in the MR tunnel, Alvin Tollestrup's solutions to the superconducting magnet problems, and John People's leadership of the pbar source. Figure 13 shows the current Fermilab facility, including the Recycler storage ring for which Bill Foster played an essential role.



Fermilab

Colliding Detector Facility Meeting Minutes

September 15, 1978

Present: H. Frisch, M. Peshkin, A. Tollestrup, J. Rhoades, J. Walker, B. Diebold, L. Holloway, R. Loveless, I. Gaines, T. Collins, T. Rhoades, P. Limon, C. Ankenbrandt

Alvin announced that there will be a review of the entire colliding beam possibilities at Fermilab in the second week in November. In order to present this Group's work in a coherent fashion at that time, Alvin asked that each Group Leader have a written report on his section by October 1, 1978.

A very lively discussion followed on which of the several options (pp , $p\bar{p}$ in MR, $p\bar{p}$ in Doubler, etc.) was the best one to push here at Fermilab given CERN's $p\bar{p}$ program and their much larger financial commitment. Alvin appointed three groups to study various questions since the answers were not clear to those present at this meeting.

- A. I. Gaines, B. Diebold: Monte Carlo pp interactions to determine if the unequal energies present any problems for the detector we have been considering.
- B. R. Loveless, T. Collins, S. Ecklund: Squeezer magnets if no pre-bending.
- C. P. Limon, H. Frisch, C. Ankenbrandt: $p\bar{p}$ luminosity estimates.

RL:clc

Figure 11. The minutes of a 1978 CDF meeting discussing the options for the accelerator itself (" pp , $p\bar{p}$ in MR, $p\bar{p}$ in Doubler, etc."). The words "A very lively discussion followed" are a diplomatic way of saying that it was a mess, with many competing options and unsupported claims of luminosities, schedules, and costs. Note the last sentence and the three groups.

5. The Foundational Contributions of Pisa to the CDF Detector Design

In his contribution to this conference, Giorgio Bellettini describes how in 1979 he and Paolo Giromini met with Alvin Tollestrup and Bob Diebold to discuss Pisa and Frascati joining CDF.

Colin Taylor

Report of the Review Committee
for the Fermilab Antiproton Source Design Report

June 1981

T. Collins, D. Edwards, R. Johnson, I. Meshkov,
C. Taylor, M. Tigner, B. Wiik

Introduction

The Committee met June 8, 9, 10, 11 to consider the $\bar{p}$ source Design Report. We have concentrated on the $\bar{p}$ production and accumulation aspects of the design and have not reviewed the Colliding Scenario described in Part 6 of the Design Report.

The design described in the Design Report appears to the Committee to be adequate to meet the goals for $\bar{p}$ production and accumulation listed in that report. It is the conclusion of the Committee, however, that the stated goals are far too modest. We recommend therefore that the Laboratory re-examine the design goals for $\bar{p}$ production and accumulation and develop a feasibility design commensurate with the full potential of the Main Ring-Booster combination to produce antiprotons.

I. Comments on the General Scheme for $\bar{p}$ Accumulation



Fermilab

MINUTES OF THE COLLIDER DETECTOR FACILITY MEETING

November 20, 1981

1. Dave Ayres reported on visit to UA1/UA2 at CERN. Rubbia claims 500 people were working on UA1 at height of its construction (and that CDF is harder). Parts of the UA1 end plugs have suffered some radiation damage (estimated dose 10^6 rads). Dave described various UA1 and UA2 calibration systems.

Figure 12. Top: The June report of the 1981 (distinguished!) review committee on the Fermilab antiproton source. Bottom: An excerpt from the minutes CDF meeting the following November; showing the awareness at Fermilab of the rapidly-moving CERN program. Both the UA1 and UA2 trigger and tracking designs had impact on the CDF designs; we studied them and wanted to do better.

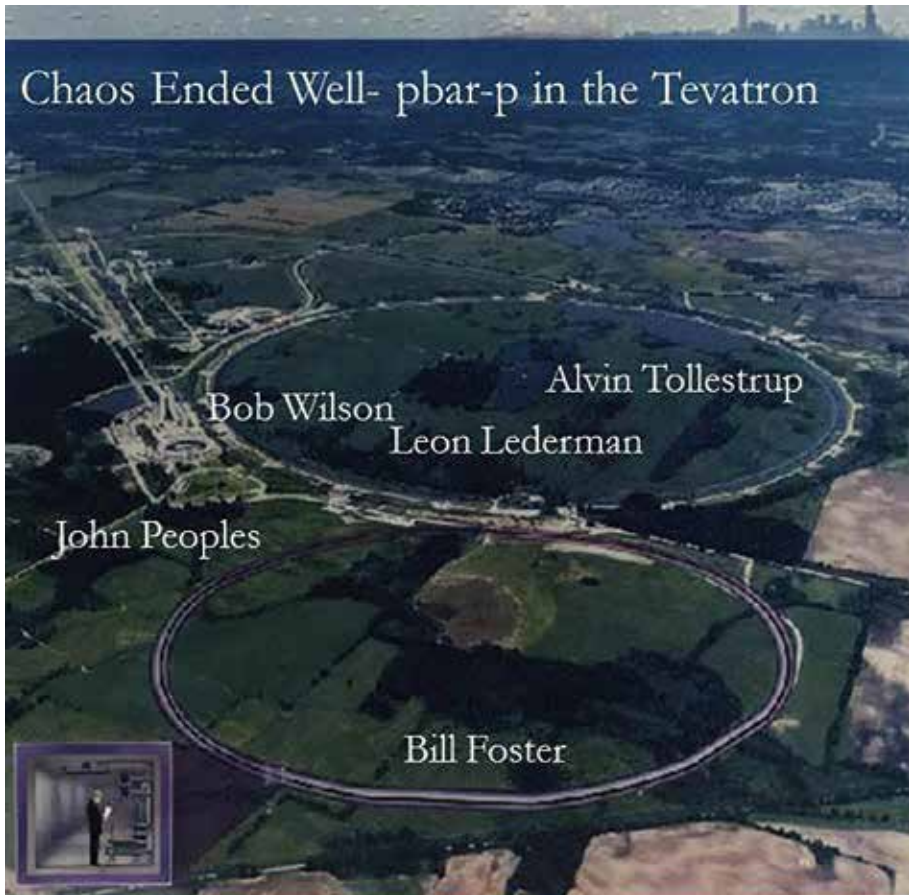


Figure 13. The completed Fermilab accelerator complex showing the remarkable solutions by Wilson, Tollestrup, Peoples, and many others to the lack of adequate funding, the technical challenge of a large ring high-field superconducting magnets, the $p\bar{p}$ source, and the development of a sophisticated hadron collider detector with both precise tracking and projective calorimetry.

Figure 15 is a copy of the 1983 Memorandum of Understanding (MOU) between Pisa, Frascati, and Fermilab. Each of the collaborating institutions ended up signing such an MOU. Note the original cast members. The original institutions included Tsukuba and KEK in Japan, with the strong Japanese effort led by Kuni Kondo.

Figure 16 shows the essential role played by Pisa and Frascati in the design, construction, and subsequent operation of CDF by listing the extensive responsibilities of the group. The remarkable characteristics of the tracking and calorimeter systems were heavily influenced (or more) by the group.



Figure 14. Giorgio Bellettini, the leader of the Pisa CDF group, in the CDF Trigger Room in 1995. One of the Silicon Vertex Trigger (SVT) racks is visible behind him.

5.1. The Technical Design Report (TDR)

Design and even construction of the Collider Detector Facility, as it was initially named, started before a proposal had been written¹. Instead, the Collaboration wrote a Technical Design Report (TDR), released in August of 1981 (H. Jensen and HJF editors). Figure 17 shows the cover, with its logo of the projective calorimeter towers put forward by the Pisa group.

The titles of the 1981 CDF Notes (internal collaboration technical notes) proposing designs for the vertex silicon detectors and hadron calorimeters are shown in figure 18. The as-built detectors corresponded remarkably faithfully to these initial innovative designs.

5.2. Projective Hadron Calorimetry: Pisa and Frascati

A very strong contingent from Pisa and Frascati, in collaboration with Argonne, Fermilab, Purdue, Urbana, and other institutions, led the adoption and design of the (largely) hermetic calorimeters based on a projective tower geometry of uniform segmentation in rapidity and polar angle. Transporting the light out of the calorimeter to the photomultipliers outside was a tour-de-force, both in design and implementation. The left-hand panel of figure 19 shows Franco Cervelli and Aldo Menzione working on hadron calorimeter modules. The right-hand panel shows a prototype of one of the four ‘arches’ of modules being assembled at Argonne².

¹ When a group of us, probably led by Tollestrup, presented the idea to Bob Wilson, he said «OK, but it can't cost more than 10 million dollars». We knew, and I'm sure he knew, that this was low by an order-of-magnitude; we looked at each other, and said “sure”.

² No mention of the detector construction would be complete without due credit being given to Dennis Theriot as overall CDF Project Manager, and Hans Jensen leading the detector assembly in the B0 collision hall.

November 1983

AGREEMENT CDFM
between the
RESEARCH DIVISION of
FERMI NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY
and the
ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE
Italy

I. Composition and Purpose of the Collaboration

This agreement covers the activities that a team of the Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) of Italy, comprising a group from Frascati and one from Pisa, will carry out in collaboration with groups from Argonne, Brandeis, Chicago, Fermilab, Harvard, Illinois, KCK, LLU, Pennsylvania, Purdue, Rutgers, Texas, Tsukuba, and Wisconsin.

The goal of this collaborative effort is the design, construction, and initial operation of the Collider Detector at Fermilab (CDF), a large detector which will be placed in the B0 interaction region to study collisions between p and $\bar{p}$ beams stored in the Fermilab Energy Doubler. The scope of the detector is given in the Design Report. The collaboration can be extended to other groups, as provided for in Paragraph VII.

II. Personnel

The following physicists are participants in the collaboration as members of the Italian team: S. Bartalucci**, G. Bellettini*, F. Bedeschi*, S. Bartolucci**, L. Bosio*, F. Corvelli*, M. Cordelli**, R. Del Fabbro*, A. Di Virgilio*, F. Focardi*, P. Giannotti*, M. A. Giorgi*, P. Giromini**, A. Menzione*, M. Pallotta**, L. Ristori*, A. Sansoni**, A. Scribano*, G. Tonelli*, R. Tripicciolo*.

It is expected that other INFN physicists might join this group in the future.

The leader of the Frascati group is P. Giromini.

The leader of the Pisa group is G. Bellettini.

The spokesman for the INFN team is G. Bellettini.

*Sezione di Pisa dell'INFN

**Laboratori Nazionale di Frascati dell'INFN

Figure 15. The 1983 Memorandum of Understanding (MOU) between Pisa/Frascati and Fermilab. The group was both large and very strong, bringing collider experience and extraordinary detector development skills to CDF.

- 2 -

II. Responsibilities of the Italian Group

The responsibilities of the Italian team are as follows:

- A. Fabrication of the scintillator/BBQ towers, the light pipes, and the associated photomultipliers, bases, and HV supplies for the central and endwall hadron calorimeters, and the shipping of this material to Fermilab. This will have to be done according to the time schedule indicated in Paragraph VI.

The iron structure of the calorimeters will be fabricated by Purdue and Fermilab.

The electromagnetic shower calorimeters of the central units will be fabricated by Argonne and KEK.

- B. Assembly of the hadron calorimeters at Fermilab, jointly with Purdue and Fermilab.
- C. Calibration of the calorimeters with cosmic rays, light flashers, and particle beams jointly with Pennsylvania, Purdue, and Fermilab. The Italian group will dedicate to the assembly and calibration work at Fermilab a minimum of:
1. One physicist and two technicians during the period October 1982-December 1983.
 2. Three physicists and three technicians during 1984.
 3. Approximately four physicists and two technicians during 1985.
- D. Development, construction, and operation of a light-flasher system for the hadron calorimeters that is compatible with overall CDF calibration requirements.
- E. Development and construction of a HV system for the central and end-wall hadron calorimeters.
- F. Coordination of the above scintillator construction, assembly, and calibration work.
- G. Development, construction, and running-in of a prototype small angle luminosity monitor and elastic scattering silicon detector, as outlined in Chapter 7 of the Design Report.
- H. Development, construction, and running-in of a prototype vertex tracking and dE/dx detector, as outlined in Chapter 7 of the Design Report.

The installation of these detectors in CDF will depend on their performance and on possible interference with the rest of the CDF activities.

Figure 16. The list from the 1983 MOU of Pisa and Frascati responsibilities.

5.3. Silicon Vertex Detectors (SVX) and Silicon Vertex Trigger (SVT)

Aldo Menzione was a key pioneer in the development of silicon tracking detectors, as well as single-handedly, it seemed, bulling through the adoption by CDF of the SVX silicon detector that played such an important role in the Tevatron physics program. Figure 20 reproduces title from papers in the development.

I was on the tracking ‘God-Parent Committee’, led by Giulio Ascoli and later Willie Chinowsky, that had the charge of vetting the tracking designs. The history of vertex tracking at CERN had not been good, and there was nervousness, particularly among the less technical folk; Aldo was an irresistible force, and the GodParents approved the installation of the silicon vertex detector. The SVX, along with the remarkable central tracking chamber of Kadel, Mukherjee, Kephart, Binkley, and others, were the core of CDF performance.

Aldo’s design and description in the Technical Design Report of this bold proposal are shown in figure 21. What is truly remarkable to me is how this sketch corresponds to what was built and operated; even though this was completely unexplored territory for us, Aldo knew deeply what the system needed to do.

The ability to trigger on displaced vertices, seemingly impossible when we first contemplated the collider, was brilliantly implemented by Luciano Ristori and the Pisa group (Chicago collaborated on the hardware). The precision, data rate, and necessary monitoring/control were a large step beyond the state-of-the-art. Figure 22 (Left) shows a ‘cartoon’ of the operating principles; the installation, driven by over 100 optical fibers running at 1.4 Gbits/sec, is shown on the right.

5.4. Summary

The period discussed here spans the development of precision measurements at hadron colliders and the parton model. The Pisa/Frascati group’s contributions to CDF have set the standards for collider programs at the

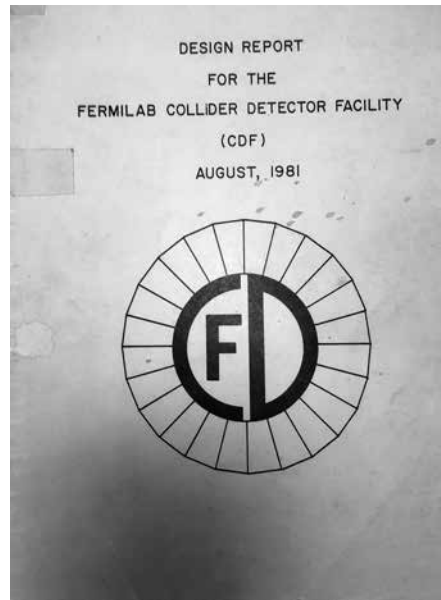


Figure 17. Cover of the CDF design report.

CDF-58	The Criterion for Avoiding Hot Spots in Calorimeters - W. Selove
CDF-59	Luminosity and Very Small Angle Physics - G. Bellettini, C. Bradaschia, A. Menzione
CDF-60	Feasibility of Operating Silicon Detectors Inside the Collider Vacuum Pipe - C. Bradaschia, T. Collins, A. Menzione
CDF-61	Prototype Pad Chamber Hadron Calorimeter - M. Ono and R. Yanada
CDF-62	Endcap Hadron Calorimeters - G. Bellettini, R. Bertani, R. Del Fabbro, G. Gennaro, A. Scribano
CDF-63	Hybrid Shower Counters for CDF - L. Nodulman
CDF-64	Conceptual Design of a Forward Detector for the Antiproton-Proton Collider - P. McIntyre et. al.

Figure 18. Key 1981 CDF Notes (the internal collaboration technical papers) The CDF Note index showing the 1981 CDF Notes from the Pisa/Frascati groups, proposing designs for silicon detectors and hadron calorimeters. The titles of notes CDF-59, CDF-60, and CDF-62 are highlighted in red.

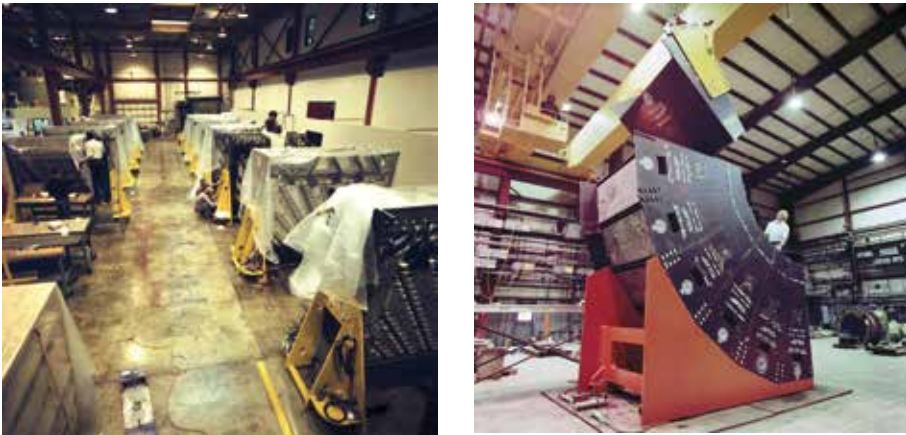


Figure 19. Left: Franco Cervelli and Aldo Menzione working on hadron calorimeter modules. Right: Hans Kautsky supervising the assembly of prototype 'arch' of modules being assembled at Argonne. (Note the hard-hat).

'Energy Frontier': the precision spectrometer consisting of precision tracking back to the vertex with a silicon vertex detector followed by projective segmented calorimeters, and using a trigger on displaced vertices. The combined tracking and calorimeter systems that the group contributed so much to allowed precision calibration of both systems through the 'E/p' method, now a standard (as are so many of the innovations from CDF) at the LHC.

The work of Aldo Menzione on the SVX and Luciano Ristori were honored with the Panofsky Prize of the American Physical Society. Figure 23 gives the citations. Recognition of the importance of the entire group

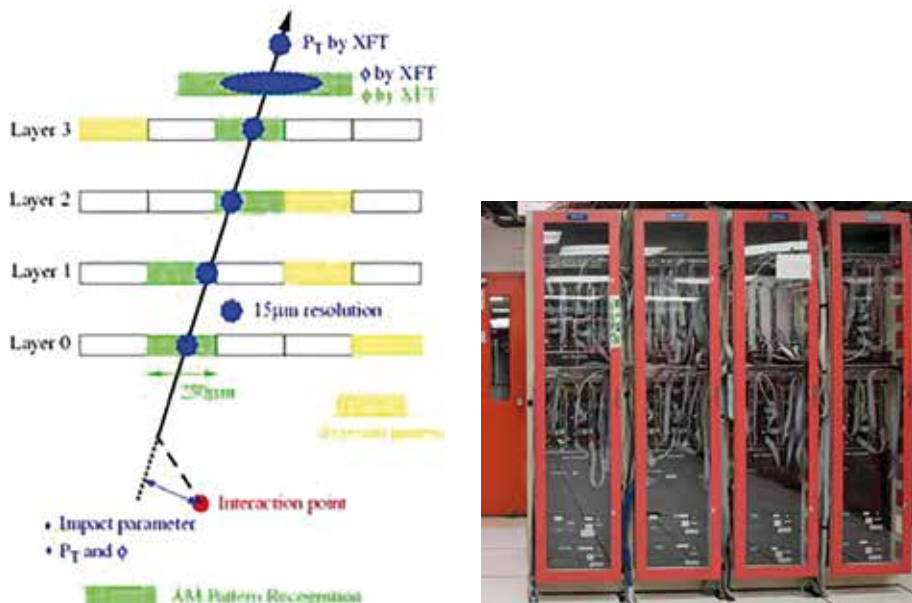


Figure 22. Left: The operating principle of the Silicon Vertex Tracker (SVT). Right: the SVT system installed in the CDF Trigger Room.

has been recognized by the continued election of Pisa physicists to the leadership of the Collaboration.

In summary, this was a remarkable group of wonderful physicists and people. It was an honor and pleasure to work closely with them; the leadership and exceptionally high intellectual standard was key to the successes of CDF.

6. Acknowledgements

I would like to thank the Organizers for the enjoyable opportunity to revisit wonderful memories of collaboration with the Pisa CDF physicists. I owe deep thanks to Vincenzo Cavasinni for his care and thoughtful hospitality, and Giorgio Bellettini for the invitation and help. The occasion to see old friends from CDF was particularly special. The talk is dedicated to the memories of Aldo Menzione and Mauro Dell'Orso.

2009 W.K.H. Panofsky Prize in Experimental Particle Physics Recipient

Aldo Menzione
INFN, Pisa

Citation:

"For their leading role in the establishment and use of precision silicon tracking detectors at hadron colliders, enabling broad advances in knowledge of the top quark, b-hadrons, and charm-hadrons."



Background:

Aldo Menzione was born in Massa (Italy) on June 18, 1943. In 1961 he started his studies in University of Pisa where he graduated in 1967. Between 65 and 68 he worked on the CERN Karlsruhe Collab. The thesis work was Production of neutral mesons decaying in all neutral secondaries. 70 73 at CERN-ISR-R801. The reason for which this experiment is still known is the discovery of the rising p-p X-section. Other interesting results were in the area of correlations among secondaries and rapidity distributions as function of energy. 73 80 at CERN-SPS Experiments NA1 NA7. These experiments led to relevant results in charm physics and meson form factors. Many technical innovations were introduced in these experiments, most important, the active target, based on semiconductors. In the period 1990 -2000 he devoted part of his time to an astroparticle experiment CLUE finalized to establish a technique to detect the air shower by the UV Cherenkov light. 80 now CDF at Fermilab. He participates from the beginning to the design and the construction of the apparatus. Starting 1985 he had the responsibility of the design, construction and commissioning of the silicon vertex. The device was relevant in the top importance in a variety of measurements done by the collaboration. He has been responsible of the CDF-Pisa group until 2006.

2009 W.K.H. Panofsky Prize in Experimental Particle Physics Recipient

Luciano Ristori
INFN

Citation:

"For their leading role in the establishment and use of precision silicon tracking detectors at hadron colliders, enabling broad advances in knowledge of the top quark, b-hadrons, and charm-hadrons."



Background:

Luciano Ristori was born in Prato (Italy) on December 13, 1948. In 1967 he was admitted at the Scuola Normale Superiore in Pisa where he graduated in 1971 with the title of *ÖDottore in FisicaÖ*. His thesis was on the measurement of the total p-p cross at the Intersecting Storage Rings (CERN-R801). In 1973, he joined the NA1 Collaboration at the CERN SPS for the first electronic measurement of the lifetime of charmed mesons using an active silicon target. In 1977, he obtained a permanent position at the Italian National Institute for Nuclear Physics (INFN). In 1991 he took a position of Associate Professor at the Scuola Normale Superiore in Pisa. In 1990 he conceived and proposed a trigger based on secondary vertices (SVT) to the CDF Collaboration. The SVT trigger, was commissioned in 2001 and has allowed CDF to perform measurements otherwise impossible, especially in the area of hadronic decays of B mesons and baryons, including the precise measurement of the Bs oscillation frequency. Since 1998, he holds a position of Research Director at INFN in Pisa. He was Co-Spokesperson of the CDF Collaboration from 2003 to 2005. Since 2005 he is responsible for the whole Italian group in CDF.

Figure 23. The Panofsky Prize citations for Aldo Menzione and Luciano Ristori.

The role of the Pisa particle physics laboratory in the ALEPH experiment

Jacques Lefrançois*

1. Introduction

I cannot start this presentation, without first mentioning Lorenzo Foà, who was the key physicist for the Pisa and actually for the INFN contribution to ALEPH.

Of course you will see his name in many subjects of these memories, but it is clear that, if he were still with us, he would be the speaker today rather than me, explaining with his usual passion, accompanied by a critical mind, his views on the ALEPH adventure.

You will see in figure 1 a picture, from left to right, of Jack Steinberger (who was the Aleph initiator and ALEPH spokesman from 1980 to 1990), Lorenzo Foà and myself, this was taken at a change-of-mandate party in 1993 when I was replaced by Lorenzo Foà as ALEPH spokesman.

2. The formation of the Aleph collaboration

The start of the ALEPH adventure can certainly be dated back to a first meeting on Wednesday July 9th 1980, in Jack Steinberger's office to discuss an eventual construction of a detector for the high energy e^+e^- collider, LEP. The LEP construction was not decided officially yet, but the consensus was that this collider would be the next CERN project.

The core of the group representatives presents were from CERN, Dortmund, Heidelberg and Saclay which had collaborated in a very successful neutrino experiment at CERN (the CDHS collaboration) but also invited there were physicists from MPI Munich, Rutherford lab, LAL Orsay and Giorgio Bellettini and Lorenzo Foà from Pisa.

I have never discussed in depth with Jack Steinberger on how the selection of the physicists invited was made, however it was clear that the idea was to form a nucleus of a collaboration with laboratories and physicists who had shown, in previous occasions, that they could take re-

* LAL, Univ. Paris-Sud, CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay, Orsay, France.



Figure 1. From left to right Jack Steinberger, Lorenzo Foà, and Jacques Lefrançois at an ALEPH party.

sponsibilities in the construction of large and complicated projects. From this first meeting and during the next two years we attracted groups from other laboratories, and made the main choices of the future apparatus, which we then presented in our letter of intent (LOI) to the LEPC (the CERN committee that the CERN management had installed in early 1982).

On figure 2 (left panel) one can see the list of the participating institutes at the time of the presentation of the LOI in March 1982 (actually figure 2 (left panel) is a copy of the first slide of the ALEPH presentation to the LEPC meeting). The ALEPH experiment was then recommended for approval and a technical report was requested. On figure 2 (right panel) the different tasks and the laboratories responsibilities are given, as presented in the technical report; this technical report was sent to the LEPC by May 1983.

One can see in this second list the arrival of a group from the Frascati laboratory (led by Paolo Laurelli) that played a major role with Pisa in the Hadronic Calorimeter (HCAL) construction. One sees also the arrival of the Beijing group that collaborated with the Italian groups for the construction of the muon chambers. One can see also in figure 2 (right panel) that a silicon minivertex detector (VDET) had been suggested by physicists of the Pisa group (as will be discussed later) but for financial and technical reasons its construction was delayed until around 1988.

ALEPH		
List of participating institutes		Share of the work
Bari Pisa Torino Trieste	]	Italy
Demokritos		Greece
Dortmund Heidelberg MPI Muenchen		GERMANY
Edinburgh Glasgow Lancaster Rutherford Sheffield Westfield College		
E.P. Palaiseau Orsay Saclay	]	U. K.
Wisconsin CERN		France
	]	U. S. A.
		Magnet: CERN for the iron and refrigerator, and Saclay for the coil
		TPC: MPI, CERN, Wisconsin, Dortmund, Glasgow, Pisa, Trieste, Edinburgh + a financial participation of Heidelberg and Siegen
		Electromagnetic Calorimeter: End caps: all UK participants (except IC London), Barrel: All French institutes
		Hadron Calorimeter, inner muon chambers: Barrel: Frascati, End caps: Pisa and Bari
		Other muon chambers: Beijing
		Inner Chamber: Imperial College London
		Luminosity monitors: Siegen and Copenhagen
		Minivertex detector: Pisa
		Trigger: Heidelberg and RAL
		DAQ: CERN

Figure 2. (left panel) List of institutes participating in ALEPH, presented to the LEPC in March 1982. (right panel) Share of responsibilities of institutes in the ALEPH collaboration as presented in the technical report May 1983.

3. Physics and apparatus knowledges in 1980

The choices that were made on the ALEPH apparatus were of course influenced to a large extent by our understanding of the physics measurements that would be performed at a high energy e^+e^- collider. Most important the W and the Z bosons had not been discovered yet at the time of our letter of intent and of our technical proposal, this would happen in 1983 at the CERN proton-antiproton collider by the UA1 and UA2 experiments. However the Electroweak Theory was well established and, from the measurement of $\sin^2(\theta_w)$ obtained from neutral current and charged current neutrino interaction experiments, one could predict with reasonable accuracy the mass of the W and Z. Of course, this is what had determined the energy range of the LEP machine, which was programmed to operate for some years at an energy equal to the Z mass before being upgraded to operate at around 200 GeV to allow to produce W^+W^- pairs.

The top quark had not been found yet; for some time, after that the state the ϕ meson was found with a mass of about 1 GeV and then a state the J/ψ with a mass of about 3 GeV and a state the Y at a about 9 GeV, physicist naively expected the next family to be discovered as a state at

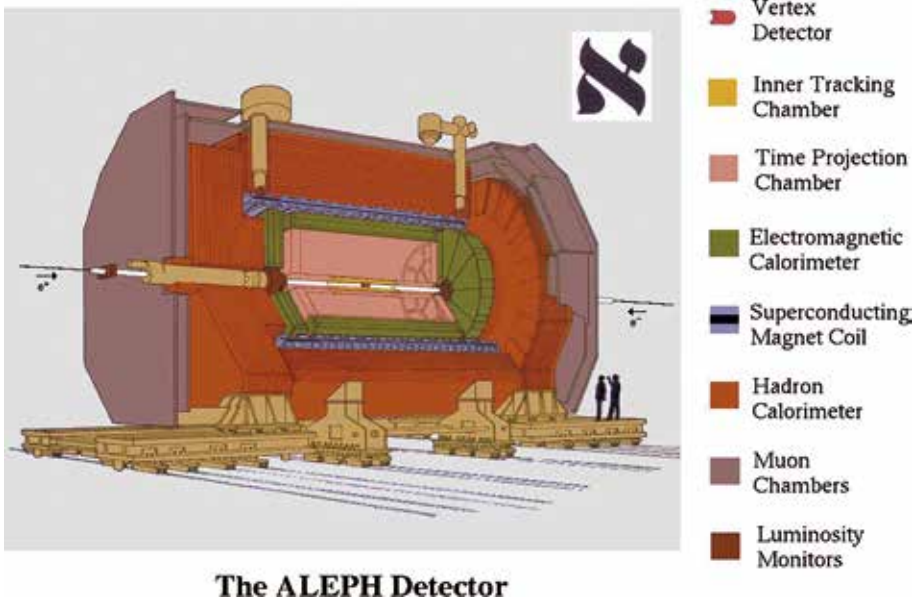


Figure 3. Schematic drawing of the ALEPH detector with the various subdetectors.

27 GeV. However, after the operation of the PETRA and PEP colliders at 30 and 29 GeV in 1979-1980, it became obvious that the top had a higher mass but at the time of the ALEPH design it could not be excluded that the mass could be low enough to be produced as a state below the energy of LEP 1 (90 GeV). Then in 1984 UA1 published [1] some evidence of what could be a top quark with a mass of about 40 GeV seen at the CERN proton antiproton collider. The existence of a toponium with a mass accessible at LEP 1 would have had an impact on the LEP 1 physics and would have given a premium to a detector able to measure low energy photons (<1 GeV) with a few percent accuracy as was implemented in the L3 apparatus, but ALEPH decided not to invest in this direction because it had negative impact on other properties we thought more essential.

The QCD theory was rather well established around 1980 and actually gluon jets had been observed in 1979 at the PETRA collider in e^+e^- events. Since the event structure had been validated at PETRA and PEP and gluon jets observed, one could have confidence in our simulation of how typical events would look like. We therefore convinced ourselves that a key property of our detector was a fine granularity of the tracker and calorimeters to observe the detail of the narrow jets of typical events. This was essential to be able for example to identify electrons or muons in jets from heavy flavour quarks hadronisation, but also, as it was learned gradually, to do better jet energy and angle measurements using the “particle flow” technique.

On the detector technique side, Multi Wire Proportional Chambers had been invented by Charpak and widely used since the early 70's, rather rapidly the chambers evolved to drift chambers which gave a better accuracy and to the Time Projection Chamber (TPC) (which can be considered as a large drift chamber), which was invented at SLAC in the late 70's and actually started to take data in 1984. Also, other modes of gas amplifications were developed like the Iarocci tube technique (first used around 1980), this allowed larger gain and standardized pulse. But in my opinion, the most important evolution was the gradual electronic chip improvements, allowing a much larger number of channels to be read out. Four or five years earlier than ALEPH a high granularity detector would have been extremely difficult and expensive if not impossible, this can be seen in the very limited granularity of the CERN collider detectors UA2 and especially UA1.

4. Early brainstorming

During the early years of ALEPH design (before the technical report in 1983) responsibilities were not frozen in our discussions and physicists from different laboratories would contribute to discussing ideas on various detectors. For example, senior physicists from Pisa like Lorenzo Foà, Italo Mannelli, Giorgio Bellettini, took part in discussions on the general concept of ALEPH, whether the magnetic field would be in the form of a solenoid or a sphere, whether the track detector would be a TPC or a more classical drift chamber, liquid argon or scintillators or wire chambers as active agents of calorimeters, etc... But, of course, gradually, the ideas evolved, decisions were taken, and, by the time of the technical report, responsibilities were assigned, as I have shown above... and some senior physicists left for other projects. However something remained of this period, where everybody could show their interest on various aspects of ALEPH: even if a laboratory like Pisa would have for main construction responsibility the hadronic calorimeter (HCAL), with Lorenzo Foà as project leader, it was possible for some Pisa physicist to continue working and make very significant contribution to other subjects like the TPC. Actually Pisa had also a key role in the VDET construction and this will be described in section 5.

A schematic drawing of the ALEPH detector is shown in figure 3 and the event display of a 2-jets event in figure 4. A paper published in 1990 in NIM [2] describes the ALEPH detector and a paper [3] published also in NIM, in 1995, describes the performance of the detector as experienced in the LEP 1 data taking.

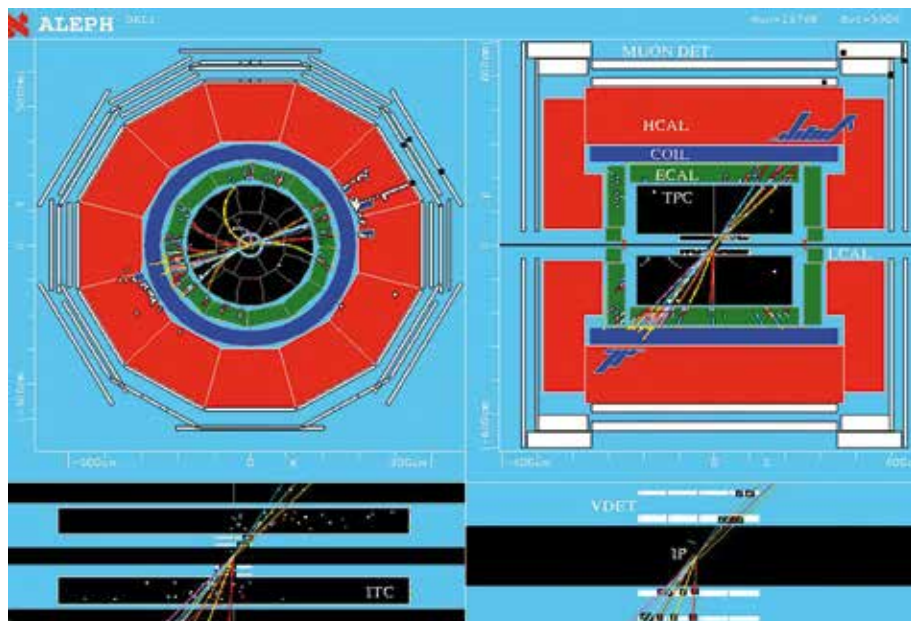


Figure 4. Event display of a 2-jet event with a double semi-leptonic decay producing two muons.

5. The Hadron Calorimeter (HCAL)

5.1. Introduction

In the initial discussion, the idea was to have a hadron calorimeter made of iron plate and scintillators read by photomultipliers, as was done in the UA1, UA2 and CDF experiments. But to obtain a better granularity the choice (as initially suggested to the collaboration by Lorenzo Foà) was made to use sandwiches of iron plates and long streamer tubes of section 1x1 cm and length up to 700 cm, with cathode readout. This technique had just been developed in a large scale for a proton lifetime experiment built at the time. The advantage of the streamer mode is that pulses are higher than in the case of MWPC, which means easier to build and therefore cheaper electronics. Because of the saturation of the streamer mode the system does not measure “energy deposited by ionisation” but rather the number of particles each creating a streamer. Initially there were suggestions of a different detector type for the muon chambers but upon the insistence of Jack Steinberger that we should minimize the number of different techniques used in the ALEPH detector, the muon chambers were built with the same streamer tube technique, with X and Y readout by cathode strip. However, this was increasing the amount of construction and a collaboration was started between the Italian labs and Chinese

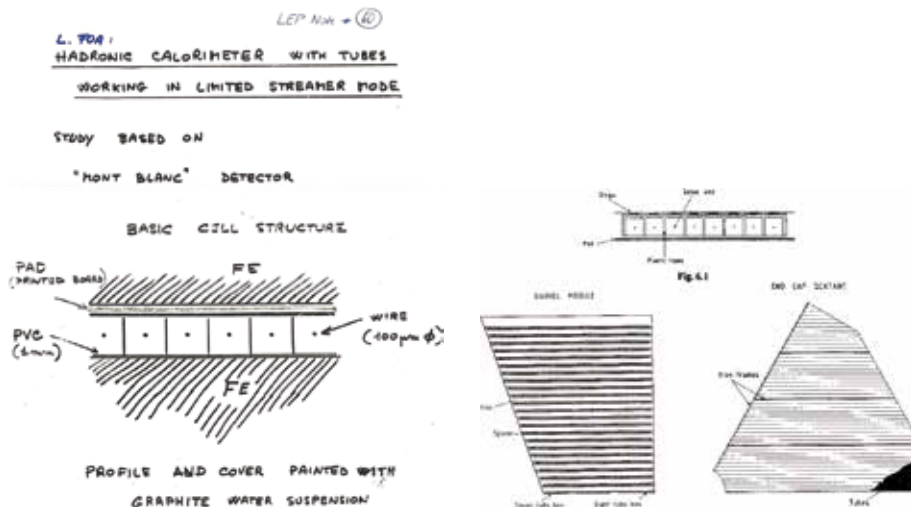


Figure 5. (left panel) Front page of ALEPH note #60 by Lorenzo Foà, introducing the idea of a streamer tube HCAL. (right panel) Detailed design of the HCAL from the same note.

collaborators of IHEP who took responsibility for the construction of the second layer of muon chambers. The HCAL per se and the first layer of muon chambers were the responsibility of the INFN labs of Frascati, Bari and Pisa with Lorenzo Foà as the project leader. From Pisa, Carlo Bradaschia had a key role in the construction and also Roberto Tenchini, Alberto Messineo and Giovanni Batignani.

5.2. The construction documents

The early construction documents of ALEPH are of course not easily accessible as detailed notes on the WEB as now. Most of our discussions and decisions were taken in plenary meetings after presentation of ideas using projected slides (mostly “hand written”). Luckily these slides were photocopied and given an “Aleph note” number, and a copy of these notes can be found in an archive basement room at CERN. The first mention by Lorenzo Foà of the streamer tube idea for the ALEPH HCAL can be found in note 60 (dating from 26/11/1981), the first page of the note is shown on figure 5 (left panel).

5.3. The HCAL design

The HCAL cell sizes were determined by the size of cathode pads on one side of the streamer tubes. Since the size of the showers produced by hadrons in iron are quite larger than the one of electrons or photons in ECAL made of lead, it is natural that the towers of HCAL be bigger than the ones of ECAL (about $3 \times 3^\circ$ instead of $1 \times 1^\circ$) and therefore the num-

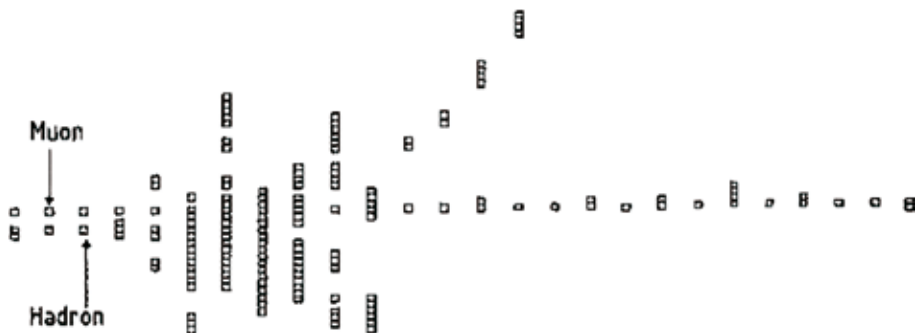


Figure 6. Event display of a hadron shower and a muon in HCAL.

ber of towers smaller (4800 instead of 70000). However the BRILLIANT idea was to decide to also read each tube using a strip cathode on the opposite side of the streamer tubes. The design from the same note 60 is shown in figure 5 (right panel).

The great advantage of reading strips was the granularity. This was useful for muon identification, as can be seen on figure 6, but was also essential for measuring jet energy and angle using particle flow technique. In this technique, charged hadrons are measured by the TPC, photons by the ECAL and neutral hadrons by the HCAL, this is only possible when the granularity is good enough to exclude energy release in HCAL related to charged particles. The price to pay was the large number of electronic channels 120,000 for HCAL+ 40,000 for muon chambers. Similarly the granularity of ECAL meant 210,000 channels and about 50,000 channels for the TPC (however in this case each channel was a 10 MHz flash ADC). A typical HCAL event with a hadronic shower and a muon is shown on figure 6.

5.4. HCAL performance

The detail performance can be found in ref. [3]. Because of the sampling of the particles in the shower with a gaseous detector one could have been afraid of obtaining worse resolution compared to a scintillator and iron HCAL, but the energy resolution was $\sigma = .84\sqrt{E}$ GeV quite similar. More important, because of the excellent granularity one could use the particle flow method and obtain jet energy measurements with an accuracy of $\sigma = 0.54\sqrt{E} + .6$ GeV. This was appreciably better than other LEP experiments and played an important role in various physics subject studied in ALEPH, in Higgs searches for example. Another important benefit of the granularity was the excellent muon identification: we had an algorithm identifying muons in jets with an efficiency of 86% while rejecting hadrons with an efficiency of 99.2%.

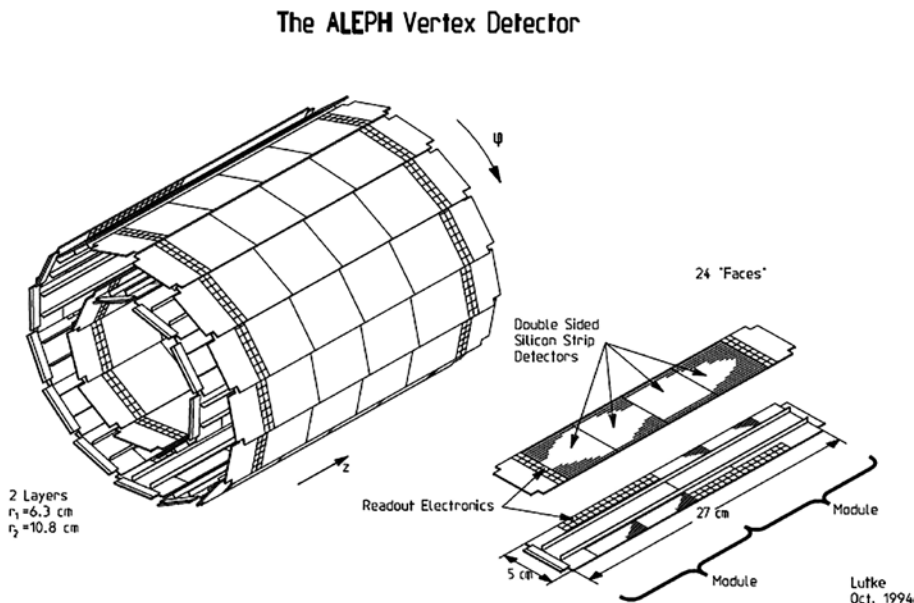


Figure 7. Overall and detailed view of the ALEPH vertex detector.

6. The ALEPH Vertex Detector (VDET)

Already in the LOI, under the main influence of Marcello Giorgi from Pisa, there was a proposal for a Silicon Vertex Detector, using two layers of Silicon detectors. Since one layer was measuring the ϕ coordinate and the other z , this VDET would have given only one precise point on the trajectory. Because of overall funding problems, anyhow, after the LOI approval, the VDET construction was staged.

Then, in 1984-85, there was the brilliant suggestion to build two side readout of each silicon detector, one side reading the r - ϕ coordinate, the other side reading the z coordinate, this allowed to measure accurately position and angle just outside the beam pipe. A view of the VDET design is shown in figure 7 and an article on double-sided silicon strip detectors developed in Pisa can be found in ref. [4].

Of course, such a detector was nevertheless more expensive than two layers with single face readout and this project was a collaboration between Munich and Pisa, (enlarged later to CERN, Marseille, Santa Cruz, Wisconsin). Marcello Giorgi was the first project leader, other important Pisa contributors were L. Bosisio, F. Forti, E. Focardi, and G. Tonelli.

The double-sided idea was brilliant but took some effort to make it work! So, in 1989, only a few modules were installed and in 1990 a bit more than one layer but there were also unforeseen difficulties, the

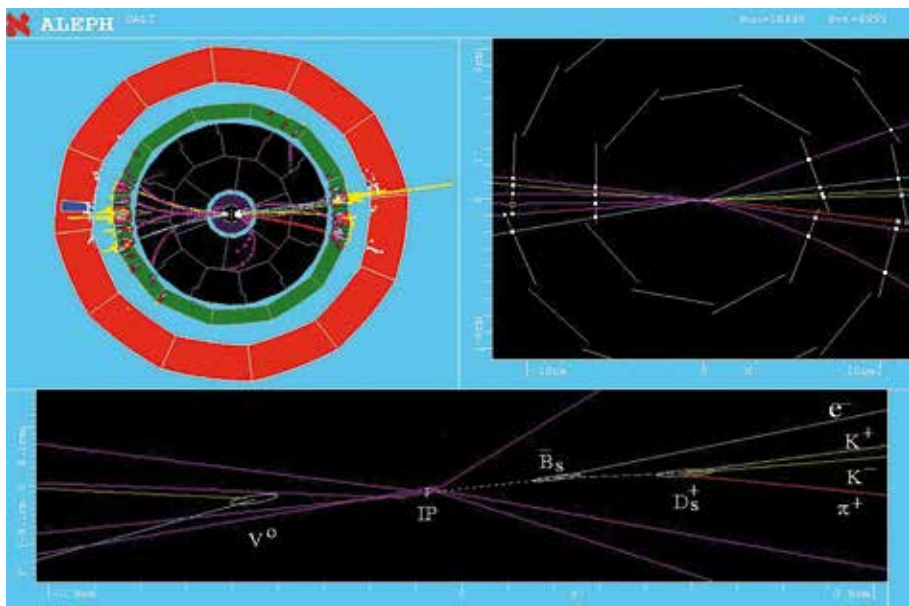


Figure 8. An event display showing the tracks from a B_s decay with detailed view of the tracks in the VDET and reconstructed track close to the vertex.

worse one in my opinion was a puncture of the thin capacitor used in series between detectors and amplifiers in case of very large pulses (few hundred volts) when there was a huge radiation from LEP beam loss. It turned out that the only way to protect our detectors (VDET but also TPC) was to detect in a sensitive way “early signs of beam instability” and voluntarily dump the beams rapidly in a safe place... This is of course now a trivial idea at the LHC, but it was new at LEP.

Finally, for the 1992 run, the full detector was installed and ran beautifully.

The accuracy of the device was about $12\ \mu$ in both views in each layer. The impact on the physics was extraordinary. It allowed to measure lifetime of τ lepton or B mesons or baryons. But it also allowed to recognised events with the production of a pair of b quarks (an example of such an event is shown in figure 8).

This had a great impact in measurements of the fraction of events with b quarks (R_b) or b quark asymmetries but also, since the Higgs boson decay mostly to a b quark pair, the VDET played a major role in Higgs searches.

As said above, the VDET worked beautifully after a difficult start but it was of a limited size since the project was already challenging. But, rather rapidly after its successful operation, there was the idea of having an improved version for LEP2 physics (with the machine operating at an energy of

more than 180 GeV) with more complicated event structure, such as or searches. So a new VDET was built which was twice as long and with thinner detectors (figure 9). Pisa had an important role in the conception and construction, but within a much larger collaboration with addition of groups from Italy, France, UK and US. It still used the great idea of double-sided readout.

7. Other apparatus contributions

As mentioned above some Pisa physicist showed their interest and then contributed to other detectors than the HCAL and VDET, mainly to the TPC project. For example in the ALEPH note 83 (Oct 82) (the first page of which is shown in figure 10) on the test result of a prototype TPC, of the 10 signatories 4 signatories were from Pisa (S.R. Amendolia, C. Batignani, F. Fidecaro, F. Liello, (and L. Rolandi and F. Ragusa from Trieste were “closely associated to Pisa”).

8. Some physics analysis and Pisa's role

It would be impossible to try to review the large number of analyses performed during the lifetime of ALEPH, so I have made an arbitrary choice: I will focus on 2 general results that in my view are among the most important for ALEPH (and LEP) talking also of Pisa's physicists involved and then I will add comments on a specific analysis with a few Pisa physicists involved.

8.1. The number of neutrino families

In principle, the only thing to do, to obtain the number of neutrino families, with masses of neutrinos $\ll (M_Z/2)$, is to measure the total Z width and subtract the partial widths to hadrons or leptons. The key point is that rather than scanning the Z mass peak to obtain the Z width it is more accurate to use the peak cross section of, which is proportional to.

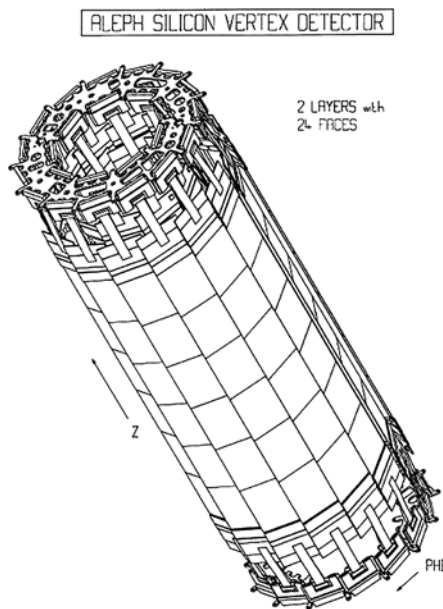


Figure 9. The upgraded vertex detector for LEP II.



Figure 10. First page of the ALEPH note #83 on the test of a TPC prototype showing the role of Pisa physicists.

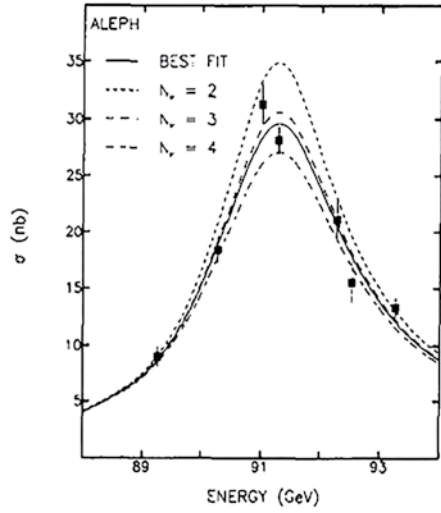


Figure 11. Scan of the Z observed in the hadronic decay mode with the expected results in the case of 2, 3 or 4 neutrino families.

$$\sigma_f^0 = \frac{12\pi}{M_Z^2} \frac{\Gamma_e \Gamma_f}{\Gamma_Z^2}$$

this can be transformed to:

$$N_v = \frac{\Gamma_\ell}{\Gamma_v} \left(\sqrt{\frac{12\pi R_\ell}{M_Z^2 \sigma_{\text{had}}^{\text{peak},0}}} - R_\ell - 3 \right)$$

R_ℓ , the ratio Γ_ℓ/Γ_ν , was taken initially from electroweak theory prediction corrected for QCD effect but later we used our own measured value of R_ℓ .

The first data was published early after the start of data taking [5] and a plot of the Z scan is shown on figure 11. This first data gave $N_v = 3.27 \pm 0.24_{\text{stat}} \pm 0.16_{\text{sys}} \pm 0.05_{\text{th}}$ but later with more statistics and using the R_ℓ value from our own data we obtained $N_v = 2.993 \pm 0.015$.

This result was extremely important because it could not be excluded that a 4th family existed with quarks and charged leptons too heavy to have been observed, the result $N_v = 3$ (for) made this extremely unlikely.

The initial analysis of course requested understanding the behaviour of the apparatus to which we had all contributed, there were two groups doing the analysis, one relying on purely calorimeter signature for the

hadronic events led by Jack Steinberger and another group relying on pure TPC signature and led by A. Blondel. Both results were averaged. Fabrizio Palla from Pisa was part of Jack's group. The later analysis used our own measurement of R_l and this involved work from the lepton groups, among them the tau group (L.Rolandi (originally from Pisa) was one of the convenors of the tau group).

8.2. Precision Electroweak measurements allowing to predict M_{top} and M_{Higgs}

I remember this prediction of M_{top} as one of the most exciting moment of ALEPH. EW measurements receive correction which are like $(1+a*(M_{\text{top}}/M_w)^2)$ or like $(1+b*\ln(M_{\text{Higgs}}/M_Z))$. These EW measurements include the width Γ_Z but most important $\sin^2(q_w)$ obtained from asymmetries. Even with only the 1989, 1990 data ALEPH could publish [6] an EW precision measurement paper, giving the prediction from ALEPH data alone:

$$M_{\text{top}} = 170 \text{ GeV} \pm 45(\text{expt}) \pm 20(\text{Higgs } 30 \text{ GeV}-1000 \text{ GeV}).$$

By 1994 the accuracy was $(173 \pm 12 \pm 19 \text{ GeV})$ for the 4 experiments, and then the top production in ppbar collisions was observed at Fermilab and its mass measured:

$$M_{\text{top}} = 176 \pm 16 \text{ GeV}.$$

As it is well known, after M_{top} was measured, the data could be used to predict M_{Higgs} (at ICHEP 2002 $M_H = 81^{+52}_{-33} \text{ GeV}$). We certainly owe a lot to our theorist colleagues for these extraordinary accurate predictions, but experimentalists are also allowed to be proud of the measurements performed!

As can be seen in figure 12 $A_{\text{fb}}^{0,b}$ the asymmetry in events was the most sensitive tool at LEP to determine $\sin^2(\theta_w)$. Different methods were used using the lepton charge in b semi-leptonic decays or signing events with the decay pattern of B hadrons using the VDET and then using the jet charge to distinguish b from. The ALEPH result was more accurate (by about 20% to 50%) than other LEP experiments. We owe this partly to the quality of the apparatus, but also to our Pisa B team of D.Abbaneo, F.Ligabue, F.Palla and R. Tenchini. By 1994, Roberto Tenchini was the convenor of the ALEPH EW Heavy Flavour group.

8.3. The τ lepton lifetime measurement

The first measurement done using the operational VDET was the τ lifetime. It was a very nice analysis done by 4 physicists from Pisa [7], F. Fidecaro, A. Lusiani, A. Messineo, I. Ferrante. Being at the Z peak had

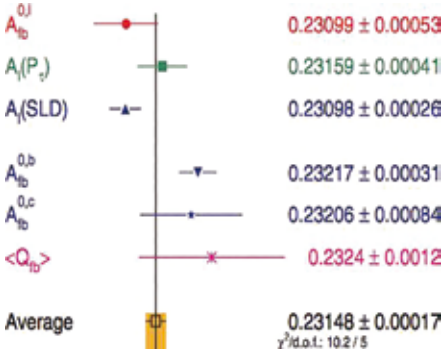


Figure 12. Values of $\sin^2(\theta_w)$, obtained by the 4 LEP experiments and SLD, from asymmetries. One sees that the b quark asymmetry provides the most accurate measurement after the one obtained at the SLD using polarized beam.

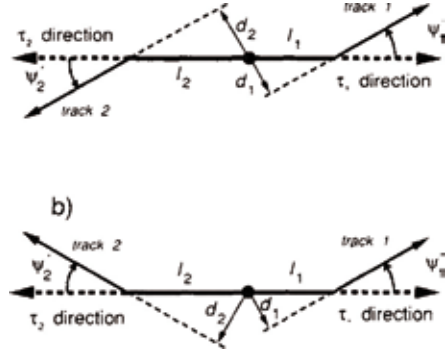


Figure 13. Schematics of the impact-parameter-sum and difference measurements used to evaluate the τ lifetime; these measurements are not sensitive to the beam size at the collision point.

advantages compared to other previous measurements at e^+e^- colliders: a higher production cross-section and therefore a larger number of events, a negligible background from events, which at this energy had a larger charged multiplicity. Also a 45 GeV τ lepton has a 2.5 mm decay length that can be directly observed in decays.

For 1-1 topology one uses impact parameter sum or differences (typically 150 μ) as can be seen on figure 13.

I remember I was ALEPH internal referee for this analysis and publication and the discussions were a pleasure! There were subtle points, for example the radial position of the VDET detectors were not known well enough, however the size of the detectors and their overlap, measured using tracks, were known to a few μ therefore the circumference was known to a few microns and the average R could be determined accurately. Of course the shape could be slightly oval but one could show that these second order effects were small. The collection of lifetime measurements is shown in figure 14, one can see the impact starting in 1992 of LEP measurements done with silicon strip vertex detectors, using the ALEPH result alone one could deduce the equality of μ and τ coupling to the W boson with a 1.2% error.

9. Conclusions

Apart from the responsibilities in apparatus construction, and some analysis (or convenor of analysis groups) that I have mentioned, there were other general contributions of Pisa physicists.

Lorenzo Foà was spokesman 1993-1994, Gigi Rolandi (which started his physics life as a PhD student of Lorenzo at the Scuola Normale, then went to the Trieste group closely linked to Pisa, then CERN and now back at the Scuola Normale was physics coordinator (1989-1994) and spokesman (1994-1997), Roberto Tenchini was spokesman (2001-2005).

These were wonderful days, the physics was fascinating, building the detector with our Pisa colleague was a pleasure and the collaboration a very united one.

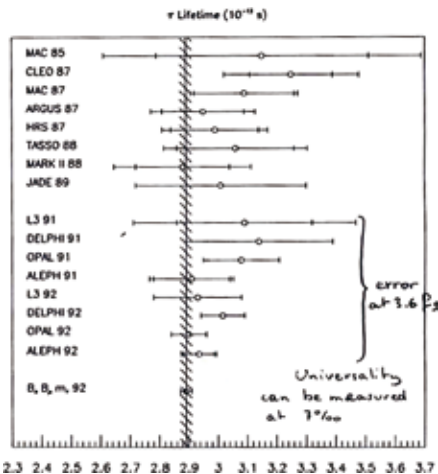


Figure 14. τ lifetime measurements up to 1992 showing the impact of vertex detectors.

10. Acknowledgements

I thank the organiser of the workshop for giving me an opportunity to remember these days close to my heart and I thank F. Fidecaro, L. Rolandi and R. Tenchini for Email exchanges when preparing the presentation. There are special thanks to Roberto Tenchini for helping me to put in shape the written version.

References

- [1] G. Arnison *et al.*, Physics. Letters B 147, 1984, 493.
- [2] D. Decamp *et al.*, ALEPH Collaboration, Nucl. Instr. And Meth. A 294, 1990, 121.
- [3] D. Buskulic *et al.*, ALEPH Collaboration, Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. A 360, 1995, pp. 481-506.
- [4] G. Batignani *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. A 360, 1995, pp. 98-102.
- [5] D. Decamp *et al.*, ALEPH Collaboration, Phys.Lett. B231, 1989, pp. 519-529.
- [6] D. Decamp *et al.*, ALEPH Collaboration, Z.Phys. C53, 1992, pp. 1-20.
- [7] D. Buskulic *et al.*, ALEPH Collaboration, Phys. Lett. B297, 1992, pp. 432-448.

I fisici pisani oltre la Cortina di Ferro: un'avventura scientifica e umana 1971-1975

Angelo Scribano*

1. Antefatto: Esperimento NEGA (CERN 1968-1971)

Nel 1968 Italo Mannelli (Pisa) e Heinz Müller (Karlsruhe) si accordano per misurare alle energie disponibili presso il nuovo protosincrotrone del CERN le sezioni d'urto di scambio carica $\pi^+p \rightarrow \pi^+n$ (con $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) ed i processi di produzione di risonanze mesoniche neutre $\pi^+p \rightarrow M^0n$ (con M^0 che decade in $m\gamma$ dove $m = 2, 3, \dots$). L'apparato sperimentale è concettualmente semplice visto che si cercano eventi che nello stato finale hanno solo particelle neutre che a loro volta decadono in γ . Serve quindi:

1. un bersaglio a idrogeno liquido (targhetta) su cui fare incidere il fascio di π^+ ;
2. un'insieme di scintillatori, tutto intorno alla targhetta, da usare in anticoincidenza per eliminare gli eventi che hanno particelle cariche nello stato finale;
3. un rivelatore di raggi γ ;
4. un rivelatore di neutroni.

Il gruppo di Pisa [1] fornirà la targhetta ad idrogeno liquido, il sistema di anticoincidenza ed il rivelatore di γ . Il gruppo di Karlsruhe [2] fornirà il rivelatore di neutroni. Nasce così l'esperimento NEGA (NEutrone-GAMma) al CERN.

Il gruppo di Pisa propone e realizza come rivelatore di raggi γ una camera a scintilla con lastre di metallo ad alto Z in modo tale che sia possibile rivelare con alta efficienza e accurata localizzazione spaziale eventi con produzione di gamma di alta energia anche di molteplicità elevata. L'ottica relativa è raffinata e le misure sono automatizzate mediante digitalizzazione delle immagini registrate su film fotografico. Nella figura 1 una foto durante il montaggio al CERN dell'apparato dell'esperimento NEGA. Nella foto sono presenti, da sinistra a destra, Franco Sergiampietri, Angelo Scribano, Gianni Gennaro e Mario Giovannetti. Sono ben visibili i fotomol-

* Università di Siena e INFN.



Figura 1. Montaggio apparato esperimento NEGA al CERN.

tiplicatori degli scintillatori che formano il sistema di anticoincidenza intorno alla targhetta e la grande camera a scintilla ($1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$) con elettrodi costituiti da un sandwich di lastre di Pb da 3 mm e fogli di Al da 0,5 mm.

Nella figura 2 una foto ravvicinata della camera a scintilla (con il sistema di alimentazione del gas) che viene fotografata su due viste mediante un sistema di specchi che formano un'immagine su una pellicola trascinata da una macchina fotografica interamente progettata e costruita a Pisa poiché quelle commerciali (Flight Research) non avevano le dimensioni del fotogramma ($35 \times 180 \text{ mm}^2$) e la velocità (6 fotogrammi/s) richieste dal nostro apparato. Nella foto Angelo Scribano, di spalle, discute con Gianni Gennaro. Vale la pena ricordare qui che le bobine di film venivano portate al Centro Nazionale Analisi Fotogrammi (CNAF) dell'INFN a Bologna dove i fotogrammi venivano digitizzati e immagazzinati su nastri magnetici per le successive analisi sull'IBM 7090 del CNUCE a Pisa.

Con tale apparato sono stati studiati in modo sistematico stati finali neutri di interazioni di pioni negativi contro protoni alle energie del PS del CERN di 6, 8 e 12 GeV [3], [4].

2. Nascita dell'esperimento NICE-SERPUKHOV 076 (1970-72)

Viste le misure fatte al CERN fino a 12 GeV veniva naturale pensare di estendere le misure ad energie più alte e quindi ad un esperimento presso l'acceleratore che, entrato in funzione da poco, disponeva dell'energia più alta al mondo: il proto-sincrotrone di Serpukhov (URSS).

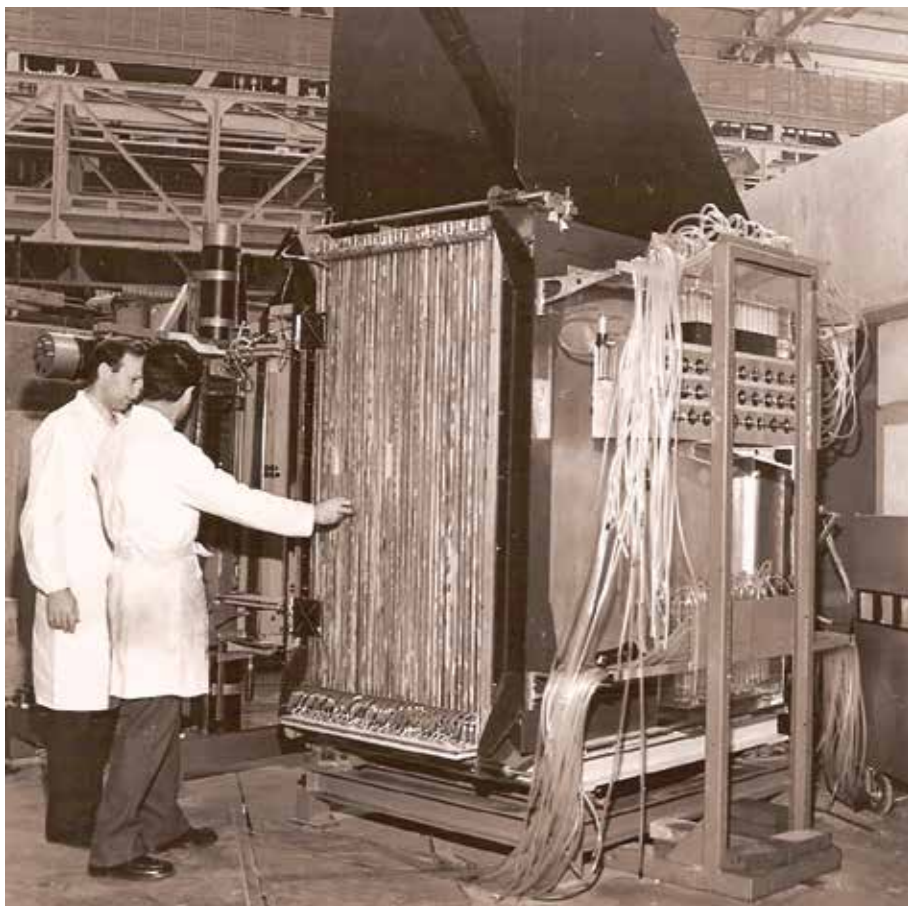


Figura 2. Camera a scintilla con elettrodi in Pb-Al per la misura dei raggi γ .

È emozionante ripercorrere questa avventura soprattutto visti gli anni in cui si è svolta. Siamo ancora in piena guerra fredda e quindi in contrapposizione politica, ideologica, culturale e militare fra Occidente e Oriente. Siamo nel periodo centrale del governo di Leonid Breznev (1964-1982) ma, per fortuna, qualcosa era successo.

Nel 1960, l'Unione Sovietica aveva preso la decisione di costruire il più grande acceleratore di particelle mai visto al mondo, un proto-sincrotrone da 70 GeV (di fatto poi sarà 76 GeV). Nel 1967 la nuova macchina viene completata a Provo (figura 3), vicino a Serpukhov (15 Km), nella regione di Mosca (100 Km).

Nello stesso anno 1967 viene firmato un Accordo fra il CERN e lo USSR State Committee for Atomic Energy (figura 4). Sotto questo accordo il CERN fornirà pezzi speciali per l'acceleratore e, in cambio, ricercatori del CERN e dei Paesi membri potranno partecipare al programma sperimentale del



Figura 3. Protvino in Russia.



Figura 4. Firma dell'Accordo CERN-USSR. All'estrema sinistra G. Funke, Presidente del CERN Council, guarda il Direttore Generale del CERN B. Gregory (al centro) e A. Petrovskiy mentre firmano l'Accordo.

nuovo acceleratore. Diversi esperimenti sono stati poi condotti a Serpukhov, mostrando come la collaborazione scientifica possa superare la politica e aprire una strada verso una futura cooperazione. Per noi questo voleva dire poter estendere le misure fino a 76 GeV. Un incontro durante una conferenza fra Italo Mannelli (Pisa) e Yuri D. Prokhoskin (Serpukhov) segna l'inizio di una collaborazione internazionale che ci porterà in Russia. L'esperimento che coinvolgerà fisici di Karlsruhe, Pisa, Serpukhov e Vienna studierà l'inte-

razione di scambio carica $\pi + p \rightarrow n + \text{neutrals}$. I gruppi di Karlsruhe e Pisa, come detto, hanno esaminato questa interazione al CERN PS misurando in coincidenza raggi γ e neutroni e sono interessati ad energie più alte per poter estendere il range di massa disponibile per $\pi^0\pi^0$ e ricercare risonanze a masse più alte. Il gruppo di Serpukhov, guidato da Yuri D. Prokhorov, ha appena finito un'esperimento con una camera a scintilla ottica ed è interessato a raccogliere maggiore statistica in particolare sull'interazione $\pi + p \rightarrow \pi^0 + n$.

Ha inizio così l'esperimento NICE (Neutral Interactions Charge Exchange) il cui nome tecnico è SERPUKHOV 076 ed è il 4° esperimento con contatori elettronici che viene realizzato sotto l'accordo fra il CERN e l'Institute for High Energy Physics (IHEP) di Serpukhov[5]. La proposta viene presentata nel giugno del 1971 e viene approvata nel dicembre dello stesso anno. L'installazione dell'apparato sperimentale al proto-sincrotrone IHEP da 76 GeV sarà completata nel marzo 1972. Subito dopo ha inizio la presa dati che sarà completata nel gennaio 1975.

3. Apparato sperimentale NICE

Gli ingredienti dell'apparato sperimentale sono essenzialmente gli stessi di quello dell'esperimento NEGA al CERN visto che il programma di fisica è lo stesso:

1. un targhetta a idrogeno liquido su cui fare incidere il fascio di π^- ;
2. un sistema di anticoincidenza tutto intorno alla targhetta, per poter selezionare eventi con lo stato finale completamente neutro;
3. un rivelatore di raggi γ ;
4. un rivelatore di neutroni.

Stessi ingredienti ma con l'obiettivo di avere rivelatori più moderni, al passo con i tempi, ossia rivelatori la cui risposta possa essere analizzata praticamente in tempo reale.

In figura 5 è riportato il layout dell'apparato sperimentale dove sono ben visibili gli elementi essenziali e identificati uno per uno nella didascalia. La figura 6 mostra una "brutta" foto dell'apparato sperimentale con i contatori a neutroni nascosti nei blocchi di cemento e il rivelatore di raggi γ in fondo. Un caos totale ma... funzionante!

In questo esperimento la camera a scintilla di NEGA è stata sostituita da un calorimetro con lastre di ferro ed odoscopi di contatori a scintillazione (spettrometro), finemente segmentato e con tre proiezioni a 60° gradi l'una rispetto all'altra.

Nella figura 7 è riportata una rappresentazione schematica dello spettrometro a odoscopio, usato come rivelatore di raggi γ . È costituito da tre blocchi di barrette di scintillatori accoppiate tre a tre ad un fotomoltiplicatore e interspaziate con le lastre di ferro e con gli scintillatori delle

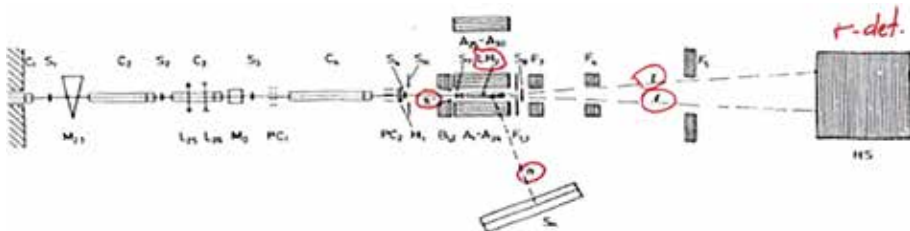


Figura 5. Layout dell'apparato sperimentale NICE - SERPUKHOV 076. M_{23} , M_0 , L_{25} e L_{20} sono gli ultimi magneti e quadrupoli di trasporto del fascio. S_1 - S_7 e C_1 - C_4 sono contatori a scintillazione e contatori Cerenkov che definiscono il fascio di π . PC_p , PC_2 e H_1 sono camere proporzionali e odoscopi che misurano la posizione e la direzione dei π del fascio. La targhetta ad idrogeno liquido LH_2 è completamente circondata da un sistema di guardia per particelle cariche, costituito da contatori a scintillazione S_8 , $F_{1,2}$ e sandwiches A_1 - A_{24} , $B_{1,2}$ e F_3 - F_5 . HS è il rivelatore a odoscopio di raggi γ con 648 canali. S_n è il rivelatore di neutroni e A_{25} - A_{30} è un blocco sandwich addizionale.

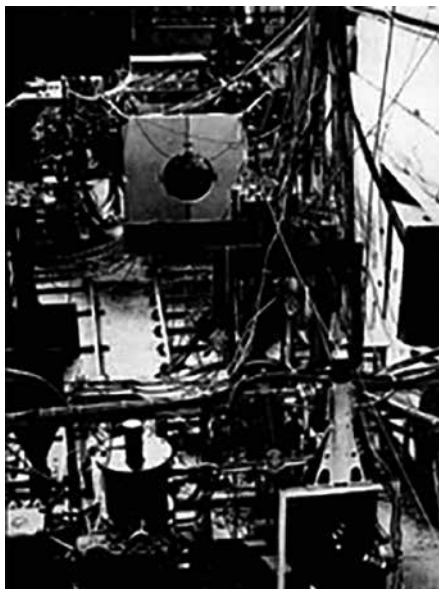


Figura 6. Foto dell'apparato sperimentale NICE - SERPUKHOV 076.

altre viste, ruotate di 60° . Segue un quarto blocco con segmentazione più grossolana ma sempre su tre proiezioni. L'altezza d'impulso di ciascun fotomoltiplicatore veniva registrata su nastro magnetico, mediante un calcolatore IBM 1800 fornito dal CERN, come pure tutti gli altri segnali provenienti dagli altri rivelatori.

Da ricordare che il sistema di contatori a neutroni era gestito da un calcolatore Telefunken fornito dal gruppo di Karlsruhe. Nella figura 8 è mostrata la rappresentazione on-line di un evento della reazione $\pi + p \rightarrow \pi^0 + n$, con il $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$. Il π incidente ha un impulso $p = 40$ GeV/c. Il triangolo interno nel diagramma corrisponde ai tre assi coordinati X, U e V del primo blocco

dello spettrometro. Il secondo ed il terzo blocco sono mostrati dalle righe parallele a ciascun lato del triangolo. Gli istogrammi rappresentano le altezze d'impulso dei singoli contatori di ciascun blocco. I contatori attivati del quarto blocco sono mostrati nel diagramma da segmenti. Le intersezioni delle linee rette tratteggiate corrispondono alle posizioni nello spettrometro degli sciami prodotti dai γ .

Per dare un'idea delle risoluzioni in massa ottenute, nella figura 9 è mostrato lo spettro della massa invariante $M_{\gamma\gamma}$ negli eventi con una sola coppia di γ nello stato finale. Sono ben visibili il π^0 e l'h.

Una descrizione particolare merita la speciale targhetta ad idrogeno liquido. La tecnologia di liquefazione dell'idrogeno l'avevamo appresa (Franco Serghiampietri e altri) nel laboratorio criogenico di Mazzoni al CERN per costruire la targhetta dell'esperimento NEGA. In un primo tempo si usava elio liquido in contenitori dewar per raffreddare e liquefare l'idrogeno, successivamente è stato utilizzato un liquefatore di elio di dimensioni ridotte, vista la piccola quantità di idrogeno (meno di 2 litri) di cui avevamo bisogno.

La particolare caratteristica di questa targhetta è la possibilità di localizzare il punto di interazione negli eventi con stati finali completamente neutri. A tale scopo si usa la misura della luce Cherenkov emessa dal pione incidente carico nel suo percorso prima di interagire. Infatti quando il π incidente fa un'interazione con uno stato finale completamente neutro, la quantità di luce emessa dipende solo dalla lunghezza del percorso del π fra la finestra d'ingresso della targhetta e il punto d'interazione. Quindi una misura della quantità di luce fornisce un'informazione sulla posizione dell'interazione lungo la targhetta.

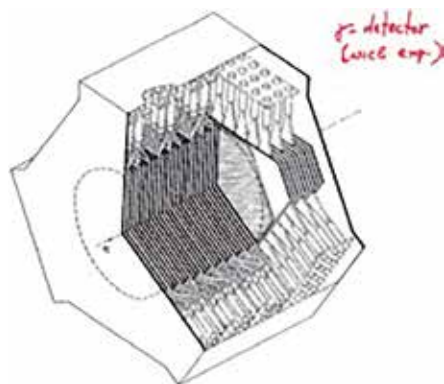


Figura 7. Rappresentazione schematica dello spettrometro a odoscopi.

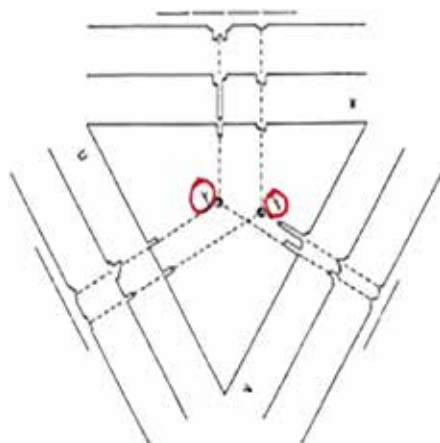


Figura 8. Rappresentazione di un evento con 2 γ nello stato finale.

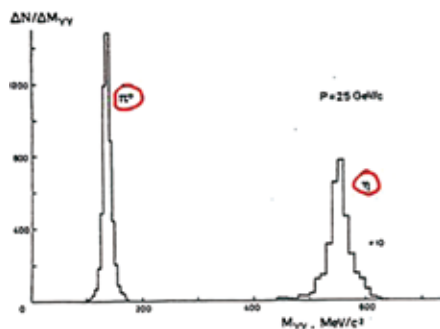


Figura 9. Spettro di massa invariante $M_{\gamma\gamma}$ (si noti che la scala verticale nella regione $M_{\gamma\gamma}$ 400 MeV/c² è stata espansa di un fattore 10).

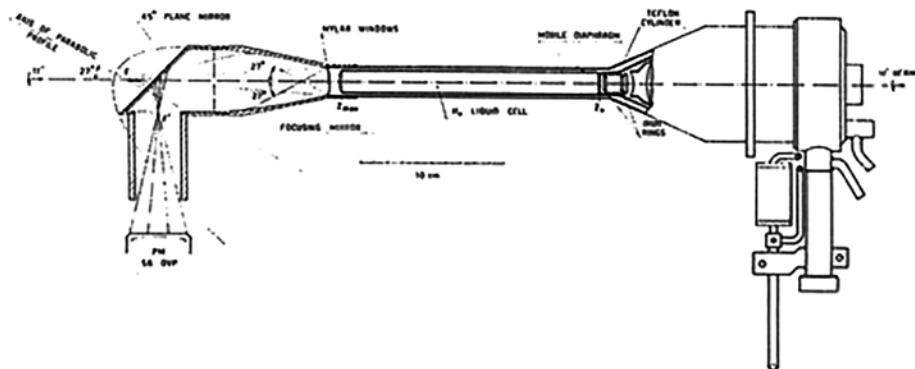


Figura 10. Targhetta a H_2 liquido con l'ottica per la raccolta della luce Cerenkov ed il fotomoltiplicatore a 90° , fuori dal fascio. Nel riquadro l'involucro esterno della targhetta di 60 cm in inox sottile, opportunamente modellato per poter resistere quando si fa il vuoto all'interno per isolare l' H_2 liquido.

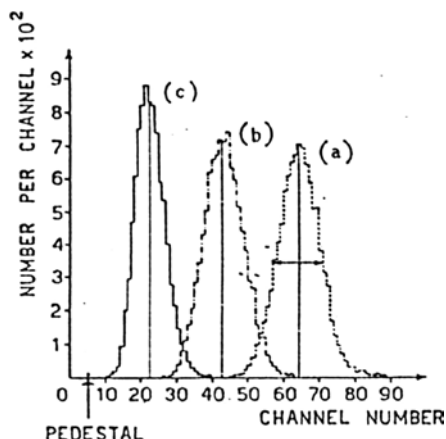


Figura 11. Misure della raccolta della luce Cerenkov in una targhetta a H_2 liquido di 20 cm.

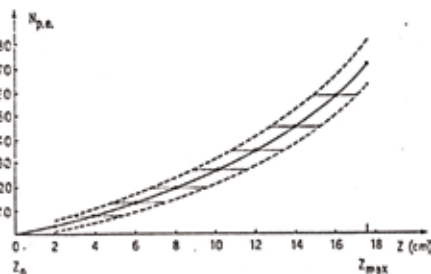


Figura 12. Curva di calibrazione per interazioni neutre in una targhetta di 20 cm. Z è il percorso del π e N_{pe} è il numero stimato di fotoelettroni prodotti sul fotocatodo.

Questo permette di utilizzare targhette molto lunghe, a beneficio del numero di interazioni, a parità di intensità del fascio, pur mantenendo la localizzazione del punto di interazione a qualche centimetro.

Nella figura 11 sono riportate gli spettri di altezza di impulso per π che hanno percorso rispettivamente $L = 17,5$ cm (a), $L = 7,5$ cm (b) e $L = 1,5$ cm (c) in una targhetta di 20 cm di lunghezza [6]. Nella figura 12 è invece riportata la curva di calibrazione per la stessa targhetta. La distanza verticale fra la curva e le linee tratteggiate rappresenta la deviazione standard in altezza d'impulso ad un dato Z . I segmenti orizzontali danno una misura

"NICE" MEASUREMENTS	
•	ANALYSIS OF THE REACTION $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \eta n$ AT 40 GEV/C BEAM MOMENTUM
•	MEASUREMENT OF $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$ AT 25-GEV/C
•	MEASUREMENT OF $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$ AT 25-GEV/C
•	OBSERVATION OF THE REACTION $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \eta n$ AT 25 GEV/C AND 40-GEV/C BEAM MOMENTUM
•	OBSERVATION OF A SPIN 4 NEUTRAL H MESON WITH 2 GEV MASS DECAYING IN $\pi^0 \pi^0$
•	REACTION $\pi^- p \rightarrow \omega n$ IN THE 15-40 GEV/C MOMENTUM RANGE
•	REACTION $\pi^- p \rightarrow \eta' n$ IN THE 15-40 GEV/C MOMENTUM RANGE
•	REACTION $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ IN THE 15-40 GEV/C MOMENTUM RANGE
•	REACTION $\pi^- p \rightarrow \eta n$ IN THE 15-40 GEV/C MOMENTUM RANGE
•	OBSERVATION OF A MESON $X \rightarrow 2\gamma$, WITH MASS 2.85 GEV/C ² , PRODUCED IN THE CHARGE
•	EXCHANGE REACTION $\pi^- p \rightarrow X n$ AT 40 GEV/C
•	INVESTIGATION OF $\pi^- p \rightarrow \pi^+ n$ REACTION AT LARGE MOMENTUM TRANSFER
•	STUDY OF THE REACTION $K^- p \rightarrow \text{anti-}K^0 n$ AT MOMENTA OF 25 GEV/C AND 40 GEV/C
•	REACTION $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ AT LARGE MOMENTUM TRANSFER
•	SEARCH FOR ASSOCIATED PRODUCTION OF CHARMED PARTICLES IN $\pi^- p$ COLLISIONS AT 40 GEV/C
•	INVESTIGATION OF THE REACTION $\pi^- p \rightarrow \pi^+ n$ AT MOMENTA UP TO 40 GEV/C
•	OBSERVATION OF THE REACTION $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^0 n$ AT 40 GEV/C
•	STUDY OF THE REACTION $K^- p \rightarrow \text{anti-}K^0 n$ AT MOMENTA OF 25 AND 40 GeV/c

Figura 13. Misure realizzate con l'apparato dell'esperimento NICE.

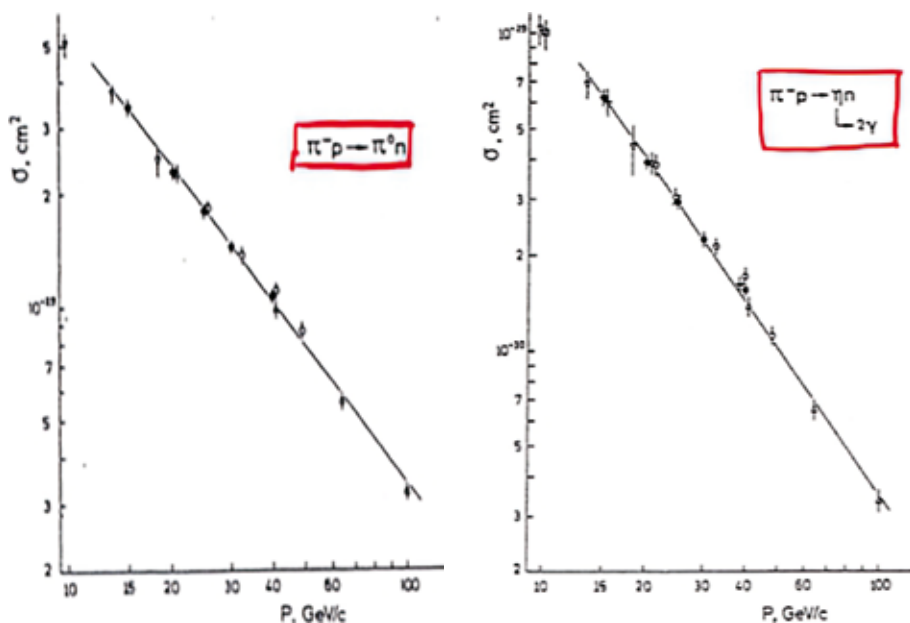


Figure 14 e 15. Sezioni d'urto totali per le reazioni $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ e $\pi^- + p \rightarrow \eta + n$.

del corrispondente grado di precisione nella localizzazione delle interazioni neutre. La risoluzione ottenuta è di circa 3 cm fwhm nella targhetta di 20 cm (CERN) e di circa 5 cm fwhm in quella da 60 cm (Serpukhov).

Prima di passare alla presentazione dei risultati dell'esperimento NICE riassumiamo le principali differenze fra l'esperimento NICE a Serpukhov e l'esperimento NEGA al CERN:

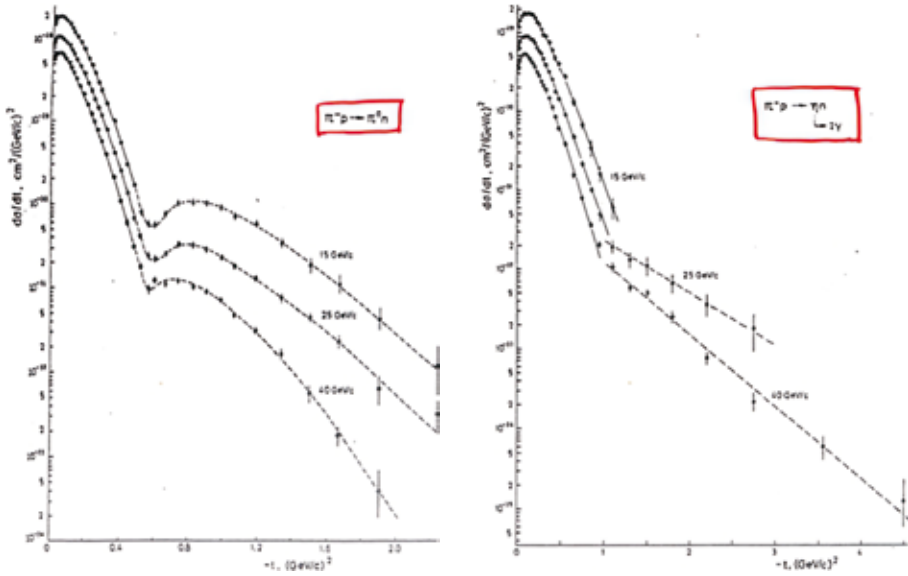
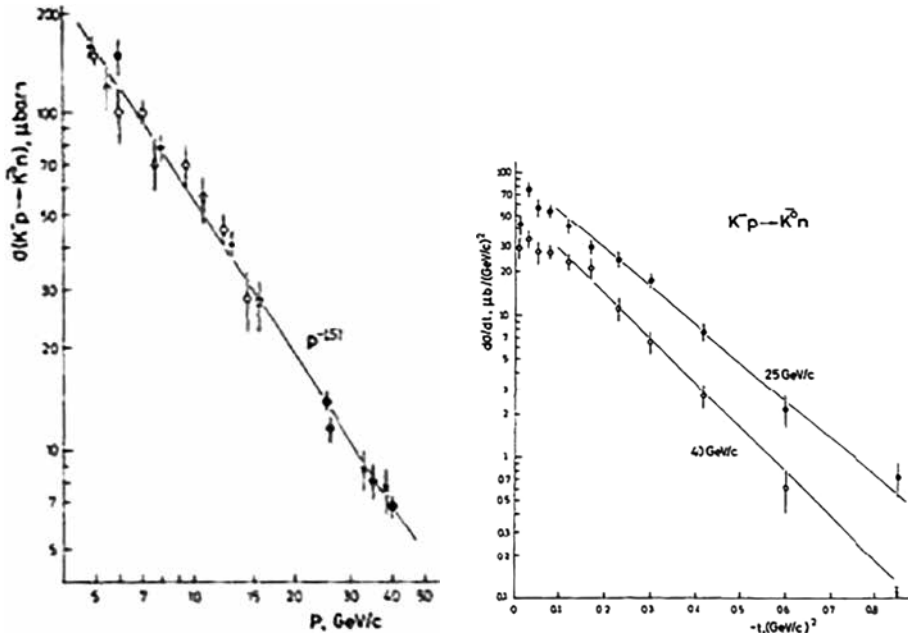


Figure 16 e 17. Sezioni d'urto differenziali in t per le reazioni $\pi^+ p \rightarrow \pi^+ n$ e $\pi^+ p \rightarrow \eta n$.



- impulso π^0 12 GeV/c al Cern $\rightarrow$ 40 GeV/c a Serpukhov;
- lunghezza targhetta H_2 liquido 10 cm NEGA $\rightarrow$ 60 cm NICE;
- data taking on-line NICE, fotogrammi NEGA.

4. Risultati esperimento NICE

Con l'apparato descritto sopra sono stati raccolti grandi quantità di dati per studiare le interazioni $\pi^- p$ a vari impulsi incidenti del π^- , fino a 40 GeV/c. Le reazioni investigate sono del tipo $\pi^- + p \rightarrow M^0 + n$ con il mesone M^0 che decade in γ , π^0 o altre particelle neutre i cui prodotti di decadimento finali sono γ , quindi $M^0 \rightarrow m \gamma$ ($m = 2, 3, \dots$). In figura 13 è riportata una tabella con tutte le misure di questo tipo realizzate dall'esperimento NICE.

A titolo di esempio nelle figure seguenti sono mostrate le sezioni d'urto totali (figure 14 e 15) e differenziali (figure 16 e 17) di produzione di π^0 e h [7].

Fra le varie prese dati a Serpukhov vale la pena ricordare lo studio della reazione $K^- p \rightarrow \bar{K}^0 n$ agli impulsi di 25 e 40 GeV/c [8], utilizzando in questo caso due sistemi di camere proporzionali a filo, poste prima dello spettrometro γ , per la tracciatura del π^+ e del π^- del decadimento $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. Le misure delle sezioni d'urto totali e differenziali sono riportate sotto alle figure 16 e 17.

Uno studio particolare è stato quello dello spettro di massa $M^0 \rightarrow m \gamma$. Poiché la distanza fra lo spettrometro e la targhetta era di $L = 3$ m l'accetanza cinematica in massa arriva a circa 5 GeV. L'analisi del sistema $m \gamma$ è stata fatta con l'ausilio di un programma di riconoscimento automatico degli sciami prodotti dai γ nello spettrometro.

Dagli spettri di massa invariante con $m = 3$ (figura 18), ossia $\pi^0 \gamma$ o $\pi^0 \pi^0$ (con i due γ di un $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$ non sufficientemente separati da produrre due distinti sciami) e $m = 4$ (figura 19), ossia $\pi^0 \pi^0$, è evidente l'esistenza di una struttura intorno a 2 GeV.

Per meglio capire la struttura osservata sono state studiate le distribuzioni angolari, calcolate nel sistema di Gottfried-Jackson, per eventi con 3 e 4 sciami. In conclusione il picco osservato nello spettro di massa invariante combinato con le osservazioni nelle distribuzioni angolari forniscono una forte evidenza per l'osservazione dell'atteso mesone neutro h con spin 4, prodotto in questo esperimento nella reazione $\pi^- + p \rightarrow h + n$ con il decadimento successivo $h \rightarrow \pi^0 \pi^0 \rightarrow 4 \gamma$. I numeri quantici da assegnare al mesone h sono spin-parità $JP = 4^+$ C-parity e G-parity positive e isospin $I = 0$ o 2. La massa del mesone h è stata determinata mediante fit ed il valore ottenuto è $M = (2020 \pm 25)$ MeV. Per la larghezza intrinseca si è ottenuto il valore $\Gamma = (190 \pm 50)$ MeV. Di seguito sono riportati il titolo, gli autori e l'abstract del primo articolo pubblicato in russo su Iadernaia Fisica [9] e in inglese su Physics Letters [10].

Con questa osservazione la collaborazione NICE ha ottenuto un'alto riconoscimento da parte del Comitato di Stato per le Scoperte dell'URSS. Un diploma e un premio in Rubli (ahimè non esportabili!) è stato consegnato a ciascun componente della Collaborazione. Nella figura 20 la foto del diploma originale attribuito ad Angelo Scribano.

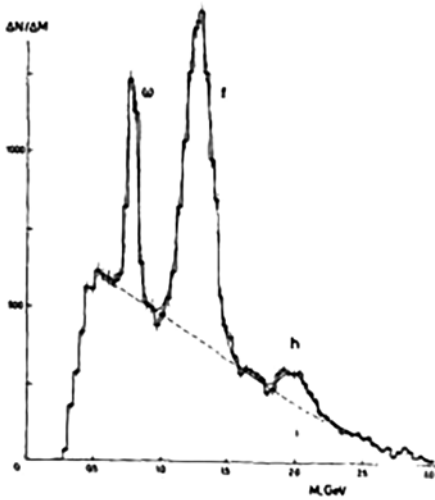


Figura 18. Spettro di massa invariante M_{3g} .

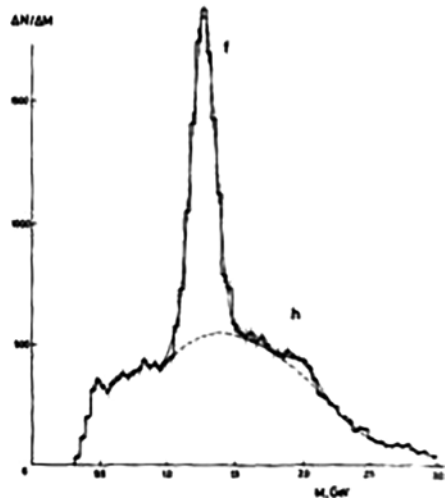


Figura 19. Spettro di massa invariante M_{4g} .

5. Conclusioni e altro

È stata una bella avventura! Proficua dal punto di vista scientifico e tutto sommato, nonostante i tempi ed il clima politico, piacevole e rilassante. Questo aggettivo mi fa ritornare alla mente il “fattore pi-greco” e un certo numero di aneddoti. Permettami di raccontarne qualcuno.

Al momento dell'accordo per la realizzazione dell'esperimento NICE avevamo stimato in 1 anno la permanenza a Serpukhov per l'installazione e la presa dati. Qualcuno nel gruppo (Pavel Rehak, allora borsista cecoslovacco a Pisa, conoscitore della Russia perché aveva studiato a Mosca) ci mise però sull'avviso che i tempi sarebbero stati di fatto più lunghi e che, a suo avviso, si sarebbero dilatati di un fattore pi-greco. Aveva ragione, la nostra permanenza a Serpukhov è durata non 1 anno bensì 3, 14 anni!

La vita laggiù, fra le betulle e gli abeti, trascorreva lenta, senza la frenesia del mondo occidentale. Quello che si poteva rimandare al domani, andava rimandato al domani. Durante la giornata “lavorativa” spesso c'erano delle interminabili ma interessanti pause davanti al samovar a bere the caldo in tazze che non dovevano essere mai lavate.

A volte per spostare un'apparecchiatura con il carro-ponte in sala sperimentale occorreva qualche giorno. C'era però un modo per accelerare i tempi o comunque per risolvere qualsiasi problematica tecnica o saltare una barriera burocratica: $\frac{1}{4}$ di vodka!

Questo però non funzionava con i controlli stretti all'ingresso e all'uscita del laboratorio. Qui, delle guardie armate (credo diretti dipendenti del governo e non del laboratorio) erano addette al controllo scrupoloso dei

НАБЛЮДЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО h -МЕЗОНА
СО СПИНОМ $J = 4$ И МАССОЙ 2 ГэВ

В.Д. Апель¹⁾, К. Аугенштайн¹⁾, Е. Бертолуччи²⁾, М.Л. Винчелли²⁾,
С.В. Донсков³⁾, А.В. Инякин³⁾, В.А. Качанов³⁾, М. Квалья²⁾,
В. Киттенбергер⁴⁾, Р.Н. Краснокутский³⁾, М. Крюгер³⁾, Г. Ледер⁴⁾,
А.А. Леднев³⁾, И. Маннелли²⁾, Ю.В. Михайлов³⁾, Х. Мюллер²⁾,
Г.М. Пьеррацци²⁾, Ю.Д. Прокошкин³⁾, Ф. Серджиампетри²⁾,
Г. Сигурдсон⁵⁾, А. Скрибано²⁾, Х. Шнайдер¹⁾, М. Штойер⁴⁾, Р.С. Шувалов³⁾

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, СЕРПУХОВ (СССР)
И ЕВРОПЕЙСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЖЕНЕВА (ШВЕЙЦАРИЯ)

(Поступила в редакцию 21 июля 1975 г.)

Сообщается о результатах исследования нейтральных мезонных состояний, образованных в π^-p -соударениях при импульсе 40 ГэВ/с. Эксперименты выполнены на 70-ГэВ ускорителе ИФЭУ. Для регистрации γ -квантов с высокой энергией использован годоскопический спектрометр в линию с ЭВМ. В области 2 ГэВ обнаружена четкая структура в спектре масс дипионов, образующихся в реакции $\pi^-p \rightarrow \pi^0\pi^0n$. Угловые распределения распада показывают в этой области изменения с ростом массы, характерные для резонанса со спином $J = 4$. Масса найденного в работе мезона получена равной $M = (2020 \pm 25)$ МэВ, оценка полной ширины распада — (190 ± 50) МэВ.

Целью настоящей работы было исследование спектра масс нейтральных мезонных состояний, образованных в π^-p -соударениях при импульсе 40 ГэВ/с в реакции

$$\pi^- + p \rightarrow M^0 + n, \quad (1)$$

и распадающихся на γ -кванты, π^0 -мезоны и другие нейтральные частицы, конечными продуктами распада которых являются γ -кванты. Область инвариантных масс выше 2 ГэВ была изучена в предыдущей работе [1]. Ниже сообщаются результаты дальнейших поисков тяжелых нейтральных мезонов в области масс до 3 ГэВ*.

Volume 57B, number 4

PHYSICS LETTERS

21 July 1975

OBSERVATION OF A SPIN 4 NEUTRAL MESON WITH
2 GeV MASS DECAYING IN $\pi^0\pi^0$

W.D. APEL¹, K. AUGENSTEIN¹, E. BERTOLUCCI², S.V. DONSKOV³, A.V. INYAKIN³,
V.A. KACHANOV³, W. KITTEBERGER⁴, R.N. KRASNOKUTSKY³, M. KRUGER¹,
G. LEDER⁴, A.A. LEDNEV³, I. MANNELLI², YU.V. MIKHAILOV³, H. MÜLLER¹,
G.M. PIERAZZINI², YU.D. PROKOSHIN³, M. QUAGLIA², H. SCHNEIDER¹, A. SCRIBANO²,
F. SERGIAMPETRI², R.S. SHUVALOV³, G. SIGURDSSON⁵,
M. STEUER⁴ and M.L. VINCELLI²

Institute for High Energy Physics, Serpukhov, USSR
and the European Organization for Nuclear Research, Geneva, Switzerland

Received 30 June 1975

The invariant mass spectrum of neutral meson states from π^+p interactions at 40 GeV/c incident momentum has been investigated in a high statistics experiment performed at the 70 GeV IHEP accelerator. To detect the high energy photons coming from the produced neutral states, a hodoscope spectrometer with a computer on-line was used. A clear structure on the mass spectrum of dipions produced in the reaction $\pi^+p \rightarrow \pi^+\pi^0n$ is observed at 2 GeV. The decay angular distributions show in this mass region the variation with mass typical of a state with a spin $J = 4$. The mass of the observed meson is found to be $M = (2020 \pm 30)$ MeV and the estimate of the full width is (180 ± 60) MeV.



Figura 20. Foto del diploma attribuito per la scoperta del mesone b con $spin 4$.

nostri lasciassero con foto, sia all'ingresso che all'uscita e non solo. Infatti all'interno del laboratorio c'erano vari edifici (sala sperimentale, sala calcolo, laboratorio di elettronica, officina meccanica, mensa, ecc.) e per ciascuno era necessaria l'autorizzazione all'ingresso evidenziata da un simbolo sul lasciassero. Ebbene per ogni edificio bisognava sottoporsi al controllo, anche qui sia all'ingresso che all'uscita, e ogni volta con riscontro visivo della foto e della persona. La prima volta che dovemmo portare, dalla sala sperimentale all'edificio del centro calcolo, degli scatoloni con dei nastri

magnetici successe una cosa che per noi aveva dell'incredibile e, sempre per noi, rasentava il ridicolo. Ogni volta che si portava uno scatolone sull'auto, giusto davanti all'uscita, bisogna sottoporsi al controllo sia in uscita che al rientro. E così per otto volte di seguito, tanti quanti erano gli scatoloni!

Un'altra cosa che ricordo era che eravamo sempre sotto sorveglianza in particolare il sottoscritto che era stato identificato come il responsabile "politico" del gruppo italiano per il semplice fatto che, non bevendo alcolici, sarei stato, secondo loro, costantemente in condizione di tenere sotto controllo gli altri membri del gruppo. Per questo motivo avevo sempre a vista, a ogni mio arrivo all'aeroporto Sheremietev di Mosca fino alla successiva partenza, una ragazza che ritrovavo in qualsiasi posto pubblico mi trovassi. Alla fine abbiamo instaurato un'amicizia "a distanza", ci si salutava con la mano e con un sorriso ma non abbiamo mai avuto l'occasione di scambiare una parola. Si teneva a debita distanza.

Avevamo una libertà di circolazione in auto (non c'erano altri mezzi) limitata a 18 km. Guarda caso però la cittadina di Serpukhov distava 19 km da Protvino, la sede del Laboratorio e nostra residenza. Per poter andare oltre 18 km bisognava chiedere alla direzione del Laboratorio un permesso scritto almeno due giorni prima. Controllo stretto ed effettivo. Al coordinatore del gruppo austriaco della nostra Collaborazione, che aveva infranto questa regola per andare a Serpukhov nottetempo, è stato negato il visto di ingresso (senza nessuna contestazione formale) una volta che era rientrato in Austria e voleva tornare sull'esperimento.

Il controllo stretto era comunque esercitato anche sui nostri collaboratori russi e comunque su tutti gli abitanti di Protvino. Una volta, di ritorno dall'Italia, era venuto a prendermi all'aeroporto il pullmino che aveva portato alcuni colleghi a Mosca per fare shopping nei vari Berioska in cui si pagava in dollari o mediante degli cheques diplomatici che ci venivano assegnati in quantità limitata ogni mese. All'arrivo a Protvino di sera, davanti al palazzo a sette piani dove abitavamo noi stranieri, nella confusione dello scarico di bagagli e vettovaglie, ho dimenticato al piano terra la borsa portadocumenti con dentro portafogli, passaporto, chiavi, regolo calcolatore e molte altre cose. Appena accortomi della mancanza sono sceso giù ma la borsa non c'era più. Avvisata la polizia questa è arrivata in meno di qualche minuto. Mi hanno invitato a fare insieme un giro intorno all'edificio e sul retro, per terra, abbiamo ritrovato la borsa aperta e con molti documenti sparsi per terra. Mancavano però il passaporto, il portafogli, le chiavi e altre cose. Sono stato invitato a fare una lista accurata di quanto mancava. Poi tutti a letto anche se un po' "disturbati" da questo evento. La mattina successiva, mentre ero in laboratorio, la polizia mi invita a passare da loro. Mi fanno entrare in una stanza che conteneva solo un tavolo: sopra c'era il mio passaporto, il mio portafogli con tutto il suo contenuto, il regolo calcolatore, il mazzo di chiavi e il resto! Efficienza della polizia dell'epoca! A un controllo accurato

del mazzo di chiavi però mi sono accorto che mancava una chiave mia e che c'era in più una chiave in alluminio di fabbricazione russa e non mia. Nel pomeriggio, sullo stesso tavolo alla stazione di polizia c'era la chiave mancante!

Concludo con un grazie al CERN, all'INFN, all'Università di Pisa, a Italo Mannelli e... alle famiglie che ci hanno seguito e hanno condiviso con noi questa esperienza.

Bibliografia

- [1] Ennio Bertolucci, Italo Mannelli, Giuseppe Pierazzini, Pavel Rehak, Angelo Scribano, Franco Sergiampietri, Marco Lucio Vincelli.
- [2] W.D. Apel, J.S. Ausländer, H. Müller, G. Sigurdsson, H.M. Staudenmaier, U. Stier.
- [3] W.D. Apel *et al.*, *Measurement of $\pi\pi$ Scattering In The Reaction $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$ At 6-GeV/c, 8-GeV/c And 12-GeV/c*, KFK-EXT-3/75-1, 1975.
- [4] W.D. Apel *et al.*, *Measurement Of $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$ At 6-GeV/c, 8-GeV/c And 12-GeV/c*, Nucl. Phys. B 160, 42 (1979) Presented at 19th Int. Conf. on High Energy Physics, Tokyo, Japan, Aug 23-30, 1978.
- [5] Membri della Collaborazione NICE: W.D. Apel, K. Augenstein, E. Bertolucci, M.L. Vincelli, S.V. Donskov, A.V. Inyakin, V.A. Kachanov, M. Quaglia, W. Kittenberger, R.N. Krasnokutsky, M. Kruger, G. Leder, A.A. Lednev, I. Mannelli, Yu.V. Mikhailov, H. Muller, G.M. Pierazzini, Yu.D. Prokoshkin, F. Sergiampietri, G. Sigurdsson, A. Scribano, H. Schneider, M. Steuer, R.S. Shuvalov (Tecnici italiani: Renzo Franceschini, Luciano Giacomelli, Marcello Givoletti, Piero Marchi).
- [6] E. Bertolucci *et al.*, *Liquid Hydrogen Target with interaction point localization by Cerenkov Effect*, NIM 69, 1969, pp. 21-24.
- [7] W.D. Apel *et al.*, *Investigation Of $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ Reaction At Large Momentum Transfer*, [Serpukhov-CERN Collaboration] Phys. Lett. B 72, 132, 1977 [JETP Lett. 26, 502.1977 ZFPRA, 26,659-662.1977] W.D. Apel *et al.*, *Investigation of the reaction $\pi^- p \rightarrow \eta n$ at momenta up to 40-GeV/c*, [Serpukhov-CERN Collaboration] Sov. J. Nucl. Phys. 25, 194, 1977 [Yad. Fiz. 25, 362].
- [8] W.D. Apel *et al.*, *Study Of The Reaction $K^- p \rightarrow \text{Anti-K}^0 n$ At Momenta Of 25-GeV/c And 40-GeV/c*, [Serpukhov-CERN Collaboration] Nucl. Phys. B 129, 275, 1977 [Yad. Fiz. 26, 1222 (1977 SJNCA, 26,645.1977)].
- [9] W.D. Apel *et al.*, *Observation Of A Spin 4 Neutral H Meson With 2-GeV Mass* - Yad. Fiz. 23, 333, 1976.
- [10] W.D. Apel *et al.*, *Observation Of A Spin 4 Neutral Meson With 2 Gev Mass Decaying In $\pi^0 \pi^0$* - Phys. Lett. 57B-4, 1975, 398.

I primi anni della mia avventura nella fisica delle alte energie

Rino Castaldi*

1. Premessa

Nei primissimi anni della mia carriera di fisico sperimentale ho partecipato a due esperimenti al primo collisionatore adronico del mondo, gli Intersecting Storage Rings (ISR) del CERN di Ginevra. Questi due esperimenti (R801 e R209) sono stati ampiamente descritti da Giorgio Bellettini, e pertanto mi limiterò a raccontare solo degli episodi che mi sono capitati durante la loro realizzazione e che per me, ma forse anche per gli esperimenti stessi, sono stati particolarmente significativi.

Parlerò inoltre di altri esperimenti a cui ho partecipato ed a cui i gruppi di Pisa hanno dato contributi importanti ma che, per motivi organizzativi, non sono stati menzionati in altre presentazioni. Tuttavia anche per questi esperimenti parlerò prevalentemente delle mie esperienze personali e di come ho vissuto certi episodi avvenuti durante la loro realizzazione. D'altra parte gli apparati sperimentali e i loro risultati di fisica sono ben descritti nelle relative pubblicazioni a cui si rimanda il lettore interessato.

2. Fotoproduzione di mesoni vettoriali su nuclei presso il Laboratorio di DESY ad Amburgo (1967-1969)

Questo esperimento di fotoproduzione di mesoni vettoriali su nuclei complessi fu realizzato dalla Collaborazione Pisa-Bonn (Pierluigi Braccini, Carlo Bradaschia, Rino Castaldi, Lorenzo Foà, Klaus Luebelsmeyer, Detlef Schmitz). L'apparato sperimentale utilizzato è lo stesso di quello usato, prima del mio arrivo nel gruppo di Pisa come laureando, per misurare la vita media dell' η via effetto Primakov [1] e di cui Bellettini ha parlato ampiamente.

Una fotografia dell'apparato sperimentale è mostrata in figura 1. Questo apparato consisteva in un array di contatori Čerenkov di vetri al piombo posti in coincidenza a due a due con un opportuno angolo di

* INFN Pisa e Membro Emerito di CMS.

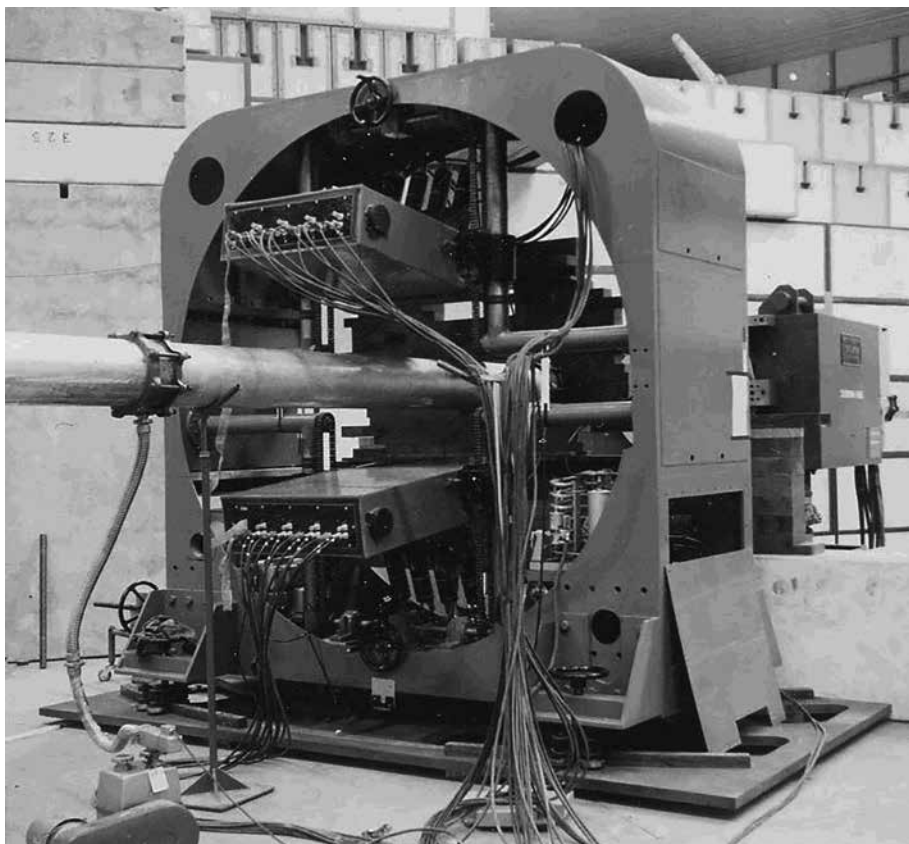


Figura 1. Apparato sperimentale usato per la misura della vita media dell' η e per l'esperimento di fotoproduzione di mesoni vettoriali su nuclei complessi.

apertura per rivelare e misurare l'energia dei due fotoni di decadimento dell' η .

L'idea di questo nuovo esperimento consisteva nel misurare la fotoproduzione su nuclei del mesone vettoriale ω [2] nel canale di decadimento $\pi^0\gamma$, rivelando solo due dei tre fotoni del decadimento e correggendo poi per l'inefficienza di rivelazione calcolata con un Monte-Carlo per tener conto del terzo fotone che non veniva rivelato. Questo metodo fu utilizzato anche per mettere un limite superiore al decadimento del mesone ϕ [3] in $\pi^0\gamma$.

Parlo di questo esperimento, oltre che per l'importanza che ha significato per me, anche e soprattutto per evidenziare di quanto sia cambiato da allora ad oggi il modo di realizzare un esperimento di particelle elementari di alte energie, sia nel numero dei componenti della Collaborazione che nelle tecniche di rivelazione.

Le Collaborazioni all'epoca erano costituite da un numero esiguo di fisici mentre oggi alcune Collaborazioni sono formate perfino da svariate migliaia di persone tra fisici e ingegneri. Naturalmente questo è dovuto alla estrema complessità degli esperimenti odierni in cui, per esempio, è necessario usare migliaia di calcolatori on-line per la formazione del "trigger" e per l'acquisizione dei dati.

In questo esperimento del 1967 l'acquisizione dati era realizzata in modo molto semplice pur rimanendo molto efficiente: una coincidenza tra una coppia di vetri al piombo formava il "trigger" ed un oscillografo analogico registrava l'evento.

Quando scattava la coincidenza tra una coppia di rivelatori, il relativo segnale di "trigger" faceva partire la traccia dell'oscillografo, a cui, con gli opportuni ritardi, venivano inviati i segnali analogici della coppia dei due contatori Čerenkov. Sulla stessa traccia venivano registrati, se presenti, i segnali di anticoincidenza dei contatori a scintillazione che si trovavano davanti a ciascun vetro al piombo. I segnali presenti sull'oscillografo venivano poi fotografati da una telecamera insieme alla luce di un led che indicava quale fosse stata la coppia che aveva fatto partire il "trigger". Il film veniva poi analizzato "off-line" registrando per ciascun evento il canale di provenienza e l'altezza (proporzionale all'energia dei fotoni) dei due impulsi dei rivelatori Čerenkov. Venivano esclusi quegli eventi in cui erano presenti segnali di anticoincidenza dovuti a particelle cariche.

In figura 2 vengono mostrati tre eventi di cui solo quello più in basso è un buon candidato ω -meson. I due eventi precedenti mostrano, oltre ai segnali molto piccoli dei due Čerenkov, anche un segnale di anticoincidenza e pertanto vengono scartati.

Partecipare a questo esperimento è stato per me un'esperienza molto formativa non solo per quanto riguarda le tecniche sperimentali o i me-

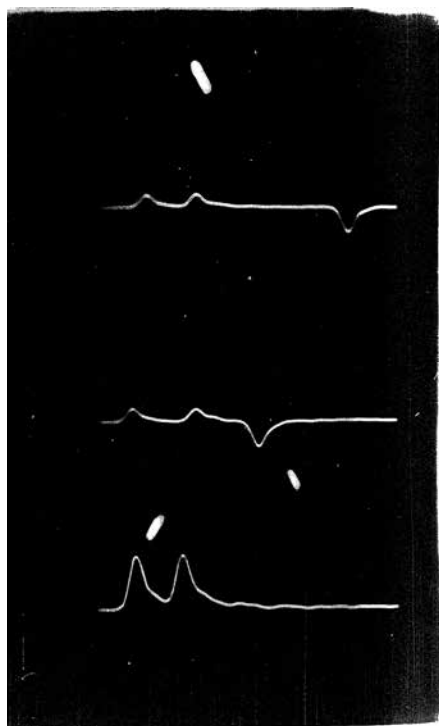


Figura 2. Tre eventi registrati sull'oscillografo di cui solo quello più in basso è un buon candidato ω -meson.

todi di analisi, ma anche, e soprattutto, perché per me è stato l'inizio di un tipo di vita completamente nuovo.

Le tecniche sperimentali e i metodi di analisi sono cambiati molto negli anni, ma il tipo di vita, tipico del fisico sperimentale agli acceleratori, è restato sempre lo stesso: una vita da giramondo rimanendo in uno stesso posto solo per brevi periodi, ottimizzando la propria permanenza non secondo le esigenze della propria vita personale ma secondo quelle che l'esperimento richiedeva.

Il mio primo impatto con la città di Amburgo ed il Laboratorio di DESY fu tuttavia abbastanza piacevole. Il posto dove era il Laboratorio era bellissimo con molti boschetti popolati da fagiani e lepri e con dei laghetti pieni di trote iridee e salmonidi di vario tipo. Quel posto mi ricordava la mia adolescenza spensierata passata a pescare sulle rive dell'Elsa e a caccia con mio nonno nei boschi della campagna toscana.

Tuttavia non tutto era piacevole: la mensa del Laboratorio con un'imangiabile "Tagessuppe" e con la sola ancora di salvezza di uno "Spiegelei" (uovo al tegamino!), mi costrinse per la prima volta in vita mia a mettere mano ai fornelli ed imparare a cucinare. Anche i frequenti e lunghi viaggi in treno o in macchina da Pisa ad Amburgo erano molto faticosi (il rimborso dell'aereo non era previsto!).

Molto spiacevole fu l'esperienza di prendere in affitto per un mese una camera fuori dal Laboratorio: mi fu richiesto dal padrone dell'appartamento di portargli un attestato dalla segreteria del Laboratorio che specificasse che io, italiano, ero persona di buona educazione e che addirittura mi stavo per laureare in fisica! Insomma non ero il tipico povero immigrato senza istruzione in cerca di lavoro.

Fortunatamente la presa dati dell'esperimento durò solo pochi mesi e l'analisi fu possibile farla rimanendo la maggior parte del tempo a Pisa.

Fu così che iniziò la mia avventura di fisico sperimentale con una tesi di laurea "Un'esperienza di fotoproduzione di mesoni vettoriali in nuclei complessi" e una tesi di perfezionamento in fisica alla Scuola Normale Superiore "Photoproduction of ω -mesons from complex nuclei", avendo in entrambi i casi Pierluigi Braccini come relatore.

3. R801: la misura della sezione d'urto totale protone-protone agli ISR (1969-1975)

Il 16 giugno 1965 il CERN "Council" aveva approvato [4] un progetto ambizioso, gli "Intersecting Storage Rings" (ISR), consistente in due anelli concentrici di 300 metri di diametro con magneti lungo tutta la circonferenza capaci di mantenere fasci di protoni circolanti stabilmente in direzioni opposte, portandoli a collidere in otto diverse zone di intersezione.

I due fasci di protoni venivano accelerati dal protosincrotrone del CERN ad una stessa energia che poteva variare da 11 a 26 GeV (successivamente fu portata fino a 31 GeV) per poi essere iniettati negli anelli degli ISR e lasciati stabili a circolare nella macchina per molte ore.

La costruzione iniziò nel 1966 e già nel 1971 gli ISR erano pronti per le prime collisioni.

Nel marzo del 1969, lo “ISR Committee” (ISRC) ricevette tre proposte di esperimento per misurare la sezione d’urto totale o la sezione d’urto elastica protone-protone alle energie degli ISR. La prima proposta [5] fu presentata da Giorgio Bellettini a nome di un gruppo di Pisa (Giorgio Bellettini, Pierluigi Braccini, Carlo Bradaschia, Rino Castaldi, Claudio Cerri, Tarcisio Del Prete, Lorenzo Foà, Aldo Menzione, Giulio Sanguinetti, Marisa Valdata) con il titolo “Measurement of the p-p total cross-section”. Il gruppo di Pisa proponeva di misurare la sezione d’urto totale misurando il “rate” totale di interazione p-p e contemporaneamente la luminosità della macchina. Poco dopo un gruppo di Stony Brook (Guido Finocchiaro, Paul Grannis, Dan Green, Robert Mustard, Rudolf Thun) si unì a questa proposta e si formò così la Collaborazione Pisa-Stony Brook.

Il “rate” totale veniva misurato con un rivelatore 4π costituito da grandi odoscopi di scintillatori finemente suddivisi negli angoli θ e ϕ , mentre la luminosità veniva misurata col così detto metodo di Van der Meer [6].

L’esperimento fu approvato nella zona di intersezione I8 con la sigla R801. In figura 3 si vedono alcuni odoscopi in cui si riconosce bene la suddivisione dei contatori nell’angolo ϕ e si intravedono, dietro la foto di Giorgio Bellettini, il retro dei fototubi di alcuni contatori θ . La figura 4 mostra poi una fotografia di tutto il rivelatore installato in I8.

L’apparato sperimentale e il metodo di misura sono stati descritti in dettaglio da Bellettini alla cui relazione si rimanda per tutti i particolari.

Le altre due proposte di esperimento proponevano di misurare il “rate” dello “scattering” elastico p-p a piccolo angolo, di estrapolarlo in avanti a $\theta = 0^\circ$ e, tramite il teorema ottico e la misura della luminosità ancora col metodo di Van der Meer, di risalire alla sezione d’urto totale.

Nella prima di queste due proposte [7] un gruppo di Roma, a cui ben presto si aggiunse un gruppo del CERN a formare la Collaborazione CERN-Roma, intendeva misurare lo “scattering” elastico a piccolissimo angolo, addirittura fino alla regione del “coulombiano” per poterne così misurare anche l’interferenza con lo “scattering” nucleare. Questo apparato richiedeva una modifica sostanziale della “beam pipe” con un sistema muovibile (le così dette “Roman Pots”) che permettesse di avvicinare i rivelatori fino ad un solo millimetro dai fasci, una volta che l’iniezione degli ISR fosse finita ed i fasci fossero diventati stabili. L’esperimento fu approvato nella zona di intersezione I6.

La terza proposta [8] veniva presentata allo “ISR Committee” da Carlo Rubbia a nome della collaborazione CERN-Genoa-Torino, a cui si ag-

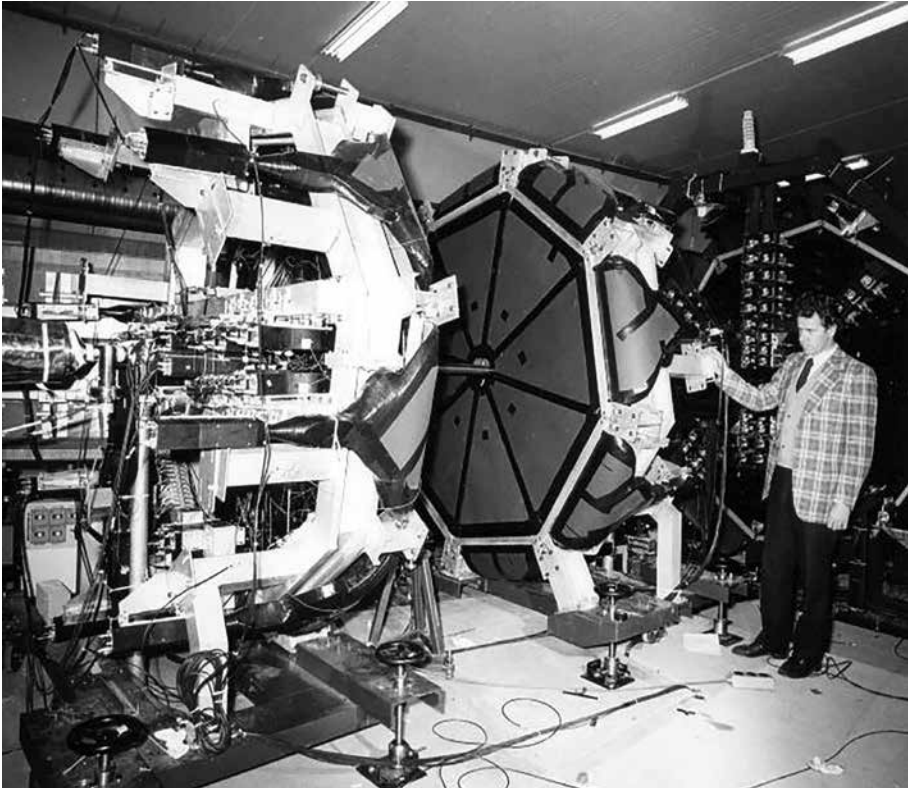


Figura 3. Giorgio Bellettini accanto ad alcuni odoscopi di R801.

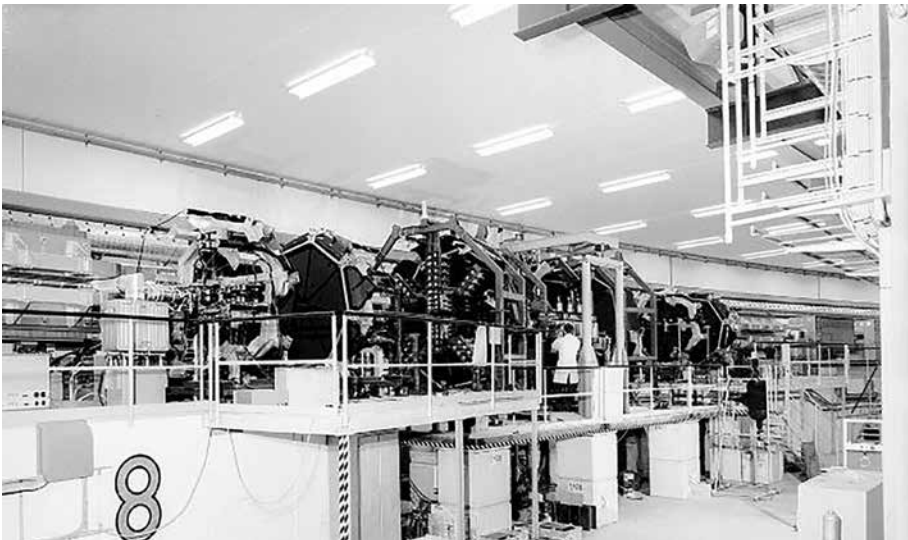


Figura 4. L'apparato sperimentale di R801.

giunsero successivamente i gruppi di Aachen e Harvard diventando la Collaborazione ACHGT. Questa proposta intendeva misurare lo “scattering” elastico su un grande intervallo angolare a partire da 100 mrad fino alla regione dello “scattering” coulombiano. Gli eventi agli angoli più piccoli venivano rivelati con uno spettrometro a due braccia utilizzando i primi quattro magneti degli ISR, mentre gli eventi ad angoli più grandi venivano analizzati con una addizionale coppia di magneti che non avrebbe perturbato la stabilità dei fasci. Lo “ISR Committee” approvò in 16 soltanto la parte a grandi angoli lasciando la misura dello “scattering” elastico nella zona del coulombiano ai rivelatori delle “Roman Pots” della Collaborazione CERN-Roma.

Nel 1971 le intersezioni degli ISR furono pronte per l'installazione degli esperimenti e, all'inizio del 1972, cominciò la presa dati.

Io ero appena tornato dal servizio militare e, con una strana e non molto sostanziosa borsa di studio della NATO, avevo ripreso a lavorare al CERN nella Collaborazione Pisa-StonyBrook. In particolare lavoravo all'analisi del “rate” totale di interazione R^{tot} da cui, previa la misura della luminosità L col metodo di Van der Meer, si poteva risalire alla misura della sezione d'urto totale semplicemente facendo il rapporto $\sigma^{\text{tot}} = R^{\text{tot}}/L$.

Dopo pochi mesi di misure alle quattro diverse energie degli ISR ($\sqrt{s} = 23.5; 30.6; 44.7; 52.8$ GeV) ottenemmo un risultato sorprendente e totalmente inatteso: la sezione d'urto totale protone-protone cresceva con l'energia!

Un tale risultato, se confermato, era davvero una scoperta rivoluzionaria dato che era in disaccordo con la teoria dei “Poli di Regge” che, all'epoca, era la sola teoria accettata dalla comunità dei fisici per descrivere le interazioni adroniche a piccolo momento trasferito. La traiettoria di Regge del così detto “pomerone”, un'ipotetica particella con i numeri quantici del vuoto, sembrava indicare chiaramente un andamento costante della sezione d'urto totale con l'energia.

Inoltre, come si vede dalla figura 5, tutte le sezioni d'urto adroniche totali, misurate fino alle energie dell'acceleratore di Serpukhov, sembravano proprio tendere ad un valore costante con l'energia.

Per questi motivi tutti i fisici teorici e molti fisici sperimentali erano convinti che alle alte energie accessibili agli ISR sarebbe stato finalmente raggiunto per le interazioni adroniche il così detto regime asintotico.

Anche le prime misure della Collaborazione CERN-Roma sembravano indicare una crescita con l'energia della sezione d'urto totale. La Collaborazione ACHGT invece sosteneva di trovare valori della sezione d'urto totale consistenti con un andamento costante con l'energia, in perfetto accordo con quanto previsto dalla teoria dei “Poli di Regge”.

Nell'estate del 1972 alla “Cantina” del CERN si assisteva spesso ad accese discussioni tra sperimentali e teorici sull'andamento con l'energia della se-

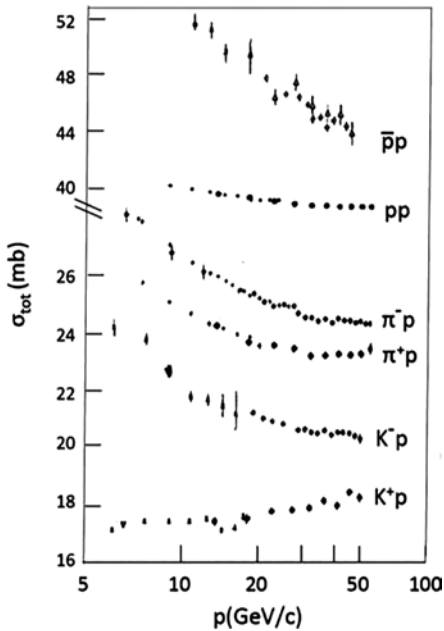


Figura 5. Sezioni d'urto adroniche totali misurate fino alle energie dell'acceleratore di Serpukhov.

zione d'urto totale e su chi delle tre Collaborazioni avesse ragione.

A fine estate la mia borsa di studio terminava lasciandomi senza stipendio, la qual cosa, onestamente, mi preoccupava di più dell'andamento con l'energia della sezione d'urto totale. Fortunatamente proprio a fine estate terminava anche l'anno sabbatico che Guido Finocchiaro aveva trascorso al CERN. Guido doveva quindi rientrare a Stony Brook per riprendere il suo insegnamento come professore di quella Università. Contemporaneamente Paul Grannis, anch'egli professore a Stony Brook, iniziava il suo anno sabbatico lasciando temporaneamente un posto libero presso l'Università. Guido allora mi propose di andare con lui a Stony Brook come "visiting assistant professor" ri-

coprendo momentaneamente il posto liberato da Grannis.

Non è difficile immaginare il mio entusiasmo: andare in America con un posto prestigioso di professore quando la mia anzianità ero solo quella di un giovane postdoc! Per di più, insieme a Guido, lontano dalle accese discussioni che si facevano in quel momento al CERN sul valore della sezione d'urto totale, avrei potuto analizzare criticamente di nuovo i dati del "rate" totale alle varie energie e verificare che non ci fossero errori sostanziali che simulassero una falsa crescita con l'energia.

Misi pertanto nel mio bagaglio, oltre ai pochi effetti personali, anche un paio di scatoloni di schede perforate che contenevano il mio programma di analisi del "rate" totale e mi trasferii a Stony Brook.

Dovevo solo insegnare Fisica I ad una classe non troppo numerosa del primo anno e potevo quindi dedicarmi quasi a tempo pieno ad una analisi critica dei dati, potendo per di più far tesoro dei preziosi suggerimenti e delle osservazioni di Guido. Tuttavia i valori di sezione d'urto che venivano fuori anche da questa nuova analisi continuavano ad indicare chiaramente una crescita della sezione d'urto totale con l'energia.

All'inizio di novembre vidi sulla bacheca dei seminari di Stony Brook la locandina che annunciava un seminario di Carlo Rubbia al Laboratorio

di Brookhaven sui primi risultati dello “scattering” elastico e della sezione d’urto totale agli ISR.

Naturalmente data la vicinanza di Stony Brook da Brookhaven, io e Guido, ma anche la maggior parte del dipartimento di Fisica, andammo tutti al seminario.

Rubbia col suo inconfondibile stile, molto brillante e per certi versi talvolta anche accattivante, illustrò in dettaglio l’apparato sperimentale, la presa dati e le analisi del suo esperimento alle varie energie degli ISR. I valori di sezione d’urto totale che ottenevano mostravano un chiaro andamento costante con l’energia; e Rubbia ne sottolineò l’accordo perfetto con quanto previsto dalla teoria di Regge.

Poi, non contento di presentare solo i suoi risultati, e, penso, sapendo che quasi tutto il dipartimento di fisica di Stony Brook era presente al seminario, aggiunse con aria sorniona, quasi distratta, che invece un gruppo di Stony Brook, insieme a un gruppo di Pisa, sosteneva che la sezione d’urto totale cresceva con l’energia. Aggiunse poi che questa Collaborazione misurava la sezione d’urto contando i conteggi totali di interazione protone-protone, ma che, ahimè, il loro apparato era pieno di buchi non coperti dai contatori. Soprattutto, specificò, perdono a piccoli angoli dove hanno il tubo a vuoto dentro cui scorre il fascio che, dovendo avere uno spessore molto sottile per minimizzare le interazioni secondarie, ha un diametro molto grande.

Rubbia concluse quindi che le misure del Pisa-Stony Brook erano poco significative dato che con quell’apparato perdevano una frazione consistente dei conteggi totali.

Sentendo queste parole, a dir poco tendenziose e scorrette, dissi immediatamente a Guido di intervenire e controbattere con forza quello che Rubbia aveva appena detto: 1) alla congiunzione del tubo a vuoto cilindrico con quello ellittico ci sono dei contatori, non per nulla chiamati “Tappa Buchi” (TB counters in figura 6), che diminuiscono notevolmente l’angolo non coperto; 2) gli odoscopi sono finemente suddivisi nell’angolo θ (come illustrato in figura 6) che permettono di estrapolare i conteggi a piccolo angolo con un errore ben controllato; 3) infine, se si perdessero in modo significativo dei conteggi non recuperati con l’extrapolazione, le perdite sarebbero maggiori al crescere dell’energia dato che gli eventi ad energie più alte sono più collimati in avanti, con l’ovvio risultato di vedere una eventuale crescita della sezione d’urto con l’energia meno accentuata...

Guido, che è un fisico sperimentale molto brillante ma, penso, troppo gentile e rispettoso degli altri, nonostante la mia sollecitazione, non intervenne; e Rubbia, soddisfatto di aver buttato un po’ di discredito sul Pisa-Stony Brook, passò rapidamente ad un altro argomento.

Il seminario si concluse così con una sezione d’urto totale protone-protone costante con l’energia. Sembrava quindi, secondo Rubbia, che

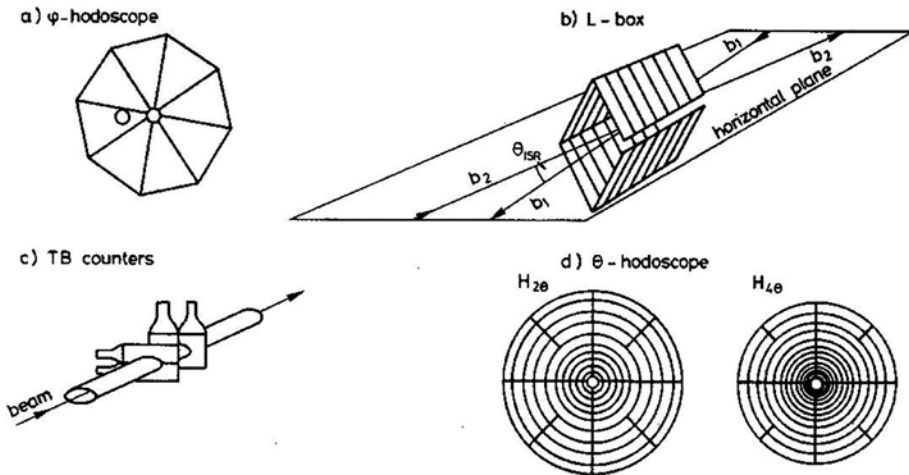


Figura 6. Disegno schematico dei contatori di R801 (Pisa-Stony Brook) e la loro suddivisione negli angoli θ and φ .

alle energie degli ISR era stato finalmente raggiunto il così detto regime asintotico per le interazioni adroniche.

Al ritorno a Stony Brook in macchina con Guido, io ero molto innervosito per l'accaduto e sostenevo che era assolutamente necessario che lui, Guido, facesse un seminario in Dipartimento per mostrare che le cose non stavano come Rubbia aveva descritto.

Guido mi disse di essere assolutamente d'accordo con la mia proposta, ma che dovevo essere io, e non lui, a fare il seminario!

Io, da poco addottorato, senza aver mai studiato l'inglese a scuola ed essendo in America solo da poche settimane, entrai nel panico. Tuttavia tanto era lo sdegno che provavo per quello che era accaduto che, ahimè, mi lasciai convincere a fare il seminario.

Naturalmente ero ben preparato sull'esperimento e sull'analisi dei dati, e quindi non mi preoccupava assolutamente il sapere che al seminario sarebbe stata presente la maggior parte del Dipartimento di Fisica di Stony Brook compreso il premio Nobel C.N. Yang. Ero invece terrorizzato dalla paura di non essere in grado di capire eventuali domande fatte con quel quasi inintelligibile accento americano. Il risultato fu che trascorsi tutta la settimana che mi separava dal seminario davanti alla televisione nel disperato tentativo di assuefarmi a quella pronuncia.

Fortunatamente al seminario non ci furono domande che non riuscii a capire, compresa quella con pronuncia ben comprensibile di Yang. Credo quindi di averli convinti che forse chi sbagliava la misura era Rubbia e non noi!

Questo seminario fu per me un po' un "battesimo del fuoco", e dal quel momento in poi non ho più avuto paura di non capire le domande;

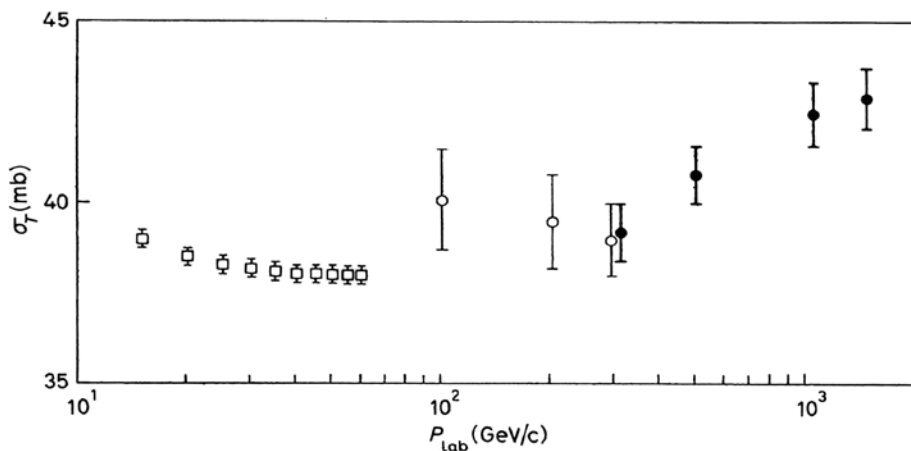


Figura 7. Valori della sezione d'urto totale p-p in millibarn ottenute dal Pisa-Stony Brook alle quattro energie degli ISR. Per confronto sono mostrati anche i valori misurati a più basse energie a Serpukhov e FNAL.

d'altra parte se non avessi capito una domanda, avrei sempre potuto chiedere di ripeterla.

Dopo meno di tre mesi, il 23 febbraio 1973, pubblicammo un articolo [9], in contemporanea con un analogo articolo [10] della Collaborazione CERN-Roma, che mostrava chiaramente che la sezione d'urto totale protone-protone cresceva di circa il 10% nell'intervallo di energie degli ISR (si veda l'andamento con l'energia in figura 7).

La crescita con l'energia della sezione d'urto totale p-p era una scoperta totalmente inattesa e pertanto, anche se due esperimenti in modo indipendente [9], [10] avevano ottenuto lo stesso risultato, erano certamente necessarie ulteriori conferme.

In particolare la misura della luminosità era molto delicata e, in quelle prime misure, aveva una precisione che non era migliore del 2-3%. Va però notato che la misura della sezione d'urto totale del Pisa-Stony Brook dipendeva in modo lineare dalla luminosità L mentre quella del CERN-Roma dipendeva da $\sqrt{L}$, per cui difficilmente una misura imprecisa della luminosità poteva essere la causa di un eventuale errore sull'andamento con l'energia della sezione d'urto totale.

Fu in realtà proprio questa diversa dipendenza dalla luminosità che permise una misura della sezione d'urto totale in modo indipendente dalla luminosità: bastava che le due misure fossero fatte contemporaneamente nella stessa zona di interazione in modo da essere certi che la luminosità fosse la stessa.

Per questo motivo le due Collaborazioni proposero di fare delle misure congiunte installando le "Roman Pots" in I8 in modo da poter misurare

contemporaneamente il “rate” totale con l’apparato del Pisa-Stony Brook e il “rate” elastico in avanti con l’apparato del CERN-Roma.

I risultati [11] di questo esperimento congiunto confermò con precisione maggiore la crescita con l’energia della sezione d’urto totale protone-protone. La nuova misura fu fatta sia indipendentemente dai due esperimenti, ma con una misura della luminosità che nel frattempo era diventata più precisa, sia ottenendo il valore della sezione d’urto totale in modo indipendente dalla luminosità facendo il rapporto del “rate” elastico estrapolato a $\theta = 0^\circ$ ed il “rate” totale, misurati contemporaneamente.

Altri esperimenti successivamente confermarono la crescita con l’energia della sezione d’urto totale protone-protone che, come è stato misurato recentemente da TOTEM a LHC, continua a crescere anche alla fantastica energia di $\sqrt{s} = 13$ TeV.

Sicuramente l’aver misurato una crescita della sezione d’urto totale protone-protone di circa il 10% sull’intervallo di energie $23.5 \text{ GeV} \leq \sqrt{s} \leq 52.8 \text{ GeV}$, è stata la più importante scoperta fatta agli ISR del CERN.

Avevamo prestato fede alle nostre misure, seppur inaspettate, ed avevamo ignorato il pregiudizio all’epoca ben radicato che alle alte energie le interazioni adroniche tendessero ad un regime asintotico costante come suggerito dalle teorie vigenti; e le molte misure successive, anche ad energie molto più alte, hanno dato ragione a noi e torto a Rubbia!

4. R209: Misura della produzione di coppie di muoni a $\sqrt{s} = 62 \text{ GeV}$ agli ISR (1975-1979)

Alla fine del mio contratto a Stony Brook ritornai al CERN con una sostanziosa “CERN fellowship” che mi permise di acquistare la mia prima BMW e di continuare a lavorare in R801.

Nei primi tempi dell’esperimento R801 avevamo avuto gli uffici in baracche provvisorie, ma ora finalmente ci erano stati assegnati dei nuovi uffici al piano terra di un bellissimo e grande edificio (lo chiamavamo perciò “Il Castello”) da poco finito di costruire nei pressi degli ISR, proprio vicino a I8 dove avevamo l’esperimento.

Alla fine di ottobre del 1973 stavo lavorando in questo mio nuovo ufficio al Castello quando Samuel C.C. Ting entrò nella stanza e mi salutò sforzandosi di dire “buongiorno” come era solito fare quando mi incontrava. Ting aveva imparato questa parola ai tempi degli esperimenti del gruppo di Pisa a DESY, dove anche lui aveva un esperimento di fotoproduzione di mesoni vettoriali installato sullo stesso fascio, subito prima di noi. Non rimasi quindi per nulla sorpreso di questo suo saluto pensando che stesse semplicemente esercitandosi nella corretta pronuncia di “buongiorno”.

Rimasi invece alquanto sorpreso quando lo vidi andare alla lavagna dove vi scrisse:

1⁻ “heavy photons”.

dicendomi che la reazione $pp \rightarrow \gamma_v(q^2) (+ \text{hadroni}) \rightarrow \mu^+\mu^- (+ \text{hadroni})$, che potremmo studiare agli ISR fino a masse di un ipotetico γ_v di 10-15 GeV, potrebbe risultare molto interessante, così come interessanti potrebbero essere le correlazioni di questo fotone pesante con gli altri adroni prodotti nella collisione.

Questa del fotone pesante era un'idea che sembrava anticipare la nuova fisica che da lì a poco sarebbe stata scoperta. Ovviamente non capii la portata di quell'idea, e probabilmente neppure Ting la capiva. Tuttavia questo comportamento di Ting stimolò moltissimo la mia curiosità, anche perché trovavo sorprendente che un importante professore del MIT venisse a cercar di convincere un giovane post-doc, politicamente irrilevante, che l'esperimento giusto da fare agli ISR era quello di cercare “fotoni pesanti” 1⁻ in $\mu^+\mu^-$.

Sapevo che Ting aveva presentato allo “ISR Committee” una proposta di esperimento per lo studio della produzione di coppie di μ agli ISR ricostruendone la massa invariante con un spettrometro di grande accettazione a coprire gli angoli centrali della zona di interazione; ma questo non spiegava perché fosse venuto a parlarne proprio con me!

Mi procurai questa proposta [12] e scoprii che in realtà, come era ben esplicitamente dichiarato anche nel titolo, erano due gli scopi dell'esperimento proposto. Questo apparato poteva avere una buona accettazione per la ricerca di fotoni pesanti in coppie $\mu^+\mu^-$ in una regione di massa $1 \leq M \leq 15$ GeV, ma poteva anche rivelare coppie di μ con un grande angolo di apertura e permettere la ricerca dello Z^0 (il bosone vettore neutro responsabile delle correnti neutre da poco scoperte) fino ad una massa di 37 GeV.

Ting mi aveva parlato solo della ricerca di fotoni pesanti e non dello Z^0 , forse perché sapeva che avevo fatto la tesi a DESY sulla fotoproduzione di mesoni vettoriali in cui il fotone, secondo il modello di “Vector Dominance”, veniva visto come una sovrapposizione degli stati vettoriali ρ , ω e ϕ . Questa ipotesi, tuttavia, mi sembrava ancor meno probabile quale spiegazione del fatto che Ting fosse venuto a convincere me dell'importanza di questo esperimento.

C'era però una nota nella prima pagina del proposal che forse spiegava il motivo della visita di Ting nel mio ufficio. La nota a piè di pagina specificava che c'erano trattative con la Collaborazione Pisa-Stony Brook sulla possibilità di collaborare installando lo spettrometro delle coppie di μ in I8 dove si trovavano gli odoscopi di R801. Si sarebbe potuto così studiare anche le correlazioni della coppia di μ con gli adroni associati

nell'evento; e il grosso spettrometro dei μ sembrava essere "compatibile" con l'apparato di R801, previe modifiche minori.

Leggendo questa proposta scoprii che Ting, qualche mese prima, aveva proposto [13] un apparato con camere gigantesche da installare intorno allo Split-Field-Magnet in I4 a formare un enorme spettrometro per la ricerca dello Z^0 . Aveva subito dopo presentato un addendum [14] in cui si proponeva di aggiungere qualche altra camera e di riorganizzare opportunamente il "trigger", in modo tale da poter anche studiare la produzione di quelli che lui chiamava fotoni pesanti.

Evidentemente queste proposte devono aver incontrato grosse difficoltà per essere approvate, forse per motivi di compatibilità con altri esperimenti che utilizzavano lo Split-Field-Magnet. Pertanto Ting deve essersi convinto che doveva disegnare uno spettrometro [12] completamente diverso e che doveva discutere con Bellettini e Braccini sulla possibilità di collaborare e di installarlo in I8.

Mi fu chiaro allora il desiderio di Ting di convincere tutto il gruppo di Pisa, me compreso, che bisognava fare questo esperimento. Al di là dell'importanza obbiettiva dello studio delle correlazioni della coppia di μ con gli adroni associati, il fatto che lo spettrometro fosse compatibile con l'apparato di Pisa, che era già installato in I8, era evidentemente un forte argomento politico per essere approvato dallo "ISR Committee" dato che difficilmente si sarebbe potuto trovare un'altra intersezione libera.

Per il gruppo di Pisa era questa un'ottima possibilità per poter partecipare ad una ricerca di frontiera come quella di ricerca dello Z^0 e ad una eventuale scoperta di "fotoni pesanti", che come si capirà non molto tempo dopo, avrebbe aperto la via allo sviluppo del "Modello Standard".

Bellettini e Braccini non si lasciarono sfuggire questa ghiotta opportunità e il gruppo di Pisa (Giorgio Bellettini, Pierluigi Braccini, Rino Castaldi, Vincenzo Cvasinni, Tarcisio Del Prete, Paolo Laurelli, Giulio Sanguinetti, Marisa Valdata) insieme alla Collaborazione Genova-Harvard-MIT, il 9 novembre 1973, presentarono allo "ISR Committee" una proposta di collaborazione [15]. Lo spettrometro delle coppie di μ poteva essere installato in I8 dato che risultava compatibile con l'apparato di Pisa semplicemente arretrando di un paio di metri i primi due odoscopi della parte destra come mostrato nella figura 8.

L'argomento della compatibilità in I8 dei due apparati era politicamente fortissimo per lo "ISR Committee" e per di più, si affermava nella proposta, l'esperimento sarebbe potuto essere pronto in tempi brevissimi, già nell'estate del 1975.

In attesa dell'approvazione, Ting non mancava mai in ogni occasione di sottolineare questa compatibilità in I8, dicendo: "We (MIT&PISA) are compatible".

Con Braccini scherzavamo spesso su questa frase intendendo che, oltre alla compatibilità degli apparati, Ting volesse mandare il messaggio

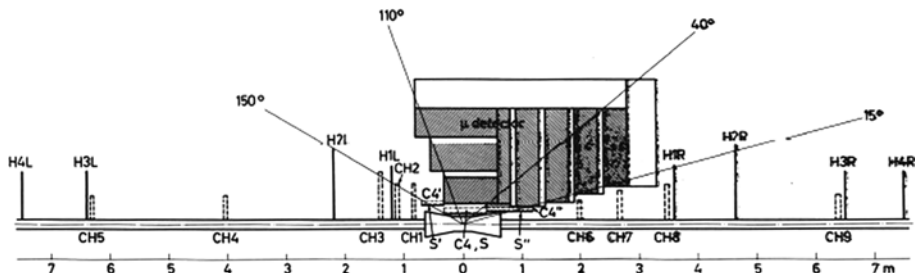


Figura 8. Disegno [15] dello spettrometro installato in I8, mostrando la compatibilità con gli odoscopi di R801.

al gruppo di Pisa, ma anche allo “ISR Committee”, che c’era tutta la sua disponibilità a lavorare con noi dandoci la giusta visibilità e senza crearci problemi; la qual cosa poteva non risultare ovvia data la forte personalità di Ting.

Dopo molte discussioni dentro e fuori lo “ISR Committee”, l’esperimento fu approvato in I8 con la sigla R804; purtroppo questa approvazione arrivò con quasi due anni di ritardo, nel 1975, anno in cui, come si asseriva nella proposta, sarebbe dovuto essere già installato e pronto a prendere dati! Poi, come se non bastasse, per non ben chiari motivi di “scheduling” [16] degli ISR, così si dichiarava nei documenti dello “ISR Committee”, l’installazione veniva posticipata di un altro anno e rimandata al 1976, ma non più in I8 bensì in I2 con la sigla R209!

Nel frattempo Ting e il suo gruppo, il giorno 11 novembre 1974 annunciavano la scoperta della J/Ψ (un “fotone pesante” 1^- con una massa di 3.1 GeV) in un esperimento di produzione di coppie e^+e^- in collisioni di protoni di 30 GeV su un bersaglio fisso di Berillio, a Brookhaven. La scoperta veniva fatta in contemporanea anche dal gruppo di Richter a SLAC in collisioni elettrone-positrone. Poco dopo la scoperta veniva confermata dal gruppo di Adone a Frascati.

Sospetto che una delle cause di questo enorme ritardo nell’approvazione e nell’installazione di R209 sia stata proprio la scoperta di Ting della J/Ψ e il grande impatto che questa scoperta, la così detta “rivoluzione di novembre”, ebbe sul mondo della fisica.

Se l’esperimento di Brookhaven con la scoperta di questo nuovo fotone pesante charm-anticharm, e il conseguente premio Nobel del 1976, potrebbero aver distratto Ting dall’esperimento R209, certamente questi fatti dettero a Ting un potere politico enorme nei confronti del CERN.

Con l’approvazione di R209 in I2, gli odoscopi di Pisa di R801 sarebbero stati sostituiti con delle opportune camere a deriva, e Pisa avrebbe avuto il compito di costruire un rivelatore di vertice da installare intorno alla zona di interazione. Questo rivelatore doveva ricostruire tutte le tracce cariche dell’e-

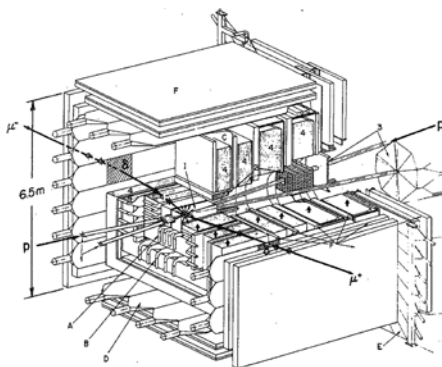


Figura 9. Schema dello spettrometro per $i\mu$ costituito da sette toroidi di ferro magnetizzato (4), grandi camere a deriva (F) e rivelatore di vertice (I).

vento, e in particolare doveva misurare le direzioni ed il vertice dei due μ , prima che entrassero nello spettrometro. Un gruppo di Napoli con la collaborazione di un piccolo gruppo di Firenze assunse l'incarico di costruire le camere a deriva in avanti.

La figura 9 mostra uno schema [17] dello spettrometro composto da sette toroidi di ferro magnetizzato che fungevano da assorbitori per l'identificazione dei μ e che contemporaneamente generavano il campo magnetico necessario per l'analisi in momento.

La curvatura nel campo magnetico delle tracce, ricostruite con delle grandi camere a deriva installate tra i vari toroidi, permetteva la misura del momento dei μ . La figura 10 mostra due dei toroidi in avanti in fase di installazione con i toroidi della parte centrale già installati. Per minimizzare il fondo di μ proveniente dal decadimento degli adroni prodotti nell'evento e per massimizzare la lunghezza di assorbimento, il ferro del primo toroide centrale si trovava ad appena ~40 cm dal punto di interazione, lasciando pochissimo spazio per il tracciatore di vertice.

Il problema era reso ancora più arduo dalla forma del bicono che unisce i due tubi a vuoto e che, dovendo essere molto sottile, era anche molto ingombrante. La figura 11 mostra i tubi a vuoto ed il bicono che era stato installato in I8 per l'esperimento R801 per minimizzare le interazioni secondarie delle particelle nelle pareti dei tubi a vuoto. Per questi stessi motivi anche per R209 furono installati dei tubi a vuoto ed un bicono identici a quelli di R801, con lo spiacevole risultato di riempire la maggior parte del già piccolo buco lasciato libero dal toroide centrale.

Il primo agosto 1975, al termine della mia borsa CERN, rientrai a Pisa, o meglio, a San Piero a Grado, con un tanto agognato posto di ricercatore INFN; e mi potei così comprare una casa a Tirrenia! Tutto per me volgeva dunque al meglio, ma la mia tranquillità venne ben presto turbata quando il gruppo di Pisa si prese la responsabilità della difficile progettazione e costruzione del rivelatore centrale di R209.

Braccini, che nel frattempo era diventato il responsabile del gruppo di Pisa e "co-spokesperson" di R209 insieme al Ting, aveva da poco laureato quattro giovani (Franco Cervelli, Marco Maria Massai, Mauro Morganti e Cristina Vannini) che avrebbero potuto rafforzare il gruppo.

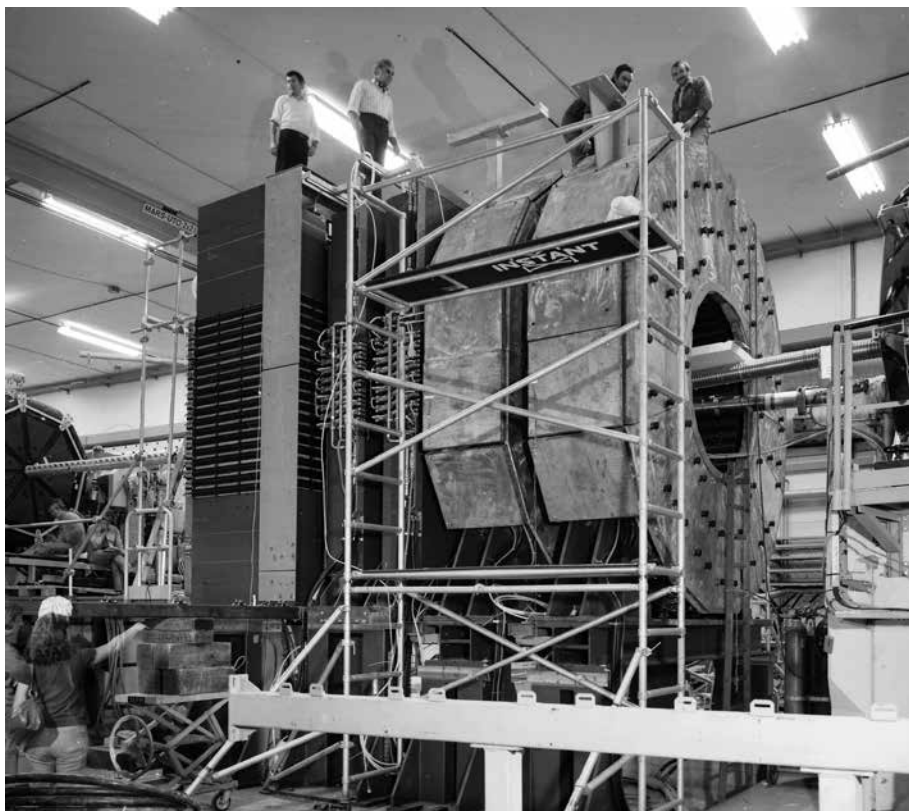


Figura 10. Due dei toroidi in avanti in fase di installazione. I toroidi della parte centrale sono già installati.

In effetti il gruppo di Pisa era diventato molto debole dato che buona parte dell'originario gruppo di R801 era andato a fare FRAMM al SPS e Bellettini era stato nominato direttore del Laboratorio Nazionale dell'INFN di Frascati. Alcuni membri poi, tra i più anziani, dovevano rimanere al CERN per finire le ultime analisi del vecchio esperimento e preparare l'elettronica ed i programmi per l'acquisizione dati di quello nuovo; per cui a Pisa, oltre a Braccini, restavamo io ed i suddetti quattro giovani (oltre a Sanguinetti e Cavasinni che rimasero a Pisa solo per brevi periodi).

Feci presente a Braccini della debolezza del gruppo a Pisa, ma lui mi rispose: “ma c'è Alberto Bechini che è una forza della natura!”; ed era davvero così! In realtà fortunatamente c'erano anche Carlo Betti e Ugo Cazzola e, tra i meccanici, soprattutto Pierino Marchi ma anche Favatino (Mario Favati) e Favatone (Giuseppe Favati). Per di più proprio nel 1975 era arrivato a San Piero un giovane progettista, portato dall'ing. Cian-



Figura 11. Nella foto si vedono i due tubi a vuoto ed il bicono di R801. Anche per R209 verranno installati nella zona di Intersezione I2 dei tubi a vuoto ed un bicono identici a quelli di R801.

Lo spazio a disposizione all'interno dello spettrometro era veramente risibile (150 cm lungo il fascio con solo una sezione trasversale di 70×70 cm²) con buona parte dello spazio riempito dall'ingombrante bicono dei tubi a vuoto (figura 11). Bisognava comunque riuscire ad installare intorno al bicono un rivelatore in grado di misurare per ciascuna traccia almeno tre punti spaziali con piena efficienza e con ottima precisione. Solo così si poteva sperare di ricostruire eventi con molte tracce cariche quali quelli che ci aspettavamo da eventi con coppie di μ ad una macchina protone-protone con un "rate" di "minimum-bias" di più di 10^6 eventi al secondo.

L'era dei rivelatori a pixel su silicio arriverà solo dopo oltre vent'anni, e, all'epoca, l'unica soluzione percorribile era quella di costruire camere a deriva con due fili di "sense" vicini per eliminare l'ambiguità destra-sinistra affiancati da una "linea di ritardo" per ricostruire il punto spaziale direttamente sulla singola camera.

La soluzione di camere a deriva, con anche linee di ritardo, creava subito dei grossi problemi sia finanziari che tecnologici. Risultava infatti necessario avere un complesso e costoso sistema di TDC che potesse acquisire tutti i tempi di volo di un numero molto alto di segnali, quali erano quelli del rivelatore che volevamo costruire.

caglini, che prese a cuore la progettazione del sistema meccanico del rivelatore: era Filippo Bosi. Questa fu la sua prima progettazione di un rivelatore di vertice ad un "collider", delle molte che farà negli anni a venire, molto più complesse e con tecnologie molto più raffinate, per Aleph, CDF, Babar, Belle II e CMS.

È grazie a Filippo che la Sezione INFN di Pisa è potuta diventare uno dei centri di ricerca in fisica delle alte energie tra i più qualificati al mondo per apparati di vertice e di tracciatura ai "Collider".

Insomma eravamo tutti giovani e inesperti, ma ci rimboccammo le maniche e iniziammo a progettare questo rivelatore di vertice!

L'aspetto tecnologico per leggere tutto il complesso sistema di TDC poteva essere ben risolto dalle persone che restavano al CERN e che avevano grande esperienza di acquisizione dati.

Più difficile risultava il problema finanziario che non poteva essere risolto con fondi INFN. L'unica speranza era quindi l'aiuto del CERN!

La situazione però non era semplice: Ting, forte del suo premio Nobel, si era fatto dare dal CERN un supporto finanziario notevole, ma solo per il suo spettrometro. Non era quindi ovvio che il CERN fosse disponibile a finanziare ulteriormente l'esperimento R209.

Questo evidentemente era un problema che poteva risolvere solo Braccini; e oggi Pierluigi mi racconta di sue infuocate riunioni con il "management" del CERN, mentre Ting, rilassato in poltrona, ascoltava in silenzio con aria sorniona, avendo lui già ottenuto tutto quello di cui aveva bisogno. Braccini dalla sua aveva l'argomento che il CERN, quale Laboratorio europeo, non poteva aiutare soltanto il gruppo americano e non aiutare, all'interno dello stesso esperimento, il gruppo di un paese come l'Italia che era uno dei maggiori finanziatori del CERN stesso.

Alla fine Braccini riuscì a far pagare al CERN l'intero sistema di TDC (~800.000 FCH) anche se a prezzo di grossi malumori con le persone del management del CERN. Tuttavia, una volta presa questa sofferta decisione, mi dice ancora Braccini, tutti i malumori furono rapidamente superati e addirittura nacque un ottimo rapporto di amicizia tra lui e alcuni membri del management; e di quelle animate discussioni non ne fu più parlato.

Ciascun membro del gruppo ebbe dunque i suoi problemi da risolvere e il gruppetto che stava a Pisa, di cui, a parte Braccini, io ero il più anziano, ebbe il difficile compito, insieme ai nostri tecnici e al giovane Filippo, di progettare e costruire il rivelatore di vertice.

Dopo molti pensieri convergemmo su un sistema modulare [18] di 136 camere a deriva posizionate con la necessaria precisione su un supporto di plexiglas in cui era alloggiato anche il sistema di distribuzione del gas. L'utilizzo del plexiglas, forse non il materiale migliore per un posizionamento di alta precisione ma comunque sufficiente, si rese necessario per minimizzare la quantità di materiale che le particelle dovevano attraversare. Non descriverò i dettagli della struttura del modulo della camera e del sistema nel suo complesso, per le quali si rimanda alla relativa pubblicazione [18]. Qui mi limiterò a mostrare le foto del posizionamento di alcune camere (figura 12) e di metà di tutto il rivelatore (figura 13) assemblato in laboratorio e pronto per essere installato in I2.

È stato questo uno dei primi, se non il primo, rivelatore di vertice al mondo installato su un collisionatore adronico. La sua struttura modulare semplificò moltissimo la costruzione delle camere ed i programmi di ricostruzione delle tracce. Lo definimmo, scherzando, il rivelatore "Mo-

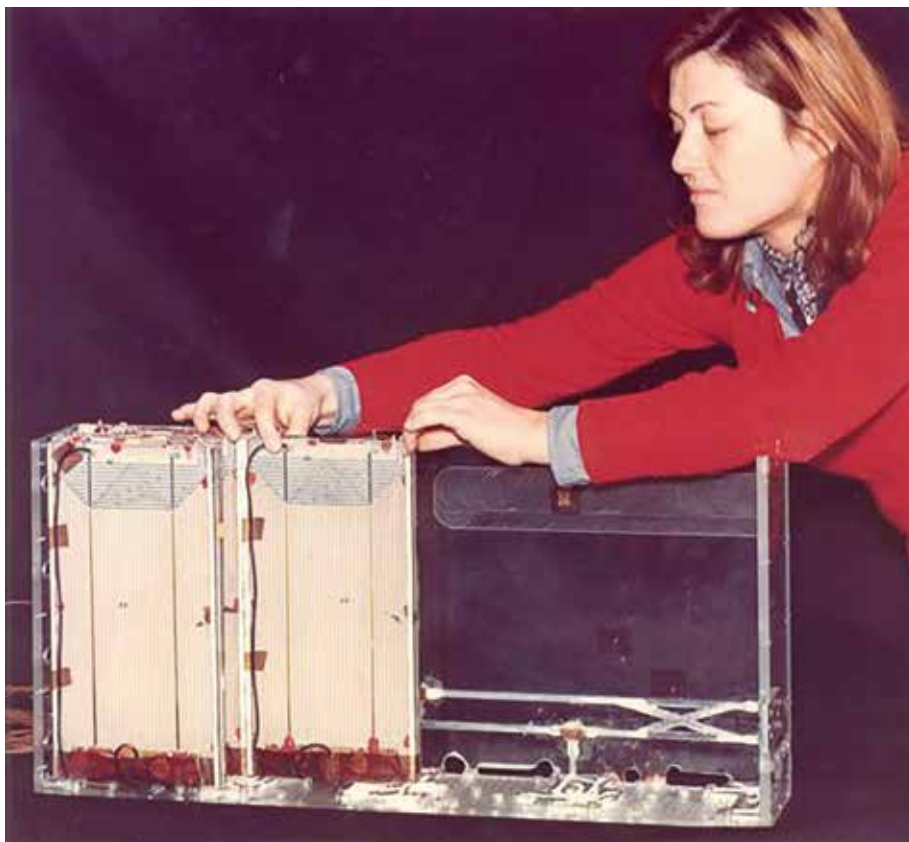


Figura 12. Foto di camere del rivelatore di vertice mentre vengono alloggiate da Cristina Vannini sul supporto di plexiglas.

dular & Compact”; e spesso, durante la sua costruzione, lo chiamavamo proprio così, ripetendo questa sua definizione come un “mantra” di buon auspicio!

Questo utilissimo concetto di modularità è stato poi utilizzato spesso in altri rivelatori ed in particolare, su una scala molto più grande, anche nella progettazione del tracciatore di CMS di cui ne sarò, più di 20 anni dopo, il responsabile.

La complessità meccanica ed elettrica del singolo modulo se da un lato permetteva la ricostruzione diretta del punto spaziale, dall’altro richiedeva che la camera fosse sottoposta a stringenti test di robustezza e di completa efficienza di rivelazione. Era anche necessario essere sicuri che i fili avessero una buona resistenza all’invecchiamento per tutto il periodo previsto della presa dati ad una macchina ad alto “rate” come gli ISR.

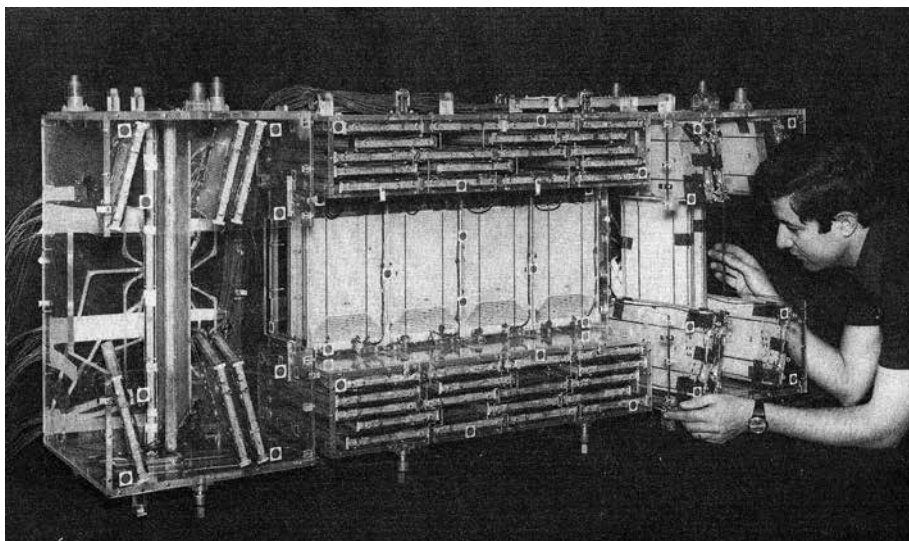


Figura 13. Foto di una metà del rivelatore di vertice assemblato in Laboratorio con Paolo Laurelli che ne osserva le camere.

Questa complessa struttura della camera, con i due fili di “sense” molto vicini tra loro e vicini ad una linea di ritardo ricoperta di un materiale isolante per evitare scariche, e per di più con i fili di campo stampati su una sottile superficie di vetronite, generò molte critiche sull’adeguatezza della camera ai nostri scopi. Queste critiche, che ci vennero rivolte sia da persone del nostro stesso gruppo che da altri che si ritenevano, e magari lo erano, molto esperti di camere a deriva, necessitavano una risposta chiara e definitiva prima di passare alla fase di costruzione dell’apparato.

Le misure che facemmo su svariati prototipi lasciati a funzionare per molto tempo su un fascio intenso del CERN, ci convinsero che, se la camera era costruita con cura, quelle critiche erano infondate e che la camera soddisfaceva bene alle nostre esigenze; e così passammo alla costruzione in serie!

Il rivelatore fu installato senza problemi intorno al punto di interazione, ma appena partimmo in presa dati nacquero due problemi uno più serio dell’altro!

Il rivelatore era circondato da contatori a scintillazione letti con dei fototubi a 12 dinodi che purtroppo erano sensibili al campo magnetico e dovevano quindi essere molto ben schermati. Il buon funzionamento di questi contatori era essenziale per dare lo “start” ai tempi di volo, ma purtroppo per un paio di essi, quelli più vicini ai toroidi in avanti, la schermatura che avevamo fatto non era sufficiente ad annullare l’effetto del campo magnetico in cui erano immersi.

Come era avvenuto svariati anni prima, Ting entrò nel mio studio al Castello e mi salutò col solito “buongiorno”, ma questa volta in modo meno sorridente. In modo gentile, ma perentorio, mi disse che era riuscito a far tenere spenti gli ISR per una settimana. Sottolineò che anche tutti gli altri esperimenti installati agli ISR non avrebbero potuto prendere dati per tutto quel tempo e concluse che quella settimana, non un’ora di più, era il tempo massimo in cui dovevamo estrarre il rivelatore, schermare meglio i contatori ed installarlo di nuovo. Mi disse poi che era confidente che saremmo riusciti a farlo; disse di nuovo buongiorno e se ne andò!

Fu una settimana da incubo ma ce la facemmo.

Il secondo problema fu meno appariscente ma sarebbe potuto essere ancora più serio se non si fosse trovata la soluzione. Le camere sembravano efficienti, ma non si riusciva a fare delle curve di plateau di alta tensione convincenti. I conteggi continuavano a crescere con l’aumentare della tensione dei fili di “sense” e si correva il rischio, per cercare di essere sicuri della loro efficienza, di aumentare troppo la tensione con il risultato di far scaricare i fili e distruggere la camera. Questo fatto riaccese le vecchie critiche che queste camere erano state mal progettate e che non avrebbero mai potuto funzionare sui fasci degli ISR.

Avevo visto i plateau di tensione sui fasci di test, per cui, seppur molto preoccupato, ritenevo che per qualche motivo stessimo facendo male le curve di plateau e non che le camere funzionassero male.

Una notte che ero solo in turno passai tutto il tempo nel cercare il “trigger” giusto per ripulire la curva da eventuali impulsi molto piccoli che con l’aumentare della tensione venivano sempre più amplificati e finivano per distruggere il plateau. La cosa non era facile perché i fasci degli ISR erano in continua, e inoltre la vicinanza del ferro dei toroidi creava un alone di particelle di “back scattering” che potevano generare una miriade di piccoli impulsi nelle camere. Alla fine della nottata, quando ormai stavo per gettare la spugna, ebbi l’idea giusta sul “trigger” da usare, e finalmente venne fuori un bellissimo plateau. Difficilmente avrei potuto sopportare un’altra visita di Ting nel mio ufficio!

Prendemmo dati a $\sqrt{s} = 62$ GeV per oltre tre anni accumulando una luminosità integrata di $1.11 \times 10^{38} \text{ cm}^{-2}$, ma al prezzo di un’infinità di turni di notte che ricordo ancora come un incubo. Durante il giorno gli operatori degli ISR lavoravano all’ottimizzazione e al miglioramento della macchina e verso sera, prima di andare a casa, iniettavano i fasci e li lasciavano stabili per tutta la notte permettendo finalmente a noi poveri fisici di prendere dati.

Per tutto questo lungo periodo le camere del nostro rivelatore funzionarono egregiamente senza significative perdite di efficienza dovute al temuto invecchiamento dei fili.

Ci volle molto tempo per accumulare una buona statistica e solo nel 1980 riuscimmo a pubblicare [17] i risultati dell’esperimento. In figura 14

è mostrata la sezione d'urto $d\sigma/dm$ (cm^2/GeV) di produzione della coppia $\mu^+ \mu^-$ in funzione della loro massa invariante. Gli eventi nella regione di massa 2-5 GeV sono dominati dalla produzione della J/Ψ , mentre intorno a 9.5 GeV si distingue chiaramente la Y , l'altro fotone ancor più pesante che era stato da poco scoperto dal gruppo di Leon Lederman a Fermilab. Si osservarono anche tre eventi con massa intorno a 25 GeV che ci permisero di stabilire solo un limite superiore alla sezione d'urto di produzione di un'eventuale risonanza X con massa maggiore di 20 GeV. Purtroppo agli ISR, come sapremo qualche anno dopo, non c'era l'energia sufficiente per produrre lo Z^0 !

In figura 15 è mostrato [19] l'evento con la massa più alta misurata da R209 ($M \sim 25$ GeV, $P_T \sim 1.2$ GeV), ricostruito nella vista longitudinale lungo i fasci, nella direzione cioè in cui il campo magnetico incurva le tracce dei muoni permettendone la misura degli impulsi.

Nella parte destra della figura è mostrato, in una vista ingrandita, lo stesso evento come ricostruito dal rivelatore di vertice in cui ben si identificano le direzioni dei due μ prima di entrare nello spettrometro. Nell'evento, insieme alla coppia di μ , ci sono altre 10 tracce cariche che permettono la ricostruzione con buona precisione del vertice di interazione. Lo studio delle tracce cariche associate alla coppia di muoni ha dimostrato la presenza di un jet di rinculo opposto alle coppie di muoni di alto impulso trasverso [20]. Questa è stata una delle prime evidenze sperimentali dell'esistenza dei gluoni che sono associati alla produzione di coppie di muoni e che si materializzano in un jet di particelle adroniche.

Purtroppo con questo esperimento non facemmo nessuna scoperta di nuove risonanze perché, nel frattempo, quello che c'era da scoprire era già stato scoperto. Ovviamente non potevamo scoprire lo Z^0 perché non c'era

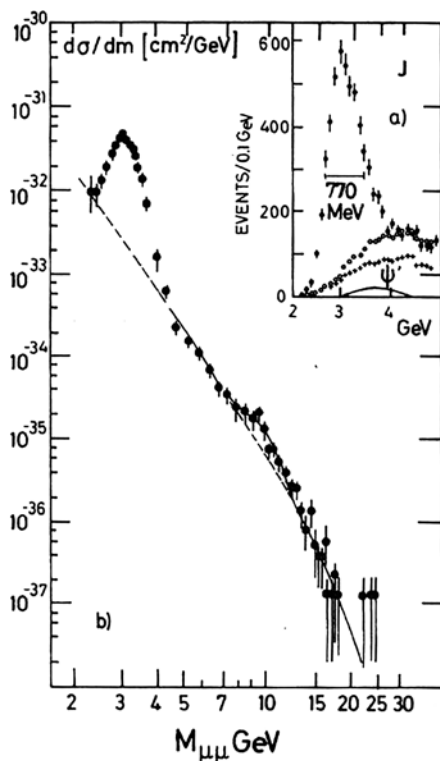


Figura 14. Sezione d'urto di produzione $d\sigma/dm$ (cm^2/GeV) della coppia $\mu^+ \mu^-$ a $\sqrt{s} = 62$ GeV in funzione della loro massa invariante.

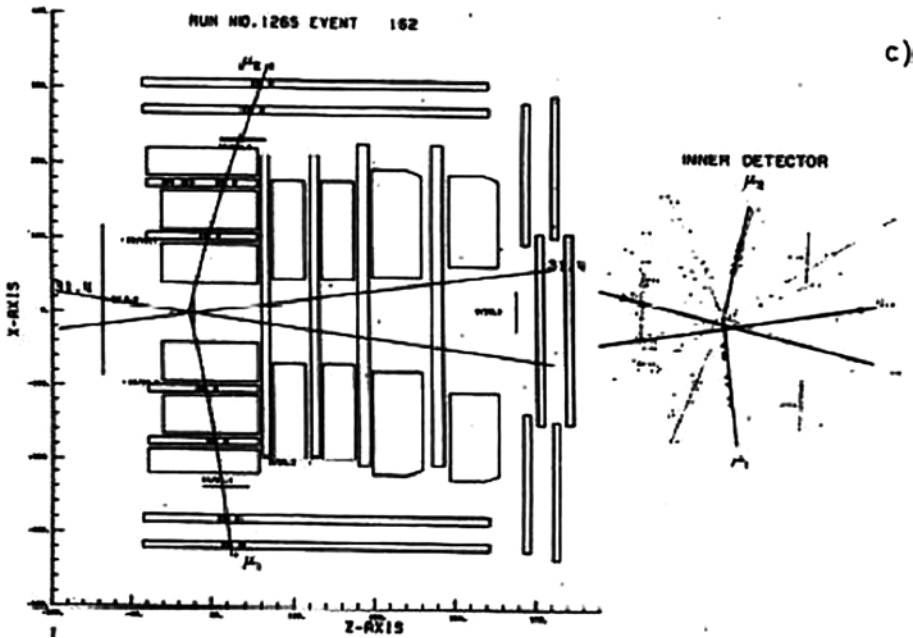


Figura 15. Evento con la massa più alta misurata da R209 ($M \sim 25 \text{ GeV}$ $P_T \sim 1.2 \text{ GeV}$), ricostruito nella vista lungo i fasci.

l'energia sufficiente e potevamo soltanto riconfermare l'esistenza dei due "1- heavy photons", la J/Ψ e la Y , già scoperti qualche anno prima.

Tuttavia questo esperimento fu per me, ma credo anche per tutto il gruppo di Pisa, l'occasione di poter acquisire non solo molta esperienza sui rivelatori di particelle e sull'elettronica di lettura, ma anche sul software di ricostruzione degli eventi e sui programmi di simulazione.

Fino ad allora un programma di analisi era scritto in molte centinaia di schede perforate, una per ogni istruzione di calcolatore. Ogni volta tutte le schede dovevano essere lette e poi fatte "assemblare" (cioè tradurre in binario) per rendere il programma eseguibile dal calcolatore. Tutto il procedimento doveva essere ripetuto se si voleva cambiare anche una sola istruzione. Con l'aumentare della complessità dei programmi di analisi il numero di schede era diventato talmente grande da rendere questa procedura quasi ingestibile dato che la probabilità che il lettore di schede si inceppasse prima di aver finito di leggere tutte le schede, era molto alta. Fu in questo esperimento che imparammo con i nostri colleghi americani ad utilizzare un sistema in cui tutto il grosso programma di base era registrato su disco e per modificarlo bastava leggere le poche schede perforate della modifica che si voleva apportare. Automaticamente poi il calcolatore "assemblava" il programma modificato e lo eseguiva.

La tecnologia evolveva in fretta e non molto tempo dopo fu possibile eliminare completamente anche queste poche schede perforate scrivendo direttamente le modifiche sul disco del calcolatore.

5. UA4: la misura della sezione d'urto totale protone antiprotone al “pbar-p Collider” del CERN (1979-1984)

Nel 1972 Simon Van der Meer [21] aveva proposto un metodo di raffreddamento degli antiprotoni (stochastic cooling) il cui funzionamento fu dimostrato sperimentalmente non molto tempo dopo sugli ISR. Questo metodo apriva la possibilità di accelerare un fascio di antiprotoni nello SPS (Super Proton Synchrotron) del CERN e di ottenere un collisionatore protone-antiprotone ad un'energia nel centro di massa di $\sqrt{s} = 540$ GeV e di sufficiente luminosità per la ricerca dei bosoni intermedi W e Z. Il progetto fu approvato nel 1978 e la macchina iniziò a funzionare nel 1981.

L'incredibile aumento in energia di questa nuova macchina rispetto agli ISR aprì di nuovo la corsa per la ricerca di nuove risonanze ed in particolare dello Z^0 e dei $W^\pm$ con i due esperimenti UA1 [22] e UA2 [23].

La crescita della sezione d'urto totale protone-protone con l'energia, che era stata scoperta molti anni prima agli ISR, riaccese l'interesse di capire il comportamento asintotico delle interazioni adroniche sperando di poterlo interpretare sulla base di pochi principi generali piuttosto che in termini di modelli particolari. Questo nuovo “Collider” offriva un'opportunità unica di studiare lo “scattering” elastico e la sezione d'urto totale antiprotone-protone a questi altissimi valori di energia. Inoltre con questa stessa tecnica di “cooling” si poteva sostituire un fascio di protoni degli ISR con un fascio di antiprotoni, e questo avrebbe permesso di misurare e quindi di confrontare a queste energie le sezioni d'urto protone-protone e antiprotone-protone.

Per questi motivi la Collaborazione Amsterdam-CERN-Genova-Napoli-Pisa propose [24] di misurare lo “scattering” elastico e la sezione d'urto totale pbar-p all'energia di $\sqrt{s} = 540$ GeV, resa disponibile da questo nuovo collisionatore. L'esperimento fu approvato il 18 gennaio 1979 con la sigla UA4 nella stessa zona di interazione dove sarebbe stato installato anche l'esperimento UA2, e si iniziò a prendere dati già dal 1981.

L'apparato sperimentale era concettualmente simile a quello utilizzato agli ISR [11] per fare questo tipo di misure. Lo “scattering elastico” a piccoli angoli veniva misurato da un sistema [25] di quattro telescopi posizionati due a destra e due a sinistra rispetto al punto di interazione ad una distanza di 37 metri e disposti in modo simmetrico sopra e sotto il tubo a vuoto del collisionatore. Ciascun telescopio consisteva in due stazioni di rivelatori posizionati ad una distanza di 6 metri l'uno dall'al-

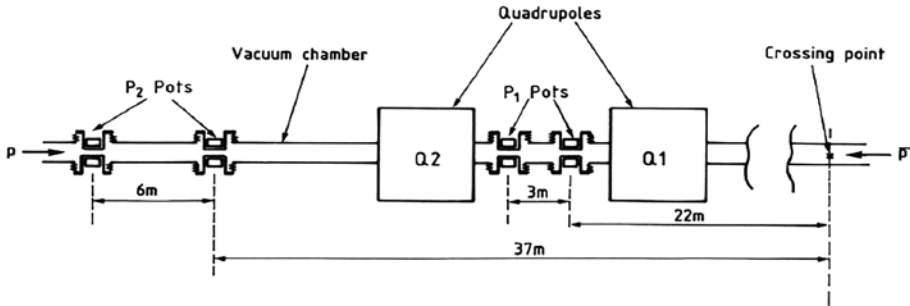


Figura 16. Schema delle "Roman Pots" del lato sinistro dei telescopi rispetto al punto di interazione.

tro. In figura 16 si mostra solo il lato sinistro dello schema dell'apparato dove i rivelatori di questi telescopi sono indicati come "P2 Pots".

Per fare questo tipo di misure è stato necessario poter rivelare particelle emesse ad un angolo dell'ordine del millesimo di radiante rispetto all'asse dei fasci. Questo è stato possibile, così come era stato fatto agli ISR, inserendo i rivelatori in un sistema mobile del tubo a vuoto (le così dette "Roman Pots") che permettevano di avvicinare i rivelatori a pochi millimetri dai fasci una volta che le condizioni della macchina fossero diventate stabili. Fu quindi naturale che la responsabilità della costruzione di questa parte dell'apparato fosse delle persone dei gruppi Amsterdam, CERN e Genova, alcune dei quali avevano partecipato all'esperimento del CERN-Roma agli ISR.

In figura 16 si mostra anche un'altra coppia di "Roman Pots" (P1 Pots) che furono installate per la misura dello "scattering" elastico a grande momento trasferito e per lo studio della produzione diffrattiva, di cui parleremo tra poco.

Il "rate" totale dell'interazione antiprotone-protone veniva misurato aggiungendo al "rate" elastico misurato con le "Roman Pots", il "rate" inelastico misurato [25] con due identici sistemi costituiti da tre telescopi (D1, D2, D3) di camere a deriva e contatori a scintillazione (T1, T2, T3), posizionati simmetricamente a destra e a sinistra del punto di interazione. In figura 17 è riportato lo schema di un lato dell'apparato con le coperture angolari in η dei tre diversi telescopi. Ciascun telescopio consisteva di 6 piani di camere a deriva seguite da un piano di contatori di trigger. La coordinata lungo i fili di "sense" veniva misurato con delle linee di ritardo poste di fronte ai fili in modo da ricostruire il punto spaziale direttamente sulla camera.

Il telescopio D1 veniva inserito all'interno dell'apparato di UA2 ad una distanza di circa 1.5 metri dal punto di interazione come continuazione del rivelatore centrale di UA2 il quale ne completava quindi la copertura

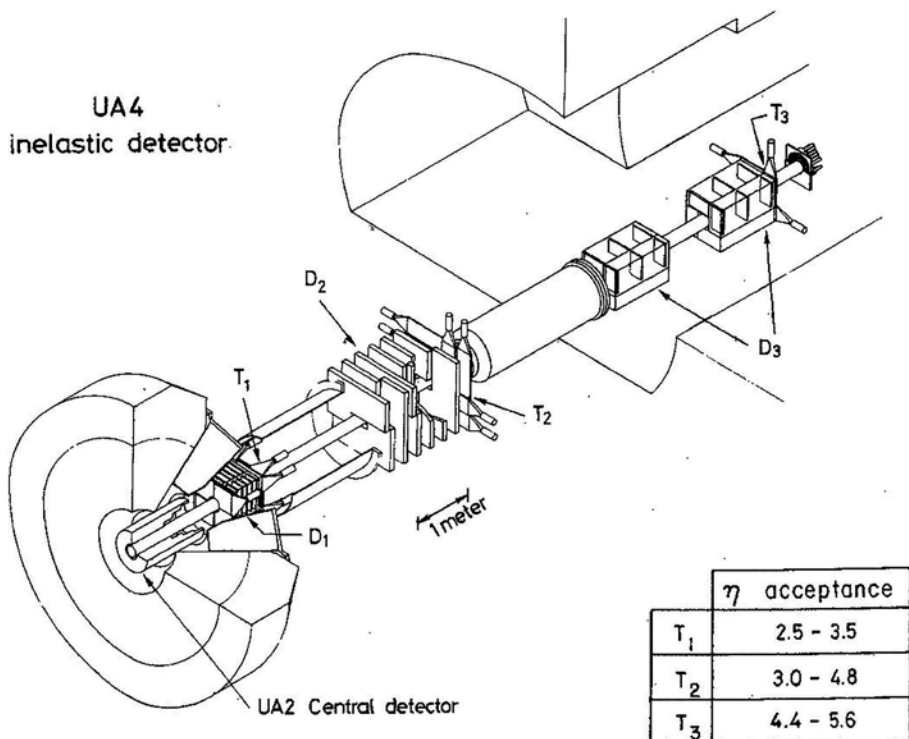


Figura 17. Schema di un lato dell'apparato per la misura del "rate" inelastico. L'apparato è simmetrico rispetto al punto di interazione.

angolare a piccoli η . Nella foto della figura 18 si vede il telescopio D1 in una prova di inserzione dentro il buco lasciato libero dai rivelatori di UA2 prima ancora che venga installato il tubo a vuoto dei fasci del Collisionatore.

Il telescopio D3 si trovava a circa 10 metri dal punto di interazione a coprire gli angoli più piccoli. Il telescopio D2 copriva gli angoli intermedi tra D1 e D3, garantendo così la totale copertura angolare dell'apparato per tutti i valori di η minori di 5.6.

I telescopi D1 e D3 dovevano avere rivelatori con requisiti molto simili a quelli che avevamo costruito per il rivelatore centrale di R209, per cui decidemmo di usare le stesse camere a deriva [18] mantenendone esattamente la stessa struttura interna e adattandone soltanto le lunghezze allo spazio disponibile. Fu quindi naturale che la costruzione di questa parte dell'apparato fosse responsabilità del gruppo di Pisa. Analogamente il gruppo di Napoli si assunse la responsabilità della costruzione di D2 con camere simili a quelle che avevano costruito per R209.

Il gruppo di Pisa (Pierluigi Braccini, Roberto Carrara, Rino Castaldi, Franco Cervelli, Giulio Sanguinetti e Cristina Vannini, a cui si era aggiun-

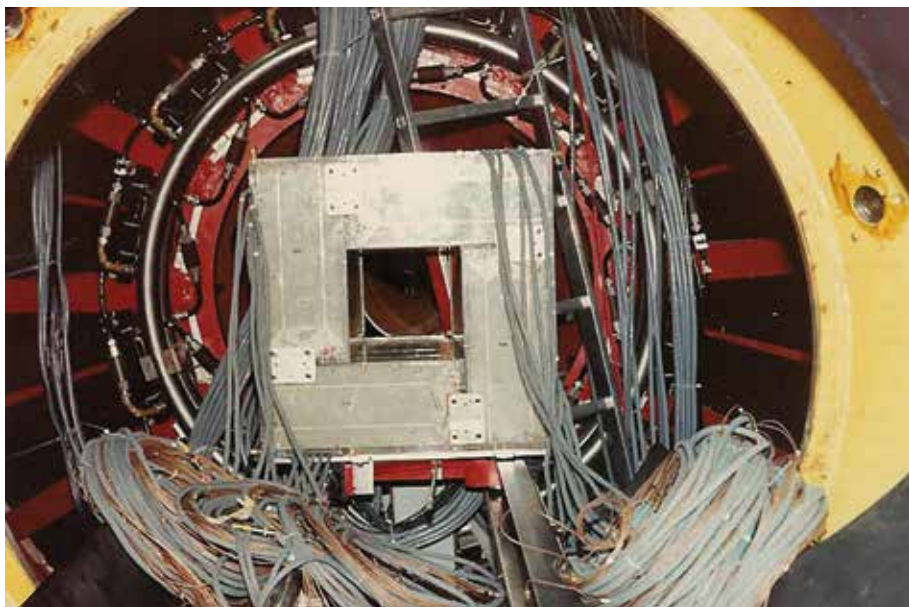


Figura 18. Foto del telescopio D1 in una prova di inserzione all'interno dell'apparato di UA2 prima che venga installato il tubo a vuoto.

to Roberto Battiston appena laureato) si era ridotto ulteriormente perché una parte del gruppo era rimasto a misurare la sezione d'urto totale antiproton-proton alle energie degli ISR (R210), ora che in uno dei due anelli poteva essere fatto circolare un fascio di antiprotoni.

Tuttavia nonostante le esigue forze del gruppo di Pisa, grazie all'esperienza acquisita con l'esperimento R209, riuscimmo a ben mantenere i nostri impegni sia nella costruzione dell'apparato che nell'acquisizione e nell'analisi dei dati.

La costruzione delle camere e dei relativi sostegni meccanici risultò molto semplice e veloce data la loro modularità e la loro struttura identica a ciò che avevamo già costruito per R209. La figura 19 mostra, da sinistra a destra, la foto di me stesso insieme a Favatino, Bechini e Favatone mentre stiamo lavorando a Pisa su alcune camere di D3. In figura 20 si vede da sinistra a destra ancora Favatone, Bechini, il giovane Filippo Bosi in primo piano, Braccini e il giovanissimo Battiston; mentre alle loro spalle si vede l'ultima box di D3 già installata nella zona sperimentale.

Se la costruzione di tutto UA4 fu semplice e veloce, molto più sofferta fu l'attesa per la presa dati, almeno quella che ci potesse permettere di fare misure con la precisione che volevamo.

Per poter misurare bene lo "scattering" elastico a piccoli angoli UA4 aveva bisogno che la macchina funzionasse in uno schema speciale, nel



Figura 19. Nella Foto, da sinistra a destra, Castaldi, Favatino, Bechini e Favatone al lavoro a Pisa sulle camere di D3.

così detto “high β ”. In questo schema i fasci si dovevano incrociare avendo direzioni molto ben parallele; ma questo implicava anche una bassa luminosità della macchina. Questo schema andava quindi in diretto contrasto con gli interessi di UA1 e UA2 che essendo alla ricerca dello Z^0 e dei $W^\pm$ avevano bisogno di alta luminosità. Questi due esperimenti necessitavano quindi di uno schema in “low β ” con questo parametro β il più piccolo possibile, in modo che i fasci fossero, non paralleli, ma molto ben focalizzati proprio nel punto di interazione. Per passare da uno schema all’altro era necessario che gli operatori della macchina spendessero molto tempo nell’ottimizzazione dello schema da utilizzare, e questo fatto evidentemente toglieva tempo prezioso ai due esperimenti principali che erano a caccia di scoperte certamente più importanti della misura della sezione d’urto totale.

Anche se a UA4 bastavano poche ore di presa dati in “high β ”, dovemmo aspettare molto tempo prima che la macchina fosse fatta funzionare in questo schema per un “run” tutto dedicato alle nostre misure.

Con UA2 forse avremmo potuto discutere e magari convincerli a perdere un po’ di tempo per noi, anche perché con la nostra misura potevano calibrare in modo assoluto qualche loro monitor di luminosità; ma fare a UA1 una tale richiesta sarebbe stato del tutto inutile. Convincere Rubbia a perdere anche un solo barn⁻¹ di luminosità integrata per



Figura 20. Nella Foto, da sinistra a destra, Favatone, Bechini, Bosi, Braccini e Battiston.

misurare l'andamento con l'energia della sezione d'urto totale $p\bar{b}ar-p$ sarebbe stato evidentemente impossibile; ormai tutti erano convinti che anch'essa non poteva che crescere (anche se nessuno l'aveva ancora misurata!).

Potevamo solo sperare che lo "SPS Committee", avendoci approvato l'esperimento fosse obbligato a darci, prima o poi, un po' di tempo macchina.

Fortunatamente all'inizio delle operazioni del "Collider", gli ingegneri di macchina non erano ancora in grado di focalizzare i fasci nel punto di interazione senza distruggerli, per cui i primi "run" furono con lo stesso β con cui i fasci venivano iniettati dallo SPS. Questo β era sufficientemente grande da permetterci una misura [26] dello "scattering" elastico fino ad un momento trasferito di 0.05 GeV^2 . Questo ci permise di fare una prima misura [27] della sezione d'urto anche se con un errore piuttosto grande ($\sim 10\%$), ma che era più che sufficiente per affermare con sicurezza che anche la sezione d'urto totale $p\bar{b}ar-p$ cresceva con l'energia.

Quando, molto tempo dopo, ottenemmo finalmente un "run" in "high β ", gli operatori riuscirono a ottimizzare la macchina con questo schema senza eccessivi problemi e il nostro apparato, nelle poche ore di macchina a noi riservata, funzionò perfettamente. Se qualcosa fosse andato storto chissà quanto tempo avremmo dovuto attendere prima di avere un'altra possibilità di prendere dati con questo schema. Potemmo così riconferma-

re [28], [29] con errori molto più piccoli tutte le misure di “scattering” elastico e di sezione d’urto totale antiprotone-protone fatte due anni prima.

In figura 21 è riportata la sezione d’urto totale $p\bar{p}$ misurata da UA4 a $\sqrt{s} = 540$ GeV insieme ai valori misurati per p - p e $p\bar{p}$ ad energie inferiori. Il valore misurato risultò essere in perfetto accordo con l’extrapolazione del “dispersion relation fit” fatto da Amaldi *et al.* [30] nel 1977 usando relazioni di dispersione ai dati della sezione d’urto totale e della parte reale dell’ampiezza di “scattering” elastico in avanti fino alle energie degli ISR. La curva continua nella figura mostra il “fit” e la sua estrapolazione alle energie del “ $p\bar{p}$ Collider”.

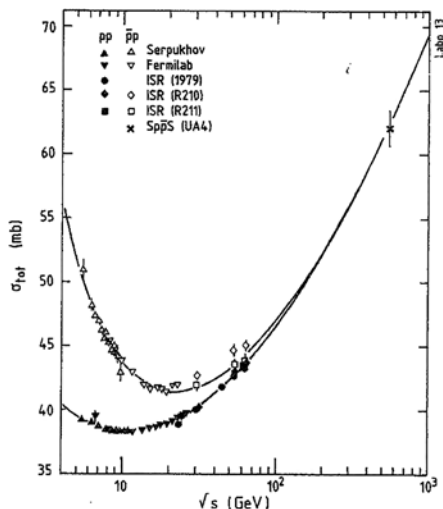


Figura 21. Sezione d’urto totale $p\bar{p}$ misurata da UA4 a $\sqrt{s} = 540$ GeV insieme ai valori misurati per p - p e $p\bar{p}$ ad energie inferiori. La curva continua mostra il “dispersion relation fit” e la sua estrapolazione.

Dovemmo attendere molto tempo in attesa di un “high β run” tutto per noi, mentre gli operatori riuscivano a far funzionare la macchina con un β sempre più piccolo e una luminosità sempre più grande. Finalmente la ricerca dei W e dello Z^0 ebbe successo e la loro scoperta fu finalmente annunciata nella prima metà del 1983 da UA1 e UA2.

Fortunatamente avevamo un programma di riserva che per altro risultò molto interessante. In figura 16, come dicevamo, si vede anche un’altra coppia di altre due “Roman Pots”, indicate come “P1 Pots”. Questi ulteriori rivelatori furono installati a 22 metri dal punto di interazione e distanti 3 metri tra loro, posizionati tra i due quadrupoli della macchina Q1 e Q2. Con l’aggiunta di questi rivelatori e utilizzando le deflessioni delle traiettorie delle particelle nel campo magnetico dei due quadrupoli si poteva misurare l’impulso delle particelle che li attraversavano. I due telescopi divennero quindi degli spettrometri di precisione che offrono la possibilità di misurare [31], [32] lo “scattering” elastico fino a grandi valori del momento trasferito (fino a $t \sim 1.55$ GeV²). La misura precisa dell’impulso dell’antiprotone permise anche lo studio [33] del “single diffraction dissociation”, cioè di una interazione in cui l’antiprotone restava intatto mentre il protone dall’altra parte si frammentava in varie particelle di massa invariante M .

Queste misure dovevano e potevano essere fatte con la macchina nello schema di “low β ” e quindi con alta luminosità. Potemmo quindi prendere dati in contemporanea con UA1 e UA2 per tutto il periodo di funzionamento della macchina in attesa del nostro “run”.

Purtroppo, a mio avviso, non sfruttammo a pieno le potenzialità del nostro apparato.

L'apparato di UA4 rivelava eventi che venivano generati dalla stessa zona di interazione attorno a cui era installato UA2; in altri termini UA4 poteva essere visto come un apparato a completamento nella regione in avanti dell'apparato di UA2. Sarebbe stato quindi logico che, per ogni evento acquisito sia da UA4 che da UA2, venissero registrate insieme tutte le informazioni viste dai due apparati.

Tra l'altro, per poter misurare il “rate” totale ed essere sicuri che non perdevamo niente oltre al “rate” visto dai nostri telescopi, chiedemmo a UA2 di poter leggere anche la loro camera centrale durante il nostro “high β run”. Naturalmente non ci furono problemi di nessun tipo, né politici tra collaborazioni, né tecnici di incompatibilità di lettura. Nel caso specifico potemmo verificare che la camera centrale non apportava nessun contributo significativo in aggiunta al “rate” totale inelastico visto dai nostri telescopi.

Sarebbe stato sufficiente unire il “trigger” di UA4 a quello di UA2 e, unendo con poco ulteriore lavoro i due sistemi di lettura, diventare un'unica Collaborazione. In tal caso sarebbe stato possibile studiare, per esempio, processi di doppia diffrazione, oltre a quelli di diffrazione singola, ricostruendo le masse prodotte in queste interazioni anche nei rivelatori di UA2. Avremmo inoltre potuto ricostruire anche tutte le particelle cariche prodotte in associazione ad eventi di alto momento trasferito come gli eventi con i W e lo Z^0 . Insomma avremmo potuto studiare questi e molti altri tipi di processi di sicuro interesse fisico.

Mi ricordo che io, insieme a Giulio Sanguinetti, cercammo di convincere la nostra Collaborazione ad entrare a far parte della Collaborazione UA2. Fummo anche molto insistenti nel tentativo di convincere alcuni nostri colleghi; ma non ci fu niente da fare. UA4 mantenne la sua indipendenza e della buona fisica fu sicuramente persa!

E la storia purtroppo si è ripetuta quando, molti anni dopo, alcuni dei membri di UA4 hanno proposto a LHCC l'esperimento TOTEM, concettualmente simile a UA4, nella stessa zona di interazione di CMS. Cercai di convincere questi miei ex-colleghi di UA4 a proporre questo apparato come completamento nella zona in avanti di tutti gli altri apparati di CMS. Ma anche questa volta non fui ascoltato, e per molti anni TOTEM ha mantenuto la sua totale indipendenza, limitandosi a fare la fisica che era loro accessibile senza le informazioni di CMS.

Finalmente, proprio in questi giorni, si sta definendo ufficialmente tra gli attuali responsabili dei due esperimenti l'ingresso di TOTEM in CMS

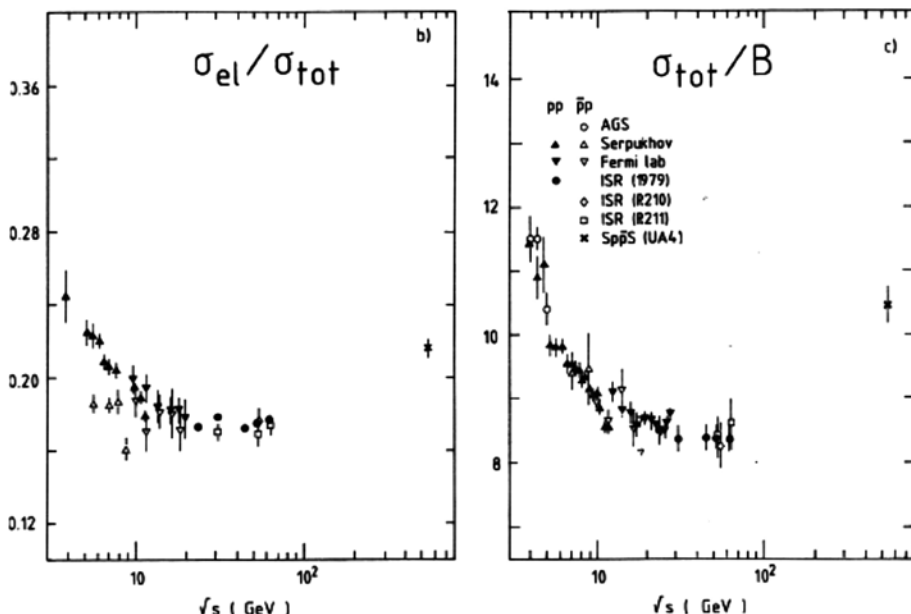


Figura 22. Dipendenza dall'energia per p-p e pbar-p fino a $\sqrt{s} = 540$ GeV del rapporto σ_{el}/σ_{tot} tra la sezione d'urto totale elastica e la sezione d'urto totale, e del rapporto σ_{tot}/B dove B è la "slope" della sezione d'urto differenziale elastica in avanti.

e, come era facilmente prevedibile, si stanno già ottenendo interessanti risultati di fisica.

Il dispiacere mio e di Sanguinetti per non essere stati ascoltati dai nostri colleghi di UA4 fu in parte attenuato dalla richiesta che ci fu fatta di scrivere un articolo [34] di rivista per "Annual Review of Nuclear and Particle Science" sullo "scattering" elastico e le sezioni d'urto totali ad alte energie.

In questo articolo cercammo di mettere in risalto l'importanza delle nuove misure fatte da UA4 al "pbar-p Collider" nell'ambito dei modelli che cercavano di interpretare l'andamento asintotico delle interazioni adroniche a basso impulso trasferito. In figura 22 si riporta la dipendenza dall'energia per p-p e pbar-p fino a $\sqrt{s} = 540$ GeV del rapporto σ_{el}/σ_{tot} tra la sezione d'urto totale elastica e la sezione d'urto totale, e del rapporto σ_{tot}/B , dove B è la "slope" della sezione d'urto differenziale elastica in avanti. Nell'articolo si sottolineava come la crescita con l'energia di questi due parametri fosse cruciale nel discriminare tra i vari modelli che descrivono l'andamento asintotico delle interazioni adroniche. La crescita con l'energia di questi rapporti indica che al crescere dell'energia non solo aumenta la dimensione degli adroni ma aumenta anche la loro opacità pur rimanendo ancora molto lontana dal limite del "black disc" in cui $\sigma_{el}/$

σ_{tot} tende al valore di $1/2$. Queste problematiche sull'andamento asintotico degli adroni stanno di nuovo diventando di grande interesse con LHC dove è possibile fare misure di precisione fino a energie di 13 TeV.

6. L'esperimento SLD al "Linear Collider" SLC di SLAC a Stanford (1984-1992)

Verso metà del 1984 terminavo il mio secondo ed ultimo mandato di coordinatore della Sezione INFN di Pisa nella Prima Commissione Scientifica Nazionale (Gruppo I). Avendo svolto questo incarico per sei anni conoscevo molto bene tutti i programmi di ricerca dell'INFN e ritenevo di aver raggiunto la necessaria esperienza per diventare responsabile di un piccolo gruppo di giovani fisici di Pisa; ed è quello che feci.

In quel periodo a Pisa si erano formati due importanti gruppi che avevano un ruolo rilevante in due grandi esperimenti; l'uno in CDF al Tevatron in America e l'altro in ALEPH al LEP del CERN.

Penso che avrei potuto trovare facilmente il mio spazio per fare della buona ricerca partecipando ad uno dei due esperimenti; ma quei gruppi avevano già molte competenze e non avevano quindi bisogno del mio contributo. Riuscii pertanto a convincere uno sparuto numero di giovani fisici con cui avevo lavorato in UA4 (Roberto Dell'Orso, Cristina Vannini e Pier Giorgio Verdini, a cui si aggiunsero successivamente i laureandi Fabio Beconcini e Massimo Carpinelli) a tentare un'avventura nel lontano "Far West" americano, al prestigioso laboratorio di SLAC in California.

Si stava formando una collaborazione italiana di piccoli gruppi delle sezioni INFN di Bologna, Ferrara, Frascati, Padova e Perugia a cui ci aggiungemmo anche noi di Pisa. Con questa collaborazione italiana, insieme ad una ventina di altri gruppi prevalentemente americani, proponemmo di costruire SLD (SLC Large Detector), un esperimento [35] "general purpose" da installare a SLC ("SLAC Linear Collider").

Nel maggio 1984 l'esperimento SLD fu approvato con l'intento di installarlo su SLC nel 1989, in contemporanea con la partenza del LEP.

L'apparato SLD era ottimizzato per studiare la fisica alla risonanza dello Z^0 e quindi era stato progettato per identificare e ricostruire con alta precisione le particelle prodotte nell'interazione su quasi tutto l'angolo solido in un intervallo d'impulsi da poche centinaia di MeV/c fino a quasi 50 GeV/c. L'apparato era costituito da differenti rivelatori assemblati in strati concentrici, tipo matryoska. La struttura dell'apparato è mostrata in figura 23 con lo schema di un quadrante perpendicolare all'asse dei fasci e in figura 24 con un disegno isometrico.

Le tracce delle particelle cariche prodotte nell'interazione e^+e^- venivano ricostruite dal rivelatore di vertice a "pixel" CCD seguito da una grande camera a drift di precisione. Subito dopo, il "Cherenkov Ring Imaging

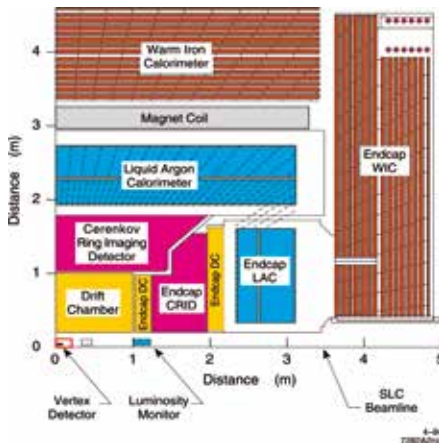


Figura 23. Schema di un quadrante perpendicolare all'asse dei fasci del rivelatore SLD.

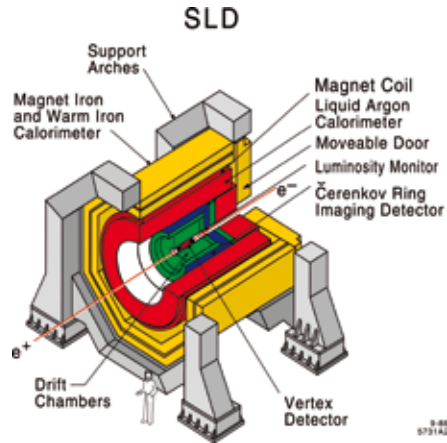


Figura 24. Disegno isometrico del rivelatore SLD.

Detector” (CRID) identificava il tipo di adroni carichi (π , k e p) mentre il “Liquid Argon Calorimeter” (LAC), oltre all’identificazione degli elettroni, forniva la calorimetria sia elettromagnetica che adronica. Questi rivelatori erano all’interno di un grande solenoide con un campo magnetico di 0.6 Tesla. Fuori dalle spire del solenoide, lo “Warm Iron Calorimeter” (WIC) [36] completava la calorimetria e forniva l’identificazione dei μ .

Il rivelatore WIC era ottenuto segmentando la struttura del ferro di ritorno del magnete in 14 piani di ferro di 5 cm ciascuno all’interno dei quali venivano inseriti piani di camere di tubi a “streamer” limitati (i famosi “Iarocci tubes”) per una superficie complessiva di ben 4500 m².

Molti gruppi dell’INFN proponevano di usare questo tipo di rivelatori in diversi esperimenti, per cui, presso il Laboratorio Nazionale di Frascati dell’INFN, era stata messa a punto una macchinetta per grafitare i tubi di plastica per renderli idonei per la costruzione di queste camere. Era quindi naturale che la costruzione [35], [36], [37] del WIC venisse affidata agli italiani, in collaborazione con un gruppo del MIT e con l’aiuto di alcuni fisici di SLAC e del Wisconsin.

Il gruppo di Pisa era molto piccolo sia come numero di fisici che di tecnici e non disponeva quindi di manpower sufficiente per dedicarsi a grosse costruzioni. Per questo ci assumemmo la responsabilità dello sviluppo e dei test dell’elettronica [38] di “front-end” dei tubi e del modulo fastbus di “readout” [39], oltre naturalmente a dare un qualche aiuto al grafitaggio dei tubi a Frascati.

L’INFN per soddisfare le esigenze dei molti suoi gruppi che intendevano costruire questo tipo di camere, affidò alla SGS-Microelectronica l’incarico di sviluppare un chip “custom” CMOS per il front-end di questi

tubi: il D779. Sottoponemmo questo chip a molti test sia in laboratorio che sul fascio e ritenemmo che per raggiungere con sicurezza la piena efficienza di questi rivelatori col gas che volevamo utilizzare era necessario aggiungere [40] uno stadio di preamplificazione di almeno un fattore 10 anche con le camere in regime di “streamer” limitato. Era poi necessario aggiungere un ulteriore stadio di amplificazione di un altro fattore 5 se volevamo raggiungere la piena efficienza [41] anche con le camere in regime proporzionale.

Svilupparammo pertanto un ibrido con una preamplificazione di un fattore 50 prima del D779 e questo ci evitò i problemi che avremmo sicuramente avuto se avessimo usato il solo D779. Infatti molte di queste schede di front-end, una volta installate in SLD, non erano più raggiungibili dall'esterno e quindi non avremmo potuto sostituirle in caso di necessità.

Durante i cinque anni della costruzione di SLD, quale responsabile dell'elettronica di “readout” dei tubi, dovetti, per molto tempo, e circa una volta al mese, recarmi a SLAC per presentare lo “status report” sull'andamento dei lavori e per partecipare alle riunioni di collaborazione. Purtroppo all'epoca le videoconferenze non esistevano ancora, con la spiacevole conseguenza di doverci andare di persona. Il viaggio da Pisa a SLAC mi causava un fastidioso “jet lag” per una settimana, giusto il tempo per recuperare e tornare di nuovo a Pisa con un nuovo “jet lag” per un'altra settimana; e poco dopo dovevo iniziare un nuovo ciclo di viaggi Pisa-SLAC-Pisa. Insomma per tutto quel lungo periodo rimasi quasi permanentemente sotto “jet lag”.

Comunque non tutto fu difficile e faticoso; ci furono anche momenti molto belli che solo il clima e l'oceano della California potevano dare.

Eravamo io e mia moglie Cristina a SLAC con Ugo Cazzola, Luigi Corucci e Pino Fausto durante il periodo dell'installazione delle camere, quando venni a sapere che nel fine settimana alcuni dipendenti del Laboratorio stavano organizzando una battuta di pesca a bolentino nell'oceano. Chiesi se potevamo partecipare anche noi e naturalmente ci accettarono ben volentieri. Da bravi americani avevano noleggiato un battello molto grande e comodo, attrezzato di tutto punto del necessario per la pesca a bolentino: canne, esche, giubbetto salvagente ecc., bastava recarsi il sabato mattina presto ad Half Moon Bay, imbarcarsi e pescare. La quota per partecipare era di 50 dollari a testa, ma dato che la battuta era già stata organizzata e quindi le spese della barca già completamente pagate, i 200 dollari della nostra quota (Ugo decise di non venire) furono utilizzati per mettere in palio due premi: 100 dollari a chi prendeva il pesce più grosso e 100 dollari a chi prendeva la maggior quantità (in peso) di pesce. Dopo un breve periodo di adattamento e sotto lo sguardo un po' divertito degli americani dato che Pino ed io annodammo subito le lenze tra noi, incominciammo a prendere una quantità inimmaginabile

di pesce, dei bellissimi pesci di fondale simili a dei grossi scorfani. Alla fine della giornata Luigi aveva preso la maggior quantità di pesce ed io il pesce più grosso, per cui riavemmo indietro tutti i soldi della nostra quota! Con tutti quei pesci che avevamo pescato Ugo, Luigi e Pino ebbero di che mangiare pesce per tutto il mese seguente durante il quale restarono a SLAC per l'istallazione delle camere.

L'esperimento SLD era stato approvato [35] dallo "Experimental Policy Advisory Committee" di SLAC nel maggio 1984, e cinque anni dopo, prima della fine del 1989, Il rivelatore "Warm Iron Calorimeter" (WIC), era completamente installato [42] e tutte le camere provate con tutta la catena dell'elettronica di lettura finale [43]. SLD avrebbe quindi potuto iniziare a prendere dati in contemporanea con LEP come previsto, ma purtroppo SLC era in ritardo.

In figura 25 è mostrata la fotografia di gran parte dei componenti la Collaborazione SLD dislocati tutto intorno al rivelatore ormai completamente assemblato, in attesa di andare sul fascio.

SLC era un "Collider" e^+e^- di concezione molto particolare, come già fa capire il nome di "linear collider". Due "bunches", uno di e^+ ed uno di e^- , distanti 60 nanosecondi uno dall'altro, venivano accelerati insieme dall'acceleratore lineare di SLAC ad un'energia di 46.6 GeV. I due "bunches" venivano poi separati e trasportati a collidere tramite due archi magnetici nel "final focus", al centro del rivelatore. Una caratteristica molto importante ai fini della fisica era che il fascio di e^- sarebbe potuto essere polarizzato longitudinalmente con un alto parametro di polarizzazione. Per i dettagli della complessa sequenza di operazioni a cui dovevano essere sottoposti i fasci per produrli, raffreddarli, accelerarli e farli collidere con queste caratteristiche si rimanda agli articoli [44] disponibili in letteratura.

Il "Linear Collider" era stato proposto [45] nel 1980 e poco dopo, nel 1983, era iniziata la costruzione. Si prevedeva [35] che potesse funzionare già alla fine del 1986 o inizio 1987. Per tale data SLD, approvato nel 1984, non poteva essere completato. Per questo motivo fu previsto che per i primi due anni di funzionamento il vecchio apparato Mark II, opportunamente migliorato, sarebbe stato installato su SLC, in attesa di sostituirlo nel 1989 con SLD, in contemporanea con la partenza degli esperimenti di LEP.

Purtroppo SLC fu completato solo nel 1989 e fu quindi Mark II, che era già da tempo installato sul punto di interazione, a vedere i primi Z^0 e a farne le prime misure di massa e larghezza in contemporanea con gli esperimenti di LEP. Tuttavia fu subito anche chiaro che non si riusciva ad ottenere un "final focus" sufficientemente piccolo da ottenere una luminosità sufficiente per poter competere con LEP. Per di più il fascio e^- non veniva ancora polarizzato, facendo venire a mancare una delle caratteristiche più importanti di questo "Collider". Fu deciso di lasciare Mark II a prendere dati per altri due anni e sostituirlo con SLD solo nel 1991,



Figura 25. Fotografia di gran parte dei componenti la Collaborazione SLD dislocati tutto intorno al rivelatore completamente assemblato.

nella speranza che nel frattempo si riuscisse ad ottenere le prestazioni di progetto previste per SLC.

Nel frattempo LEP stava producendo centinaia di migliaia di Z^0 e i quattro esperimenti stavano producendo molta bella fisica.

Dovetti quindi prendere una decisione molto difficile. I giovani del mio piccolo gruppo avevano ben lavorato nei cinque anni di costruzione di SLD ed erano stati molto apprezzati dalla Collaborazione, ma ora si trovavano a non produrre articoli di fisica mentre i loro colleghi che avevano lavorato negli esperimenti LEP producevano molte e interessanti pubblicazioni. Questo avrebbe messo i miei giovani collaboratori in grosse difficoltà nei concorsi INFN e universitari, con il rischio che alla fine fossero costretti ad abbandonare la ricerca per mancanza di pubblicazioni.

Decisi allora di parlare con Lorenzo Foà, uno dei padri fondatori di Aleph. Con la cenere sulla testa, gli chiesi se ritenesse impensabile che i giovani del mio piccolo gruppo fossero accettati ora, con cinque anni di ritardo, nel suo gruppo pisano. Io, che li avevo convinti a seguirmi nell'avventura americana, mi sentivo responsabile del loro incerto futuro e quindi chiedevo a Lorenzo di accettare solo loro nel gruppo Aleph; io invece, che avevo meno incertezze di futuro e che anzi stavo per diventare professore ordinario, non chiedevo di entrare in Aleph. Sarei rimasto nell'esperimento americano nella speranza che, prima o poi, il grande lavoro che avevamo fatto nel costruire un bellissimo e potente apparato come SLD, fosse ripagato con qualche buona misura di fisica, magari migliorando la precisione di qualcuna di quelle che i quattro esperimenti di LEP avevano già fatto.

Lorenzo capì molto bene il problema e mi portò a parlare con lo "spokesperson di Aleph", che in quel momento era Jacques Lefrançois. La discussione non partì bene perché fui subito rimproverato per aver contribuito ad un esperimento come SLD che aveva creato serie preoccupazioni agli esperimenti di LEP. Se SLC avesse funzionato come da progetto e soprattutto nei tempi previsti, l'enorme investimento che il CERN e l'Europa avevano fatto nel LEP avrebbe potuto avere dei grossi problemi a livello politico. Io ribattei nel modo più amichevole possibile che sì, capivo il problema, ma che la Collaborazione SLD sarebbe stata comunque sufficientemente forte da poter fare a meno del contributo del nostro piccolo gruppo. Fortunatamente la discussione, dopo un minimo di tensione che fu subito smorzata dalla grande capacità diplomatica di Lorenzo, prese la giusta direzione e Lefrançois accettò di buon grado che Carpinelli, Dell'Orso, Vannini e Verdini entrassero a far parte del gruppo Aleph di Pisa. Il piccolo gruppo SLD di Pisa che con tanta fatica avevo fatto nascere veniva riassorbito in un gruppo molto più grande: ma ero contento così!

Sia io che i giovani del gruppo ci eravamo fatti delle buone ossa a lavorare con gruppi americani, che sono sempre molto competitivi. Tutto andò quindi per il meglio: il mio piccolo ex-gruppo non ebbe problemi ad inserirsi nel nuovo esperimento, ed io riuscii a mantenere in vita il gruppo SLD a Pisa per tutto il tempo che SLD prese dati, cioè fino al 1998.

Questa mia decisione fu molto saggia: infatti SLD, anche dopo l'installazione su SLC, nel 1991 ebbe solo un piccolo "engineering run" con soli 300 Z^0 , per di più non ancora polarizzati; assolutamente niente rispetto a quello che stava facendo LEP!

Non fu infatti facile neppure produrre fasci polarizzati in SLC e solo alla fine del 1992, SLD aveva potuto acquisire 11000 Z^0 con una polarizzazione media di solo il 22%. Questo cattivo funzionamento di SLC fu dovuto non solo alla obbiettiva complessità di un "collider" lineare, ma anche, e soprat-

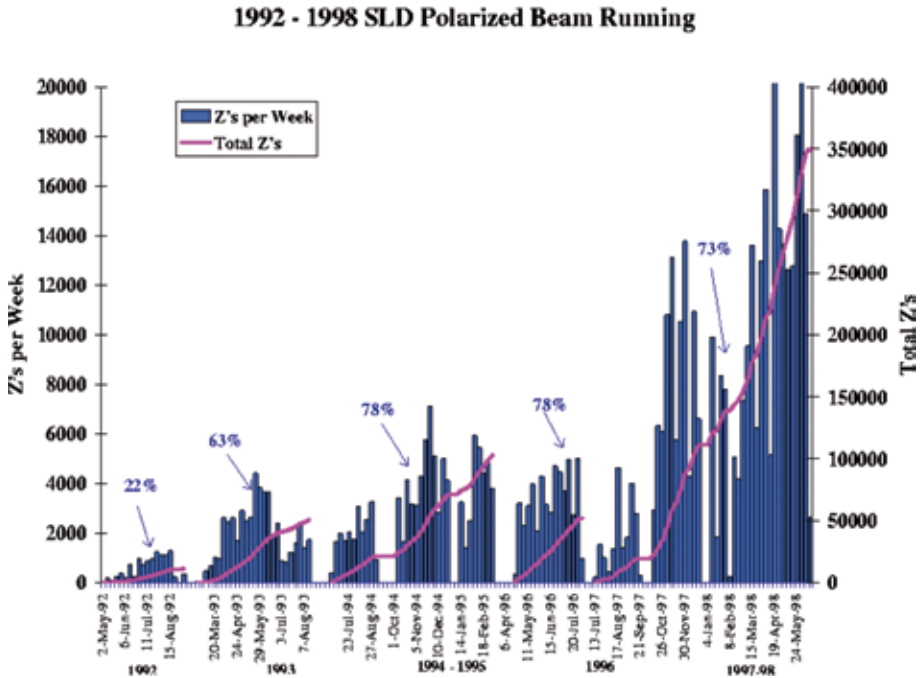


Figura 26. Andamento della luminosità e del parametro di polarizzazione (numeri in rosso) di SLC negli anni dal 1992 al 1998.

tutto, al fatto che l'acceleratore di SLAC funzionava ormai da troppi anni e tutti i controlli con la relativa elettronica sarebbero dovuti essere rinnovati.

Tuttavia negli anni, anche se solo lentamente, la luminosità e la percentuale di polarizzazione dei fasci di elettroni aumentarono in modo significativo come si può vedere dalla figura 26, dove è mostrato il loro andamento dal 1992 al 1998.

Nonostante che SLC abbia prodotto durante tutto il suo periodo di funzionamento poco più di $\sim 500.000 Z^0$, molto meno rispetto agli svariati milioni di LEP, SLD ha potuto fare molte misure [46] dei parametri dello Standard Model con una precisione paragonabile, e talvolta superiore, a quella dei quattro esperimenti LEP. In particolare grazie alla polarizzazione longitudinale del fascio di elettroni fu possibile misurare il parametro $\sin^2\theta_w$ con una precisione maggiore delle misure di LEP, come si può vedere in figura 27.

All'inizio degli anni '90 con infinito dispiacere avevo dunque dovuto rinunciare al mio piccolo gruppo con cui ero partito per l'avventura in California, ma a consuntivo questa esperienza era stata molto formativa sia per me che per i giovani del mio ex gruppo. Inoltre anche se con troppo ritardo a causa del mal funzionamento di SLC, avevamo comunque contribuito a produrre della buona fisica con SLD.

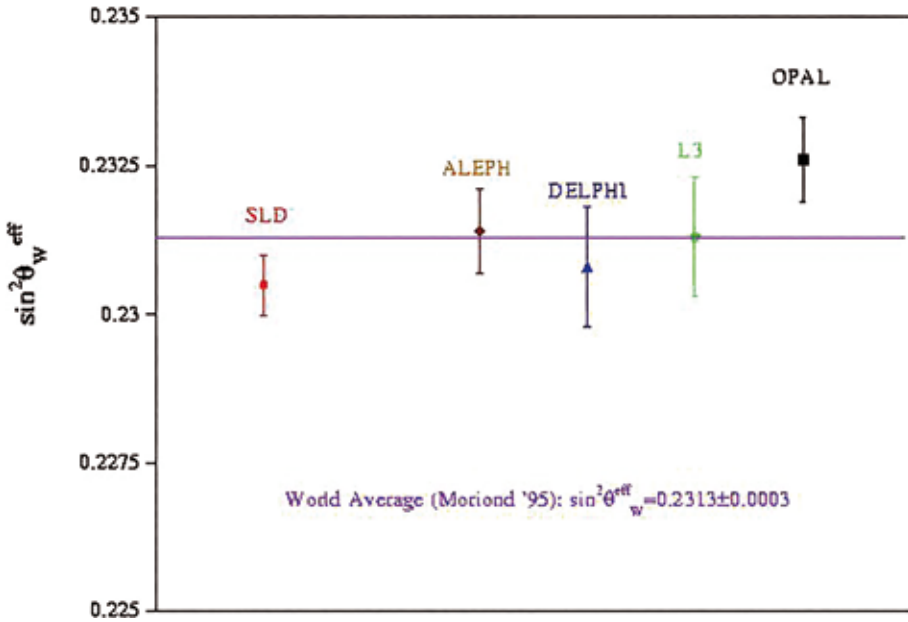


Figura 27. Confronto del valore di $\sin^2 \theta_w^{\text{eff}}$ misurato da SLD con i valori misurati dai quattro esperimenti LEP.

Nel frattempo io ero stato eletto Direttore della Sezione INFN di Pisa e si cominciava a parlare di possibili esperimenti al “Large Hadron Collider” del CERN, ma queste sono avventure più recenti con molte altre storie...

Bibliografia

- [1] Bemporad C., Braccini P.L., Foà L., Luebelsmeyer K., Schmitz D., *Experimental Determination of the eta Lifetime by the Measurement of the Primakoff Effect*. Phys. Letters 25B 380, 1967.
- [2] Braccini P.L., Bradaschia C., Castaldi R., Foà L., Luebelsmeyer K., Schmitz D., *Photoproduction of ω -mesons from nuclei*. Nuclear Physics B24, 173, 1970.
- [3] Braccini P.L., Castaldi R., Foà L., Luebelsmeyer K., Schmitz D., *An upper limit for the branching ratio $\Gamma(\Phi \rightarrow \pi^0 \gamma) / \Gamma(\Phi \rightarrow \text{all})$* . Phys. Letters 29B 383, 1969.
- [4] CERN Council, *Draft resolution relating to the ISR project*. CERN/600/draft, 1965.

Johnsen K., *CERN Intersecting Storage Rings (ISR)*. Proc. Nat. Acad. Sci. Vol. 70, 619, 1973.

- [5] Bellettini G. *et al.*, *Measurement of the p-p total cross section*. CERN/ISRC/69-12, 1969.
- [6] Van der Meer S., CERN internal report /ISR-PO/68-31, 1968.
- [7] Amaldi U. *et al.*, *Measurement of the proton-proton differential cross-section in the angular region of Coulomb scattering at the ISR*. CERN/ISRC/69-20, 1969.
- [8] Darriulat P. *et al.*, *Measurement of the elastic scattering cross section at the ISR*. CERN/ISRC/69-19, 1969.
- [9] Amendolia S.R. *et al.*, (Pisa-Stony Brook Collaboration), *Measurement of the total proton-proton cross section at the ISR*. Phys. Letters 44B 119, 1973.
- [10] Amaldi U. *et al.* (CERN-Roma Collaboration), *The energy dependence of the proton-proton total cross section for center-of-mass energies between 23 and 53 GeV*. Phys. Letters 44B 112, 1973.
- [11] Amaldi U. *et al.* (CERN-Pisa-Roma-Stony Brook Collaboration), *New measurements of proton-proton total cross section at the CERN Intersecting Storage Rings*. Phys. Letters 62B 460, 1976.
- [12] Diambriini-Palazzi G. *et al.* (Genova-Harvard-MIT Collaboration), *Proposal to study electromagnetic properties of protons in the time-like region and to search for the neutral boson Z^0* . CERN/ISRC 73-28, 1973.
- [13] Becker U.J. *et al.* (MIT), *A proposal to search for the neutral heavy boson Z^0* . CERN/ISRC 73-9, 1973.
- [14] Della Negra M. *et al.* (College de France-Harvard-MIT Collaboration), *Addendum to the proposal to search for the neutral heavy boson Z^0* . CERN/ISRC 73-9, Add. 2, 1973.
- [15] Diambriini-Palazzi G. *et al.* (Genova-Harvard-MIT-Pisa Collaboration), *Proposal for an extension of the μ -pair experiment to include correlation with the associated hadrons*. CERN/ISRC 73-28, Add. 1, 1973.
- [16] Krige J. *History of CERN, III*, North Holland, Elsevier Science, 151, 1996.
- [17] Antreasyan D. *et al.* (CERN-MIT-LAPP-Harvard-Napoli-Pisa Collaboration), *Measurement of dimuon production at $s^{1/2} = 62$ GeV*. Phys. Rev. Letters 45, 863, 1980.
- [18] Bechini A. *et al.* (R209 Pisa Group), *A modular Drift-chamber vertex detector at the CERN ISR*. Nucl. Instrum. Methods 156, 181, 1978.
- [19] Antreasyan D. *et al.* (CERN-MIT-LAPP-Harvard-Napoli-Pisa Collaboration), *Dimuon spectra from 62 GeV proton collisions*. Proceedings of Int. Conf. on High-Energy Physics, vol. 2 Session V, CERN Geneva, 1979.
- [20] Antreasyan D. *et al.* (CERN-MIT-LAPP-Harvard-Napoli-Pisa Collaboration), *Associated hadronic production in muon-pair events at the CERN Intersecting Storage Rings*. Nucl. Phys B199, 365, 1982.

- [21] Van der Meer S., *Stochastic Cooling of Betatron Oscillations in the ISR*. CERN/ISR-P0/72-31, 1972.
- [22] Astbury A. *et al.* (UA1 Collaboration), *Proposal: A 4π solid-angle detector for the SPS used as a proton-antiproton collider at a centre-of-mass energy of 540 GeV*. CERN/SPSC 78-06, 1978.
- [23] Banner M. *et al.* (UA2 Collaboration), *Proposal to study antiproton-proton interactions at 540 GEV CM energy*. CERN/SPSC/78-8, 1978.
- [24] Battiston R. *et al.* (UA4 Collaboration), *Proposal: Measurement of elastic scattering and of the total cross-section at the CERN antiproton-proton Collider*. CERN/SPSC/78-105, 1978.
- [25] Battiston R. *et al.* (UA4 Collaboration), *The “Roman Pot” spectrometer and the vertex detector of experiment UA4 at the CERN antiproton-proton Collider*. Nucl. Instrum. Methods A238, 35, 1985.
- [26] Battiston R. *et al.* (UA4 Collaboration) *First results of low momentum transfer elastic scattering at the CERN proton-antiproton Collider*. Phys. Letters 115B, 333, 1982.
- [27] Battiston R. *et al.* (UA4 Collaboration), *Measurement of proton-antiproton elastic and total cross-section at the centre of mass energy of 540 GeV*. Phys. Letters 117B, 126, 1982.
- [28] Bozzo M. *et al.* (UA4 Collaboration), *Low momentum transfer elastic scattering at the CERN proton-antiproton Collider*. Phys. Letters 147B, 385, 1984.
- [29] Bozzo M. *et al.* (UA4 Collaboration), *Measurement of proton-antiproton total and elastic cross sections at the CERN SPS Collider*. Phys. Letters 147B, 392, 1984.
- [30] Amaldi U. *et al.* (CERN-Rome Collaboration), *The real part of the forward proton proton scattering amplitude measured at the CERN intersecting storage rings*. Phys. Letters 66B, 390, 1977.
- [31] Battiston R. *et al.* (UA4 Collaboration) *Proton-antiproton elastic scattering at four-momentum transfer up to 0.5 GeV^2 at the CERN SPS Collider*. Phys. Letters 127B, 472, 1983.
- [32] Bozzo M. *et al.* (UA4 Collaboration), *Elastic scattering at the CERN SPS Collider up to a four-momentum transfer of 1.55 GeV^2* . Phys. Letters 155B, 197, 1985.
- [33] Bozzo M. *et al.* (UA4 Collaboration), *Single diffraction dissociation at the CERN SPS Collider*. Phys. Letters 136B, 217, 1984.
- [34] Castaldi R., Sanguinetti G., *Elastic scattering and total cross section at very high energies*. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 35, 351, 1985.
- [35] SLD Collaboration, *SLD Design Report*. SLAC-Report-273, 1984. Breidenbach M., *Overview of the SLD*. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-33, 46, 1986.

- [36] Benvenuti A.C. *et al.* (Bologna-Ferrara-Frascati-MIT-Padova-Perugia-Pisa-SLAC-Wisconsin Collaboration), *The Iron Calorimeter and Muon Identifier for SLD*. SLAC-PUB-4677, 1988 published in Nucl.Instrum.Meth. A276, 94, 1989.
- [37] Benvenuti A.C. *et al.* (Bologna-Ferrara-Frascati-MIT-Padova-Perugia-Pisa-SLAC-Wisconsin Collaboration), *A Non-Flammable Gas Mixture for Plastic Limited Streamer Tubes*. SLAC-PUB-4687, 1988 published in Nucl.Instrum.Meth. A284, 339, 1989.
- [38] Beconcini F., Bilei G.M., Castaldi R., Cazzola U., Dell'Orso R., Verdini P.G., *Test of the SGS D779 based readout electronics for the SLD limited streamer tube strips*. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-35, 311, 1988.
- [39] Bilei G.M., R. Castaldi., *A Fastbus Digital Readout Module for Streamer Tubes*. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-35, 282, 1988.
- [40] Beconcini F. *et al.*, *Status and Results of the SGS Strip Readout Electronics Testing*. SLD-New Detector Note 154, and INFN/TC-86/17, 1986.
- [41] Beconcini F., Bilei G.M., Castaldi R., Cazzola U., Dell'Orso R., Verdini P.G., *The front-end electronics and the Fastbus readout module for the SLD limited streamer tubes*. Nucl.Instrum.Meth. A277, 222, 1989.
- [42] Benvenuti A.C. *et al.* (Bologna-Ferrara-Frascati-MIT-Padova-Perugia-Pisa-SLAC-Wisconsin Collaboration) *The limited streamer tubes of the SLD*. SLAC-PUB-4993, 1989 published in Nucl.Instrum.Meth. A290, 353, 1990.
- [43] Benvenuti *et al.*, *A status report on the SLD data acquisition System*. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-36, 23, 1989.
- [44] Seeman J.T., *The Stanford Linear Collider*. SLAC-PUB-5607, 1991. Breidenbach M., *SLC and SLD-experimental experience with a Linear Collider*. SLAC-PUB-6313, 1993.
- [45] Stanford Linear Accelerator Center, *SLAC Linear Collider Conceptual Design Report*. SLAC-Report-229, 1980.
- [46] The ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, SLD Collaborations, *Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance*. Physics Reports 427 257, 2006.

Some Virgo History by Adalberto Giazotto

Diego Passuello*, Francesco Fidecaro**

1. Foreword

This contribution should have been given by Adalberto Giazotto (figure 1) himself, as nobody better than him could have told the early days and battles toward the Virgo project. We thought that the best tribute would be to refer to the slides he used when the first gravitational wave event was publicly announced in Pisa [1] in March 2016. Adalberto Giazotto passed away in November 2017, a few days after this meeting on Physics and physicists in Pisa.

The slides were shown and commented by one of us, D.P., who also gave fundamental contributions to the Virgo ideas since the first days. The text of the slides, edited and complemented with additional transcriptions from the presentation he gave in 2016, form the contribution to this volume. We now let Adalberto Giazotto speak.

2. Introduction

This contribution will not be about the gravitational wave events just recorded this summer but following a desire from many Virgo members, about the origin of this machine, how it had been possible to get the site in Cascina and which had been the motivations that led INFN and CNRS financing the construction of Virgo.

3. The search of the Virgo site

I think that not many people know the history connected with the search of the Virgo site. Even this part of Virgo history has had many exciting and adventurous episodes. We started talking to INFN about the necessity of having a large site of 3 by 3 or 4 by 4 km. The first direction in which I was pushed, if I remember well, had been a search of Virgo site on the sand dunes (Barene) in the region between Padova and Venice. There, large areas were available and

* INFN sezione di Pisa.

** Università degli Studi di Pisa e INFN sezione di Pisa.



Figure 1. Adalberto Giazotto and, behind, the North arm of the Virgo interferometer in Cascina.

could have been interesting from the point of view of noise, without trees and little human activity. When first drillings were made it turned out that underground water would have been a big problem: Virgo 3+3 km tubes and other infrastructures would have slowly sunk into the ground and, God willing, the perspective of having Virgo lost in that area vanished. This attempt lasted several months and required many trips to the INFN laboratory of Legnaro.

We began considering another possibility. Our eyes were caught by the San Rossore Park nearby Pisa. I wrote several letters to the Italian Republic Pres-

idential Office to ask space in their properties: the Presidential Park of S. Rossore.

My idea was to ask the use of fire-cutting roads to position the two 3 km long Virgo arms. As one could imagine the answer was never negative and always interlocutory; I was pointing on this direction because my hope was to obtain an acceptable counterproposition. What happened is that the University of Pisa was asked to create a botanist committee, whose chairman was Prof. Fabio Garbari, for the evaluation of the environmental impact of Virgo on the S. Rossore Park.

Obviously the response from the Committee was very negative and the hopes to build Virgo in a site nearby Pisa were slimming out.

But sometimes devil is not so black: at the conclusive University meeting was present the Mayor of Cascina, Franco Viegì. After Garbari's negative report, Viegì promptly raised his hand and, with great spirit of venture, declared that Cascina would be extremely happy to host Virgo in his territory. Franco Viegì is hardly remembered but his courageous decision had been essential for Virgo.

4. Some history about the Virgo birth and Mirror suspensions

Now I will go through the second point I would like to somewhat clarify, in particular for the young people that may not know the scientific origin of Virgo. In the 80's cryogenic bar detectors were the main interpreters of

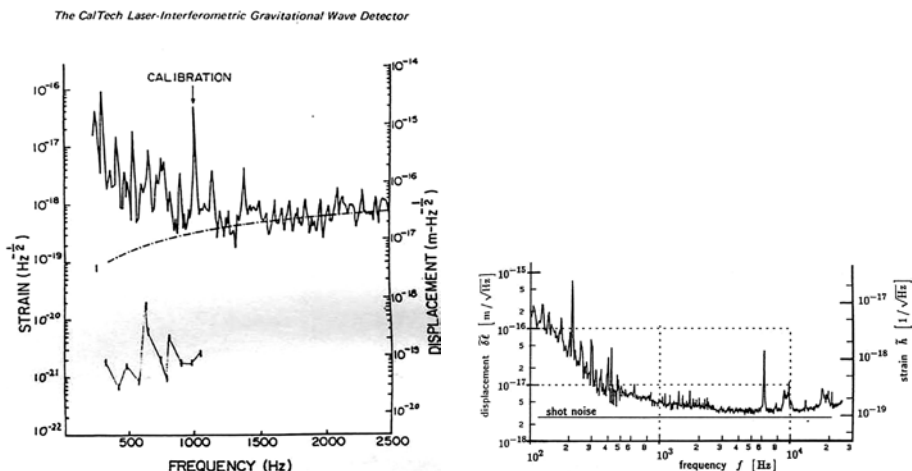


Figure 2. Sensitivity curves for the Caltech 40 m (left) and the Garching 30 m (right).

gravitational wave (GW) physics. These were typically cylinders cooled at liquid Helium temperature. Italy was operating several of them: one was called Nautilus and the other one Auriga, located at the INFN Laboratory of Frascati and INFN Laboratory of Legnaro respectively. At INFN there were pressures, seen the lack of reliable results with these detectors, to find new techniques for detecting GW.

From our viewpoint, this was extremely interesting and the idea immediately considered was to have a new extremely performant detector with a very strong Riemann force and bandwidth extending at low frequency. This was absolutely not obvious at that time as the two running detectors were the Caltech 40 m Fabry-Perot prototype [2], located in Pasadena, California, and the 30 m Delay Line [3] in Garching, near Munich, Germany. Their sensitivity curves are shown in figure 2: 10^{-16} - 10^{-17} m Hz^{-1/2} was what it could be achieved with that kind of machine.

It seemed to us that the more promising solution should have been a large interferometer.

At that time the Australian Radiotelescope in Marrabra, led by Dick Manchester, was giving very exciting results in the Pulsar detection. We realized that a relatively big number of pulsar could have gravitational wave frequency greater than 10 Hz. Figure 3 shows the original slide that I was using to promote that idea, where one sees that at the left of the vertical red line there are some dots, corresponding to a few pulsar above 10 Hz.

Nowadays there are many more pulsar above 10 Hz, including a whole family around 1 kHz, the millisecond pulsar, that are not very well understood.

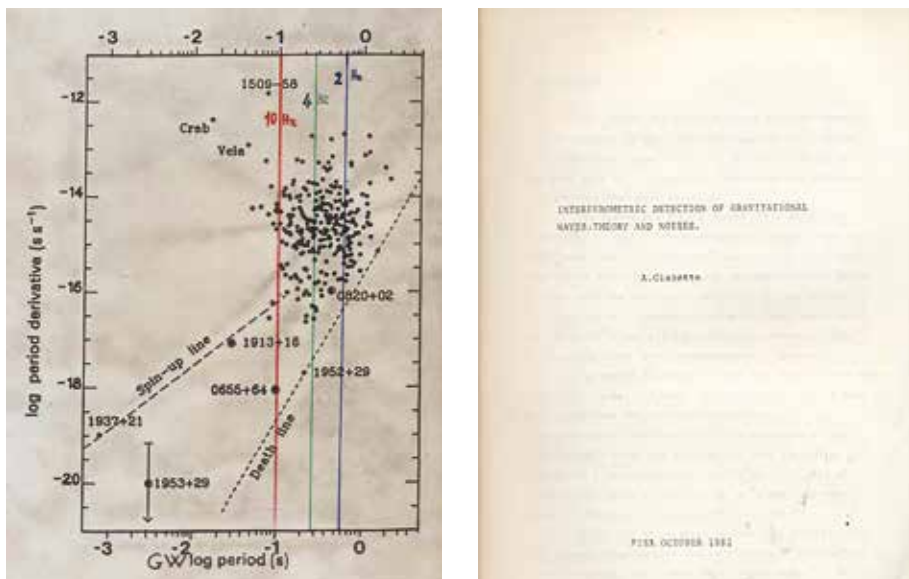


Figure 3. Left: The early distribution of pulsar showing rotation slow down, to be possibly attributed to gravitational wave emission, versus emission period. Right: the cover of the report about noise sources.

I had written a report [4] whose cover is shown in figure 3 in which I summarized all the noise evaluations intervening in a large interferometer going also to very low frequency. This report was very well accepted by the theory division of the Pisa Physics Institute. It helped us a lot. Being Pisa an INFN Section completely devoted to accelerator physics it was by no means obvious that it would build a machine like Virgo, let say that it would have been a rather big jump.

However quite often little things help trigger important events. Given that one wanted to go to low frequency, the problem was how to cut seismic noise by 12 orders of magnitude. Ron Drever in Caltech and Jim Hough in Glasgow were attempting to create the first inertial reference frames. This led us start an INFN funded experiment called IRAS (Interferometro per la Riduzione attiva del Sisma). Figure 4 shows a schematic drawing of the experiment, essentially a one arm interferometer, a suspended mass and a reference mass that could be rotated to correct for tilt. With this setup we were able to show that there was the possibility to kill seismic noise at low frequency as can be seen from the displacement spectra on the right.

Figure 5 shows the beginnings of Virgo, in that sort of “chiesina” (little church), and on the right a view of the experimental apparatus for active seism reduction.

This experiment was very important because it showed that this system would never work for our purposes.

As a coincidence, in June 1985 there was the 4th Marcel Grossmann meeting on General Relativity where I presented the IRAS results. It had been done by these three characters: Giazotto, Passuello and Lello Stefanini. There I and Alain Brillet from CNRS, who is my French partner, an optics super expert. We decided it would be our common interest to build an interferometer with Fabry-Perot cavities and extended bandwidth at low frequency; at those times it was not clear that the Fabry-Perot would be the winning move because delay lines were used in Munich. It became clear later that delay lines could never work because of the diffracted light from the hole in the mirror that would create an intolerable background. So Brillet and I decided to present the proposal to INFN and CNRS. This was the beginning of Virgo, but it was clear that experimental results were needed to support it.

5. The Superattenuator

5.1. The gas filter Superattenuator

IRAS had shown that attenuation in one degree of freedom was already very complex, and we understood that a single filter should attenuate in the six degrees of freedom of a rigid body. Forgetting all that had been done before, we started thinking in a completely new direction: passive filters having very low vertical and relatively low rotation resonance frequency. We started by conceiving a gas spring mechanical filter that would attenuate motion in both translation and rotation degrees of freedom and we built two chains of seven filters to be put under vacuum to see how much seismic noise would be attenuated.

This was quite a large device and in the meantime the Virgo chiesina had expanded to host the gas spring chains shown in Figure 6.

First results [5] are shown in figure 7 an attenuation of 10^8 - 10^9 for seismic noise at 10 Hz was obtained.

5.2. The magnetic antispring

But even if the working principle was correct, Gas Springs were too unstable under temperature variations. For this reason we designed a mechanical filter [6] satisfying the following requirements:

1. mechanical restoring force essentially insensitive to temperature variations;
2. no creep, that is no yielding of the structure over a long period;
3. high moment of inertia along the three rotation axes;

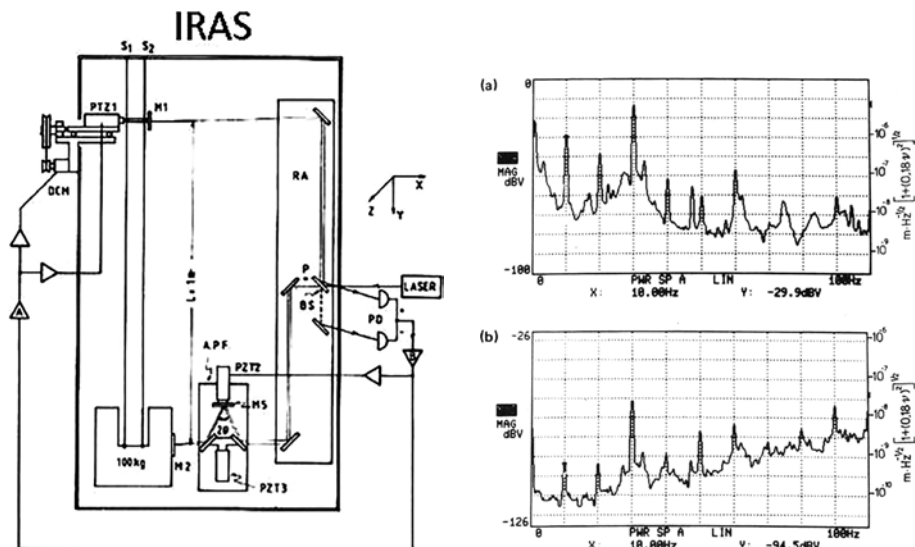


Figure 4. Left: layout of the IRAS experiment including the interferometric system. Right: open and closed loop frequency spectra in the band 0-100 Hz.

4. a very low vertical resonance frequency, achieving 100 mHz which was very difficult to obtain.

There came to help the idea of the tunable magnetic antispring [7], where the filter and the movable vertical part are equipped with magnets with opposite polarities generating repulsive forces (figure 8).

This allowed reducing the elastic constant of the original metal springs from 3000 N/m to 30 N/m, and indeed the Virgo filters can lower their vertical resonance frequency down to 0.15 Hz.

5.3. The inverted pendulum

The second step was to understand how to cascade these filters and we concluded that a huge object was needed: three long legs on flexible joints supporting a table to which the seven filter chain would be hooked. This is called the inverted pendulum [8] and is used to gently move the Virgo suspension point to maintain the interferometer within a tiny fraction of the dark fringe without reintroducing noise. This was a fundamental problem as optical properties of the interferometer could be spoiled by noise reintroduced.

With magnetic antisprings and the inverted pendulum everything was different and we were able to create an exceptional system that would have the outstanding characteristics we wanted. Figure 9 shows a per-



Figure 5. On the left the “chiesina” hosting IRAS and on the right the apparatus.

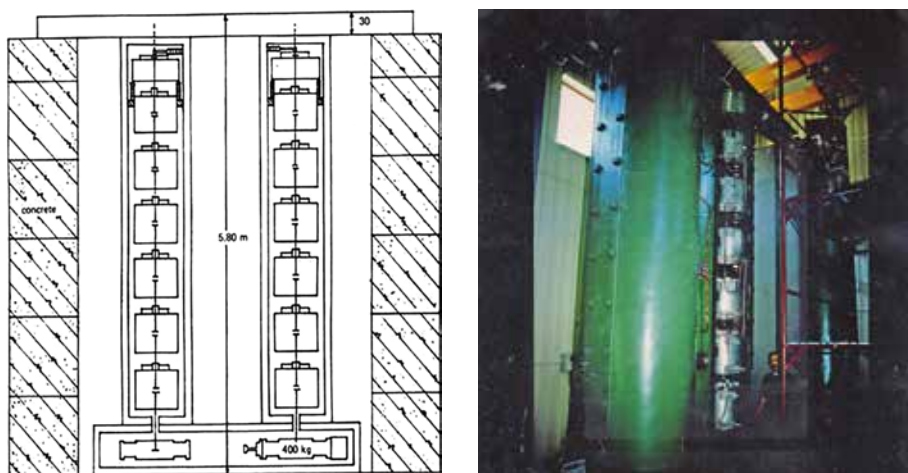


Figure 6. Layout of the two superattenuators on the left, one chain in the open vacuum chamber is visible.

spective drawing of the superattenuator that was built in San Piero a Grado, and then replicated for Virgo. The performance is shown in figure 11, this object attenuates at least 10^{15} times and seismic noise is confined below the other sources of noise in Virgo.

With these results we had overcome every problem with INFN and CNRS and we could create a proposal for a 3 km arm interferometer able to record gravitational wave signals down to 10 Hz.

6. The approval

One of the first progress reports described this beginning was presented at the Fifth Marcel Grossmann meeting in Australia in 1988, the cover is shown in figure 11.

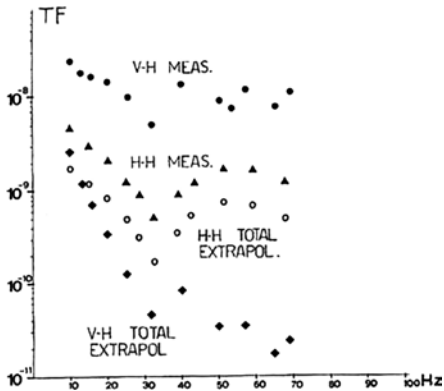


Figure 7. Transfer function from top to bottom of the superattenuator, for horizontal and vertical displacements.

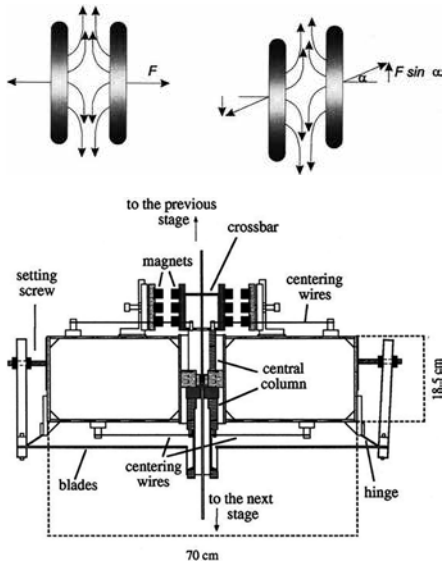


Figure 8. The seismic filter with magnetic antisprings. Top: magnetic antispring principle. Bottom: The drawing shows a section of a cylinder along its axis. The central black body is connected with the filter below and supported by blade springs. The filter body is connected to the filter above. Connection points are very close one to another to almost cancel the residual torque from the tension in the chain. Magnets introduce an instability that reduces the spring constant of the blades resulting in a lower vertical resonance frequency.

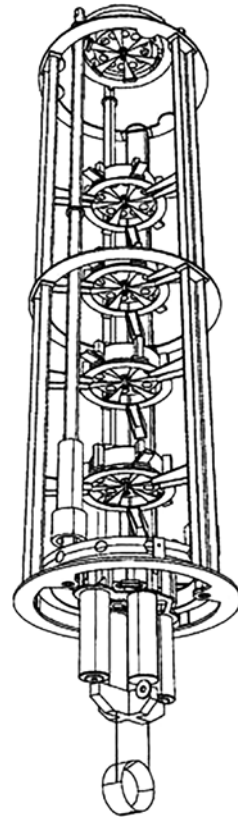


Figure 9. The Virgo Superattenuator. The bottom ring moves with the ground, then three cylindrical legs support the top table, which the filter chain is hooked to. At the bottom one sees the marionette that is used to steer the mirror.

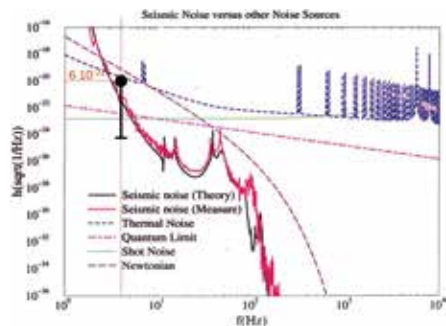


Figure 10. Noise spectra for various sources. Seismic noise is now lower than Newtonian and thermal noise.

Several years had to pass but eventually came the agreement signed by the President of INFN Luciano Maiani and the President of CNRS François Kourilski (figure 12), stating that Virgo was beginning.

Born in 1940 in Genoa, Adalberto Giazotto graduated in Rome with a thesis in Theoretical Physics, and then joined the experimental physics group at the electron synchrotron in Frascati led by Edoardo Amaldi. The group was studying p^+ production with an 800 MeV electron beam. With a few colleagues he then moved to Daresbury, in the United Kingdom, where the NINA electron synchrotron was providing 5 GeV beams, and allowed precision studies of the p^+ axial form factor. Subsequently, he participated at CERN in the FRAMM experiment at the Super Proton Synchrotron measuring the lifetime of charmed particles, and then the p^- and K^- space-like form factor, yielding precise values for their radius. He then approached General Relativity and gravitational waves, with extreme attention to the detection of low frequency signals.

On August 14th, 2017, the Virgo and LIGO interferometers could locate a binary black hole coalescence with unprecedented precision in the sky. Three days after, a new astronomy started with GW170817, the first detection of a binary neutron star coalescence, that could be observed at all optical wavelength by telescopes. Adalberto Giazotto could see how these were alerted by the gravitational wave signal of the interferometers recorded for tens of seconds at low frequency, and the astonishing amount of knowledge that came out of that event.

References

- [1] *Gravitational wave festival*, March 1st 2016, Pisa, <http://agenda.infn.it/event/GWFestival>. Video at <http://mediaeventi.unipi.it/category/video/Gravitational-Wave-Festival-Pisa-01-Marzo-2016/198a41ca-935a61bd13d0c37a0dda0c16/37> starting time 3:30 ending 26:04.



Figure 11. Results on seismic attenuation presented in 1988.

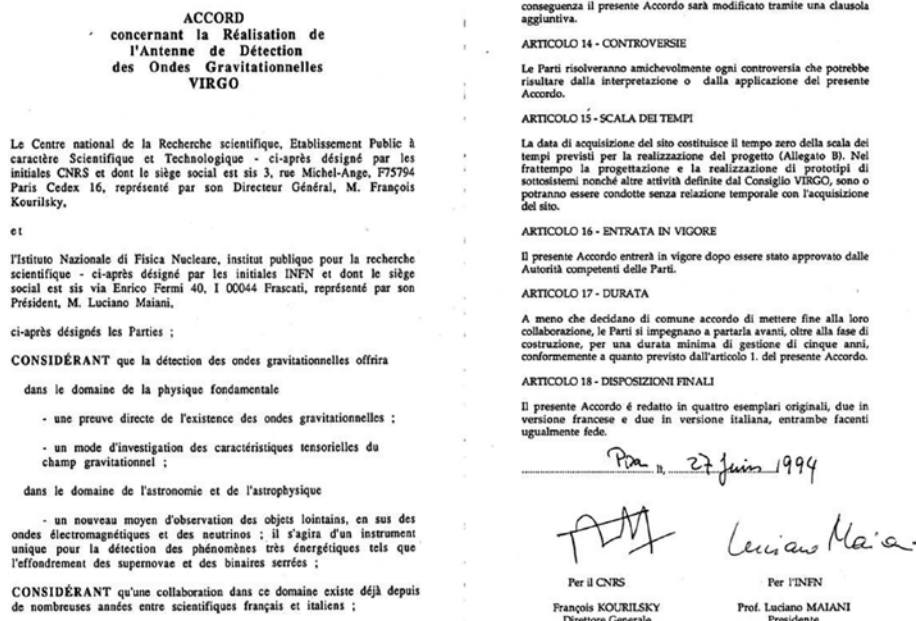


Figure 12. First and last page of the agreement between France and Italy for the Virgo construction.

- [2] R. Spero, *The Caltech laser-interferometric gravitational wave detector*, Proceedings of the Fourth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, Part A, 615, Noth-Holland, 1986.
- [3] D. Shoemaker *et al.*, *Noise behavior of the 30 m Garching prototype gravitational-wave detector*, Phys.Rev.D 38(1988)423.
- [4] A. Giazotto, *Interferometric detection of gravitational waves*, Physics Reports 182 (1989) 365.
- [5] R. Del Fabbro *et al.*, *Performance of a gas spring harmonic oscillator*, Rev.Sci.Instrum. 59(1988) 292; <https://doi.org/10.1063/1.1140243>.
- [6] S. Braccini *et al.*, *Seismic vibrations mechanical filters for the gravitational waves detector VIRGO*, Rev. Sci. Instrum. 67(1996) 2899; <https://doi.org/10.1063/1.1147069>.
- [7] S. Braccini *et al.*, *An improvement in the VIRGO Super Attenuator for interferometric detection of gravitational waves: The use of a magnetic antispring*, Rev. Sci. Instrum. 64 (1993) 310; <https://doi.org/10.1063/1.1144249>.
- [8] G. Losurdo *et al.*, *An inverted pendulum preisolator stage for the VIRGO suspension system*, Rev. Sci. Instrum. 70 (1999) 2507; <https://doi.org/10.1063/1.1149783>.

La nascita della Fisica Medica presso l'Istituto di Fisica dell'Università di Pisa

Alberto Del Guerra*

La Fisica Medica è iniziata all'Istituto di Fisica dell'Università di Pisa nei primi mesi del 1974, quando è sorta la necessità di preparare Esperti Qualificati di III grado per la Radioprotezione dalle radiazioni ionizzanti per i nuovi reattori nucleari che sarebbero stati installati in Italia secondo il cosiddetto "Piano Energetico Nazionale" (PEN, 1975). Con la collaborazione dell'ENEA, del CAMEN, del Laboratorio di Fisiologia Clinica del CNR, della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa e della Facoltà di Medicina dell'Università di Firenze, l'Istituto di Fisica di Pisa istituisce il primo "Corso di Cultura in Fisica Sanitaria", dedicato alla preparazione teorica e pratica di questi professionisti. Questa necessità scomparve rapidamente con la cancellazione del PEN, ma le attività formative di Fisica Medica nell'Istituto si svilupparono rapidamente con l'istituzione della prima "Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria" in Italia e, soprattutto, con la formazione di un gruppo di ricerca in fisica medica con le prime applicazioni nel campo del "*Medical Radiation Imaging*".

Questo contributo pertanto vuole anche ripercorrere le attività di ricerca in fisica medica nell'Istituto di Fisica di Pisa negli ultimi 25 anni del secolo scorso, dalle prime applicazioni in Medicina Nucleare, alla Radiologia Digitale con le "*Multiwire Proportional Chambers*" (MWPC) ed i rivelatori a stato solido, alle applicazioni di Tomografia ad Emissione di Positroni (PET) e all'*Image Processing* con l'utilizzo delle Intelligenze artificiali (AI).

1. La Fisica Medica nel XX secolo

La più recente definizione della disciplina della Fisica Medica è stata data dalla "*International Organisation of Medical Physics*" nel 2010: "*Medical Physics is a branch of Applied Physics, pursued by medical physicists, which uses physics principles, methods and techniques for the prevention,*

* Dipartimento di Fisica "E.Fermi" e INFN-Sezione di Pisa, Pisa, Italia.

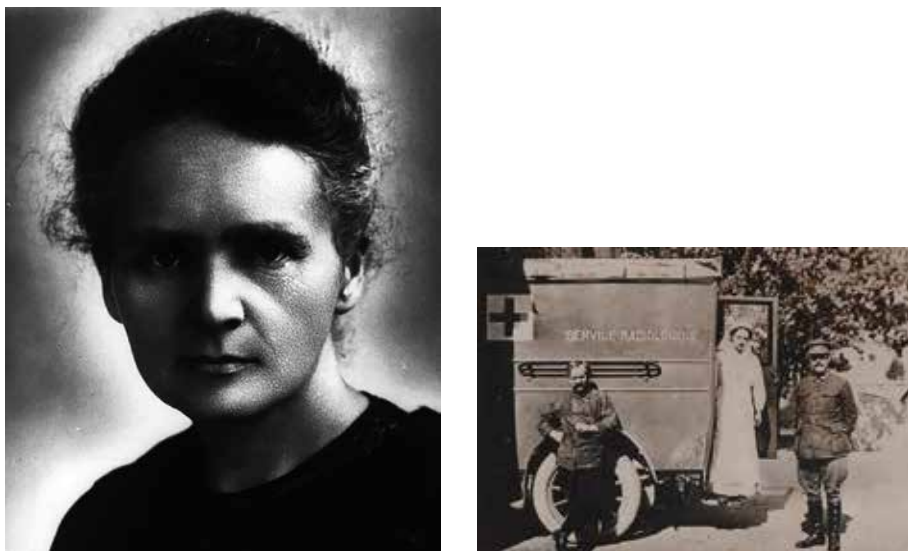


Figura 1. (A sinistra: Foto di Maria Skłodowska Curie. (A destra: Foto dei primi servizi radiologici mobili durante la prima guerra mondiale.

Tabella 1. Premi Nobel collegati alla Fisica delle Radiazioni nel secolo XX.

Premi Nobel in Fisica per ricerche in Fisica fondamentale

- Wilhelm Conrad Roentgen → X-rays (1901)
- A. Henry Becquerel, Maria Skłodowska Curie e Pierre Curie → Radioactivity (1903)
- Carl D. Anderson → Positron (1936)
- Ernest Orlando Lawrence → Cyclotron and artificial radioisotopes (1939)
- Felix Bloch e Edward Mills Purcell → NMR

Premi Nobel in Medicina per ricerche in Fisica Medica

- Allan M.Cormack e Godfrey N.Hounsfield → TAC (1979)
- Paul C. Lauterbur e Peter Mansfield → MRI (2003)

diagnosis and treatment of human diseases with the specific goal of improving human health and well-being”.

Da tale definizione è evidente che l'attività di ricerca in Fisica Medica non può essere fine a se stessa ma deve essere strettamente connessa con la prevenzione, la diagnosi e la cura della popolazione. A questo riguardo mi piace sottolineare come in concomitanza allo svolgimento di questo convegno “Fisica e Fisici a Pisa nel '900”, si celebrasse in tutto il mondo il giorno della Fisica Medica, il 9 Novembre 2018, in occasione della ricorrenza della nascita di Marie Skłodowska Curie (figura 1). Madame Curie è un esempio eclatante di come la fisica fondamentale, nel suo caso la scoperta della radioattività, abbia avuto un impatto eccezionale nel mondo della Fisica Medica, quale la diagnostica con radioisotopi e la terapia con

radiofarmaci. Marie Curie fu inoltre tra i primi utilizzatori dei raggi X per il riconoscimento di ferite e fratture durante la guerra 1915-'18. In figura 1 si può vedere uno dei primi gabinetti radiologici mobili di cui Madame Curie fu una attiva sostenitrice. La connessione tra Fisica Fondamentale e Fisica Medica è resa ancora più evidente dalla interconnessione tra vari premi Nobel per ricerca in fisica fondamentale ed i premi Nobel per ricerca in Fisica medica (vedi tabella 1).

2. La Fisica Medica in Italia e a Pisa negli anni '70-'90

Nel 1974 furono istituiti per legge negli Ospedali i "Servizi di Fisica Sanitaria", dando quindi ai Fisici Medici che lavoravano in ospedale a stretto contatto del paziente lo stato giuridico ed economico dei Medici. A Pisa, negli anni '70 e successivi, ci sono stati vari eventi che hanno contribuito allo sviluppo della Fisica Medica: nel 1978 il Laboratorio di Fisiologia Clinica (ora Istituto di Fisiologia Clinica) del CNR sotto la guida del professor Luigi Donato istituì una sezione di "Scienze di base", dando vita al primo tentativo reale di ricerca interdisciplinare tra le scienze di base e la Medicina. Negli anni '80 venne installato presso tale Laboratorio il primo tomografo PET in Italia ed il primo mini-ciclotrone per la produzione di radiotraccianti in Europa. Negli anni '90 la Fondazione IRCCS Stella Maris a Calambrone installò il secondo Tomografo a Risonanza superconduttore a 1.5 T in Italia; il primo era stato installato poco prima a Carpi a seguito di una donazione dell'imprenditore Enzo Ferrari. Fino ad allora erano stati installati solo Tomografi resistivi di campo magnetico inferiore a 1 T.

Nel frattempo, negli anni '90, il MURST riconosceva la Fisica Medica come una disciplina indipendente nell'ambito dei settori disciplinari della Fisica, attualmente FIS07, e come riflesso immediato vennero istituite le prime cattedre di Fisica Medica nella Facoltà di Scienze M.F.N. mentre il corso di insegnamento di Fisica della Facoltà di Medicina e Chirurgia venne rinominato corso di Fisica Medica.

2.1. La nascita della Fisica Medica nell'Istituto di Fisica di Pisa

La Fisica Medica è nata nell'Istituto di Fisica di Pisa con l'istituzione del Corso di Cultura in Fisica Sanitaria, un corso annuale volto alla preparazione degli Esperti Qualificati di III grado che si sarebbero resi necessari per la Radioprotezione a fronte dei futuri 20 impianti nucleari previsti dal Piano Energetico Nazionale (PEN, 1975).

Il professor Gherardo Stoppini, a quei tempi vicepresidente del C.N.E.N., ottenne la collaborazione del centro CAMEN (dove era stato installato primo in Italia ed era ancora in attività un reattore nucleare di

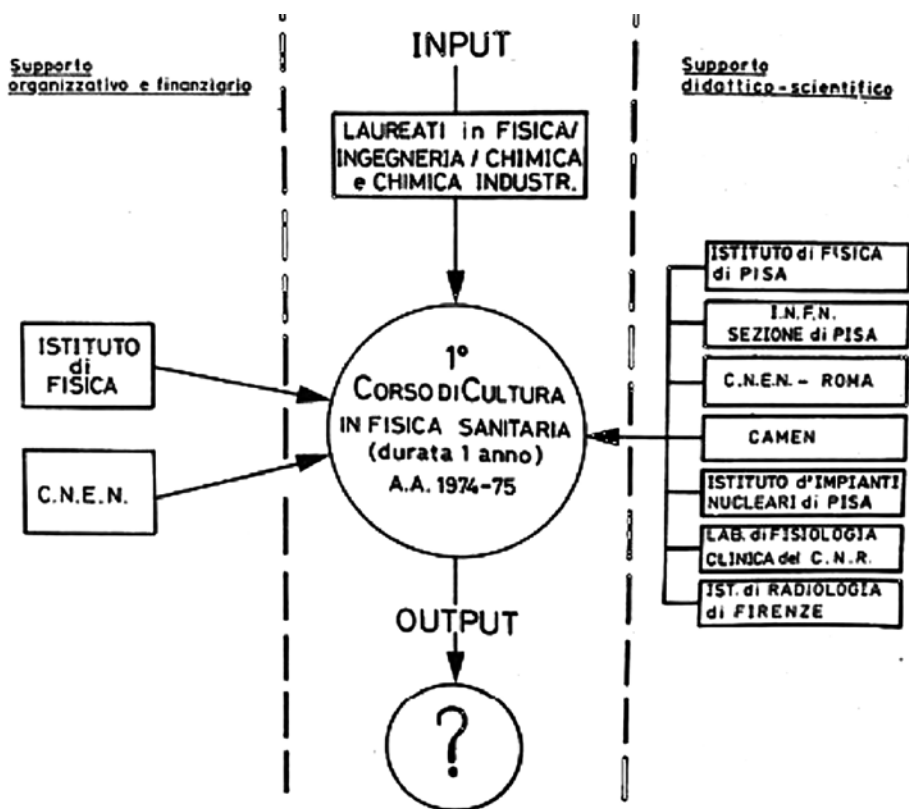


Figura 2. Struttura del Corso di Cultura in Fisica Sanitaria [1].

ricerca di potenza di 5 MegaWatt), dell'Istituto di Impianti Nucleari della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, del Laboratorio di Fisiologia Clinica del CNR, e della Università di Firenze, per istituire nel 1974 presso l'Istituto di Fisica il "Corso di Cultura in Fisica Sanitaria", di cui mi fu affidata l'organizzazione e la direzione. In figura 2 è rappresentata la struttura originaria del primo Corso nel 1974, al quale avevano accesso laureati in Fisica, in Ingegneria, in Chimica e Chimica Industriale.

La lista dei corsi e dei docenti del secondo Corso di Cultura in Fisica Sanitaria (a.a. 1975-76) è presentata in tabella 2.

Il corso di Cultura in Fisica Sanitaria continuò per alcuni anni, fino a che fu chiaro che il PEN era stato abbandonato e quindi veniva meno la necessità contingente della preparazione di un adeguato numero di Esperti qualificati di III grado. Tuttavia, esso si sviluppò nella Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria, di durata biennale, rivolta alla preparazione dei Fisici Sanitari ospedalieri. Esisteva a Milano, all'Università Statale, l'Indirizzo di Fisica Sanitaria nella Scuola di Perfezionamento in

Tabella 2. Lista dei corsi di insegnamento e dei docenti del Corso di Cultura in Fisica Sanitaria nell'a.a. 1975-76 (secondo anno di attivazione).

Insegnamento (n. ore)	Docente	Corso di Laurea	Ente di appartenenza
Fisica Nucleare (32h)	A. Giazotto N. Cerullo	Fisica Ingegneria	INFN, Sezione di Pisa Istituto di Impianti Nucleari e CAMEN
Effetti biologici delle radiazioni ionizzanti (32h)	P. Metalli G. Silini	Medicina Medicina	CNEN-CSN Casaccia CNEN-CSN Casaccia
Strumentazione e metodologia di misura delle radiazioni ionizzanti (39h)	G. Gorini M. Giorgi G. Curzio E. Bertolucci	Fisica Fisica Fisica Fisica	Istituto di Fisica INFN, Sezione di Pisa Facoltà di Ingegneria Facoltà di Medicina
Fisica Sanitaria (28h)	L. De Franceschi F. Pagni	Fisica Fisica	Facoltà di Agraria e CAMEN CAMEN
Normativa nel campo della protezione don- tro le radiazioni ioniz- zanti (12h)	O. Ilari F. Nocera A. Susanna C. Faloci	Fisica Legge Fisica Fisica	CNEN-DISP Roma CNEN-DISP Roma CNEN-DISP Roma CNEN-DISP Roma
Radioprotezione in im- pianti nucleari (27h)	M. Mazzini A. Gentili	Ingegneria Fisica	Istituto di Impianti Nucleari CAMEN
Fisica per la Radiolo- gia (17h)	R. Renzi	Fisica	Istituto di Radiologia Università di Firenze
Fisica per la Medicina Nucleare (20h)	R. Guzzardi R. Bedini A. Pilo A. Maseri C. Giuntini L. Donato	Fisica Fisica Fisica Medicina Medicina Medicina	Laboratorio di Fisiologia Clinica del CNR di Pisa e Facoltà di Medicina di Pisa

Fisica, ma fu l'Università di Pisa la prima in Italia ad istituire la Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria, con accesso ai soli laureati in Fisica, allineandosi fin dall'inizio alle Scuole di Specializzazione della Facoltà di Medicina. Sotto l'impulso del Professor Erseo Polacco la Scuola di Pisa divenne ben presto l'esperienza di riferimento da cui nacquero poi tutte le scuole di Specializzazione in Fisica Sanitaria in Italia. Lo schema della Scuola è presentato in figura 3. È notevole il tentativo che fu fatto di andare verso una scuola di tipo regionale, che ora è incoraggiato a livello ministeriale, ma che allora non era possibile. Successivamente la scuola fu portata ad una durata triennale, per poi entrare ufficialmente a far parte delle Scuole di Specializzazione di Area Sanitaria, ponendo la specializzazione in Fisica Sanitaria come requisito necessario per un laureato in Fisica per entrare a far parte del Servizio Sanitario Nazionale.

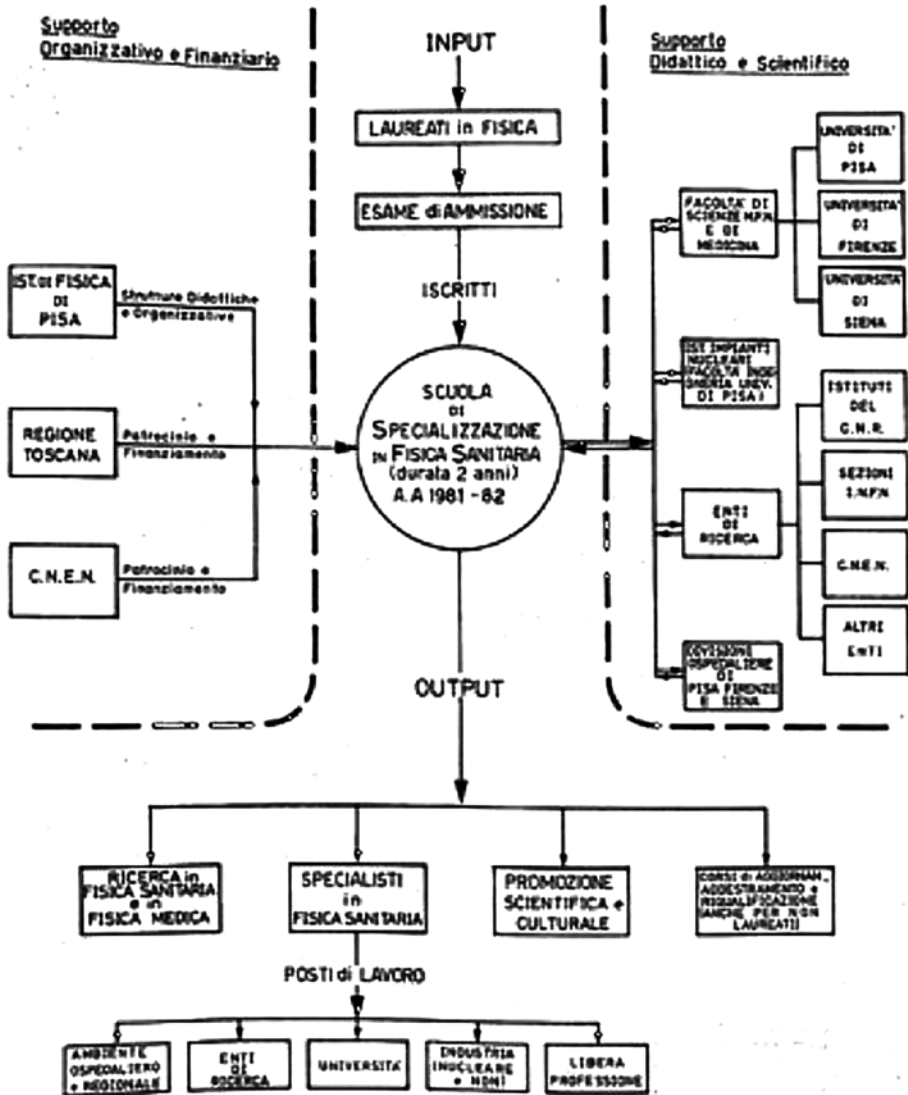


Figura 3. Struttura iniziale della Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria dell'Università di Pisa [1].

2.2. I finanziamenti per la ricerca in Fisica Medica

Fino agli anni '80, i finanziamenti di cui godeva la fisica medica erano molto modesti e quasi "erratici". Fu l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare che iniziò a sostenere progetti di ricerca di Fisica Nucleare applicati alla Medicina. In particolare il prof. Gabriele Torelli, presidente del Gruppo V dell'INFN, introdusse il sottogruppo di Fisica Interdisciplinare, tutt'ora



Figura 4. Copertina del secondo volume (1986) della rivista *Fisica in Medicina* (a sinistra); copertina attuale (2016) della rivista *Physica Medica* (a destra).

esistente, che diventerà il sottogruppo di riferimento per tutti gli esperimenti di Fisica Medica che riceveranno da allora i finanziamenti INFN.

Negli anni '90, sotto l'impulso e la guida del professor Arnaldo Stefanini si formò il Gruppo Nazionale di Coordinamento per tutte le ricerche in Fisica Biomedica svolte in Italia (CNFB). Questo gruppo riceveva ogni anno dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MURST) un finanziamento (frazione dell'annuale finanziamento destinato dal MURST al cosiddetto 40%), che veniva suddiviso tra i vari esperimenti di ricerca presentati sulla base di un referaggio interno ed una discussione aperta a tutti gli aderenti al Gruppo.

2.3. La nascita della rivista scientifica di Fisica Medica

Nel 1985, l'associazione Italiana di Fisica Sanitaria e Protezione dalle Radiazioni (AIFSPR) istituì la rivista scientifica di Fisica Medica, "Fisica in Medicina" (figura 4). La rivista pubblicava articoli scientifici in italiano ed in inglese; il suo direttore editoriale era il dottor Riccardo Guzzardi, ricercatore presso l'Istituto Fisiologia Clinica del CNR di Pisa, con un comitato editoriale di fisici medici solo italiani. Ben presto fu chiara l'esigenza di portare la rivista in ambito internazionale pubblicando solo articoli in lingua inglese. La rivista assunse il nome di "*Physica Medica*" (figura 4) ed io diventai l'*Editor in Chief* (carica che ho ricoperto dal 1988 al 2008)

con un comitato editoriale internazionale. In questi 20 anni *Physica Medica* è diventata non solo la rivista scientifica ufficiale della Associazione Italiana di Fisica Medica (AIFM), evoluzione della AIFSPR e della successiva AIFB, ma anche della “*European Federation of Associations of Medical Physics*” (EFOMP), della Società di Fisica Medica francese (SPFM) e di quella irlandese (IAPM). La rivista *Physica Medica* assieme all’inglese “*Physics in Medicine and Biology*” e all’americana “*Medical Physics*” costituisce una delle tre riviste di riferimento per la ricerca in Fisica Medica a livello mondiale.

3. La ricerca in Fisica Medica nell’Istituto di Fisica di Pisa

3.1. Gli albori della ricerca in fisica medica alla fine degli anni ’70

Al mio ritorno a Pisa dopo un periodo di ricerca in fisica sperimentale delle particelle elementari trascorso in Inghilterra presso l’elettrosincrotrone NINA da 5 GeV di Daresbury (Gran Bretagna) come componente del gruppo “Pion-ElectroProduction” (PEP), il mio interesse scientifico si rivolse verso la Fisica Medica, anche a seguito dei compiti didattici-gestionali che mi erano stati affidati per il “Corso di Cultura in Fisica Sanitaria”.

Il primo gruppo di Fisica Medica fu costituito a metà degli anni ’70 con l’arrivo dei neo-laureati del prof. Stoppini, Ronaldo Bellazzini e Guido Tonelli. Le tematiche di ricerca si rivolsero immediatamente all’Imaging Medico con radiazioni ionizzanti, utilizzando le tecnologie tipiche della Fisica Sperimentale delle Alte Energie: simulazioni Monte Carlo e rivelatori per particelle. Indubbiamente la connessione con l’INFN fu fondamentale per indirizzare la Fisica Medica pisana in questa direzione.

La prima tematica affrontata fu la simulazione e l’analisi dei dati di una nuova tecnica di Tomografia Computerizzata, dove si voleva sfruttare non l’assorbimento dei raggi X nell’attraversamento di un paziente, ma il loro “scattering Compton” a 90°. Questa tecnica era stata inizialmente sviluppata da un gruppo canadese ed un prototipo era allo studio presso il Laboratorio di Fisiologia Clinica del CNR di Pisa (tomografo COSCAT). La simulazione Monte Carlo e l’analisi dei dati fu effettuata con la collaborazione di ricercatori di SLAC, tra cui W.R. Nelson che era in anno sabbatico al CERN, mentre la parte strumentale era fornita dal CNR con strumentazione clinica [2].

3.2. Applicazioni delle MWPC in campo biomedico

Il gruppo si accrebbe con la partecipazione di Marco Maria Massai e con i primi due laureandi del gruppo, Gloria Spandre e Massimo Ragadini. Gli interessi di ricerca si indirizzarono verso gli aspetti più strettamente strumentali, con la costruzione e l’utilizzo dei nuovi rivelatori di radia-

zione a gas nel campo biologico e medico, le Camere proporzionali multifilo (MWPC). In quegli anni c'erano due gruppi a livello internazionale che lavoravano su queste tematiche, il gruppo di George Charpak al CERN che sviluppava MWPC ibride per la Tomografia a Positroni ed il gruppo di J.E. Bateman a Rutherford, che sviluppava invece MWPC per applicazioni in campo biologico. Il gruppo di Pisa si dedicò inizialmente alla costruzione delle MWPC in campo biologico [3] (figura 5), utilizzando l'esperienza del gruppo FRAMM nella costruzione delle camere a deriva. L'applicazione era in autoradiografia digitale in vitro di cellule triziate in collaborazione con i biologi Angelo Abbondandolo e Stefania Bonatti. Il risultato di questa ricerca produsse il primo lavoro di fisica medica pubblicato dal gruppo su una rivista scientifica nel 1981 e costituì la tesi di laurea di Gloria Spandre, il primo laureato del gruppo. Fu questa la prima esperienza concreta di *technology transfer* della Fisica delle Alte Energie alla Fisica medica.

Lo scopo biologico dell'esperimento era quello di trovare un metodo non distruttivo per isolare cellule di mammifero marcate con ^3H , incapaci di riparare mutazioni di DNA [4]. A causa della base energia dei raggi beta emessi nel decadimento del trizio (energia massima di 18 keV), il campione con le cellule doveva essere inserito direttamente all'interno della MWPC, separato dalla zona gassosa da un sottile finestra di Mylar da 50 micron. Usando la stessa tipologia di MWPC, in stretta collaborazione con il Laboratorio di Fisiologia Clinica del CNR, il gruppo studiò l'imaging digitale del metabolismo cardiaco ex-vivo nel cane. In questo caso il tracciante, deossi-glucosio, era marcato con ^3H [5]. Successivamente in collaborazione con l'Istituto di Radiologia di Pisa fu sviluppata una MWPC a pressione a Xenon per applicazioni radiologiche, in particolare per densitometria ossea digitale [6].

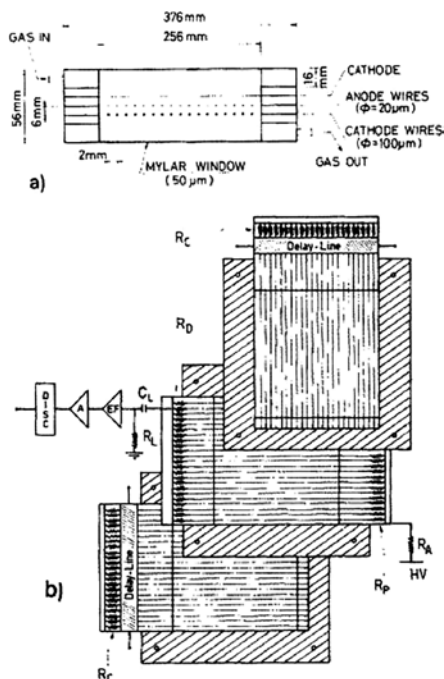


Figura 5. Disegno schematico della prima MWPC costruita dal gruppo di fisica medica: a) sezione della camera; b) vista esplosa [3].

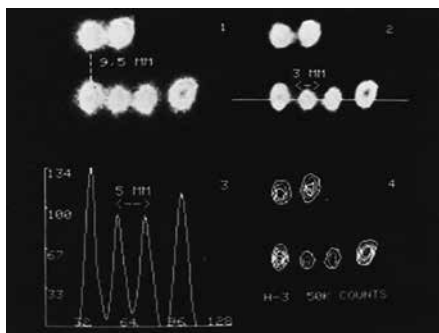


Figura 6. Mappatura di 6 "monostrati cellulari" marcati con ^3H . La "distanza minima" tra ciascun strato è 2.5 mm: 1) immagine originale, 2) la stessa immagine dopo uno "smoothing" e la sottrazione del fondo, 3) un profilo dell'immagine ottenuto lungo la linea mediana di 4 monostrati come indicato in 2), 4) linee di isoconteggio [4].

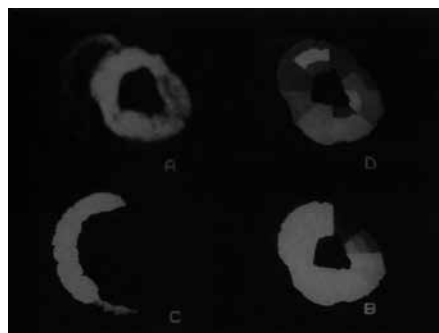


Figura 7. Un esempio della procedura di partizione del ventricolo sinistro: a) immagine originale come ottenuta dalla MWPC, b)-c) divisione della fetta in "layers" e "wedges", d) mappa regionale dello "uptake" di $^{13}\text{H-DG}$ [5].

3.3. La Tomografia a Positroni

Alla fine degli anni '70 il gruppo aveva iniziato una collaborazione con SLAC, per quanto riguardava l'utilizzo del codice Monte Carlo Electron-Gamma-Shower (EGS) in fisica medica e con il gruppo del Lawrence Berkeley Laboratory, guidato da Victor Perez-Mendez per lo sviluppo di camere a fili per Tomografia a Positroni (PET). Utilizzando un periodo di "sabbatico" di 18 mesi, mi recai a Berkeley dove iniziai ad occuparmi di PET, con lo scopo di costruire un tomografo ad alta risoluzione spaziale (HISPET) basato su tecnologie MWPC accoppiate a un convertitore a tubicini di vetro-piombo. Dopo alcune "proof of principle" sviluppate a Berkeley [7], al mio ritorno a Pisa, costituì un secondo gruppo di Fisica Medica per costruire il primo prototipo di tale tomografo HISPET [8], a cui afferirono Maurizio Conti, Carlo Rizzo, Augusto Bandettini e Gary Schwartz. Il gruppo originale guidato da Ronaldo Bellazzini a cui si era aggiunto Alessandro Brez, proseguì su altri esperimenti con nuovi sviluppi su rivelatori a gas. Guido Tonelli aveva già lasciato le ricerche in Fisica Medica per unirsi a un gruppo di Alte Energie.

Essendo HISPET un tomografo tri-dimensionale, contrariamente ai tomografi PET esistenti 2-D, fu necessario sviluppare nuovi algoritmi per la ricostruzione delle immagini 3-D [9] che utilizzavano per la prima volta retroproiezioni filtrate 3-D con algoritmi di Siddon. La pesantezza computazionale richiese anche l'istallazione di calcolo parallelo tramite transputer [10] che possono essere considerati gli antenati delle attuali "Graphic Processor Units" GPU).

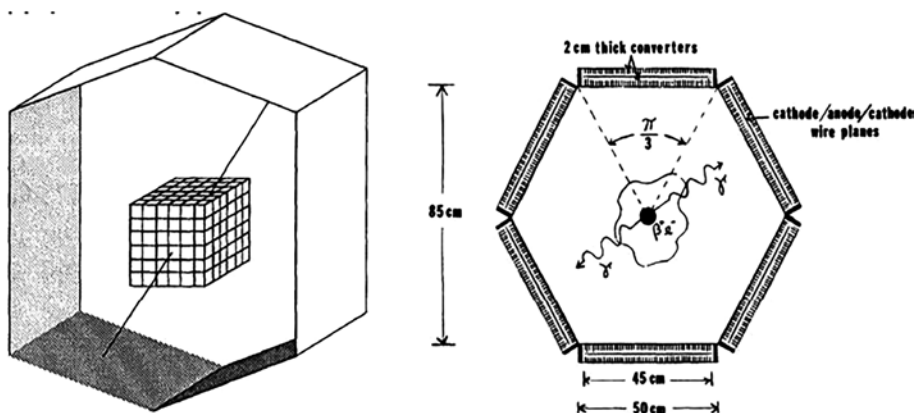


Figura 8. (A sinistra): vista schematica del tomografo HISPET con l'indicazione del campo di vista. (A destra): il tomografo HISPET, costituito da 6 moduli disposti ad esagono. Ciascun modulo ha un'area di $45 \times 45 \text{ cm}^2$ ed ha 2 cm di convertitore a tubicini di vetro-piombo [7].

3.4. Applicazioni dei rivelatori a stato solido alla Fisica Medica

A metà degli anni '80 gli esperimenti al CERN (ALEPH) stavano sviluppando contatori a stato solido (Silicio e Germanio) a microstrisce per il loro utilizzo come tracciatori di particelle cariche. All'Infn di Pisa il loro sviluppo era guidato dal Prof. Marcello Giorgi che all'epoca era anche presidente del gruppo V dell'INFN.

Il Prof. A. Stefanini, rientrato a Pisa da Trieste sulla cattedra di Fisica alla Facoltà di Medicina, aveva formato un nuovo gruppo di Fisica Medica di cui fecero inizialmente parte Ennio Bertolucci, Ubaldo Bottigli e Valeria Rosso, e successivamente Pasquale Delogu, Maria Evelina Fantacci e Maria Giuseppina Bisogni. Anche sotto la spinta del Prof. Giorgi il gruppo si concentrò su un programma di ricerca volto all'utilizzo dei rivelatori al silicio a microstrisce per la rivelazione di raggi X in radiologia digitale ed in particolare in mammografia [11].

In questa applicazione i rivelatori dovevano essere a microstrisce a doppia faccia per ottenere simultaneamente la coordinata X ed Y. Il vantaggio rispetto alle lastre convenzionali era costituito dalla altissima risoluzione spaziale determinata dal passo delle microstrisce, ma la loro criticità era data dalla bassa efficienza e dalla necessità di avere un'intensità di fascio non troppo elevata a causa dell'aumentare di ambiguità x-y [12]. L'aumentata complessità dell'elettronica e del sistema di DAQ fece sì che venissero introdotte, anche nelle applicazioni di fisica medica, ASIC dedicati sviluppati con tecniche VLSI [13]. Questa applicazione vide anche il nascere delle prime applicazioni di AI per la ricostruzione ed elaborazione delle immagini, con l'utilizzo delle reti neurali [14].

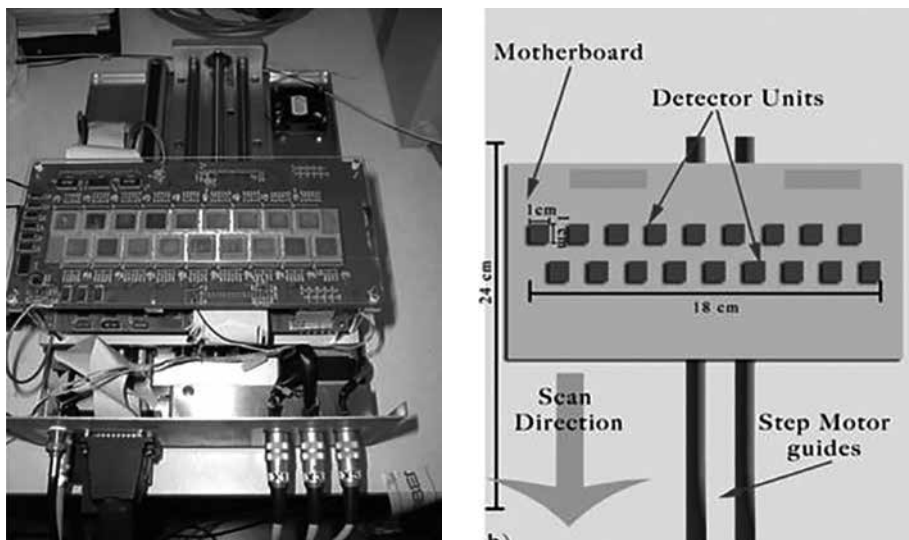


Figura 9. (a): Foto della testa di rivelazione a pixel di GaAs. (b) Disegno schematico con i rivelatori montati a mosaico [15].

Nel frattempo, in seguito alla chiamata sulla cattedra di Fisica all'Università di Napoli "Federico II", formai un gruppo di Fisica Medica, con Paolo Russo, Bruno Alfano e più tardi Maurizio Conti che mi aveva seguito da Pisa. In stretta collaborazione con il gruppo di Pisa, a Napoli ci concentravamo sui rivelatori a microstrisce di silicio per l'autoradiografia digitale ripercorrendo le tematiche originali dell'autoradiografia digitale delle cellule triziate.

La fisica delle Alte Energie ai "colliders" richiedeva rivelatori di vertice sempre più ad alta risoluzione e soprattutto in grado di sostenere gli altissimi rate di particelle, e stava sviluppando contemporaneamente i rivelatori a pixel al silicio ed a semiconduttori di più alto Z. La possibilità di utilizzare queste tecnologie in Fisica Medica apparve subito estremamente interessante ed il gruppo del prof. Stefanini sviluppò un rivelatore a pixel di Arseniurio di Gallio (GaAs) per mammografia digitale (figura 9), nell'ambito di un progetto IMI di trasferimento industriale al quale collaborarono varie università ed industrie [15]. Le qualità delle immagini ottenute furono eccezionali soprattutto in termini di contrasto, come mostrato in figura 10.

3.5. L'imaging molecolare

Agli inizi degli anni '90, mi trasferii a Ferrara sulla cattedra di Fisica Medica. Il gruppo di Fisica Medica di Ferrara era inizialmente composto da Mauro Gambaccini e Michele Marziani, ai quali si aggiunsero ben presto Giovanni



Figura 10. Immagini radiografiche di fiori ottenute con il rivelatore a pixel di GaAs ed uno tubo mammografico convenzionale.

Di Domenico e Guido Zavattini. L'attività scientifica era rivolta verso la produzione di sorgenti di raggi X quasi-monocromatiche e la costruzione di un tomografo PET per piccoli animali, basato su matrici di cristallo scintillatore YAP e di fotomoltiplicatori sensibili alla posizione. Agli inizi degli anni '90 solo altri due gruppi a livello mondiale stavano costruendo tomografi per piccoli animali, a UCLA (Los Angeles), sotto la guida di Simon Cherry, e all'Università di Sherbrooke (Canada) sotto la guida di Roger Lecomte. Tale strumenti dettero grande impulso al decollo della disciplina del "molecular imaging", alla base degli studi traslazionali dal piccolo animale all'uomo. In figura 11 è rappresentato il tomografo YAPPET [16], sviluppato a Ferrara e la sua ingegnerizzazione effettuata dalla ditta ISE srl di Pisa.

Alla fine degli anni '90 rientrai all'Università di Pisa sulla cattedra di Fisica Medica della Facoltà di Medicina. Nuovi ricercatori si unirono al gruppo di Fisica Medica di Pisa, Nicola Belcari, Niccolò Camarlinghi, Sara Marcatili e Giancarlo Sportelli. Le tematiche sperimentali di "molecular imaging" furono riprese a Pisa con la costruzione di un nuovo tomografo di più elevate prestazioni, il tomografo ibrido PET/CT, IRIS [17]. In figura 12 sono presentate due immagini del ventricolo sinistro di un cuore di ratto "in vivo": a sinistra un cuore normale, a destra un cuore ischemico. Il radiotracciante usato è

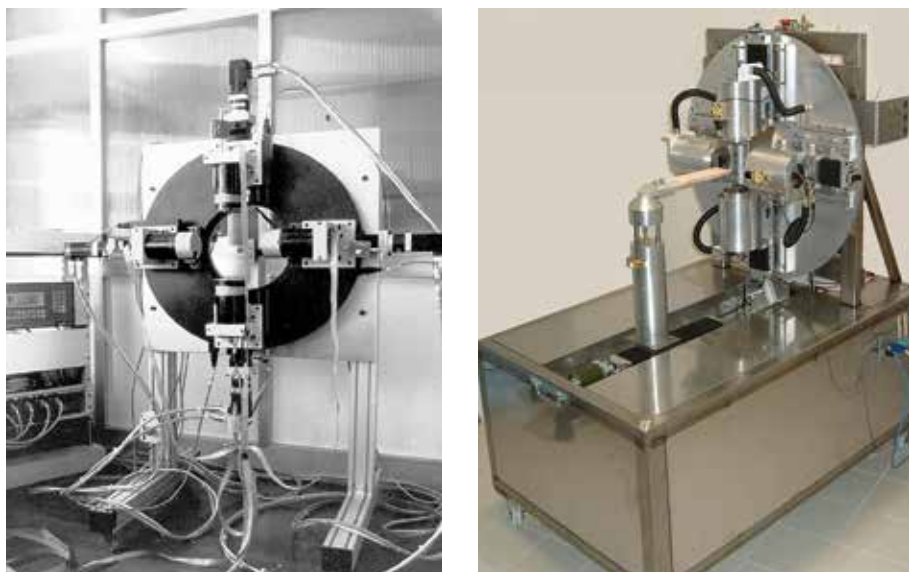


Figura 11. (A sinistra): foto del primo prototipo del tomografo YAPPET. (A destra): il tomografo YAPPET ingegnerizzato dalla ditta ISE srl (Migliarino Pisano, Pisa).

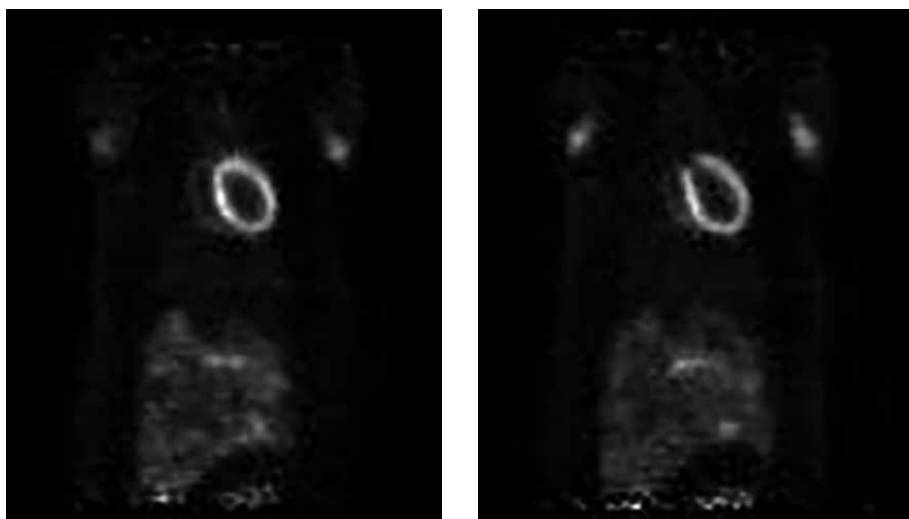


Figura 12. Imaging del ventricolo sinistro di un ratto ottenuto “in vivo” con radiotraccianti ^{18}F -FDG ed il tomografo PET/CT IRIS [17]. (A sinistra): cuore normale; (A destra): cuore con una ischemia indotta.

^{18}F -FDG. Si tornava quindi a perfezionare gli studi iniziali degli anni '80, ma passando dalla autoradiografia ex-vivo alla PET in-vivo. Ecco perché agli inizi la PET era stata anche chiamata “autoradiografia in-vivo”.

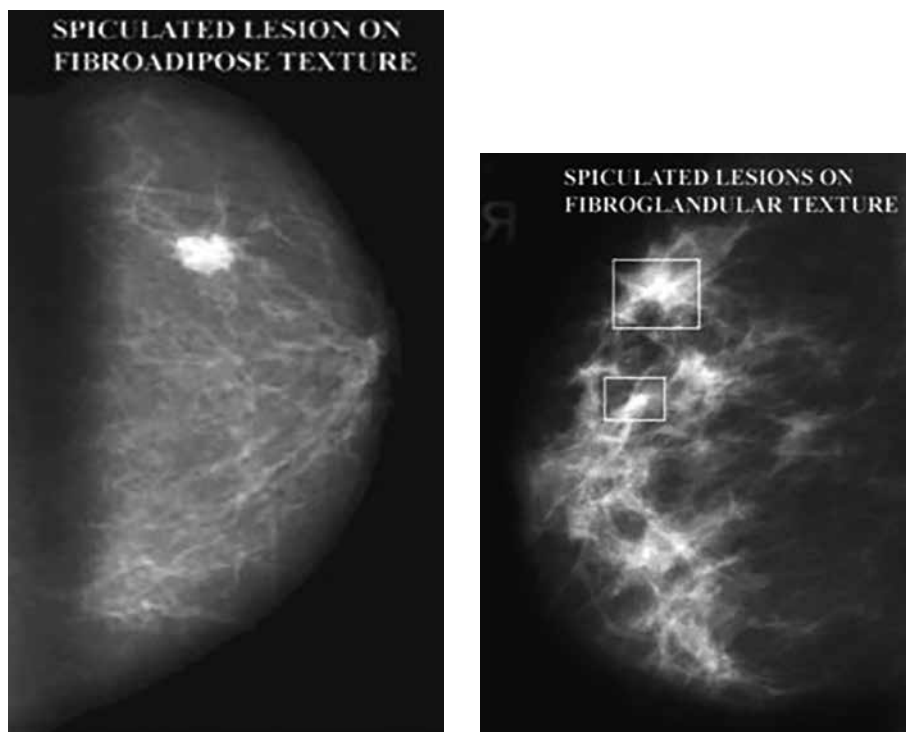


Figura 13. Ricostruzioni di immagini mammografiche utilizzando il CAD del progetto CALMA [18].

3.6. Recenti sviluppi degli anni 2000

Il gruppo di Pisa si era nel frattempo orientato verso tematiche avanzate di elaborazione di immagini e AI, passando dalle prime applicazioni di reti neurali ai CAD clinici per lo studio delle neoplasie del seno, figura 13 [18] e del polmone, figura 14 [19] nell'ambito di grosse collaborazioni nazionali CALMA e MAGIC-V.

Nuove attività di ricerca si svilupparono:

- nelle applicazioni dei nuovi fotomoltiplicatori a stato solido, i SiPM, per i quali il gruppo di Fisica fu un precursore per il loro utilizzo per l'imaging medico [20];
- nella radioterapia a protoni (esperimenti DOPET [21] e INSIDE [22]);
- nello studio ed applicazioni di ricerca clinica della risonanza a 7T installata presso l'IRCSS Stella Maris di Calambrone (IMAGO7) [23];
- nella costruzione di un tomografo ibrido (PET/MR/EEG) dedicato agli studi del cervello, per il quale il gruppo di Fisica Medica di Pisa è coordinatore di un progetto europeo [24].

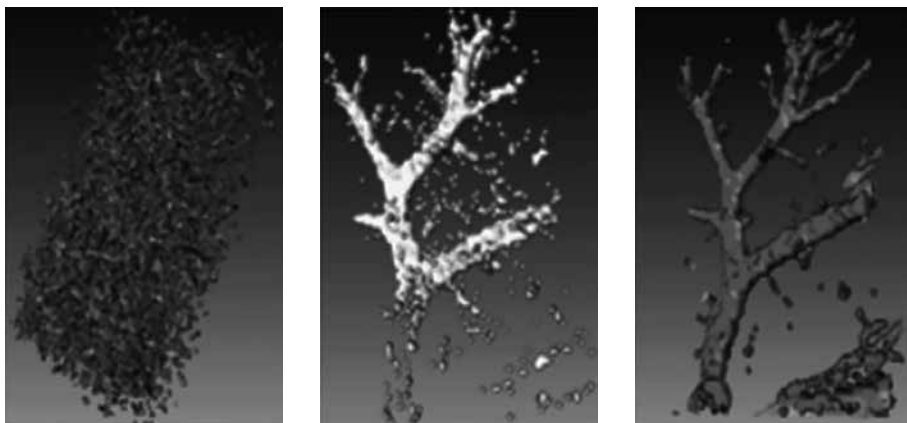


Figura 14. Formiche al lavoro: ricostruzione di una parte dell'albero bronchiale dopo 1 ciclo (A), 50 cicli (B), 100 cicli(C) [19].

4. Conclusioni

A partire dai primi vagiti di metà anni '70, il gruppo di Fisica Medica dell'Istituto/Dipartimento di Fisica di Pisa si è affermato da un punto di vista scientifico in Italia e nel mondo della ricerca internazionale. Ora è composto da circa 20 ricercatori (strutturati dell'Università e dell'INFN, post-doc, studenti di dottorato e di master in Fisica). Esso ha la responsabilità didattica della fisica medica dei corsi di insegnamento della Scuola di Medicina e del Corso di laurea Magistrale in fisica. Ha la responsabilità didattica-gestionale della Scuola di Specializzazione in Fisica Medica ed ha recentemente acquisito la configurazione di Sezione di Fisica Medica del dipartimento di Fisica "E. Fermi".

Bibliografia

- [1] A. Del Guerra, *L'insegnamento della Fisica Sanitaria al livello post-lauream: corsi/scuole di perfezionamento/specializzazione o dottorato di ricerca? Una base di discussione*, Ann. Ist. Super. Sanità, 1982, 18(2), 289-300.
- [2] A. Del Guerra, R. Bellazzini, G. Tonelli, R. Venturi, W.R. Nelson, *A Detailed Monte Carlo Study of Multiple Scattering Contamination in Compton Tomography at 90 degrees*, IEEE Trans.Med.Imag., 1982, MI-1, 147-152.
- [3] R. Bellazzini, A. Del Guerra, M.M. Massai, M. Ragadini, G. Spandre, G. Tonelli, *A MWPC with a cathode coupled delay line read-out as radioactivity detector for DNA repair Studies*, Nucl. Instr. Meth., 1981, 190, 627-638.

- [4] A. Abbondandolo, S. Bonatti, R. Bellazzini, G. Betti, A. Del Guerra, M.M. Massai, M. Ragadini, G. Spandre, G. Tonelli, *Direct screening of living mammalian cell colonies for the identification of DNA repair deficient mutants by a MultiWire Proportional Chamber*, Radiat. Environ. Biophys., 1982, 21, 109-121.
- [5] R. Bellazzini, A. Del Guerra, M.M. Massai, M. Ragadini, G. Spandre, G. Tonelli, P. Camici, *Digital Imaging of Regional Glucose Metabolism of the Heart with MWPC*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, NS-30, 686-688.
- [6] R. Bellazzini, A. Brez, A. Del Guerra, M.M. Massai, M.R. Torquati, M. Franchi, G. Perri, *Digital Imaging with a Pressurized Xenon Filled MWPC working at High Data Rate*, Nucl. Instr. Meth., 1984, A228, 193-200.
- [7] A. Del Guerra, C.B. Lim, G.K. Lum, D. Ortendahl, V. Perez-Mendez, *Medical Positron Imaging with a dense drift space Multiwire proportional chamber*, IEEE Trans. Med. Imag. 1982, MI-1, 4-11.
- [8] A. Del Guerra, A. Bandettini, M. Conti, G. De Pascalis, P. Maiano, V. Perez-Mendez, C. Rizzo, *Test of the HISPET Prototype*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, NS-37, 817-822.
- [9] M. Conti, A. Del Guerra, G. De Vincentis, L. Fonti, M.P. Lombardo, P. Maiano, P.S. Paolucci, C. Rizzo, R. Tripiccone, *3-D filtered back projection algorithm for 3-D PET*, Digital Signal Processing-87, Eds. V. Cappellini, A.G. Constantinides, North-Holland, 1987, 1, 599-603.
- [10] S. Barresi, D. Bollini, A. Del Guerra, *Use of a transputer system for fast 3-D image reconstruction in 3-D PET*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, NS-37, 812-816.
- [11] W. Bencivelli, E. Bertolucci, U. Bottigli, A. Del Guerra, D. Mazzei, A. Messineo, W.R. Nelson, P. Randaccio, V. Rosso, P. Russo, A. Stefanini, *Use of EGS4 for the evaluation of the performance of a silicon detector for X-ray digital radiography*, Nucl. Instr. Meth., 1991, A305, 564-573.
- [12] B. Alfano, A. Bandettini, W. Bencivelli, E. Bertolucci, U. Bottigli, M. Conti, A. Del Guerra, M.E. Fantacci, D. Mazzei, M. Penkowski, P. Randaccio, V. Rosso, P. Russo, A. Stefanini, *First X-ray images with a double sided microstrips silicon crystal. A novel detector for digital radiography?*, Physics in Medicine and Biology, 1992, 37, 1167-1170.
- [13] R. Beccherle, A. Cisternino, A. Del Guerra, M. Folli, R. Marchesini, M.G. Bisogni, A. Ceccopieri, V. Rosso, A. Stefanini, R. Tripiccone, I. Kipniss, *A VLSI Front-end Circuit for Microstrip Silicon Detectors for Medical Imaging Applications*, Nucl. Instr. Meth 1999, A436, 401-414.
- [14] B. Alfano, S.R. Amendolia, A. Bandettini, W. Bencivelli, E. Bertolucci, U. Bottigli, M. Conti, A. Del Guerra, A. Messineo, P. Randaccio, V.

- Rosso, P. Russo, A. Stefanini, *A neural network approach to structured background subtraction for digital radiography*, Physica Medica, 1992, VIII, 123-129.
- [15] S.R. Amendolia, M.G. Bisogni, P. Delogu, M.E. Fantacci, G. Pateroster, V. Rosso, A. Stefanini *Characterization of a mammographic system based on a single counting pixel array coupled to GaAs X-ray detectors*. Medical Physics 2009, 36(4) 1330-1339.
- [16] A. Del Guerra, G. Di Domenico, M. Scandola, G. Zavattini, *High spatial resolution small animal YAP-PET*, Nucl. Instr. Methods A, 1998, A409, 537-541.
- [17] N. Belcari, N. Camarlinghi, E. Fabbiani, S. Ferretti, P. Iozzo, D. Pannetta, P.A. Salvadori, G. Sportelli, and A. Del Guerra, *Nema NU-4 performance evaluation of the IRIS PET/CT preclinical scanner*, IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, June 2017, DOI10.1109/TRPMS.2017.2707300.
- [18] S.R. Amendolia, M.G. Bisogni, U. Bottigli, A. Ceccopieri, P. Delogu, M.E. Fantacci, A. Marchi'm V.M. Marzulli, R. Palmieri, S. Stumbo, *The Calma project: a CAD tool in breast radiography*, Nucl. Instr. and Meth. 2001, A69, 107-112.
- [19] S. Tangaro, R. Bellotti, F. De Carlo, *et al. MAGIC-5: an Italian mammographic database of digitised images for research*, Radiol Med. 2008, 113(4), 477-85.
- [20] S. Moehrs, A. Del Guerra, D.J. Herbert, M.A. Mandelkern, *A detector head design for small animal PET with silicon photomultipliers (SiPM)*, Physics in Medicine and Biology 2006, 51, 1113-1127.
- [21] F. Attanasi, N. Belcari, A. Del Guerra, W. Enghardt, S. Moehrs, K. Parodi, V. Rosso, S. Vecchio, *Comparison of two dedicated 'in beam' PET systems via simultaneous imaging of ^{12}C induced beta+ activity*, Physics in Medicine and Biology 2009, 54, N29-N35.
- [22] M.G. Bisogni, A. Attili, G. Battistoni, N. Belcari *et al.*, *INSIDE in-beam positron emission tomography system for particle range monitoring in hadrontherapy*, J.Med.Imaging (Bellingham), 2017 Jan; 4(1): 011005. Epub 2016 Dec 2.
- [23] www.imago7.eu.
- [24] A. Del Guerra, S. Ahmad, M. Avram, N. Belcari *et al.*, *TRIMAGE: A dedicated trimodality (PET/MR/EEG) imaging tool for schizophrenia*, April 2018, European Psychiatry. Vol 50C, DOI10.1016/j.eurpsy.2017.11.007.

**LA FISICA TEORICA,
L'ASTROFISICA E L'INFORMATICA**

Nella relazione introduttiva di Adriano Di Giacomo, dopo un excursus sugli sviluppi della fisica teorica dopo l'avvento della meccanica quantistica, è descritto il costituirsi di una scuola di fisica teorica a Pisa a seguito dell'arrivo di Luigi Aialdo Radicati nel 1953, e sono riassunti i principali filoni di ricerca avviati dai primi allievi di Radicati e continuati dai loro studenti e collaboratori nei decenni successivi.

Il saggio di Riccardo Barbieri si occupa in particolare di descrivere gli studi effettuati dallo stesso e dai suoi collaboratori fino agli anni Novanta nel quadro della fenomenologia delle particelle elementari e delle loro interazioni.

Giuseppe Bertin presenta un'approfondita disamina delle ricerche pisane nel campo dell'astrofisica e delle importanti relazioni internazionali stabilite in quest'ambito, in particolare per l'azione della Scuola Normale, e ne segnala alcune ricadute sugli sviluppi più recenti della ricerca.

Nel proprio intervento Paolo Degano ricostruisce il ruolo dei fisici nella nascita e nei primi sviluppi dell'informatica pisana, in particolare con la costruzione della CEP, ponendo così le premesse per la nascita del CNUCE e del primo corso di laurea in scienze dell'informazione.

Infine Nicola Minnaja porta un ricordo personale dei rapporti che si stabilirono nei primi anni Sessanta tra la società Olivetti e l'Istituto di Fisica, finalizzati allo sviluppo dei calcolatori elettronici.

La fisica teorica a Pisa nel dopoguerra

Adriano Di Giacomo*

1. Proemio

Parlerò della nascita e degli sviluppi iniziali dell'attività di Fisica Teorica a Pisa a partire dagli anni 50. Non per fare la storia di noi stessi, che sarebbe inappropriato, ma per dare un'idea del clima culturale e del modo di lavorare a quei tempi.

2. Introduzione

La fisica teorica nel senso oggi comunemente inteso è nata nel Novecento, sostanzialmente con la meccanica quantistica.

Maxwell aveva una cattedra di “Natural Philosophy”, Hamilton di Matematica.

Nell'Università Italiana c'erano differenziazioni nei nomi delle discipline basate sul contenuto (Fisica Terrestre, Fisica Tecnologica...) ma il nome usuale delle cattedre era Fisica o Fisica sperimentale e si supposeva che il titolare fosse in grado di sviluppare la strumentazione, di fare le misure, di calcolare le aspettative e analizzare il risultato nell'ambito della meccanica e dell'elettromagnetismo classici.

Con la meccanica quantistica la tecnologia di calcolo e di interpretazione diviene di diffusione meno vasta e più specializzata sì da richiedere una formazione e una professionalità specifica.

L'altra grande innovazione teorica, la relatività, viene considerata per molti decenni fisica matematica, almeno quella generale, forse per le difficoltà nelle verifiche sperimentali. La relatività speciale era usualmente inclusa nella Meccanica razionale o nella fisica matematica.

In Italia la prima cattedra di Fisica teorica fu quella di Fermi a Roma nel 1927, in terna insieme a quella di Enrico Persico a Firenze e di Aldo Pontremoli a Milano. Lo stimolo principale a crearla furono i risultati e la personalità scientifica di Fermi, più' che il clima scientifico in Europa.

* Dip. di Fisica Università di Pisa and INFN-Sezione di Pisa, Largo Bruno Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy. Adriano.digiacomio@df.unipi.it.

Una spinta autoctona di grande livello più che una influenza congiunturale. Il prossimo concorso si ha dieci anni dopo, nel 1937, con la terna Giovanni Gentile Jr, Giancarlo Wick e Giulio Racah. Majorana viene promosso a parte per meriti speciali e chiamato a Napoli. Giulio Racah, che scientificamente collaborava col gruppo di via Panisperna, viene chiamato a Pisa, ma ci resta solo un anno e fugge in Israele nel 1938 per via delle leggi razziali.

La prossima chance si avrà solo negli anni 50 con la venuta a Pisa di Luigi A. Radicati (1955).

Per precisione di cronaca c'era stato a Pisa un corso di Fisica teorica tenuto per incarico da Giovannino Gentile dal 1930 al 1936 che consisteva in una esposizione della teoria quantistica elementare, a partire dal modello di Bohr. Che io sappia non ebbe conseguenze apprezzabili sull'orientamento della attività dell'Istituto Pisano.

L'attività a Pisa era tradizionalmente sperimentale. L'ultimo cattedratico era stato Puccianti che era stato professore dal 1917 al 1947 e fuori ruolo fino al 1952. Puccianti si occupava da sempre di spettroscopia, in particolare infrarossa. Tra i suoi allievi Giovanni Polvani, Gilberto Bernardini, Adriano Gozzini, Nello Carrara. I suoi predecessori erano stati Angelo Battelli dal 1893 al 1916, e prima di lui Riccardo Felici dal 1859 al 1893 e Carlo Matteucci dal 1840 al 1868.

Quando io sono arrivato a Pisa come studente nel Novembre 1954 nel corso di studi in fisica era previsto un corso di Fisica Teorica al terzo-quarto anno. Lo teneva per incarico Tullio Derenzini, ordinario di Fisica Generale all'Accademia Navale di Livorno. Aveva tipicamente tre o quattro allievi, gli studenti di Fisica cioè i Normalisti più qualcun'altro e insegnava meccanica quantistica elementare. Gran parte degli altri corsi (ad es. Fisica Generale) erano in comune con i Matematici, gli studenti di "Matematica e Fisica", i chimici, gli ingegneri con molti più studenti. L'ultima annata di studenti che ha avuto il corso di Derenzini è stata quella entrata nel 1952, che comprendeva tra i normalisti Sergio Rosati e Paolo Franzini. L'anno successivo (Carlo Rubbia, Vittorio Silvestrini, Giorgio Bellettini, Italo Mannelli, Renato Santangelo, Alberto Egidi, Luigi Picasso, Bruno Barsella) è stato il primo ad avere il corso fatto da Radicati, venuto a Pisa nel Novembre 1955.

Per avere un quadro della situazione della fisica teorica in Italia nel 1947, quando fu bandito il nuovo concorso, dei cattedratici teorici era rimasto ben poco: Fermi era emigrato in USA dopo l'assegnazione del premio Nobel nel 1938, Pontremoli era morto nella spedizione Nobili al Polo Nord, Giancarlo Wick aveva seguito Fermi negli USA nel 1946, Majorana era sparito dalla nave Napoli-Palermo nel 1938, Gentile Jr era morto di infezione, Racah era emigrato in Israele. Persico era l'ultimo superstite, e da Torino stava per trasferirsi a Roma. I ternati nel 47 furono Piero Cal-

dirola (Milano), Bruno Ferretti (Roma) e Niccolò dalla Porta (Padova). Il numero di cattedrati teorici saliva a quattro. Gatto, che era studente alla Normale, fece la sua tesi teorica nel 1951 con Bruno Ferretti a Roma (sul modello a shell dei nuclei).

Con la normalizzazione della vita civile del dopoguerra e con la crescita economica del paese il numero delle cattedre crebbe. Nel 1950 Antonio Borsellino (Genova), Giampietro Puppi (Napoli e poi Bologna) Mario Verde (Torino), Nel 1954 Paolo Budini (Trieste), Luigi Radicati (Napoli e poi Pisa nel 1956), Carlo Salvetti (Milano).

Questa è una sommaria descrizione della condizione iniziale a livello nazionale della nostra storia. La storia per cattedre è realistica e riflette l'organizzazione della ricerca in quel periodo. Nell'Università erano tutti precari (incaricati con scadenza annuale) eccetto i titolari di cattedra e gli assistenti ordinari, che erano assistenti di uno specifico titolare di cattedra.

Dopo dieci anni in posizione di assistente si aveva diritto ad una cattedra nei licei, o si poteva restare assistenti stabili se si era passato l'esame di libera docenza.

Prima di dare un'idea del quadro internazionale della ricerca teorica per poter meglio capire e giudicare la situazione pisana, dirò qualcosa sull'istituto visto da uno studente del primo o secondo anno come ero io nel 1955-56. In un ambiente esteriormente ottocentesco lavoravano persone di grande livello. Ho avuto la fortuna di avere come docente di Fisica generale biennale Marcello Conversi: il suo corso che pure era rivolto a un pubblico di ingegneri, matematici, chimici oltre che ai fisici insegnava a ragionare da fisici. Tra i colleghi del mio anno c'era Marco Toller, che si sarebbe laureato con Conversi in fisica sperimentale. Quelli dell'anno prima tra cui Carlo Rubbia avevano il corso fatto da Giorgio Salvini. Salvini dirigeva la costruzione del Sincrotrone e si occupava di raggi cosmici, Conversi, oltre che di raggi cosmici, stava in quegli anni sviluppando con Gozzini i rivelatori a tubi di gas. Questi due gruppi davano il tono all'istituto. Con loro Gozzini che si occupava di spettroscopia a microonde, ma ancora in posizione di assistente ed era l'erede di Puccianti. Fra gli insegnanti c'era Carlo Cattaneo, ordinario di meccanica razionale e allievo di Tullio Levi Civita, che per gli studenti del terzo anno faceva un corso di relatività generale chiaro ed essenziale. Mancava ancora la voce di un fisico teorico.

3. La fisica teorica nel mondo a cavallo della guerra

La grande fisica teorica si sviluppa con l'avvento della meccanica quantistica nella seconda metà degli anni venti: Heisenberg, Schroedinger, Dirac.

Cambia il modo di vedere il mondo, con la creazione di una nuova meccanica che riproduce la fisica classica alle distanze macroscopiche, e spiega i fenomeni atomici per i quali la fisica classica si era dimostrata insufficiente.

L'estensione ai sistemi relativistici, con infiniti gradi di libertà, i campi, è il passo successivo naturale. L'elettrodinamica è il sistema relativistico in natura noto a quei tempi. Lo sviluppo perturbativo della teoria presenta presto difficoltà in forma di divergenze legate al numero divergente di gradi di libertà ai grandi momenti, cioè alle piccole distanze. Il problema verrà formalizzato e messo sotto controllo solo alla fine degli anni quaranta da Feynman, Tomonaga, Schwinger e Dyson con la rinormalizzazione, cioè il riassorbimento delle divergenze nella ridefinizione per quantità infinite delle costanti della teoria, la massa e la carica. Lo sviluppo dell'elettrodinamica ebbe allora un impulso importante: tra i teorici italiani citati sopra vi lavorarono Borsellino, Budini e Caianiello anche se con attitudini diverse. A dispetto della chiarezza della formulazione il calcolo effettivo di grandezze come il momento magnetico anomalo del mu e dell'elettrone è tecnicamente complicato con complicazione che cresce violentemente con l'ordine. Si è perciò formata una comunità di teorici dedicati a questo tipo di problema, che, pur assottigliatasi col tempo, ancora oggi opera e produce numeri di grande utilità, ad esempio per i momenti magnetici dei leptoni. Tra i teorici pisani della giovane generazione va citato Ettore Remiddi, laureatosi con Radicati nel 1963, e per qualche tempo in collaborazione con lui Riccardo Barbieri, più giovane di quattro anni.

Nel 1933 Fermi proponeva una teoria del decadimento beta in analogia con l'elettrodinamica, cioè un nuovo esempio di teoria di campo applicata alla natura. Questa teoria descrive le interazioni deboli, e contiene i germi dell'unificazione elettro-debole operata dal modello standard. Nonostante essa fosse non rinormalizzabile, nel senso che le sue divergenze non erano riassorbibili da un numero finito di rinormalizzazioni, e nonostante essa contenesse una particella mai osservata, il neutrino ipotizzato da Pauli, essa conteneva di fatto l'idea di interazione vettoriale e di unificazione con l'elettromagnetismo, ed è stata la guida della ricerca sulle interazioni deboli per decenni. Fermi stesso non se ne occupò più, e passò agli studi sulla radioattività artificiale e alle applicazioni della fisica dei nuclei come la pila atomica. Tra i teorici italiani menzionati sopra Gianpietro Puppi ha contribuito (1948-49) con un lavoro che precorreva l'universalità delle interazioni deboli.

Nel 1935 Yukawa aveva ipotizzato l'esistenza di una particella scalare che mediasse l'interazione tra nucleoni (interazione forte) come il fotone media quella tra elettroni: la predizione era che la massa fosse uguale all'inverso del raggio delle forze nucleari. Il mesone (pione) fu trovato

nella radiazione cosmica nella seconda metà degli anni quaranta. La teoria perturbativa del sistema pione nucleone non andò mai molto lontano perché la costante di accoppiamento tornava dell'ordine di 1 rendendo lo sviluppo perturbativo privo di senso.

In aggiunta nel 1954 Landau mostrò che la serie perturbativa in QED è comunque priva di senso, perché ha una singolarità alle piccole distanze (polo di Landau) che rende la procedura mal definita.

Nel periodo fino al 1970 la comunità teorica si divide in corrispondenza alle diverse maniere di affrontare queste difficoltà. Una prima divisione era tra coloro convinti comunque che la soluzione fosse una teoria quantistica relativistica in termini di campi locali, e una più estrema che sosteneva che i campi sono inadeguati e che bisognava ragionare in termini di matrice S e di principi di auto-consistenza come il bootstrap (Chew). Per la seconda è l'era dei poli di Regge. Nella prima si cerca di riformulare la teoria in modo più generale (Lehman, Symanzik, Zimmermann, approccio assiomatico), o di assumere che la teoria di campo sia valida e trarre conseguenze da alcune proprietà di essa. Un esempio sono le relazioni di dispersione, basate sulla causalità. Un altro lo studio di conseguenze di principi di simmetria, in particolare di simmetria interna sull'esempio dello spin isotopico, inventato da Heisenberg nel 1932. I risultati sono la V-A per le interazioni deboli, (dopo la scoperta della violazione di parità (Lee Yang 1957), la CVC, la PCAC, la simmetria $SU(3)$ per gli adroni (Gell Mann). Paradigmatico è l'approccio di Gell-Mann, che astrae dal modello a quark liberi l'algebra delle correnti assumendo che la vera teoria (ignota) delle interazioni forti obbedisca la stessa proprietà. Con l'ipotesi di esistenza dei bosoni intermedi si arriva ad un passo dal modello standard: la difficoltà resta la non rinormalizzabilità di una teoria di bosoni vettori accoppiati a correnti non conservate come sono le correnti assiali. Emblematico il lavoro di Weinberg che nel 1967 introduce il modello standard (per i leptoni). Nel 1967 non si sapeva ancora quantizzare le teorie di gauge non abeliane. L'ipotesi di Weinberg fu che la teoria fondamentale avesse leptoni di massa zero, sì che la corrente assiale è conservata e la teoria fa senso. La massa viene da una rottura spontanea di simmetria alla Higgs, prodotta da un mesone scalare.

Nel 1973 'tHooft e Veltman riescono a quantizzare le teorie di gauge non abeliane, l'ipotesi di Weinberg si realizza, i bosoni intermedi vengono osservati sperimentalmente e negli anni successivi il modello standard viene confermato con grande precisione. Allo stesso tempo viene capito che anche le interazioni forti sono descritte da un modello di gauge, la QCD, che obbedisce l'algebra delle correnti astratta da Gell-mann dal modello a quark liberi.

Per dare un'idea di come la fisica abbia anche una dimensione sociologica, ricordo che nella primavera del 1970 c'era al CERN alla divisio-

ne teorica un seminario di Veltman sulla quantizzazione delle teorie di gauge: ad ascoltare c'era Jacques Prentki, che l'aveva organizzato, Ettore Remiddi, Benny Lautrup ed io e forse un borsista polacco. Un seminario sugli zeri sense-nonsense delle traiettorie di Regge tenuto due ore prima da Maurice Jacob aveva avuto più di duecento ascoltatori.

Va comunque osservato, per correttezza, che anche l'approccio di matrice S aveva prodotto risultati notevoli, come il modello di Veneziano, precursore delle stringhe.

Questo rapido schematico e incompleto panorama della fisica teorica nel dopoguerra è introdotto solo per dare un senso a quello che dirò sulla fisica teorica a Pisa.

Aggiungo che ho parlato solo di fisica teorica delle alte energie perché essa ha dominato a Pisa nel periodo che debbo coprire. Cose importanti, come la teoria dei superfluidi, la teoria della superconduttività, i progressi nella meccanica statistica sono state sviluppate nello stesso tempo. In Italia hanno avuto relativamente meno risonanza che in altri paesi. Un motivo è l'influenza di Fermi, che aveva fortemente influito sullo sviluppo della fisica in Italia: sulla costruzione del Sincrotrone di Frascati, della CEP a Pisa e sulla creazione dell'INFN. L'INFN ha avuto un effetto trainante: basta pensare alle integrazioni dello stipendio universitario date ai fisici universitari associati.

4. La fisica teorica a Pisa

Radicati viene a Pisa da Napoli nel novembre 1955. Si era occupato di fisica nucleare a Birmingham nel gruppo di Rudolph Peierls. Il suo contributo più significativo in quel periodo è un breve lavoro pubblicato sul *Phys. Rev.* in cui osserva che la relazione semplice trovata nell'ambito di un modello da tal Trainor fra transizioni elettromagnetiche e deboli, non era virtù specifica del modello di forze nucleari da lui usato, ma una conseguenza generale dell'invarianza sotto spin isotopico comune a tutti i modelli che obbediscono tale simmetria.

Appena arrivato Radicati imposta il corso di fisica teorica, con esercitazioni tenute da Modesto (Tino) Pusterla, allievo di Caldirola (Milano) e ingaggiato come assistente per la bisogna. L'esame include una prova scritta, consistente nella soluzione di problema di meccanica quantistica. Il primo che gli chiede la tesi è Sergio Rosati, e la tesi è un problema di fisica dei nuclei. L'anno successivo i laureandi sono Luigi Picasso con una tesi sul decadimento beta e Bruno Barsella con ancora una tesi sui nuclei.

Nel 1958 i laureandi sono Di Giacomo con una tesi sulla teoria dei pioni e dei nucleoni, Seeber (Knut) con una tesi sulle interazioni deboli, Fiorio con una tesi sulla cattura nucleare di muoni, nel 1959 Menotti con

una tesi sulle disuguaglianze di Wigner per le fasi di scattering. Questo elenco per mostrare che Radicati cercava di incamminare i laureandi su argomenti di interesse attuale. Mi fermo qui perché per un paio di anni Radicati va negli Stati Uniti, lasciando il corso ad Ernesto Corinaldesi con cui prepara la tesi Strocchi.

Radicati si occupa anche della biblioteca che viene aggiornata e adeguata alle esigenze della ricerca. L'addetto a quel tempo era il sig De Pasquale, di origine pugliese, che Radicati non sopportava per la sua verbosità e lentezza: ogni volta che De Pasquale usciva dallo studio di Radicati dopo aver discusso di biblioteca si sentivano calci stizziti contro la scrivania.

A quel tempo il dottorato non esisteva. Esisteva, come in tutte le Sezioni, un Corso di Perfezionamento in Fisica finanziato dall'INFN di cui l'ordinario teorico era di solito il direttore. Anche io l'ho diretto negli anni 70. Esso fu ben utilizzato: ci fu per due anni di fila un bellissimo corso di Bruno Touschek sulla teoria di campo e in particolare sulla Elettrodinamica Quantistica, un magnifico corso di Carlo Franzinetti, successo nella cattedra di Fisica Superiore a Marcello Conversi, trasferitosi a Roma alla fine del 1958, sulla teoria della misura (degli errori), un corso di Antonio Borsellino sulla Fisica dei Nuclei. C'erano quasi regolarmente seminari: ricordo un seminario di Tullio Regge sul lavoro sui poli pubblicato sul Nuovo Cimento nel 1959, un seminario di Steven Weinberg molto bello sulle possibili conseguenze cosmologiche di una ipotetica massa dei neutrini (a quel tempo si parlava di un solo neutrino), dei seminari sulla relatività generale di Lichnerowicz che erano organizzati in collaborazione con Carlo Cattaneo, e mi impressionarono molto, anche se io li capivo molto parzialmente, e alcuni seminari di membri del gruppo milanese di Caldirola (Prosperi, Loinger, Duimio) sulla dimostrazione del teorema ergodico in meccanica statistica.

Parallelamente a Radicati operava anche Elio Fabri, che di mestiere inizialmente lavorava al CEP (Calcolatrice Elettronica Pisana), all'ultimo piano dell'edificio, alla costruzione della calcolatrice. Teneva per incarico il corso di Fisica Superiore su argomenti che cambiavano di anno in anno, (aspetti dell'elettromagnetismo classico, meccanica analitica...). Fabri veniva da Roma, dove si era laureato con Ferretti e aveva prodotto una generalizzazione relativistica del plot di Dalitz per decadimenti in tre particelle (plot di Dalitz-Fabri). A Pisa organizzò un seminario in cui lui e noi giovani borsisti teorici presentavamo talks su argomenti vari, per lo più di natura generale, come il gruppo di Poincaré, alcuni aspetti della teoria della superconduttività, la formulazione della meccanica quantistica. Aveva iniziato a collaborare con Luigi Picasso, con cui poi avrebbe sistematizzato argomenti come la rottura spontanea della simmetria chirale, e laureato un certo numero di studenti, tra cui Cicogna e Vergara Caffarelli.

In conclusione c'era più o meno tutto quello che serviva a formare un ambiente scientificamente valido. Forse mancava un po' l'aspetto "bottega rinascimentale" cioè di discussione aperta, dove i più giovani potessero imparare il mestiere. Se un po' questo era dovuto al carattere riservato di Radicati, in molta parte viene dal fatto che i giovani erano tutti normalisti, e pertanto maestri. In altri gruppi italiani, come quello di Gatto a Roma o quello di Fubini a Torino l'effetto bottega era più vivo, e portava a una produttività maggiore per i giovani, almeno nell'immediato.

Il problema andava oltre i limiti locali. Come per la fisica sperimentale si stava passando dal lavoro impostato su base individuale a quello in gruppi più o meno grandi, in cui l'individuo tende a contribuire su alcuni aspetti legati ad una sua specialistica capacità tecnica.

Durante l'assenza di Radicati negli USA ognuno di noi ha preso iniziative diverse. Rosati ha continuato i suoi conti sugli ipernuclei, Menotti e Picasso sono stato in Gran Bretagna, io ho aumentato la mia collaborazione col gruppo di Gozzini, lavorando sulle risonanze a più fotoni e su alcuni aspetti del pompaggio ottico, e ho trascorso un anno a Saclay, nel gruppo di Anatole Abragam.

Al ritorno di Radicati dagli USA si laureano con lui altri studenti: Marcello Ciafaloni, Roberto Odorico, Ettore Remiddi, Ruggero Ferrari, Luca Caneschi, Piero De Mottoni, Marco Rosa-Clot, Federico Ferrini, Paolo Paolicchi.

Non andrò nei dettagli dell'attività delle persone citate, se non per cenni, ma di ognuno dei senior elencherò gli allievi, almeno quelli noti che hanno continuato nella ricerca, e il campo di attività. Delle varie linee citerò una selezione di lavori caratterizzanti. Seguirò l'ordine decrescente di età.

- Sergio Rosati: Fisica dei nuclei e materia nucleare.
Allievi: Sergio Fantoni, Adelchi Fabrocini, Rocco Shiavilla, Michele Viviani, Alejandro Kieviski, Laura Marcucci.
Lavori caratterizzanti:
 - S. Fantoni, S. Rosati, The Hypernetted-chain approximation for a fermion system. *Nuovo Cimento* 25A 593 (1975);
- Luigi Ettore Picasso: Teoria di campo. *Fenomenologia* (Fiorentini).
Allievi: Enzo Campani, Gianni Fiorentini, Enrico Iacopini, Enoe Guadagnini.
Lavori caratterizzanti:
 - E. Fabri, L. Picasso, Quantum Field theory and approximate symmetries *Physical Review Letters* 16, 408, 1966;
 - L. Bracci, G. Fiorentini, Mesic molecules and mu collisions fusion. *Phys. Rept* 86 169, 1982;
 - E. Guadagnini Baryons as solitons and mass formulae. *Nucl. Phys.* B236, 35, 1984;

- Bruno Barsella: Astronomia;
- Adriano Di Giacomo: Processi a molti fotoni, pompaggio ottico, modelli duali, teoria di campo e topologia, Lattice QCD.
Allievi: Ottavio Tarrini, Francesco Feo, Paolo Christillin, Kenichi Konishi, Paolo Rossi, Claudio Giannessi, Giampiero Paffuti, Fabio Marchesoni, Raffaele Tripiccone, Giuseppe Mussardo, Massimo Campostrini, Enrico Meggiolaro, Ettore Vicari, Michele Maggiore, Federico Farchioni, Alessandro Papa, Alessandra Feo, Mario Tri-
giante, Dario Martelli, Luigi Del Debbio, Biagio Lucini, Guido Cos-
su, Claudio Pica, Massimo D'Elia, Agostino Patella, Claudio Bonati.
Lavori caratterizzanti:
 - A. Di Giacomo On some phenomena related to the saturation of rotational resonances *Nuovo Cimento* 14, 1083 1959 and *Varen-
na XVII Corso Academic Press* (1962);
 - A. Di Giacomo, S. Santucci, Response to e.m. excitations in a quantized field formalism. *N.C.* 62 B 408 (1969);
 - Paolo Rossi Exact results in the theory of non abelian monopoles. *Phys. Rept.* 86, 317 (1982);
 - G. Di Cecio, G. Paffuti Some properties of renormalons in gauge theories. *Int. J. Mod. Phys A* 10 1449 (1995);
 - A. Di Giacomo, S. Fubini, L. Sertorio, G. Veneziano Unitarity in Dual Resonance Models, *Phys. Lett.* 33B 171 (1970);
 - M. Campostrini, A. Di Giacomo, H. Panagopoulos The topological susceptibility on the lattice *Phys. Lett.* B212 206 (1988);
- Pietro Menotti: Teoria di campo, Equazione di Bethe Salpeter, Gravitazione.
Allievi: Cristina Prati, Riccardo Barbieri, Sergio Cecotti, Sergio Caracciolo, Andrea Pelissetto, Camillo Imbimbo, Domenico Seminara, Luigi Cantini, Pier Paolo Peirano, Erik Tonni.
Lavori caratterizzanti:
 - di quelli di Barbieri sulla fenomenologia delle alte energie ha riferito lui stesso in questo convegno;
 - M. Ciafaloni, P. Menotti Asymptotic behaviour of form factors for some composite models *Phys. Rev.* 173, 1575 (1968);
 - R. Gatto, P. Menotti Commutators near the light-cone *N.C.* A7, 118, 1977;
 - G. Curci, P. Menotti, G. Paffuti Symanzik improved Lagrangian for Lattice Gauge Theories *Phys. Lett.* 130B 201, (1983);
 - S. Caracciolo, G. Curci, P. Menotti, A. Pelissetto Energy momentum tensor for Lattice gauge theories *Annals Phys.* 197, 119 (1990);
- Franco Strocchi: Teoria delle particelle Teoria assiomatica di campo.
Allievi: Giovanni Morchio.

Lavori caratterizzanti:

- J. Frolich, G. Morchio, F. Strocchi Higgs Phenomenon without symmetry breaking Phys. Lett. 97B 249 (1980);
- R. Barbieri, D.V. Nanopoulos, G. Morchio, F. Strocchi Neutrino masses in G.U.T. Phys. Lett. B90 91, (1980);
- Ruggero Ferrari: Teoria di campo.

Allievi: Giuseppe Curci.

Lavori caratterizzanti:

- G. Curci, R. Ferrari, An Alternative approach to the proof of unitarity in gauge theories. N.C. A35 273, 1976.

Tra i relatori esterni che hanno avuto impatto sull'attività del gruppo di Fisica teorica di Pisa voglio citare Bruno Touschek, che ha laureato su argomenti di meccanica statistica Emilio d'Emilio e Sandro Stringari.

Voglio accennare infine ad un problema che il dipartimento ha avuto e che, a mio parere, ha pesato non poco non solo sullo sviluppo della fisica teorica, ma anche su quello del Dipartimento stesso. La questione edilizia.

Per anni il dipartimento e la Sezione INFN hanno vissuto in parti separate: gli sperimentali alte energie e l'amministrazione INFN a San Piero, i teorici e la struttura della materia a Pisa in Piazza Torricelli. Questo ha creato un handicap culturale e organizzativo. È un problema che è finalmente risolto dopo molti sforzi di ogni tipo. A me è costato un mandato in Consiglio di Amministrazione dell'Università.

Un ultimo commento sullo status dei teorici nell'INFN. Fino alla seconda metà degli anni settanta la Commissione Nazionale per la fisica teorica (Commissione IV) aveva nell'Istituto un ruolo piuttosto marginale e rifletteva l'origine universitaria dell'Istituto. Solo alla fine degli anni settanta si è avuta una svolta, con l'istituzione di borse di scambio per teorici con grandi istituzioni estere, di posizioni di post-doc per teorici nelle sezioni e con un sostanziale incremento dei finanziamenti per mobilità. Il risultato è stato molto positivo, per Pisa e per tutti i teorici italiani. Va espressa gratitudine ad Antonino Zichichi, allora presidente dell'Ente per la sua apertura di idee e per la sua mancanza di complessi.

Quanto sopra ha permesso un numero di post-doc o persone a contratto, come Kenichi Konishi, Haralambos Panagopoulos, Bartolomeu Alles, Michele Mintchev, Stephan Olejnik, Jose Carmona, Valentin Zakharov, Giuseppe Lacagnina, David Boyd, Dmitri Antonov, Yuri Simonov, P.W. Stephenson, Manu Mathur, Yigit Gunduc.

Particle-physics phenomenology in and from Pisa. Years 1970-1993

Riccardo Barbieri*

1. Abstract

This is a personal recollection, i.e. not an historical reconstruction, of the activity and the contributions of people in or from Pisa on the phenomenology of particle physics as I view it. The period chosen is 1970-1993 for reasons explained in the text.

2. Introduction

This is a personal recollection, i.e. certainly not an historical reconstruction, of some contributions by people in and from Pisa to particle-physics phenomenology as I view it. I choose the period 1970-1993 because I do not remember being involved in or attending any discussion in particle-physics phenomenology before that time. As a student in the sixties.

I was only vaguely aware of the works of Luigi Radicati on $SU(6)$ [1] or on the magnetic moments of proton and neutron based on current algebra [2]. I only discovered a few years later, quite to my surprise, that it would have taken a train trip to Rome or to Florence to see the intense phenomenological discussions that were taking place there, led mostly by Nicola Cabibbo and Raul Gatto. This is the way things were going at that time, quite differently from now. Interpreting the intentions of the organizers of this Conference, the end date, 1993, of the period that I am considering is chosen so that at least a quarter of a century is left intact between these recollections and now.

3. Analytic calculations in qed by unitarity cuts

Towards the end of 1969 I was both lucky and glad to receive and accept the proposal by Ettore Remiddi, who was coming back to Pisa after two years at CERN, to calculate analytically the electron form factors at two

* Scuola Normale Superiore, and INFN, Pisa, Italy.

loops using dispersion relations [3]. There was an immediate phenomenological motivation: the theoretical and the experimental values of the Lamb shift in hydrogenic atoms were disagreeing and a previous numerical calculation of the 4th order charge radius, $F_0(0)$, was viewed as a possible source for the discrepancy. In fact, a few months before our analytic result, a new numerical calculation by Appelquist and Brodsky [4], that we confirmed, corrected the error and brought back the agreement between theory and experiment. Our motivation, however, was broader. We wanted to show the power of unitarity cut methods in doing higher order analytic calculations, only used before for the 4th order QED vacuum polarization by Kallen and Sabry [5]. This general idea of Ettore, who has kept giving highly significant contributions to the field with a number of students in Bologna and elsewhere, has proven right: unitarity cut methods, in a way or another, are a basic ingredient in most if not all the loop calculations that have been and are being made now of relevance to LHC. Ettore had also brought to Pisa his contacts with Tiny Veltman and his familiarity with Schoonschip, the program that Veltman had written a few years earlier to do algebraic manipulations of perturbative field theory amplitudes¹.

This gives me the opportunity to recall that Veltman visited the Scuola Normale in 1972 and gave a series of lectures on field theory. These lectures became a basis for the CERN yellow report that came out in 1973 under the title of Diagrammar with Gerard 't Hooft as coauthor.

4. Contributions to phenomenological qcd

At the end of 1973 the full Standard Model was formulated, including the idea of colour interaction by quarks [6] and the realization of asymptotic freedom [7], [8], both at the heart of QCD. As I am about to recall, some people from Pisa, mostly but not only taking advantage of extended visits to the CERN Theory Division, were soon able to contribute to QCD phenomenology.

4.1. Charmonium parti videnziate

Soon after the discovery of the J/ψ in November 1974, Appelquist, Politzer [9] and De Rujula, Glashow [10] identified the newly found resonance as a $c\bar{c}$ bound state: the narrowness of the observed state was understood as a

¹ Schoonschip was a key ingredient in our calculation. We used to make one-day trips from Pisa to Casalecchio, near Bologna, to process with the CNUCE computer our “job” consisting of a pretty huge deck of punched cards.

very characteristic manifestation of QCD. This allowed them to compute, only in terms of α_S , the ratio between the e^+e^- and the hadronic widths of the J/Ψ , including as well the hadronic width of the yet unobserved η_c .

Both the J/Ψ and the η_c are S-wave bound states. A few months later Gatto, Remiddi, who had moved in the meantime to Bologna as an assistant professor of Bruno Ferretti, and myself, a fresh fellow at CERN, could extend this observation to the P-waves, predicting the ratios of the hadronic widths $\Gamma(\chi_{c0}) : \Gamma(\chi_{c2}) : \Gamma(\chi_{c1}) = 15 : 4 : 1$; up to binding corrections and corrections of order α_S [11], [12]. It took a decade to start having relatively precise measurements of these widths, as well as that of the η_c . The current PDG numbers, within less than 10% errors, give $\Gamma(\chi_{c0}) : \Gamma(\chi_{c2}) : \Gamma(\chi_{c1}) = 12 : 2.4 : 1$. The relative order α_S correction to the hadronic versus electromagnetic annihilation rate ratio of pseudo-scalar quarkonium was computed later on by Remiddi, Giuseppe Curci, Emilio d'Emilio and myself [13]. This was my first collaboration with Beppe Curci. His contributions were crucial to master quite a few subtleties in this full one loop QCD calculation, some of them appearing for the first time in the literature. Starting from the next paragraph, I will have to return more than once to the works of Beppe, whom I vividly remember, and of some of his students.

4.2. Beyond the parton picture

In the second half of the seventies the study of partonic quarks rapidly evolved. It was possible to prove the universality of the so called mass singularities, allowing to compute hard QCD processes beyond the leading order. In particular the pointlike nature of QCD implied the existence of jets. Both problems received seminal contributions by Marcello Ciafaloni, Giuseppe Curci and Ken Konishi in several papers with various coauthors. In Ref. [14] Ken and coworkers set the stage for what became known as ‘jet-calculus’. The properties of quarks and gluons clustering in an overall color singlet system were studied in a number of papers by Marcello and coauthors [15{17]. Marcello was still working in Pisa at that time, although in the process of moving to Florence, where he established one of the most significant schools of QCD in the world. Beppe contributed to the study of the non-singlet case in a crucial work for next-to-leading order computations [18].

5. Weak decays of heavy quarks

The remarkable field theory knowhow of Giuseppe Curci emerged as well in his contributions to the QCD corrections to the weak decays of heavy quarks. Here it is worth mentioning both a paper in which the corrections to non-leptonic decays of charmed mesons were studied with collabo-

rators at CERN and in Rome [19] and later works about weak radiative decays of the B meson, starting in 1990 with several students in Pisa, Giancarlo Cella, Giulia Ricciardi and Andrea Vicerè [20]. The rigour and the precision of Beppe are manifest in these papers as well. It is interesting to notice that Giancarlo Cella and Andrea Vicerè followed Giuseppe in his growing interest for the VIRGO experiment a few years later.

6. The faith in supersymmetry

The growing number of successful tests of the SM diverted the attention of many people towards what became known as Beyond the SM (BSM) physics, with a special role played by supersymmetry, advocated among other things as a way to solve the so called “hierarchy problem” [21][23]. I have not been an exception to this movement, especially after having found, with Sergio Ferrara and Carlos Savoy, how it was possible to write down a general “softly broken” supersymmetric extension of the SM, starting from a spontaneously broken supergravity Lagrangian [24]. As a consequence, back to Pisa after a number of extended visits abroad and having moved from the SNS to the University in 1983, most of the students that I trained in the following decade were working on supersymmetry. Among them I recall Michelangelo Mangano [25], Giorgio Gamberini [26], Maurizio Frigeni [25, 27, 28], Francesco Caravaglios [25], [28], Alessandro Strumia [29], Francesco Vissani as well as some students who were affiliated with Institutions outside Pisa but spent significant amounts of time in the Physics Department in Piazza Torricelli, like Giovanni Ridolfi [26] or, even more so, Gian Giudice² [26, 27, 30, 31]. “Non supersymmetric” students have been Riccardo Rattazzi [32], who worked for his thesis on the role of some effective operators at the Z-pole, as well as Paolo Ciafaloni and Mauro Moretti, a student at Ferrara and at SISSA, both to be recalled in a while. Also Gia Dvali, who came at the end of 1993 as a fresh student from Tbilisi to spend two years with us as an INFN postdoc, stayed mostly away from supersymmetry, although not at the very beginning [29]. My interest in supersymmetry is quoted in this recollection of particle-physics phenomenology since I have always paid particular attention to the phenomenological nature of supersymmetry, as shown for example in some early works with Luciano Maiani [33], [34] or with Antonio Masiero [35].

² I do not have a full record of my students. It is likely, therefore, that I forget some of them in this list. I think that I quote all the students who have stayed in Universities or physics research Institutes and have discussed their Laurea or PhD thesis within 1993. The references should all concern works related to the thesis of some of them.

7. Neutrinos and axions

For different reasons neutrinos and axions too have been and still are relevant pieces of BSM physics. In Pisa with Gianni Morchio and Franco Strocchi we started wondering in 1979 about the origin of small neutrino masses in the context of Grand Unified Theories and of the breaking of $B - L$ [36]. We were in fact (and unfortunately) just anticipated by the inventors of the see-saw mechanism [37], [38]. Both this mechanism and the specific proposal of a gravitational origin of the see-saw operator [39] remain to be experimentally proven.

The solar neutrino problem was also at the center of our interest in Pisa. A special aspect of this problem emerged in the eighties when a correlation of the observed solar neutrino flux with the sunspot cycle seemed to emerge, possibly due to the interaction of a neutrino magnetic moment with the magnetic field residing in the convective zone of the sun. The problem was studied with Gianni Fiorentini, who had moved to the University of Cagliari but kept a strong relation with Pisa in those years, and with Mauro Moretti, proposing possible observations that could confirm or constrain this hypothesis [40], [41]. Related to that was the bound that I could derive with Rabi Mohapatra on the neutrino magnetic moment from the Supernova SN 1987a observations [42] as well as the work by Vittorio Castellani and Scilla degl'Innocenti, who could put a stronger limit by studying the effect of the neutrino magnetic moment on stellar evolution [43].

In my years as a CERN fellow in the seventies I shared an office with Sacha Dolgov.

My friendship with him since that time has given rise, together with a number of visits of Sasha to Pisa, also to two seminal papers on neutrinos, both active and sterile, in the early cosmology [44], [45].

I finally mention in this Section the proposal, made with Gianni Fiorentini and two experimental colleagues, Massimo Cerdonio and Stefano Vitale, to detect Dark Matter axions by way of the their interaction with the spin of the electron [46]. This proposal was judged unrealistic at that time, but is now at the basis of an intense R&D activity in Padova and Legnaro [47], even with partial help (and competition) by Pisa colleagues as well.

8. The electroweak precision tests and lep

Also because of the very strong participation of our experimental colleagues to the LEP experiments, the role that LEP could have played in particle phenomenology did not escape our attention since the beginning. Together with Guido Altarelli, and later with Francesco Caravaglios as well, we developed a scheme to analyze in an effective way the number of dif-

ferent measurements that were being made at the Z-pole, encapsulated in four dimensionless parameters, ε_i [48], [49]. The model independence of this method allowed its simultaneous application to the SM and to BSM physics.

In the SM case of primary interest was the indirect determination of the top mass, m_t , that required, however, the precise knowledge of the dependence of the ε_i on m_t . To this end the collaboration of the group of students of Giuseppe Curci, which included also Matteo Beccaria, with Paolo Ciafaloni and myself was again very fruitful [50]. The basic observation behind this calculation was that the leading m_t^{2n} corrections to any observable occurring at the n -th loop could be obtained in what we called the “gauge-less limit” of the SM, i.e. the pure Yukawa Higgs-top Lagrangian, a far simpler Lagrangian to work with than the full SM itself. I recall this because a similar limit of the SM was advocated by James Bjorken in the discussions I had with him at INFN in San Piero where he spent an extended period of time in 1990.

9. Conclusions and prospective

Already at the beginning of the period that I have considered here and, in fact, well before that, the experimental activity in particle physics in and from Pisa was strongly connected with the international research. This was less the case for particle-physics phenomenology, in particular and as a consequence with feeble interactions between experimentalists and theorists. This situation has gradually changed. Meanwhile the frontier of fundamental physics has broadened its horizons, with particle physicists speaking with cosmologists and astrophysicists at growing intensity. In my view to keep strengthening the interactions between experiment and theory in this enlarged context would be a way to honour the history of physics in Pisa and, more importantly, to maintain its high standards.

10. Acknowledgments

I am grateful to Vincenzo Cavasinni and Paolo Rossi for taking the initiative of organizing the Conference “Fisica e Fisici a Pisa nel 900”.

References

- [1] F. Gursey, L.A. Radicati, Phys. Rev. Lett. **13**, 1964, 173. Doi: 10.1103/PhysRevLett.13.173.
- [2] N. Cabibbo, L.A. Radicati, Phys. Lett. **19**, 1966, 697. Doi: 10.1016/0031-9163(66)90448-3.

- [3] R. Barbieri, J.A. Mignaco, E. Remiddi, *Nuovo Cim. A* **11**, 1972, 824. Doi: 10.1007/BF02728545.
- [4] T. Appelquist, S.J. Brodsky, *Phys. Rev. A* **2** (1970) 2293. Doi: 10.1103/PhysRevA.2.2293.
- [5] A.O.G. Kallen, A. Sabry, *Kong. Dan. Vid. Sel. Mat. Fys. Med.* **29**, 1955, no.17, 1. Doi: 10.1007/978-3-319-00627-7.
- [6] H. Fritzsch, M. Gell-Mann, H. Leutwyler, *Phys. Lett.* **47B**, 1973, 365. Doi: 10.1016/0370-2693(73)90625-4.
- [7] D.J. Gross, F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.* **30**, 1973, 1343. Doi: 10.1103/PhysRevLett.30.1343.
- [8] H.D. Politzer, *Phys. Rept.* **14**, 1974, 129. Doi: 10.1016/0370-1573(74)90014-3.
- [9] T. Appelquist, H.D. Politzer, *Phys. Rev. Lett.* **34**, 1975, 43. Doi: 10.1103/PhysRevLett.34.43.
- [10] A. De Rujula, S. Glashow *Phys. Rev. Lett.* **34**, 1975, 46.
- [11] R. Barbieri, R. Gatto, R. Kogerler, *Phys. Lett.* **60B**, 1976, 183. Doi: 10.1016/0370-2693(76)90419-6.
- [12] R. Barbieri, R. Gatto, E. Remiddi, *Phys. Lett.* **61B**, 1976, 465. Doi: 10.1016/0370-2693(76)90729-2.
- [13] R. Barbieri, E. d'Emilio, G. Curci, E. Remiddi, *Nucl. Phys. B* **154**, 1979, 535. Doi: 10.1016/0550-3213(79)90047-6.
- [14] K. Konishi, A. Ukawa, G. Veneziano, *Phys. Lett.* **78B**, 1978, 243. Doi: 10.1016/0370-2693(78)90015-1.
- [15] A. Bassetto, M. Ciafaloni, G. Marchesini, *Phys. Lett.* **83B**, 207, 1979. Doi: 10.1016/0370-2693(79)90687-78.
- [16] D. Amati, A. Bassetto, M. Ciafaloni, G. Marchesini, G. Veneziano, *Nucl. Phys. B* **173**, 1980, 429. Doi: 10.1016/0550-3213(80)90012-7.
- [17] A. Bassetto, M. Ciafaloni, G. Marchesini, A.H. Mueller, *Nucl. Phys. B* **207**, 1982, 189. Doi: 10.1016/0550-3213(82)90161-4.
- [18] G. Curci, W. Furmanski, R. Petronzio, *Nucl. Phys. B* **175**, 1980, 27. Doi: 10.1016/0550-3213(80)90003-6.
- [19] G. Altarelli, G. Curci, G. Martinelli, S. Petrarca, *Nucl. Phys. B* **187**, 1981, 461. Doi: 10.1016/0550-3213(81)90473-9.
- [20] G. Cella, G. Curci, G. Ricciardi, A. Vicere, *Phys. Lett. B* **248**, 1990, 181. Doi: 10.1016/0370-2693(90)90036-6.
- [21] L. Maiani, in *Proceedings of the Summer School on Particle Physics*, Gif-sur-Yvette, 3-7 Sep 1979. M. Davier, L. Maiani, C.A. Savoy, J. Scherk, IN2P3, Paris, pp. 1-52.
- [22] M.J.G. Veltman, *Acta Phys. Polon. B* **12**, 1981, 437.

- [23] E. Witten, Nucl. Phys. B **188**, 1981, 513. Doi: 10.1016/0550-3213(81)90006-7.
- [24] R. Barbieri, S. Ferrara, C.A. Savoy, Phys. Lett. **119B**, 1982, 343. Doi: 10.1016/0370-2693(82)90685-2.
- [25] R. Barbieri, F. Caravaglios, M. Frigeni, M.L. Mangano, Nucl. Phys. B **367**, 1991, 28. Doi: 10.1016/0550-3213(91)90040-5.
- [26] R. Barbieri, G. Gamberini, G.F. Giudice, G. Ridolfi, Nucl. Phys. B **296**, 1988, 75. Doi: 10.1016/0550-3213(88)90381-1.
- [27] R. Barbieri, M. Frigeni, G.F. Giudice, Nucl. Phys. B **313**, 1989, 725. Doi: 10.1016/0550-3213(89)90404-5.
- [28] R. Barbieri, M. Frigeni, F. Caravaglios, Phys. Lett. B **258**, 1991, 167. Doi: 10.1016/0370-2693(91)91226-L.
- [29] R. Barbieri, G.R. Dvali, A. Strumia, Nucl. Phys. B **391**, 1993, 487. Doi: 10.1016/0550-3213(93)90080-9.
- [30] R. Barbieri, G.F. Giudice, Nucl. Phys. B **306**, 1988, 63. Doi: 10.1016/0550-3213(88)90171-X.
- [31] G.F. Giudice, A. Masiero, Phys. Lett. B **206**, 1988, 480. Doi: 10.1016/0370-2693(88)91613-9.
- [32] R. Rattazzi, Z. Phys. C **40**, 1988, **605**. Doi: 10.1007/BF015602329.
- [33] R. Barbieri, L. Maiani, Phys. Lett. **117B**, 1982, 203. Doi: 10.1016/0370-2693(82)90547-0.
- [34] R. Barbieri, L. Maiani, Nucl. Phys. B **224**, 1983, 32. Doi: 10.1016/0550-3213(83)90311-5.
- [35] R. Barbieri, A. Masiero, Nucl. Phys. B **267**, 1986, 679. Doi: 10.1016/0550-3213(86)90136-7.
- [36] R. Barbieri, D.V. Nanopoulos, G. Morchio, F. Strocchi, Phys. Lett. **90B**, 1980, 91. Doi: 10.1016/0370-2693(80)90058-1.
- [37] T. Yanagida, Conf. Proc. C **7902131**, 1979, 95.
- [38] M. Gell-Mann, P. Ramond, R. Slansky, Conf. Proc. C **790927**, 1979, 315 [arXiv:1306.4669 [hep-th]].
- [39] R. Barbieri, J.R. Ellis, M.K. Gaillard, Phys. Lett. **90B**, 249, 1980. Doi: 10.1016/0370-2693(80)90734-0.
- [40] R. Barbieri, G. Fiorentini, Nucl. Phys. B **304**, 1988, 909. Doi: 10.1016/0550-3213(88)90661-X.
- [41] R. Barbieri, G. Fiorentini, G. Mezzorani, M. Moretti, Phys. Lett. B **259**, 1991, 119. Doi: 10.1016/0370-2693(91)90144-F.
- [42] R. Barbieri, R.N. Mohapatra, Phys. Rev. Lett. **61**, 1988, 27. Doi: 10.1103/PhysRevLett.61.27.

- [43] V. Castellani, S. Degl’Innocenti, *Astrophys. J.* **402**, 1993, 574. Doi: 10.1086/172159.
- [44] R. Barbieri, A. Dolgov, *Phys. Lett. B* **237**, 1990, **440**. Doi: 10.1016/0370-2693(90)91203-N.
- [45] R. Barbieri, A. Dolgov, *Nucl. Phys. B* **349**, 1991, **743**. Doi: 10.1016/0550-3213(91)90396-F.
- [46] R. Barbieri, M. Cerdonio, G. Fiorentini, S. Vitale, *Phys. Lett. B* **226**, 1989, 357. Doi: 10.1016/0370-2693(89)91209-4.
- [47] R. Barbieri *et al.*, *Phys. Dark Univ.* **15**, 2017, 135. Doi: 10.1016/j.dark.2017.01.003 [arXiv:1606.02201 [hep-ph]].
- [48] G. Altarelli, R. Barbieri, *Phys. Lett. B* **253**, 1991, 161. Doi: 10.1016/0370-2693(91)91378-9.
- [49] G. Altarelli, R. Barbieri, F. Caravaglios, *Nucl. Phys. B* **405**, 1993, 3. Doi: 10.1016/0550-3213(93)90424-N.
- [50] R. Barbieri, M. Beccaria, P. Ciafaloni, G. Curci, A. Vicere, *Nucl. Phys. B* **409**, 1993, 105. Doi: 10.1016/0550-3213(93)90448-X.

Astrophysics in Pisa from the 1960s to the 1980s: personal recollections

Giuseppe Bertin*

I wish to thank the organizers of the Conference “Fisica e Fisici a Pisa nel Novecento” (Pisa, 7-9 November 2017) for inviting me to describe the role of astrophysics in Pisa in the three decades preceding the 1990s. In fact, I arrived in Pisa as a student in the fall of 1970. My transition from studying to doing research was guided by reading the two books “Principles of stellar dynamics” (1942) and “Ellipsoidal figures of equilibrium” (1969), by Subrahmanyan Chandrasekhar, and the two long articles “Structure and dynamics of galaxies,” by Lo Woltjer, and “Co-operative phenomena in stellar dynamics,” by Donald Lynden-Bell (the two articles are published in 1967 in Volume 9 of the AMS Lectures in Applied Mathematics, edited by Jürgen Ehlers), at the suggestion of my thesis advisor, Luigi A. Radicati. With several leaves of absence related to periods spent in the US, I have been in the faculty of the Scuola Normale from 1978 to the spring of 2001, when I moved to the Università degli Studi di Milano.

Therefore, I am very happy to try to reconstruct the general picture by means of personal recollections. As will be clear from my exposition, I will say very little on what happened in the 1960s and earlier; in turn, in the final part of this paper, I will provide some highlights on selected modern developments in astrophysics, just because, here and there, even if the actual work that led to these beautiful discoveries was carried out outside Pisa, the contribution of scientists educated in Pisa or the roots in topics that characterize the science done in Pisa in the 1970s and 1980s can be easily recognized. In my effort there may be some inadvertent omissions, for which I ask to be excused.

* Università di Milano.

1. Preliminary remarks

1.1. The unique position of astrophysics, with respect to mathematics, astronomy, and physics

In our country (but not only in our country), as a discipline, astronomy used to be closer to mathematics than to physics. Probably this was the long-term heritage of the perception that astronomy is best represented by celestial mechanics. Of course, this partial picture had already been overcome by many scientists, such as Galileo, Newton, Maxwell, Kelvin, Poincaré, or Fermi, just to name a few. And it is recognized that historically astronomical phenomena have provided the inspiration for important progress in physics. But often, before the 1960s, research activity in Italian observatories had only little appeal to physicists because it was limited to a patient collection and classification of observational data.

It is commonly thought that astrophysics is not really a discipline part of the general field of physics. The main reason for this distinction is that the paradigm of formulating a theory as a quantitative framework for a certain class of phenomena to be tested in laboratory experiments fails in the astrophysical context (with the possible exception of space physics). In fact, we cannot make controlled experiments on the astrophysical scale, we can only make observations. Therefore, why should physicists be interested in doing research in astrophysics?

A second point that may be at the basis of a general uneasiness of physicists when confronted with astronomical phenomena is the widespread belief that “fundamental physics” (commonly identified with “physics of elementary interactions and microscopic phenomena”) stands at the top of the physics ladder. In reality, understanding elementary interactions is an important and wonderful prerequisite, but in general does not answer the questions posed by the collective behavior of complex systems. The physics of macroscopic phenomena is often identified as applied physics or phenomenological physics and thought to lack the depth of the issues addressed by studies of elementary interactions. Most of the questions raised by astrophysical phenomena refer to mechanisms that determine the behavior of macroscopic systems.

Not surprisingly, one topic that, as a sort of exception, has often attracted the attention of physicists is that of cosmology, because of the presumption to be able to set out an extremely simple model capable of predicting from first principles the evolution of the entire universe. For this optimistic but a priori unjustified approach the term “precision cosmology” has become quite popular.

All of the above left many physicists without much curiosity toward the cosmos. Yet many physicists, especially after World War II, became

attracted by astronomy and many astronomers became attracted by physics. Just to set the scene, below I give a list of influential scientists in Italy, among whom we may recognize the variety of feelings with respect to the relation between astronomy and physics. The list is certainly incomplete; other names will be mentioned later in this presentation. In approximate chronological order, I wish to recall: Gino Cecchini (1896-1978), Francesco Zagar (1900-1976), Gilberto Bernardini (1906-1995), Beppo Occhialini (1907-1993), Edoardo Amaldi (1908-1989), Guglielmo Righini (1908-1978), Nicolò Dallaporta (1910-2003), Livio Gratton (1910-1991), Piero Caldirola (1914-1984), Mario Girolamo Fracastoro (1914-1994), Leonida Rosino (1915-1997), Alberto Masani (1915-2005), Marcello Conversi (1917-1988), Giampietro Puppi (1917-2006), Aldo Kranjc (1919-1994), Margherita Hack (1922-2013), Carlo Castagnoli (1924-2005), Marcello Ceccarelli (1927-1984), Livio Scarsi (1927-2006), followed by Bruno Bertotti, Alberto Bonetti, Riccardo Giacconi, Alfonso Cavaliere, Giuseppe Vaiana, Giancarlo Setti, Alessandro Braccesi, Giorgio Sironi, Francesco Melchiorri, Guido Pizzella, Remo Ruffini, Giuseppe Cesare Perola, Guido Chincarini, Giancarlo Noci, Nino Panagia, Duccio Macchetto, Cesare Chiosi, Nanni Bignami, Massimo Tarengi, Piero Benvenuti... Note that many of the physicists at some point attracted by astrophysics come from studies of cosmic rays or plasma physics.

1.2. The beauty and the surprises of astrophysics

In turn, a number of surprising discoveries, made in the 1960s and 1970s, demonstrated that many astrophysical phenomena are fantastic sources of inspiration, popping up often completely unexpected while astronomical technology progresses, with a tremendous impact on physics. Our perception of key concepts in fundamental physics may be shaken by some astronomical observations.

Here I refer to only four of the most intriguing discoveries that literally revolutionized our picture of the physical world: the discovery of the Cosmic Microwave Background Radiation, the discovery of pulsars soon identified as neutron stars¹, the discovery of dark matter (still defying a proper identification), and the apparent deficiency of neutrinos from the Sun.

The concept of surprises in astrophysics is somewhat different from that of the title of the book by Rudolf Peierls “Surprises in Theoretical Physics” (Princeton University Press, 1979). In astrophysics, we just

¹ The existence of neutron stars had been conjectured by Baade and Zwicky in 1934, only two years after the discovery of the neutron. The binary pulsar discovered by Hulse and Taylor in 1974 eventually turned out to provide the first evidence for the emission of gravitational waves by an astrophysical system (see Sect. 4).

have to wait (but alert, with better and better instrumentation, and well-planned observational projects), and surprises will shine on us.

A beautiful example of this general idea is the detection of 12 neutrinos (Kamiokande II) and 8 neutrinos (IMB) from Supernova SN1987a, exploded at a distance of approximately one hundred and fifty thousand light years from us, in the Large Magellanic Cloud. An even more beautiful example is given by the announcement on October 16, 2017 of the observations of the event known as GW170817 (LIGO/VIRGO collaboration, with the electromagnetic counterpart observed in many different wavebands with telescopes from the ground and from space).

A key mysterious aspect of physics that is prominently and continually brought to our minds by astrophysical phenomena is gravitational interaction. In his essay “Science et Méthode” (1908) Henri Poincaré mentions the possible existence of “matière obscure”:

«Mais alors, ce que nous donnerait la méthode de lord Kelvin, ce serait le nombre totale des ´etoiles, en y comprenant les ´etoiles obscures”...» Referring to a picture of a globular cluster and of a spiral galaxy, in chapter 7 of the first volume of *The Feynman Lectures on Physic* (Addison-Wesley 1963) we read: «If one cannot see gravitation acting here, he has no soul [...]. Of course we cannot prove that the law here is precisely inverse square, only that there is still an attraction...» All these statements are dated well before the discovery of dark halos in galaxies. Nowadays we commonly discuss the properties of dark matter and, in this century, of dark energy, but, unfortunately, we do not even know what we are talking about.

1.3. The 1960s in Pisa: a welcome intuition

In Pisa some scientists, in particular, Luigi A. Radicati (Università di Pisa 1955-1962; Scuola Normale Superiore 1962-), soon realized the great potential and the beauty of astrophysics, its major force in generating progress in physics, and its power in challenging what we call fundamental physics². As a result, seeds were laid in several research areas that even today are at the forefront of scientific research. The seeds were planted with the collaboration of a number of top scientists invited from outside Pisa, often from abroad, to give a seminar, or a series of lectures, or to make a relatively long scientific visit, or to supervise a thesis or a doctoral thesis project. Pisa was able to attract top scientists and became an enjoyable site for interdisciplinary exchanges. Many young scientists, who started their scientific career in Pisa, then moved to key institutes all

² Some of the following notes are based on material presented at a meeting in honor of Luigi Radicati at the Accademia Nazionale dei Lincei in Rome on December 9th, 2010.

over the world; some stayed away becoming leaders in their own field, others returned or at least kept contact with their Alma Mater.

A precursor of the exciting scientific activity that was soon to take place in Pisa was an international workshop on the physics of pulsars held at the Scuola Normale in the late 1960s, with the participation, among others, of eminent scientists, such as Subrahmanyan Chandrasekhar, Freeman Dyson, Thomas Gold, and David Pines, and of younger physicists, such as Bruno Coppi (from 1968 professor at MIT) and Franco Pacini (Arcetri).

2. The 1970s and the 1980s: a variety of research topics

2.1. Classical astronomy

The structure of telescopes and of the main types of astronomical instruments, the definition of the basic reference frames and coordinates, and the monitoring of planets and nearby objects are all subjects that make a natural introduction to astronomy. To interested students, Elio Fabri and Bruno Barsella offered a course in astronomy and the possibility of using simple techniques to make elementary observations from the dome of the Specola. I remember participating in the simple observation of the transit of Mercury over the solar disk. Curiously, by means of much more sophisticated techniques, the transit of planets in front of nearby stars is one of the major hot topics that is currently leading to the discovery of a large number of extrasolar planets.

The study of celestial mechanics, the role of resonances in the dynamics of the solar system, planetary astrophysics, planetary rings, and asteroids was greatly promoted by Bepi Colombo (normalista, who became full professor of applied mechanics in the faculty of Ingegneria in 1955 in Padova, and led several advanced projects and collaborations in the US), also by means of a course taught at the Scuola Normale. He had a pioneering role not only in these classical topics, which have reached top interest in modern astrophysics (in view of the current investigations of extrasolar planets), but also in the idea of relating observed morphologies in planetary rings to the presence of density waves (see Subsect. 2.4 and the article published in *Nature* in 1976 by Colombo, Goldreich, and Harris).

In relation to the fundamental issues of integrability and chaos in theoretical mechanics, I wish to recall the scientific visits and lectures by Louis Michel (IHES) and Donald Lynden-Bell (IoA) and especially the Fermi Lectures by Jürgen Moser (1981, *Integrable hamiltonian systems and spectral theory*) and Vladimir I. Arnold (1990, *The theory of singularities and its applications*).

A group working on celestial mechanics and planetary sciences was soon formed in Pisa (in particular, in the Department of Mathematics).

2.2. Plasma physics, plasma astrophysics, X-ray astrophysics

The birth and growth in Pisa of plasma physics and plasma astrophysics is certainly to be related to the influence of Bruno Coppi and Claudio Chiuderi (Arcetri), also as a result of the courses they taught at the Scuola Normale. But we should not ignore the impact of the scientific visits by Lo Woltjer (who, in earlier times, had worked on fundamental conservation laws in ideal MHD) and Bruno Rossi (in relation to his studies of the solar wind and to the discovery of X-ray binaries and of the intracluster medium in clusters of galaxies). Later, an important scientific visit by Craig Sarazin (UVA) brought further interest in the study of the intracluster medium, probably one of the best environments for studies of plasma physics on the grand scale of clusters of galaxies; at present, it is thought that most of the visible mass in clusters is in the form of such hot plasma, with a temperature of several keV. Of course, one primary source of interest in plasma astrophysics is the study of the Sun, which was promoted by collaborations with scientists based in Arcetri.

This wide variety of topics, all centered on the investigation of collective phenomena in ionized gases, with phenomena and mechanisms that relate the behavior of laboratory plasmas to the behavior of systems on the scale of megaparsecs and beyond, stirred an enthusiastic response among young scientists in Pisa, in particular Francesco Pegoraro, Pierluigi Veltri, and Giorgio Einaudi, who soon promoted the formation at the national level of a small, but very active community, with regular meetings where ideas and scientific results were exchanged. Among these, I should mention the workshops held at Pisa (1980), Firenze and Elba (1981), San Miniato (1983), Torino (1985), S. Angelo di Drapia (1986), Padova (1987), San Gimignano (1988), and Loiano (1990).

2.3. Collective phenomena in fluid dynamics

The paradigm of equilibrium and stability, with the counterpart of symmetry and symmetry break, is a general framework for the study of collective mechanisms in plasma physics. It has a long-term tradition in classical hydrodynamics. Modern ideas and experiments on the Bénard problem, the formation of convection cells of different morphologies in a fluid heated from below, were explored.

Important lectures on related subjects were given by Marzio Giglio (Milano) and Albert Libchaber (École Normale Supérieure, before moving to the US).

A major issue in hydrodynamics, the contrast between modal and nonmodal behavior of complex systems, can be traced back to the work by Orr (1907), Prandtl (1922), and Heisenberg (1924). In this context, C.C. Lin (author of the classical monograph *The theory of hydrodynamic*

stability, published by Cambridge University Press in 1955) resolved a major difficulty encountered by Heisenberg. As will be briefly described in the next subsection, Chia-Chiao Lin made an extended visit in Pisa lecturing on these themes applied to the problem of the excitation and maintenance of large-scale spiral structure in galaxies.

2.4. Gravitation and cosmology

One of the lines of research that have fascinated theoretical physicists and astrophysicists is the possibility of developing a thermodynamical description of self-gravitating systems. There still are stumbling blocks that prevent us from doing so in a satisfactory way even under idealized conditions. Yet, some remarkable points of interest and clues suggest that the topic is not necessarily hopeless. Here we may refer to the Fermi Lectures by Freeman Dyson (1970, *Neutron stars and pulsars*), to the collaboration that led to frequent visits by Louis Michel, on the relation between bifurcations in the dynamics of self-gravitating rotating fluids and second-order phase transitions, and to the lectures by Donald Lynden-Bell on the statistical mechanics of self-gravitating systems and the curious phenomenon of the gravothermal catastrophe (for the latter phenomenon, today we have evidence not only from numerical experiments, but especially from observations of some globular clusters). On the strictly theoretical side, an important role was played by the visits by Walter Thirring, and, on the issue of associating the proper entropy to black holes, I should recall the lectures by Dennis Sciama.

General relativity naturally brings us to cosmology. Carlo Cattaneo returned to Pisa to teach a course at the Scuola Normale in general relativity and cosmology. Then I should mention the Fermi Lectures by John Wheeler (1975, *Gravitation and the universe*) and by Jerry Ostriker (1988, *Development of large-scale structure in the universe*; notes prepared by Roberto Saglia and Massimo Stiavelli)³.

The regularity of the morphology of many complex stellar systems, especially on the scale of galaxies, raises well-defined, difficult questions, some of which have kept astronomers and physicists without a satisfactory answer for several decades. A proper answer to some key questions may require invoking the participation of coherent collective phenomena, often quite subtle. A special focus on the interpretation of large-scale grand-design spiral structure in galaxies in terms of global self-excited modes was given in the lectures by C.C.

³ Massimo Stiavelli obtained his Perfezionamento in 1986 in Pisa with a thesis on "Stellar dynamical models and statistical mechanics of elliptical galaxies;" Roberto P. Saglia obtained his Perfezionamento in 1990 in Pisa with a thesis on "Dark matter in elliptical galaxies."

Lin, during an extended visit made in Pisa as part of a twenty-year-long collaboration on the subject (see the monograph *Spiral structure in galaxies: A density wave theory*, published by The MIT Press in 1996). In fact, C.C. Lin and his wife happened to be in Pisa in the spring of 1989, when events in Tiananmen Square precipitated a very serious crisis in Beijing (C.C. Lin was particularly concerned about these events, having participated, with T.D. Lee, in the first contacts for the normalization of relations between China and the US). Ennio De Giorgi was also fascinated by the structure and morphology of stellar systems, and contributed by means of a number of informal conversations.

Renzo Sancisi visited regularly, providing input from the empirical side of radioastronomy; in this respect, one question he raised is why frequently galaxy disks are observed to be warped, breaking the natural planar symmetry, even if in the 1960s applied mathematicians had proved that self-gravitating disks are stable with respect to bending waves⁴. He also often emphasized the frequent lopsided character of galaxy disks, which may be related to the onset of dipolar modes. Renzo Sancisi lectured on the beautiful diagnostics offered by the study of the 21 cm emission from interstellar atomic hydrogen (a line produced by a hyperfine transition related to spin alignment); at that time, Italy had no experts in that research area (Renzo Sancisi worked in Groningen; Stefano Casertano⁵ and Roberto Saglia, as Pisa students, spent many months in Groningen to learn the difficult art of acquiring and interpreting 21 cm radioastronomical data).

Another regular visitor from Groningen was Tjeerd van Albada (for many years he spent at the Scuola Normale at least one month each year). In the 1970s the finding of flat rotation curves in disk galaxies had suggested the existence of dark matter halos, but the issue was confused by the fact that the claim of the need for a dark halo was often based on the flatness of the observed rotation curve, regardless of the spatial extent of the kinematical data with respect to the distribution of luminous matter. The decisive proof that a dark halo is needed came by recognizing the role of the radio data (21 cm line) that often happen to sample a region of space much larger than that occupied by the gravitationally dominant stellar disk. Such decisive proof is given in a landmark article published by Tjeerd van Albada, John Bahcall, Kor Begeman, and Renzo

⁴ It turned out that the “theorem” proved in the 1960s did not include the presence of a dark halo (dark matter had not been discovered yet); in the 1980s, disk-halo interaction was shown to be able to make a disk flap, much like a flag in the wind.

⁵ Stefano Casertano obtained his Perfezionamento in 1983 in Pisa with a thesis on “Dynamics of the outer regions of spiral galaxies.”

Sancisi in 1985, on the rotation curve of NGC 3198. The excitement produced by this discovery had a major impact in Pisa.

Other themes that found fertile ground in Pisa are that of galaxy scaling laws⁶ and the topic of the formation of galaxies. From the observational side, the main ideas were inspired by the collaboration with Renzo Sancisi. From the theoretical side, they were inspired by the studies of Donald Lynden-Bell on the process of incomplete violent relaxation in collisionless stellar systems and especially by the N-body simulations of collisionless collapse performed by Tjeerd van Albada. A satisfactory development that took place in Pisa was the construction of analytically simple, physically justified distribution functions able to incorporate the results of incomplete violent relaxation; these distribution functions generate global self-consistent models able to match the observed properties of bright elliptical galaxies (i.e., to explain the observed $R1/4$ luminosity law). In addition, the capability of making reliable simulations of the collisionless nonlinear evolution of stellar systems was soon mastered by Massimo Stiavelli⁷.

2.5. Gravitational waves

The two decades described in this section also saw the growth of ideas related to the detection of gravitational waves, a topic that stands today at the top of the current interest of physicists and astrophysicists. Here I wish to mention a set of three articles on electromagnetic detectors, written by Emilio Picasso (CERN; later he became Director of the Scuola Normale), Francesco Pegoraro, Luigi Radicati, Philippe Bernard, and Enrico Iacopini (formerly a student in Pisa, was at CERN at that time) in the period 1978-1979, and the work started by Adalberto Giazotto and collaborators in the 1980s, which eventually led to the approval of the VIRGO project in 1993.

2.6. Stellar structure

In Italy, studies of stellar structure and evolution started in the 1960s. In that decade, Vittorio Castellani ran star-model computations at the Pisa computer center CNUCE. Later he started to visit regularly and taught a

⁶ Curiously, in Pisa in the fall of 1977, during my PhD thesis defense, I was asked if any scaling relations were known to govern the global properties of galaxies. I did not know how to answer, because the Tully-Fisher relation for spiral galaxies was being discovered at that time and the Fundamental Plane relation for elliptical galaxies was to be discovered ten years later.

⁷ A rather complete description of the themes and concepts mentioned in this subsection and of recent developments related to these issues can be found in the monograph "Dynamics of Galaxies," 2nd edition, published by Cambridge University Press in 2014.

course on the subject at the Scuola Normale. Eventually, in the late 1980s, he joined the faculty of the Università di Pisa and a group working on stellar structure and evolution was formed at the Department of Physics.

2.7. Matter in very strong magnetic fields

As a theme suggested by the discovery of pulsars and related to the international workshop mentioned at the end of Subsect. 1.3, a line of research addressed the study of matter in very strong magnetic fields, developed in a series of articles written by Biswarup Banerjee, Dan Constantinescu, and Pavel Reháč (also in collaboration with Giovanni Moruzzi).

2.8. Interstellar medium

Mayo Greenberg was an American astrochemist who was attracted in 1975 by Henk van de Hulst (the scientist who had predicted the existence of the 21 cm line of atomic hydrogen) to move to Leiden and to take there the chair for laboratory astrophysics. His scientific interests ranged from comets to astrobiology. One important contribution he made was in the study of interstellar dust. On this topic, Bruno Barsella started a collaboration with him, which also brought him to visit Pisa. Today the study of the interstellar dust and of the interstellar medium in general is one of the key subjects of modern astrophysics. In the 1980s, on the general problem of the study of interstellar medium, star formation, and chemical evolution of galaxies, Federico Ferrini started a collaboration with Steve Shore and Francesco Palla (Arcetri). Steve Shore joined the faculty of the Università di Pisa at the beginning of this century.

2.9. Major initiatives

Scientists in Pisa were exposed to interactions with science leaders that had major institutional roles or led major technological initiatives from the ground and from space. For example, we may recall that Lo Woltjer had been Director General of the European Southern Observatory in the period 1975-1987 and that he initiated the construction of VLT, still one of the largest and most successful optical telescopes in the world. Bepi Colombo had an extraordinary ingenuity for space initiatives; he promoted the construction and deployment of Tethered Satellites and played a major role in the Mariner 10 mission to Mercury, in the early 1970s, and in the Giotto mission to comet Halley, in the 1980s. Bruno Rossi had a leading role in space plasma physics missions. The Explorer 10 mission that Bruno Rossi promoted led to the discovery of the magnetopause (the area of plasma interaction between the solar wind and the Earth magnetosphere); in addition, he is recognized as the father of X-ray as-

tronomy, with the 1962 discovery of the first extrasolar source, Sco X-1, and later of the intracluster medium in clusters of galaxies.

Pisa was also visited by Lyman Spitzer, the founding Director of Project Matterhorn (later renamed Princeton Plasma Physics Laboratory) and an early proponent of the Hubble Space Telescope. The Hubble Space Telescope (launched in 1990) is still in operation, but will soon be surpassed by the James Webb Space Telescope, a 6-meter class telescope, optimized for observations between long optical wavelengths and the mid-infrared, to be launched in the spring of 2019 and placed in the vicinity of the Sun-Earth Lagrangian point L2, at a distance of about one and a half million kilometers: Massimo Stiavelli (mentioned in Subsect. 2.4) is Mission Head of JWST.

2.10. Contacts and collaborations

As should be clear from the above description, research in astrophysics flourished in Pisa as a result of a large number of collaborations and exchanges with top institutions throughout the world. A full list would be difficult to make. Here I wish to mention only a few: the European Southern Observatory (with headquarters in München and telescope facilities in Chile), the European Space Agency, the Space Telescope Science Institute (Baltimore, MD), and, on the academic side, the Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, MA; especially, the Department of Applied Mathematics and the Department of Physics), the Institute for Advanced Study (Princeton, NJ), and the Kapteyn Astronomical Institute (Groningen, The Netherlands).

3. The 1990s: some sprouts are developing

An incomplete but interesting picture of some sprouts from the seeds planted in the period 1960s-1980s is provided by a booklet “Seminario di Astrofisica 1994” (published by the Scuola Normale), collecting the contributions by 13 young Pisa scientists (graduate students and young researchers, some with well-developed international collaborations, who lectured on their research in progress) covering a broad spectrum of topics. Following the order of presentation, the contributions started with Stefano Braccini (*Detection of gravitational waves by means of laser interferometers*; lecture given on January 28) and continued with Maurizio Cipollina (*Massive black holes inside galaxy cores*), Thomas Toniazzo (*Cooling flow models for the X-ray emission from elliptical galaxies*), Massimo Stiavelli (*Nuclear activity in galaxies*), Enrico Vesperini (*Binary stars and dynamical evolution of globular clusters*), Francine Leeuwin (*The Perturbation Particles method applied to stellar dynamics*), Gio-

vanni Losurdo (*VIRGO sensitivity to low frequency gravitational waves*), Lapo Casetti (*Chaotic dynamics in high-dimensional Hamiltonian systems*), Federico Ferrini (*Non-linear multipopulation models for galactic evolution*), David A. Smith (*Recent progress in gamma ray astronomy (100 MeV to 10 TeV)*), Marco Velli (*Supersonic outflows and accretion in stellar winds*), Daniel O'Connor (*Clusters of galaxies and the anti-proton lifetime*). The last contribution is by Paolo Farinella (*Where do meteorites come from?* lecture given on May 27). All these scientists but three (Francine Leeuw, David A. Smith, and Daniel O'Connor) obtained their Laurea and/or their PhD in Pisa.

Another indication that interesting sprouts were developing is given by a series of Giornate Lincee on "Internal dynamics of galaxies" held at the Accademia Nazionale dei Lincei and promoted by Francesco Bertola, Alvio Renzini, and Pisa scientists on a yearly basis (1988-1993; and several international symposia in the following years).

Other interesting developments are related to the lectures at the Scuola Normale by Alexei M. Fridman in 1995 on "Nonlinear gravipysics: solitons, vortices, and turbulence" and in 1999 the "Lectures on nonlinear physics" (published by the Scuola Normale) by Sergei V. Bulanov. In the period 1998-2000 Luca Ciotti (Bologna) taught the course "Lectures on stellar dynamics" (published by the Scuola Normale). Nonlinear physics considers important and difficult-to-analyze aspects of physical systems⁸, with natural ties to astrophysical phenomena.

4. Modern frontier studies, some with important contributions by scientists educated in Pisa

One of the key developments of modern astrophysics is the discovery of gravitational lenses and the use of gravitational lenses in probing the properties of the distribution of dark matter in distant galaxies and clusters of galaxies, out to redshifts $z \approx 1$ and beyond (i.e., at distances of many billion light years). Strong lensing may produce multiple images of distant galaxies or quasars and other prominent features such as arcs and rings. Two important results may be mentioned. The first is the finding, by the combined application of stellar dynamics and strong lensing diagnostics, that dark halos around distant bright elliptical galaxies have a density distribution that mimics that observed in nearby galaxies, so that the total (dark plus visible mass) distribution resembles that of the

⁸ See also W. Heisenberg "Nonlinear problems in physics," 1967, *Physics Today*, 20, 27.

isothermal selfgravitating sphere, which generates flat rotation curves⁹. A second very interesting result is the finding, by a combined study of the galaxy distribution, of the intracluster medium distribution, and of the total mass distribution as obtained from weak gravitational lensing, that in the Bullet Cluster the center of the total mass distribution and that of the visible mass appear to be offset¹⁰; this result appears to rule out the possibility that the dark matter picture might be replaced by a modification of the gravitation law.

In 1964, well before multiple images produced by strong gravitational lensing were discovered, Sjur Refsdal had anticipated the interesting possibility of measuring the time delays in the observed flux changes of the various images of a single distant source, associated with the different optical paths related to the different images. He suggested that this observation would set the measurement of an intrinsic length scale in the lens configuration, thus providing an effective “standard rod,” with the consequent possibility of measuring the Hubble constant (a precise measurement of this constant is still one of the major concerns of observational cosmology). It happened recently that one supernova explosion was observed in one of the images of a system with multiple images produced by strong lensing. Many observations and many papers have been devoted to this system, for which successful predictions were made¹¹, and which may turn out to lead to one of the most accurate measurements of the Hubble constant.

Charles Townes, best known among physicists for his work on the maser, made many important contributions in astrophysics, from the study of molecules in the interstellar medium to the study of the shape of nearby stars by means of sophisticated interferometric techniques. He is also well known for his studies of the central regions of our Galaxy that led to conjecture that the powerful radio source SgrA* in Sagittarius could be associated with a supermassive black hole. The best evidence for the presence of such black hole comes from one of the most beautiful observations made in recent years. This is the monitoring of star orbits over a period of more than 20 years, especially of a $15 M_{\odot}$ star called S2,

⁹ For example, see figure 4 in L.V.E. Koopmans, T. Treu, *et al.* “The Sloan Lens ACS Survey. III: The structure and formation of early-type galaxies and their evolution since $z \approx 1$,” 2006, *Astrophys. J.*, 649, 599. Tommaso Treu obtained his Perfezionamento in 2001 in Pisa with a thesis “On the formation and evolution of early-type galaxies.”

¹⁰ D. Clowe, M. Bradać, *et al.* “A direct empirical proof of the existence of dark matter,” 2006, *Astrophys. J. Lett.*, 648, L109.

¹¹ T. Treu, G. Brammer, *et al.* “Refsdal meets Popper: comparing predictions of the reappearance of the multiply imaged supernova behind MACSJ 1149.5 + 2223,” 2016, *Astrophys. J.*, 817, id60.

which has been observed to perform a Keplerian ellipse¹² rushing at a speed of ≈ 5000 km/s at about one hundred astronomical units from the pericenter (basically coinciding with SgrA*). This provides evidence that the center of our Galaxy hosts a black hole with mass $\approx 4 \times 10^6 M_\odot$.

A discovery made in 1974 and mentioned briefly in Subsect. 1.2, that of the Hulse-Taylor binary pulsar, led to very interesting developments. The system is made of two neutron stars of similar mass (approximately fifty percent larger than the mass of the Sun) bound in a noncircular orbit (the distance between the two neutron stars at periastron is approximately one solar radius, at apoastron about five solar radii; the orbit period is slightly shorter than eight hours). The period of the pulsar is ≈ 0.059 s. The system has been monitored since its discovery and has been used as a laboratory for general relativity.

The data show unambiguously that the orbit is slowly decaying, with the semimajor axis shrinking at a rate of ≈ 1 cm per day, following in detail the expectations from general relativity that the phenomenon reflects the loss of energy associated with the emission of gravitational waves; the current power associated with such emission is two percent of the total power emitted by the Sun in electromagnetic waves¹³. In some three hundred million years the two neutron stars are bound to merge. This may result in a powerful event similar to GW170817.

If I was asked to single out the best result obtained by the Hubble Space Telescope, I would refer to the Hubble Deep Fields, which opened an entire gold mine to astronomers, for studies of galaxies out to $z \approx 10$. In particular, I would refer to the Hubble Ultra Deep Field, based on observations made with the newly installed ACS camera from September 2003 to January 2004. The total exposure time of about one million seconds was devoted to a small region (about ten square arcminutes) of the constellation Fornax. The image captures the light of about ten thousand galaxies down to the 30th magnitude (in the words of Massimo Stiavelli, this sensitivity is approximately that required to detect a firefly at the distance of the Moon), with a look-back time of 13 billion years, a few hundred million years after the Big Bang occurred¹⁴.

In closing this short digression on selected frontier results in modern astrophysics, I wish to go back to two points that refer to our solar sys-

¹² For example, see figure 17 in R. Genzel, F. Eisenhauer, S. Gillessen "The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster," 2010, *Rev. Mod. Phys.*, 82, 3121.

¹³ This beautiful result is well summarized by figure 1 in J.M. Weisberg, J.H. Taylor *The relativistic binary pulsar B 1913 + 16: thirty years of observations and analysis*, 2005, ASP Conf. Ser., 328, 25.

¹⁴ See figure 4 in S.V.W. Beckwith, M. Stiavelli, *et al. The Hubble Ultra Deep Field*, 2006, *Astron. J.*, 132, 1729.

tem, which can be seen as advanced topics in space physics. One is the surprising discovery of a perfectly hexagonal structure in the north-polar region of planet Saturn. The discovery was made by the Voyager mission in 1981 and nicely confirmed with beautiful images by the Cassini-Huygens mission¹⁵. The exagon was also studied by observations from the ground. Apparently the south pole does not have a similar structure. The structure reminds us of some convection cells that may be formed in the Bénard problem, mentioned in Subsect. 2.3. But its regularity, singular nature, and observed physical properties raise a number of unresolved issues. In a different context, among other space science projects I wish to mention the Parker Solar Probe, to be launched in 2018. The main goal of this mission is to study properties of the solar wind (mentioned in Subsect. 2.2) that have so far escaped direct measurements. At closest approach, the Parker Solar Probe will hurtle around the Sun at approximately 700,000 km/h. At closest approach to the Sun, the front of Parker Solar Probe's solar shield will face temperatures approaching 1,400 C, while the spacecraft's payload will be kept near room temperature. On the final three orbits, the Parker Solar Probe will fly to within 8.5 solar radii from the surface of the Sun. In 2010 Marco Velli's proposal "Heliospheric Origins with Solar Probe Plus" was selected as one of the five science investigations to be carried out by the project¹⁶. Solar Probe Plus was recently renamed Parker Solar Probe, in honor of Eugene Parker, an astrophysicist who has developed the simplest and most successful model of the solar wind.

¹⁵ For example, see <https://www.nasa.gov/jpl/cassini/pia18274>.

¹⁶ N.J. Fox, M.C. Velli, *et al.* "The Solar Probe Plus mission: humanity's first visit to our star," 2016, *Space Science Reviews*, 204, 7. Marco Velli was briefly mentioned in Sect. 3.

... e se fossimo davvero figli dei fisici?

Pierpaolo Degano*

La risposta è un secco NO! e tuttavia quanto deve l'informatica non solo italiana, ai fisici pisani (e romani), giovanissimi apprendisti stregoni e inconsapevoli?

1. Quando nasce l'informatica

È necessario che sostenga la risposta negativa al titolo, anche se è innegabile la mia piena riconoscenza per chi mi condusse a Pisa alla fine degli anni '60 dello scorso millennio. Sarei eccessivamente presuntuoso se pretendessi di individuare il momento, il luogo e il perché nasce il meccanismo che sostiene i sistemi che calcolano, o meglio manipolano informazione, non necessariamente numerica (ma i due tipi di informazione sono forse differenti?).

Eppure, trascurando al momento il perché, se guardo indietro fino ai primi tentativi dei Greci, o di altri ancor prima di loro, di comprendere i modi con cui ragioniamo, vedo il desiderio di formalizzare la costruzione della conoscenza che porta Aristotele alla definizione di sillogismo e più avanti Abulafia a costruire la cabbala delle parole e Ramon Lull alla sua *Ars Magna* e ai dischi che ruotano e la realizzano. In questi approcci, e ancor più nella formulazione del "pensiero cieco" di Leibniz la cosa fondamentale è partire dai "primitivi" (noi li chiamiamo assiomi) e poi combinare alcuni primitivi mediante regole fisse e precise (le regole di inferenza) che non alterano la verità e consentono di ottenere via via nuove conoscenze – i primitivi sono verità inconfutabili: per Aristotele i fatti che gli uomini son mortali e che Socrate è un uomo, da cui dedurre che Socrate è mortale; per Abulafia e Lull alcuni attributi della divinità; per Leibniz qualunque cosa, purché vera.

Ancor più esplicito uno dei 23 problemi del secolo posti da Hilbert nel primo Congresso degli Scienziati a Parigi, che riporto nell'enunciato del congresso di Bologna nel 1928 (Gödel e Turing e altri lo dimostreranno insolubile): «l'Entscheidungsproblem è risolto se si conosce una procedura che permette di decidere, con un numero finito di operazioni, la validità o la soddisfacibilità di una data espressione logica».

¹ Dipartimento di Informatica, Università di Pisa.

Noi informatici siamo dunque figli di un approccio logico-deduttivo.

Non sottovaluto certamente il bisogno e il piacere di effettuare calcoli complessi il più velocemente possibile, da cui i sofisticati algoritmi su pallottolieri e abaci, né mi dimentico la costruzione delle macchine calcolatrici di Pascal, Schickard e soprattutto di Leibniz, ma anche in queste si riverbera chiarissimo l'approccio logico-deduttivo, e quindi no, non siamo figli dei fisici. Eppure...

2. Che c'entrano i fisici?

I fisici si fanno da sé stessi gli strumenti per indagare la natura del mondo e di come funzioni. All'inizio degli anni '50 costruire un elettrosincrotrone a Pisa sembrava possibile, visto il finanziamento di 150 milioni di lire messo a disposizione della nostra Università dalle amministrazioni provinciali di Pisa, Livorno e Lucca. Ma Roma aveva a disposizione 400 milioni e lo strumento si fece a Frascati. Che ne facciamo di questi soldi?

I fisici fanno un mucchio di conti (approssimati). Dicono che Enrico Fermi abbia usato MANIAC, il calcolatore di Los Alamos, per ottenere le soluzioni numeriche di un complesso sistema di 64 equazioni differenziali non lineari che richiese giornate di tempo macchina, con il risultato inaspettato di non trovare soluzioni stabili, aprendo così la strada allo studio del chaos deterministico. E allora i fisici pisani e il rettore Avanzi: Perché non chiediamo a Fermi che fare dei 150 milioni a disposizione?¹ E Fermi risponde: Fatevi una calcolatrice elettronica.

Fin qui la vulgata ben nota a chiunque parli di Informatica a Pisa e che forse sovrastima il ruolo di Fermi, che di lì a poco mancò. Solite lotte intestine in Ateneo tra questi e quelli, che poi si accordano o vengono convinti a farlo: facciamoci una calcolatrice (ma cosa saranno mai questi programmi? non ungono, non pesano, non hanno odore. Meno male che i nastri perforati si vedono...). Per precisione storica, va detto che già Picone all'Istituto Nazionale per le Applicazioni del Calcolo vorrebbe farsene una a Roma, e si oppone duramente, vuole essere il primo, ma stavolta Pisa vince e Picone fa buon viso a cattivo gioco e si compra una Ferrante, ottima macchina per i tempi. Inoltre c'erano anche i milanesi e forse altri, ma in veste di acquirenti, non di progettisti. Ecco il primato di Pisa e la riconoscenza degli informatici ai rettori Avanzi e Faedo, a Conversi, Salvini, Bernardini e a tutti quelli che colpevolmente dimentico.

¹ Non tutti: parte fu impiegata da Ezio Tongiorgi per acquistare uno strumento per la datazione al radio-carbonio.

Nasce il Centro Studi Calcolatrici Elettroniche (CSCE) che progetta e realizza la CEP, Calcolatrice Elettronica Pisana, la prima in Italia, e il centro è ospitato presso l'Istituto di Fisica e farcito di fisici e di qualche ingegnere: ne parlerò tra poco. Parte faticosamente una collaborazione con l'Olivetti che stabilisce un suo centro di Ricerca e Sviluppo a Barbaricina da cui nasce l'ELEA. La storia è affascinante e rimando il lettore interessato agli Atti del Convegno "La CEP prima della CEP: storia dell'Informatica" Pisa University Press, 2011.

Ecco perché siamo una costola dei fisici noi informatici pisani, attirati qui dal primissimo corso di laurea partito nel 1969; lo sono di conseguenza anche moltissimi informatici italiani che sono stati formati a Pisa e i loro figli, nostri nipoti in scienza.

3. Il CSCE, la Macchina Ridotta e la CEP

Credo che sia importante spendere alcune parole su chi ha progettato e realizzato, con l'aiuto di tecnici eccezionali, la CEP, non solo per ricordare l'audacia, le capacità e la straordinaria determinazione dei membri del CSCE, ma anche rimarcare il differente ambiente culturale e politico in cui si trovarono ad agire.

Da Roma vennero su invito di Marcello Conversi, allora direttore dell'Istituto di Fisica, tre fisici teorici: Alfonso Caracciolo di Forino², Elio Fabri e Sergio Sibani. A loro si aggiunsero due ingegneri: Giuseppe Cecchini, che proveniva dall'Olivetti, e poi GiovanBattista Gerace, che aveva lavorato in una impresa di telecomunicazioni. Nessuno di loro aveva superato i 30 anni, avevano l'età in cui oggi gli studenti bravi conseguono il dottorato! All'inizio Mario Tchou collaborò strettamente e poi si dedicò quasi esclusivamente alla direzione del centro Olivetti di Barbaricina e allo sviluppo dell'ELEA, prima di una serie di macchine calcolatrici commerciali di prestazioni per l'epoca elevatissime.

A questo nucleo si affiancarono via via altre persone, prevalentemente fisici, ma anche matematici e ingegneri. Il progetto iniziale della CEP prevede prima la realizzazione del prototipo che fu chiamato Macchina Ridotta, che aveva la parola di 36 bit e che impiegava tubi elettronici, anche se stavano facendo la loro apparizione i primi transistor. Molte sono le novità assolute che si ritrovano nella Macchina Ridotta, dalla modifica automatica delle istruzioni per agevolare la realizzazione dei cicli, alle modalità del passaggio dei parametri ai sottoprogrammi e al loro ritorno al chiamante, al controllo a micro-istruzioni, alla memoria centrale a nu-

² Vanagloriosamente a volte mi aggrappo ai braccioli della cattedra che fu sua.

clei di ferrite [*op. cit.*]. Inoltre, si può dire che la Macchina Ridotta fosse la più veloce tra quelle al momento funzionanti, in termini di velocità di elaborazione.

La Macchina Ridotta iniziò la sua attività nel 1957 e fu impiegata per risolvere vari problemi, tra cui cito solo il calcolo di trasformate di Fourier per i cristallografi e la determinazione esatta delle autofunzioni del momento angolare di più elettroni. Ho mentito: non posso tacere il programma sviluppato da Elio Fabri per generare tautologie nel calcolo proposizionale, che anticipa di 10 anni il tema della dimostrazione automatica, aspetto tutt'altro che secondario al giorno d'oggi e cuore dell'Intelligenza Artificiale.

Riecco l'aspetto logico-deduttivo!

E infine la CEP, la cui realizzazione soffrì di due grossi problemi: l'esaurirsi dei finanziamenti e la comparsa di transistor a buon mercato. Il primato delle soluzioni tecniche alla base della Macchina Ridotta non fu più tale e quando nel 1961 la CEP fu inaugurata dal Presidente della Repubblica Giovanni Gronchi sul mercato vi erano macchine ben più potenti, tra le quali quelle prodotte dall'Olivetti; ciò non ostante, la CEP rimase in servizio per ben oltre un decennio.

Le competenze acquisite e le esperienze fatte allora mi obbligano a dire, ed è un piacere farlo, che qualcosa ai fisici dobbiamo e di questo molto resta.

4. Non solo calcolo

Di quella splendida avventura resta a Pisa un Dipartimento nella ex-Facoltà di Scienze e una parte rilevante di uno in quella di Ingegneria. Entrambi, ma mi si permetta un briciolo di arrogante presunzione, soprattutto il primo, hanno avuto un ruolo importante in campo internazionale nello sviluppo scientifico della disciplina, anche se forse abbiamo purtroppo perso parte della visione lungimirante dei suoi fondatori.

Concentrandosi sugli aspetti basilari dell'Informatica, i contributi nell'area dei linguaggi di programmazione non sarebbero certo stati possibili senza gli studi pionieristici di chi sviluppò, tra i primi nel mondo, il compilatore FORTRAN per la CEP e molto probabilmente da quegli stessi studi ha avuto origine il gruppo degli algoritmisti e poi di coloro che si occupano della gestione di grosse moli di dati. Ed è superfluo ricordare l'impatto che ebbe l'attività dei membri del CSCE sulle successive ricerche nel settore dell'architettura degli elaboratori e delle reti.

Tra le aree applicative più affascinanti agli occhi di chi scrive ve ne sono due che i pisani hanno contribuito a far nascere: l'Informatica Musicale e la Linguistica Computazionale. Il Maestro Grossi aprì la via

alla prima, anche se ho un ricordo agghiacciante degli stridori prodotti dall'IBM 7090 che rendevano irriconoscibile il pezzo re-interpretato da un programma (credo fosse Bach). La seconda nacque con Padre Busa che indagava le concordanze nelle opere di San Tommaso, e poi crebbe con Zampolli e l'Istituto di Linguistica Computazionale del CNR. Non si può certo tacere il ruolo fondamentale del Centro Nazionale Universitario di Calcolo Elettronico, poi Istituto CNUCE-CNR, alcuni dei cui ricercatori, sorretti dall'entusiasmo del suo direttore Guido Torrigiani, inserirono Pisa quale nodo nel WEB, ancora una volta per primi in Italia. E moltissimo ci sarebbe da dire sui contributi dati in quasi tutte le aree della disciplina dall'erede del CSCE, l'Istituto di Elaborazione dell'Informazione IEI-CNR e dalla sua costola, l'Istituto di Matematica Computazionale, principalmente orientato al calcolo e ai suoi algoritmi. La presenza a Pisa del CNR (ora alcuni dei suoi istituti han cambiato nome, non certo importanza), di cui l'intera comunità scientifica ha beneficiato, non sarebbe stata nemmeno immaginabile senza la progettazione e la realizzazione della CEP. Né il centro di ricerche IBM, purtroppo chiuso da alcuni anni, avrebbe trovato posto in via S. Maria, di fronte al CNUCE e all'IEI, a due passi da Piazza Torricelli.

Infine la formazione, in cui nuovamente Pisa ha il primato in Italia ed eccellenti posizioni in campo internazionale. Nel 1969 il primo corso di Laurea in Scienze dell'Informazione; nel 1983 il primo Dottorato in Informatica; e poi la prima Scuola Diretta in Informatica; uno dei primi Corsi di Laurea in Ingegneria Informatica; i Corsi di Laurea (triennale e magistrale) in Business Informatics e in Digital Humanities; il Dottorato in Data Science. Tutti preceduti dai primissimi corsi di introduzione alla programmazione tenuti agli inizi degli anni '60 e dal mitico Corso di Specializzazione in Calcolo Automatico.

Avrebbero potuto i politici locali, il Magnifico Rettore, il Direttore dell'Istituto di Fisica e i molti altri che li consigliarono e li sorressero essere più lungimiranti? Avrebbero potuto i cinque non ancora trentenni del nucleo iniziale e tutti gli altri che si buttarono a capofitto in quella splendida avventura produrre un risultato con maggior impatto?

Ringraziamenti

Un sentito grazie agli organizzatori del convegno "Fisica e Fisici a Pisa nel 90" per aver invitato me *ex partibus infidelium* facendomi sedere dopo molti anni in Aula A, e in particolare a Marco M. Massai per l'amicizia, la stima nei miei confronti, immeritata, e l'affettuosa insistenza con cui mi ha convinto a partecipare a questo interessantissimo evento e a scrivere queste poche, superficiali righe.

La Olivetti e l'Istituto di Fisica di Pisa

Nicola Minnaja*

Negli anni '60 la Olivetti era sulla cresta dell'onda, e impiegava circa 25 mila dipendenti nell'area di Ivrea. Aveva deciso di entrare nel campo di quello che ora si chiama informatica, per consolidare la sua leadership monopolistica nel mercato italiano delle macchine da ufficio: questo avrebbe implicato di doversi dare una adeguata struttura di ricerca. La morte di Adriano Olivetti e del responsabile dell'informatica, l'ing. Chu, non rallentarono inizialmente le decisioni prese, che erano molto ambiziose: l'incarico di portarle a compimento toccò al figlio di Adriano, Roberto. La progettazione si orientò su una nuova linea di calcolatori, la serie ELEA 9000, destinata coprire con 4 modelli tutte le esigenze di elaborazione per il mercato italiano. Il gruppo di lavoro fu installato a Barbaricina, in periferia di Pisa, in modo da continuare i rapporti con l'Istituto di Fisica, presso il quale, all'ultimo piano, veniva progettata e realizzata la CEP, la Calcolatrice elettronica Pisana. Questa fu inaugurata da Gronchi: ed è conservata nel Museo Nazionale degli Strumenti per il Calcolo, situato nell'area degli exMacelli, Ingresso da via Bonanno). La memoria di massa era a nastro. Vi era stato sviluppato un nuovo linguaggio di programmazione, il PALGO, derivato dal Fortran: O ovviamente significava Olivetti).

A questo punto però i rapporti con Pisa si allentarono, e la Divisione Elettronica, diretta dall'ing. Otorino Beltrami, si trasferì a Borgolombardo, dove di notte veniva provato il software sviluppato a Barbaricina. Però stava maturando l'idea di rinforzare la ricerca tecnologica, tanto che alla Divisione Elettronica si affiancò, almeno sulla carta, il Laboratorio Ricerche Elettroniche, affidato all'ing. Giorgio Sacerdoti. Più o meno contemporaneamente furono prese due decisioni logistiche, anche queste destinate ad affievolire le relazioni con Pisa. La prima fu la creazione, nel 1957, di una società a capitale misto, la Società Generale Semiconduttori, partecipata dalla Olivetti, dalla Telettra e da una nuova impresa USA, la Fairchild, fondata da 7 ricercatori fuoriusciti dai Laboratori Bell, che in quell'epoca cominciavano a sviluppare transistori al silicio in sostituzio-

¹ Olivetti SpA.

ne di quelli al germanio. La sede scelta fu quella della Telettra ad Agrate Brianza. La seconda fu la decisione di localizzare Laboratorio e Divisione in una sede in località a metà strada fra Milano e Ivrea, e ne fu acquistato il terreno a Pregnana Milanese.

Pensando al futuro, era stato deciso di assumere personale laureato da formare in azienda, assegnando al Laboratorio un piccolo gruppo col nome ambizioso di Ricerca Fisica, e di convenzionare una cattedra (forse a Bologna) a al prof. Fausto Fumi, che si sarebbe portato dietro i dr. Tosi e Bassani, di inserirvi un paio di reduci da stage in Fairchild, e di inserirlo provvisoriamente nel Servizio Componenti Elettronici pilotato dal dr. Franco Filippazzi, facendolo guidare ad interim da una persona che avesse seguito il corso di Fisica dello Stato Solido tenuto presso l'Istituto di Fisica dal prof. Roberto Fieschi. Tutti i neo-assunti furono invitati di arricchire la biblioteca, e furono iscritti a un corso europeo sullo stato solido, che si teneva annualmente a Gand. Fra loro la Direzione Aziendale lasciò anche circolare la voce che per il terreno acquisito era stata commissionata la progettazione di un locale sotterraneo depolverizzato nientemeno che a Le Corbusier. Il gruppo con l'andare degli anni fu incoraggiato a presentare comunicazioni sia a congressi SIF sia a congressi internazionali di elettronica, e, deviando un po' dai suoi obiettivi iniziali, ebbe alla lunga una funzione importante nella scelta di componenti innovativi e nella definizione del loro miglior impiego (fu fra i primi gruppi italiani ad impiegare i microprocessori nella progettazione elettronica).

Nel frattempo, alla serie ELEA veniva ad aggiungersi una nuova calcolatrice da tavolo, questa volta elettronica e programmabile, la Programma 101, con la capacità di estrarre radici quadrate. Fu la prima calcolatrice elettronica da tavolo sul mercato mondiale, su progetto dell'ing. Pier Giorgio Perotto,; anche questa è esposta al Museo citato sopra. La memoria non si basava sull'elettronica Fairchild, ma su linee magnetostrittive disponibili sul mercato.

Queste ambizioni furono frustrate, non tanto dall'apertura di uno stabilimento IBM a Vimercate (1965), quanto da una gravissima crisi di liquidità, dovuta a uno sconsiderato ingresso nel mercato finanziario USA; il valore delle azioni Olivetti crollò bruscamente, e la famiglia Olivetti fu costretta a cedere il controllo della società al gruppo FIAT, il quale nominò il nuovo amministratore delegato nella persona dell'ing. Aurelio Peccei. Questi non era certo uno sprovveduto, anzi è noto per essere stato più tardi l'iniziatore del Club di Roma, precursore delle valutazioni sulle conseguenze economiche dell'inquinamento industriale. Tuttavia, presentando la situazione finanziaria che si era trovato a dover amministrare, ammise, (in privato, ma non troppo) che l'elettronica era un bubbone di cui la Olivetti si sarebbe dovuta liberare al più presto. In realtà se ne liberò rapidamente, donando al Museo già citato i prototipi

ancora esistenti della serie ELEA, e vendendo il 49% della Divisione Elettronica (non si parlava più di Laboratorio) ad un'impresa USA, la General Electric, la quale era già entrata nel mercato italiano dei capitali con l'acquisizione della Nuovo Pignone, ed era intenzionata a competere con la IBM su tutto il mercato mondiale dell'informatica. Difatti inserì fra i suoi strateghi uno dei più qualificati sistemisti IBM, (che morì poco dopo in un incidente sul suo aereo: è la terza morte improvvisa di questa storia). Nei suoi piani c'era una linea completa di 4 unità centrali e un certo numero di periferiche, con ripartizione di progettazione, produzione e mercati fra i suoi dipartimenti in USA, Francia e Italia. Quello italiano prese il nome di General Electric Information Systems Italia e passò sotto il controllo completo di General Electric. L'acquisizione avvenne attraverso trattative a livello governativo, con l'impegno di mantenere in Italia il personale esistente, la direzione operativa e parte della progettazione (l'unità centrale di prestazioni minime e la stampante seriale, quest'ultima da produrre a Caluso, presso Ivrea), e inoltre la commercializzazione e l'assistenza sul territorio nazionale per tutti i prodotti aziendali). La società lanciò un programma di ricerca tecnologica, con finanziamenti distribuiti fra i dipartimenti, incluso quello italiano; questo se ne avvantaggiò, non solo in termini economici, ma anche per una collaborazione efficace con laboratori stranieri; ma questo inevitabilmente pregiudicò qualsiasi velleità di integrazione con l'Istituto di Fisica di Pisa.

Conclusioni

L'ampia ricognizione delle attività dei fisici pisani nel corso del Novecento fin qui presentata ci permette di trarre alcune conclusioni, certamente provvisorie ma forse non del tutto superflue.

La scuola pisana, che nel corso dell'Ottocento, con Mossotti, Matteucci, Felici e Pacinotti, aveva rappresentato uno dei punti di riferimento più significativi per la fisica nazionale e si era già proiettata sullo scenario internazionale della ricerca, vide nella prima metà del Novecento una parziale battuta d'arresto, non tanto per la qualità scientifica dei ricercatori, primo fra tutti Puccianti (forse ancora non adeguatamente valorizzato dalla storiografia scientifica), quanto per l'incapacità di tenere il passo con le problematiche che stavano emergendo a seguito delle grandi rivoluzioni scientifiche di inizio secolo (relatività e meccanica quantistica).

Fatta salva l'eccezionalità della figura di Fermi, che solo per alcuni aspetti della sua formazione sperimentale può forse considerarsi un prodotto della "scuola pisana", tra gli eredi della tradizione scientifica locale soltanto Nello Carrara e Adriano Gozzini furono capaci di affrontare tematiche più moderne e di giungere a risultati di rilevanza internazionale.

Questo ritardo fu però ampiamente colmato dall'arrivo a Pisa, nei primi anni Cinquanta, di personaggi della statura di Conversi, Salvini, Radicati, e più tardi Bernardini e Bassani, che non soltanto seppero inserirsi autorevolmente nel contesto delle ricerche più attuali, ma furono anche capaci, nella loro veste di docenti-ricercatori, di creare una vera scuola di fisica e di collocare Pisa tra le sedi di riferimento della ricerca nazionale anche in quegli ambiti, come la fisica sperimentale subnucleare e la fisica teorica, in cui la tradizione locale si era rivelata incapace di una significativa presenza.

La rilevanza del contributo pisano alla ricerca fisica italiana, che emerge da molti dei contributi qui pubblicati, non si rivela soltanto dai risultati scientifici anche recenti già ricordati nell'introduzione, ma anche, e forse in un certo senso soprattutto, nell'ampiezza delle collaborazioni anche internazionali, nella rete dei rapporti con la comunità scientifica mondiale, condizioni oggi quasi sempre necessarie per risultare competitivi nel mondo della ricerca, nella capacità di essere presenti anche in ambiti interdisciplinari, dalla biofisica all'informatica.

Un tema certamente meritevole di futuri approfondimenti, in quanto i limiti temporali assegnati a questo volume non si prestavano a una sua

trattazione sistematica, sarebbe anche quello della ricaduta formativa del lavoro dei fisici pisani, che si è tradotta in un numero ancora difficilmente stimabile, ma certamente molto elevato, di ricercatori di seconda e terza generazione che hanno trovato spazio per la loro attività scientifica ben al di fuori dei confini locali e nazionali (basti pensare a Carlo Rubbia, a Italo Mannelli o ad alcuni degli autori dei contributi a questo volume). La presenza di laureati pisani tuttora caratterizza in misura significativa numerose istituzioni non soltanto italiane.

Questo primo sforzo di raccolta di dati e di memorie è certamente soltanto un passo sulla strada di una più larga e compiuta ricostruzione storico-scientifica di quello che è stato per Pisa “il secolo della Fisica” (come qualcuno ha voluto caratterizzare il XX secolo). Ma il cammino è iniziato, e non si può che auspicare che il lavoro fin qui svolto possa proseguire con lo stesso impegno che i tanti autori di questo volume hanno voluto e saputo approfondire nel comune obiettivo di lasciare alle future generazioni di studiosi una valida testimonianza di questo capitolo di storia scientifica collettiva.

Elenco degli Autori

Riccardo Barbieri

Riccardo Barbieri si è laureato in Fisica a Pisa e diplomato alla Scuola Normale Superiore nel 1967. Professore di Fisica teorica dal 1980, ordinario a Pisa dal 1987 al 1997 e in seguito alla SNS fino al 2015, si è occupato di Elettrodinamica quantistica e di fenomenologia (anche supersimmetrica) dei processi fondamentali.

Giovanni Battimelli

Giovanni Battimelli si è laureato in Fisica a Roma nel 1974. Ricercatore a Roma “La Sapienza” dal 1980, professore di Storia della Fisica a Roma dal 2000. Si è occupato di storia della fisica (in particolare italiana) nel corso del Novecento, di organizzazione degli archivi dipartimentali e di didattica della fisica.

Giorgio Bellettini

Giorgio Bellettini è professore emerito di fisica presso l'Università di Pisa. Ha lavorato in fisica adronica delle particelle come leader di esperimenti ai collisionatori protone-protone (R801 agli ISR del CERN) e protone-antiprotone (CDF a Fermilab). I suoi risultati più importanti sono stati l'osservazione dell'aumento con l'energia della sezione d'urto totale protone-protone (R801) e la scoperta del quark top (CDF).

Carlo Bemporad

Professore emerito dell'Università degli Studi di Pisa, Carlo Bemporad ha avuto un ruolo di rilevanza in esperimenti di fisica adronica, fisica astroparticellare, fisica del neutrino e delle violazioni del sapore leptonico. Ha dato un forte contributo allo sviluppo dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Susanna Bertelli

Susanna Bertelli è ricercatrice in Didattica e Storia della Fisica presso l'Università di Ferrara e i Laboratori Nazionali di Frascati - INFN. Coordina diversi progetti di educazione scientifica dedicati ai diversi livelli del sistema educativo e attività di orientamento universitario. È curatrice di mostre scientifiche ed eventi di didattica museale per la Collezione Instrumentaria delle Scienze Fisiche del Sistema Museale d'Ateneo di Ferrara.

Giuseppe Bertin

Giuseppe Bertin si è laureato in Fisica a Pisa e diplomato alla Scuola Normale Superiore nel 1974. Professore alla SNS dal 1980, ordinario di Astrofisica all'Università di Milano (Statale) dal 2001, si è occupato in particolare di dinamica delle galassie e di fenomeni collettivi nei plasmi astrofisici.

Rino Castaldi

Laureato in Fisica con lode a Pisa nel 1968 e Perfezionato con lode alla SNS nel 1972, Rino Castaldi è stato Dirigente di Ricerca INFN presso la Sezione di Pisa, Professore Ordinario all'Università di Genova (1990-1996) e Direttore della Sezione INFN di Pisa dal 1989 al 1991 e dal 2002 al 2008. Project Manager del Tracker di CMS dal 1994 al 2000 e responsabile per molti anni di gruppi di ricerca di Pisa. Attualmente Membro Emerito di CMS.

Giuliano Colombetti

Giuliano Colombetti è stato Dirigente di Ricerca del CNR in Biofisica. Ha condotto ricerche nel campo della Interazione luce-materia in organismi microbiologici, con particolare attenzione all'analisi dell'azione della radiazione luminosa sui parametri di moto dei microrganismi e nel campo della microscopia confocale di pigmenti fotoricettori in cellule singole. Si è inoltre interessato all'effetto della radiazione UV su protozoi ciliati.

Pierpaolo Degano

Pierpaolo Degano si è laureato a Pisa in Scienze dell'Informazione nel 1973. Professore a Pisa dal 1989, ordinario a Parma dal 1990 al 1993 e in seguito al Dipartimento di Informatica di Pisa, di cui è stato direttore dal 1993 al 1996, Pierpaolo Degano si è occupato di semantica della concorrenza, di sicurezza dei sistemi distribuiti e di bioinformatica.

Alberto Del Guerra

Professore di Fisica Medica presso l'Università di Pisa, Alberto Del Guerra ha lavorato in Fisica Medica come leader di esperimenti nazionali ed europei, nell'imaging radiologico e molecolare e nella PET presso le Università di Napoli Federico II, di Ferrara e di Pisa. È stato direttore della Scuola di Specializzazione di Fisica Medica dell'Università di Pisa e Presidente della Federazione Europea delle Società di Fisica Medica.

Adriano Di Giacomo

Laureato in Fisica a Pisa e diplomato alla Scuola Normale Superiore nel 1958, Adriano Di Giacomo è stato Professore ordinario di Fisica Teorica a Pisa dal 1976 al 2009, oggi Professore emerito. Si è occupato di ottica

quantistica, di modelli duali, di aspetti topologici delle teorie di campo e di QCD sul reticolo. È stato Vicepresidente dell'INFN e ha promosso la realizzazione della nuova sede del Dipartimento di Fisica nell'Area Pontecorvo.

Luigi Di Lella

Membro staff del CERN per oltre quaranta anni, Luigi Di Lella ha giocato ruoli di rilevanza in esperimenti di fisica del neutrino, fisica astroparticellare ed esperimenti ai collisionatori adronici. Ha contribuito in maniera rilevante alla scoperta dei bosoni W e Z.

Francesco Fidecaro

Francesco Fidecaro ha conseguito la Laurea in Fisica a Pisa nel 1978. Studente e ricercatore presso la Scuola Normale, ha partecipato agli esperimenti FRAMM e Aleph al CERN, contribuendo allo sviluppo della Time Projection Chamber. Dal 1992 lavora nella Collaborazione Virgo, di cui è stato spokesperson. Professore ordinario ed ex Direttore del Dipartimento di Fisica di Pisa, insegna Fisica al primo anno della Laurea Triennale e Fisica delle onde gravitazionali alla Laurea Magistrale.

Henry Frisch

Henry Frisch è professore di fisica presso l'Istituto Enrico Fermi dell'Università di Chicago. Come ricercatore di fisica delle particelle elementari, è cresciuto alla scuola di Enrico Fermi a Chicago, distinguendosi per il suo lavoro nell'applicazione di tecnologie innovative e sviluppo di rivelatori di frontiera. È stato uno dei fondatori dell'esperimento CDF e ha sviluppato una intensa collaborazione con i fisici di Pisa, condividendo la loro creatività e le competenze nello sviluppo di nuovi rivelatori.

Danilo Giulietti

Danilo Giulietti è docente di Ottica Quantistica ed Elettrodinamica presso l'Università di Pisa. Nel campo dell'interazione laser-materia ad alte intensità ha contribuito a sviluppare nuove tecniche di accelerazione di elettroni e ioni, ed innovativi processi di fusione nucleare basati su plasmi prodotti da laser. In questo ambito è stato Rappresentante Nazionale del Progetto Strategico dell'INFN PLASMONX e dei progetti europei ELI ed HIPER.

Silvia Gozzini

Silvia Gozzini è Primo Ricercatore presso l'Istituto Nazionale di Ottica del CNR. Dal 2011 al 2017 è stata Responsabile della Sede Secondaria di Pisa. Ha lavorato nel campo della Fisica della Materia, i principali interessi

sono: studio di effetti coerenti e loro applicazioni; magnetometria ottica per imaging e rilevamento remoto; spettroscopia laser di atomi e molecole e relative tecniche; raffreddamento laser e gas quantistici ultrafreddi.

Marco Grassi

Marco Grassi è Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Ha partecipato ad esperimenti di fisica astroparticellare, fisica del neutrino e ricerca di violazioni del sapore leptonico. È Direttore della sezione di Pisa dell'INFN.

Giuseppe Grosso

Laureato in Fisica presso l'Università di Pisa nel 1972 e perfezionato presso la Scuola Normale Superiore nel 1977, Giuseppe Grosso è professore ordinario di Fisica dello Stato Solido presso il Dipartimento di Fisica di Pisa. I principali temi di ricerca affrontati riguardano proprietà elettroniche e ottiche di solidi perfetti e nanostrutturati, funzione di Green, metodi ricorsivi, trasporto coerente, polimeri coniugati e cristalli molecolari, fotonica a base di silicio e germanio.

Francesco Guerra

Francesco Guerra si è laureato in Fisica a Napoli nel 1964. Professore ordinario di Fisica Teorica dal 1976 a Salerno, poi dal 1979 al 2013 all'Università di Roma "La Sapienza". Si è occupato di teoria costruttiva dei campi quantistici, di metodi stocastici, di meccanica statistica di sistemi complessi e di storia della fisica.

Giuseppe La Rocca

Giuseppe La Rocca è professore associato presso la Scuola Normale Superiore, della quale è stato allievo. I suoi risultati principali riguardano la fisica teorica della materia condensata, e segnatamente: stati elettronici e transizioni ottiche, eccitoni nei semiconduttori organici e inorganici, effetti dell'accoppiamento spin-orbita, controllo coerente dell'interazione luce materia e delle nonlinearità ottiche, metamateriali fotonici.

Jacques Lefrançois

Jacques Lefrançois ha conseguito il PhD ad Harvard nel 1961. Ha eseguito misure di precisione sul mesone ϕ al collisionatore ACO presso LAL ad Orsay. È stato responsabile della costruzione del calorimetro elettromagnetico dell'esperimento Aleph e spokesperson della collaborazione. Tra gli altri risultati, Aleph ha misurato le proprietà del bosone Z_0 , e il numero di neutrini. Attualmente fa parte dell'esperimento LHCb. Ha diretto il Laboratorio d'Orsay ed è stato presidente del Comitato di politica scientifica del CERN.

Francesco Lenci

Francesco Lenci si è laureato in Fisica all'Università di Pisa. Già Dirigente di Ricerca CNR e già Direttore dell'Istituto di Biofisica del CNR e del Consiglio Scientifico Generale del CNR, si è dedicato allo studio degli effetti biologici della radiazione (X e visibile) e si è occupato di Biofisica sensoriale e spettroscopia ottica di pigmenti naturali e sintetici. Ha servito in Società Scientifiche Nazionali ed Internazionali sia come Presidente che come Consigliere.

Claudio Luperini

Claudio Luperini si è laureato in Fisica a Pisa ed è Dottore di ricerca in Storia della Scienza. Coordinatore dei Laboratori didattici del Dipartimento di Fisica di Pisa, ha pubblicato ricerche sulla storia della scienza e in particolare su Antonio e Luigi Pacinotti. Ha curato diverse mostre per il Museo del Calcolo.

Marco Maria Massai

In 40 anni di attività di ricerca in Fisica delle Alte Energie presso l'INFN, da Frascati a Pisa al CERN, Marco Maria Massai ha anche contribuito allo sviluppo di innovativi rivelatori di particelle. Da anni Docente di Storia della Fisica a Pisa, è cofondatore della Ludoteca Scientifica pisana nel 2003; da anni collabora con Scuole e Istituzioni con cicli di seminari di scienza. È autore di numerosi articoli su riviste e volumi di divulgazione storico-scientifica.

Nicola Minnaja

Laureato in Fisica e diplomato alla Scuola Normale Superiore nel 1960, si è inserito nel Laboratorio Ricerche Elettroniche Olivetti a Pisa, e poi in General Electric, contribuendo allo sviluppo delle tecnologie per una nuova linea di elaboratori. Responsabile della qualità in Italtel e in Eni-ricerche, ha seguito la progettazione della linea di luce MICROESCA di Elettra. Come consulente CNR ha partecipato al progetto MADESS (Materiali Dispositivi Elettronica Stato Solido).

Diego Passuello

Diego Passuello ha conseguito la laurea in Fisica a Pisa nel 1974. Dal 1975 al 1990 ha progettato e realizzato sistemi innovativi di trigger e acquisizione dati per la fisica delle alte energie. Dopo l'esperimento IRAS ha lavorato a tempo pieno in Virgo, responsabile del sistema di controllo digitale delle sospensioni a specchio che ha concepito. Direttore di ricerca INFN dal 2002, insegna "Elettronica e sensori" per il corso di laurea Magistrale in Fisica a Pisa.

Ferruccio Renzoni

Ferruccio Renzoni è professore ordinario di fisica all'University College di Londra. Si è occupato di varie tematiche tutte relative all'interazione fra atomi e radiazione laser. I suoi risultati recenti più significativi includono lo studio di motori Browniani usando reticoli ottici lontani dall'equilibrio, e la realizzazione di sistemi di diagnostica per immagini basati su magnetometri atomici.

Nadia Robotti

Nadia Robotti si è laureata in Fisica a Genova. Professoressa di Storia della Fisica a Genova dal 1992, ordinaria dal 2004. Fa parte del Consiglio scientifico della Domus Galilaeana. Si è occupata di Storia della Fisica Atomica e Nucleare, della Storia della Meccanica quantistica e della strumentazione scientifica.

Paolo Rossi

Paolo Rossi si è laureato in Fisica a Pisa e diplomato alla Scuola Normale Superiore nel 1975. Professore a Pisa dal 1988 e ordinario di Fisica teorica dal 2000 al 2016, passando poi a Storia della Fisica, ha diretto il Dipartimento di Fisica (2003-2010) e la Facoltà di Scienze MFN (2010-2012). Si è occupato di teoria dei campi quantistica e statistica e di applicazioni interdisciplinari dei modelli teorici.

Angelo Scribano

Professore Ordinario in Fisica presso l'Università di Siena, Vice Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Direttore prima, e Vice Presidente poi, dell'European Gravitational Observatory (EGO), Angelo Scribano ha svolto la sua attività nel campo della fisica ai collisionatori adronici ed astroparticellare.

Gloria Spandre

Gloria Spandre è ricercatrice dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, per oltre 30 anni ha lavorato allo sviluppo di rivelatori di particelle in esperimenti di Fisica fondamentale in Russia e al CERN. È membro delle missioni spaziali della NASA, Fermi e IXPE. Cofondatrice di Pixirad Imaging Counters, primo spin-off dell'INFN che ha sviluppato rivelatori di radiazione X altamente innovativi per radiologia digitale e imaging industriale e scientifico.

Flavio Toigo

Flavio Toigo è professore emerito presso l'Università di Padova. Ha studiato teoricamente vari temi di Fisica della Materia. I suoi lavori più importanti hanno riguardato la risposta dielettrica del gas di elettroni,

il ruolo dei plasmoni superficiali nello scattering di luce, le interazioni di fisisorbimento, le leggi che governano la morfologia delle superfici di crescita e il comportamento quantistico di sistemi atomici ultrafreddi.

Ringraziamenti

Ci è gradito ringraziare il Prof. Rolando Ferri, direttore del “Dipartimento di Filologia, Letteratura e Linguistica” attualmente ospitato presso il Palazzo Matteucci, per la gentile concessione dell’aula magna per lo svolgimento del convegno.

Ringraziamo anche:

Alessio Sbrana e Maria Virdò dell’Ufficio Contenuti digitali e grafica - Direzione servizi informatici e statistici dell’Università di Pisa e il suo responsabile: David Mustaro per le riprese, il montaggio video e la messa in rete delle registrazioni del convegno.

Mauro Giannini e Giuseppe Terreni INFN Pisa, per il supporto tecnico fornito per l’organizzazione e la gestione del convegno.

Lucia Lilli e Claudia Tofani, INFN Pisa, che hanno curato la Segreteria Scientifica del convegno.

Finito di stampare nel mese di novembre 2018
da Impressum S.r.l. - Marina di Carrara (MS)
per conto di Pisa University Press