

# Fisica Astroparticellare

*Ultimi decenni → enormi progressi in fisica delle particelle*

*...correlati con la costruzione di acceleratori di energia sempre più elevata*

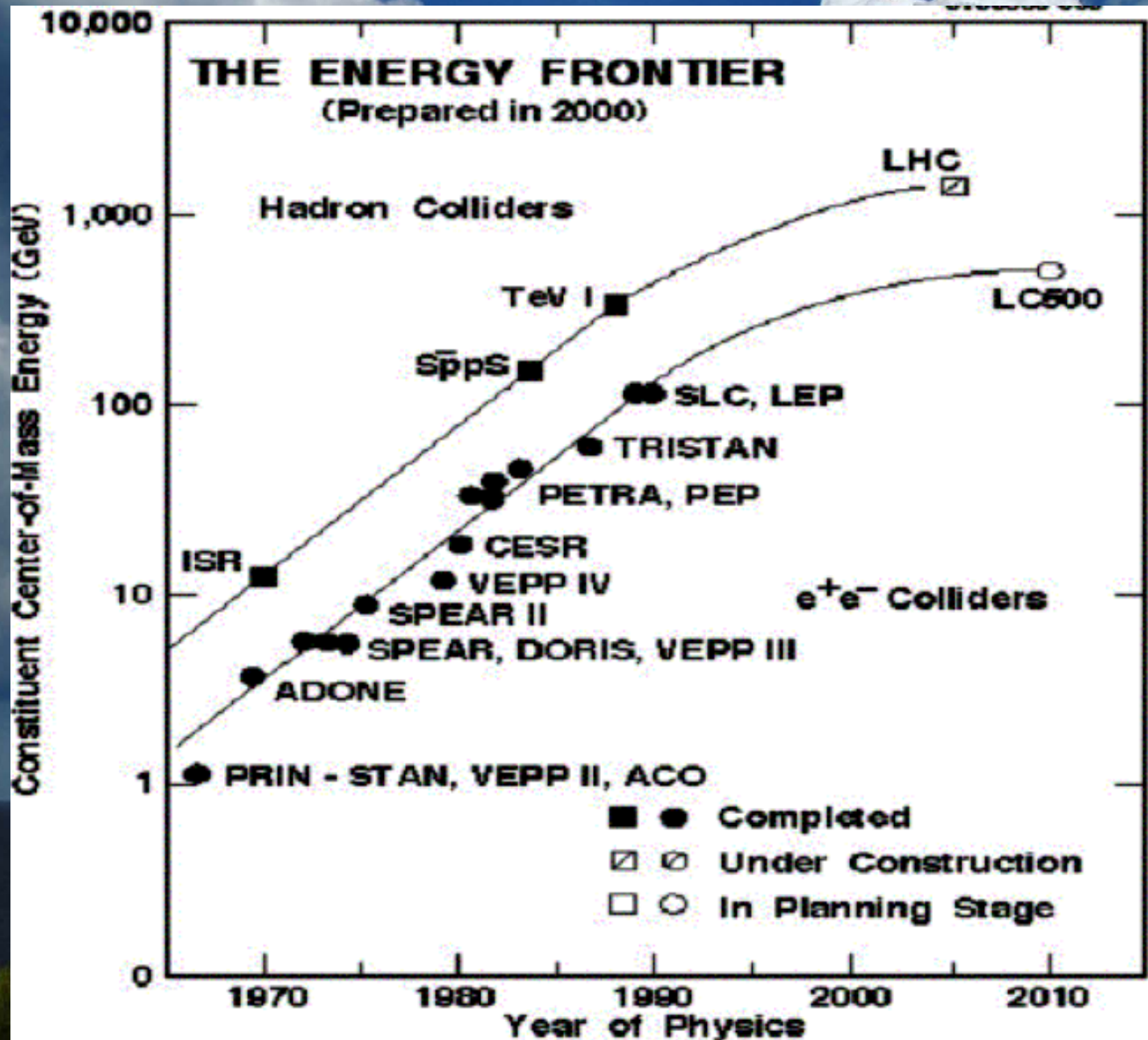
*1945-1969 → Macchine su targetta fissa*

$$E_{CM} \cong \sqrt{2m_p E_{Beam}}$$

*1970 → Colliders (1970 - CERN-ISR → 60 GeV nel CM  
2008 - LHC → 14 TeV nel CM)*

# Centre-of-Mass Energy vs. Year

as of 2000



# *Ruolo delle particelle in Astrofisica e Cosmologia*

## **- Esplosioni di Supernovae**

*interazioni tra elettroni-protoni-fotoni-neutrini*

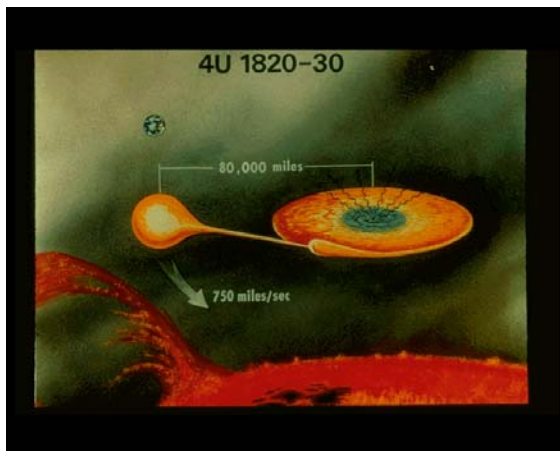
*~99% dell'energia rilasciata → neutrini/antineutrini*

## **- Sistemi binari (stella di neutroni/buco nero e stella normale)**

*sistema in rapida rotazione; materiale della stella → “accretion” su NS*

*→ emissione di fotoni di altissime energie. (Emissione di neutrini?)*

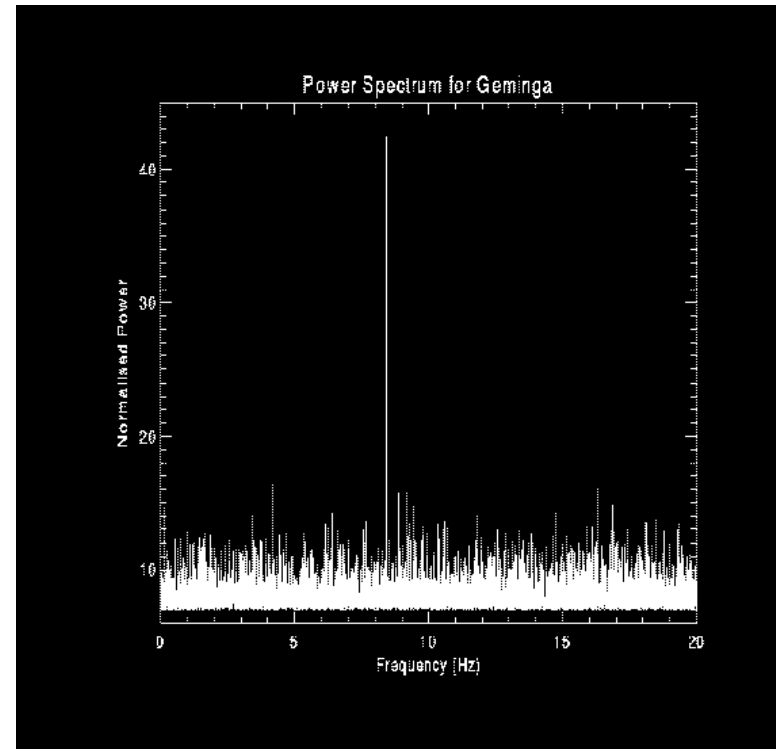
*Fenomeno periodico causa occultamento (Pulsars)*



# Gamma-Ray Pulsars

*Geminga (scoperta nel 1972 dal satellite SAS-2. Periodicità negli X trovata nel 1992 da ROSAT)*

*Osservazione da EGRET nei gamma*



*Il picco nella distribuzione appare a 8.4 Hz, seconda armonica della frequenza rotazionale della Pulsar.*

# *Double Pulsars*

## **Doppie Pulsars**

**coppie di stelle di neutroni**

*sistema in rapida rotazione; emissione  
periodica di onde radio, di raggi X e  $\gamma$   
(Emissione di neutrini?)*



*Qualche migliaio di Pulsars note. Catalogo →*

<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

# *Gamma Ray Bursters*

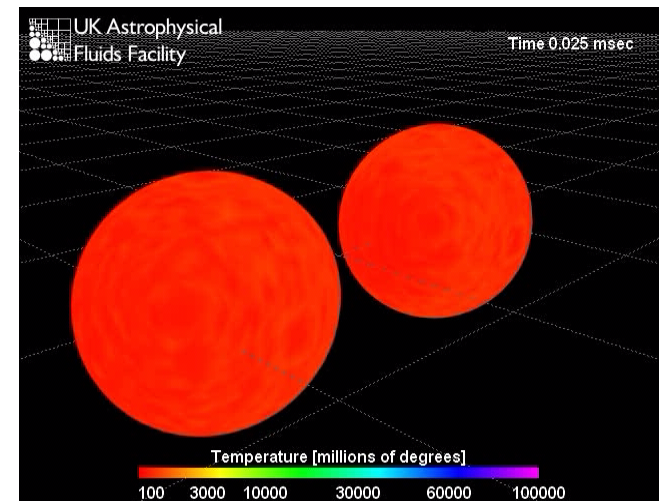
*Emissione improvvisa di enormi quantita' di energia sotto forma di fotoni di alta energia.*

*Durata molto breve (100 ms – 100 secondi)*

*Tra i fenomeni piu' violenti che si verificano nell'Universo*

*A distanze cosmologiche*

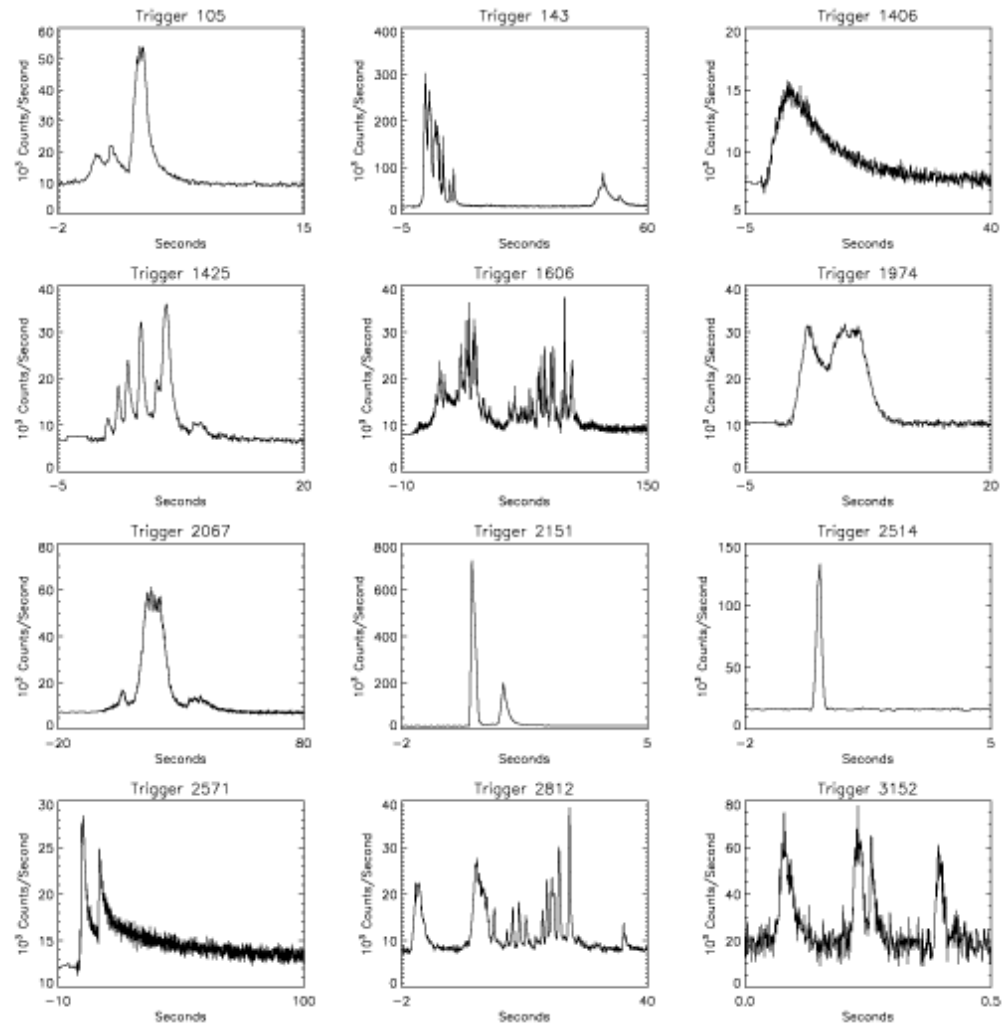
*Possibile emissione di mesoni carichi e neutrini*



# *Gamma Ray Bursters*

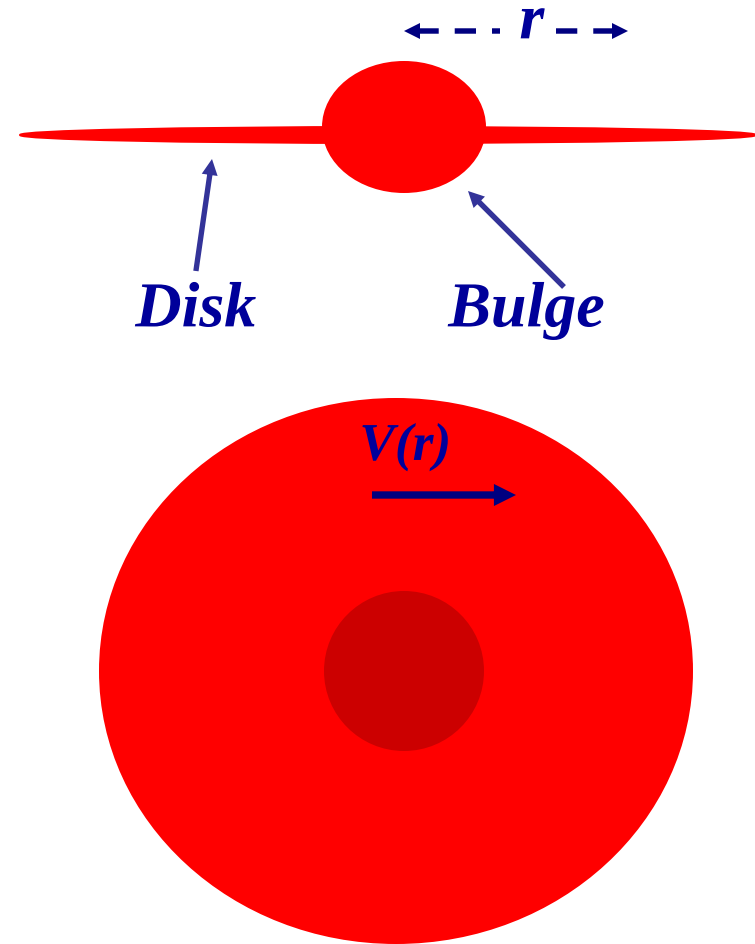
*Durata molto breve (100 ms – 100 secondi)*

*Andamento temporale dell'emissione molto vario*



# Materia oscura nell'Universo e Fisica delle particelle

## *Curve di rotazione delle Galassie a spirale*



*Velocita' radiale in funzione di  $r$*

# Materia oscura nell'Universo e Fisica delle particelle

## *Curve di rotazione delle Galassie a spirale*

Per una stella in un'orbita circolare:

$$\frac{G m M_r}{r^2} = \frac{m v(r)^2}{r} \Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{G M_r}{r}}$$

(dove  $M_r$  = massa entro il raggio  $r$ )

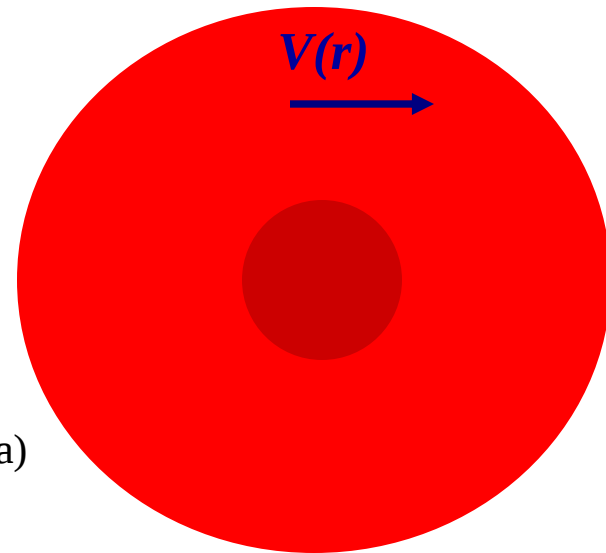
All'interno del bulge (simmetria sferica):

$$M_r = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \Rightarrow v(r) \propto r$$

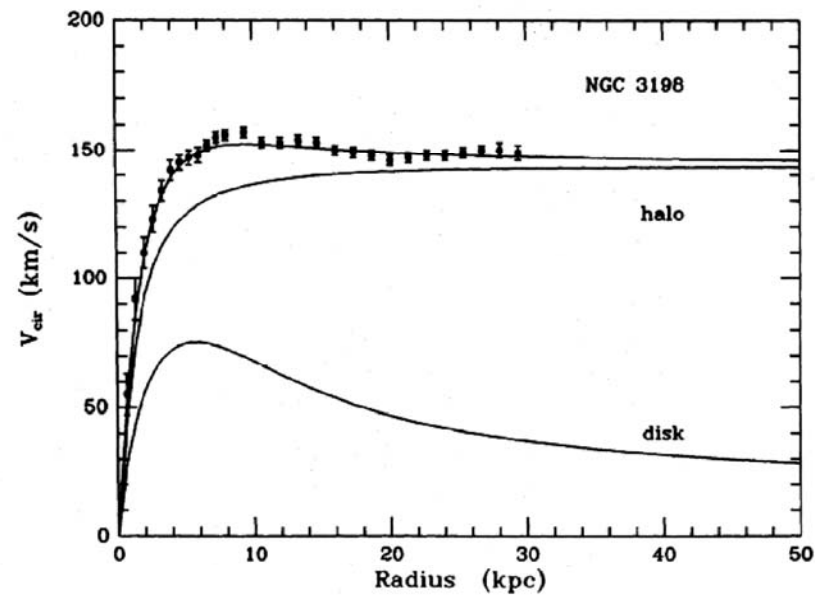
Fuori della Galassia :  $M_r = M$  (massa totale della Galassia)

$\Downarrow$

$$v(r) \propto r^{-1/2}$$



# Curva di rotazione delle galassie



**Figure 1.2:** Rotation curve of the galaxy NGC 3196: the separate contribution of the disk and the DM halo are shown.

*Consistente con la presenza di un ricco “alone” di materia invisibile*

# Particelle candidate per la “materia oscura”

*WIMPS (weakly interacting massive particles)*

*Particelle supersimmetriche (neutralini)*

*Neutrini “pesanti”*

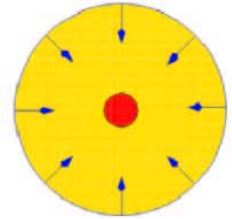
.....

*Numerose ricerche in corso ad acceleratori, come pure in esperimenti sotterranei*

## Neutrini solari

Nascita di una stella: contrazione gravitazionale di una nuvola di gas primordiale (principalmente  $\sim 75\% \text{ H}_2$ ,  $\sim 25\% \text{ He}$ )  $\Rightarrow$  aumento di densità e temperatura nel nucleo  $\Rightarrow$  **FUSIONE NUCLEARE**

**Equilibrio idrostatico fra pressione e forza gravitazionale**



Risultato finale di una catena di reazioni di fusione:



**Energia media prodotta sotto forma di radiazione elettromagnetica:**

$$Q = (4M_p - M_{\text{He}} + 2m_e)c^2 - \langle E(2\nu_e) \rangle \approx 26.1 \text{ MeV}$$

$\searrow$  (from  $2e^+ + 2e^- \rightarrow 4\gamma$ )

$$(\langle E(2\nu_e) \rangle \approx 0.59 \text{ MeV})$$

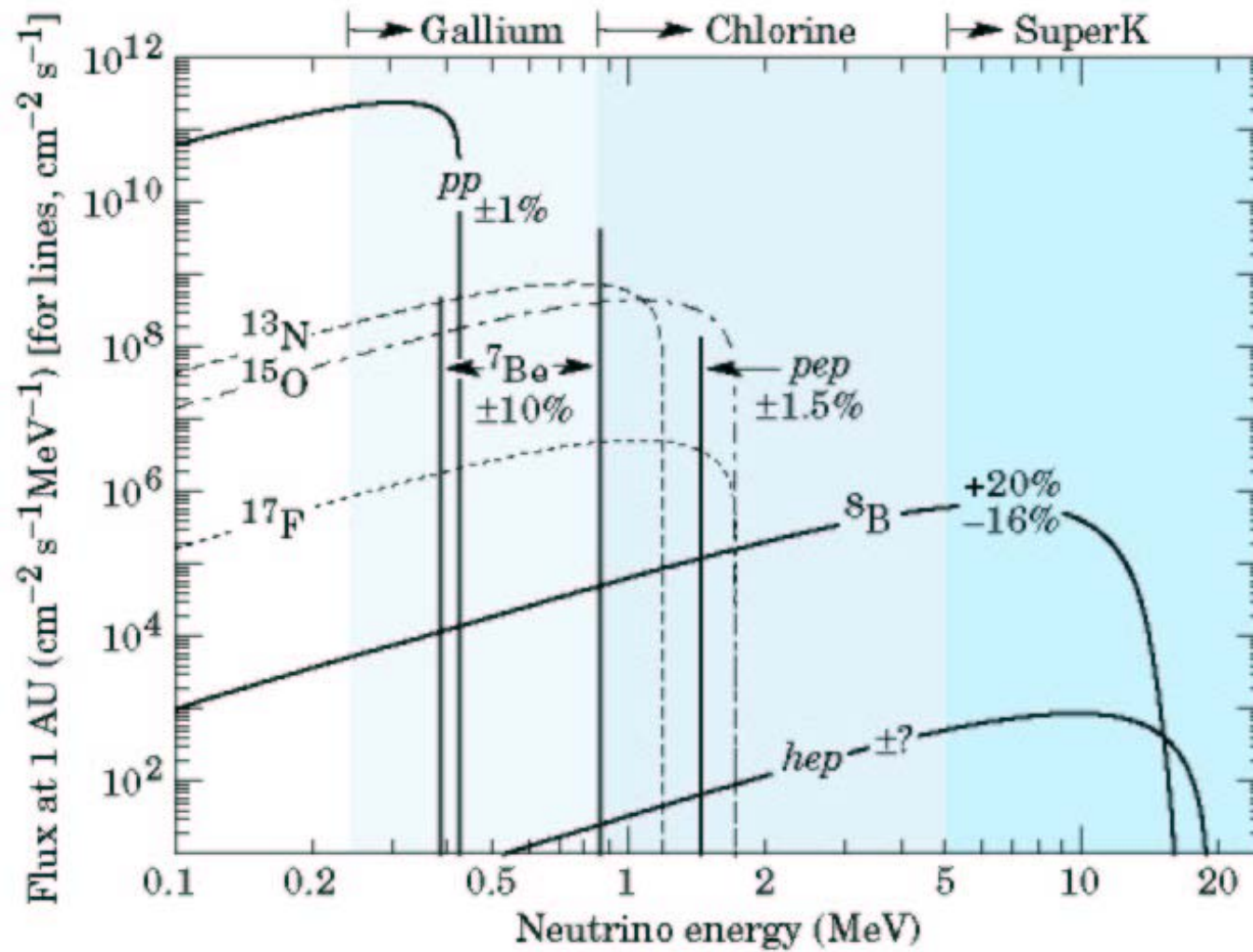
**Luminosità solare:**  $L_\odot = 3.846 \times 10^{26} \text{ W} = 2.401 \times 10^{39} \text{ MeV/s}$

**Frequenza di emissione di neutrini:**  $dN(\nu_e)/dt = 2 L_\odot / Q \approx 1.84 \times 10^{38} \text{ s}^{-1}$

**Flusso di neutrini sulla Terra:**  $\Phi(\nu_e) \approx 6.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

(distanza media Sole – Terra =  $1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ )

# Neutrini solari



## Esperimento Homestake (1970 – 1998): prima rivelazione dei neutrini solari

Metodo radio-chimico (R. Davis, University of Pennsylvania)

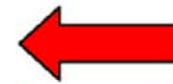


Energia alla soglia:  $E(\nu_e) > 0.814 \text{ MeV}$

Rivelatore: serbatoio contenente  $390 \text{ m}^3 \text{ C}_2\text{Cl}_4$  (percloroetilene) nella miniera di Homestake (South Dakota, U.S.A.). Profondità equivalente a  $4100 \text{ m H}_2\text{O}$ .

Contenuto di  ${}^{37}\text{Cl}$  nel Cloro naturale = 24%

Frequenza di produzione di atomi di  ${}^{37}\text{Ar}$  prevista  $\approx 1.5 / \text{giorno}$

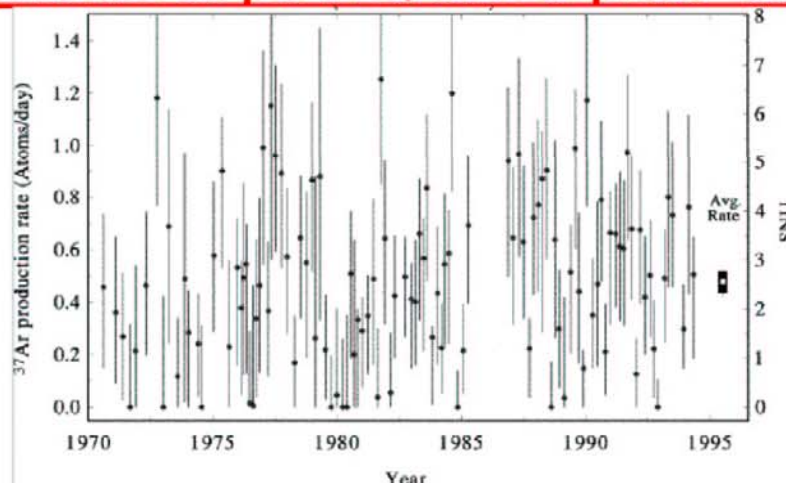


Metodo sperimentale: ogni 2 – 3 mesi estrazione di  ${}^{37}\text{Ar}$  mediante flusso di  $\text{N}_2$  attraverso il serbatoio. Purificazione, miscelazione con Argon naturale, riempimento di un contatore proporzionale e rivelazione della cattura elettronica  $e^- + {}^{37}\text{Ar} \rightarrow \nu_e + {}^{37}\text{Cl}$  (tempo di dimezzamento  $\tau_{1/2} = 34 \text{ giorni}$ )

(Lo stato finale eccitato dell'atomo di  ${}^{37}\text{Cl}$  emette elettroni Auger e/o raggi X)

Misura dell'efficienza mediante iniezione di quantità note di  ${}^{37}\text{Ar}$  nel serbatoio.

### Risultati da più di 20 anni di presa - dati



SNU (Solar Neutrino Units): unità di misura della frequenza di eventi in esperimenti radio-chimici:

1 SNU = 1 evento  $\text{s}^{-1}$  per  $10^{36}$  atomi

Media di tutte le misure:

$R({}^{37}\text{Cl}) = 2.56 \pm 0.16 \pm 0.16 \text{ SNU}$   
(stat) (sist)

Predizione SSM :  $7.6^{+1.3}_{-1.1} \text{ SNU}$

Deficit dei  
Neutrini  
Solari

# Fisica Astroparticellare

*Si occupa di problematiche scientifiche comuni alla Fisica delle Particelle ed all'Astrofisica, utilizzando concetti e tecniche mutuati dalla fisica delle particelle*

*Apporti da Astrofisica e Fisica delle particelle*

*Informazioni di grande utilità per entrambi i campi*

*Forte correlazione con la fisica dei raggi cosmici*

*Tecniche sperimentali attuali: prevalentemente dalla fisica delle particelle:*

*Rivelatori al silicio; calorimetri elettromagnetici ed adronici;*

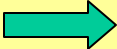
*rivelatori Cerenkov; rivelatori a scintillazione..*

## ***Fisica dei raggi cosmici: sviluppo storico***

***Scoperta della radioattività': Becquerel 1896***

***Camere a ionizzazione: segnale in vicinanza di sorgenti radioattive***

***Tuttavia....segnale mai esattamente nullo in assenza di sorgenti  
e con rivelatore totalmente schermato  
[Rutherford&Mc Lennan (1903)]***

 ***radiazione dotata di grande potere penetrante  
(molto maggiore di quella dei raggi gamma)***

***Radioattività' della terra ? Misure a varie altezze***

***Gockel (1910) misure a 5 km***

***Hess e Kolhorster (1911-1913) misure fino a 9 km***

***L'effetto aumenta con l'altezza !!!***

***“Una radiazione dotata di grande potere penetrante entra dall'alto  
nell'atmosfera” (Hess)***

# Durata di un tipico esperimento

(nel 1912 !)

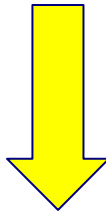
*In un volo su pallone aerostatico, effettuato ad Aussig (Boemia) alle 6.12 del 7 Agosto 1912, raggiunse un'altezza massima di 5300 m.*

*La ionizzazione risultò il doppio di quella a terra.*

*Il volo duro' circa 6 ore ed al ritorno a terra (a Pieskow, Brandenburgo, alle 12.15) il gruppo di ricercatori, effettuate le ultime verifiche, pote' rientrare a Vienna con il treno della notte.*

***Hess battezza la nuova radiazione: “hohenstrahlung”***

# *Millikan*

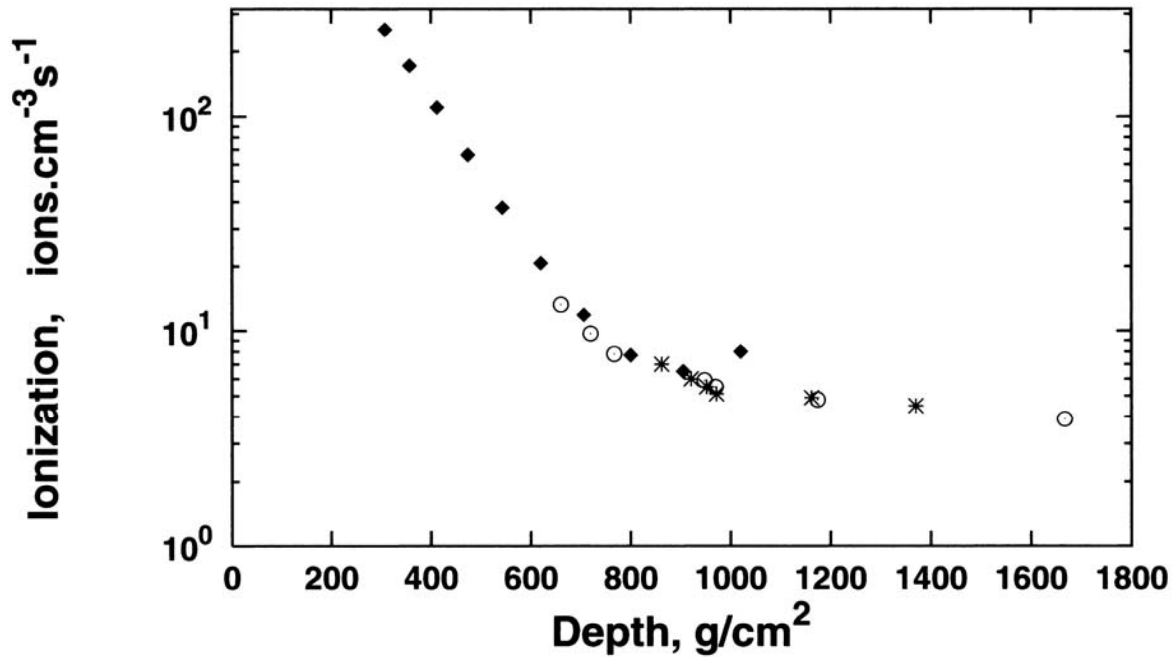


**Dubbi sull'origine della radiazione osservata da Hess e Kohlhorster (raggi gamma ?) →**

**Misure in profondita', sotto un lago**

*Se la radiazione ha origine cosmica, dovra' diminuire al crescere dello spessore d'acqua (attenuazione)*





**Fig. 1.1.** The ionization as a function of the depth in the atmosphere. The diamonds are from the flight of Kohlhörster and the circles and asterisks are from the under-water measurements of Millikan.

# Ulteriori sviluppi

*Misure successive furono effettuate, a grandi altezze, da W. Kohlhorster*

*Queste confermarono che la radiazione proveniva dallo spazio*

*Fino ai primi anni '30 si continuo' a pensare che tale radiazione fosse di origine elettromagnetica (fotoni di alta energia)*

*Anche se, fin dal 1927 il Fisico Olandese Jacob Clay aveva evidenziato l'esistenza di un effetto "latitudine" (confermato definitivamente da Compton nel 1932)*

## Millikan (Nobel 1923)

Misure effettuate tra il 1922 ed il 1923 con palloni, fino ad altezze di 16 Km  
→ nessuna dipendenza della ionizzazione dall'altezza. L'effetto ha origine locale e non cosmica. (Inoltre nessun effetto di dipendenza dalla latitudine !!)

Nuove misure effettuate da Millikan nel 1925. Si trova una dipendenza dall'altezza! Millikan presenta i nuovi risultati e reinterpreta quelli vecchi come **la prima evidenza dell'origine cosmica dell'effetto !!**

Il New York Times propone di battezzare i nuovi raggi **“Millikan Rays”**

*Ribatte Hess (nel 1926):*

*Le recenti affermazioni di millikan circa l'esistenza ed il grande potere penetrante della hohlenstrahlung sono state riportate da alcuni giornali americani come “Science” e “Scientific Monthly” in modo tale che qualcuno ha suggerito di chiamare la hohlenstrahlung “Millikan Rays” .*

*Dal momento che tale lavoro non fa altro che confermare ed estendere i risultati già ottenuti da Gockel, da me e da Kolhorster tra il 1910 ed il 1913 per mezzo delle misure in pallone, questa denominazione deve essere respinta come equivoca ed ingiustificata*

# Ulteriori sviluppi

*La diatriba tra Hess e Millikan proseguì negli anni successivi.*

*Ulteriori esperimenti dimostrarono però che le originali misure di Hess e dei ricercatori Svizzero-Tedeschi erano di gran lunga più precise di quelle di Millikan.*

*Altre misure mostrarono poi che le particelle (battezzate “raggi cosmici” da Millikan !) erano prevalentemente positive e costituite soprattutto da protoni.*

***Per la sua scoperta, Hess ebbe il premio Nobel nel 1936***

## Altre osservazioni

### Osservazioni della dipendenza dalla latitudine

*Particelle di basso impulso vengono curvate dal campo magnetico terrestre e non raggiungono la sommità dell'atmosfera (e men che mai la terra!). L'effetto è più rilevante alle piccole latitudini, dove è maggiore l'integrale del campo lungo la traiettoria*

### Deflessione in campo magnetico

**Raggio di curvatura:  $r = E / (300 B Z)$**

**dove:  $r$  in cm;  $E$  in eV;  $B$  in gauss;  $Z$  in unità di carica dell'elettrone**

**o anche:  $r = E / (0.3 B Z)$**

**dove:  $r$  in m;  $E$  in GeV;  $B$  in Tesla;  $Z$  in unità di carica dell'elettrone**

**Da cui:  $E = 0.3 B r Z$**

## *Unità' usata dai Fisici dei raggi cosmici*

**<Rigidita`>**

*E' semplicemente l'energia per unità' di carica nucleare (Ze) !*

*$R=E/Ze$  (o  $\text{pc}/Ze$ ); con:  $E= B r Z e$ ; da cui:  $R=B r$*

*Alta rigidita' = alta energia ( a parita' di Z)*

*Particella di alta rigidita' poco "curvata" da B*

*Particella di bassa rigidita' curvata cosi' tanto da non raggiungere la terra.*

*Cutoff in rigidita' dovuto al campo magnetico:*

$$R_{\text{cut}} = 14.9 (\cos \theta_M)^4$$

*e.g. per  $\cos \theta_M = 42^\circ \Rightarrow R_{\text{cut}} = 4.5 \text{ GV}$*

## Effetto est-ovest

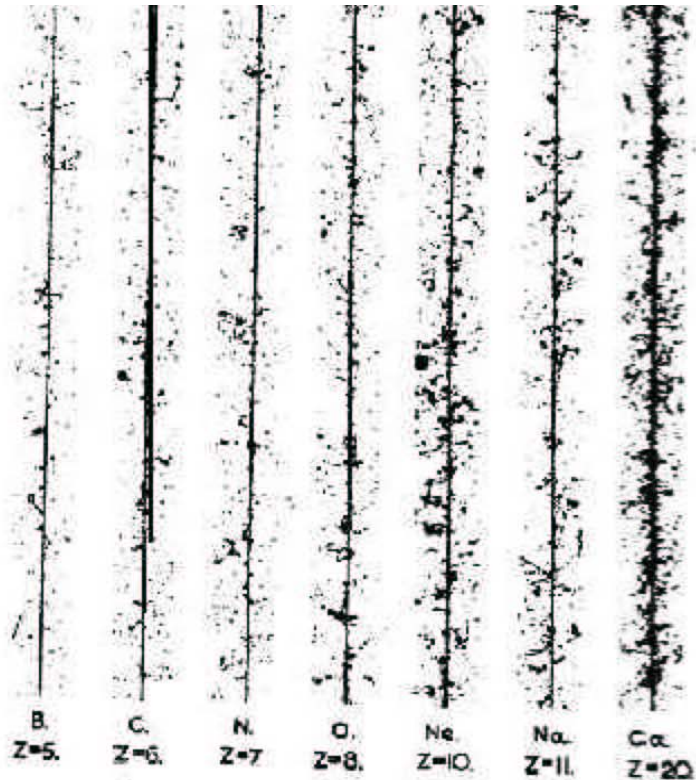
*Per lo stesso motivo, tenendo conto del verso del campo e del fatto che le particelle sono prevalentemente positive, si vede che quelle che provengono da est sono soppresse molto piu' di quelle che provengono da ovest*

*(ricordiamo che, all'equatore  $B$  e' rivolto verso  $N$ )*

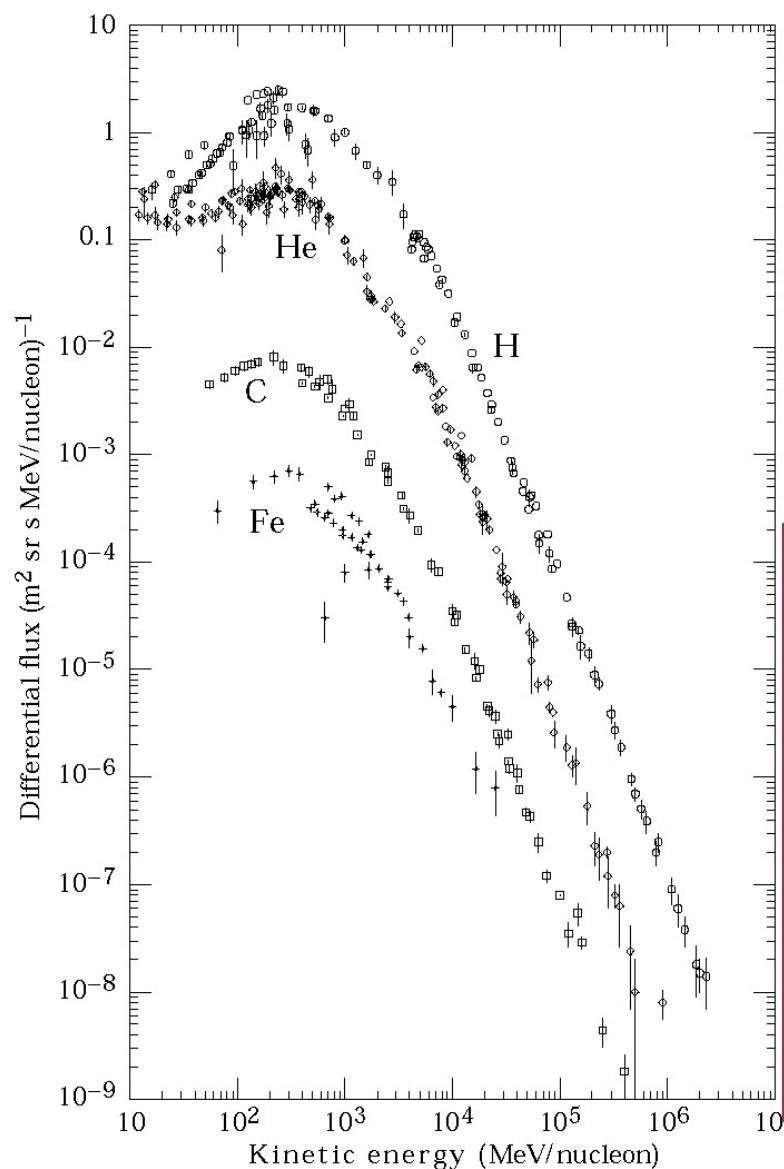
## Misure della composizione isotopica

*Prime misure di Z effettuate con emulsioni fotografiche*

*Alto Z  $\rightarrow$  elevato “annerimento”*



## Misure del flusso differenziale per particelle di diverso Z



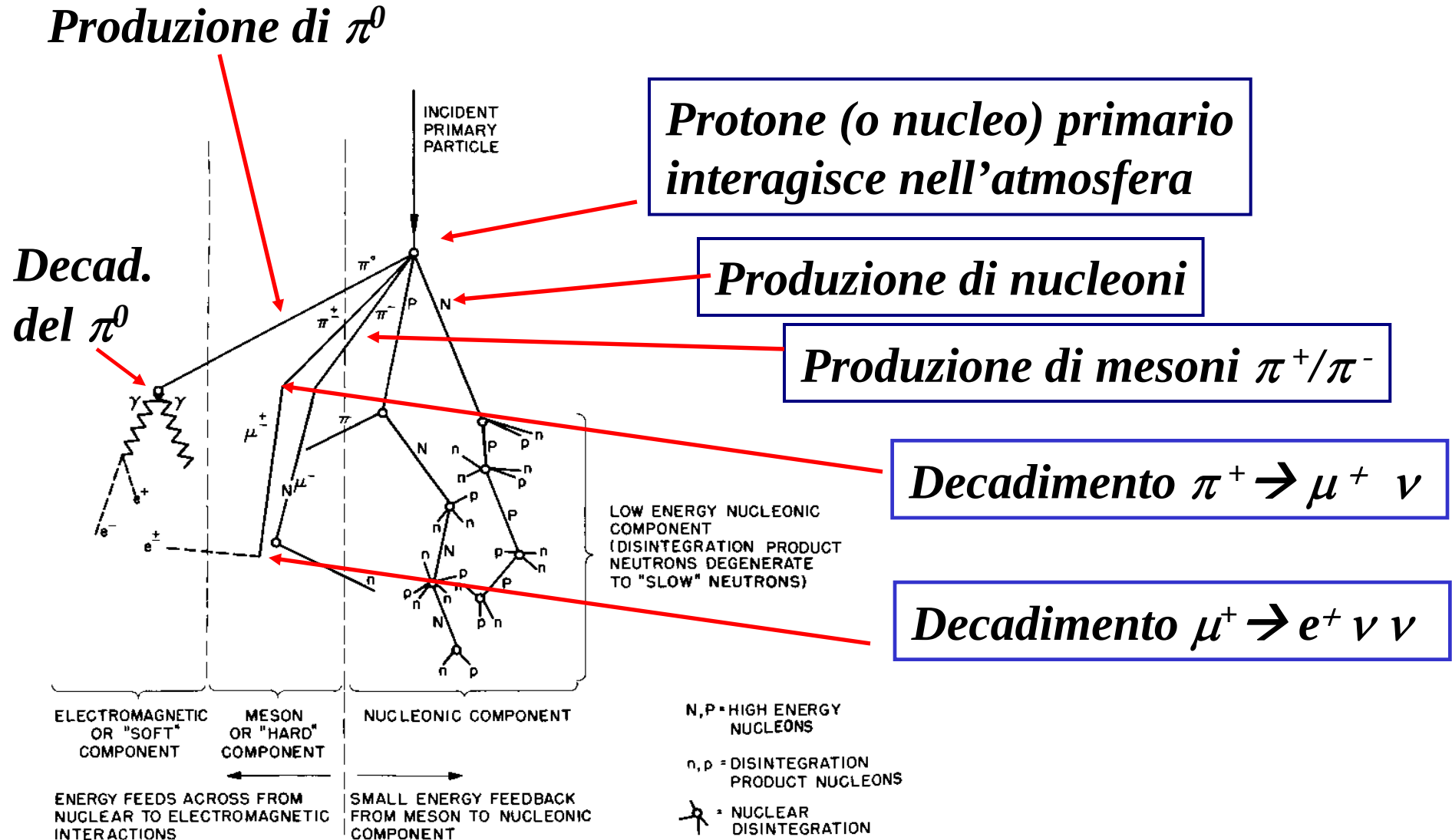
| Z    | Elemento | Flusso relativo |
|------|----------|-----------------|
| 1    | H        | 540             |
| 2    | He       | 26              |
| 3-5  | Li-B     | 0.40            |
| 6-8  | C-O      | 2.20            |
| 9-10 | F-Ne     | 0.30            |

*Flusso di elettroni circa due ordini di grandezza inferiore a quello dei protoni*

*Flusso di positroni circa 1/20 di quello degli elettroni*

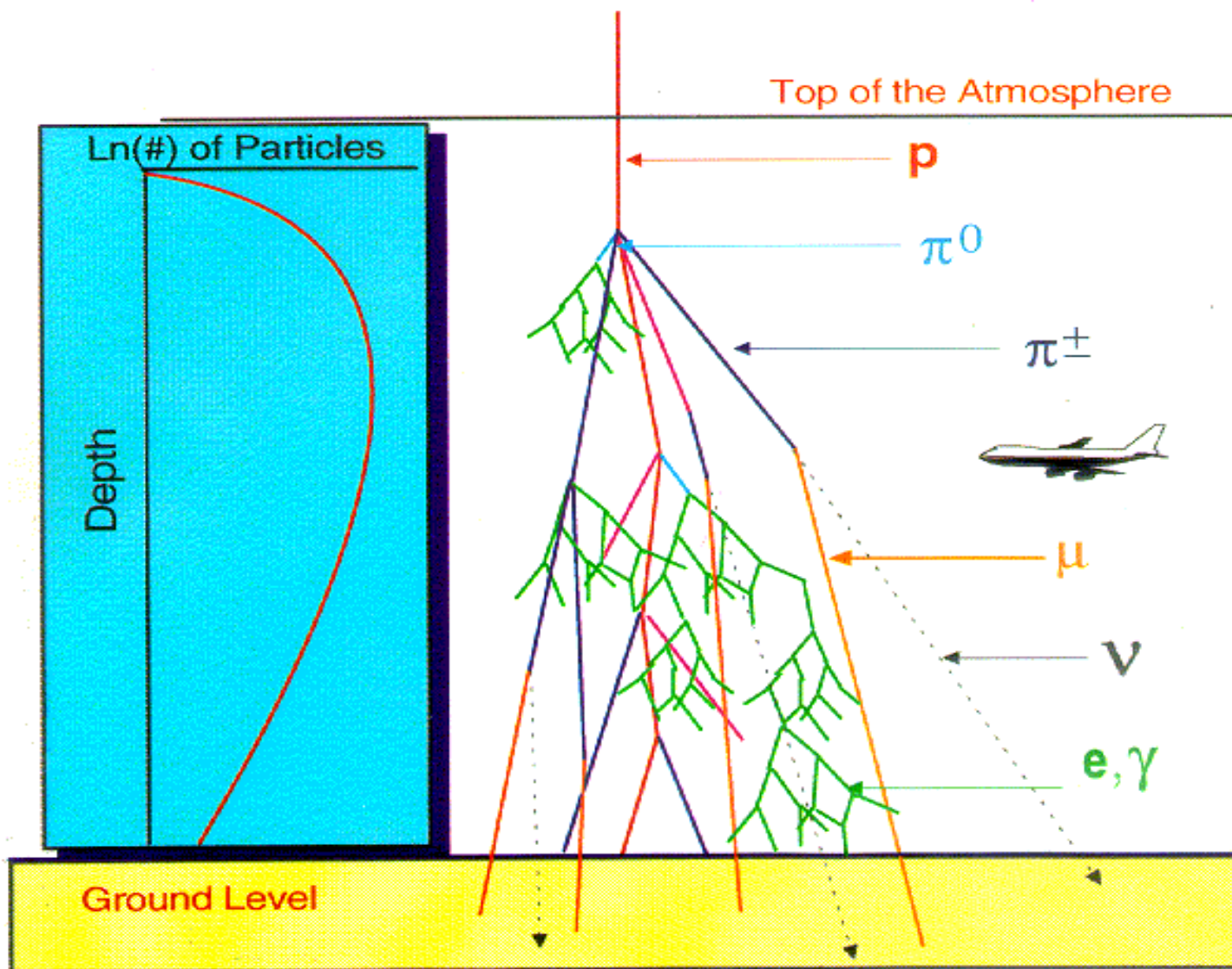
*Flusso di antiprotoni circa un decimillesimo di quello dei protoni*

# Raggi cosmici nell'atmosfera



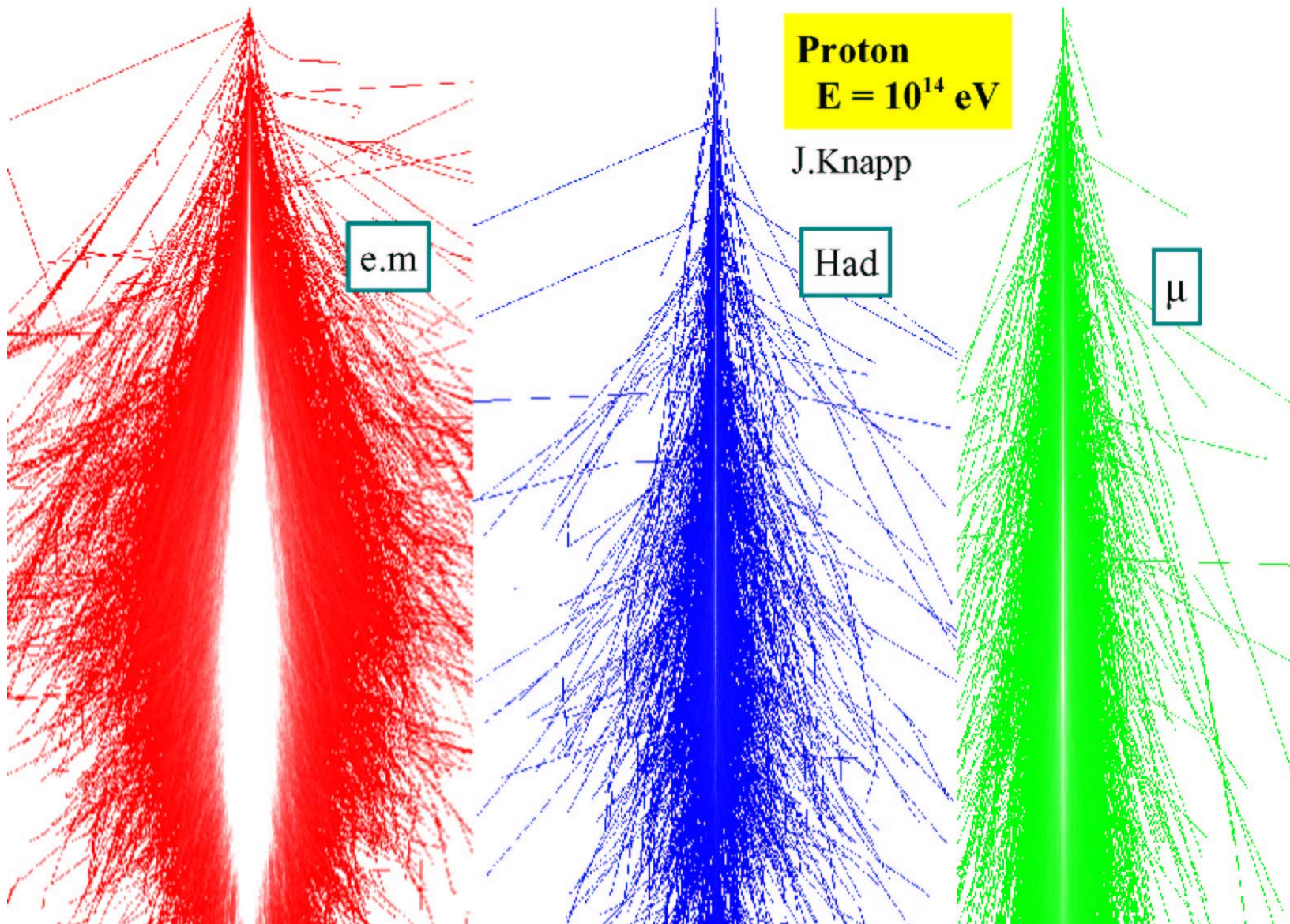
Schematic Diagram of Cosmic Ray Shower

## *Raggi cosmici nell'atmosfera*

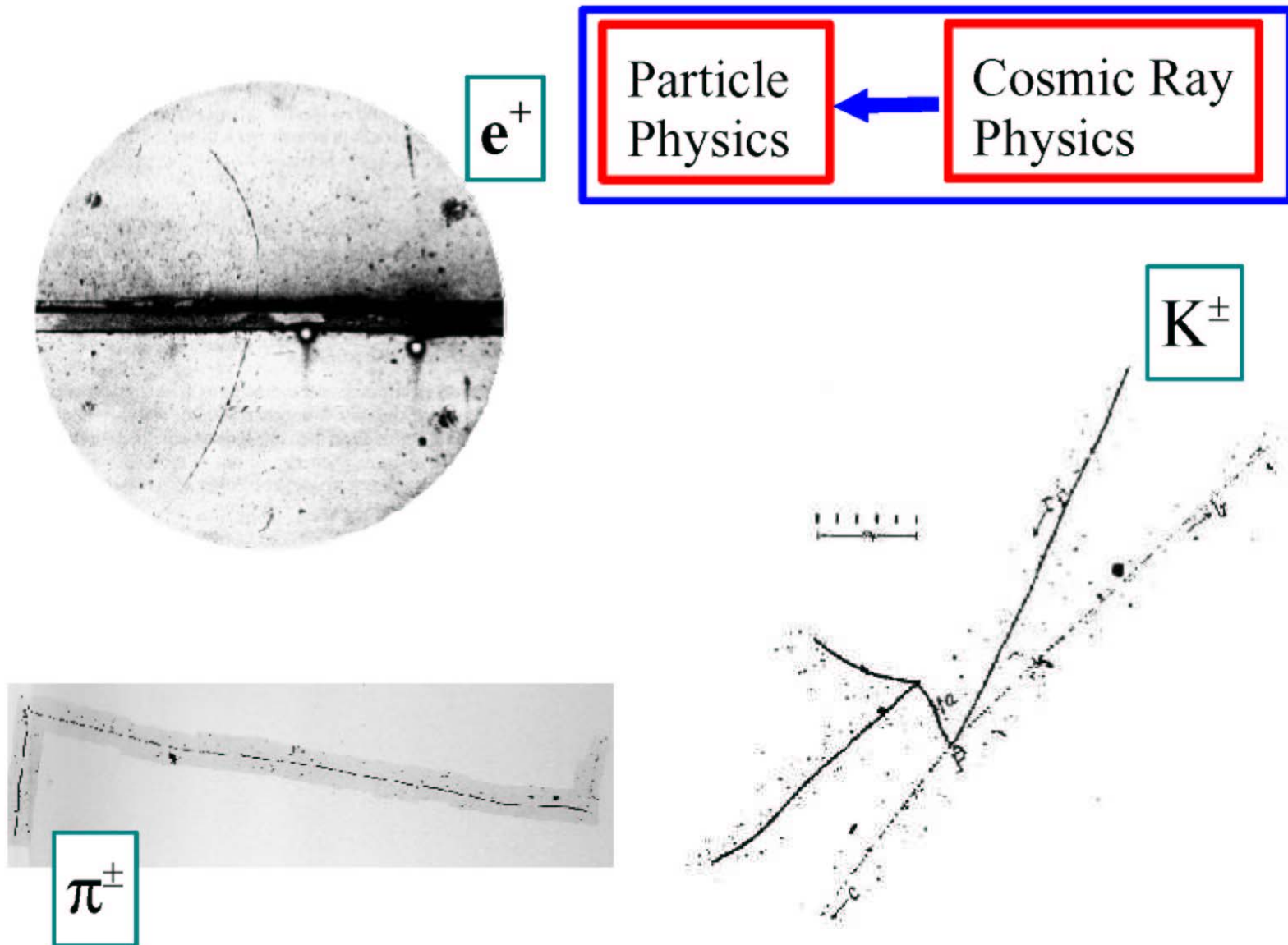


Extensive Air Showers

# *Raggi cosmici nell'atmosfera*



## *Raggi cosmici: primi acceleratori di particelle*



***Avvento degli acceleratori di particelle (1945...)***

***Declino della fisica dei raggi cosmici***

***Revival attorno al 1985 (Proton decay, Supernova 1987A, neutrini solari, problema della dark matter, monopoli....)***

***Costruzione di laboratori sotterranei (IMB, Kamiokande, Gran Sasso, Sudbury...)***

***Esperimenti su satelliti***

# Indirect Measurements of Cosmic Rays

$$E > 10^{14} \text{ eV}$$

Tibet AS $\gamma$  detector

**Extensive Air Showers**

Multi-Component measurements

e.m. ( $e^{\pm}$ ,  $\gamma$ ),  $\mu$ , hadrons.



# ***Panorama delle ricerche estremamente vasto***

*Ampie intersezioni con astrofisica e fisica delle particelle*

## **Problemi aperti:**

*Origine dei raggi cosmici e meccanismi di accelerazione*

*(Supernovae remnants, Neutron stars, Black holes, Quasars...)*

*Propagazione dei raggi cosmici nel mezzo galattico ed intergalattico*

*Raggi gamma di origine cosmica*

*(Ricerca di sorgenti, studio delle pulsar...)*

*Proprietà dei neutrini (masse ed oscillazioni)*

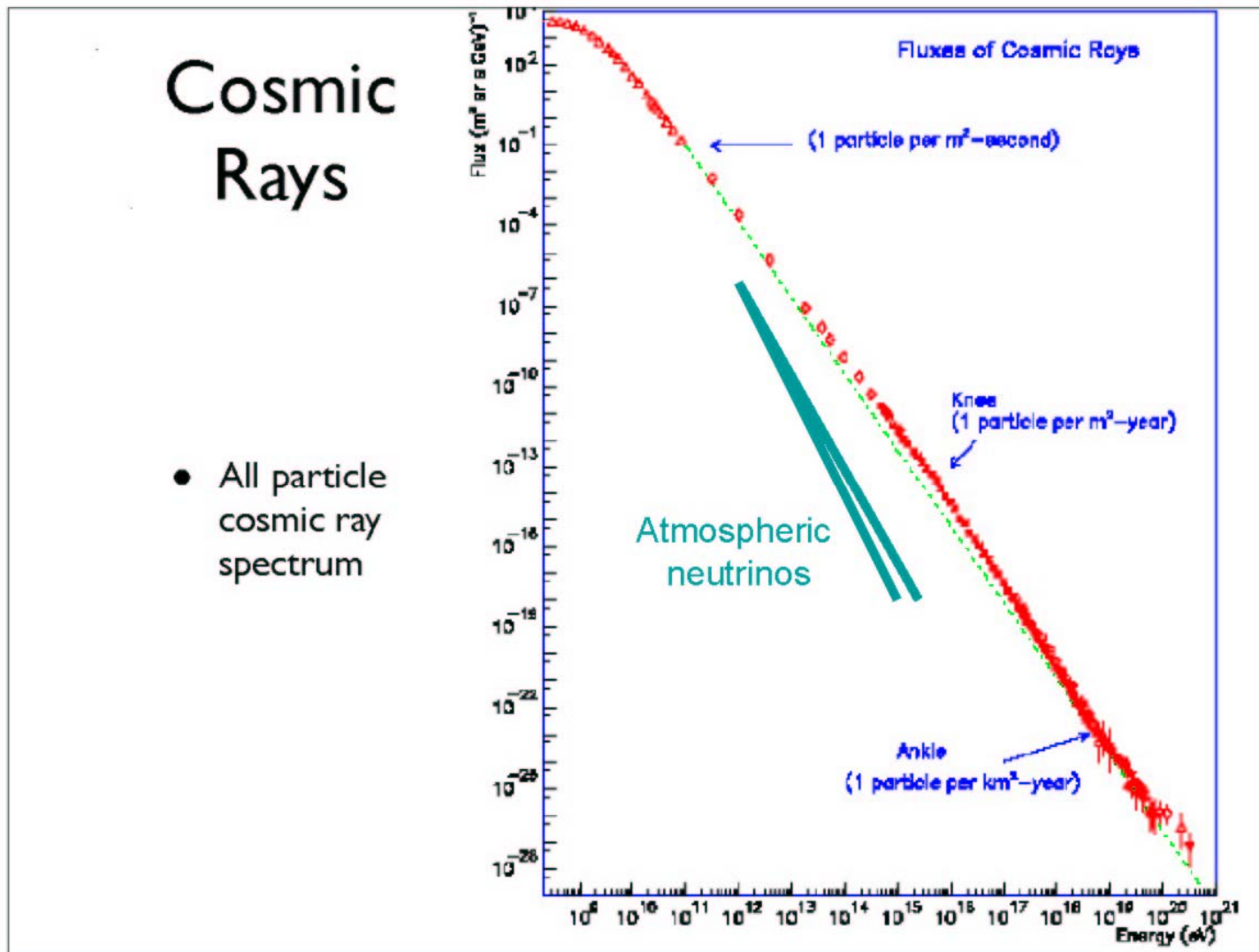
*(studi facenti uso di neutrini solari + neutrini atmosferici)*

*Ricerche della materia oscura (Wimps) e dei monopoli magnetici*

*Ricerca di neutrini di origine cosmica*

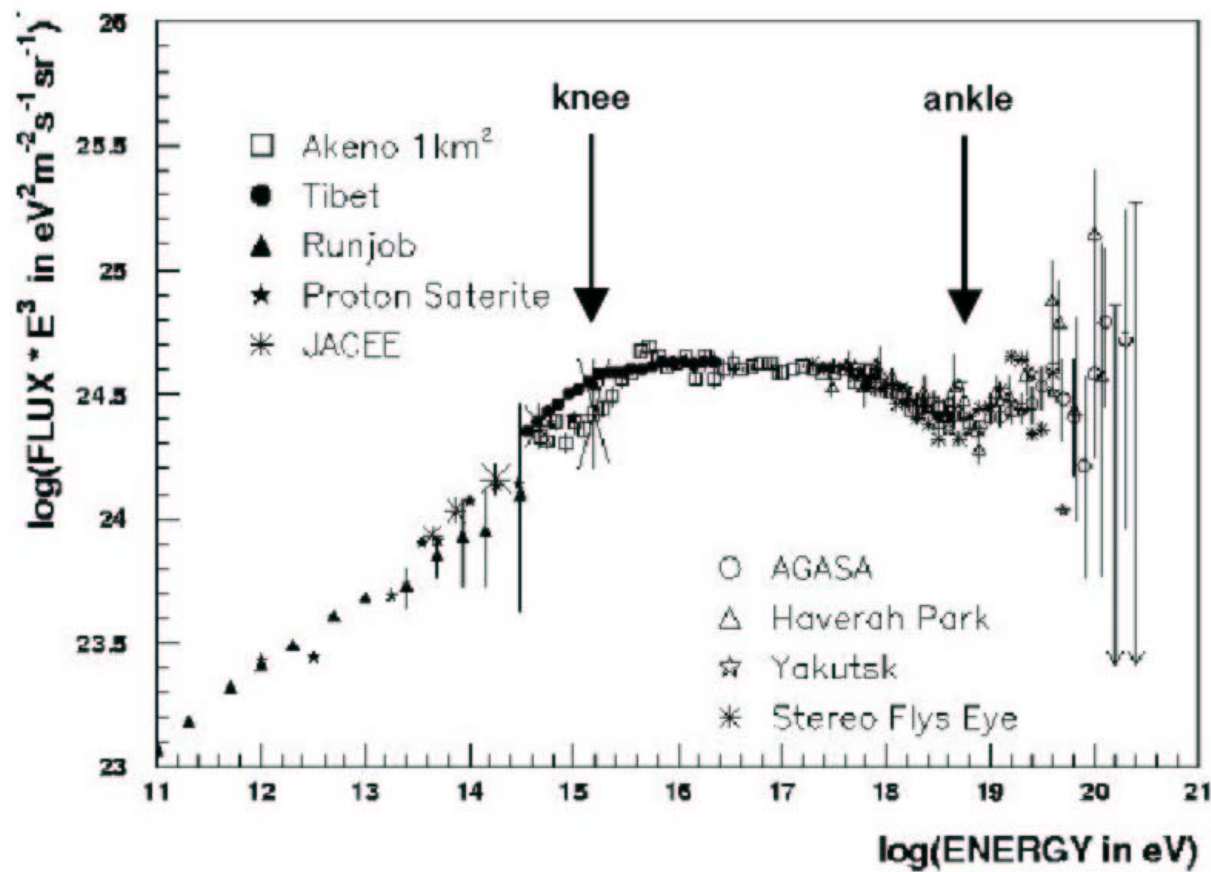
# Spettro dei raggi cosmici

$$\text{Flusso} \sim E^{-\alpha} \text{ con } \alpha = 2.7$$



# Flusso moltiplicato per $E^3$

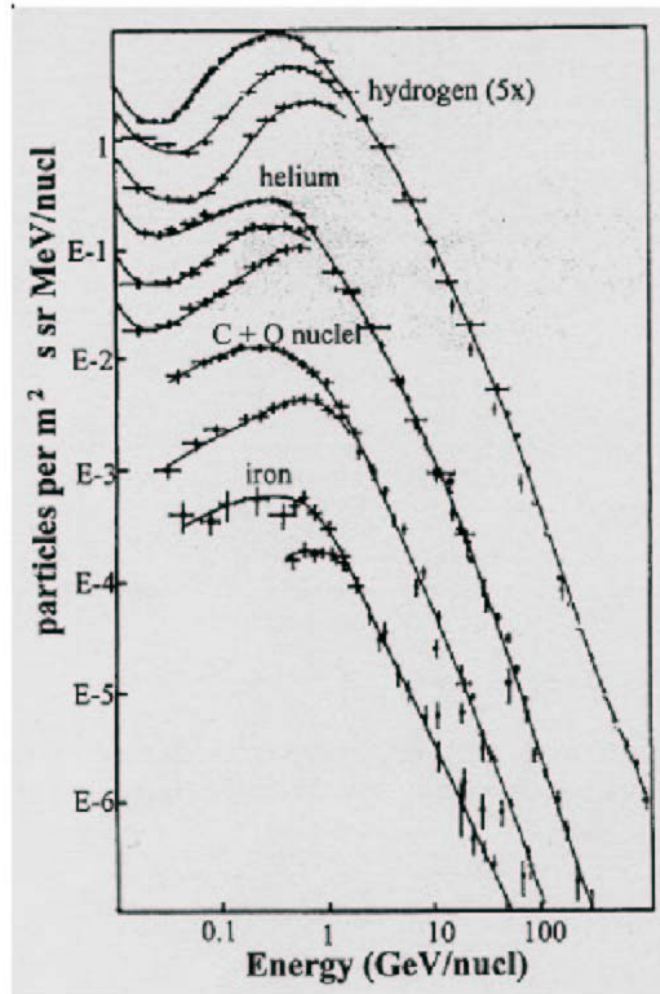
## Multiplied by $E^3$



# Modulazione

## Spectra

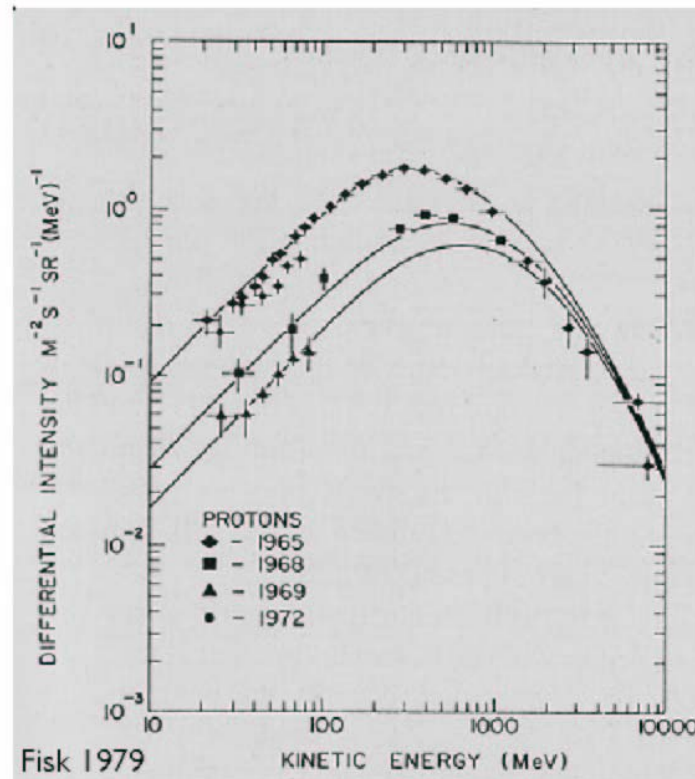
- Modulation at energies below 1 GeV
- Energy per nucleon indicates magnetic field effect/shielding



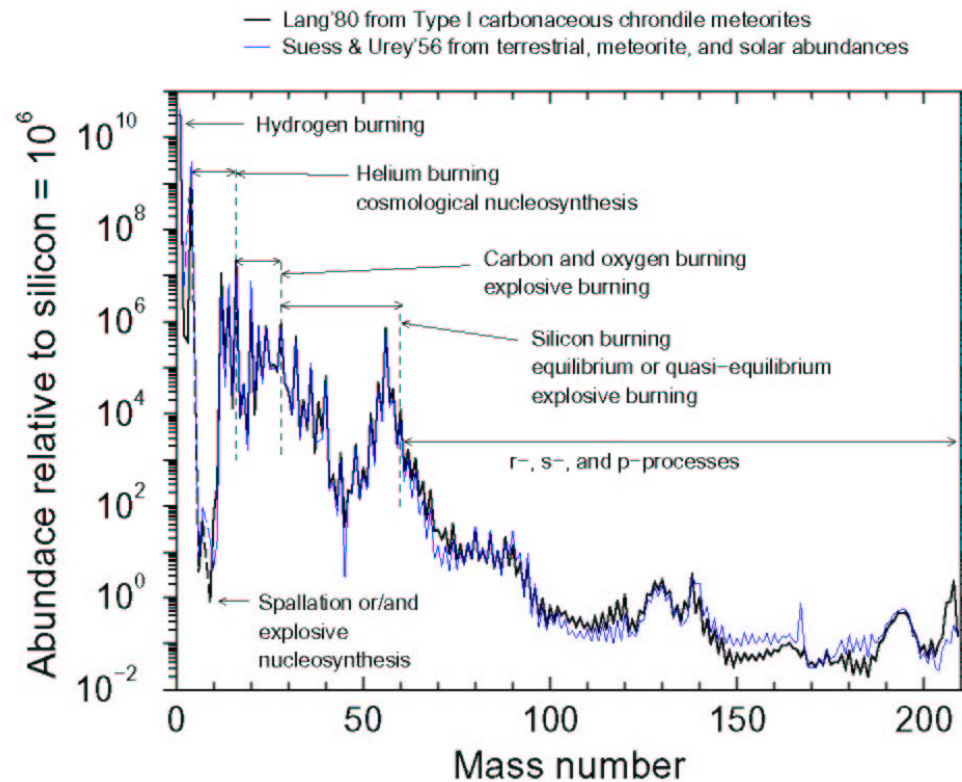
# *Effetti dei cicli solari*

## Low energy cosmic rays

- Solar cycle variations at low energies  $\approx < 1 \text{ GeV}$
- CR  $> 1 \text{ GeV}$  from galaxy penetrate heliosphere
- Differential spectrum maximum at 300 MeV
- Check the numbers: Integrate from 100 to 1000:  $\sim 1000 \text{ GeV}$  protons  $/\text{m}^2/\text{sec}/\text{sr}$ , that is intense!! (think twice before you volunteer for the mission to Mars)



# Abbondanze isotopiche nel sistema solare



Ref: Mashnik, astro/ph:  
0008382

Fig. 1.— Abundances of solar system nuclides plotted as a function of mass number. The thin blue curves shows old data compiled in Table III by Suess and Urey (1956) which are based on measurements of terrestrial, meteoric, and solar abundances. These data were used by Burbidge, Burbidge, Fowler, and Hoyle (1957) in postulating the basic nucleosynthetic processes in stars in their seminal work which become widely known as “B<sup>2</sup>FH,” the “bible” of nuclear astrophysics. The thick black curve shows newer data from the compilation published in Table 38 by Lang (1980) which are based upon measurement of Type I carbonaceous chondrite meteorites, and are thought to be a better representation than Suess and Urey’s curve. The nuclear processes which are thought to be the main stellar mechanisms of nuclide production are shown as well in the figure.

# Abbondanze relative nei raggi cosmici e nel sistema solare

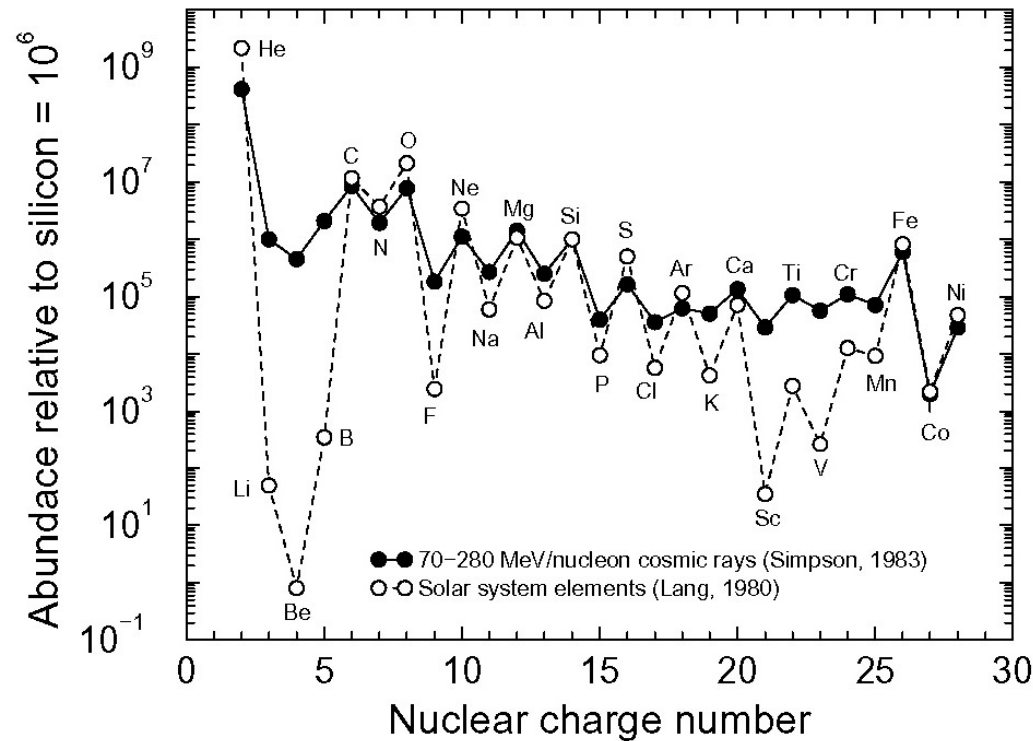
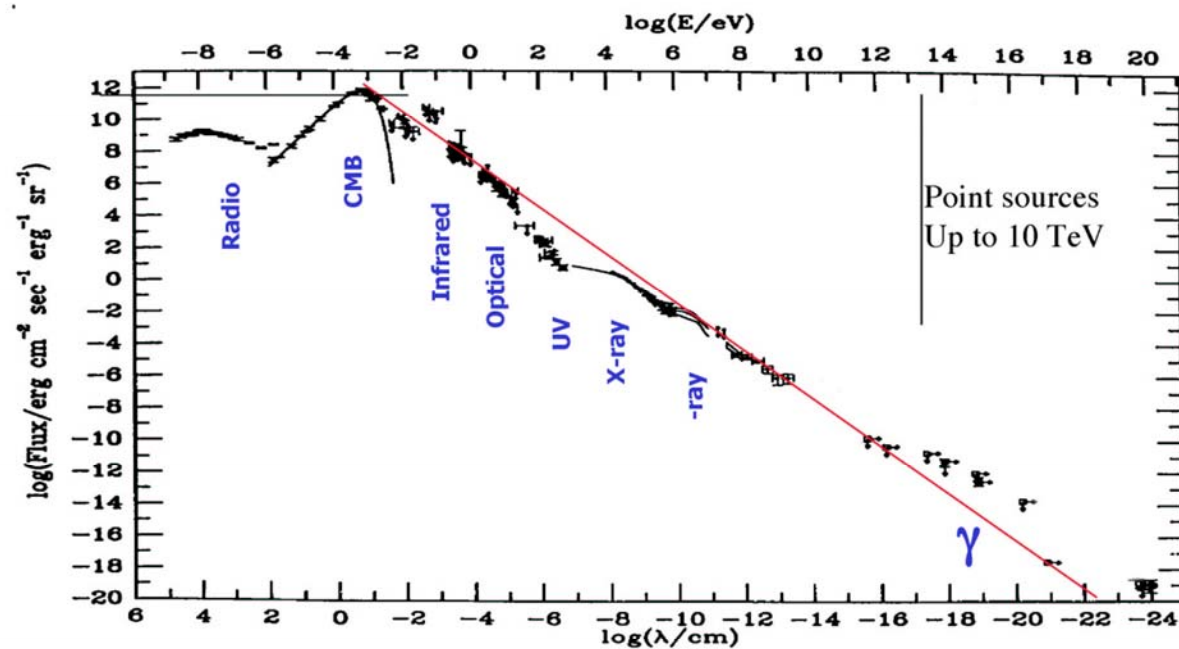


Fig. 2.— The relative elemental abundances of 70-280 MeV/nucleon cosmic rays (closed circles, taken from Tab. 2 by Simpson, 1983) compared to the solar system abundances (open circles, taken from Tab. 38 by Lang, 1980) normalized to Si =  $10^6$ .

# Fotoni

## Photon spectrum



***Lezioni: Martedì 12-13 Aula N1  
Mercoledì 15-17 Aula N1  
Venerdì 14-16 Aula V1***

***Informazioni sul corso:***

***<http://www.df.unipi.it/~flaminio/astroparticelle/astroparticelle.html>***

***Referenze: Files powerpoint!!***

***Inoltre:***

***Malcolm S. Longair: “High Energy Astrophysics”; Cambridge Univ. Press***

***Mario Vietri: “Astrofisica delle alte energie”; Bollati-Boringhieri, 2006***

***Todor Stanev: “High Energy Cosmic Rays”; Springer-Praxis 2004***

***Neb Duric: “Advanced Astrophysics”; Cambridge Univ. Press 2003***

***+ ..... Vedere sul sito del corso***