

La scoperta della violazione di CP

Brookhaven, A.D. 1963

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 132, NUMBER 5

1 DECEMBER 1963

Anomalous Regeneration of K_1^0 Mesons from K_2^0 Mesons*

L. B. LEIPUNER, W. CHINOWSKY,[†] AND R. CRITTENDEN
Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

AND

R. ADAIR,[‡] B. MUSGRAVE,[§] AND F. T. SHIVELY[†]
Yale University, New Haven, Connecticut

(Received 13 March 1963; revised manuscript received 27 August 1963)

A beam of 1.0-BeV/c K_2^0 mesons passing through liquid hydrogen in a bubble chamber was seen to generate K_1^0 mesons with the momentum and direction of the original beam. The intensity of K_1^0 production was far greater than that anticipated from conventional mechanisms, and the suggestion is made that the K_1^0 mesons are produced by coherent regeneration resulting from a new weak long-range interaction between protons and K mesons.

"The probability that the peak arises purely as a statistical fluctuation is $\approx 10^{-6}$ ".

"The possibility of interpreting the events as two-pion decays of K_2^0 , which would be allowed if CP invariance were violated, is excluded by the result of observation of 411 K_2^0 decays in cloud chambers^{5,6}, none of which were consistent with two-pion decays".

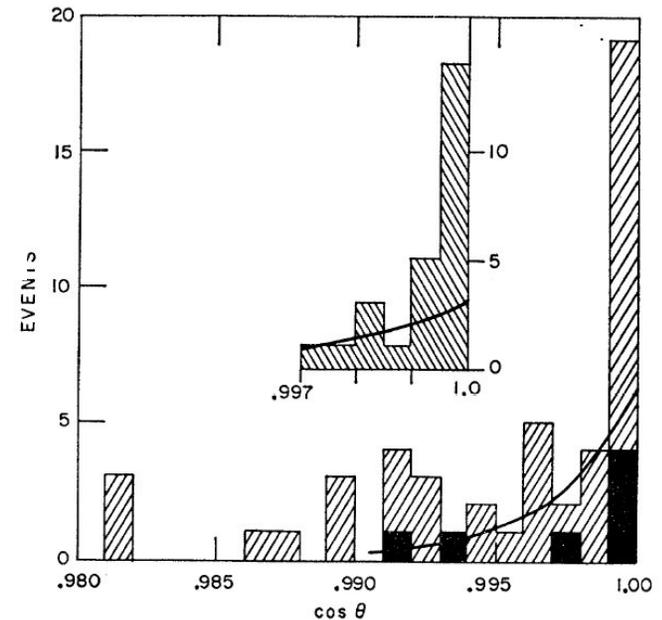


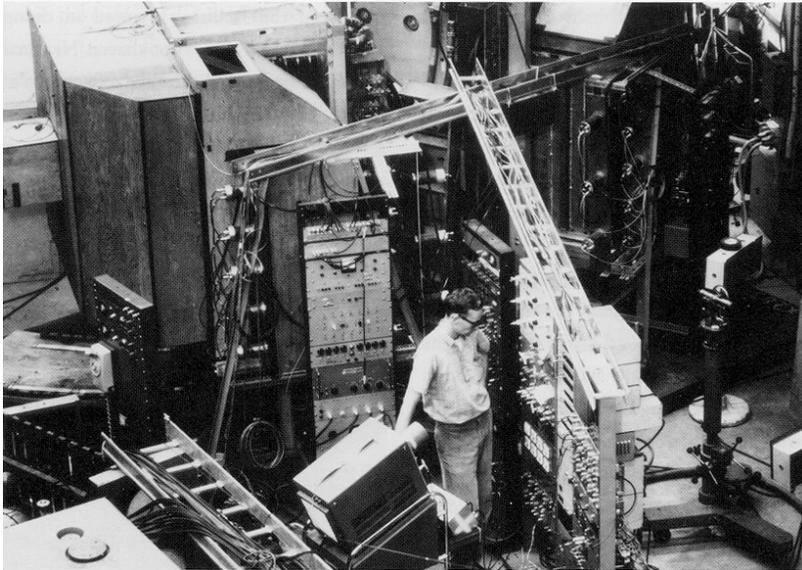
FIG. 3. Angular distribution of events which have a 2π -decay Q value consistent with K_1^0 decay, and a momentum consistent with the beam momentum. θ is the angle between the total visible momentum and the incident beam. All events are plotted for which $180 \text{ MeV} \leq Q \leq 270 \text{ MeV}$, $p \geq 800 \text{ MeV}/c$. The black histogram presents those events in front of the thin window. The solid curve represents the contribution expected from K_2^0 decays.

Nuovo meccanismo di rigenerazione coerente?

M.S. Sozzi

Violazione di CP

L'esperimento



Letter of Intent di J. Cronin, V. Fitch,
R. Turley: **Aprile 1963**
Approvazione direzione BNL: **Maggio 1963**
Apparato pronto: **22 Giugno 1963**
40 giorni+notte di run: **fine Luglio 1963**

DATE	TIME	STOP	3a	2a	N	J	Pix	PULSES	NEW	NM	3%	N	67	N	N	N	SUSSO	MANU	
125455	124157	22.10	4.51	0.47	10.000	8.076	6.98	4618	45234	.452	.451	2.7	.127	.145	.127	.688	0.10	63348	b=25%
124157	124920	12.40	12.10	11.75	9.931	8.94	7.82	4618	46182	.459	.456	20.2	.121	.144	.129	3.14	11.20	63335	450 (3"50 DIAL) 363
THURSDAY - JUNE 20, 1963 - CP INVARIANCE RUN																			
126492	126445	5.41	5.27	256	934	151	1.744											64387	63261
126445	127262	5.4469	5.3147	2.449	30.811	12.045	3.17	312	15248	.508	.423	2.17	.1216	.1772	.0930	10.6	2.390	AT N127355-D1A6.36	
127262	128912	12.00	11.55	10.41	10.42	9.64	11.00	8.87	90.192				.179	.179	.081	14.0	4.40		
128912	128604	1.19	1.15	1.641	6.97	9.97	3.68						.185	.187	.0799	7.77	2.40		
128604	130845	12.10	12.02	11.92	10.02	9.92	9.97	5.94	47.48				.185	.182	.0824	14.9	2.44		
130845	131535	2.40	11.734	5.87	6.577	2.77	3.0	1.88	20.215	.418			16.2	.185	.0752	11.3	2.47	63320	
131535	132426	12.41	12.38	12.44	11.42	10.0	6.977	97.965					.140		.113	5.06	11.2	2.40	
132426	133226	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13				.143	.143	.070	11.9	2.37	3446	

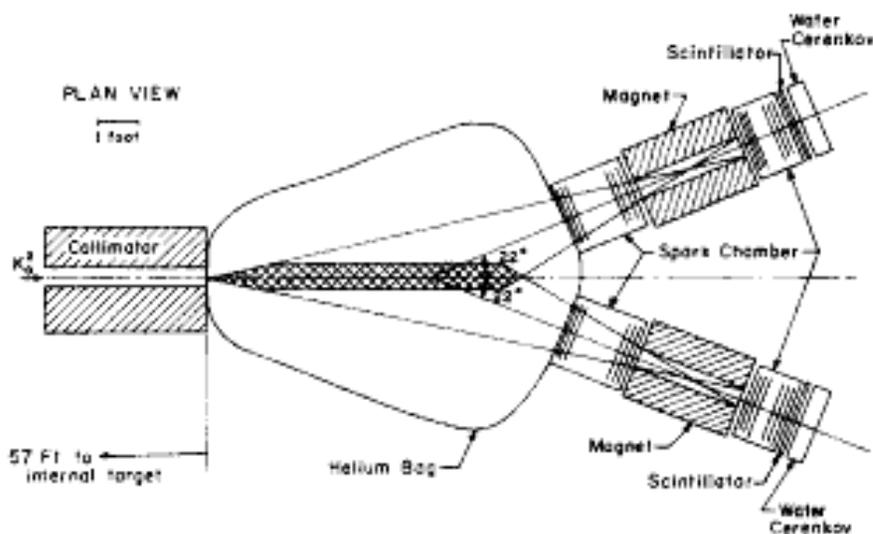
Figure 7: Page from the data book at the beginning of the CP violation run, June 20, 1963

Dal run book all'inizio del run per CP

L'esperimento

Esperimento per studiare la rigenerazione anomala in avanti vista da Leipuner *et al.* al sincrotrone da 30 GeV.

Parte secondaria del programma: miglioramento del limite su $K_L \rightarrow \pi\pi$



J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch, R. Turlay (1964)

- 30 GeV p su bersaglio Be, fascio neutro $\sim 1 \text{ GeV}/c$ @ 30°
- Assorbitore Pb, collimatore, magneti
- "He bag" dopo 17 m ($\beta\gamma\tau \sim 2.3 \text{ cm}$, restano solo K_L)
- Spettrometro a due bracci con camere a scintilla comandate da contatori Cerenkov ad H_2O e scintillatori
- Misura **massa invariante** e p_T di coppie $\pi^+\pi^-$ (decadimenti a 3-corpi non danno un picco)
- Distribuzione $m(\pi^+\pi^-)$ con 3.6 MeV/ c^2 RMS
- **Calibrazione** con rigeneratore spesso di tungsteno ed anti-coincidenza

Camere a scintilla:
migliore risoluzione sulle
tracce e trigger selettivo

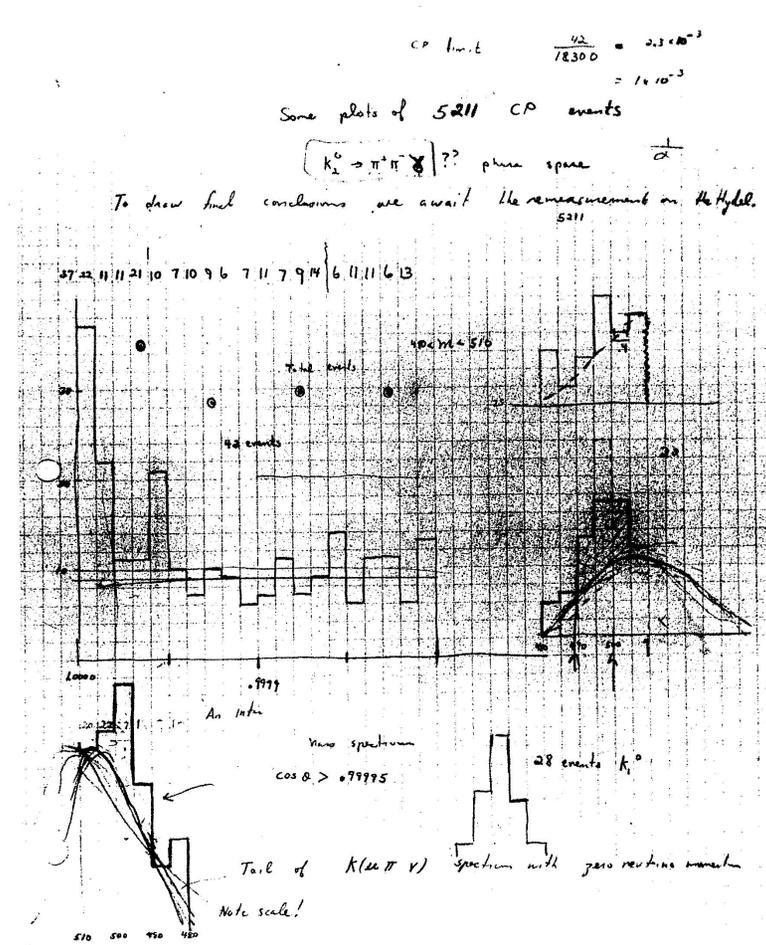
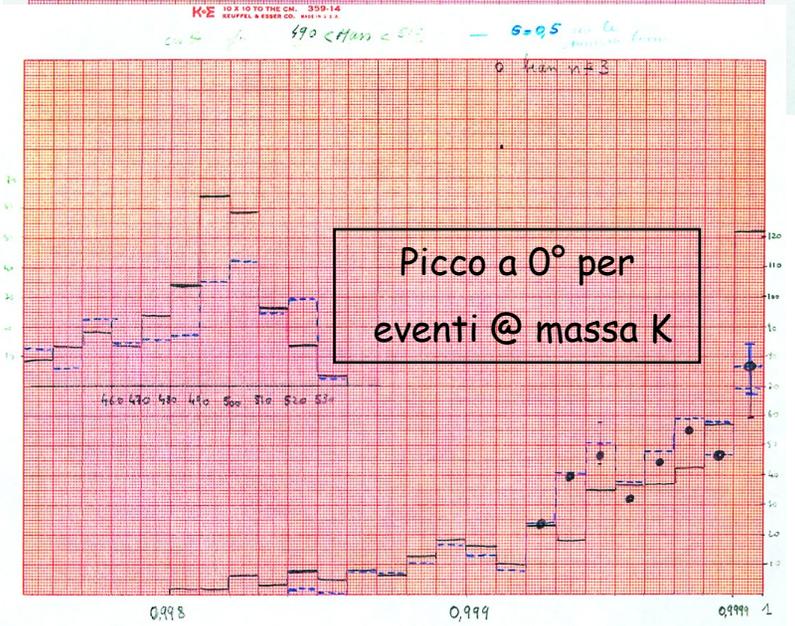
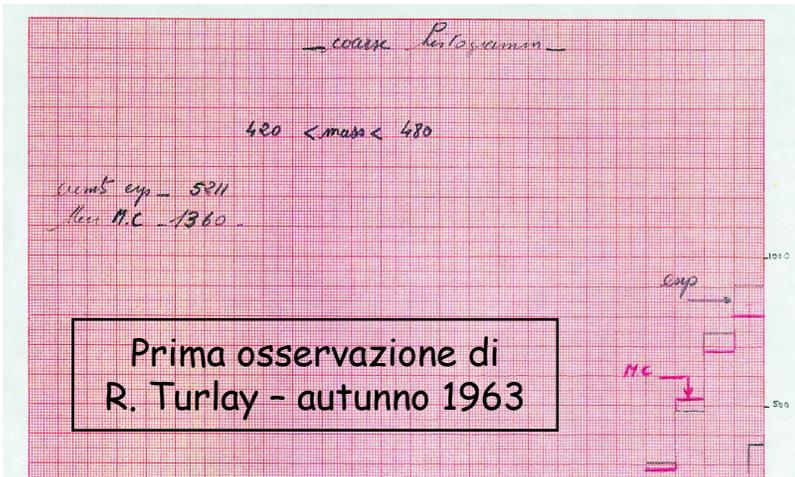
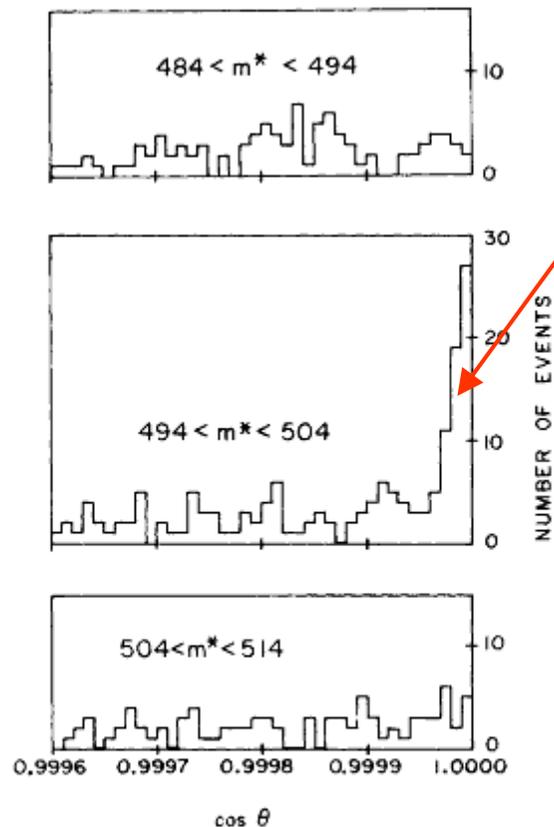


Figure 9: Page from notebook of J. W. Cronin with comment on the first results of the analysis of the CP events measured with the angular encoder.

EVIDENCE FOR THE 2π DECAY OF THE K_2^0 MESON*†

J. H. Christenson, J. W. Cronin,† V. L. Fitch,† and R. Turlay§
 Princeton University, Princeton, New Jersey
 (Received 10 July 1964)



$$(45 \pm 9)/22700$$

"The events from the He gas appear identical with those from the coherent regeneration in tungsten in both mass and angular spread".

Dopo 6 mesi di analisi:
 spiegazioni alternative
 rigettate:

Rigenerazione coerente in He
 decadimenti a 3-corpi $\pi\mu\nu$ o $\pi e\nu$
 decadimenti $\pi\pi\gamma$

FIG. 3. Angular distribution in three mass ranges for events with $\cos\theta > 0.9995$.

Nessuna possibilita' di fuga...

Molte (disperate) spiegazioni per salvare la simmetria CP:
rigenerazione anomala (mosca...), "iper-fotoni" da campo cosmologico
CP-asimmetrico, fallimento della MQ convenzionale, decadimento a 3 corpi,
stati finali diversi, mis-identificazione di π ...

MA: Massa invariante = $m(K^0)$
Tasso di decadimento indipendente dal metodo di produzione
Evidenza di π

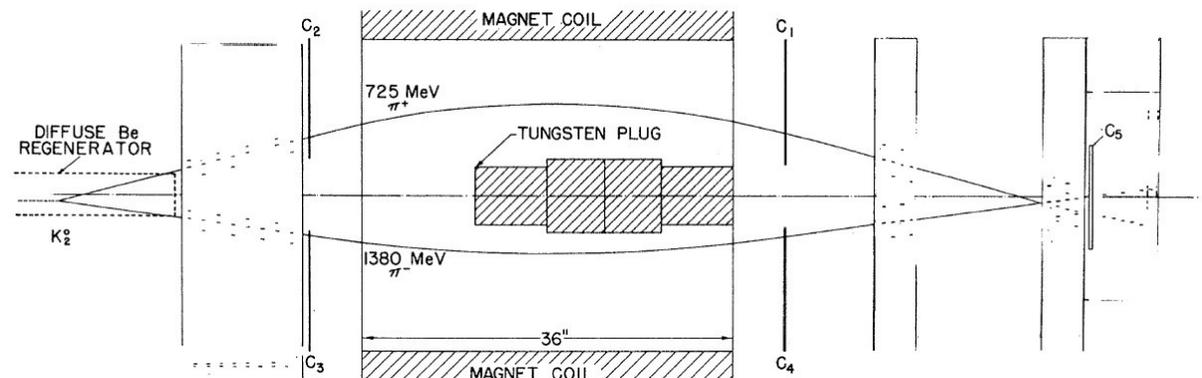
La prova schiacciante: interferenza $K_S - K_L$
studiando il tasso di $\pi\pi$ nel vuoto e con rigeneratore

Rigeneratore diffuso
(piastre di Be spesse 0.5 mm, totale 0.1 g/cm^3 ,
ampiezze confrontabili da K_S e K_L):

Misura di $K \rightarrow \pi^+\pi^-$ nel vuoto

Misura di $K \rightarrow \pi^+\pi^-$ con rigeneratore denso

V. Fitch et al. (BNL 1965):



Tasso $\pi^+\pi^-$ dopo il rigeneratore:

$$I(\pi^+\pi^-) = \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-) \left[|\eta_{+-}|^2 e^{-\Gamma_L t} + |A_r|^2 e^{-\Gamma_S t} + 2|\eta_{+-}||A_r| e^{-(\Gamma_S + \Gamma_L)t/2} \cos(\Delta m t - \phi_{+-} + \phi_r) \right]$$

$$\eta_{+-} = A(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-) / A(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-) = |\eta_{+-}| e^{i\phi_{+-}} \leftarrow \text{Violazione di CP (no materia)}$$

$$A_r = |A_r| e^{i\phi_r} \leftarrow \text{Rigenerazione (rigeneratore spesso)}$$

$$\Delta m = m(K_L) - m(K_S)$$

VOLUME 15, NUMBER 2

PHYSICAL REVIEW LETTERS

12 JULY 1965

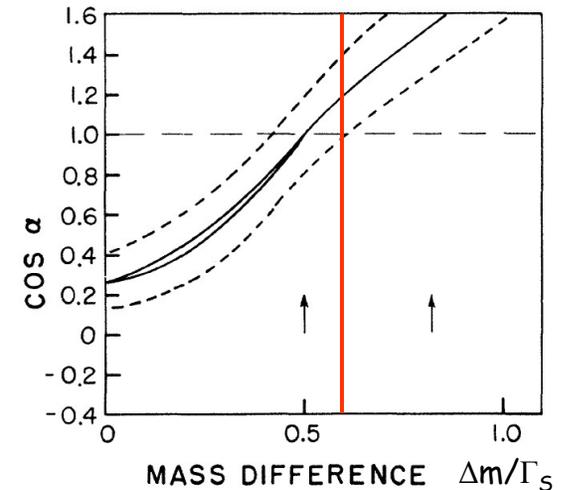
EVIDENCE FOR CONSTRUCTIVE INTERFERENCE BETWEEN COHERENTLY REGENERATED
AND CP-NONCONSERVING AMPLITUDES*

V. L. Fitch, R. F. Roth, J. S. Russ, and W. Vernon

Palmer Physical Laboratory, Princeton University, Princeton, New Jersey

(Received 3 June 1965)

Rigeneratore diffuso ($|\eta| \sim |A_r|$):



Confronto con il tasso nel vuoto:

Intensita' x4 \Rightarrow interferenza di stati coerenti (identici)

Esiste una coppia (K_S, K_L) di stati non degeneri ($\Delta m \neq 0$), uno dei quali decade in due stati finali con CP opposte

"But then in 1964 these same particles, in effect, dropped the other shoe".
(V. Fitch, 1980)

Evidenza di VIOLAZIONE DI SIMMETRIA CP

New York Times, August 6th 1964:
"High energy physics experiment finds time reversal may affect physics laws".

Premio Nobel 1980

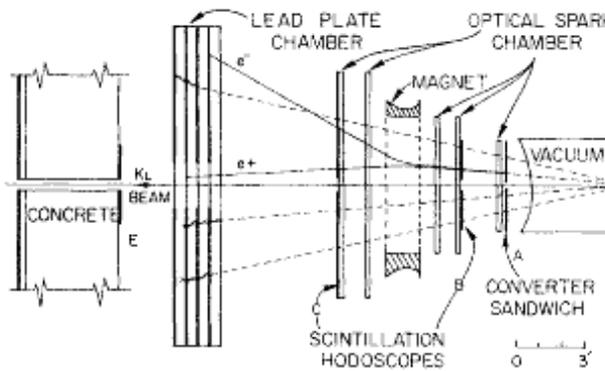
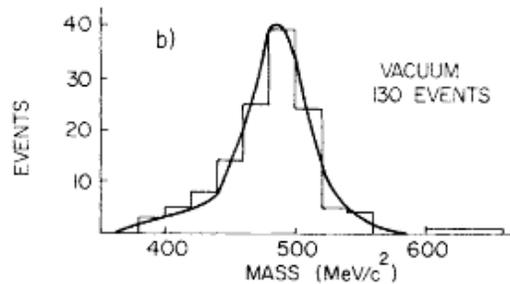
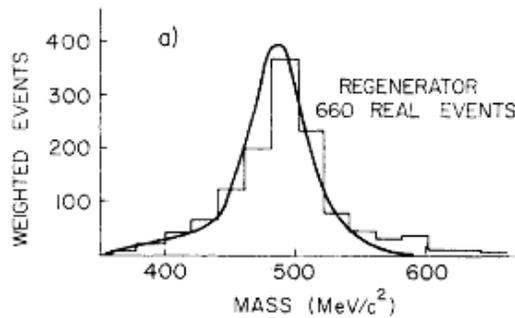


Conferme

CERN, Harwell (1965)

Asimmetrie di carica:
 $K_{\mu 3}$ (Stanford, 1967)

$K_{e 3}$ (Columbia, 1967)



Decadimento non-esponenziale in autostato di CP: violazione di CP

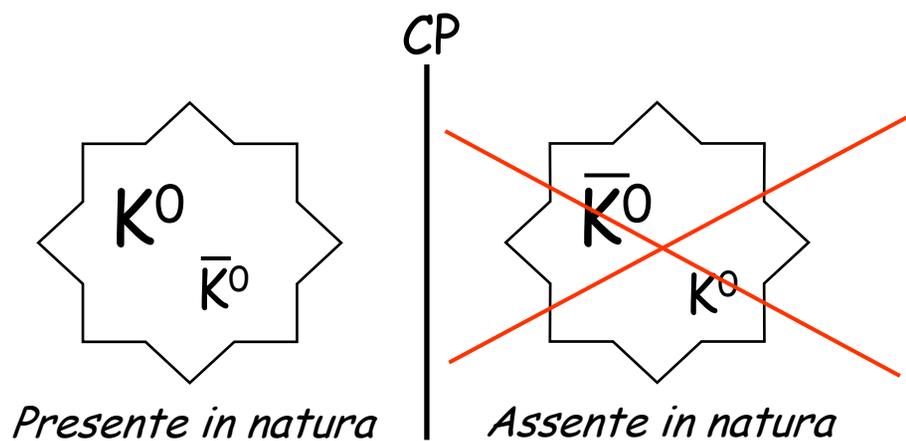
Banner *et al.* (1968):
 Evidenza del decadimento
 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$

Nuovo paradigma

Gli stati fisici (massa e vita media definite) *non sono* autostati di CP:

$$K_S, K_L \neq K_1, K_2$$

K_L e' una sovrapposizione di autostati di stranezza con una *lieve* (0.002) preponderanza di K^0 .



$$\left\{ \begin{array}{l} |K_S\rangle \propto (1 + \varepsilon) |K^0\rangle + (1 - \varepsilon) |\overline{K^0}\rangle \\ |K_L\rangle \propto (1 + \varepsilon) |K^0\rangle - (1 - \varepsilon) |\overline{K^0}\rangle \end{array} \right.$$

Ricerca della violazione di CP

- Transizioni tra autostati di CP con autovalori opposti
- Ricerca di stati fisici non autostati di CP:
decadimento non esponenziale di autostati di CP
(CP: stati fisici = autostati di CP o
coppie particella-antiparticella degeneri in massa)
- Differenze nelle larghezze di decadimento parziali di particelle ed antiparticelle
- Verifica della reversibilita' temporale
- Misura di grandezze dispari per CP non nulle

Violazione di CP nei mesoni neutri

Formalismo a due stati

Si considera il sottospazio (non completo) $\{K^0, \bar{K}^0\}$, per tempi \gg della scala delle interazioni forti (Weisskopf-Wigner).

$$|\psi(t)\rangle = e^{-i\mathbf{H}_{eff} t} |\psi(0)\rangle$$

Hamiltoniana efficace non hermitiana, scomposta in parte hermitiana (matrice di massa) ed anti-hermitiana ($i/2$ matrice di decadimento):

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = \mathbf{H}_{eff} |\psi(t)\rangle = \left[\mathbf{M} - \frac{i}{2} \mathbf{\Gamma} \right] |\psi(t)\rangle \quad \left[\mathbf{M} - \frac{i}{2} \mathbf{\Gamma} \right] |K_{S,L}(t)\rangle = \lambda_{S,L} |K_{S,L}(t)\rangle$$

$$\mathbf{M}^+ = \mathbf{M} \quad \mathbf{\Gamma}^+ = \mathbf{\Gamma}$$

$$\lambda_{S,L} = m_{S,L} - \frac{i}{2} \Gamma_{S,L}$$

$$M_{ij} = m_K \delta_{ij} + \langle i | H_2 | j \rangle - \mathcal{P} \sum_k \frac{\langle i | H_1 | k \rangle \langle k | H_1 | j \rangle}{E_k - m_K}$$

H_2 : transizioni dirette $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ ($\Delta S=2$)

$$\Gamma_{ij} = 2\pi \sum_k \langle i | H_1 | k \rangle \langle k | H_1 | j \rangle \delta(E_k - m_K)$$

H_1 : hamiltoniana debole ($\Delta S=1$)

Caso di simmetria CP

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}$$

Se vale la simmetria CP $[\mathbf{H}, \mathbf{CP}] = 0$

$$\mathbf{CP} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\langle K^0 | \mathbf{H} | K^0 \rangle = \langle K^0 | \mathbf{H} \mathbf{CP} | \bar{K}^0 \rangle = \langle K^0 | \mathbf{CP} \mathbf{H} | \bar{K}^0 \rangle = \langle \bar{K}^0 | \mathbf{H} | \bar{K}^0 \rangle$$

$$\langle K^0 | \mathbf{H} | \bar{K}^0 \rangle = \langle K^0 | \mathbf{H} \mathbf{CP} | K^0 \rangle = \langle K^0 | \mathbf{CP} \mathbf{H} | K^0 \rangle = \langle \bar{K}^0 | \mathbf{H} | K^0 \rangle$$

$$H_{11} = H_{22} = m_0$$

$$H_{12} = H_{21} = \delta m$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} m_K + m_0 & \delta m \\ \delta m & m_K + m_0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H} |\Psi\rangle = (m_K + m_0 \pm \delta m) |\Psi\rangle$$

Mass shift m_0 & *mass split* $\Delta m = 2\delta m$

Differenza di massa Δm

Deriva da interazioni $\Delta S=2$:

$$m(K_1) - m(K_2) = \langle K^0 | H_{eff} | \bar{K}^0 \rangle + \langle \bar{K}^0 | H_{eff} | K^0 \rangle$$

Richiede *violazione di stranezza*:

$$\langle \bar{K}^0 | H_{eff} | K^0 \rangle = \langle \bar{K}^0 | H_{eff} S | K^0 \rangle = \langle \bar{K}^0 | S H_{eff} | K^0 \rangle = - \langle \bar{K}^0 | H_{eff} | K^0 \rangle = 0$$

$$\Delta m \cong 2 \operatorname{Re} M_{12} \quad \Delta \Gamma \cong 2 \operatorname{Re} \Gamma_{12}$$

$$\Delta m = m(K_L) - m(K_S) = (3.491 \pm 0.009) \cdot 10^{-6} \text{ eV}$$

Effetto delle interazioni deboli al *second'ordine*!

Δm misurato mediante oscillazioni
 $(K^+ n \rightarrow K^0 p) \quad K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \quad (\bar{K}^0 p \rightarrow \Lambda \pi^+)$
 o rigenerazione.

Rigenerazione

Nello spazio (K^0, \bar{K}^0) :
 Propagazione nel vuoto

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi\rangle = \begin{pmatrix} \bar{m} - i\bar{\Gamma}/2 & \Delta m - i\Delta\Gamma/2 \\ \Delta m - i\Delta\Gamma/2 & \bar{m} - i\bar{\Gamma}/2 \end{pmatrix} |\Psi\rangle$$

Nella materia: propagazione in avanti differente,
 diverso "indice di rifrazione" $n = 1 + 2\pi N f(0)/k^2$

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi\rangle = \begin{pmatrix} \bar{m} - i\bar{\Gamma}/2 - 2\pi N\beta\gamma f(0)/k & \Delta m - i\Delta\Gamma/2 \\ \Delta m - i\Delta\Gamma/2 & \bar{m} - i\bar{\Gamma}/2 - 2\pi N\beta\gamma \bar{f}(0)/k \end{pmatrix} |\Psi\rangle$$

Interazioni differenti

Integrando, all'uscita di un rigeneratore di spessore l :

$$|K_1(l)\rangle = \frac{i\pi N\beta\gamma(f - \bar{f})/k_1}{-i\Delta m + 1/2\tau_1} [1 - e^{-(-i\Delta m + 1/2\tau_1)l}] |K_2(l)\rangle$$

$$|K_2(l)\rangle \propto e^{-l/N\sigma_{tot}} |K_2(0)\rangle$$

Caso senza simmetria CP

CPT impone $H_{11} = H_{22}$ (come CP), ovvero:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} m_K + m_0 & H_{12} \\ H_{21} & m_K + m_0 \end{pmatrix} \quad \lambda_{S,L} = H_{11} \pm \sqrt{H_{12}H_{21}}$$

T impone $H_{12} = H_{21}$ (come CP)

$\langle f | \mathbf{M}, \Gamma | i \rangle = \langle i | \mathbf{M}, \Gamma | f \rangle = \langle f | \mathbf{M}, \Gamma | i \rangle^*$ quindi M_{12} e Γ_{12} reali.

Cambiando la fase relativa di $|K^0\rangle$ e $|\bar{K}^0\rangle$ (trasformazione generata dalla stranezza) cambiano le fasi di M_{12} e Γ_{12} :

T (CP) impone M_{12} e Γ_{12} *relativamente* reali.

Nel caso piu' generale:

$$\mathbf{H} = A \mathbf{1} + B_i \boldsymbol{\sigma}_i$$

	A	B ₁	B ₂	B ₃
CP	+	+	-	-
T	+	+	-	+
CPT	+	+	+	-

Stati fisici

Gli stati fisici sono "quasi" autostati di CP

$$\begin{cases} |K_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon_S|^2}} \left[|K_1\rangle + \varepsilon_S |K_2\rangle \right] = \frac{1}{\sqrt{2(1+|\varepsilon_S|^2)}} \left[(1+\varepsilon_S) |K^0\rangle + (1-\varepsilon_S) |\overline{K^0}\rangle \right] \\ |K_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon_L|^2}} \left[|K_2\rangle + \varepsilon_L |K_1\rangle \right] = \frac{1}{\sqrt{2(1+|\varepsilon_L|^2)}} \left[(1+\varepsilon_L) |K^0\rangle - (1-\varepsilon_L) |\overline{K^0}\rangle \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} |K_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1+|\overline{\varepsilon}^2 - \delta^2|)}} \left[(1+\overline{\varepsilon} - \delta) |K^0\rangle + (1-\overline{\varepsilon} + \delta) |\overline{K^0}\rangle \right] \\ |K_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2(1+|\overline{\varepsilon}^2 + \delta^2|)}} \left[(1+\overline{\varepsilon} + \delta) |K^0\rangle - (1-\overline{\varepsilon} - \delta) |\overline{K^0}\rangle \right] \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \overline{\varepsilon} &\equiv (\varepsilon_S + \varepsilon_L) / 2 \\ \delta &\equiv (\varepsilon_L - \varepsilon_S) / 2 \end{aligned}$$

Se $\varepsilon_S, \varepsilon_L \neq 0$ la simmetria CP e' violata (stati fisici non autostati di CP)

$$\langle K_L | K_S \rangle = 2 \operatorname{Re} \overline{\varepsilon} - 2i \operatorname{Im} \delta$$

Tre descrizioni

K^0, \bar{K}^0 : Autostati di stranezza, prodotti dalle interazioni forti, rilevanti per la propagazione nella materia. Coppia particella/anti-particella (masse uguali per CPT), decadimenti in stati finali comuni (non ortogonali), vita media non definita (decadimento non esponenziale).

K_1, K_2 : Autostati di CP, quasi coincidenti con gli stati fisici, non particella/anti-particella, masse diverse e stati finali (quasi) differenti, ortogonali.

K_S, K_L : Stati fisici, non particella/anti-particella, masse diverse e stati finali (quasi) differenti, quasi ortogonali.

"... there is scarcely a physical system which contains so many of the elements of modern physics".
(V. Fitch, 1980)

Diagonalizzazione dell'hamiltoniana efficace:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\text{Im} M_{12} - (i/2) \text{Im} \Gamma_{12}}{i\Delta m - \Delta\Gamma/2} \quad \delta = \frac{(M_{22} - M_{11}) - i(\Gamma_{22} - \Gamma_{11})}{2[\Delta m - (i/2)\Delta\Gamma]}$$

N.B. Si definiscono: $\Delta m \equiv m_L - m_S > 0$ e $\Delta\Gamma \equiv \Gamma_S - \Gamma_L > 0$

Se $\bar{\varepsilon} \neq 0$ o $\delta \neq 0$ la simmetria CP e' violata
(stati fisici non autostati di CP)

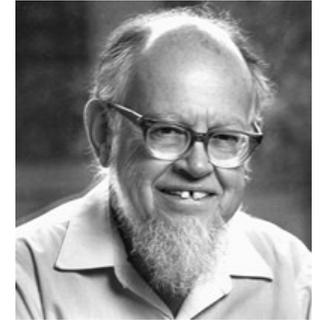
Se $\bar{\varepsilon} \neq 0$ la simmetria T
e' violata:

$$M_{12} \neq M_{21} \quad \Gamma_{12} \neq \Gamma_{21}$$

Se $\delta \neq 0$ la simmetria CPT
e' violata:

$$M_{11} \neq M_{22} \quad \Gamma_{11} \neq \Gamma_{22}$$

Ipotesi superdebole



L. Wolfenstein (1964):
Un'ipotetica nuova
interazione che induca
transizioni $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ ($\Delta S=2$)
al *prim'ordine*, con
accoppiamento $\sim 10^{-7} G_F$
potrebbe spiegare
l'effetto e risultare
praticamente invisibile
altrove.

VIOLATION OF CP INVARIANCE AND THE POSSIBILITY OF VERY WEAK INTERACTIONS*

L. Wolfenstein

Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, Pennsylvania

(Received 31 August 1964)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\text{Im } M_{12} - (i/2) \text{Im } \Gamma_{12}}{i\Delta m - \Delta\Gamma/2}$$

$$|\bar{\varepsilon}| \propto \frac{G_{SW}}{\Delta m} = \frac{\alpha G_F}{\Delta m}$$

$$|\bar{\varepsilon}| \approx \frac{\alpha G_F}{G_F^2} \frac{m_p^2}{m_p^4} \approx 2 \cdot 10^{-3}$$

In questo modello la violazione di CP deriva da una
proprietà degli stati fisici K_S, K_L parametrizzata da $\bar{\varepsilon}$
(violazione *indiretta* di CP).

Il problema...

In uno schema superdebole la violazione di CP potrebbe essere limitata in natura ai mesoni K neutri.

Per 35 anni la situazione e' rimasta questa...

"At present our experimental understanding of CP violation can be summarized by the statement of a single number".

(J. Cronin, 10.12.1980 - Stockholm)

In questo modello la violazione di CP deriva da una *proprietà degli stati* fisici K_S, K_L parametrizzata da ϵ (violazione *indiretta* di CP).

Tipi di violazione di CP

La violazione di CP in interazioni $\Delta S=2$ e' detta
VIOLAZIONE INDIRETTA DI CP

La violazione di CP in interazioni $\Delta S=1$ e' detta
VIOLAZIONE DIRETTA DI CP

La violazione di CP dovuta all'impurita' ($\bar{\epsilon}$) negli stati fisici e' detta
VIOLAZIONE DI CP NEL MESCOLOAMENTO

$$K_L \propto K_2 + \epsilon K_1$$


$\pi\pi$

E' violazione *indiretta* di CP

La violazione di CP nel processo fisico di decadimento e' detta

VIOLAZIONE DI CP NEL DECADIMENTO

$$K_L \propto K_2 + \varepsilon K_1$$


$\pi\pi$

E' violazione *diretta* di CP

Transizione da un autostato di CP
ad un altro con autovalore opposto:

$$K_2 (CP=-1) \rightarrow \pi\pi (CP=+1)$$

Manifesta una proprieta' *intrinseca*
delle interazioni deboli

Non esiste nel modello superdebole

Vincoli sulle ampiezze di transizione

CPT

$$a(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = a^*(i \rightarrow f)$$

T

$$a(i \rightarrow f) = a^*(i \rightarrow f)$$
$$a(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = a^*(\bar{i} \rightarrow \bar{f})$$

CP

$$a(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = a(i \rightarrow f)$$

Teorema di Fermi-Watson

1. Unitarietà *elastica* (interazioni forti non creano nuovi stati)
2. Simmetria CPT
3. Stati invarianti per T (ad es. senza spin)

"La fase di un'ampiezza di decadimento (debole) e' sostanzialmente determinata dalle interazioni elastiche delle particelle nello stato finale".



$$A(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = e^{2i\delta} A^*(i \rightarrow f)$$

Dove δ e' la fase di diffusione (forte) per $f \rightarrow f$ (ad es. $\pi\pi \rightarrow \pi\pi$ per l'ampiezza $K \rightarrow \pi\pi$).

Fattorizzando le fasi forti: $A(i \rightarrow f) \equiv e^{i\delta} a(i \rightarrow f)$

$$a(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = a^*(i \rightarrow f)$$

Violazione di CP: ampiezze complesse

Violazione di CP nei decadimenti

Avere un'ampiezza complessa *non e' sufficiente*.

E' necessaria l'interferenza di 2 ampiezze

$$A(i \rightarrow f) = e^{i\delta_1} |a_1| e^{i\phi_1} + e^{i\delta_2} |a_2| e^{i\phi_2}$$

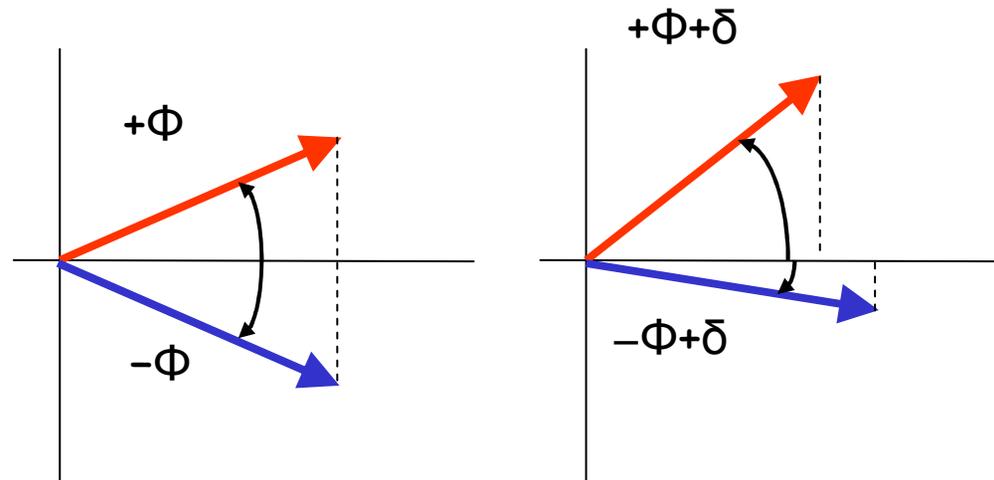
(Fermi-Watson)

$$A(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = e^{i\delta_1} |a_1| e^{-i\phi_1} + e^{i\delta_2} |a_2| e^{-i\phi_2}$$

$$\Gamma(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) - \Gamma(i \rightarrow f) = 4 |a_1| |a_2| \sin(\delta_1 - \delta_2) \sin(\phi_1 - \phi_2)$$

Necessarie ampiezze con
fasi *deboli* (ϕ) e *forti* (δ)
differenti

Per avere grande
asimmetria: ampiezze
comparabili



Violazione di CP

Decadimenti semileptonici ($K_{\ell 3}$)

$$\text{BR}(K_L \rightarrow \pi e \nu) \approx 0.39$$

$$\text{BR}(K_L \rightarrow \pi \mu \nu) \approx 0.28$$

Per la regola $\Delta S = \Delta Q$:
possibili soltanto

$$K^0 \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu \text{ e } \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \ell^- \bar{\nu}$$

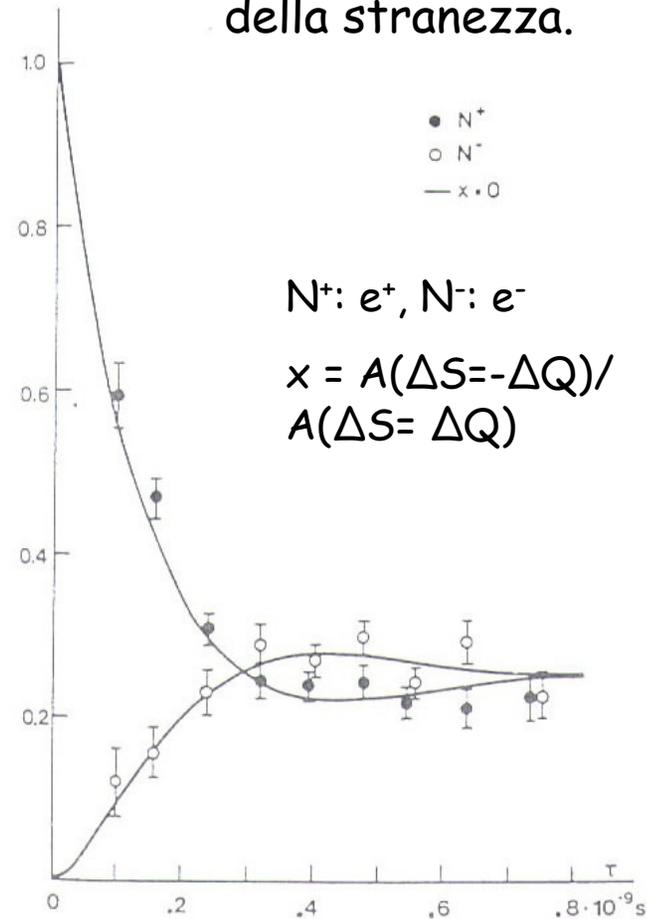
Ad es. $\Sigma^- \rightarrow n e^- \bar{\nu}$ ma
non $\Sigma^+ \rightarrow n e^+ \nu$

Non sono autostati di CP.

*Unica ampiezza di
decadimento.*

Gli stati K^0 e \bar{K}^0 non possono
contribuire entrambi.

Consentono la misura
della stranezza.

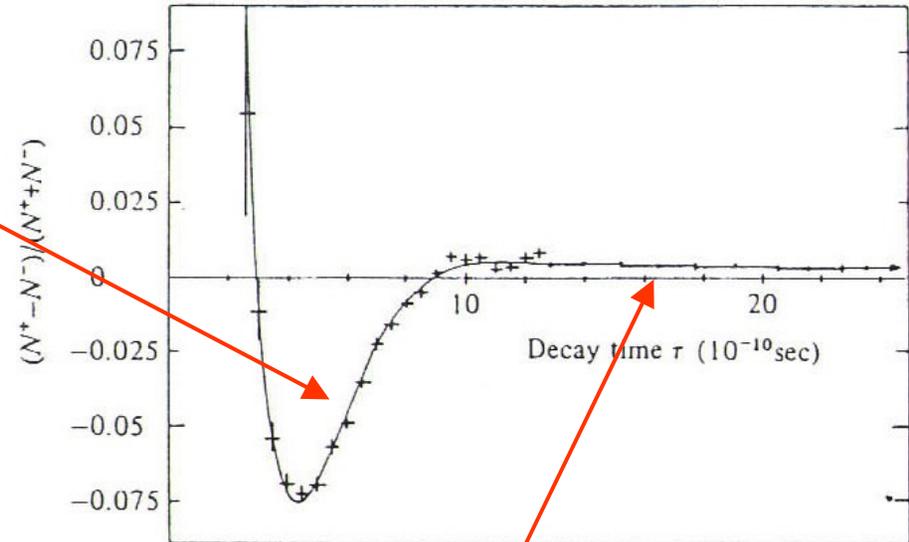


Asimmetria di carica

Contributo da oscillazioni di stranezza.

Se vale CP, con K^0 iniziali:

$$A(t) = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-} = \frac{2 \cos(\Delta mt)}{e^{+\Delta\Gamma t/2} + e^{-\Delta\Gamma t/2}}$$



Segnale di violazione di CP

$$\delta_\ell = \frac{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu) - \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \ell^- \bar{\nu})}{\Gamma(K_L \rightarrow \pi^- \ell^+ \nu) + \Gamma(K_L \rightarrow \pi^+ \ell^- \bar{\nu})}$$

$$\delta_e = (3.33 \pm 0.14) \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_\mu = (3.04 \pm 0.25) \cdot 10^{-3}$$

Distinzione assoluta materia/antimateria

Piu' in generale, a partire da K^0 o \bar{K}^0 :

$$A(t) \cong \frac{2(1-|x|^2) \left[\text{Re}(\bar{\varepsilon}) (e^{-\Gamma_S t} + e^{-\Gamma_L t}) \pm e^{-\bar{\Gamma} t} \cos(\Delta m t) \right]}{|1+x|^2 e^{-\Gamma_S t} + |1-x|^2 e^{-\Gamma_L t} \mp 4 \text{Im}(x) e^{-\bar{\Gamma} t} \sin(\Delta m t)}$$

E se $x=0$ ($\Delta S = \Delta Q$ valida):

$$A(t) \cong 2 \text{Re}(\bar{\varepsilon}) \pm \frac{2e^{-\bar{\Gamma} t} \cos(\Delta m t)}{e^{-\Gamma_S t} + e^{-\Gamma_L t}}$$

Miscela incoerente di K^0 e \bar{K}^0 :
termine oscillante moltiplicato per

$$D(p) = \frac{N(K^0, p) - N(\bar{K}^0, p)}{N(K^0, p) + N(\bar{K}^0, p)}$$

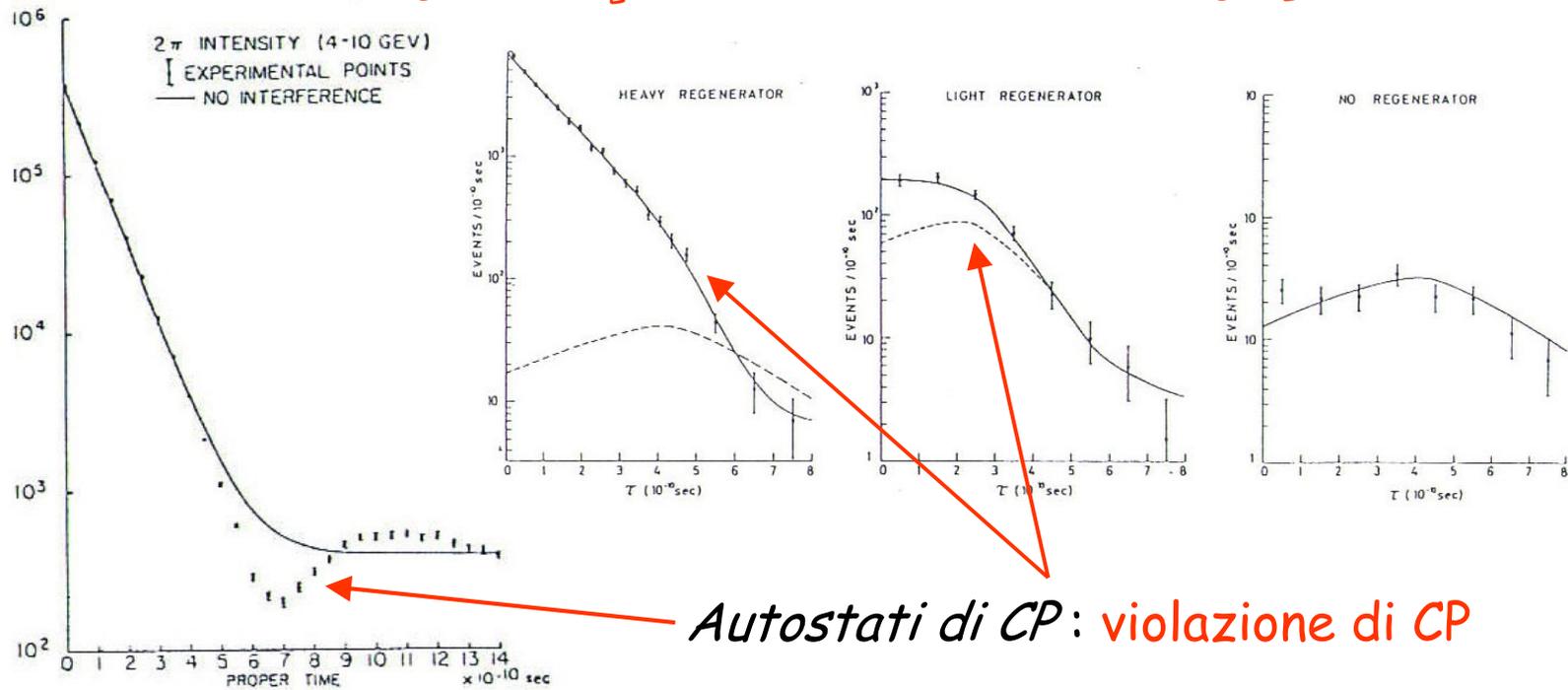
Violazione di CP solo da
mescolamento (indiretta):

$$\delta_\ell = \frac{2 \text{Re}(\bar{\varepsilon})}{1 + |\bar{\varepsilon}|^2} = \langle K_L | K_S \rangle$$

Interferenza K_S-K_L

Numero di decadimenti $\pi^+\pi^-$ dietro a rigeneratore:

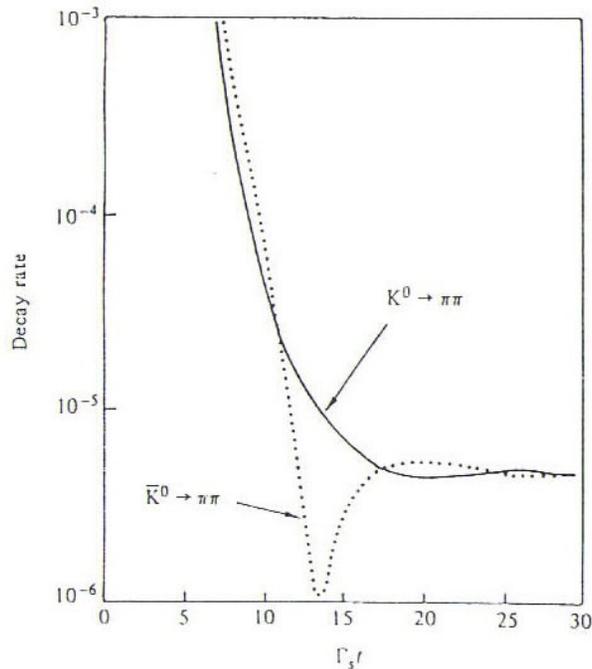
$$N(\pi^+\pi^-; t) \propto \underbrace{|\eta_{+-}|^2}_{K_S} e^{-t/\tau_L} + \underbrace{|\rho_c|^2}_{K_L} e^{-t/\tau_S} + \underbrace{2|\eta_{+-}||\rho_c|}_{\text{Interferenza } K_S-K_L} e^{-t/2(1/\tau_S+1/\tau_L)} \cos(\Delta mt - \phi_{+-} + \phi_\rho)$$



Interferenza nel vuoto

Numero di decadimenti $\pi^+\pi^-$ a partire da uno stato K^0 o \bar{K}^0 a $t=0$:

$$N(\pi^+\pi^-;t) \propto \underbrace{e^{-t/\tau_S}}_{K_S} + \underbrace{|\eta_{+-}|^2 e^{-t/\tau_L}}_{K_L} \pm \underbrace{2|\eta_{+-}| e^{-t/2(1/\tau_S+1/\tau_L)}}_{\text{Interferenza } K_S-K_L} \cos(\Delta m t - \phi_{+-})$$



Vicino al punto di produzione.

Indipendente da fase di rigenerazione.

Nota Δm permette di misurare ϕ_{+-} .

Il segno del termine di interferenza dipende dallo stato iniziale:

Distinzione assoluta
materia/antimateria

Decadimenti adronici ($\pi\pi$)

I pioni interagiscono anche mediante interazione forte
Stati rilevanti: autostati di isospin (conservato)

$L(\pi\pi) = 0 \Rightarrow$ simmetria di Bose esclude $I=1$

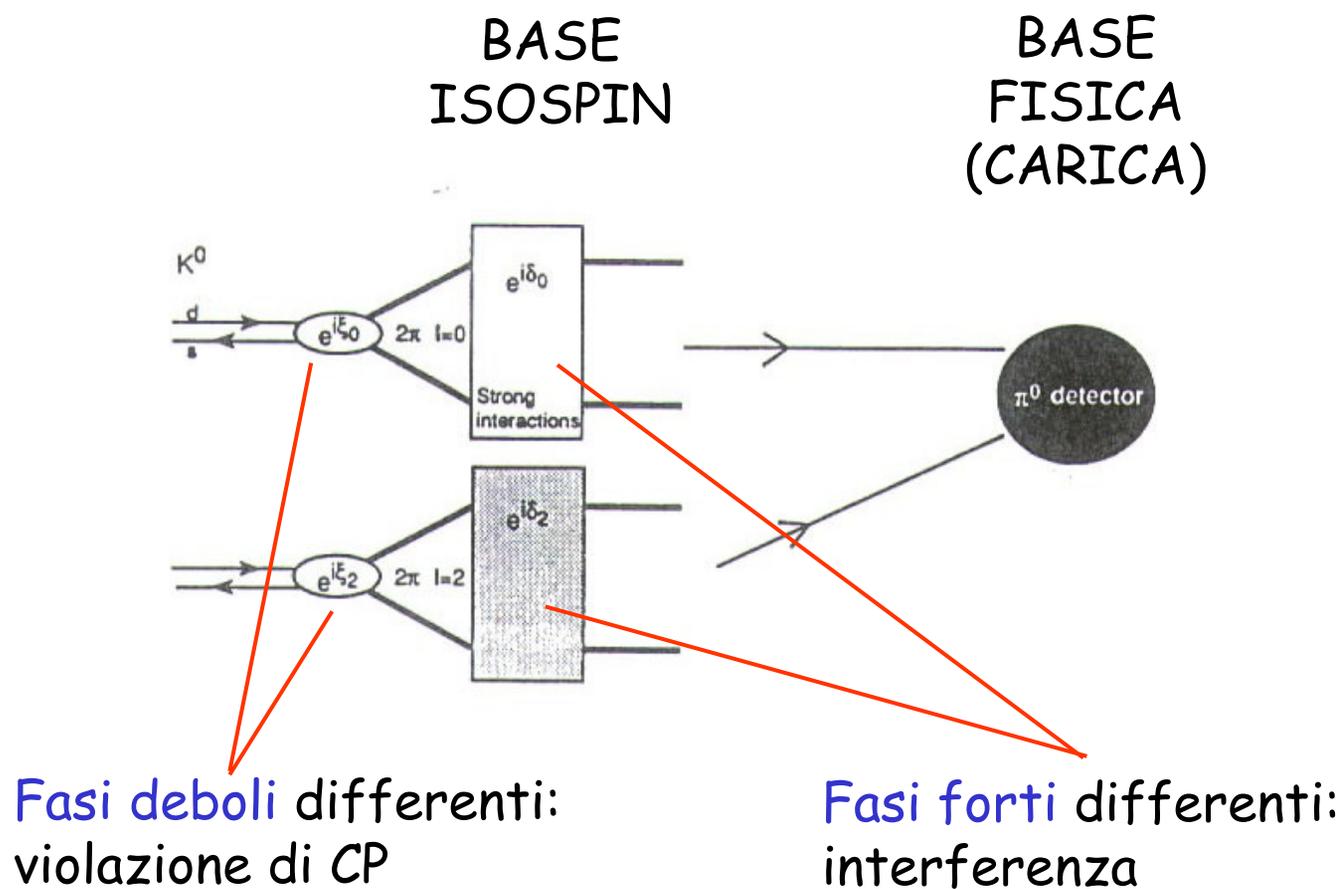
$$|\pi\pi(I=0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[|\pi^+\pi^-\rangle - |\pi^0\pi^0\rangle + |\pi^-\pi^+\rangle \right]$$

$$|\pi\pi(I=2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}} \left[|\pi^+\pi^-\rangle + 2|\pi^0\pi^0\rangle + |\pi^-\pi^+\rangle \right]$$

Le due ampiezze di decadimento $I=0$, $I=2$ possono interferire
(se hanno fasi differenti) in *modo diverso* per $\pi^+\pi^-$ e $\pi^0\pi^0$

$$\begin{aligned} A[K^0 \rightarrow \pi\pi(I=0)] &= a_0 e^{i\delta_0} & A[K^0 \rightarrow \pi\pi(I=2)] &= a_2 e^{i\delta_2} \\ A[\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi(I=0)] &= a_0^* e^{i\delta_0} & A[\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi(I=2)] &= a_2^* e^{i\delta_2} \end{aligned}$$

Esempio: violazione di CP nel decadimento $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$



Violazione di CP in $K^0 \rightarrow \pi\pi$

$$\eta_{+-} = |\eta_{+-}| e^{i\phi_{+-}} = \frac{A(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-)}{A(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)} = \frac{\varepsilon + \varepsilon'}{1 + \omega/\sqrt{2}} \approx \varepsilon + \varepsilon'$$

$$\eta_{00} = |\eta_{00}| e^{i\phi_{00}} = \frac{A(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0)}{A(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0)} = \frac{\varepsilon - 2\varepsilon'}{1 - \omega\sqrt{2}} \approx \varepsilon - 2\varepsilon'$$

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} + i \frac{\text{Im}(a_0)}{\text{Re}(a_0)}$$

$$\varepsilon' = \frac{i}{\sqrt{2}} \frac{\text{Re}(a_2)}{\text{Re}(a_0)} \left[\frac{\text{Im}(a_2)}{\text{Re}(a_2)} - \frac{\text{Im}(a_0)}{\text{Re}(a_0)} \right] e^{i(\delta_2 - \delta_0)}$$

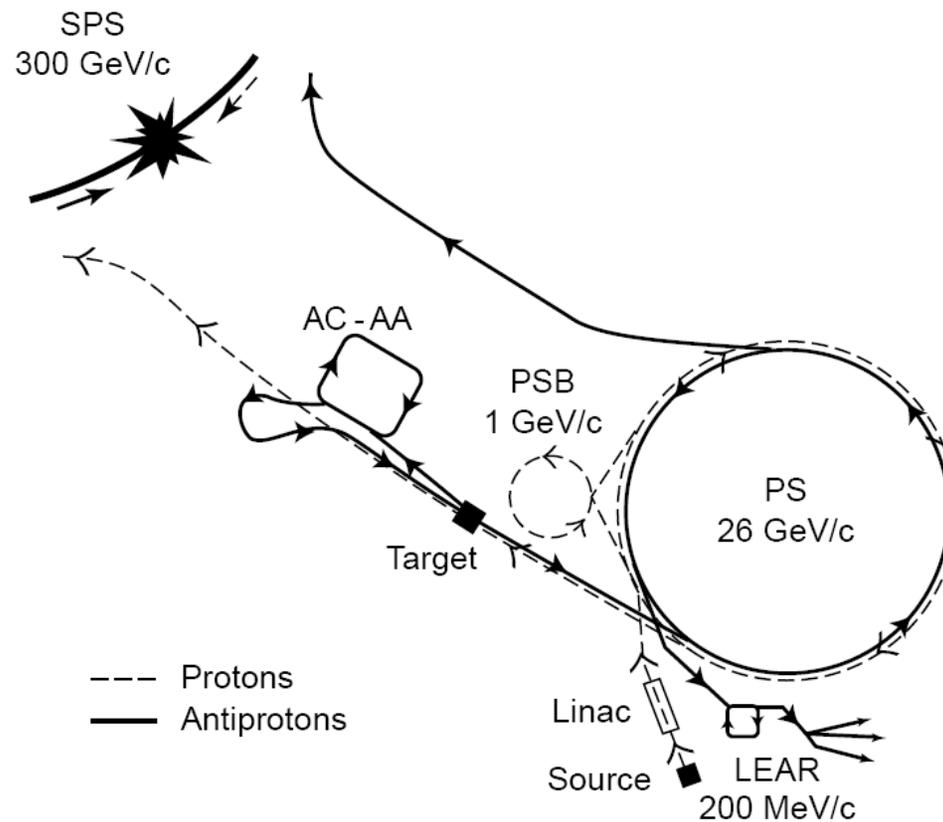
$$\omega = \frac{A[K_S \rightarrow \pi\pi(I=2)]}{A[K_S \rightarrow \pi\pi(I=0)]} \approx 1/22$$

"Regola" $\Delta I=1/2$: ampiezze adroniche con $\Delta I=3/2$ sopresse: $\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0) \ll \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)$

Esperimenti su violazione di CP con mesoni K

CPLEAR: produzione adronica

Annichilazione di antiprotoni a riposo ($p \approx 200 \text{ MeV}/c$)

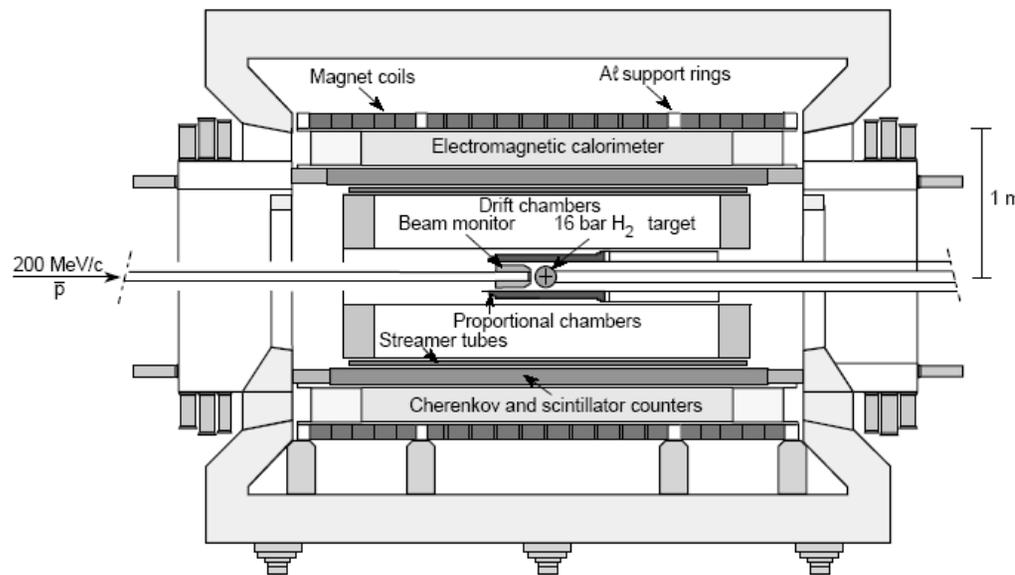


Produzione associata di K^0 (conservazione stranezza):



Carica del mesone K carico = stranezza del mesone K neutro

Stranezza al decadimento ($\Delta S = \Delta Q$):

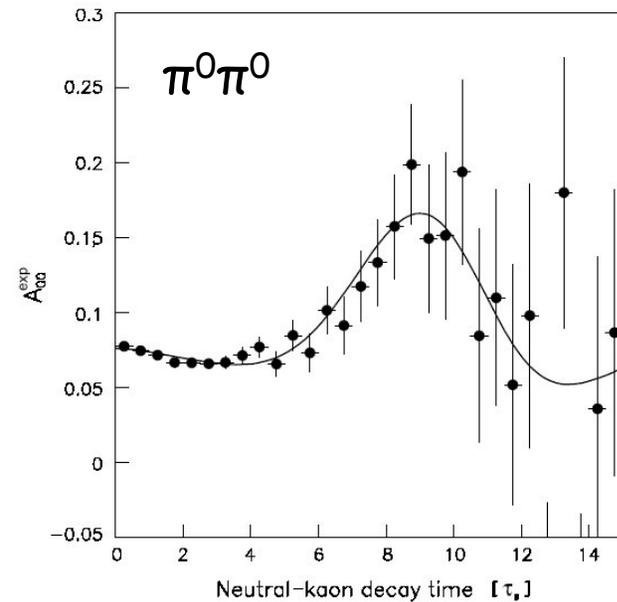
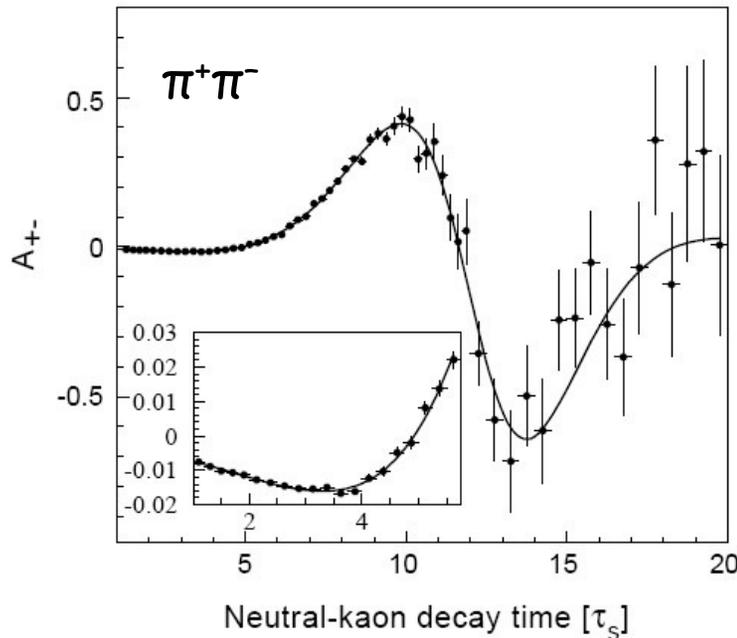


Bersaglio H_2 liquido
 10^6 stop/s

Rivelatore 4π
Solenoid 0.44 T
Camere proporzionali,
drift e streamer:
 $\Delta p/p = 5 \div 10\%$
Čerenkov e TOF
Calorimetro Pb-gas

CLEAR: $\pi\pi$

$$A_{CP}(\pi\pi) = \frac{P(\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi) - P(K^0 \rightarrow \pi\pi)}{P(\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi) + P(K^0 \rightarrow \pi\pi)} = 2 \operatorname{Re}(\varepsilon - \delta) - 2 \frac{|\eta_{\pi\pi}| e^{-\Delta\Gamma t/2} \cos(\Delta m - \phi_{\pi\pi})}{1 + |\eta_{\pi\pi}|^2 e^{\Delta\Gamma t}}$$



Ricerca della violazione diretta di CP

- La violazione di CP è dovuta ad una nuova interazione al di fuori del Modello Standard?
- La violazione di CP è dovuta a qualche peculiarità dei mesoni K (piccolissima differenza di massa)?
- La violazione di CP è descritta da un solo parametro, (l'impurità ϵ degli stati fisici), dovuto ad effetti nel mescolamento di particella ed antiparticella?
- La violazione di CP è dovuta ad una proprietà del sistema mesone-antimesone accoppiato quanto-meccanicamente? Oppure è una caratteristica delle interazioni che inducono i decadimenti deboli?

“At present our experimental understanding of CP violation can be summarized by the statement of a single number”. (J. Cronin, 10.12.1980)

Misura della violazione diretta di CP

Misura simultanea di $|\eta_{00}|^2$ e $|\eta_{+-}|^2$ in doppio rapporto
(stesso intervallo di p e z):

$$\frac{N(\overset{\text{A}}{K_L} \rightarrow \overset{\text{B}}{\pi^0 \pi^0})}{N(\overset{\text{B}}{K_S} \rightarrow \pi^0 \pi^0)} \frac{N(\overset{\text{C}}{K_S} \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{N(\overset{\text{D}}{K_L} \rightarrow \pi^+ \pi^-)} = \frac{|\eta_{00}|^2}{|\eta_{+-}|^2} \approx 1 - 6 \varepsilon' / \varepsilon$$

indipendenza (al prim'ordine) dalle efficienze assolute di rivelazione.

- A+D nel vuoto e poi B+C con rigeneratore (BNL)
- A+B con due fasci e convertitore e poi C+D (FNAL E731)
- A+D nel vuoto e poi B+C con bersaglio vicino (CERN NA31)
- A+B+C+D con due fasci con rigeneratore (FNAL KTeV)
- A+B+C+D con due fasci con bersaglio vicino (CERN NA48)

Situazione negli anni '90

I due esperimenti dedicati piu' recenti risultano incompatibili:

NA31 (CERN): $\text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = (23.0 \pm 6.5) \cdot 10^{-4}$ (evidenza di CPV diretta)

E731 (FNAL): $\text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = (7.4 \pm 6.0) \cdot 10^{-4}$ (consistente con *superweak*)

$\chi^2 = 3.11$ Prob. consistenza = 7.7%

Tecniche differenti (produzione adronica da p 450-800 GeV):

NA31: fasci alternati K_S/K_L , bersaglio mobile per K_S , minimizzazione differenza di accettazione, rivelatore non magnetico, calorimetro ad Ar liquido.

E731: rigeneratore per K_S , rivelazione alternata carichi/neutri (per maggior parte della presa dati), correzione accettazione con MonteCarlo, rivelatore magnetico, calorimetro a vetro-piombo.

KTeV (Fermilab)

Due fasci paralleli K_L (70 GeV/c), rigeneratore per K_S (alternante)

Calorimetro EM a cristalli CsI

Identificazione evento mediante posizione

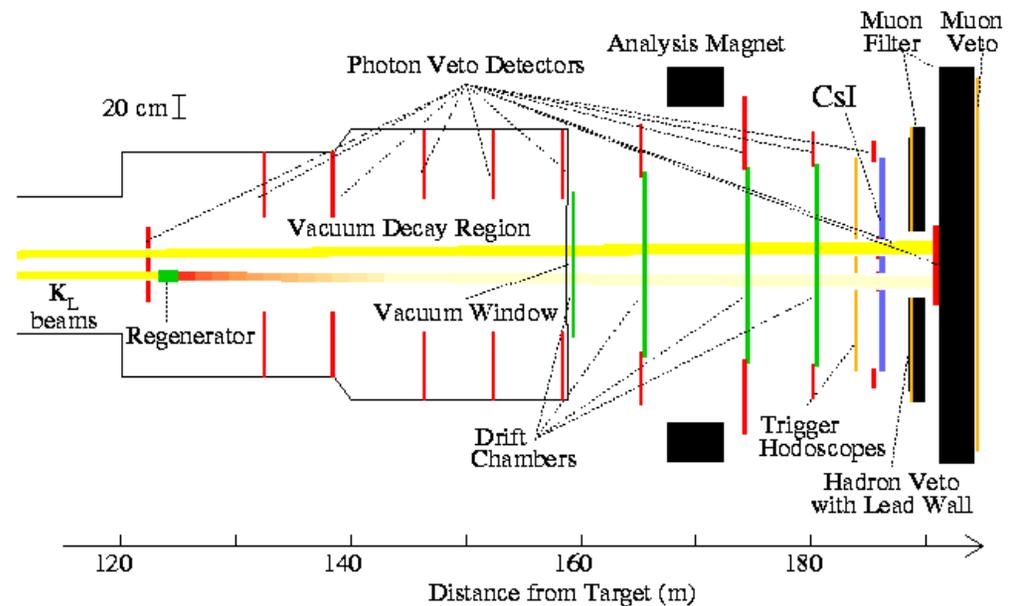
Correzione MonteCarlo per accettazione

Massimizzazione della statistica

Presenza dati 1997-1999



M.S. Sozzi



Violazione di CP

NA48 (CERN)

Due bersagli a distanze diverse (K_L/K_S)

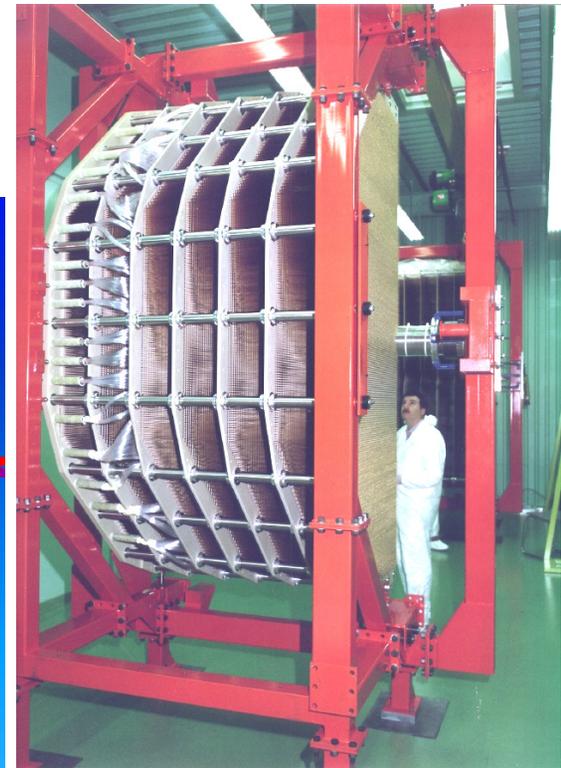
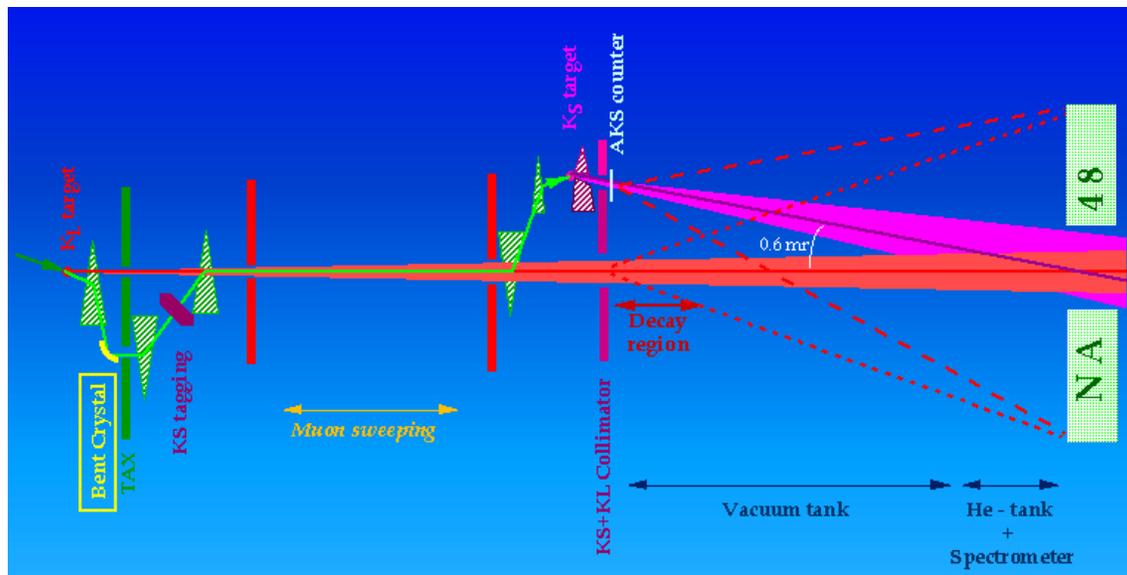
Fasci convergenti ($100 \text{ GeV}/c$)

Calorimetro EM omogeneo a Krypton liquido

Identificazione evento con tempo di volo

Pesatura eventi minimizza correzioni accettazione

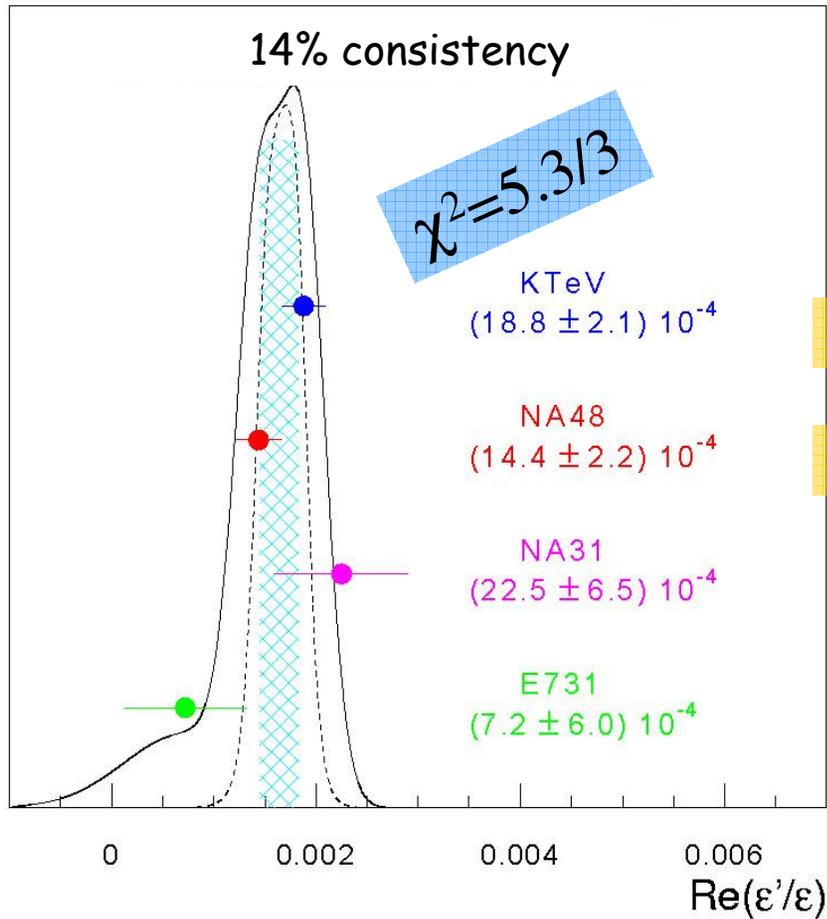
Presenza dati 1997-2001



M.S. Sozzi

Violazione di CP

Risultati su ϵ'/ϵ



(Including $\Delta I=3/2$ correction)

$$\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (16.4 \pm 1.9) \cdot 10^{-4}$$

[errore riscaloato "a la PDG"]

Statistica completa (1997+1999) [2008]

Risultato finale (1997-2001) [2003]

Violazione di CP
diretta
dimostrata a $>9\sigma$...
dopo 36 anni!

ϵ'/ϵ – significato

1999: proof of direct CP violation (after 36 years!)

Primo test del paradigma CKM pe la violazione di CP

CPV proprieta' universale delle interazioni deboli

$$\frac{\Gamma(K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) - \Gamma(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) + \Gamma(\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)} = (5.18 \pm 0.61) \times 10^{-6}$$

(BR=2.0·10⁻³)
O(10⁷) events

2005 EPS Prize to the
NA31 collaboration

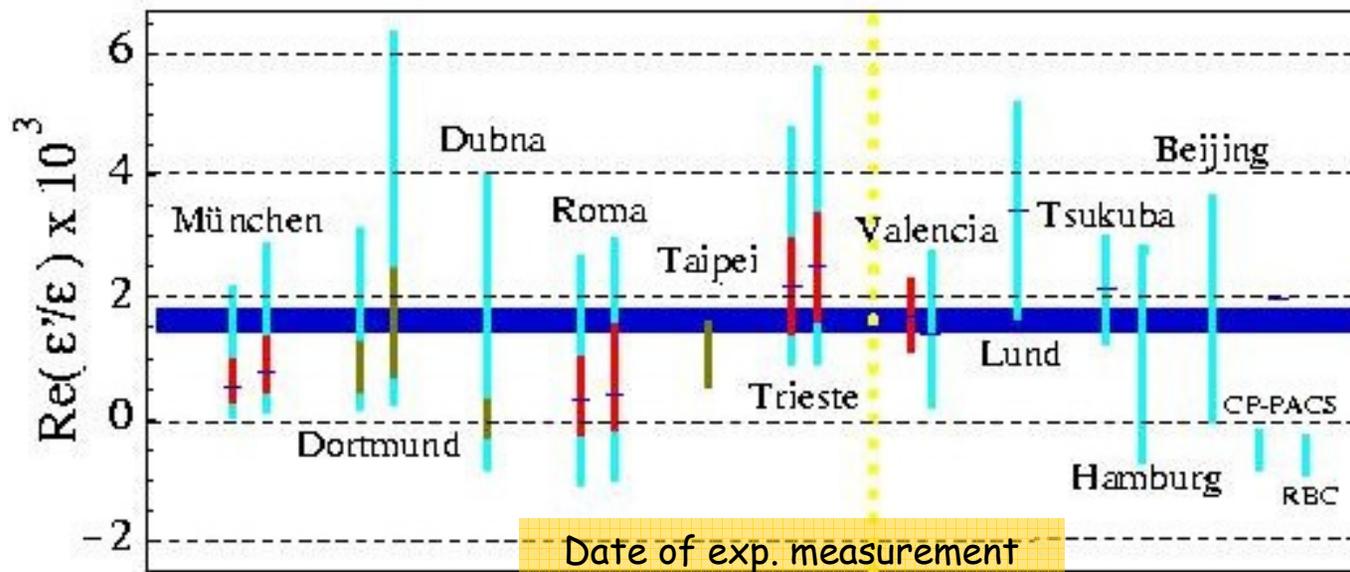
2007 APS Panofsky Prize to
Italo Mannelli (Pisa), Heinrich Wahl (CERN)
and Bruce Winstein (Chicago)

Confronto ad es.

$$A_{CP}(B^0 \rightarrow \eta K^*(892)) = 0.21 \pm 0.06$$

(BR=1.6·10⁻⁵) O(10²) events

ϵ'/ϵ - previsioni teoriche



Estremamente difficile tenere sotto controllo la parte non perturbativa: cancellazione accidentale di due termini.
QCD su reticolo?

Violazione di CP in $K_{\pi 3}$ (perche'?)

•CPV per particelle cariche e' di tipo **diretto**

• Modi di decadimento piu' frequenti che possono dare CPV:

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \nu \quad \times$$

$$K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0 \quad \times$$

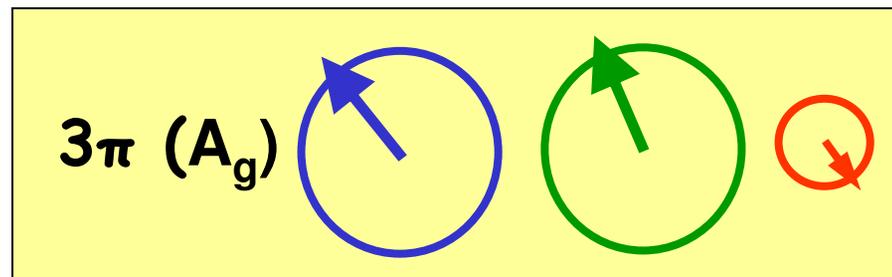
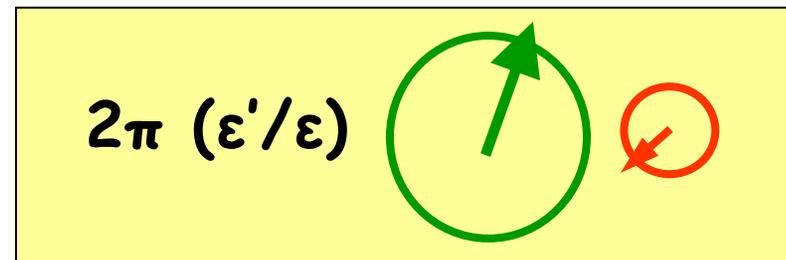
$$K^{\pm} \rightarrow 3\pi \quad \checkmark$$

Grande statistica, selezione semplice, fondi piccoli

Incertezze adroniche piccole fasi forti

→ Piccola asimmetria in SM

Non c'e' soppressione intrinseca per $\Delta I=1/2$ (come per ε'/ε)



$K_{\pi 3}$ decays

$$\text{BR}(K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^+ \pi^-) = 5.57\%$$

“charged”

$$\text{BR}(K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0 \pi^0) = 1.73\%.$$

“neutral”

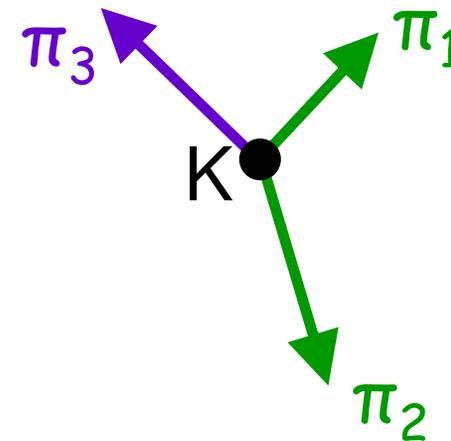
Kinematics:

$$s_i = (P_K - P_{\pi_i})^2 \quad i=1,2,3 \quad (3=\text{odd } \pi)$$

$$s_0 = (s_1 + s_2 + s_3)/3$$

$$u = (s_3 - s_0)/m_{\pi}^2 = 2m_K (m_K/3 - E_{\text{odd}}^*)/m_{\pi}^2$$

$$v = (s_2 - s_1)/m_{\pi}^2 = 2m_K (E_1^* - E_2^*)/m_{\pi}^2$$



Matrix element:

$$|M(u,v)|^2 \sim 1 + gu + hu^2 + kv^2$$

$$K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^+ \pi^- \quad g = -0.2154 \pm 0.0035$$

$$K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} \pi^0 \pi^0 \quad g = 0.652 \pm 0.031$$

$$|h|, |k| \ll |g|$$

CP violation in $K_{\pi 3}$ (how)

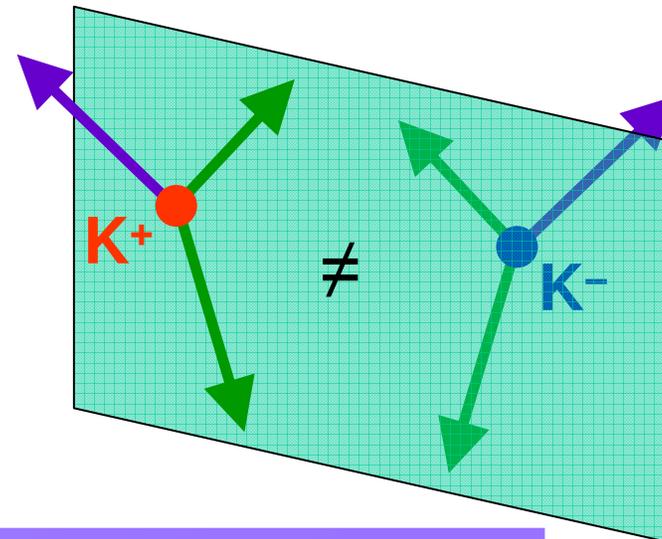
Potentially large statistics

Simple selection

Low backgrounds

No absolute K flux measurement: compare only Dalitz plot shapes

Measured CP-violating quantity:



$$A_g = (g_+ - g_-) / (g_+ + g_-) \neq 0 ?$$

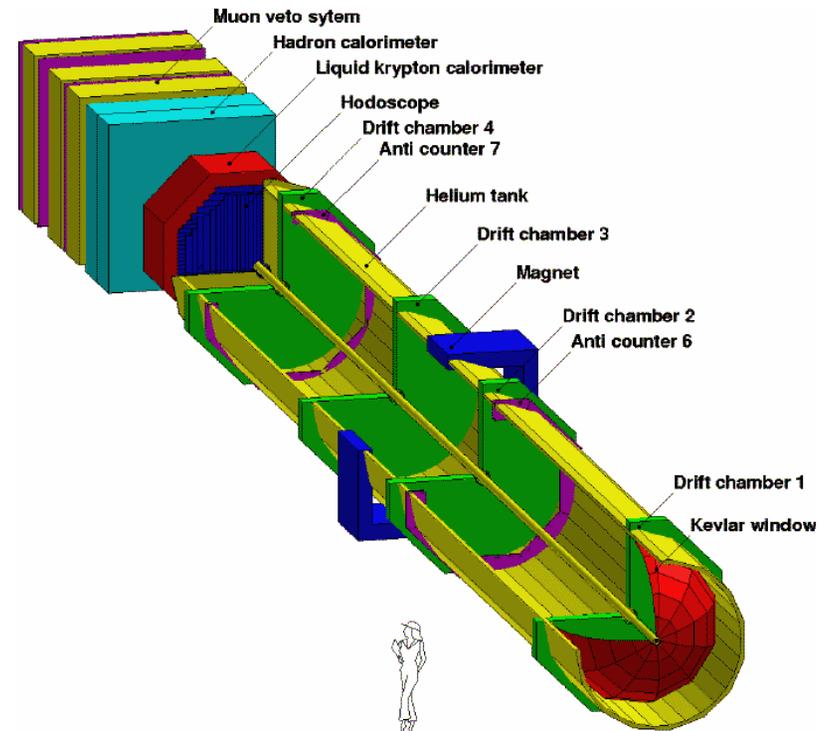
PDG 2004:

$$\frac{g(\pi^+\pi^-\pi^+) - g(\pi^+\pi^-\pi^-)}{g(\pi^+\pi^-\pi^+) + g(\pi^+\pi^-\pi^-)} = (-0.70 \pm 0.53)\%$$

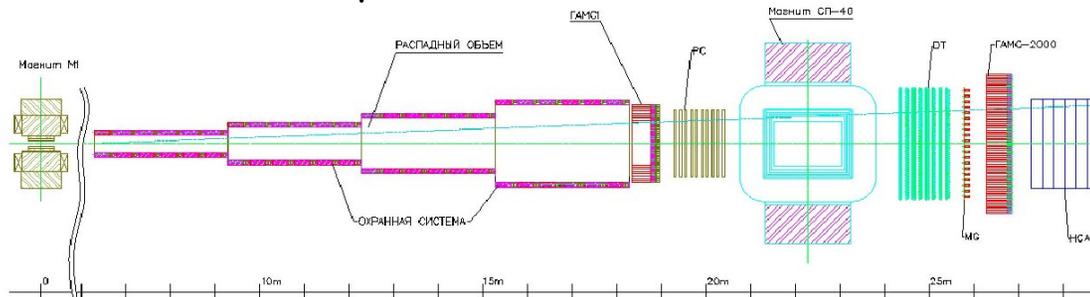
$$K^{\pm} \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^{\pm}, \pi^0 \pi^0 \pi^{\pm}$$

NA48/2 al CERN sfrutta al massimo le cancellazioni (robustezza)

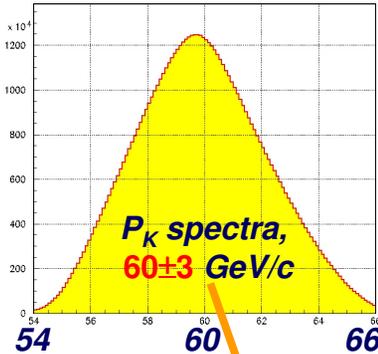
- Fasci K^+ e K^- **simultanei**, **sovrapposti** spazialmente, con spettri di impulso stretti
- Asimmetria dalle pendenze di **rapporti** di distribuzioni in u normalizzate
- **Eguagliamento** delle accettanze medie K^+ e K^- con frequenti inversioni delle polarita' dei campi magnetici



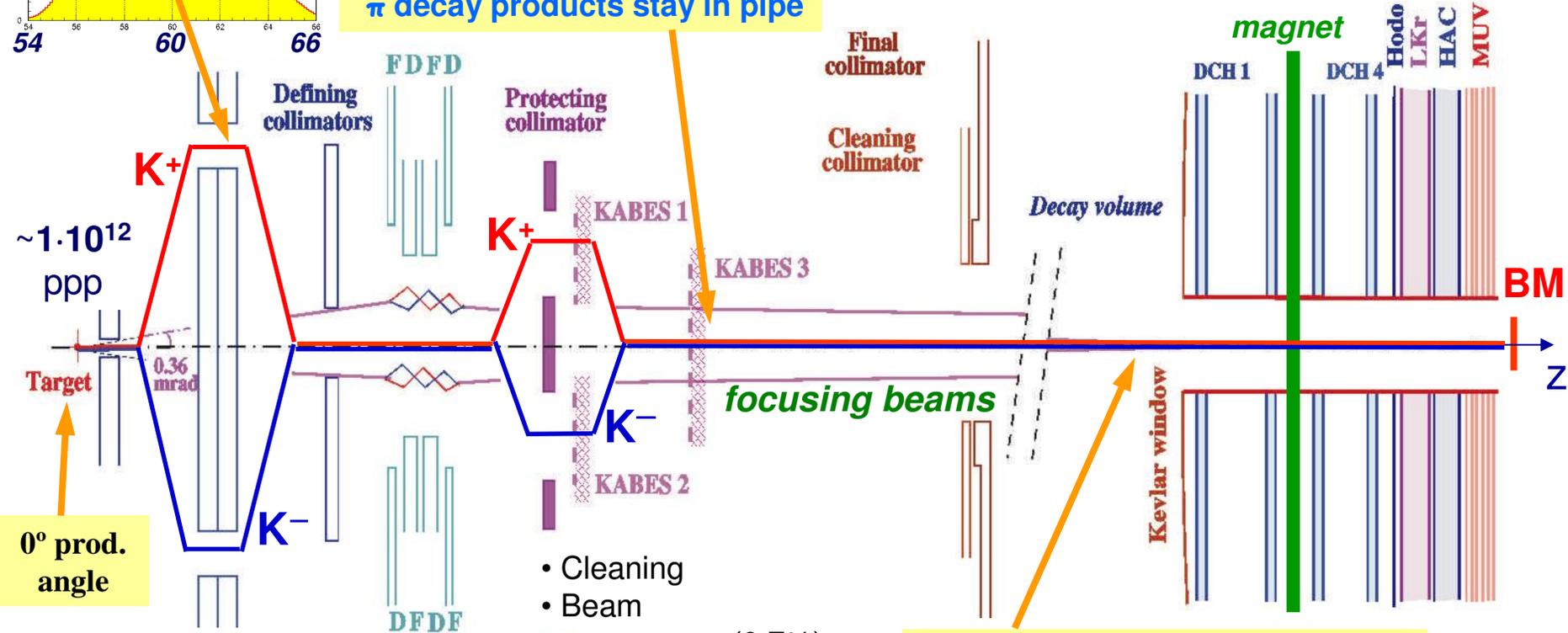
Proposta Protvino OKA (non realizzato): fasci alternati separati di K^{\pm} 15 GeV/c



Fasci di NA48/2



2 ÷ 3 M K/spill ($\pi/K \sim 12$)
 π decay products stay in pipe



0° prod. angle

- Momentum selection
- Focusing
- μ sweeping

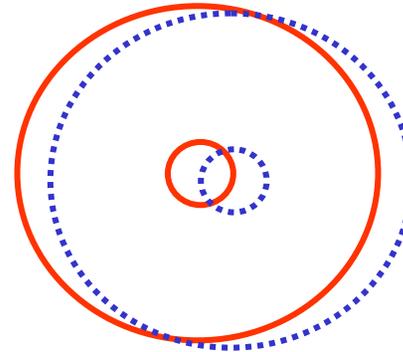
- Cleaning
- Beam spectrometer (0.7%)

Beams coincide within ~1mm all along 114m decay volume, always in vacuum

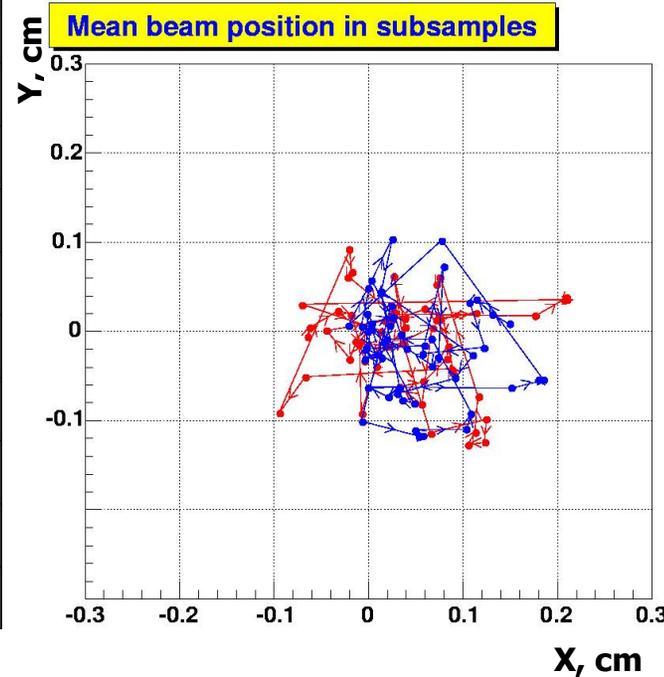
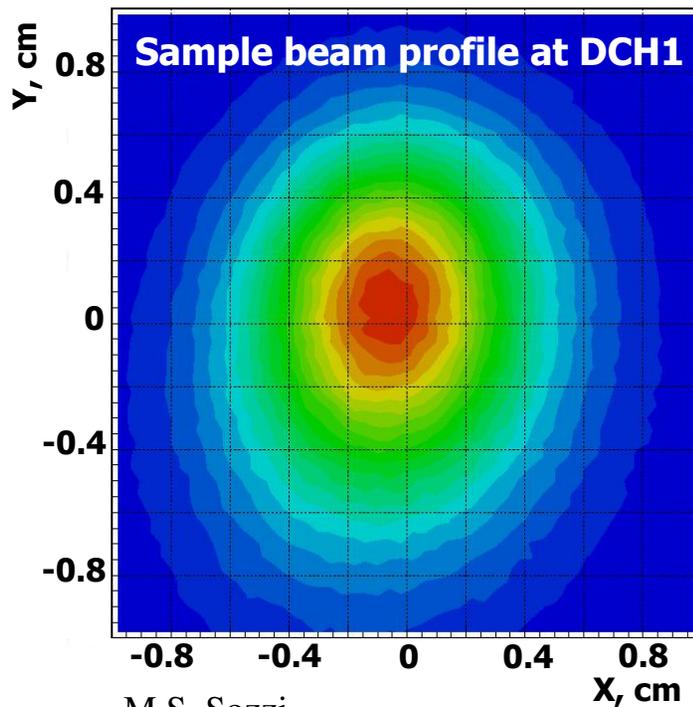
10¹¹ K decays per year collected



First order effects...



Acceptance cuts following beam movements



Beam widths:

~ 5 mm

Beam movements:

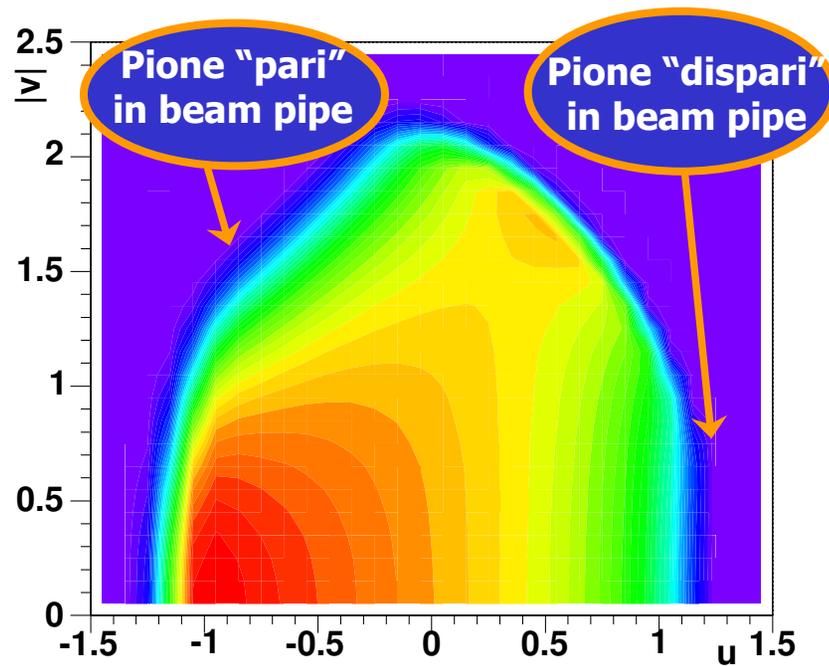
~ 2 mm

Also corrects for differences in the two beam paths

NA48/2: $K^\pm \rightarrow 3\pi$

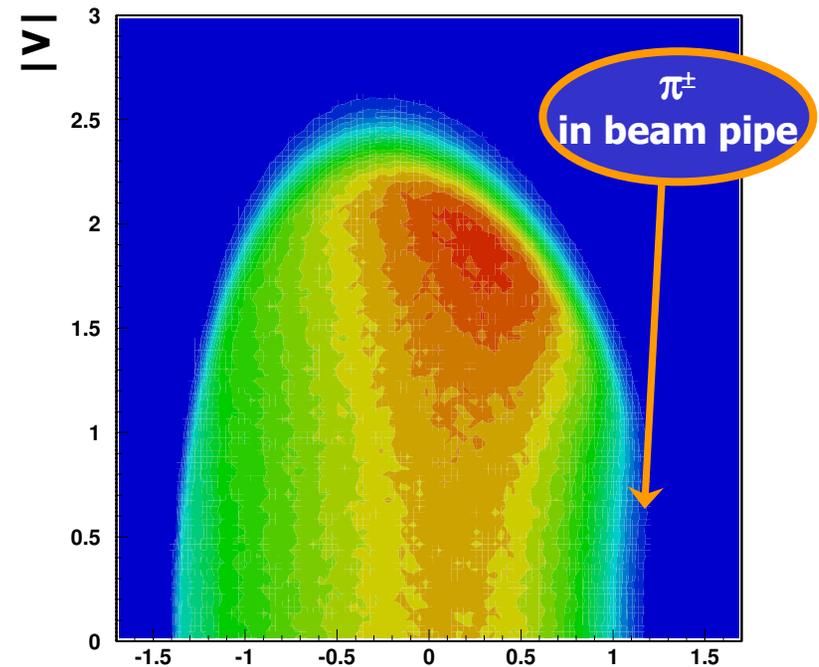
Presi dati 2003-04: $3.1 \times 10^9 + 9.1 \times 10^7$ eventi selezionati ($K^+/K^- \approx 1.8$)
Fondo trascurabile, analisi complementari (rivelatori) dei due modi.
Sfruttamento cancellazioni multiple di effetti strumentali con
inversione dei campi magnetici e di fasci simultanei.

$3.1 \cdot 10^9 K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^+ \pi^-$



M.S. Sozzi

$9.1 \cdot 10^7 K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \pi^0$



Violazione di CP

U

NA48/2: CPV in $K_{\pi 3}$

Risultati finali su statistica completa (2003+2004)

Ag(C)

$$= (-1.5 \pm 1.5_{\text{stat}} \pm 0.9_{\text{trig}} \pm 1.1_{\text{syst}}) \cdot 10^{-4}$$

$$= (-1.5 \pm 2.1) \cdot 10^{-4}$$

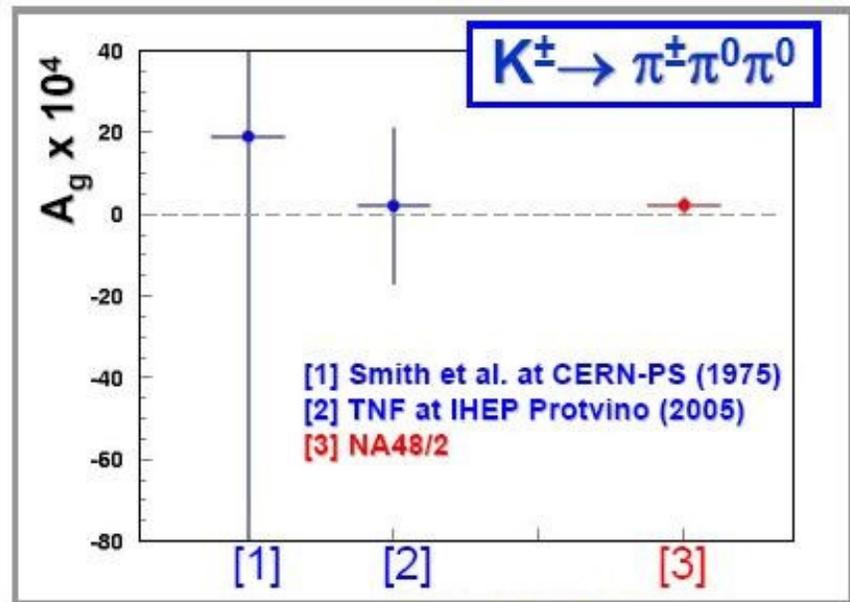
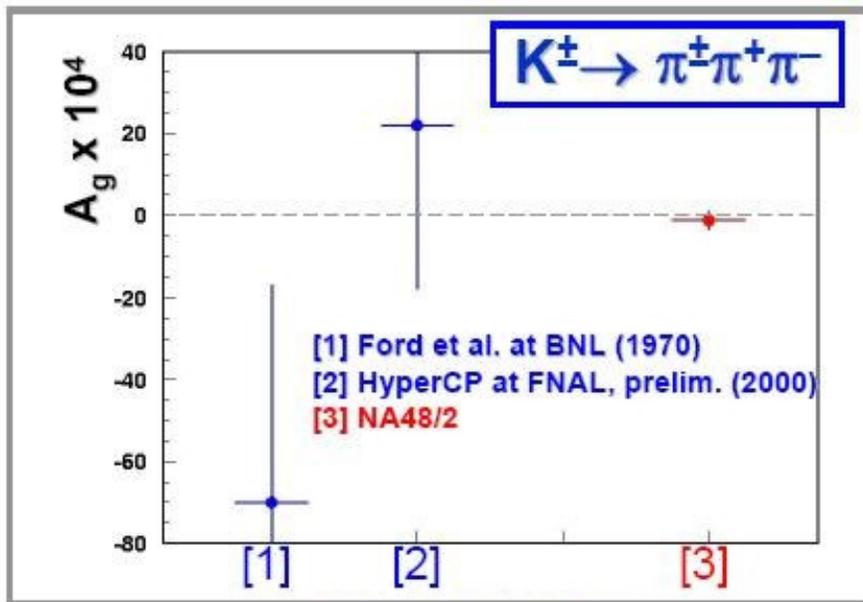
($3.1 \cdot 10^9$ decadimenti)

Ag(N)

$$= (1.8 \pm 1.7_{\text{stat}} \pm 0.5_{\text{syst}}) \cdot 10^{-4}$$

$$= (1.8 \pm 1.8) \cdot 10^{-4}$$

($9.1 \cdot 10^7$ decadimenti)



Errore statistico dominante. Miglioramento x10. No CPV.

Asimmetrie K^\pm e SM

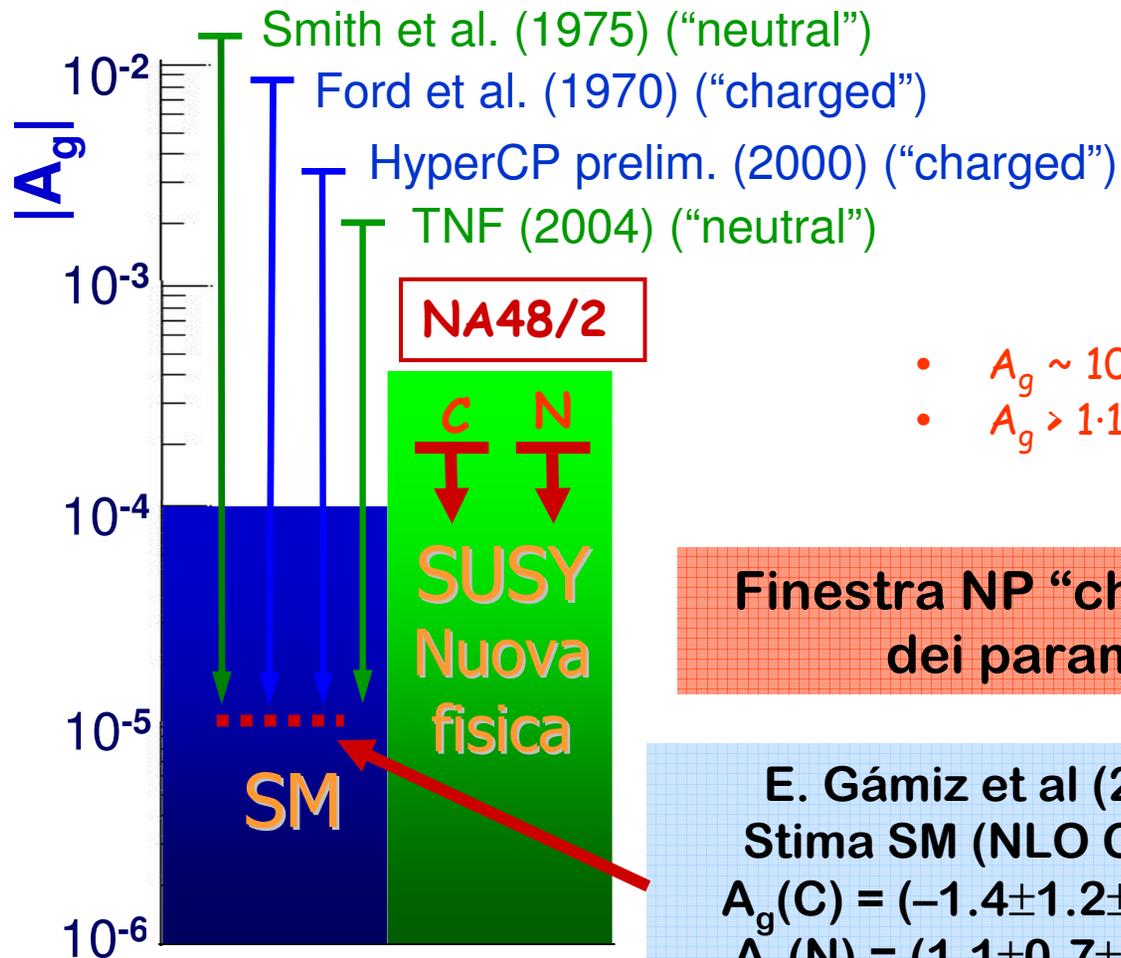
TEORIA:

Contributo SM: molte valutazioni teoriche

Grandi incertezze (adroniche)

(~1 ordine di grandezza)

Possibili innalzamenti oltre SM



- $A_g \sim 10^{-5}$ compatibile con SM
- $A_g > 1 \cdot 10^{-4}$ SUSY / Nuova Fisica

Finestra NP “chiusa”, parte dello spazio dei parametri SUSY esclusa

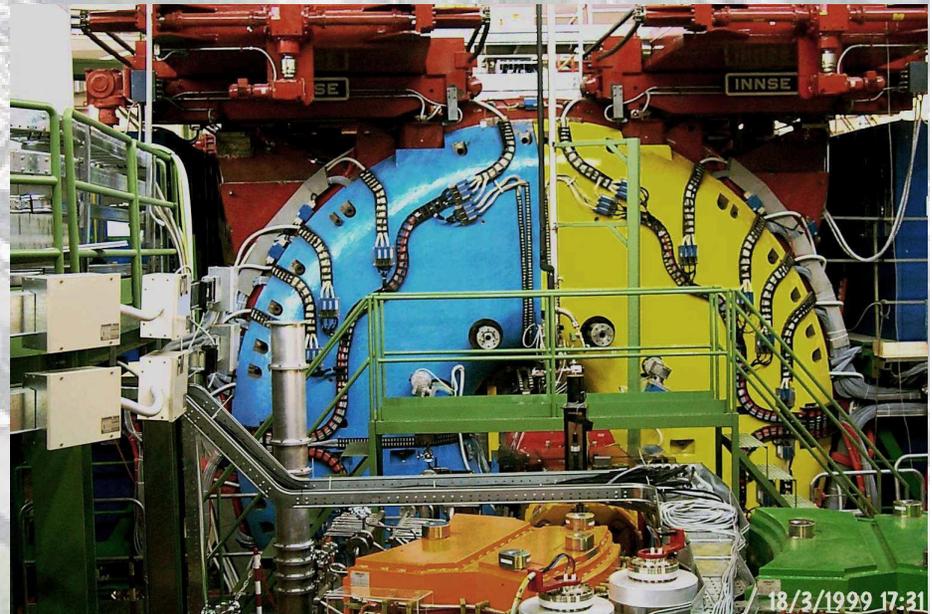
E. Gámiz et al (2003)
 Stima SM (NLO ChPT):
 $A_g(C) = (-1.4 \pm 1.2 \pm ?) \cdot 10^{-5}$
 $A_g(N) = (1.1 \pm 0.7 \pm ?) \cdot 10^{-5}$

Violazione di CP

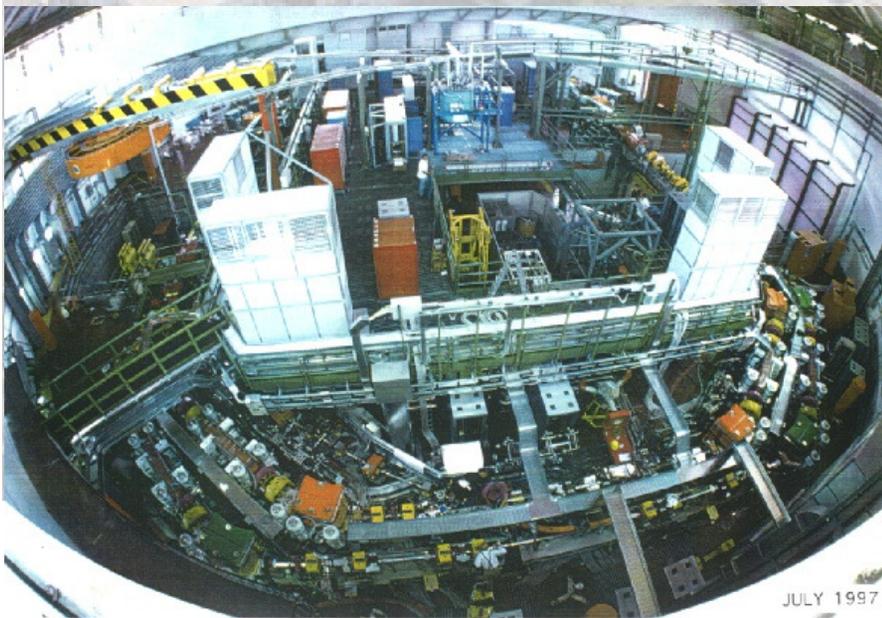


KLOE (1999-2007)

Frascati INFN DAΦNE Φ -factory
con anelli e^+e^- separati e
angolo tra i fasci 12.5 mrad
energia $\sqrt{s} = m(\Phi) = 1019.4 \text{ MeV}$



Luminosita' integrata:
 $\sim 2.5 \text{ fb}^{-1}$ 1999-2006
($\sim 2.5 \cdot 10^9$ eventi $K_S K_L$)



M.S. Sozzi

Violazione di CP

Φ -factories: DAΦNE

Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN.

Doppio anello di accumulazione (96 m circonferenza),
fino a 120 bunches, energia 0.3-1.5 GeV (RMS $\sim 10^{-3}$).

Luminosità di disegno:

$$L = 5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

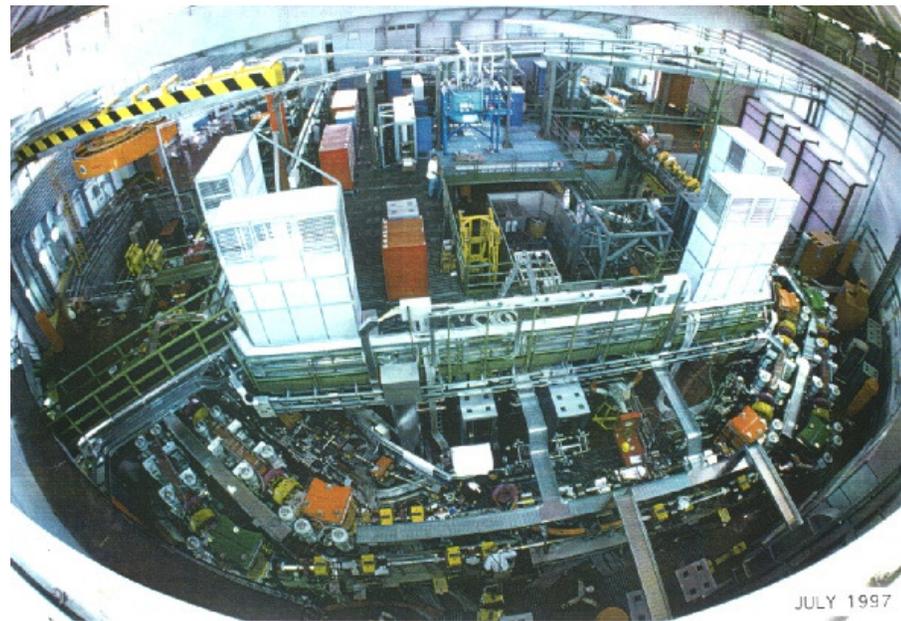
Novosibirsk:

VEPP-2M:

$$L = 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

VEPP-2000 (2005?):

$$L = 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



Produzione risonante (K-factory)

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \Phi(1019) \rightarrow K^0 \bar{K}^0$$

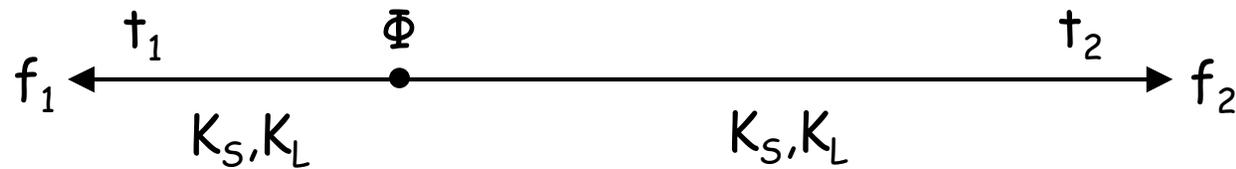
$$C(K^0 \bar{K}^0) = C(\Phi) = C(\gamma) = -1$$

La Φ decade in $K_S K_L$: $(|K_S, -\mathbf{p}\rangle |K_L, \mathbf{p}\rangle - |K_L, -\mathbf{p}\rangle |K_S, \mathbf{p}\rangle) / \sqrt{2}$

$$\sigma(e^+ e^- \rightarrow \Phi) = 4.4 \mu\text{b} \quad \sigma(e^+ e^-) = 0.17 \mu\text{b}$$

	BR	β_K	$\gamma\beta c\tau$ (cm)	P_{max} (MeV/c)
$K^+ K^-$	0.49	0.249	95.4	127
$K_S K_L$	0.34	0.216	343.8	110
$\rho\pi$	0.13			182
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	0.02			462
$\eta\gamma$	0.013			362
Altro	≈ 0.1			

Interferometria



$$I(f_1, f_2; \Delta t) = \frac{1}{2} \int_{\Delta t}^{\infty} |A(f_1, f_2; \Delta t, t)|^2 dt =$$

$$\frac{1}{2\Gamma} |\langle f_1 | K_S \rangle \langle f_2 | K_S \rangle|^2 \left(|\eta_1|^2 e^{-\Gamma_L \Delta t} + |\eta_2|^2 e^{-\Gamma_S \Delta t} - 2 |\eta_1| |\eta_2| e^{-\Gamma \Delta t / 2} \cos(\Delta m \Delta t + \phi_1 - \phi_2) \right)$$

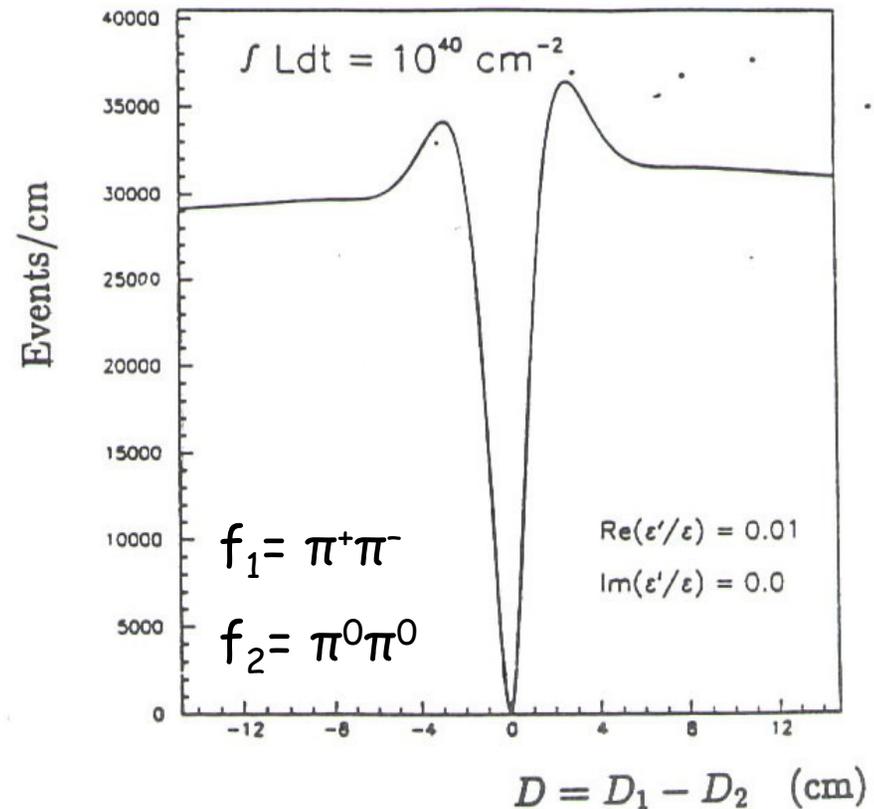
Decadimenti correlati in due stati uguali o differenti:

- $f_1 = f_2 \Rightarrow \Gamma_L, \Gamma_S, \Delta m$
- $\pi\pi, \pi\pi \Rightarrow \text{Re}(\epsilon'/\epsilon), \text{Im}(\epsilon'/\epsilon) \approx 3(\phi_1 - \phi_2)$
- $\pi\ell\nu, \pi\ell\nu \Rightarrow T, CPT$
- $\pi\pi, \pi\ell\nu \Rightarrow CPT$

Misura di $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ mediante doppio rapporto o interferometria:
 errore $1.2 \cdot 10^{-4}$ per 1 anno a
 $L=10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

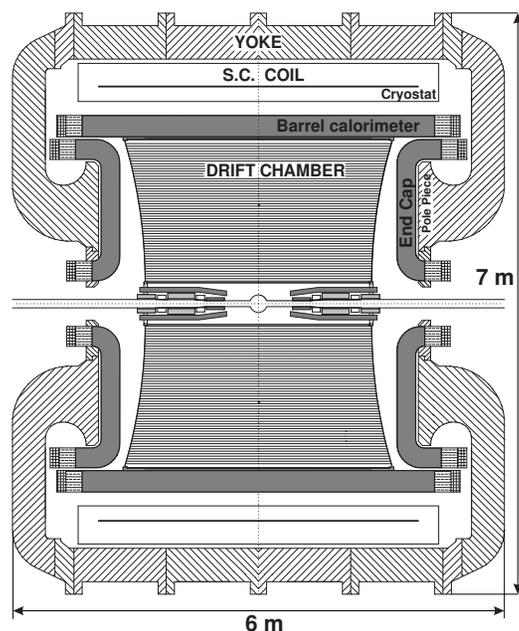
Misura di $\text{Im}(\epsilon'/\epsilon) = (\phi_{+-} - \phi_{00})/3$
 mediante interferometria
 (regione $\tau < 10 \tau_S$)

Vari test di CP e CPT

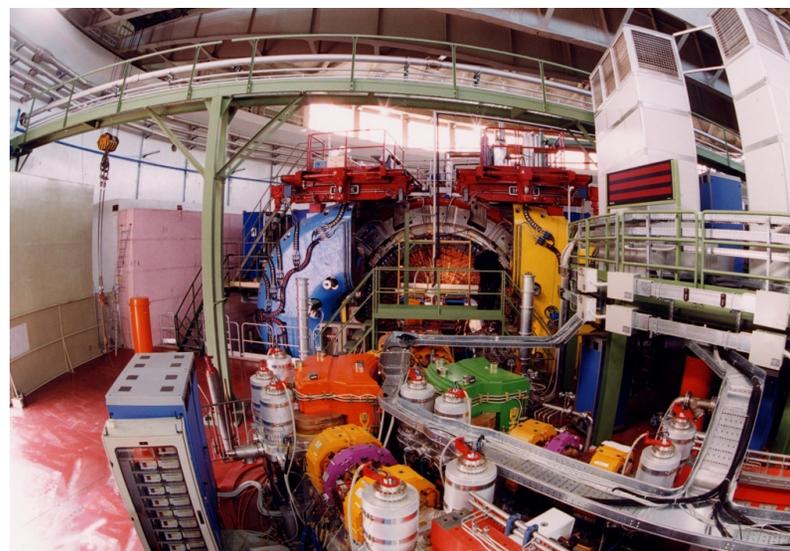


KLOE

K_S ($\gamma\beta c\tau = 0.6$ cm) decadono nella *beam-pipe*, necessario grande rivelatore per K_L ($\gamma\beta c\tau = 350$ cm). Calorimetria a bassa energia (20 MeV): Pb-fibre scintillanti. Minimizzazione diffusione multipla: camera a deriva con He. Elevata risoluzione temporale (TOF) per misura vertice di decadimento neutro, discriminazione e/μ .



Luminosita' 2003: $7 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

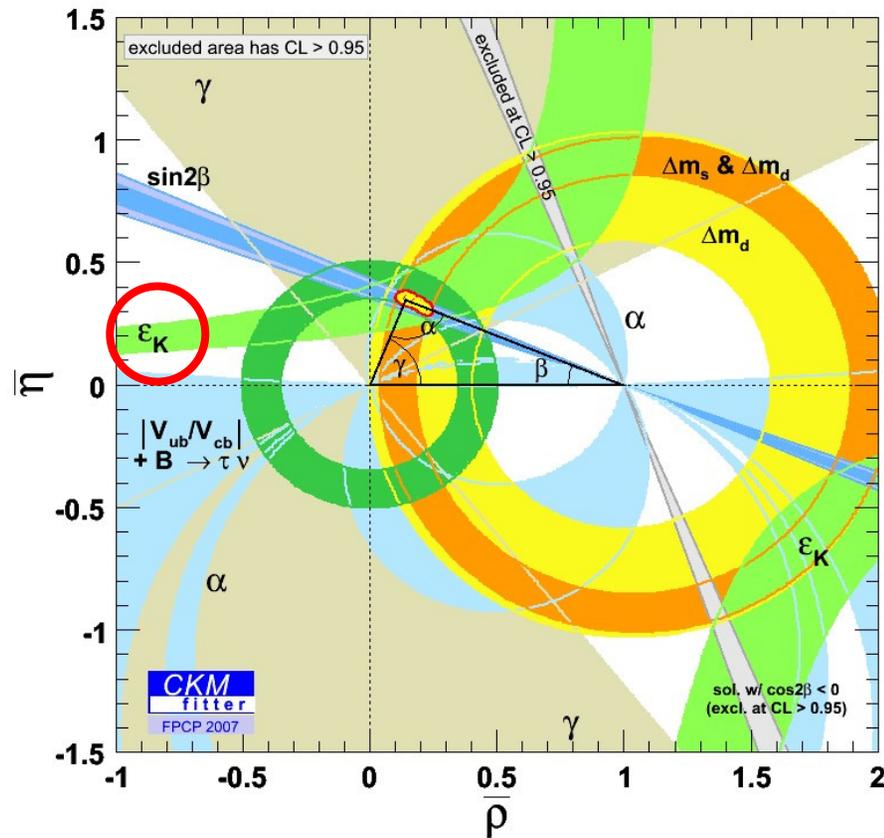


M.S. Sozzi

Violazione di CP

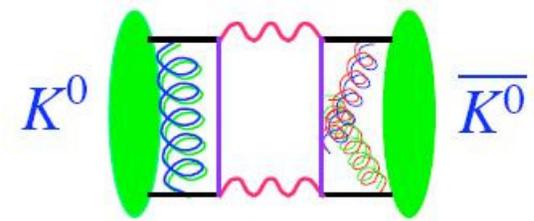
ϵ confronts the SM

$\epsilon \neq 0$ constrains (poorly) the apex of the Unitarity Triangle due to the theoretical difficulty in handling the hadronic uncertainties



ϵ measured to 0.5%
 Waiting for lattice QCD
 for K to become also
 a *quantitative* test of SM.

New accurate and precise B_K required.



ne di CP

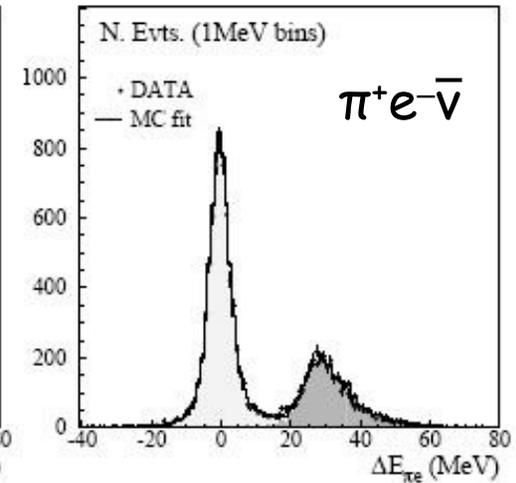
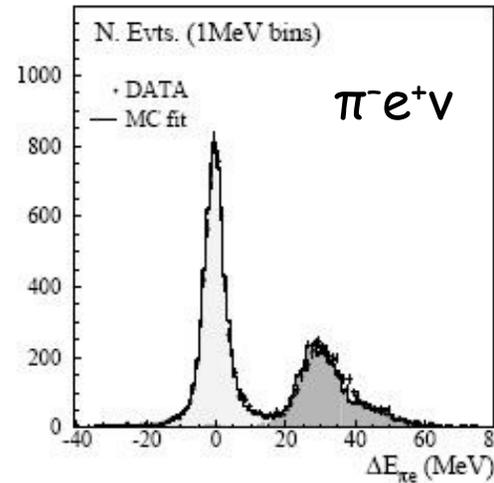
KLOE: $\delta_S(e)$

First measurement of K_S semi-leptonic decays ($K_S \rightarrow \pi \mu \nu$ also seen):

$$\text{BR}(K_S \rightarrow \pi e \nu) = (7.028 \pm 0.092) \times 10^{-4}$$

2001-2002 data (410 pb⁻¹):
13K events

(Indirect) CP-violating
charge asymmetry:



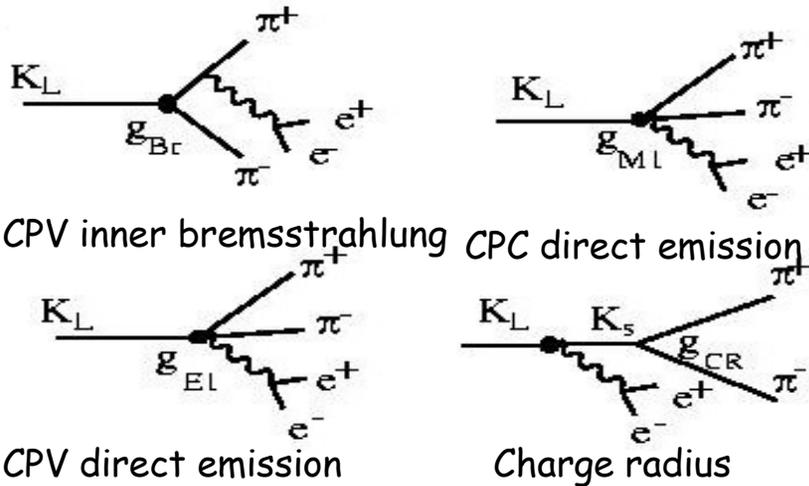
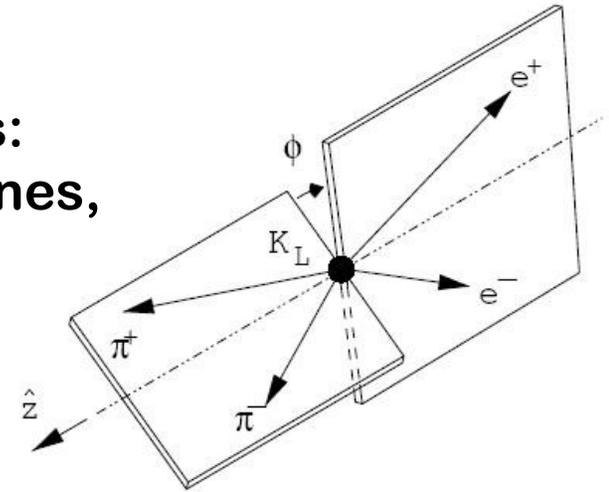
$$\delta_S(e) = \frac{\Gamma(K_S \rightarrow \pi^- e^+ \nu) - \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu})}{\Gamma(K_S \rightarrow \pi^- e^+ \nu) + \Gamma(K_S \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu})}$$

$$= (1.5 \pm 9.6_{\text{stat}} \pm 2.9_{\text{syst}}) \cdot 10^{-3}$$

CPT test by comparison
to $\delta_L(e)$ (still far from
being significant)

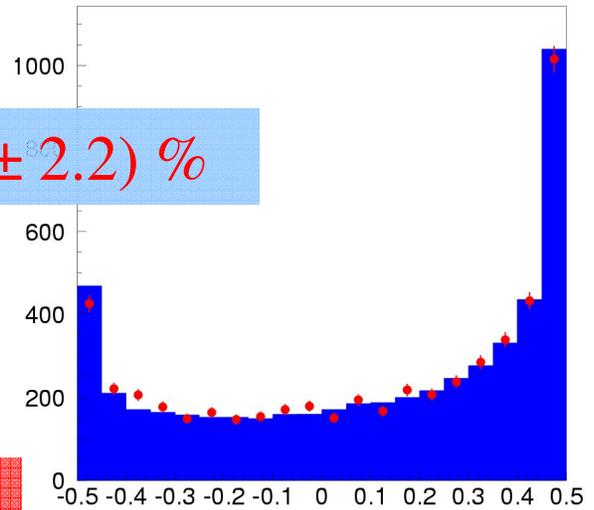
$K_{L,S} \rightarrow \pi^+\pi^-e^+e^-$ and CPV

Rare decay ($BR \approx 3 \cdot 10^{-7}$) first seen by KTeV
 Internal γ conversion allows helicity analysis:
 asymmetry in angle ϕ between $\pi\pi$ and ee planes,
 in agreement with theory (indirect CPV)



$$A_\phi = (13.8 \pm 2.2) \%$$

(KTeV + NA48)



Also $K_L \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ (KTeV, NA48)
 and related CPV parameters

All consistent with usual (ϵ) CPV

T violation: Kabir's Test

Reminder: the only direct measurement of TV
 Direct comparison of T-conjugate (virtual) transitions:



$$A_T = \frac{P(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - P(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}{P(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) + P(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}$$

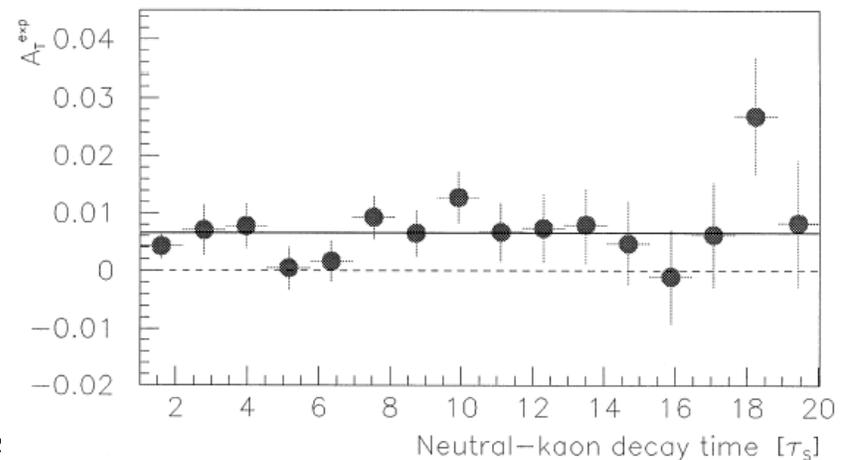
Using semi-leptonic decays and assuming CPT in decays

$$A_T(t) = 4 \operatorname{Re}(\epsilon) + 2 \frac{\operatorname{Re}(x_-) [e^{-\Delta\Gamma t/2} - \cos(\Delta m t)] + \operatorname{Im}(x_+) \sin(\Delta m t)}{\cosh(\Delta\Gamma t/2) - \cos(\Delta m t)}$$

CPLEAR (1998):

$$\langle A_T \rangle = (6.6 \pm 1.3) \cdot 10^{-3}$$

Fully consistent with indirect
 CPV in K^0 mixing



T-odd correlations

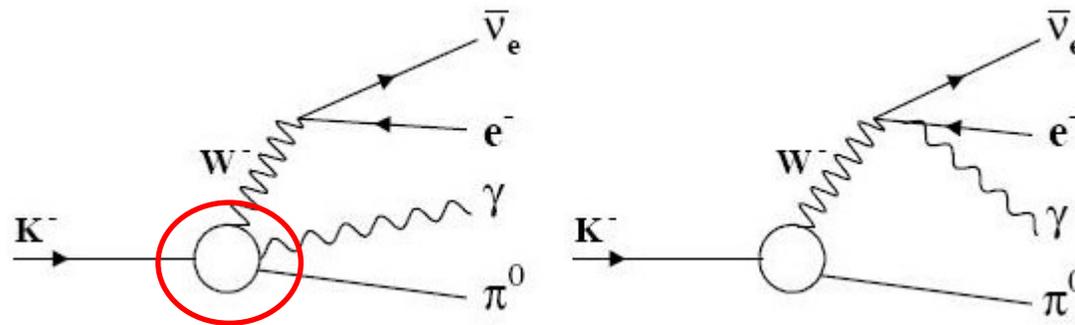
Looked for in 3-body decays (w. spin) or 4-body decays (momenta)

Beware of fake asymmetries by Final State Interactions

K_{e4} ($K \rightarrow \pi\pi e\nu$) $BR \approx 4.1 \cdot 10^{-5}$ or $K_{e3\gamma}$ ($K \rightarrow \pi e\nu\gamma$) $BR \approx 2.7 \cdot 10^{-4}$ or

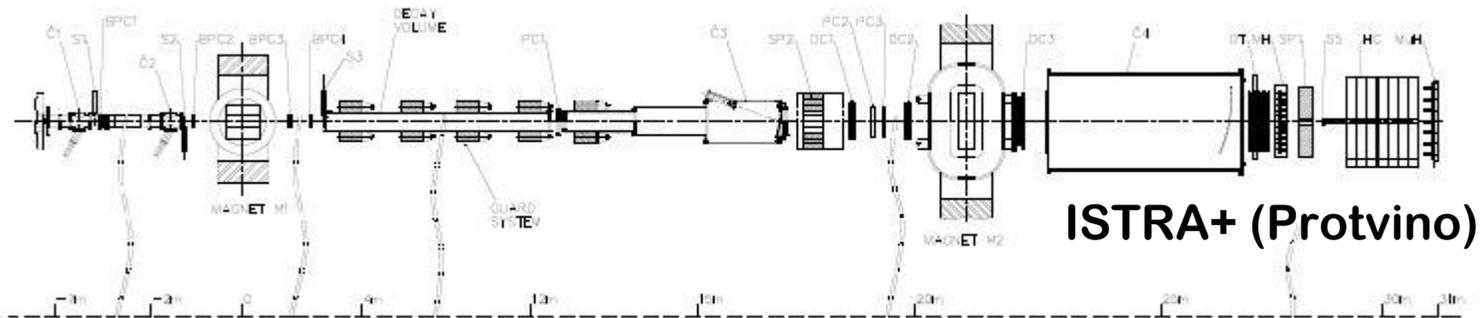
$K_{\mu 3\gamma}$ ($K \rightarrow \pi\mu\nu\gamma$) $BR \approx 2.4 \cdot 10^{-5}$

$Ke3\gamma$:



$$\xi = \frac{(\mathbf{p}_\pi \times \mathbf{p}_\mu) \cdot \mathbf{p}_\gamma}{|\mathbf{p}_\pi \times \mathbf{p}_\mu| |\mathbf{p}_\gamma|} \quad A_\xi = \frac{N(\xi > 0) - N(\xi < 0)}{N(\xi > 0) + N(\xi < 0)}$$

$K\ell 3\gamma$: ISTRA, NA48



$K e 3 \gamma$: FSI: $A_{\xi} \approx (0.5-1) \cdot 10^{-4}$ in the SM - NP models: $A_{\xi} \approx \text{few } 10^{-4}$

ISTRA+ (2005): $A_{\xi} = 0.015 \pm 0.021$ (1400 events)

NA48/2: few 10^5 events and *cancellation* of FSI effects
by K^+/K^- comparison, *in progress*

$K \mu 3 \gamma$: FSI: $A_{\xi} \approx 1.1 \cdot 10^{-4}$ in the SM - NP models: $A_{\xi} \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$

ISTRA+ (2006): $BR(K^- \rightarrow \pi^0 \mu^- \nu \gamma) \approx 9 \cdot 10^{-5}$

$A_{\xi} = -0.03 \pm 0.13$ (400 events)

More T-odd: $PT(\mu)$

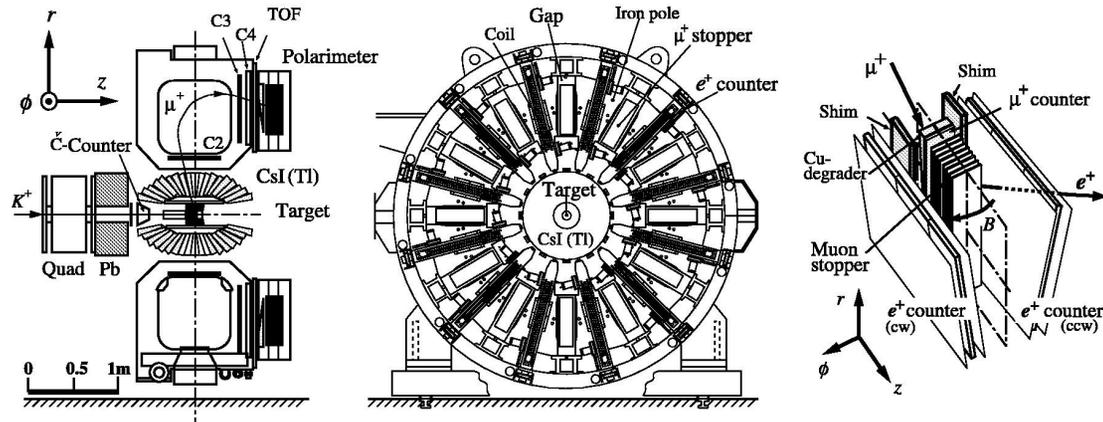
$P_T(\mu)$ in $K\mu 3$ decays

$$P_T(\mu) = \frac{(\mathbf{p}_\pi \times \mathbf{p}_\mu) \cdot \mathbf{S}_\mu}{|\mathbf{p}_\pi \times \mathbf{p}_\mu| |\mathbf{S}_\mu|}$$

Experiments in the '70s on $K_L \rightarrow \pi^- \mu^+ \nu$ reached the FSI limit:

$$\text{Im } \xi = (-7 \pm 26) \times 10^{-3} \quad (\xi = \text{ratio of the two contributing FFs})$$

KEK E246:
 660 MeV/c K^+ stopped
 in active target.
 Final result
 (8.3M $\pi^0 \mu^+ \nu$
 decays, 1996-2000):



$$P_T(\mu) = (-1.7 \pm 2.3 \pm 1.1) \times 10^{-3}$$

$$\text{Im } \xi = (-5.3 \pm 7.1 \pm 3.6) \times 10^{-3}$$

x10 improvement expected at J-PARC [see later talk]