

Misura della violazione di CP

Flavio Marchetto

1. Esperimento di Christenson, Cronin, Fitch, Turlay: scoperta della violazione di CP (1964)
2. Violazione diretta di CP
3. Esperimento NA48 per la misura della violazione diretta di CP (1997-2001)

Fino al 1964:

$$\mathbf{K}_S = \mathbf{K}_1 \text{ (CP di } \mathbf{K}_1 = +1)$$

$$\mathbf{K}_L = \mathbf{K}_2 \text{ (CP di } \mathbf{K}_2 = -1)$$

$$\mathbf{K}_1 \rightarrow \pi \pi$$

$$\mathbf{K}_2 \rightarrow \pi \pi \pi$$

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \overline{K^0})$$

$$K_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \overline{K^0})$$

Quindi l'evidenza di decadimenti di $\mathbf{K}_L \rightarrow \pi \pi$ (oppure di $\mathbf{K}_S \rightarrow \pi \pi \pi$) avrebbe indicato la violazione di CP

L'esperimento di Christenson, Cronin, Fitch e Turlay (1964) evidenzio' il decadimento di $\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ e quindi la violazione di CP.

L'esperimento doveva rivelare eventi aventi la seguente firma:

- **due e solo due particelle cariche** (una per braccio)
- **ricostruendo la massa invariante delle due particelle cariche il risultato deve fornire un valore vicino alla massa del kaone ($M_K = 0.4977 \text{ GeV}/c^2$)**

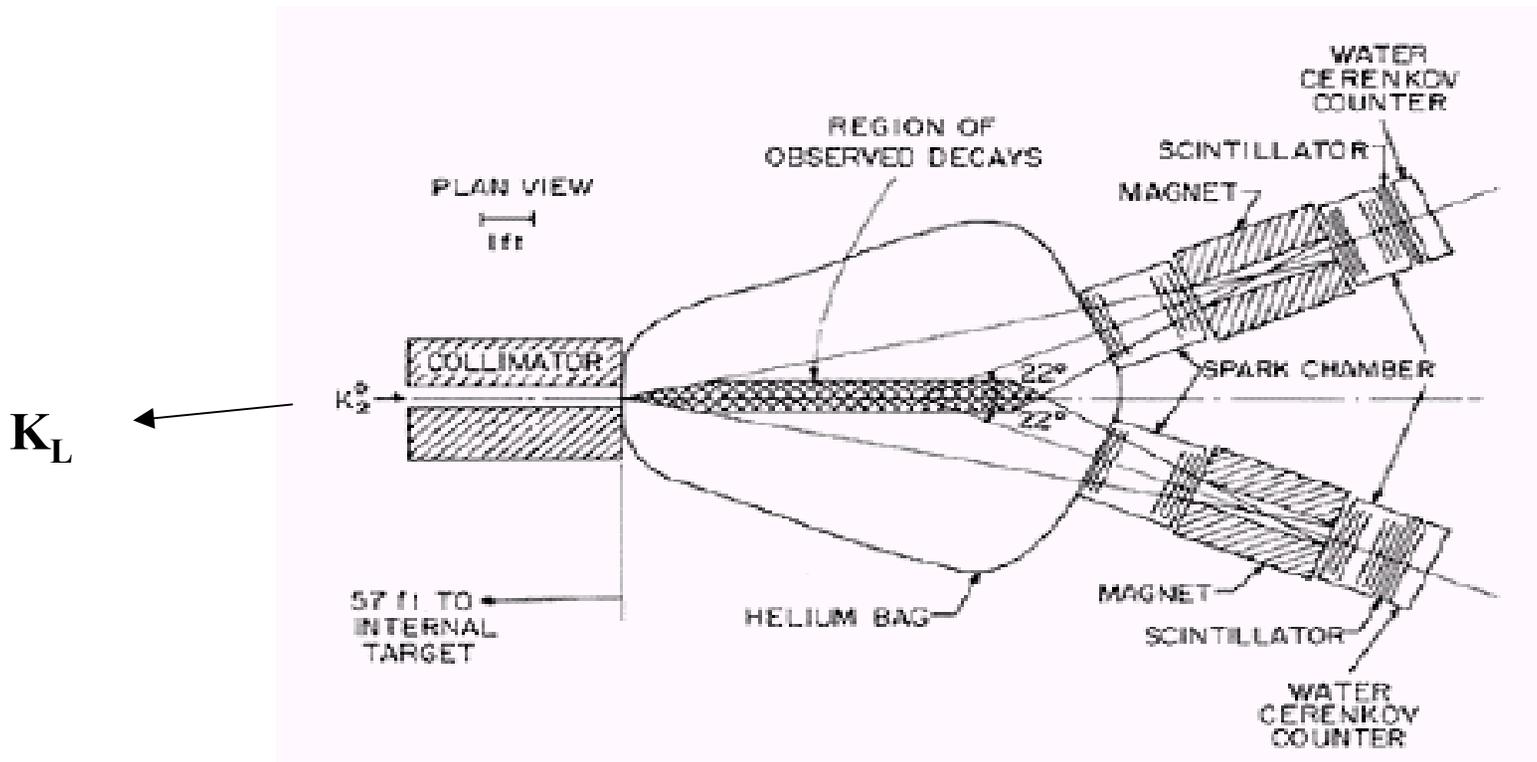
$$(m_{12})^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2 = 2 m_\pi^2 + 2E_1 E_2 - 2\mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2 \cos \Theta_{12}$$

con $E = \sqrt{p^2 + m_\pi^2}$

per cui e' necessario misurare $|p|$ e direzione di entrambi le particelle cariche per determinare $(m_{12})^2$

Fondi: decadimenti del K_L che possono mimare il segnale

- $\pi e \nu$ (38.79 %)
- $\pi \mu \nu$ (27.18 %)
- $\pi^+ \pi^- \pi^0$ (12.58 %)



Schema dell'esperimento che scopri' la violazione di CP

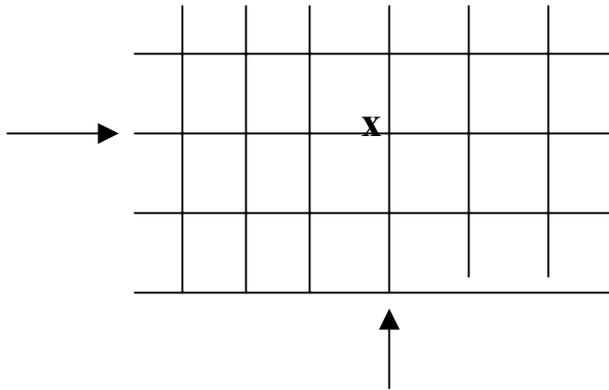
1. Il collimatore definisce la direzione del K_L (si vedrà in seguito come si possa definire/costruire un fascio predominante di K_L .

2. Regione di decadimento: zona dove una frazione di K_L decade.
Riempita con gas Elio per limitare per quanto possibile lo scattering multiplo dei prodotti di decadimento del K_L

3. Spettrometro con due bracci uguali

- due stazioni di **spark chambers** per definire la direzione della particella carica (vedere la prossima slide)
- magneti per deviare la particella carica
- due stazioni di spark chambers per definire la direzione delle particelle cariche uscenti.

4. Scintillatori per riconoscere eventi con due particelle cariche, una per braccio



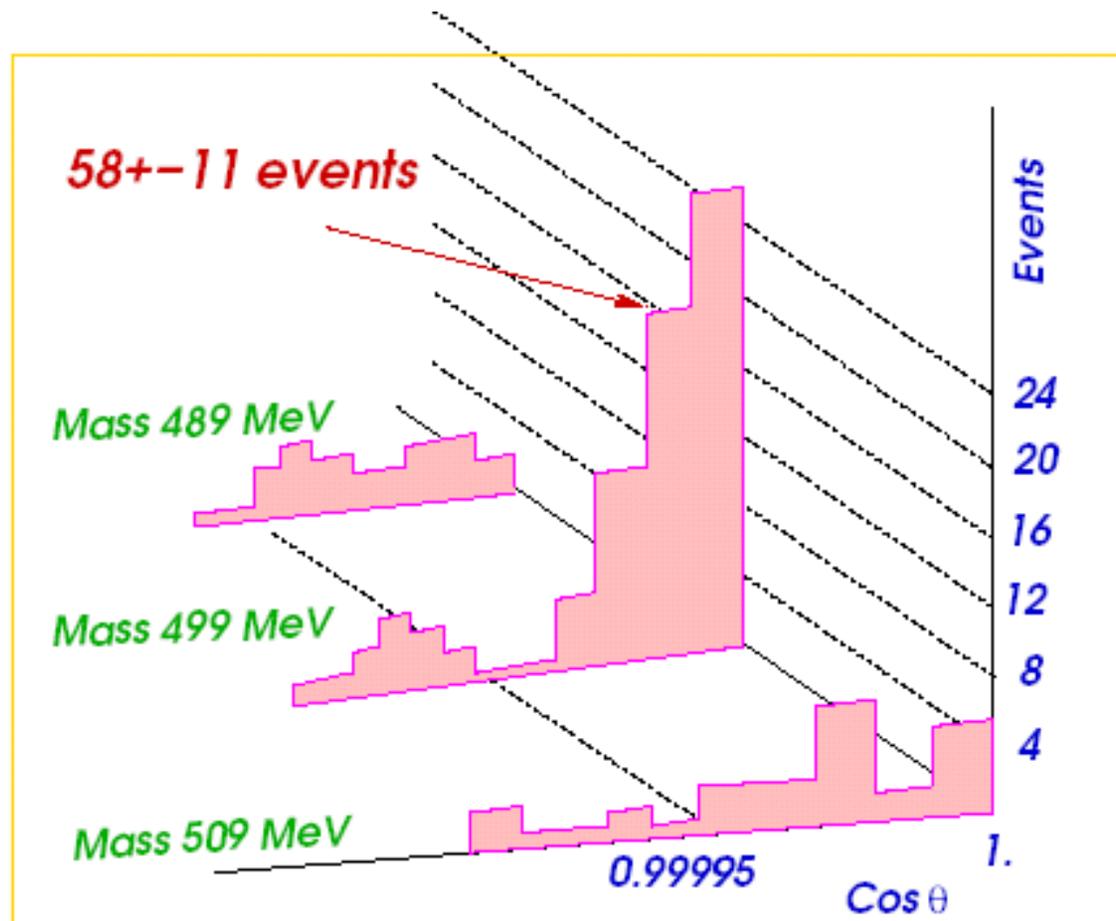
stazione di spark chamber:

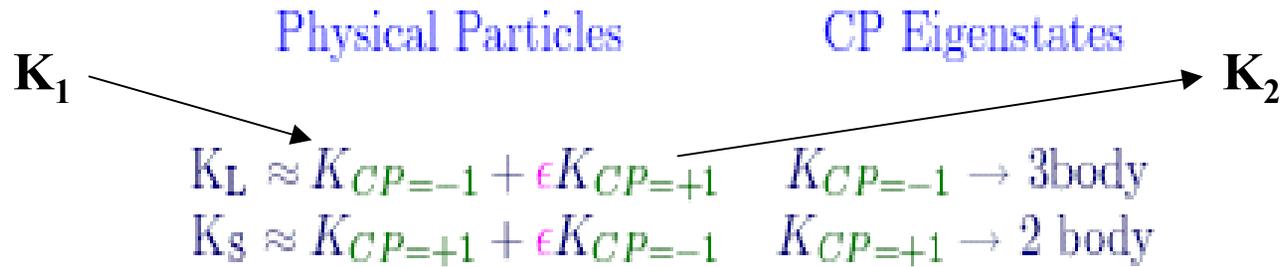
due piani di fili per misurare la posizione della particella

- con due stazioni di spark chamber si misura la direzione della particella carica
- il magnete (campo B noto) devia la particella da cui si misura:

$$p \text{ (GeV/c)} = 0.3 B \text{ (Tesla)} R \text{ (metri)}$$

Risultati: numero di eventi in funzione della massa invariante e del coseno dell'angolo fra direzione K_L e direzione risultante delle due particelle cariche $\rightarrow \overline{p_1} + \overline{p_2}$





Mixing parameter $|\epsilon| \approx 2 \cdot 10^{-3}$ (1964)

La frazione ϵ di \mathbf{K}_L che decade in due pioni deriva dal *mixing* degli autostati di CP: $\mathbf{K}_L = \mathbf{K}_2 + \epsilon \mathbf{K}_1$

La questione fra il 1964 e il ~2000 e' stata:

a prescindere dalla violazione di CP dovuta al *mixing* esiste una violazione diretta di CP ? Cioe' il decadimento di $\mathbf{K}_L \rightarrow \pi \pi$ senza passare attraverso lo stato \mathbf{K}_1

Come si evidenzia la violazione *diretta* di CP ?

(decadimento di K_L in due pioni senza passare attraverso K_1)

K_1 decade in $\pi^+\pi^-$ o $\pi^0\pi^0$ in un ben preciso rapporto:

$$\mathbf{BR(\pi^+\pi^-) / BR(\pi^0\pi^0) = 68.60\% / 31.40\%}$$

Quindi se il K_L decade in $\pi\pi$ senza passare attraverso K_1 allora il rapporto $BR(\pi^+\pi^-) / BR(\pi^0\pi^0)$

sara' in generale diverso da 68.60% / 31.40%

In altri termini, se:

$BR(\pi^+\pi^-) / BR(\pi^0\pi^0)$ da K_L *diverso da* $BR(\pi^+\pi^-) / BR(\pi^0\pi^0)$ da K_S



proveniente da K_1 + violazione
diretta di CP



proveniente da K_1

L'eventuale differenza di:

$$\mathbf{BR}(\pi^+\pi^-) / \mathbf{BR}(\pi^0\pi^0) \text{ da } \mathbf{K}_L$$

$$\mathbf{BR}(\pi^+\pi^-) / \mathbf{BR}(\pi^0\pi^0) \text{ da } \mathbf{K}_S$$

e' evidenza

della violazione diretta di CP

Misura di:

$$\mathbf{BR}(\pi^+\pi^-) / \mathbf{BR}(\pi^0\pi^0) |_{\mathbf{K}_L} / \mathbf{BR}(\pi^+\pi^-) / \mathbf{BR}(\pi^0\pi^0) |_{\mathbf{K}_S}$$



$$[\mathbf{N}_{\text{ev}}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0\pi^0) / \mathbf{N}_{\text{ev}}(\mathbf{K}_S \rightarrow \pi^0\pi^0)] / [\mathbf{N}_{\text{ev}}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^+\pi^-) / \mathbf{N}_{\text{ev}}(\mathbf{K}_S \rightarrow \pi^+\pi^-)]$$



$$\mathbf{R} = \frac{\Gamma(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0\pi^0)}{\Gamma(\mathbf{K}_S \rightarrow \pi^0\pi^0)} / \frac{\Gamma(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^+\pi^-)}{\Gamma(\mathbf{K}_S \rightarrow \pi^+\pi^-)} \approx 1 - 6 \times \text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon)$$

Negli anni 80 ci furono due misure per determinare la violazione diretta di CP:

$$\text{NA31} \quad (23 \pm 6.5) \cdot 10^{-4}$$

$$\text{E731} \quad (7.4 \pm 5.2 \pm 2.9) \cdot 10^{-4}$$

SPS Cern

Fermilab

Misure non conclusive !

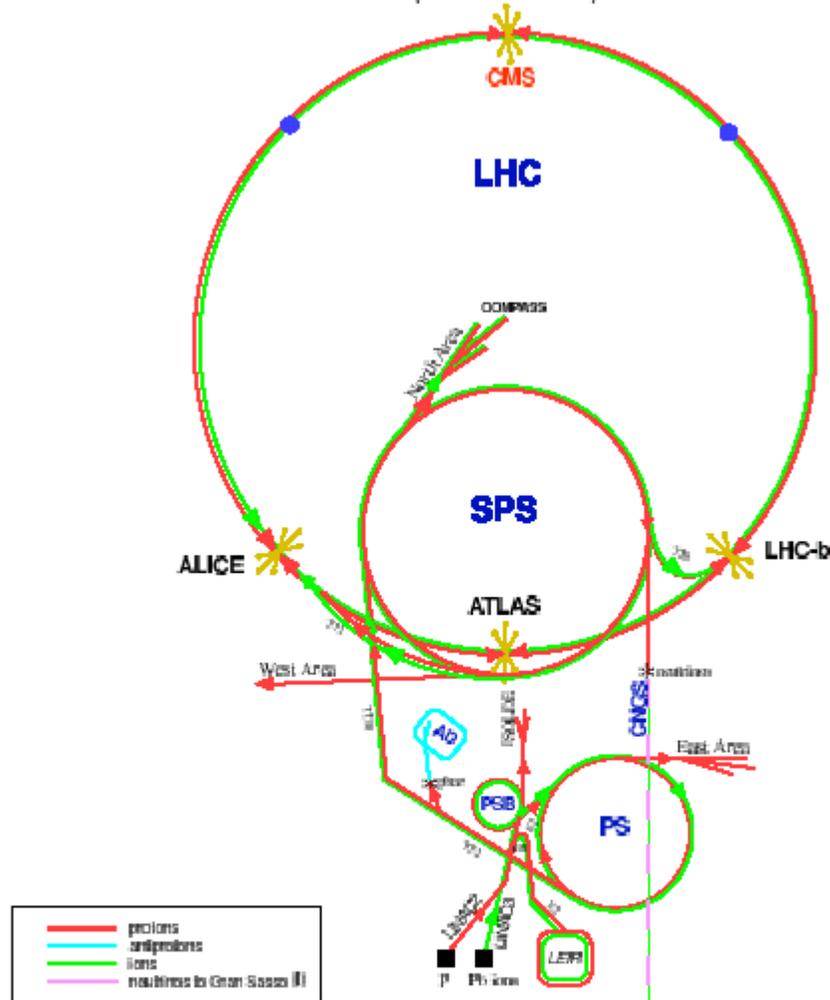
NA31: deviazione di $\sim 3\sigma$ da zero mentre il risultato di E731 e' pienamente compatibile con zero.

All'inizio degli anni 90 sono stati progettati e costruiti altri due esperimenti per la misura di CP (diretta)

- **NA48 (SPS Cern)**
- **KTeV (Fermilab)**

NA48 allo SPS del CERN

CERN Accelerators (not to scale)



- LHC: Large Hadron Collider
- SPS: Super Proton Synchrotron
- AD: Antiproton Decelerator
- ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
- PSB: Proton Synchrotron Booster
- PS: Proton Synchrotron
- LINAC: LINear ACcelerator
- LEIR: Low Energy Ion Ring
- CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

NA48: collaborazione di diverse Universita' e Istituti

**Cagliari, Cambridge, Cern, Dubna, Edinburgh, Ferrara, Firenze,
Mainz, Orsay, Perugia, Pisa, Saclay, Siegen, Torino, Vienna, Warsaw**

Misura del *doppio rapporto R*

$$R = [N_{\text{ev}}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) / N_{\text{ev}}(\mathbf{K}_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)] / [N_{\text{ev}}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^+ \pi^-) / N_{\text{ev}}(\mathbf{K}_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)]$$

$$\text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = 1/6 (1 - R)$$

Precisione della misura di $\text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon)$: $\sim 10^{-4}$ \rightarrow $\delta R \sim 6 \cdot 10^{-4}$

$$\text{BR}(\mathbf{K}_S \rightarrow \pi^+ \pi^-) = 68.60\%$$

$$\text{BR}(\mathbf{K}_S \rightarrow \pi^0 \pi^0) = 31.40\%$$

$$\text{BR}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^+ \pi^-) = 2.08 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{BR}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) = 9.42 \cdot 10^{-4}$$

Ci si aspetta che l'errore statistico maggiore sia dovuto a $\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ che ha Branching Ratio minore quindi in prima approssimazione:

$$\delta R/R \sim \delta N_{\text{ev}}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) / N_{\text{ev}}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) = \frac{1}{\sqrt{N_{\text{ev}}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0 \pi^0)}}$$

$$N_{\text{ev}}(\mathbf{K}_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) > 2 \cdot 10^6$$

Da confrontare con 58 eventi con cui si scopri' la violazione di CP

Per limitare gli errori sistematici furono fatte le seguenti scelte:

- **fasci di K_L e di K_S contemporanei (NA48 – KTeV):**

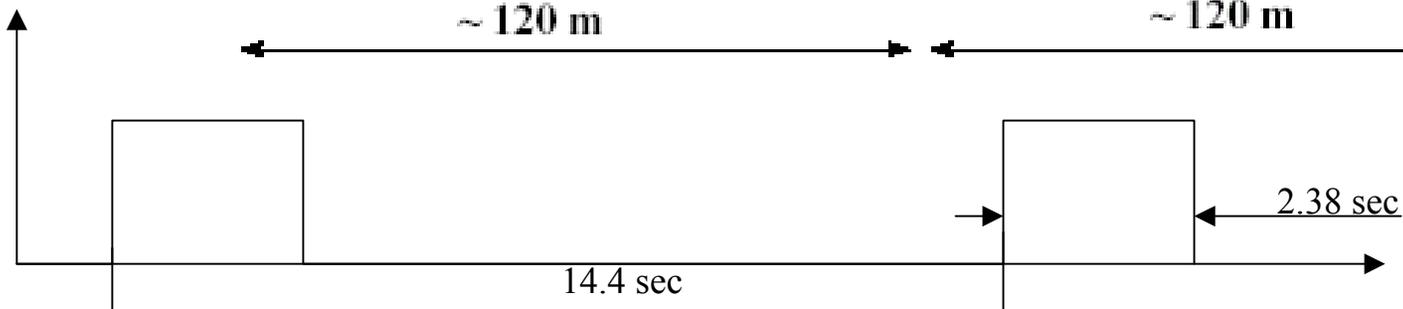
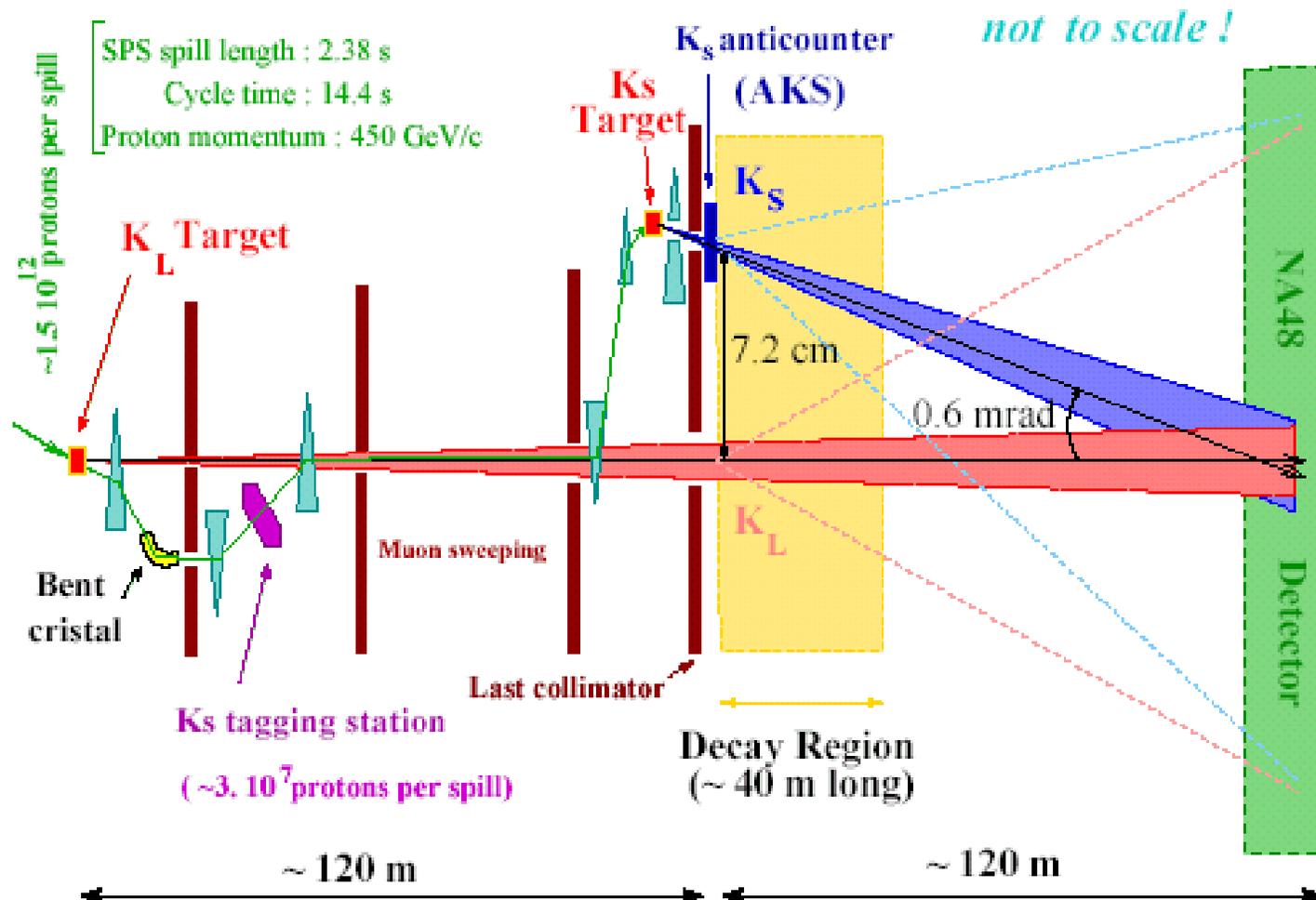
se per una frazione del tempo di presa dati un componente del rivelatore non funziona bene ne vengono a *soffrire* in modo uguale sia K_L che K_S e grazie al doppio rapporto l'inefficienza si cancella

- **geometria dei fasci molto simile (NA48):**

dal rivelatore i due fasci sono *visti* in modo equivalente, e quindi l'illuminazione del rivelatore dovuta ai prodotti di decadimento e' uguale per K_L e K_S

Possibili asimmetrie di funzionamento del rivelatore si cancellano

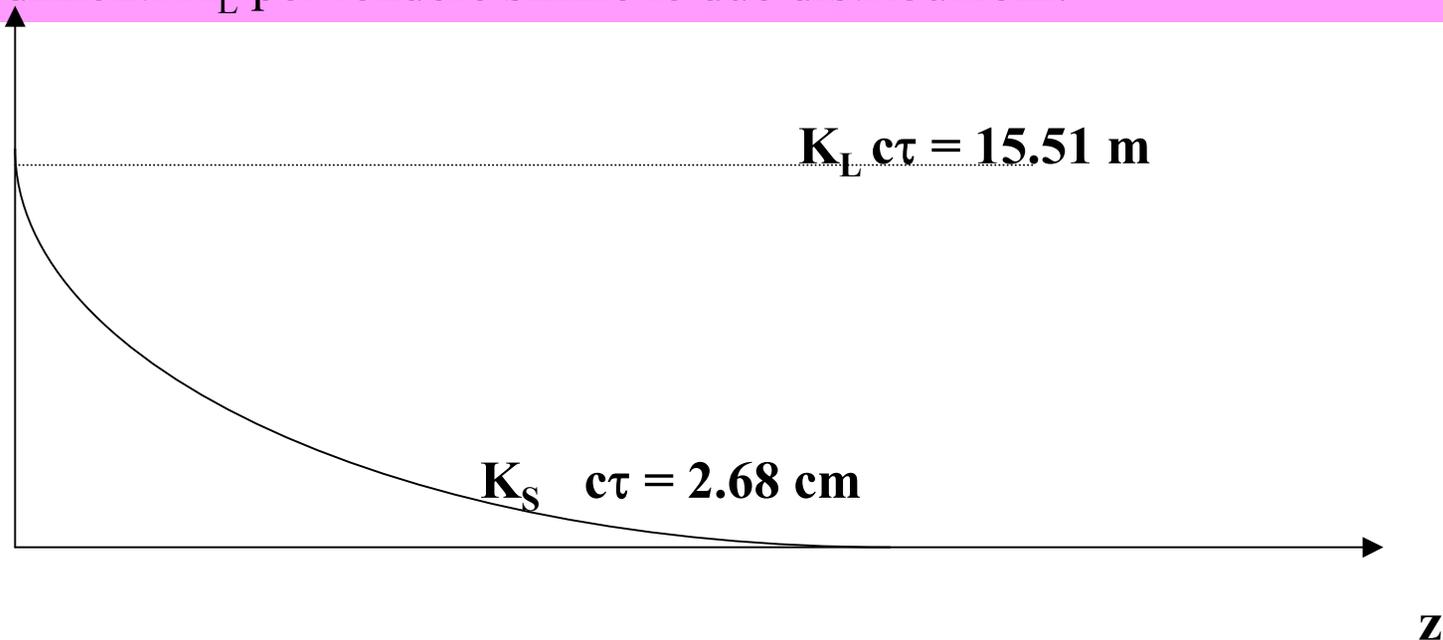
Fasci di K_L e K_S



Altri accorgimenti per limitare l'impatto degli errori sistematici

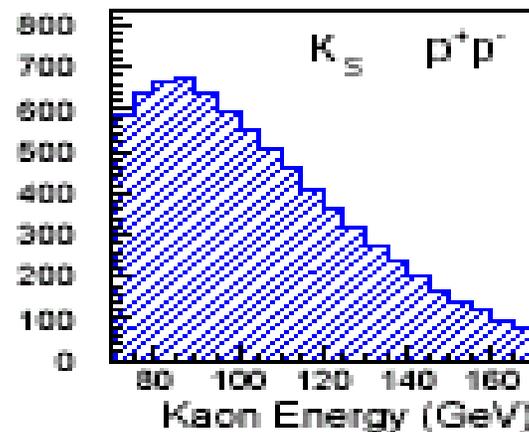
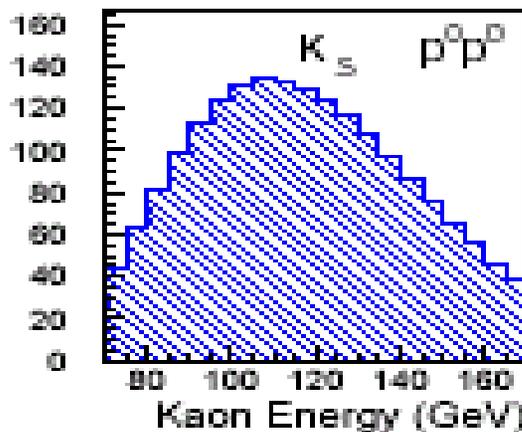
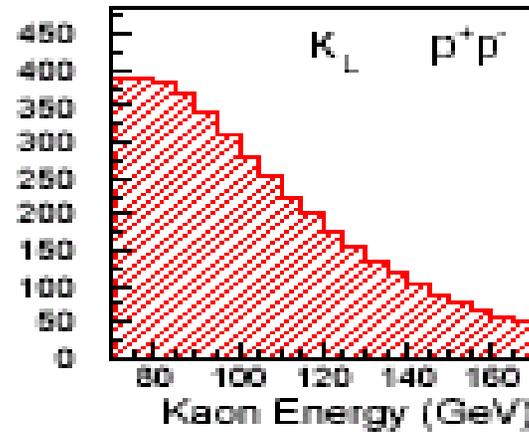
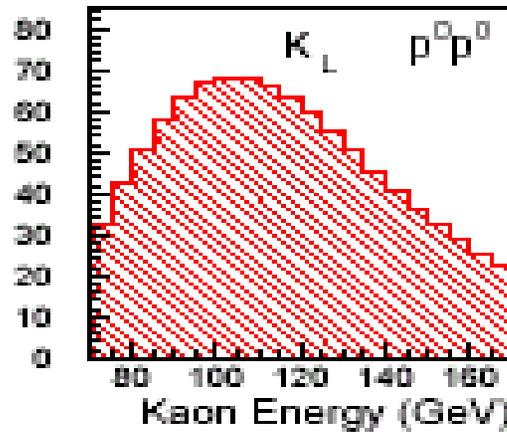
- spettro in energia di K_L e K_S il piu' possibile identici e determinazione del doppio rapporto in bin di energia (vedere prossima slide)

- distribuzione dei vertici dei decadimenti che e' molto diversa per K_L e K_S quindi da' luogo a correzioni di accettazione molto grandi: pesatura dei decadimenti K_L per rendere simile le due distribuzioni.

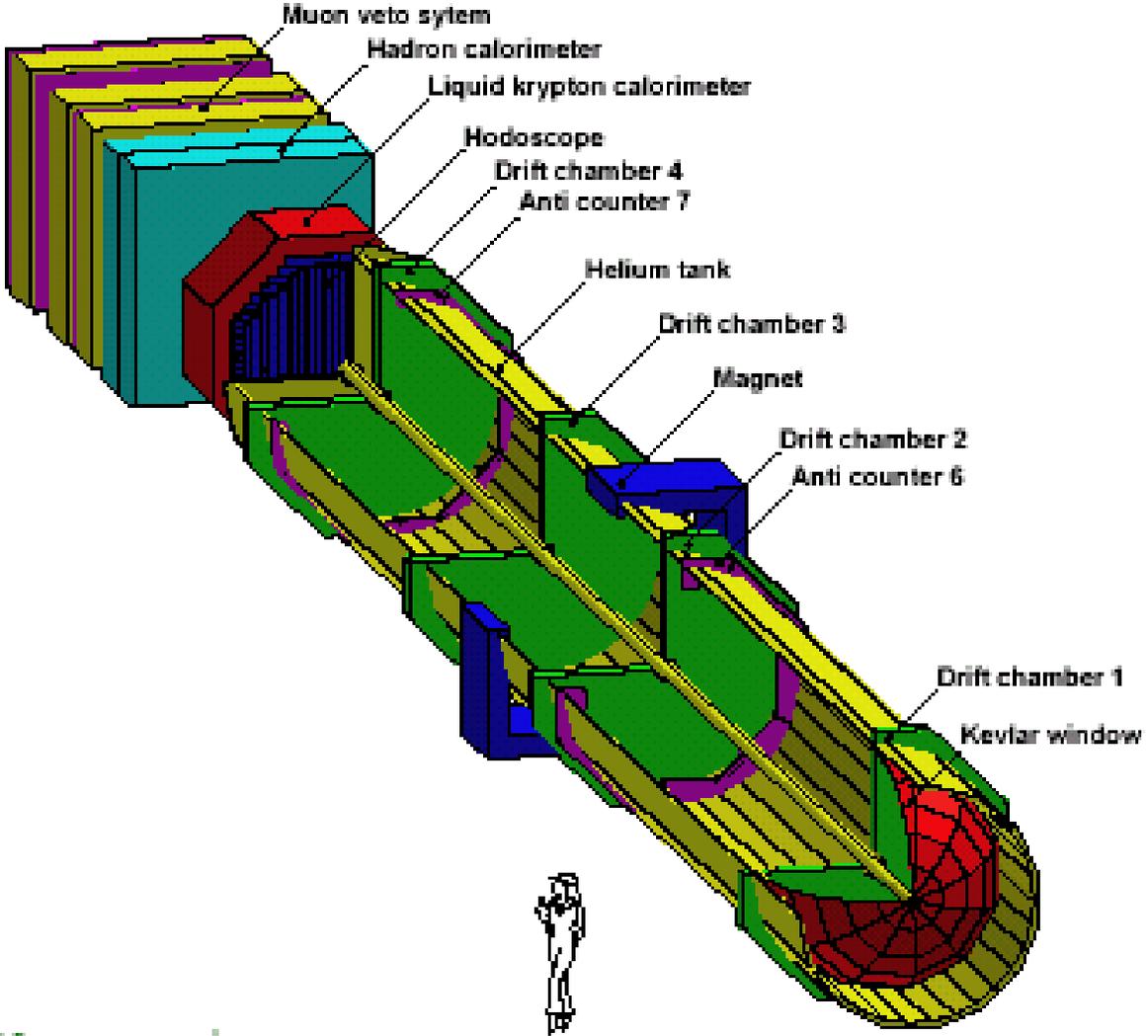


Distribuzione energia dei kaoni ricostruiti nei 4 possibili modi

Reconstructed events per mode (thousands per 5 GeV)

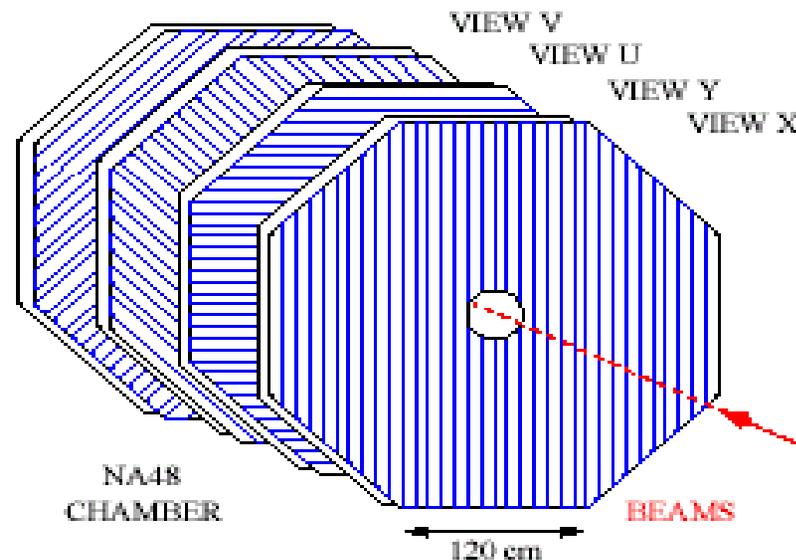


Rivelatore di NA48



Elementi del rivelatore:

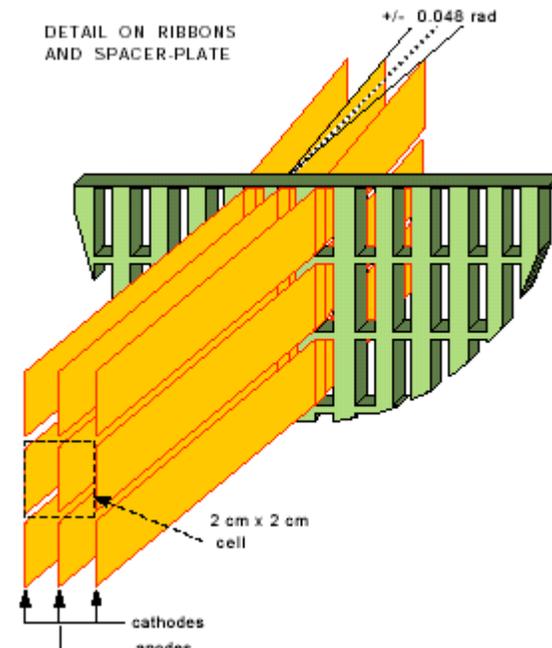
1. spettrometro (misura di energia e direzione dei carichi):
 - due camere ciascuna composta da 8 piani (ridondanza) prima del magnete: misurano le direzioni
 - magnete da ~ 1.5 Tesla
 - altre due camere dopo il magnete per la misura della curvatura e quindi del momento



Elementi del rivelatore (continua) :

2. calorimetro elettromagnetico a Krypton liquido

- raccolta della carica sviluppata dalla ionizzazione (guadagno = 1)
- ~13000 celle $2 \times 2 \text{ cm}^2$
- ~10 m^3 di Krypton liquido





3. Calorimetro adronico: misura supplementare dell'energia delle particelle cariche
4. Veto per muoni
5. Anelli di scintillatori disposti lungo il tubo per il veto di fotoni

Elementi molto importanti dell'esperimento, ma che non verranno introdotti perché ci porterebbero troppo lontano, sono:

- **trigger: logica per decidere se un evento è da registrare**
- **lettura del rivelatore**

Si registravano circa 50000 trigger per ogni burst (2.4 sec) per un totale di circa 1 GByte

Analisi per la misura di $\text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon)$

1. Selezione dei decadimenti $\pi^+\pi^-$ e $\pi^0\pi^0$

2. Separazione e assegnazione dei decadimenti a K_L oppure K_S

3. Pesatura dei K_L di modo che la distribuzione dei decadimenti sia *simile* a quella dei K_S

4. Stima e sottrazione dei fondi dovuti a decadimenti di K_L in

- $\pi \mu \nu$ (veto di muoni per liberarsi dal fondo)

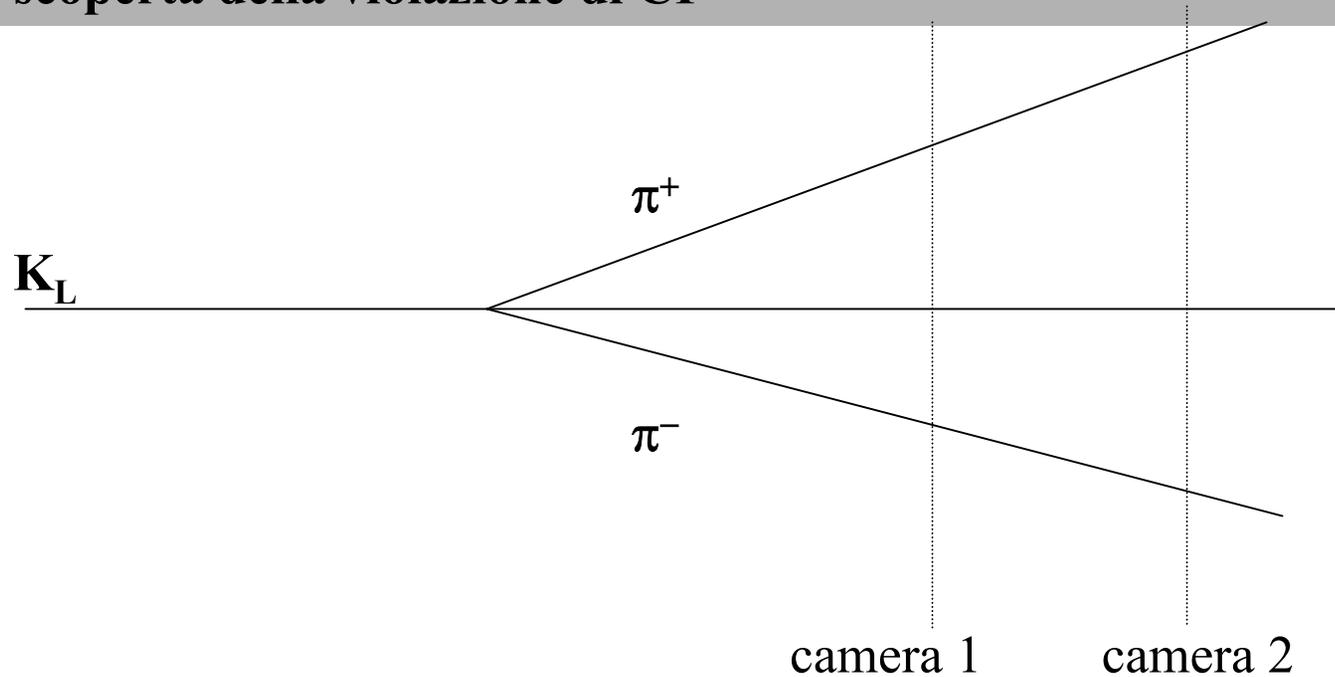
- $\pi e \nu$ (calorimetro elettromagnetico per riconoscere e rigettare eventi con elettroni)

- $\pi^0 \pi^0 \pi^0$

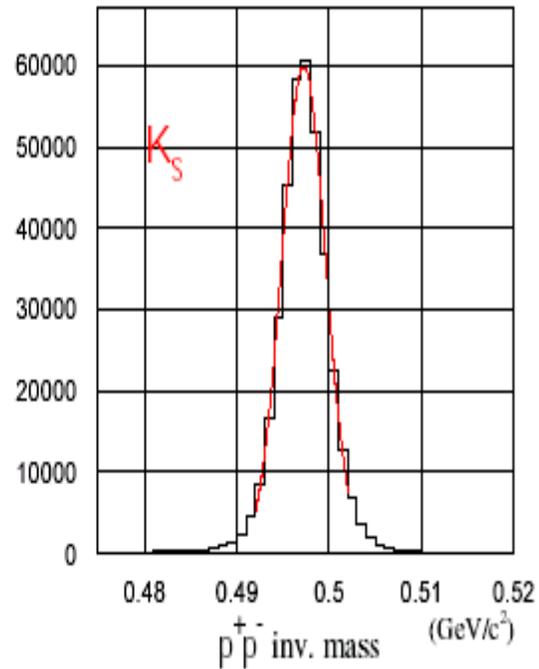
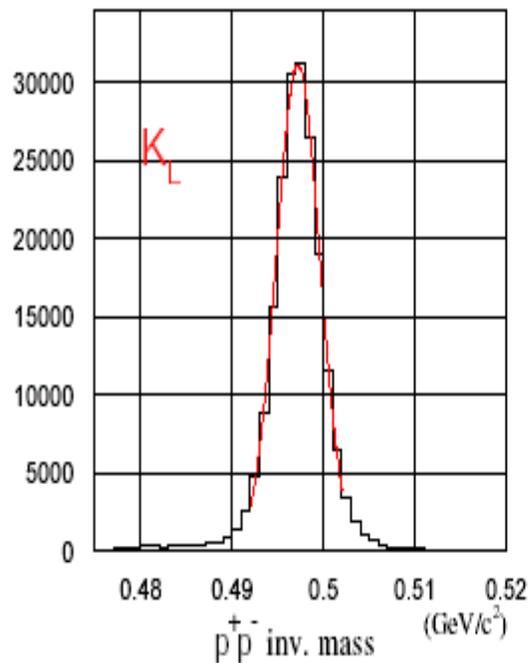
5. Si applica ad R la correzione dovuta alla geometria: pur con fasci e decadimenti molto simili sopravvive una piccola differenza fra K_L e K_S

6. Calcolo di R in bin di energia e se ne fa la media

Selezione eventi carichi: molto simile a quella fatta nel 1964 per la scoperta della violazione di CP



calcolo della massa invariante delle due particelle



$$\frac{\sigma(P)}{P} = 0.48 \% \oplus 0.009 P[\text{GeV}/c^2] \%$$

scattering multiplo

risoluzione del punto

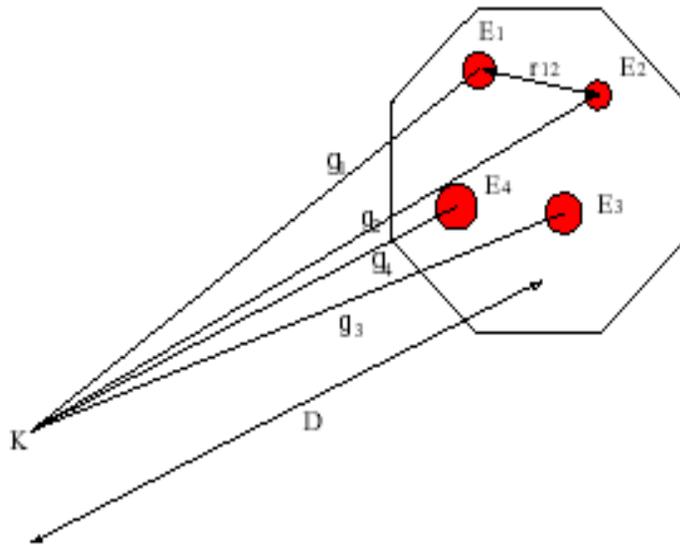
~ 100 μm

Selezione eventi neutri: $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$

$\gamma\gamma$ $\gamma\gamma$

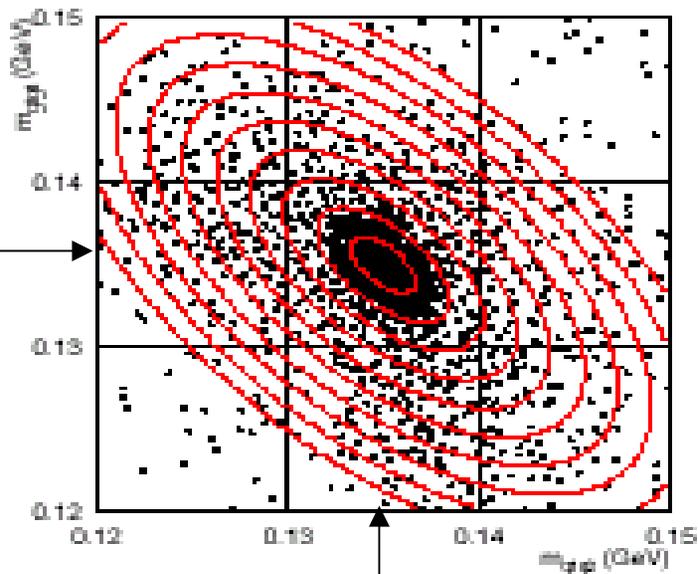
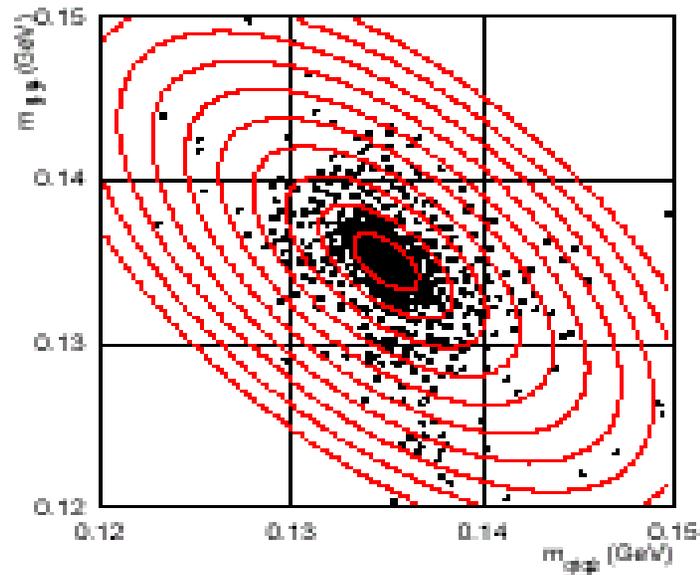
K_L

LKR



calorimetro elettromagnetico

$$D = \sqrt{\sum E_i E_j \times r_{ij}^2} / M_K \quad m_{ij} = \sqrt{E_i E_j r_{ij}^2} / D$$

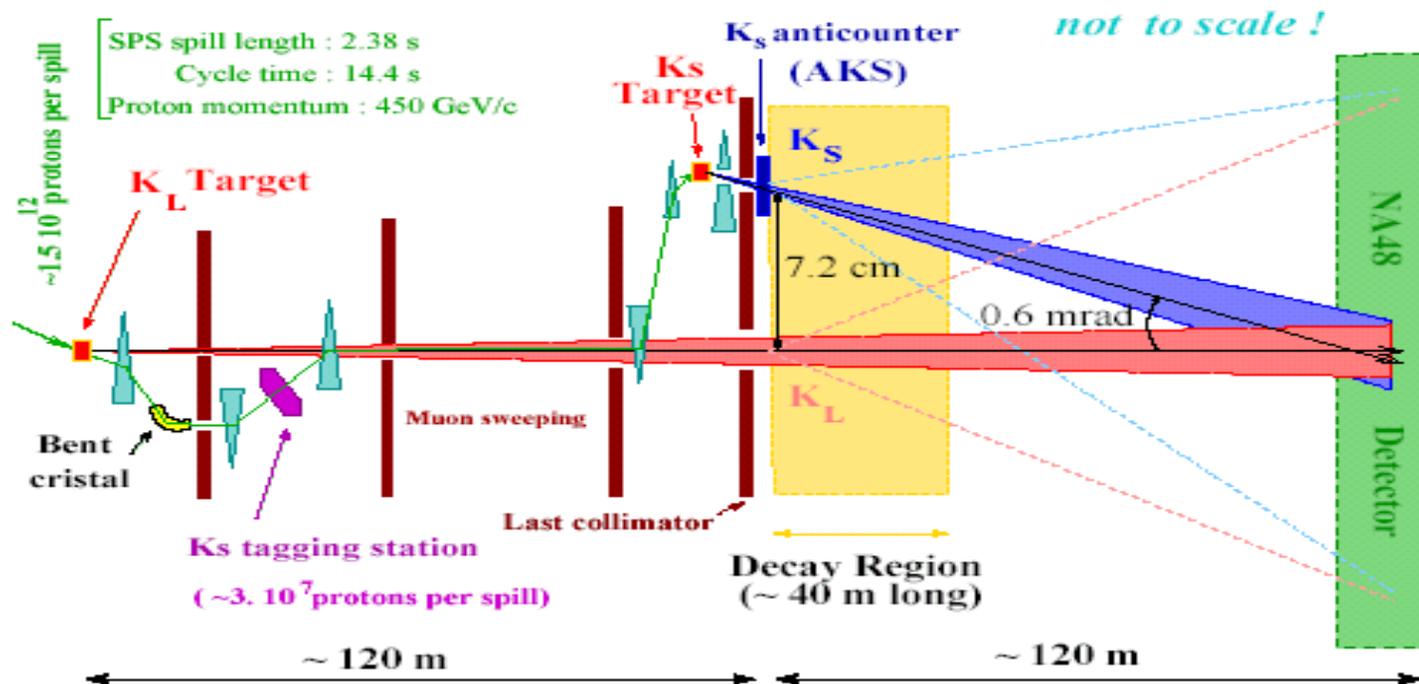
K_L  K_S 

$$R_{ell} \equiv \frac{1}{9} \left\{ \left(\frac{\frac{m_1 + m_2}{2} - m_{\pi 0}}{\sigma \frac{m_1 + m_2}{2}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{m_1 - m_2}{2}}{\sigma \frac{m_1 - m_2}{2}} \right)^2 \right\}$$

Separazione $K_S - K_L$

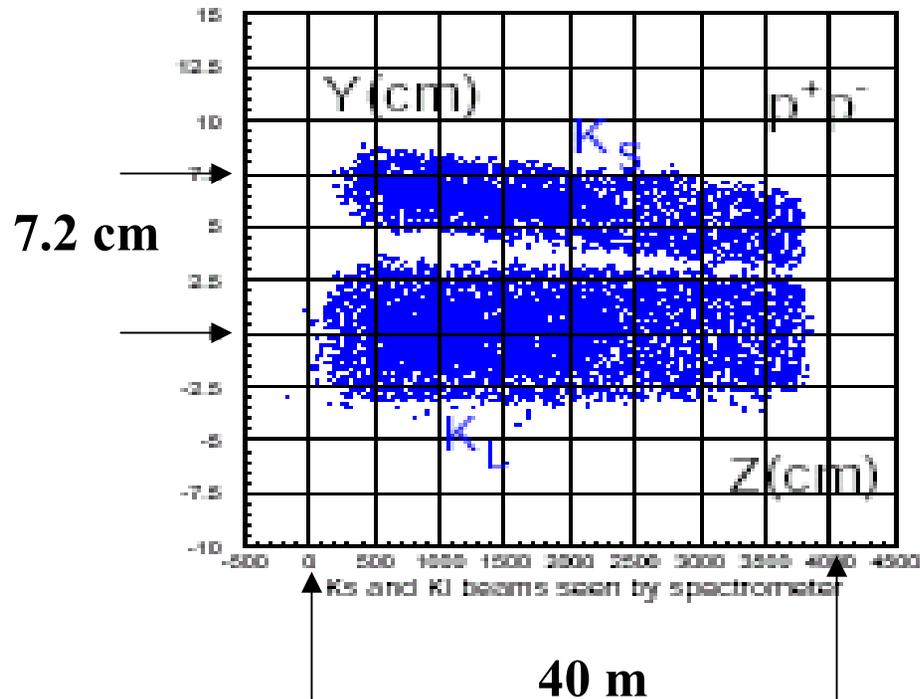
I due fasci sono separati soltanto di ~ 7.2 cm lungo la direzione verticale

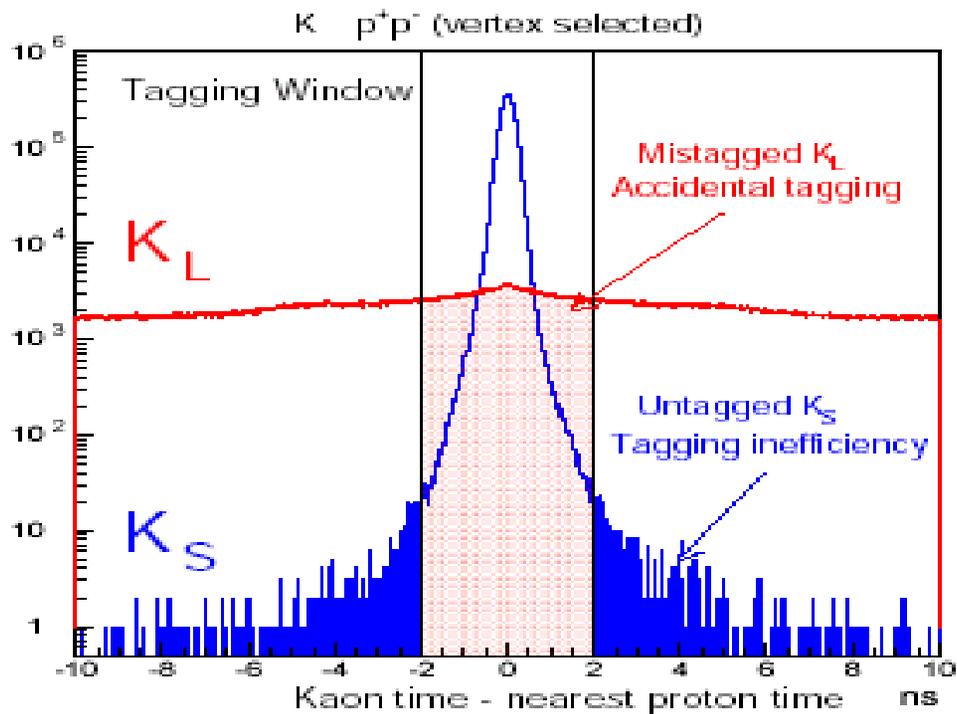
- i carichi possono essere separati sulla base della posizione del vertice: risoluzione di qualche mm
- i neutri non possono essere separati sulla base della ricostruzione



Ricostruzione del vertice carico:

vertice di due tracce *sghembe* definito come punto medio del segmento di minima distanza delle tracce.





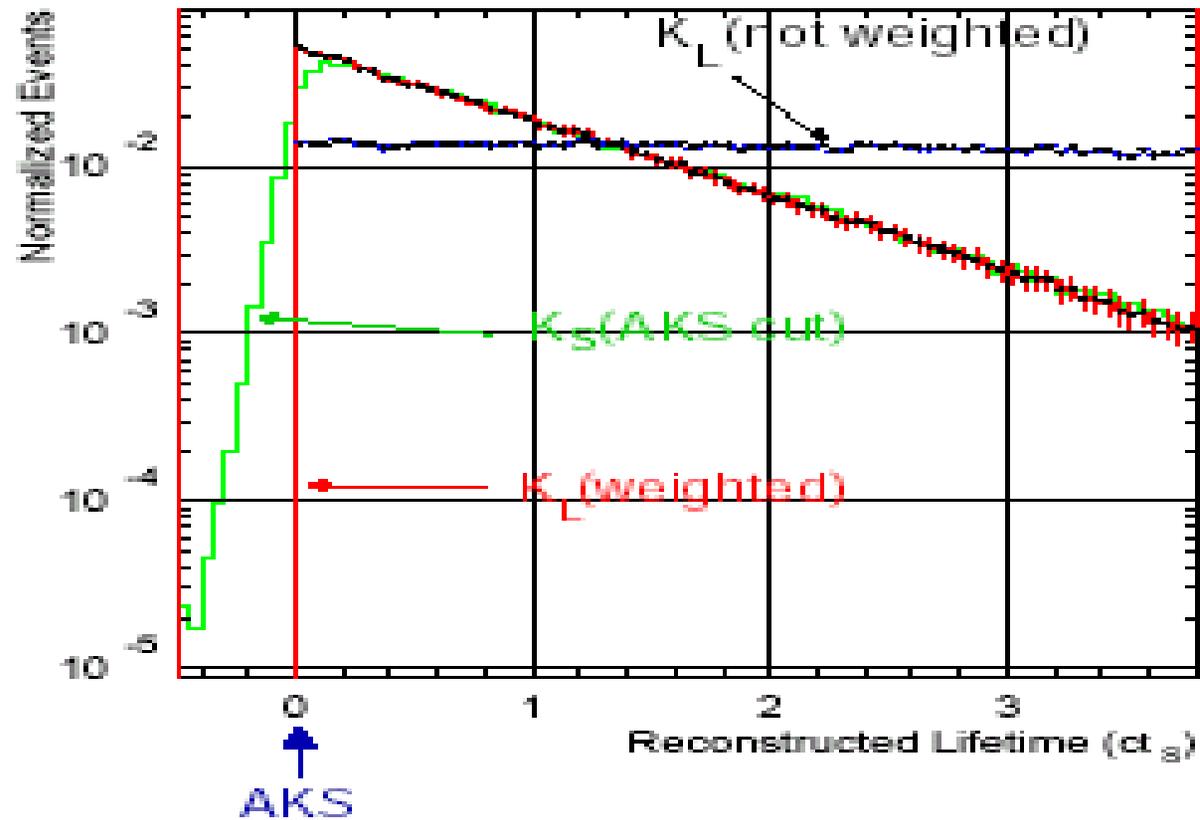
Distribuzione della differenza fra il tempo dell'evento e il tempo piu' vicino di un protone: $\Delta t = t_K - t_p$

Definiti come K_S tutti gli decadimenti per i quali $|\Delta t| < 2$ ns

Circa il 10% sono in realta' K_L per i quali casualmente c'era un protone nel rivelatore del fascio K_S (detto Tagger)

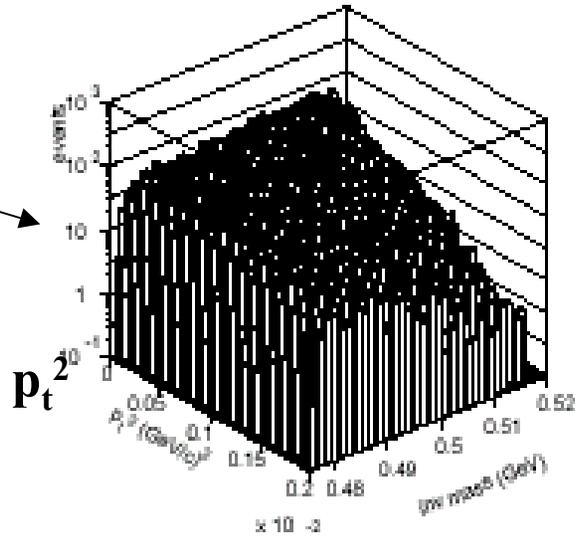
Si e' verificato che la frazione di mis-tagged K_S e' uguale sia per neutri che per carichi e quindi l'effetto si cancella

Pesatura degli eventi

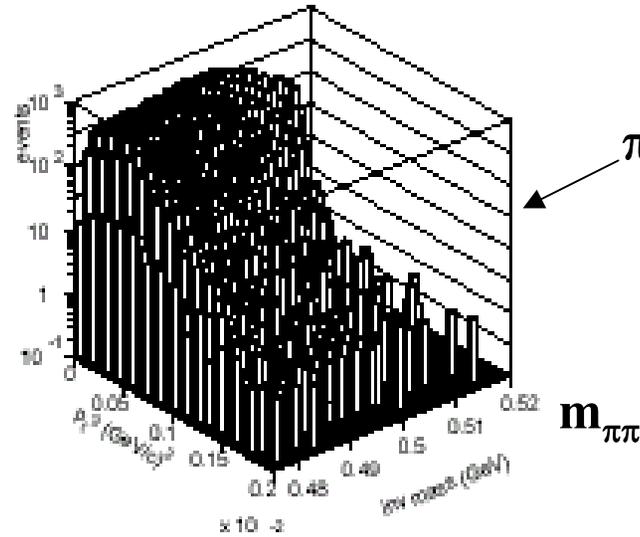


Stima dei fondi a $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$

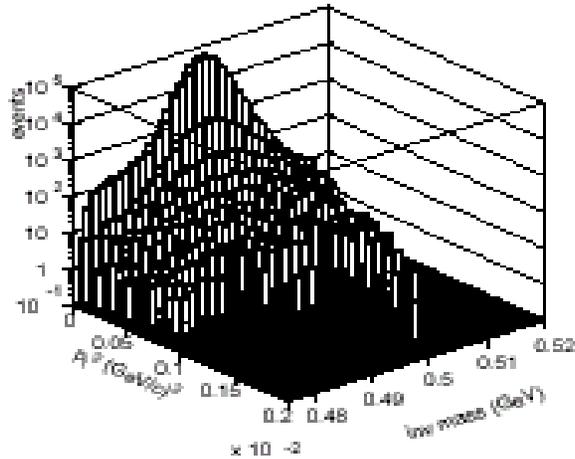
$e \pi \nu$



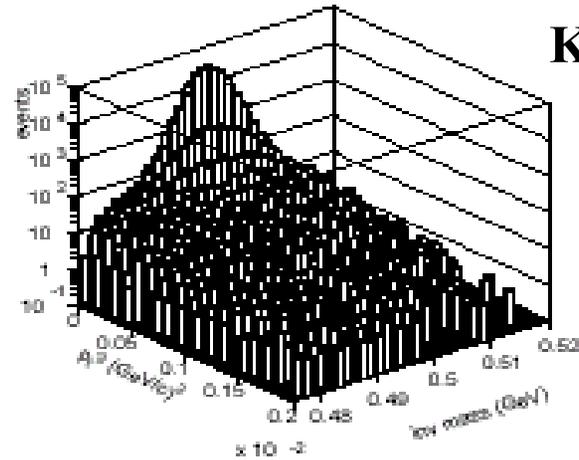
$\pi \mu \nu$



$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$

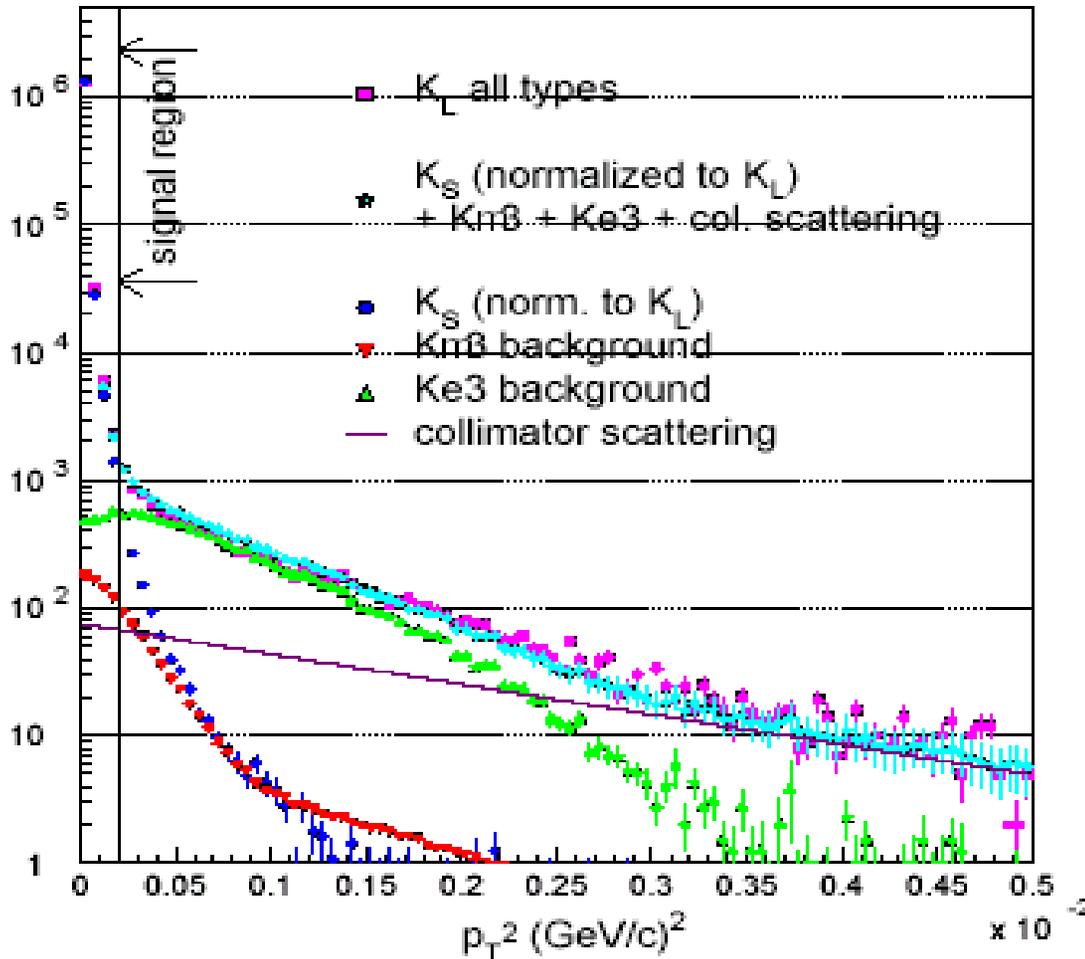


$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$



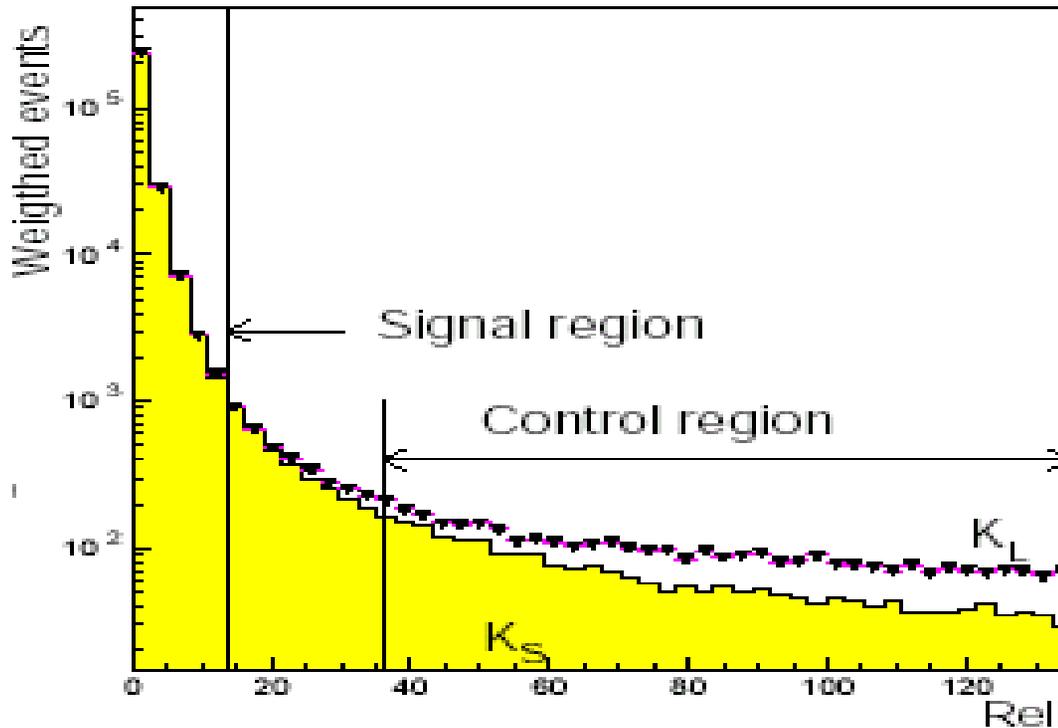
Dal fit sui bin in $(p_t^2, m_{\pi\pi})$ di :

$$K_L \rightarrow \pi\pi = \alpha(K_S \rightarrow \pi\pi) + \beta(K_L \rightarrow \pi e \nu) + \gamma(K_L \rightarrow \pi \mu \nu)$$



$$\Delta R = (+16.9 \pm 3.0) \times 10^{-4}$$

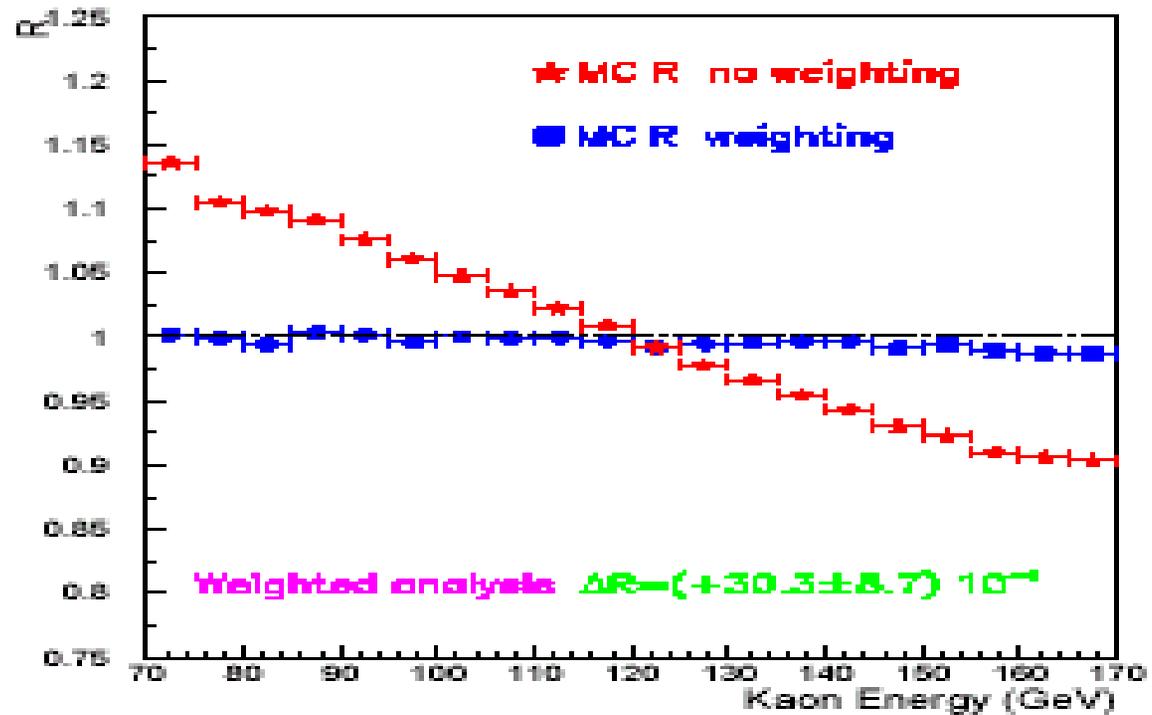
Stima del fondo dovuto a $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ ove uno dei π^0 e' fuori dall'accettazione



$$\Delta R = (-5.9 \pm 2.0) \times 10^{-4}$$

$$R_{cell} \equiv \frac{1}{9} \left\{ \left(\frac{\frac{m_1 + m_2}{2} - m_{\pi^0}}{\sigma_{\frac{m_1 + m_2}{2}}} \right)^2 + \left(\frac{\frac{m_1 - m_2}{2}}{\sigma_{\frac{m_1 - m_2}{2}}} \right)^2 \right\}$$

Correzione dovuta alla accettazione del rivelatore



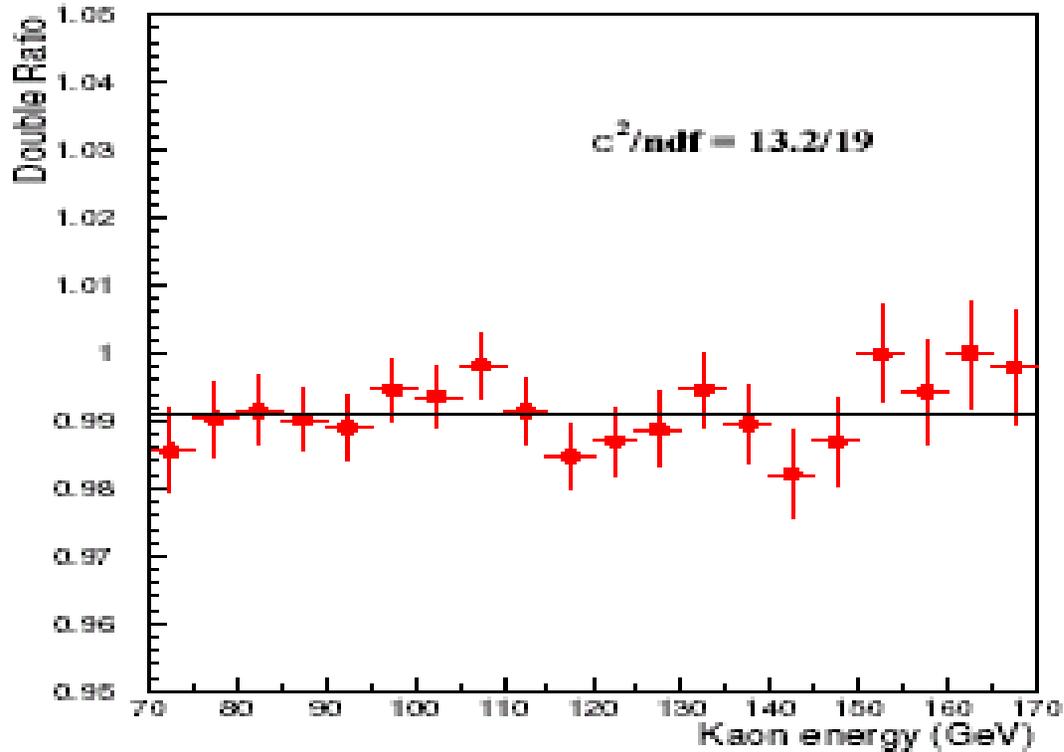
Sommario della statistica accumulata

| | 1998 | 1999 | total |
|---|-------|--------|--------|
| $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ | 1.047 | 2.243 | 3.290 |
| $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$ | 1.638 | 3.571 | 5.209 |
| $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ | 4.541 | 9.912 | 14.453 |
| $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$ | 6.910 | 15.311 | 22.221 |
| statistical error on \mathcal{R} 10^{-4} units | 18.0 | 12.2 | 10.1 |

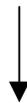
Lista correzioni a R

| | correction | uncertainty |
|-----------------------------------|------------|-------------|
| $\pi^+\pi^-$ trigger inefficiency | -3.6 | ± 5.2 |
| AKS inefficiency | +1.1 | ± 0.4 |
| Reconstruction of $\pi^0\pi^0$ | - | ± 5.8 |
| Reconstruction of $\pi^+\pi^-$ | +2.0 | ± 2.8 |
| Background to $\pi^0\pi^0$ | -5.9 | ± 2.0 |
| Background to $\pi^+\pi^-$ | +16.9 | ± 3.0 |
| Beam scattering | -9.6 | ± 2.0 |
| Accidental tagging | +8.3 | ± 3.4 |
| Tagging inefficiency | - | ± 3.0 |
| Acceptance | +26.7 | ± 4.1 |
| Acceptance systematics | | ± 4.0 |
| Accidental activity | - | ± 4.4 |
| Long term variations of K_S/K_L | - | ± 0.6 |
| Total | +35.9 | ± 12.6 |

Risultati

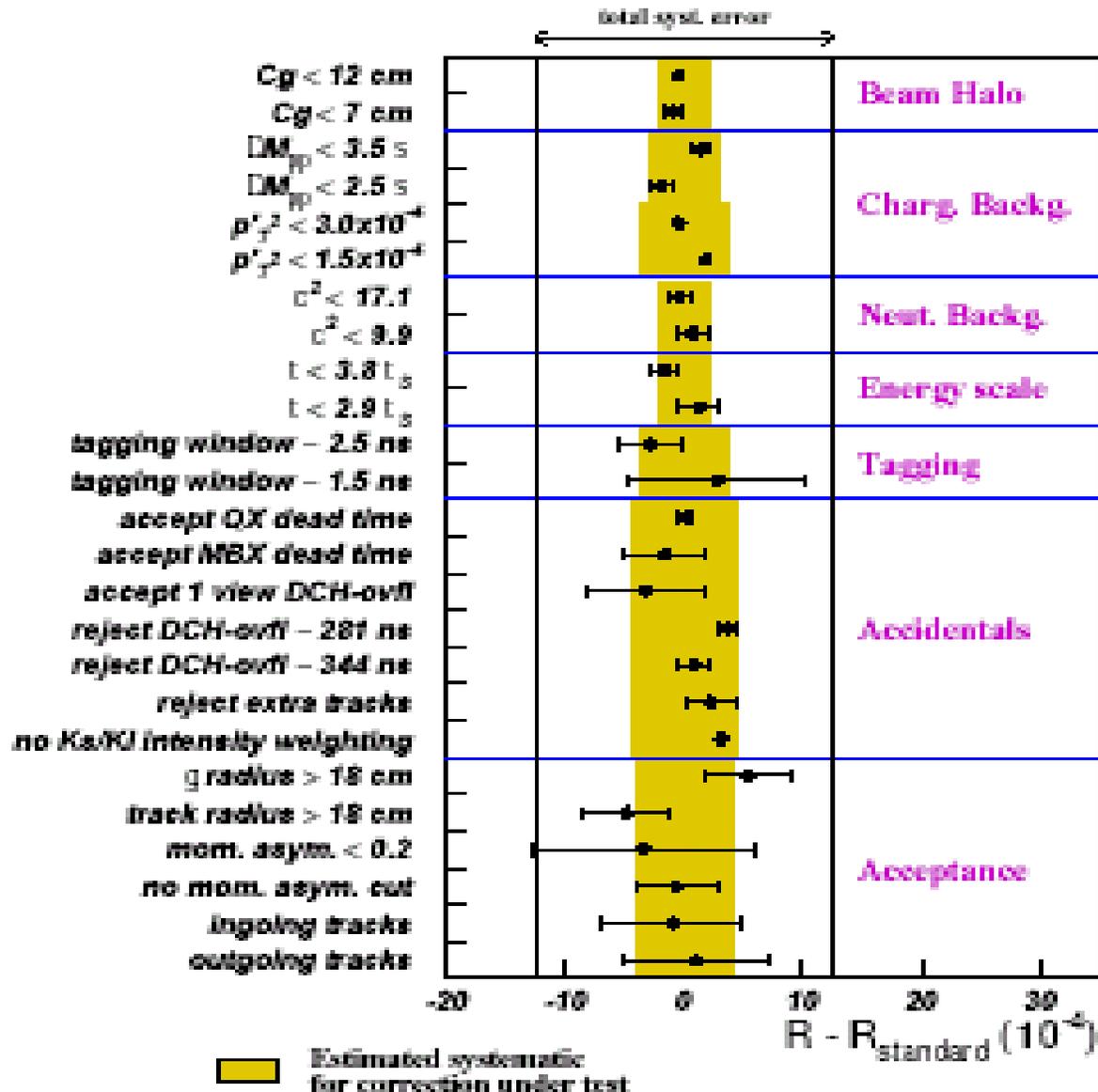


$$R = (9912 \pm 8.4 \pm 10.2) \times 10^{-4}$$



$$\text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = (+14.7 \pm 1.4 \pm 1.7) \times 10^{-4}$$

R stability against cut variations



Sommario e conclusioni

- **nel 1964 si scopri' la violazione di CP:** esperimento di Christenson, Cronin, Fitch, e Turlay che evidenzio' il decadimento del K_L in $\pi^+ \pi^-$ con 58 +/- 11 eventi

- **molti esperimenti si susseguirono per stabilire ci fosse o no una violazione diretta di CP senza poterlo stabilire con certezza**

- **nel 2001-2002 gli esperimenti NA48 (Cern) e KTeV (Fermilab – Chicago) provarono che $\text{Re}(\varepsilon'/\varepsilon)$ e' diverso da zero.**

- e' interessante notare che i risultati di NA48 e KTeV sono fra loro compatibili

NA48: $(14.7 \pm 2.2) \times 10^{-4}$

KTeV : $(20.7 \pm 2.8) \times 10^{-4}$

pur seguendo due strade apparentemente simili, ma nei dettagli molto diverse.

Questo fa sperare che il risultato sia corretto.