

La fisica dei mesoni K neutri

Un esempio di esperimento: KLOE

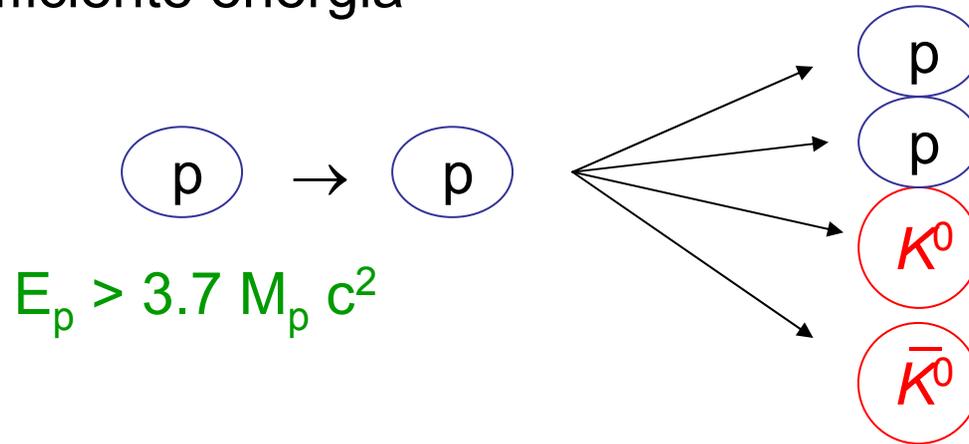
Fabio Bossi

Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN

(fabio.bossi@Inf.infn.it)

I mesoni K neutri

I mesoni K^0 (\bar{K}^0) sono prodotti da interazioni forti di sufficiente energia



Il loro contenuto in quark e':

$$K^0 \equiv (d, \bar{s})$$

$$\bar{K}^0 \equiv (\bar{d}, s)$$

La loro massa e' $497.6 \text{ MeV}/c^2$ ovvero $\sim M_p / 2$

Nel processo precedentemente mostrato si osserva che i due mesoni K^0 e \bar{K}^0 sono prodotti in coppia

Questo perché i mediatori delle interazioni forti (*i gluoni*) si accoppiano sempre a una coppia quark-antiquark dello stesso sapore

Per questo stesso motivo le interazioni forti non possono causarne il decadimento

Storicamente, è interessante notare come sia stata proprio l'osservazione di questi fenomeni a motivare l'introduzione del concetto di "sapore" o "flavour" come quantità conservata nelle interazioni forti

Le interazioni deboli provocano due fenomeni importanti e distinti sui mesoni K :

A) Le oscillazioni $K^0 - \bar{K}^0$: ciascun mesone si trasforma nella sua antiparticella e viceversa con una frequenza di 5 miliardi di volte al secondo



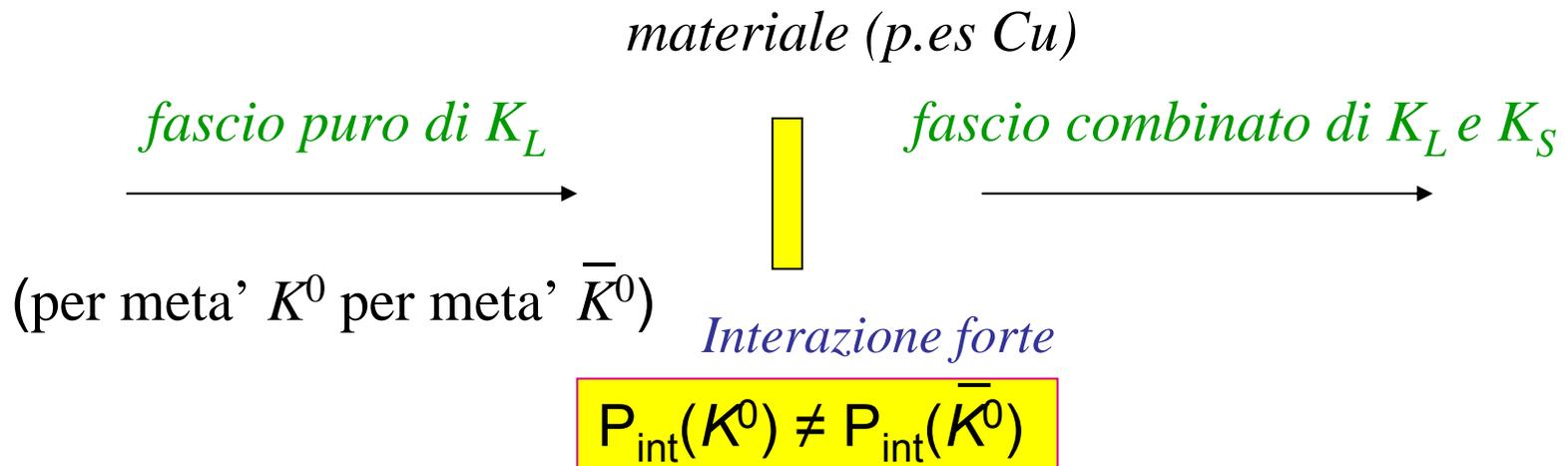
B) Il decadimento dei mesoni K principalmente in 2 pioni, oppure 3 pioni, oppure un pione un elettrone (o muone) e un neutrino

Si distinguono due separate componenti nel decadimento: una a vita media lunga (K_L) ed una a vita media breve (K_S)

In altre parole dal punto di vista dei decadimenti deboli, non contano gli stati K^0 o \bar{K}^0 ma quelli K_L e K_S che si distinguono per la differente vita media

Un mesone K neutro *nasce* (per interazione forte) solo come un K^0 o un \bar{K}^0 ma *vive* e *muore* come K_L o K_S , cioè come un “mescolamento” dei due

Questo gioco tra interazione forte e debole provoca lo strano fenomeno della “rigenerazione”



Per ragioni di simmetria i K_S decadono prevalentemente in 2π mentre i K_L decadono in 3 particelle ($\pi e\nu$, $\pi\mu\nu$, 3π).

Tuttavia una piccola frazione di K_L (~ 3 su mille) decade in 2π ed una ancor piu' piccola frazione di K_S (~ 2 su 10^9 !!) e' prevista decadere in $3\pi^0$

Questo fenomeno, chiamato “violazione della simmetria CP” e' di grande importanza per la descrizione delle interazioni deboli e per la comprensione della cosmogenesi (asimmetria materia–antimateria) e rappresenta l'oggetto principale di studio per la la maggior parte degli esperimenti dedicati alla fisica dei mesoni K

Come si producono fasci di K neutri?

Generalmente il metodo piu' utilizzato e' quello di sfruttare urti protone-protone e selezionare i prodotti di decadimento con opportune linee di trasporto



Particelle cariche deflesse da campi magnetici

A grandi distanze dal bersaglio sopravvive (quasi) esclusivamente la componente di K_L

Legge di decadimento esponenziale

n. di particelle
decadute entro L

fattore di Lorentz = $\gamma = P/m$

$$N = N_0 \left(1 - e^{-L/c \beta \gamma \tau} \right)$$

n. di particelle
prodotte a L=0.

velocita' della
luce nel vuoto

vita media delle
particelle

un po' di numeri:

$$K_S : \text{vita media } \tau_S : 0.89 \times 10^{-10} \text{ s}$$

$$K_L : \text{vita media } \tau_L : 5.2 \times 10^{-8} \text{ s}$$

$$m_K = 497.6 \text{ MeV}/c^2$$

$$e = 2.7183\dots$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Per esempio al **SPS** del CERN di Ginevra 2×10^{11} protoni collidono sul bersaglio ogni secondo producendo circa 10^5 K neutri di $\langle P \rangle \sim 70$ GeV/c

$$K_S : \beta\gamma c\tau \sim 3.7 \text{ m}$$

$$K_L : \beta\gamma c\tau \sim 2180 \text{ m}$$

Dopo ~ 100 m praticamente tutti i K_S sono decaduti mentre praticamente tutti i K_L sopravvivono

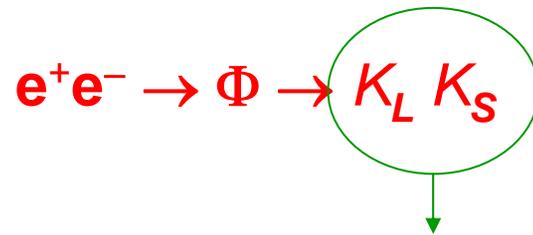
$$K_S : \longrightarrow e^{-L/c\beta\gamma\tau} \sim 10^{-12}$$

$$K_L : \longrightarrow e^{-L/c\beta\gamma\tau} \sim 0.96$$

Per la stessa ragione, tuttavia, in una ragionevole zona atta a studiare il decadimento dei K_L (qualche decina di metri) solo una piccola frazione dei K_L effettivamente decadono ($\sim 1\%$).
Tutti gli altri sono persi!



Il modo di produzione di fasci di K neutri utilizzato a DAΦNE e' invece tramite la reazione



Per ragioni di meccanica quantistica (che non spiego) lo stato finale e' forzato ad essere uno stato con presenza di un K_L ed un K_S . Questo consente di marcare a priori la presenza di un K_L (K_S) osservando il decadimento o l'interazione del suo partner, di nuovo sfruttando la differenza tra le due vite medie (*tagging*)

DAΦNE : $P_K = 110$ MeV/c

K_S : $\beta\gamma c\tau = 0.5$ cm

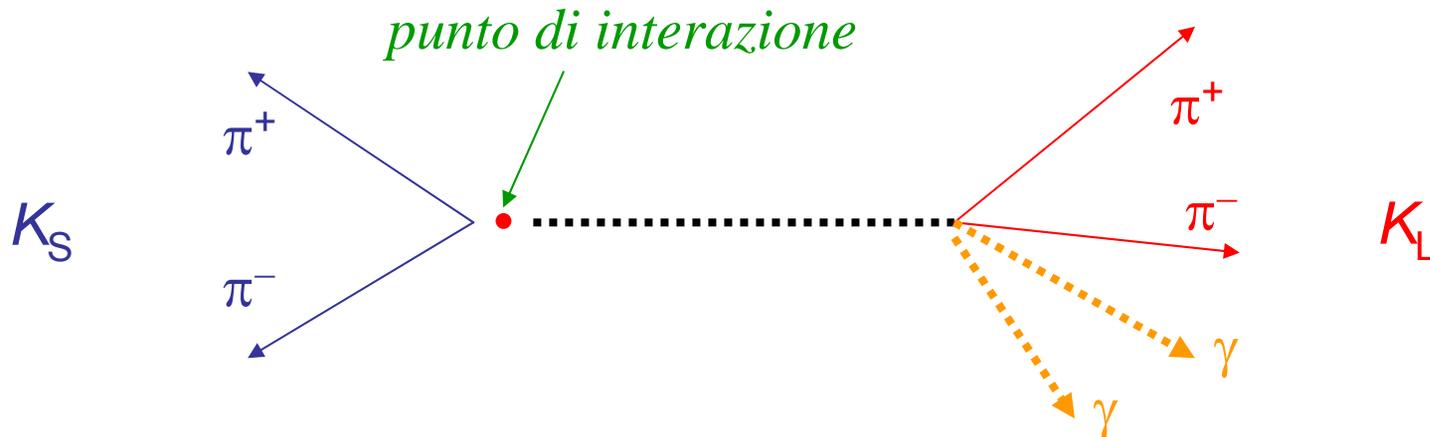
100% decaduti entro pochi cm

K_L : $\beta\gamma c\tau = 3.5$ m

5% decaduti a $L = 20$ cm

45% decaduti a $L = 200$ cm

70% decaduti a $L = 400$ cm



Una Φ -factory ha dunque il vantaggio, rispetto ad un acceleratore a protoni su bersaglio, di produrre fasci puri e “taggati” di K_L e K_S di energia ben nota

Tuttavia i **flussi** (soprattutto di K_L) sono **inferiori** rispetto alle macchine adroniche

Alla luminosita' tipica di **DAΦNE** di $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ si producono **100** coppie $K_L - K_S$ al secondo

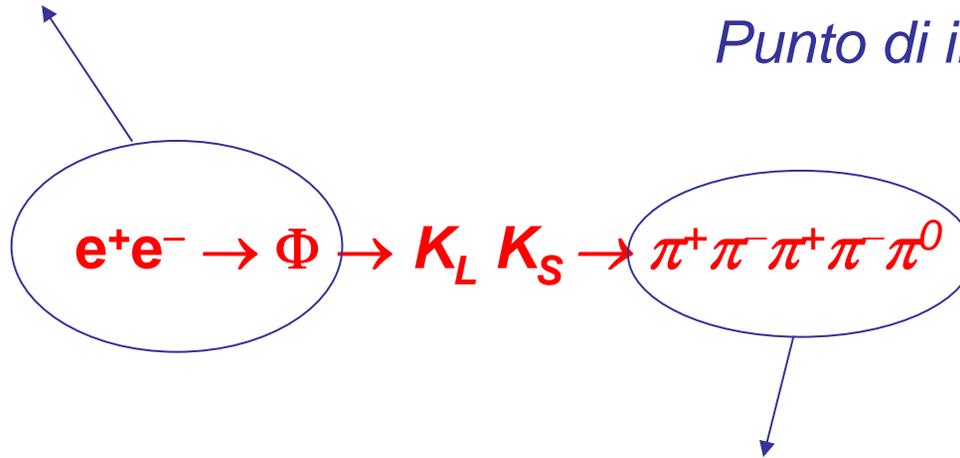
E' dunque importante cercare di massimizzare l'accettanza del rivelatore, cioe' la frazione di decadimenti che esso riesce ad osservare

Acceleratore: produzione evento

Parametri cinematici noti:

Energia della reazione

Punto di interazione



Rivelatore: osservazione prodotti di decadimento

Parametri cinematici misurati:

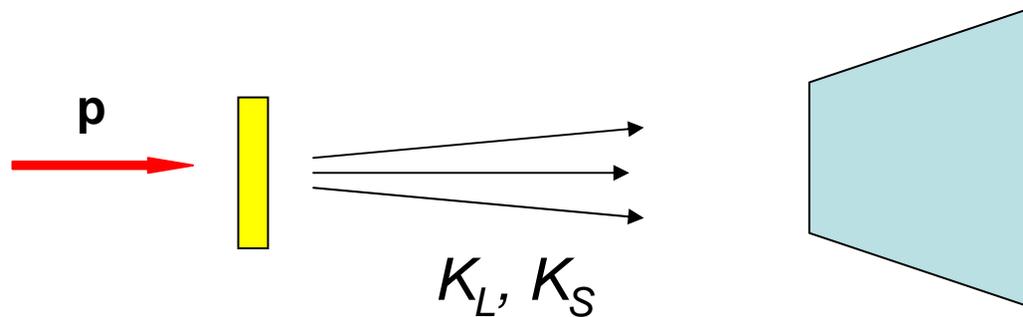
Energie delle particelle

Punti di produzione/decadimento

Ricercatore: analizza i dati del rivelatore e tenta di ricostruire l'evento per estrarne informazioni sulla fisica che lo governa

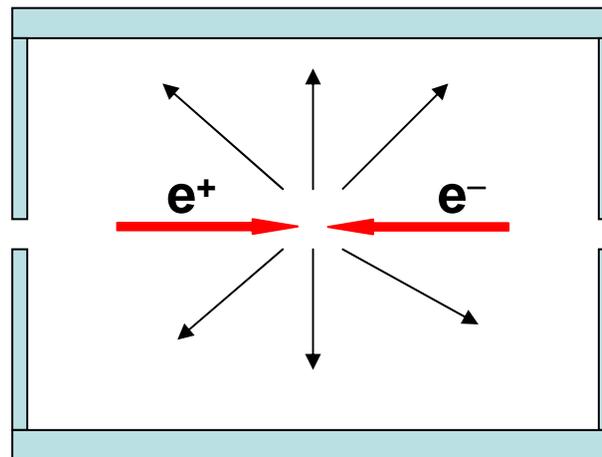
Bersaglio fisso:

Prodotti collimati in avanti \rightarrow rivelatore a piccolo angolo



Collisore:

Prodotti in tutto lo spazio \rightarrow rivelatore a “ 4π ”



Molti fattori determinano le dimensioni del rivelatore:

1) Numero dei campionamenti aumenta
la precisione delle misure



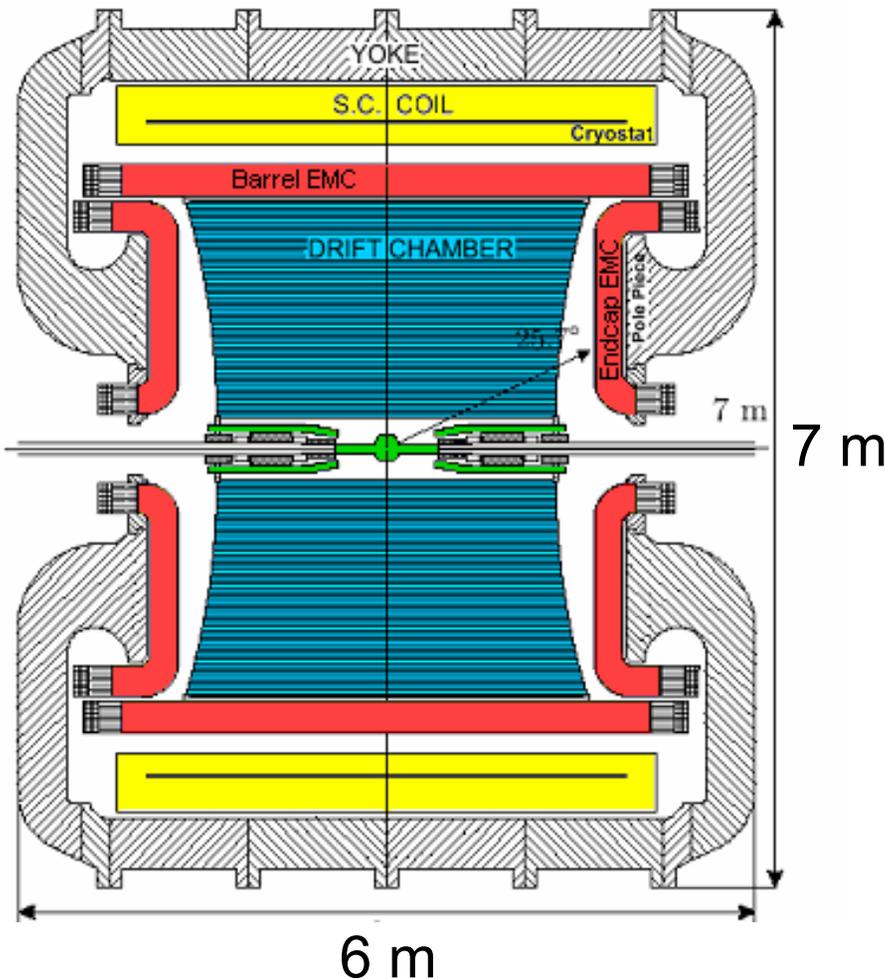
2) Praticita' di costruzione/movimentazione
minimizzazione dei costi



3) Energie in gioco; p. es: contenimento
sciame e.m. $\sim \log(E)$

4) Natura, collimazione, vita media dei
fasci utilizzati

Nel caso di **KLOE** le dimensioni sono state determinate dalla richiesta di massimizzare il numero di decadimenti del K_L osservabili, tenendo sotto controllo i costi e gli ingombri



Poiche' si devono rivelare sia particelle cariche che neutre occorre utilizzare una camera tracciante ed un calorimetro

La misura dell'impulso dei carichi si ottiene tramite l'uso di un campo magnetico generato da una bobina superconduttrice

Il calorimetro elettromagnetico e' costituito da moduli di *fibre scintillanti* inserite in piombo

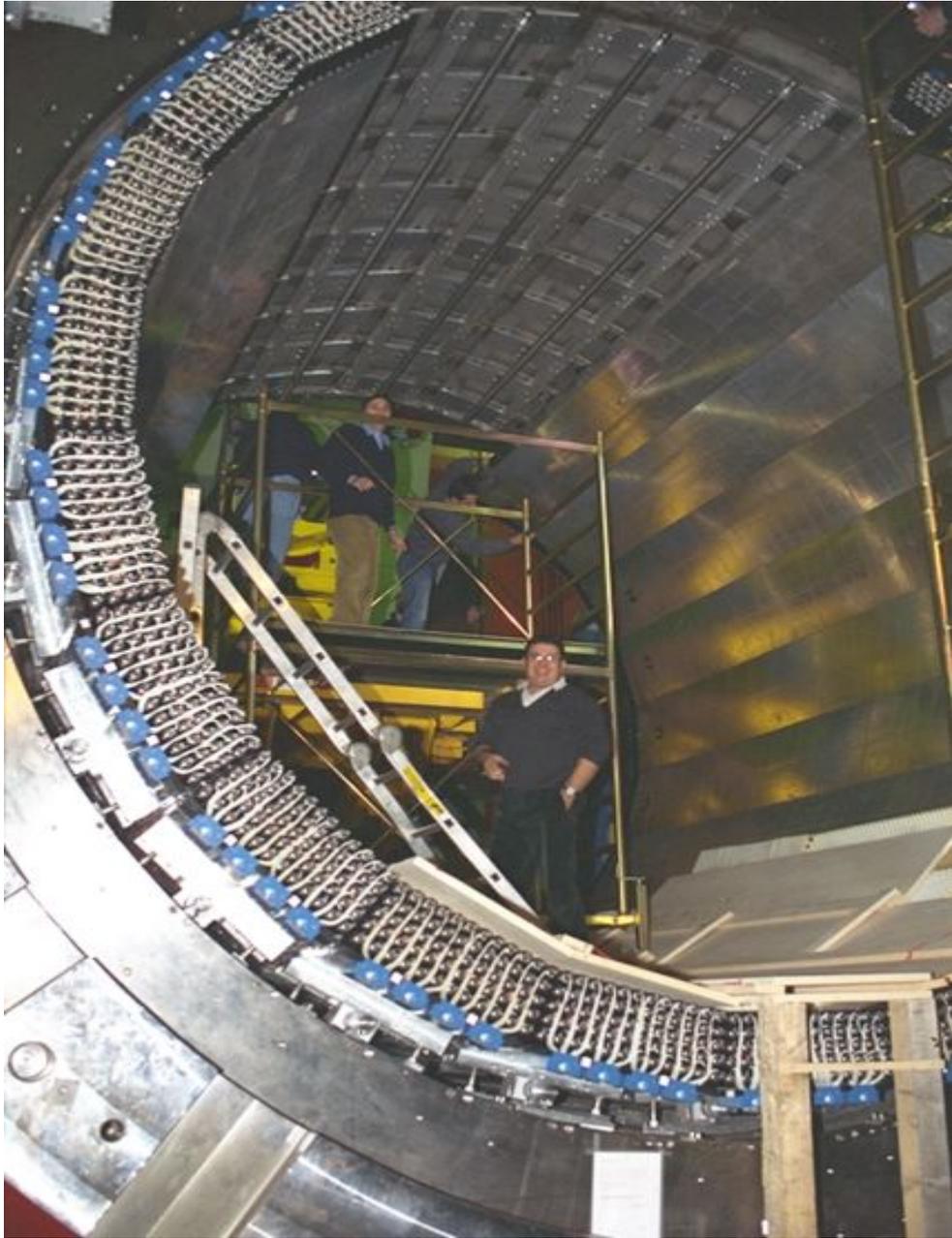
I principali vantaggi di questa tecnica sono:

- A) Grande velocita' di risposta (~ 20 ns)
- B) Grande precisione nella misura dei tempi di impatto delle particelle (~ 100 ps)
- C) Possibilita' di lavorare i moduli nelle forme preferite: grande ermeticita'

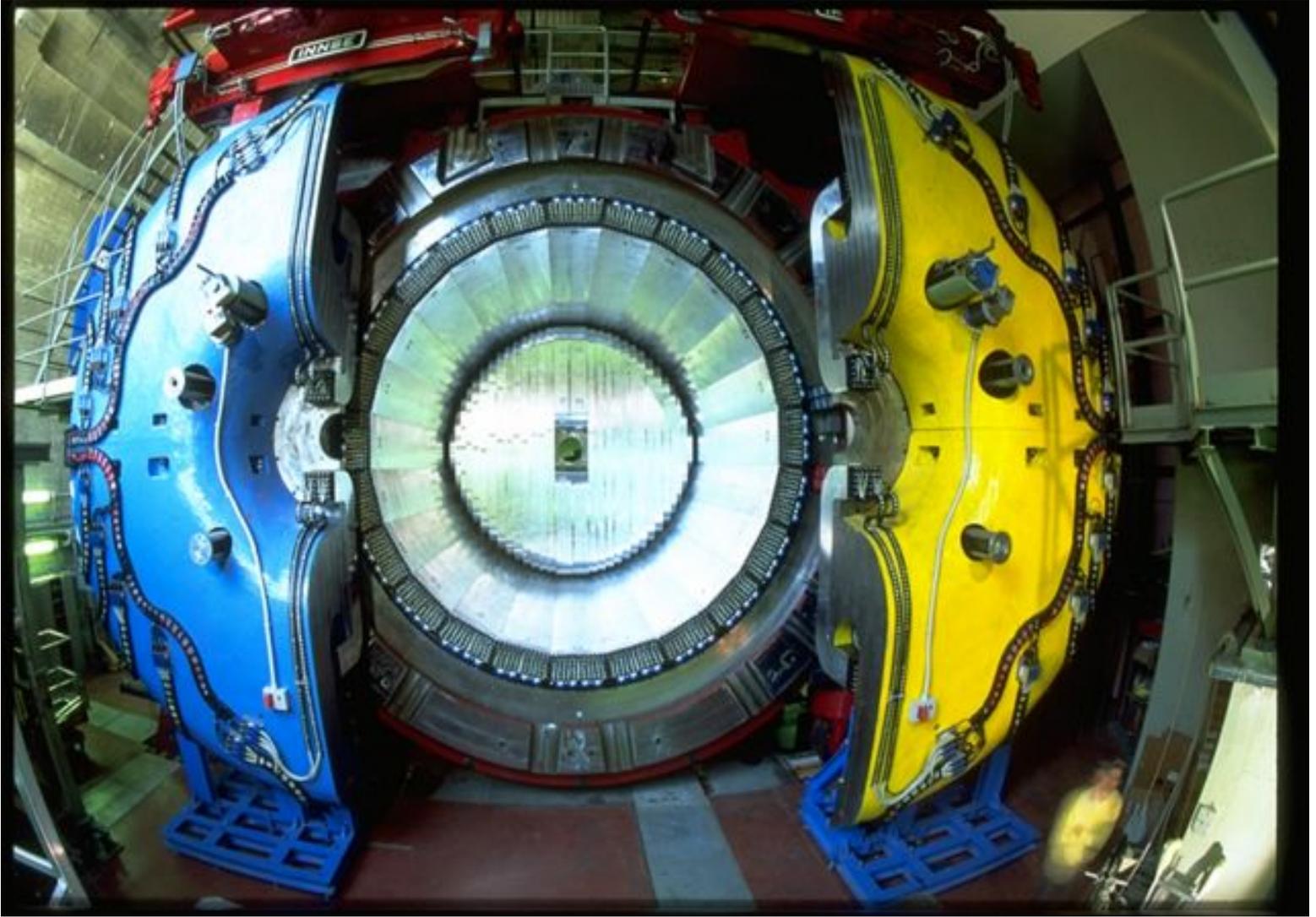
Piccoli svantaggi di questa tecnica sono:

- A) Risoluzione energetica non eccezionale (5% a 1 GeV)
- B) Delicatezza di operazioni in campo magnetico





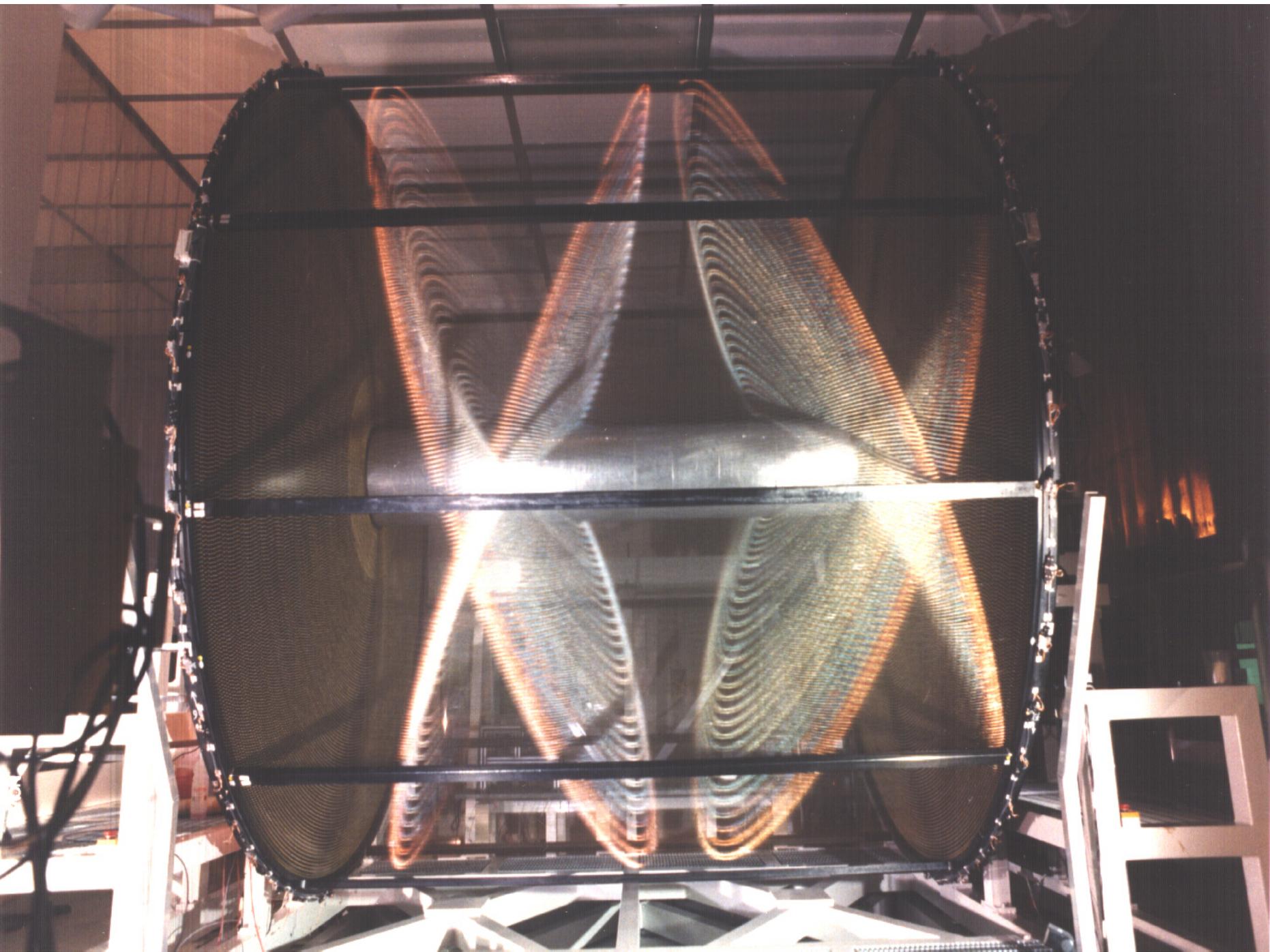


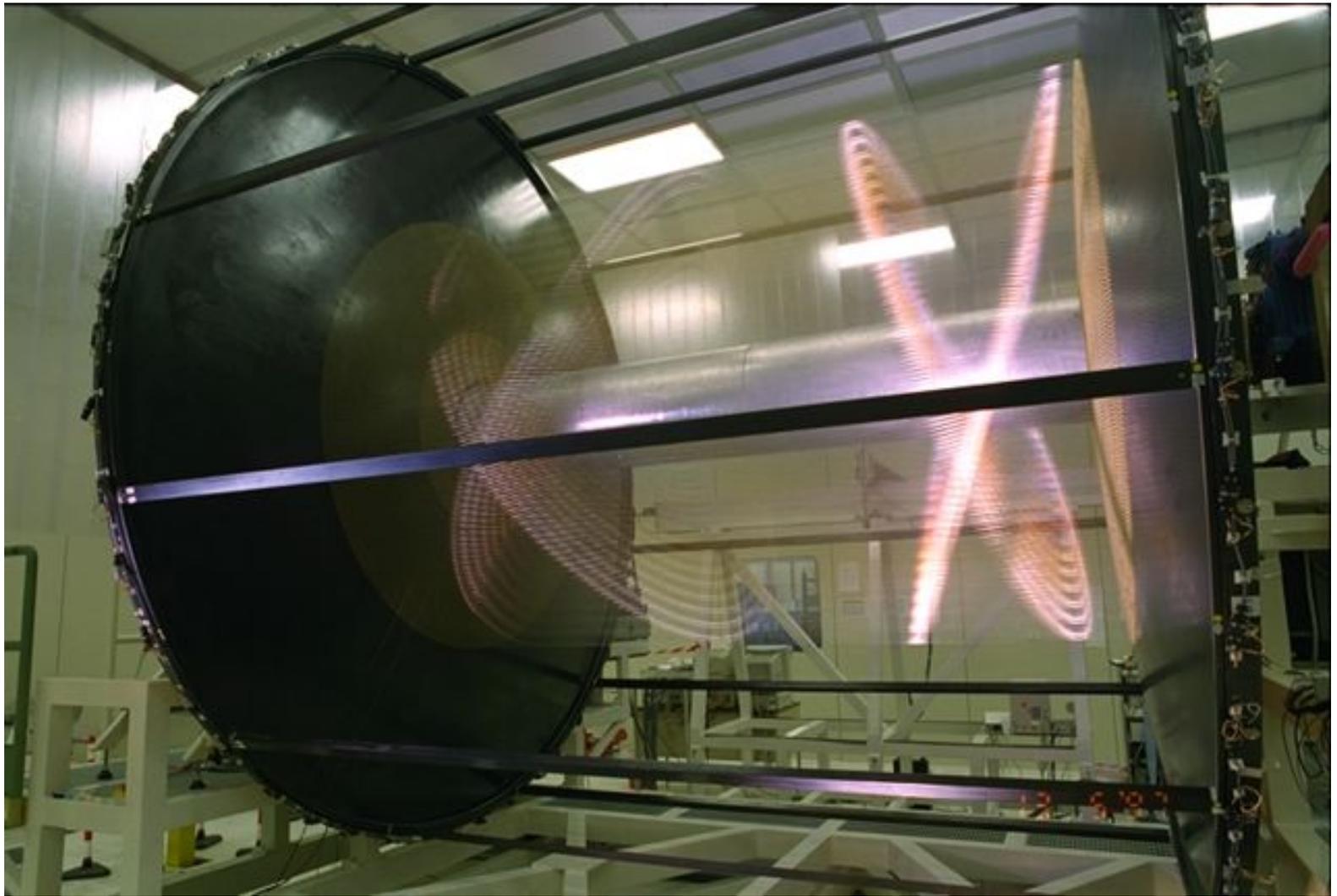


La *camera a deriva* consta di > 50000 fili di cui ~ 12000 sono quelli “di senso”

La struttura meccanica e' in *fibra di carbonio*, per massimizzarne la trasparenza per i fotoni

E' la piu' grande camera a deriva mai realizzata: un fiore all'occhiello del nostro laboratorio!







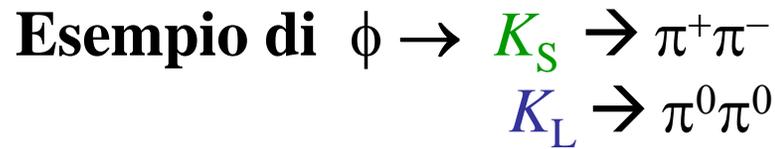


Oxford Instruments (UK) Ltd

Supplier for any instrumentation
needed by the experiment of

KLOE

The world's largest continuously produced
superconducting magnet from Oxford
Instruments in Oxford, England or in Italy, Germany, Italy.

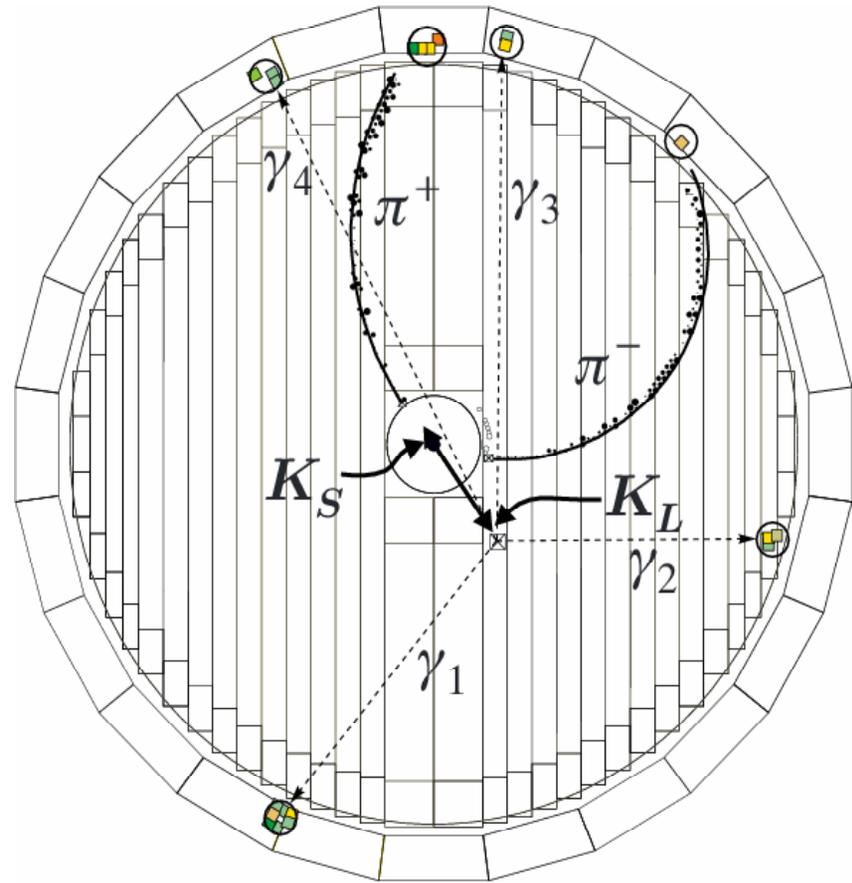


Cosa si osserva:

2 tracce di opposta curvatura nella camera a deriva

2 depositi di energia nel calorimetro connessi alle tracce

4 depositi di energia nel calorimetro non connessi ad alcuna traccia



Esempio di $\phi \rightarrow K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$
 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$

Cosa si misura:

Gli impulsi delle due tracce

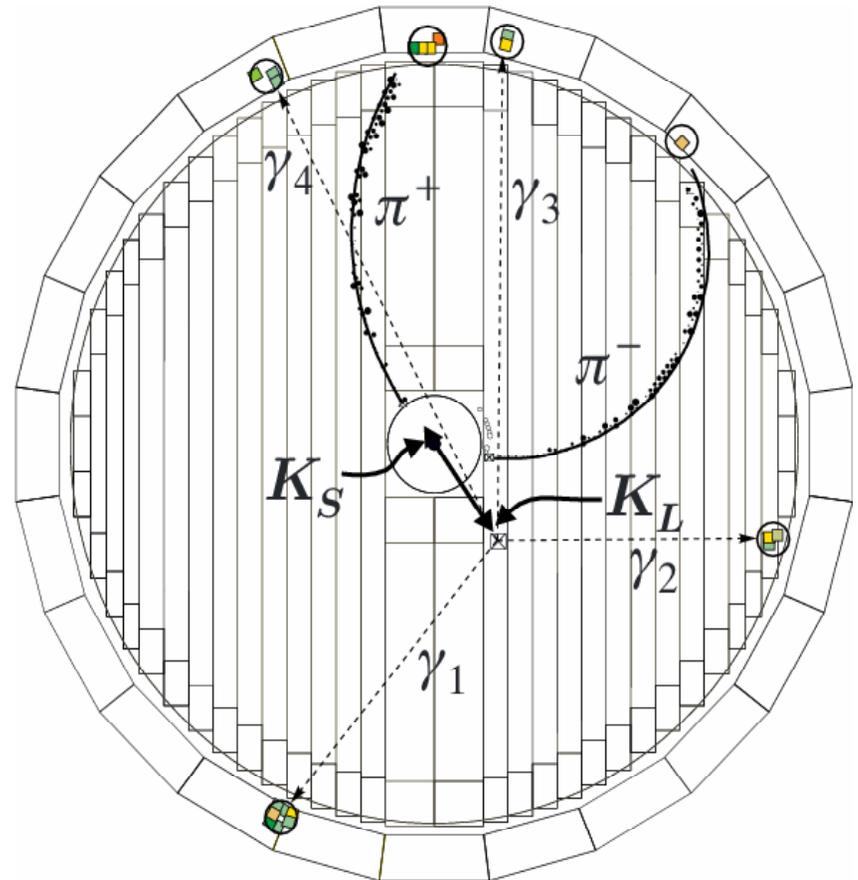
Le energie ed i tempi di arrivo
dei depositi calorimetrici

Cosa si ricostruisce:

Il vertice comune delle due
tracce

Il vertice comune dei 4 depositi
non connessi a tracce

*Infine si interpreta l'evento facendo ipotesi ragionevoli sulla
sua natura e cercando di "chiudere" la cinematica
(conservazione energia, conservazione impulso)*



Il decadimento $K_S \rightarrow 3\pi^0$ e' tra quelli piu' interessanti perche' viola la simmetria CP. Non e' mai stato osservato perche' la sua probabilita' e' calcolata essere di $\sim 2 \times 10^{-9}$

Come fare per osservarlo in KLOE?

- 1) "Taggare" la presenza di un K_S
- 2) Cercare eventi con 6 depositi di energia (2 fotoni per ciascun π^0) e *nessuna* traccia
- 3) Chiudere la cinematica dell'evento

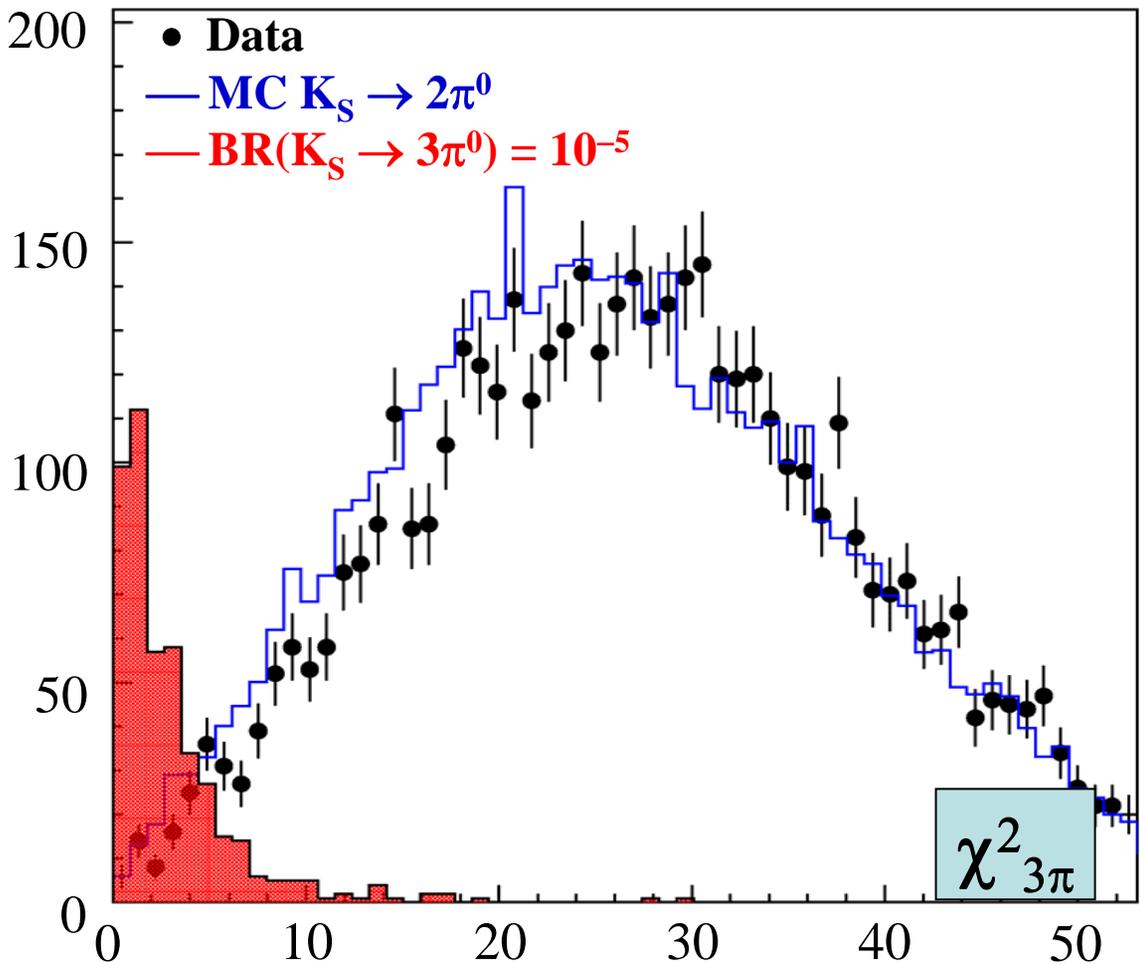
Sembra facile!

Bisogna tenere conto dei segnali di fondo (*background*) cioè eventi spuri che possono “imitare” il segnale vero

Per esempio si possono avere eventi di decadimento $K_S \rightarrow 2\pi^0$ (che ha una probabilità del 34%) con due fotoni sovrapposti, per esempio originati dai fasci (“*fotoni accidentali*”), oppure dovuti a cattiva ricostruzione nel calorimetro (“*splittings*”)

Anche se *accidentali* e *splittings* sono eventi abbastanza rari, essi si devono confrontare con segnali la cui probabilità è estremamente piccola ($\sim 10^{-9}$)

Per rigettare efficacemente i fondi bisogna dunque imporre severe richieste sulla ricostruzione cinematica dell'evento al prezzo di diminuire l'efficienza sul segnale.



Linea blu: simulazione per il fondo

Grafico rosso: simulazione per il segnale

Cerchi neri : dati di KLOE

Nei dati disponibili non c'è evidenza di segnale

Ne concludiamo che $B(K_S \rightarrow 3\pi^0) < 2 \times 10^{-7}$

Cosa fare per riuscire finalmente ad osservare il segnale?

E' in studio un progetto per potenziare DAΦNE ed aumentarne la luminosita' di almeno un ordine di grandezza.

Contemporaneamente e' sotto studio la possibilita' di apportare delle migliorie al rivelatore per aumentarne la efficienza nella rivelazione del segnale (che attualmente e' di circa il 10%)

Fra qualche anno, potremmo essere pronti ad annunciare la prima evidenza sperimentale di questo decadimento: qualcuno di voi e' interessato a partecipare all'impresa?