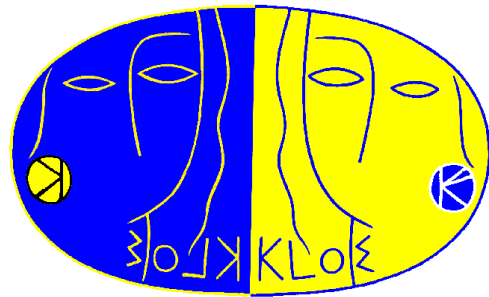


Ideare progettare costruire un
esperimento: il caso di KLOE a DAΦNE

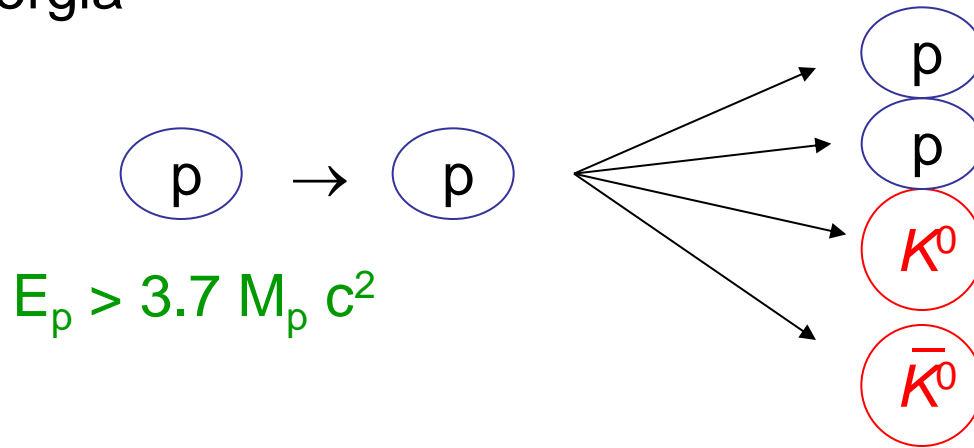


Fabio Bossi

INFN-LNF

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*. Infatti non esiste nessuna particella contenente “stranezza” più leggera dei K .

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



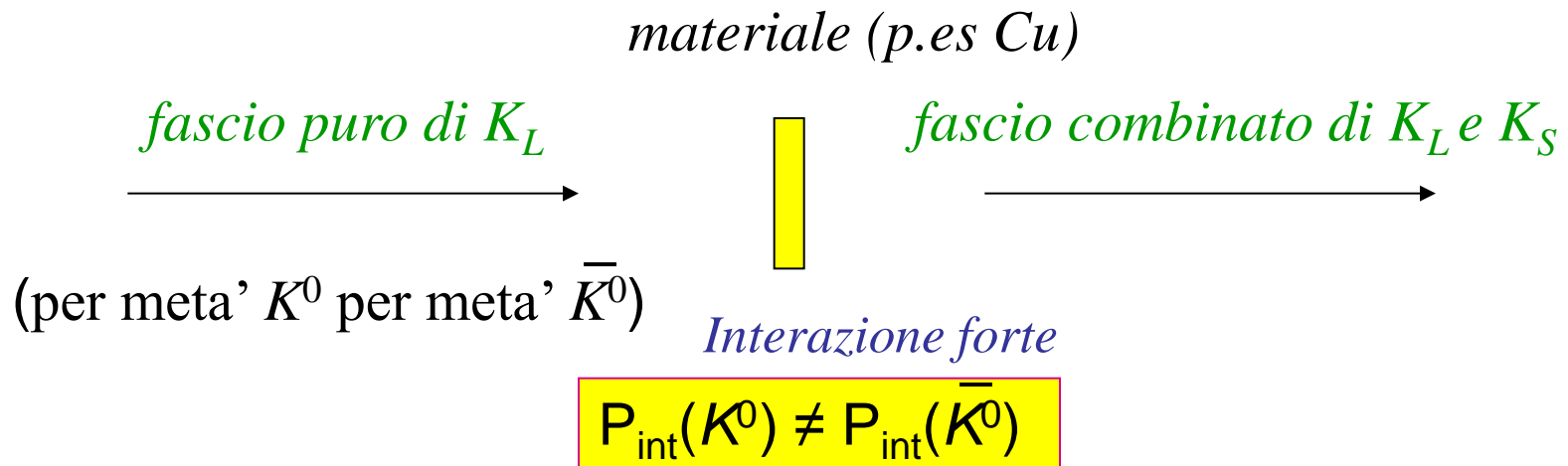
B) Il decadimento dei mesoni K principalmente in 2 pioni, oppure 3 pioni, oppure un pione un elettrone (o muone) e un neutrino

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 ha rappresentato l'oggetto principale di studio per la la maggior parte degli esperimenti dedicati alla fisica dei mesoni K sino ad oggi

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 = $\beta\gamma$

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

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

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

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

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

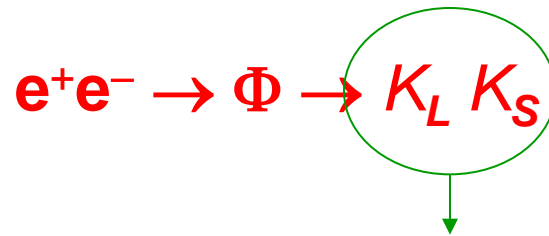
$$K_S : \longrightarrow e^{-L/c \beta\gamma\tau} \sim 10^{-12}$$

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

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

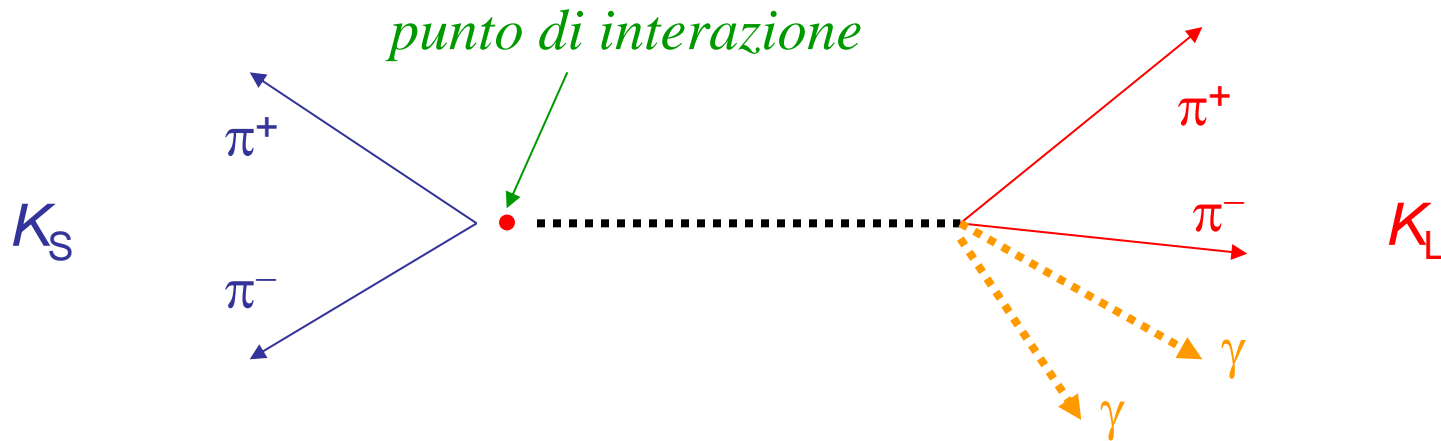


Per ragioni di meccanica quantistica (che non spiego) lo stato finale e' forzato ad essere uno stato con presenza di un K_L ed un K_S . Questo consente di marcare a priori la presenza di un K_L (K_S) osservando il decadimento o l'interazione del suo partner, di nuovo sfruttando la differenza tra le due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



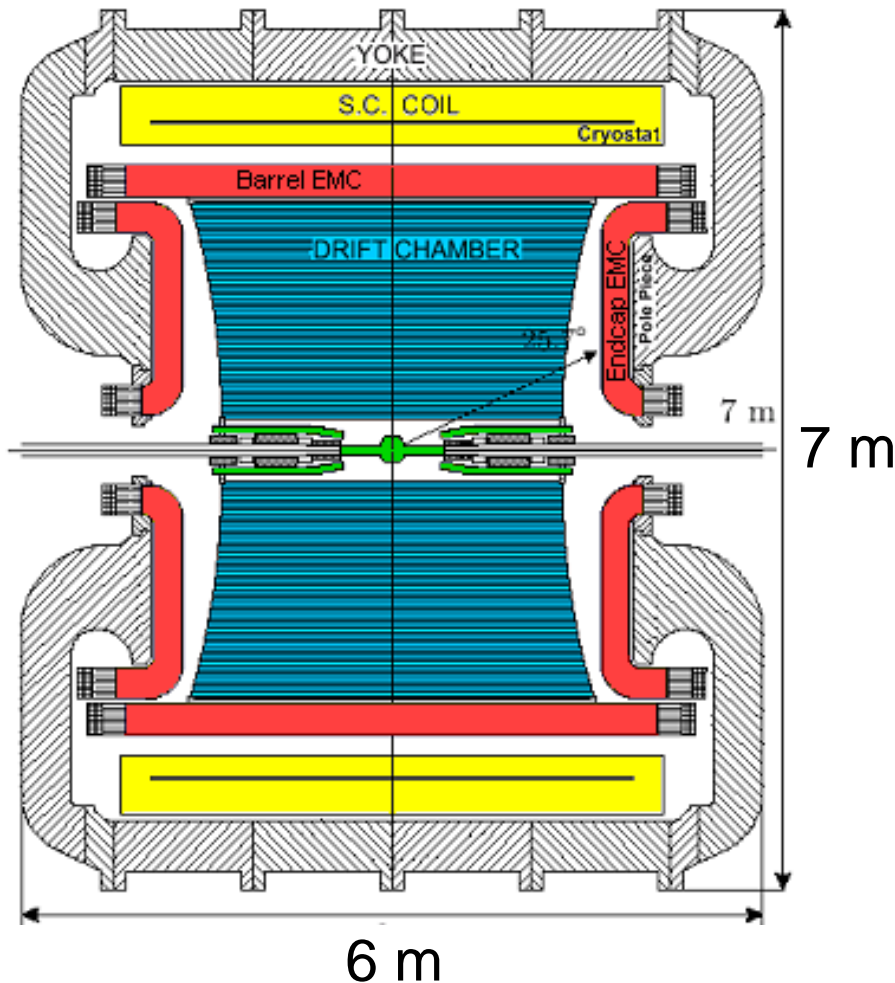
Una Φ -factory ha dunque il vantaggio, rispetto ad un acceleratore a protoni su bersaglio, di produrre fasci puri e “taggati” di K_L e K_S di energia ben nota

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

Alla luminosita' tipica di **DAΦNE** di 10^{32} cm⁻²s⁻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

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

Anche la scelta del nome e' importante: ci siamo ispirati alla mitologia greca (con una piccola forzatura...)



CHLOE'

*N'y a-t-il rien de plus Daphnis,
Que nous tenir entre nos bras
Et nous endormir ainsi?*

DAPHNIS

*Si, Chloe'. Il y a
La pris de toi
Que je sais maintenant*

CHLOE'

*N'y a-t-il rien de plus Daphnis,
Que la pris de moi
Que tu as fait?*

DAPHNIS

*Si, Chloe'. Il y a
Nous tenir entre nos bras
Et nous endormir ainsi*

H.P. Roche'

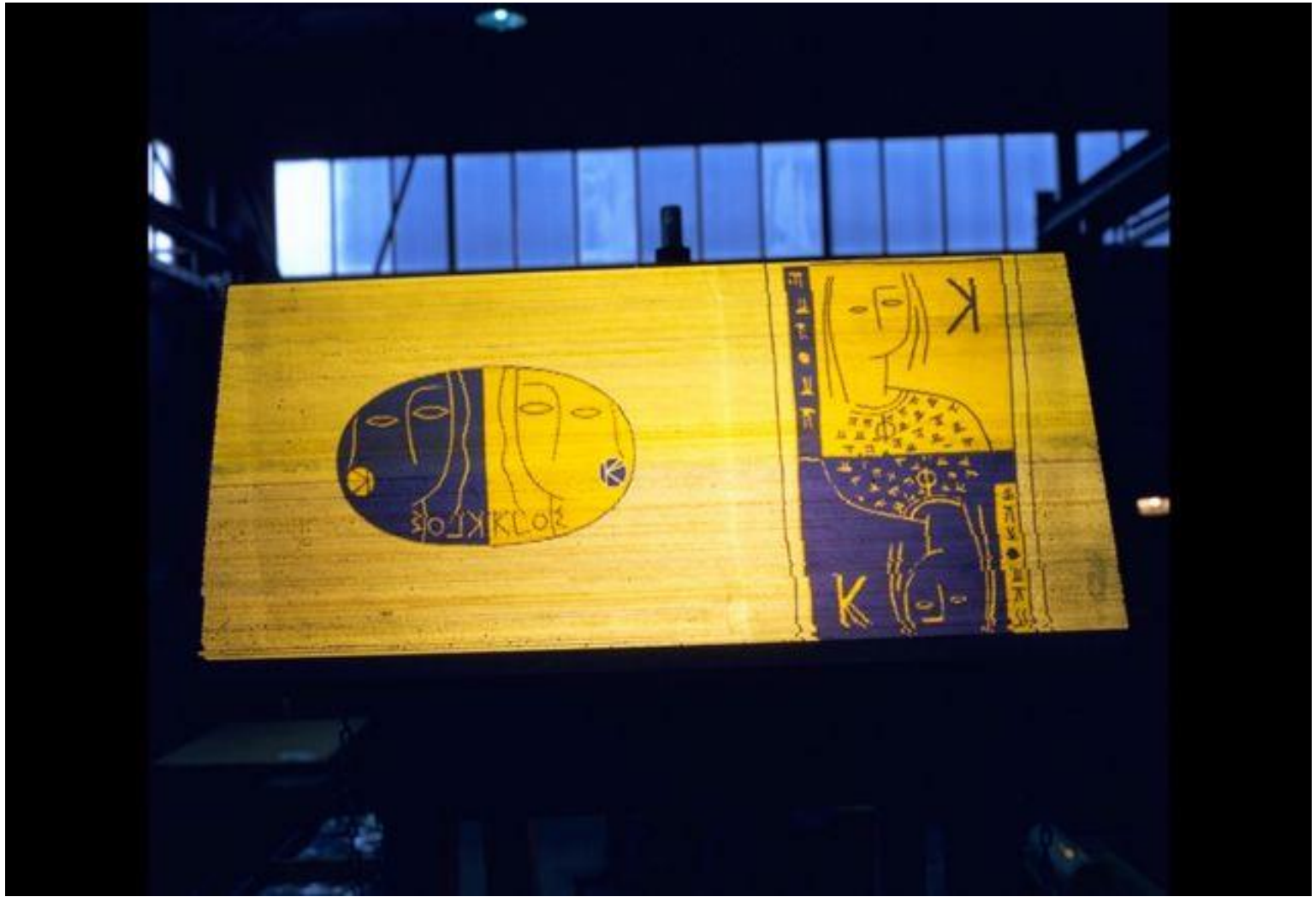
Il calorimetro elettromagnetico e' costituito da moduli di *fibre scintillanti* inserite in piombo

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'

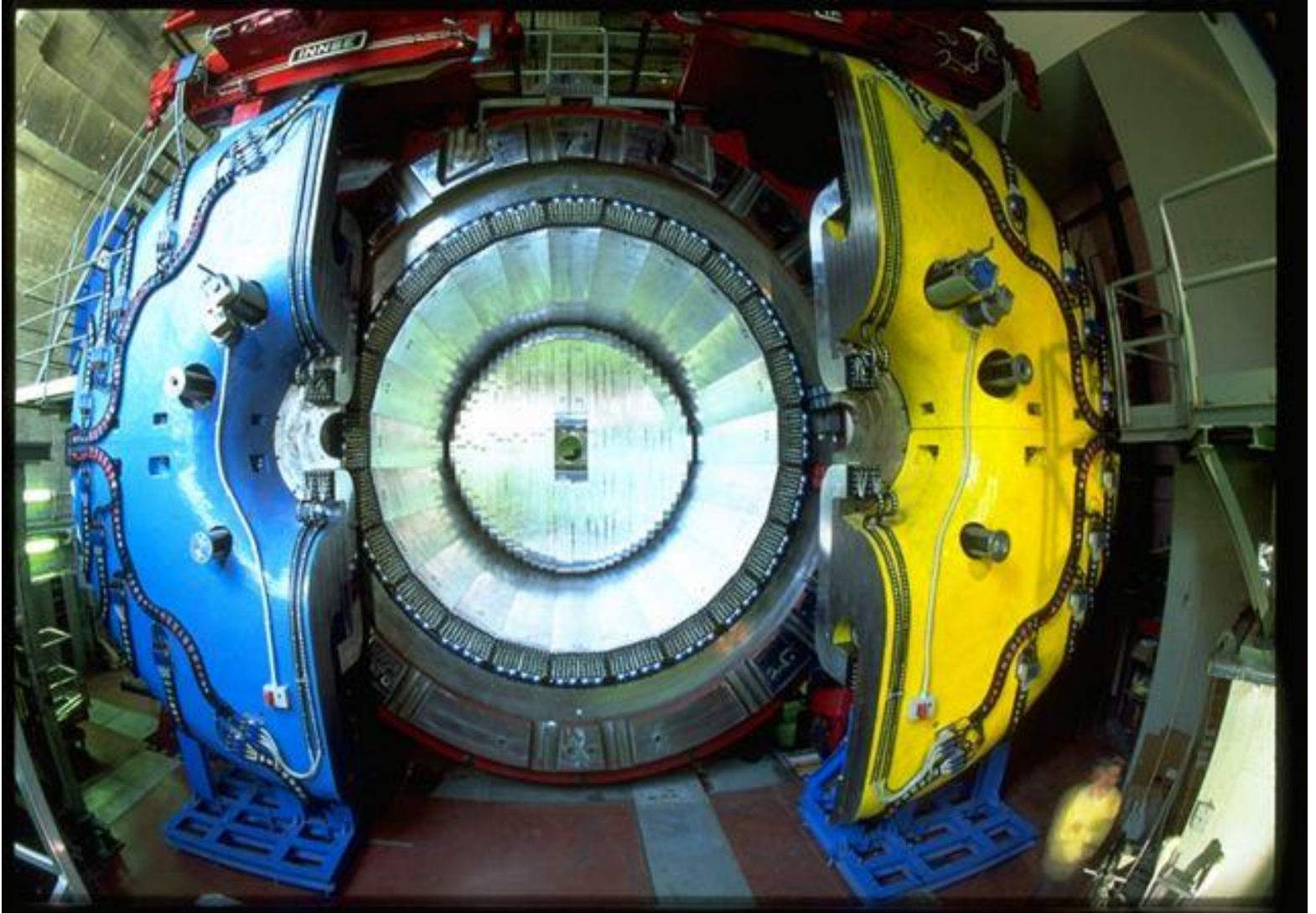
Piccoli svantaggi di questa tecnica sono:

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





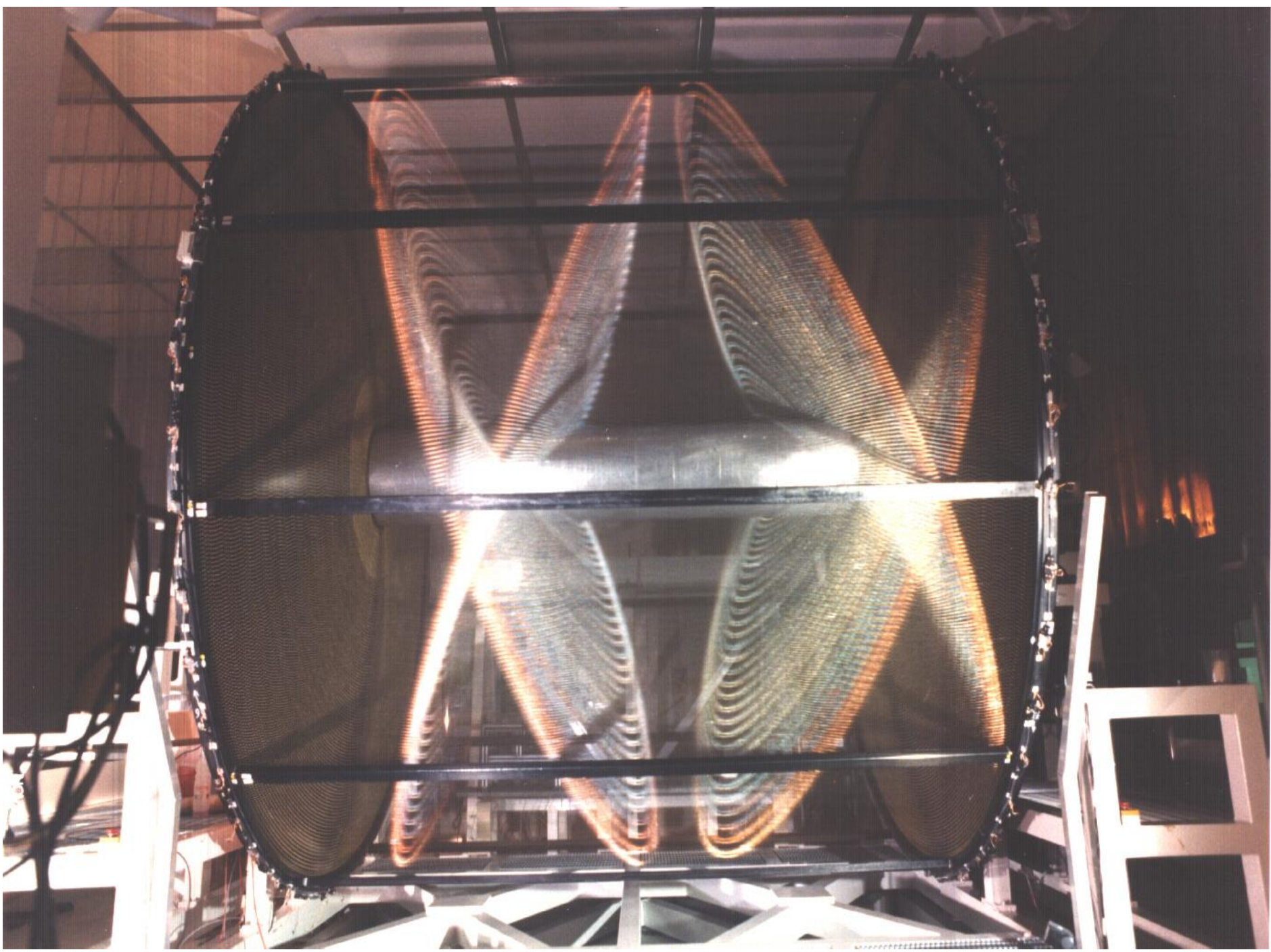


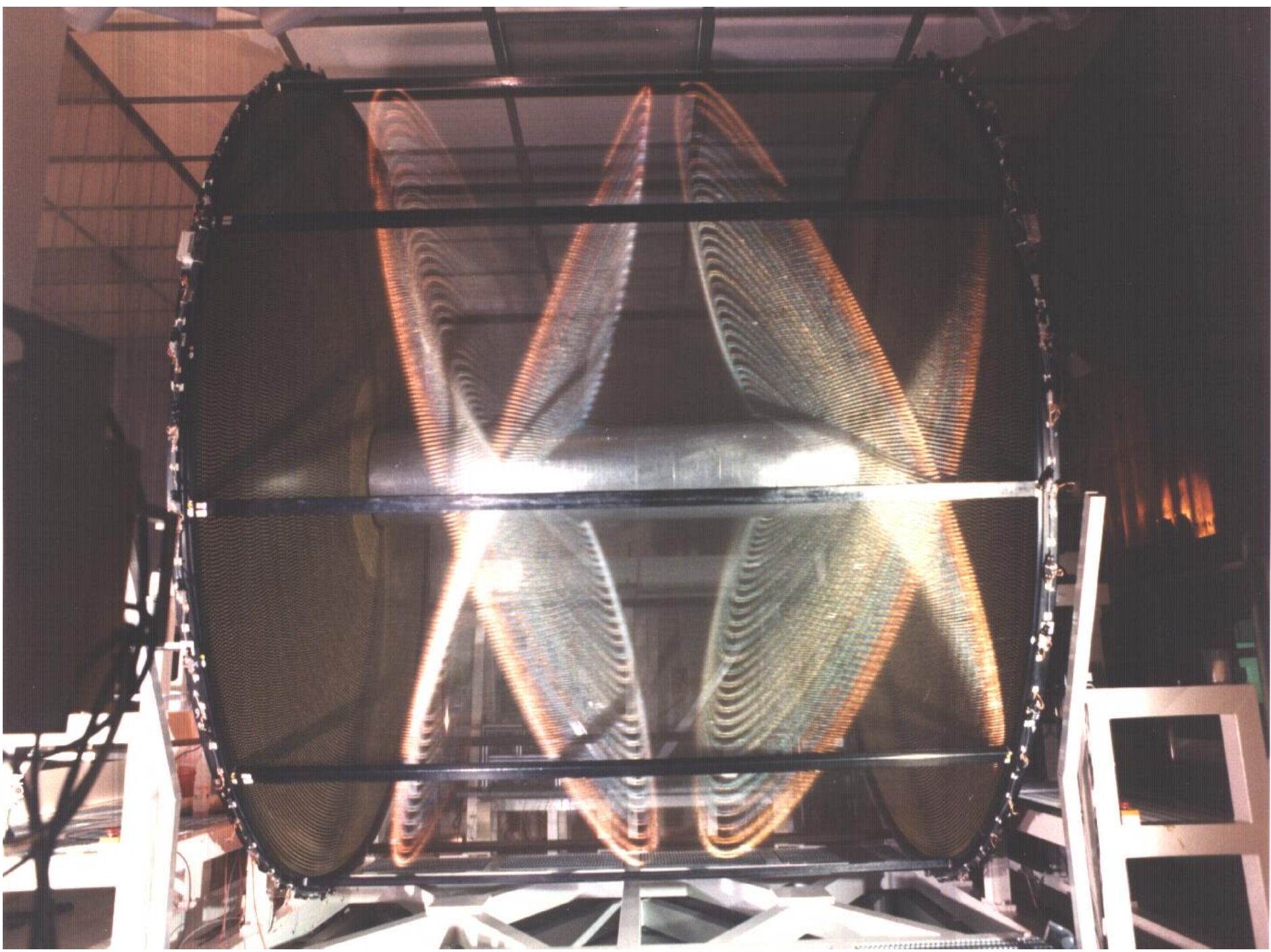


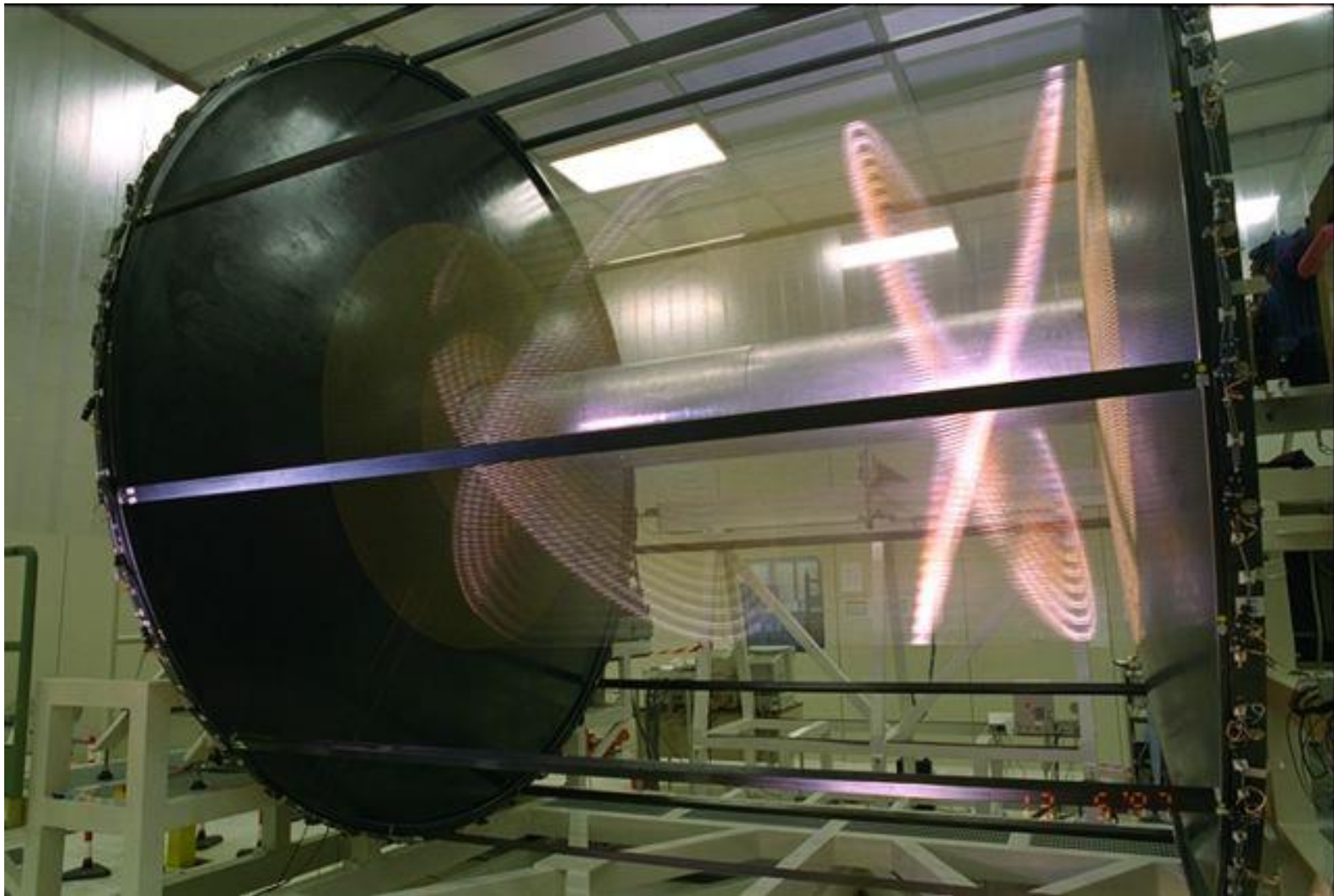
La *camera a deriva* consta di > 50000 fili di cui ~ 12000 sono quelli “di senso”

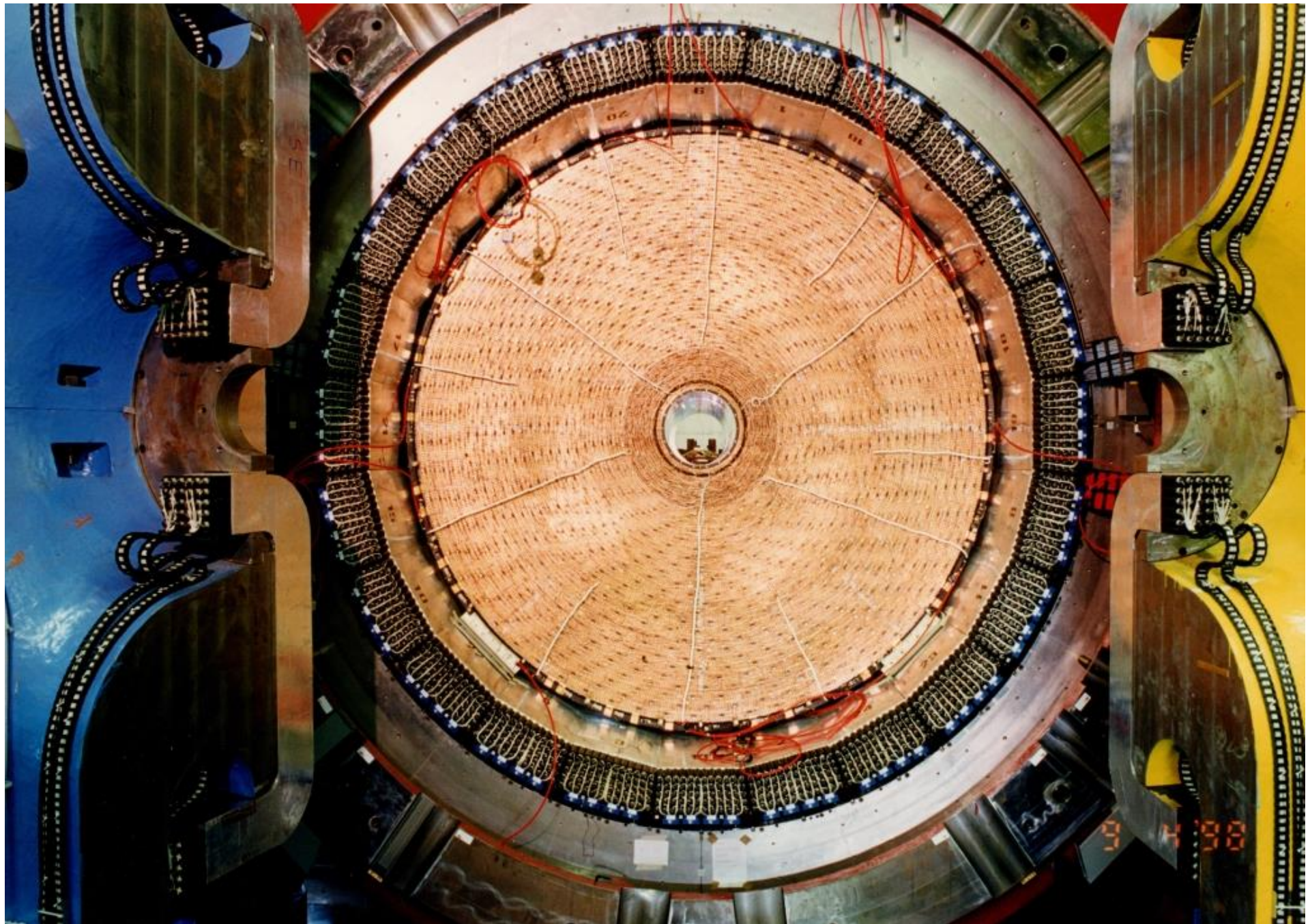
La struttura meccanica e' in *fibra di carbonio*, per massimizzarne la trasparenza per i fotoni

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







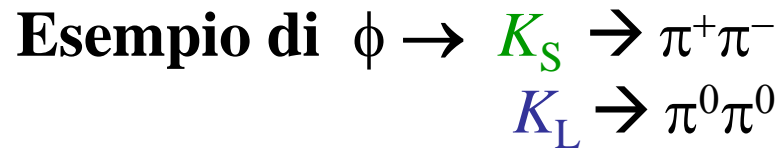




Quando DAΦNE produce collisioni e^+e^- , i prodotti delle stesse generano segnali elettronici in KLOE che vengono registrati tramite computers (DAQ) su nastri magnetici. Tipicamente, vengono registrati 2000 eventi al secondo. Di questi, circa un terzo sono reali prodotti delle collisioni, il resto sono eventi accidentali o interazioni di raggi cosmici

In seguito, opportuni programmi di ricostruzione trasformano queste informazioni di tipo elettronico (*raw data*) in informazioni di tipo fisico (*reconstructed data*)

L'analisi di ciascuno di questi dati e la loro interpretazione e' poi lasciata alla pazienza e all'ingegno di ciascun componente della Collaborazione che produce il risultato fisico finale (che puo' arrivare anche a distanza di anni dal data taking)

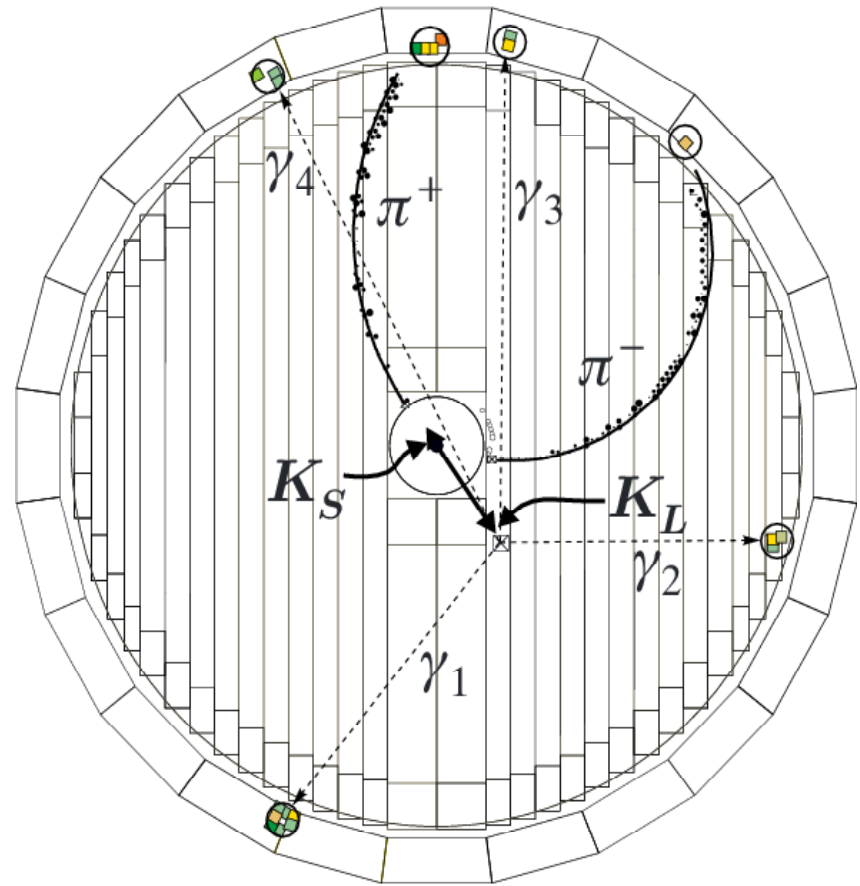


Cosa si osserva:

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

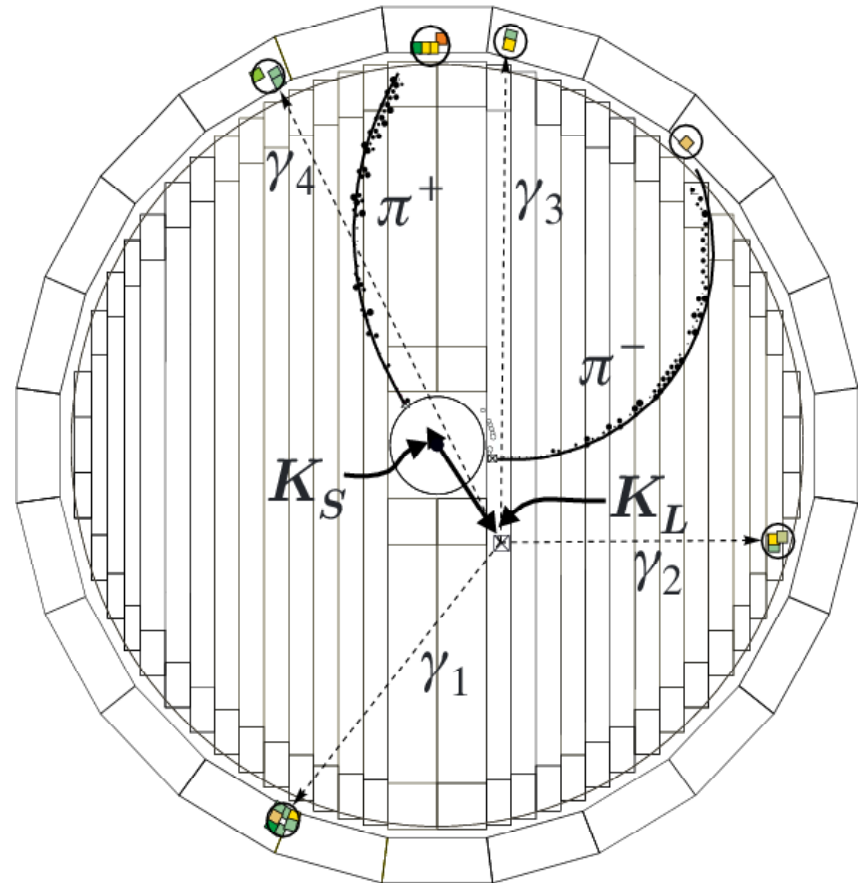
Le energie ed i tempi di arrivo
dei depositi calorimetrici

Cosa si ricostruisce:

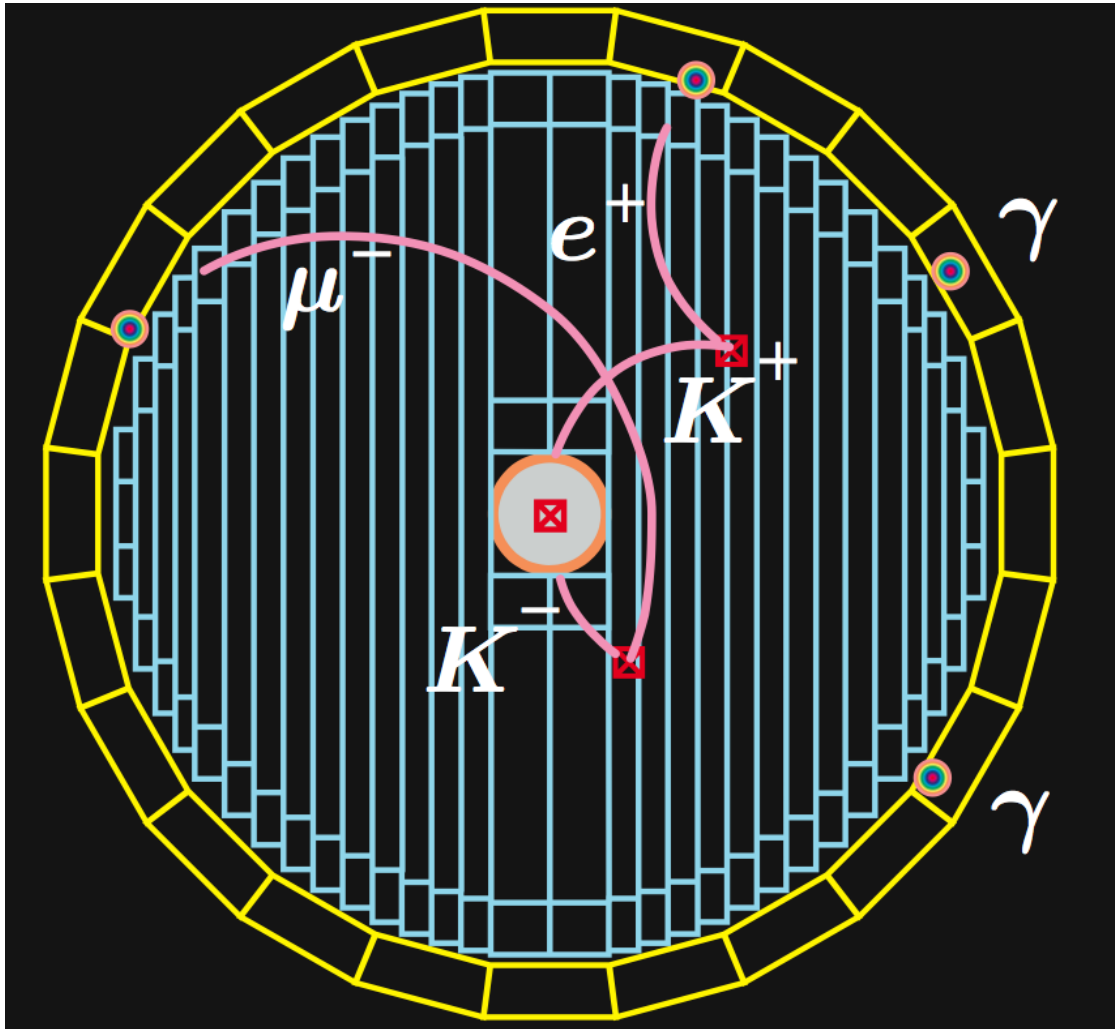
Il vertice comune delle due
tracce

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)*



Tagged K^\pm “beams”



for each channel
2 charges \times 2 tags

<i>tag</i>	<i>decay</i>
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	} $K^- \rightarrow$ anything
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	
$K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$	} $K^+ \rightarrow$ anything
$K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$	

In questo modo KLOE e' stato *l'unico esperimento al mondo* in grado di misurare con precisione *tutti* i parametri rilevanti (vite medie, rapporti di decadimento...) dei mesoni K neutri (e anche di quelli carichi, in effetti...)

L'insieme di queste misure mostra un perfetto accordo con le previsioni del Modello Standard comportandone una conferma con un livello di precisione di circa l'uno per mille

Per ottenere questo risultato ci sono voluti 5 anni di presa dati ed altrettanti di lavoro di analisi di qualche decina di fisici, soprattutto dottorandi e giovani post-doc

Le collisioni prodotte da DAΦNE sono utili anche per studiare argomenti di fisica differenti dallo studio dei mesoni K

In effetti circa il 40% dei lavori pubblicati dalla Collaborazione riguardano questi canali di fisica “non K”

Nel seguito della lezione vi parlero' di uno di questi lavori che ha a che vedere con il problema piu' urgente (secondo me) della moderna fisica delle particelle: *la ricerca della materia oscura*

Esistono evidenze astrofisiche ormai incontrovertibili sul fatto che la grande maggioranza della materia esistente nell'universo *non e' costituita di materia ordinaria* (cioe' quella che obbedisce al Modello Standard)

1. Velocita' di rotazione delle galassie spirali
2. Dispersione delle velocita' delle galassie di un ammasso
3. Effetti di lenti gravitazionali

Nessuno dei fenomeni su menzionati puo' essere spiegato dalla presenza della sola materia *osservabile*

v (km/s)

100

50

observed

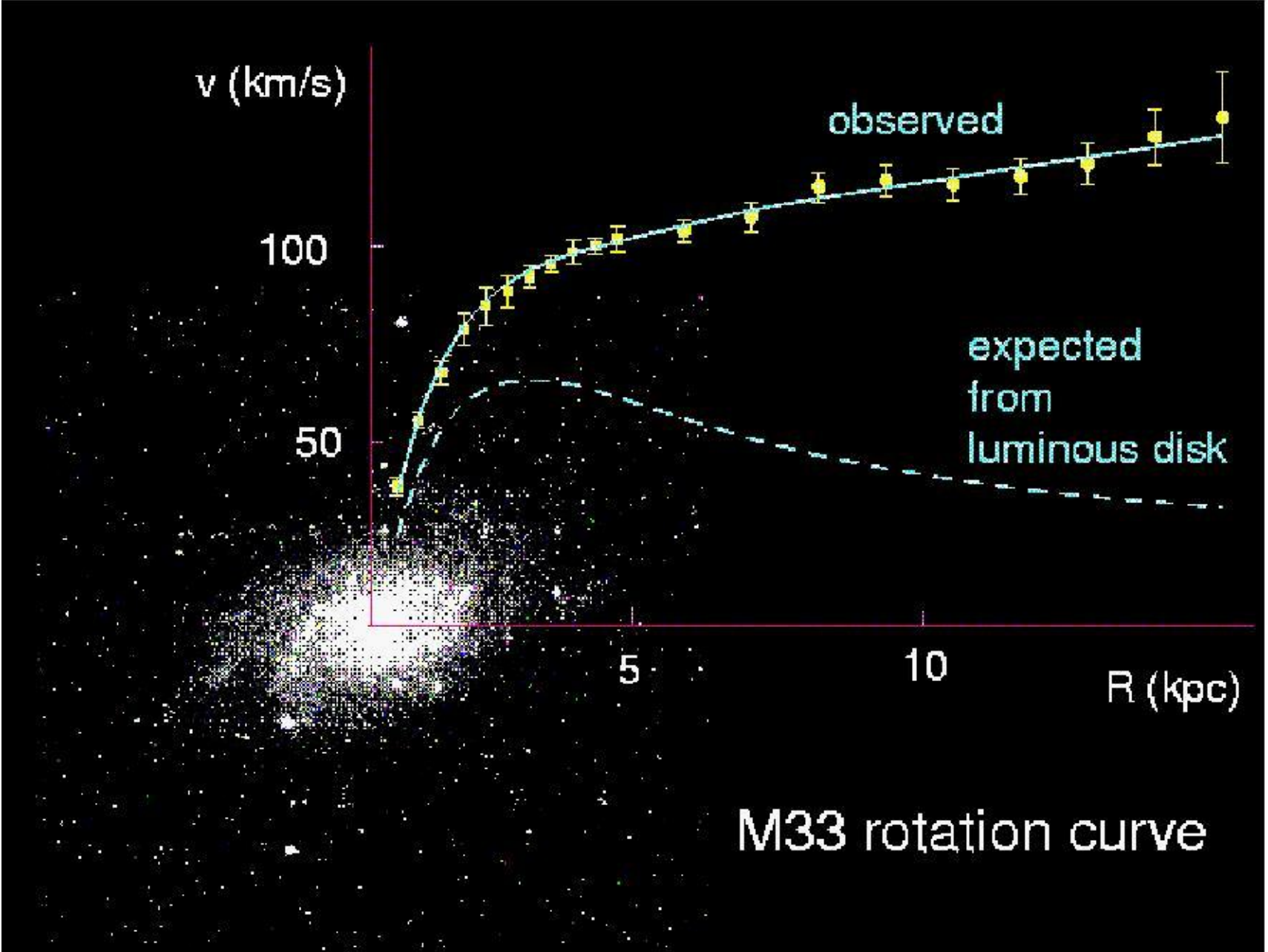
expected
from
luminous disk

5

10

R (kpc)

M33 rotation curve



E' ovviamente possibile pensare che queste discrepanze siano dovute al fatto che *le leggi dinamiche a noi note non siano piu' valide a grandi distanze o per specifici valori di accelerazione*

Per esempio il modello **MO**dified **N**ewtonian **D**ynamics prevede che in presenza di un potenziale gravitazionale la legge di Newton sia modificata come

$$\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)a = \frac{GM}{r^2}$$

Dove μ che e' una funzione che vale 1 per $a \gg a_0$ (limite newtoniano) tende a 0 per $a \rightarrow 0$ con $a_0 \sim 10^{-8} \text{ cms}^{-2}$

Tuttavia la supposizione piu' popolare tra i fisici e' che questi fenomeni siano spiegabili con l'esistenza di un qualche nuovo tipo di materia, **neutra, stabile** che permea l'universo in un rapporto di **5:1** rispetto alla materia barionica ordinaria

Esistono numerose ipotesi teoriche a proposito della natura di questa **materia oscura**, nessuna delle quali ad oggi provata sperimentalmente

Per esempio in **Supersimmetria** un candidato naturale a questo scopo e' il **neutralino** ammesso che esso sia stabile. Le sue ricerche ad LHC hanno sinora dato esito nullo

Noi oggi discuteremo una particolare classe di modelli che sono di interesse per la sperimentazione a DAΦNE e vedremo come essi vengono testati con KLOE

L'idea base è che la materia oscura pur non essendo carica elettricamente *lo sia rispetto ad un diverso tipo di interazione rispetto alla quale, invece, la materia ordinaria è neutra*

Il “quanto” di questa nuova interazione (il cosiddetto “*dark photon*”) può però interagire con la materia ordinaria attraverso effetti quantistici molto deboli e per questo sinora sfuggiti alla sperimentazione in fisica

Non esiste una predizione esatta di quale sia la massa di questo nuovo bosone (in letteratura spesso chiamato U oppure A'), ne' di *quanto* debole sia questo accoppiamento tra U e materia ordinaria (in letteratura parametrizzato con una costante chiamata ε oppure α'/α)

Esistono, pero', un certo numero di osservazioni astrofisiche che preferirebbero una massa dell'ordine di 10-1000 MeV ed accoppiamenti $\varepsilon^2 < \sim 10^{-5}$

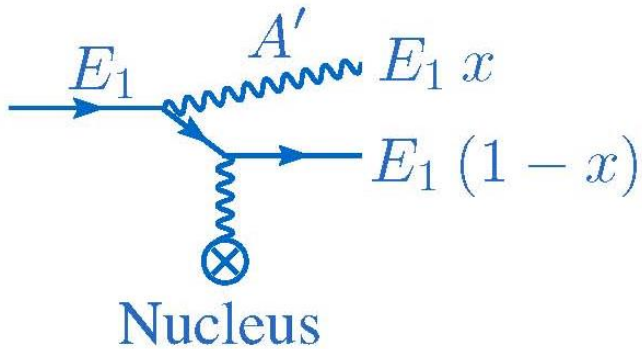
Questo significa che e' in linea di principio possibile pensare di produrre ed osservare U bosons in laboratorio!

Se, infatti, il bosone U ha gli stessi numeri quantici del fotone si può manifestare in tutti quei processi in cui sappiamo essere coinvolto un fotone, con due importanti differenze:

1. La frequenza di questi processi *è soppressa di un fattore ϵ^2* rispetto ai processi analoghi in elettrodinamica
2. A differenza che in QED, dove lo spettro energetico degli stati finali è continuo, in questo caso esso *deve essere concentrato intorno all'energia pari ad M_U*

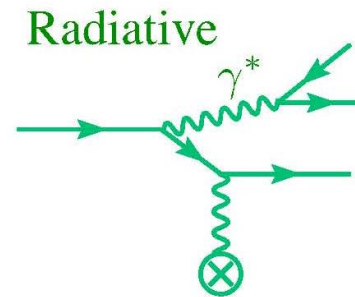
Il nome del gioco è dunque: 1. produrre tanti eventi per potere osservare una manciata di eventi rari. 2. grande risoluzione nella misura delle masse per poter distinguere il “segnale” dal fondo

Alcuni esperimenti utilizzano fasci intensi di elettroni su bersagli di vari materiali

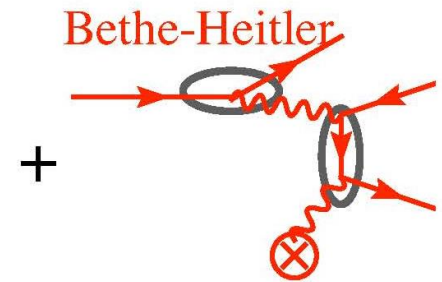


Questa tecnica ha il vantaggio di avere probabilita' di produzione relativamente alte ($\sim Z^2$)

Ma ha anche fondi fisici molto rilevanti. Inoltre le accettanze geometriche sono limitate per ragioni di cinematica



Same kinematics as signal,
IRREDUCIBLE:
(except vertex)



Larger rate, reject using very different kinematics

Esperimenti di questo tipo sono attualmente in corso (o lo saranno a breve) presso il microtrone dell'Universita' di Mainz (Germania) o al Jefferson Lab (USA)

A1: Spectrometer setup at MAMI

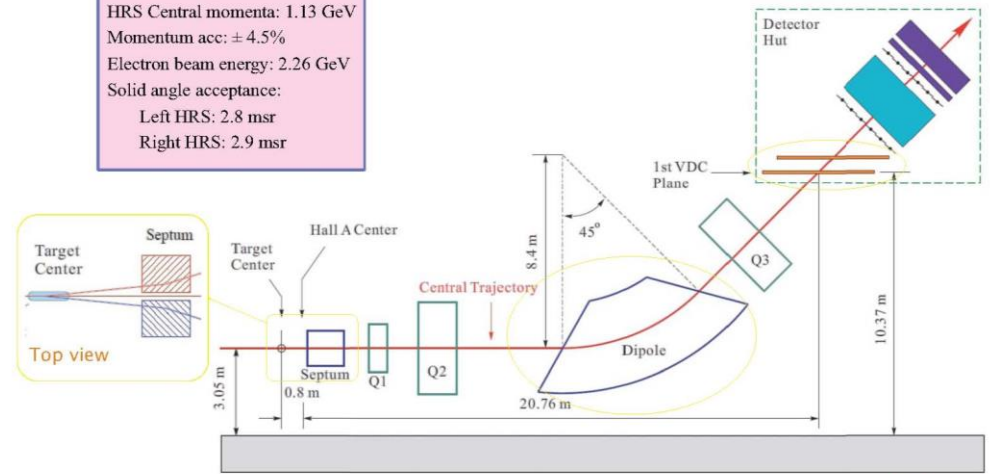


APEX



Jefferson Lab's Hall A experimental apparatus

APEX test run:
 Beam current up to $150\mu\text{A}$
 Target: Ta foil, 22 mg/cm^2
 HRS Central momenta: 1.13 GeV
 Momentum acc: $\pm 4.5\%$
 Electron beam energy: 2.26 GeV
 Solid angle acceptance:
 Left HRS: 2.8 msr
 Right HRS: 2.9 msr



J. Huang

A KLOE cerchiamo l' U boson in due processi totalmente differenti:

1. $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$
2. $\Phi \rightarrow \eta e^+e^-$

In entrambe i casi, si cerca un *picco* statisticamente significativo nella distribuzione di massa invariante della coppia di leptoni, che corrisponderebbe alla produzione di un U di quella massa ed al suo successivo decadimento nella coppia di leptoni stessa (2 muoni in un caso, e^\pm nell'altro)

La massa invariante e' una quantita' *invariante relativistica*,
cioe' una grandezza il cui valore e' *indipendente dal sistema
di riferimento in cui viene misurata*

Nel caso di una coppia di particelle osservate nel sistema di
riferimento del nostro laboratorio essa e' data dalla formula

$$M_{inv} = \sqrt{(m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 + E_2 - P_1 \cdot P_2 \cos \vartheta))}$$

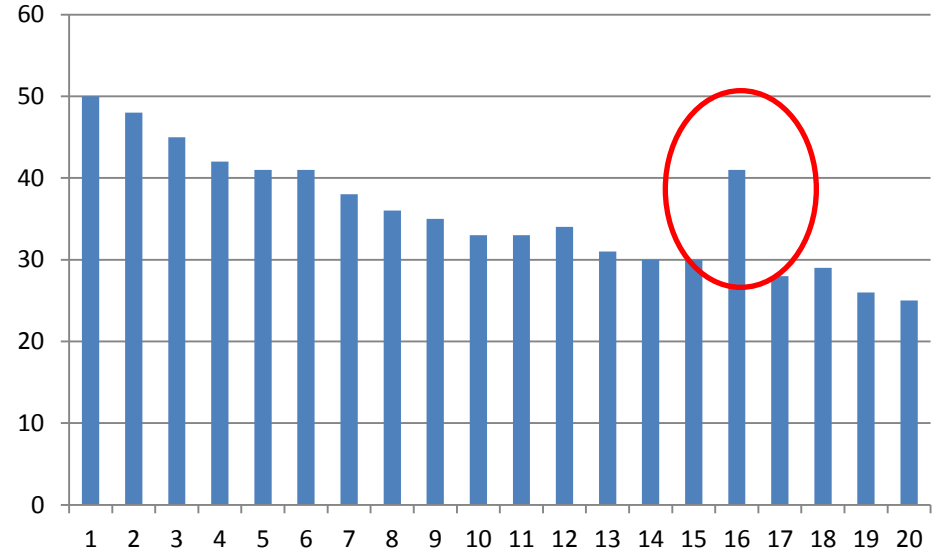
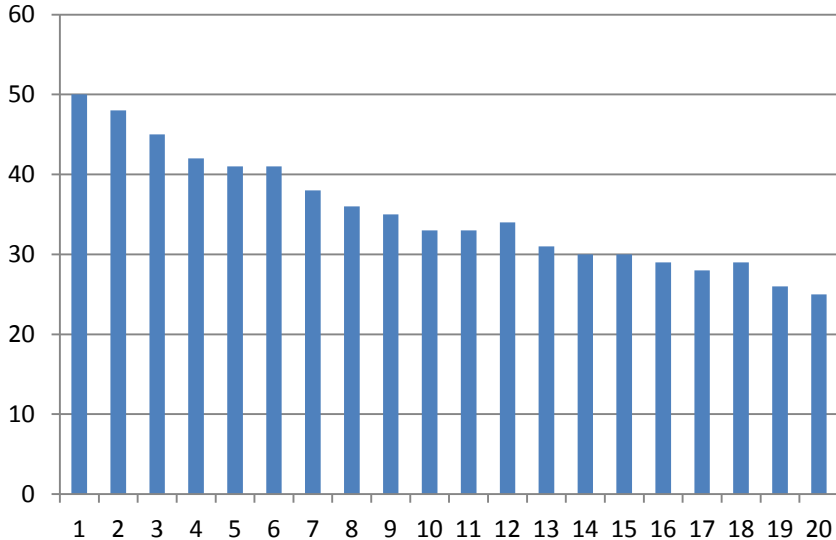
Dove $E_1, E_2, P_1, P_2, m_1, m_2$, sono energia, impulso e massa
delle due particelle e θ e' l'angolo tra le loro direzioni di moto

Essa corrisponde alla massa della eventuale "madre" da cui
le due particelle sono state prodotte

La strategia di misura e' dunque, per es. nel caso 2.

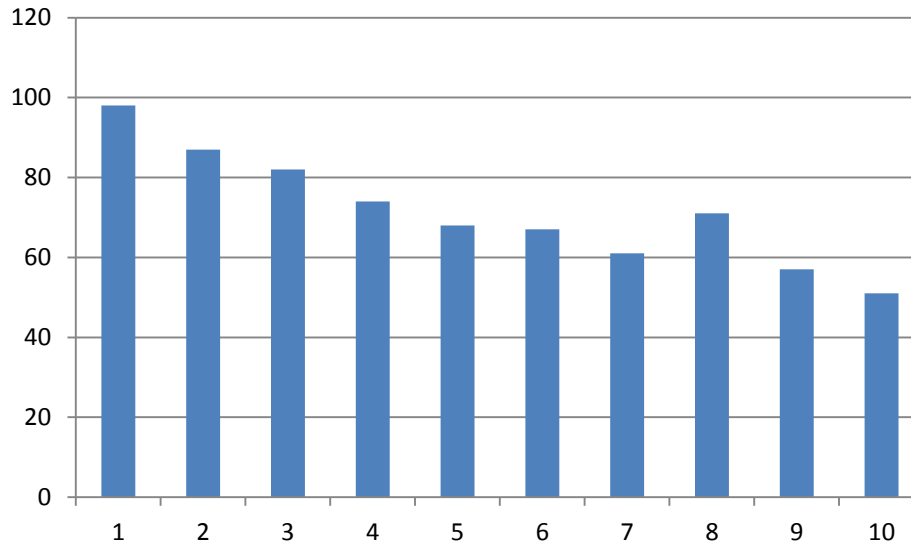
1. Si selezionano eventi $\Phi \rightarrow \eta e^+ e^-$
2. Si costruisce la distribuzione di massa invariante della coppia di leptoni

In assenza di segnale la distribuzione apparirebbe come il grafico a sinistra. In presenza del segnale *mostrerebbe un picco in una ben definita posizione*



La larghezza di ciascun bin delle distribuzioni precedenti e' determinata dalla *risoluzione* con cui si misura la massa invariante della coppia leptonica.

Questo e' molto importante. Se si avesse una risoluzione peggiore di un fattore 2, per esempio, la stessa distribuzione si trasformerebbe come nel grafico qui sotto. *Il picco e' molto meno pronunciato!*

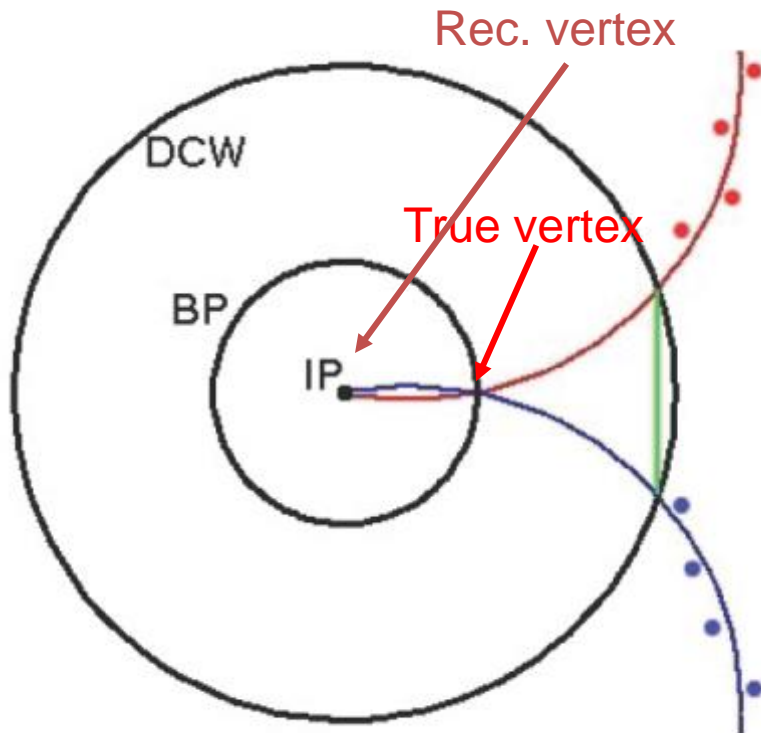


Si ricercano, dunque, eventi in cui ci sia un mesone η e una coppia e^\pm

Il mesone η viene individuato dai suoi prodotti di decadimento che possono essere **6 fotoni** (prodotti a loro volta da 3 π^0) oppure **2 fotoni e due tracce cariche** ($\pi^+\pi^-\pi^0$)

Tutti gli eventi che hanno queste caratteristiche vengono osservati e se ne misurano le grandezze cinematiche per vedere se sono compatibili con il tipo di eventi cercati (cioè se effettivamente le loro energie/impulsi/direzioni tornano con la presenza di una η ed una coppia e^\pm)

Un effetto particolarmente pericoloso e' la *conversione* di un fotone che puo' avvenire nei ben piu' abbondanti eventi $\Phi \rightarrow \eta \gamma$

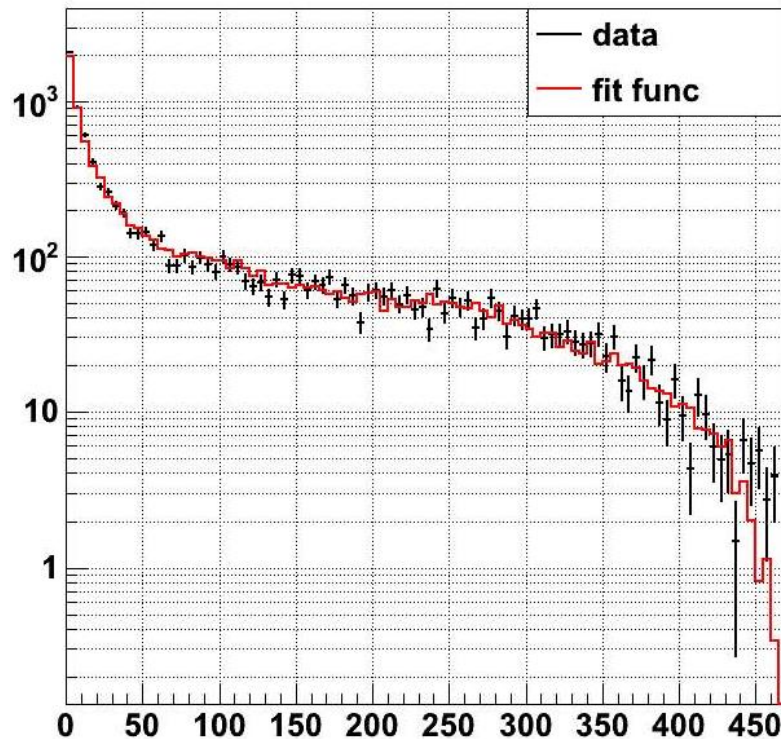


Un fotone ha una probabilita' di circa **1%** di produrre una coppia e^\pm attraversando la beam pipe o la parete interna della camera

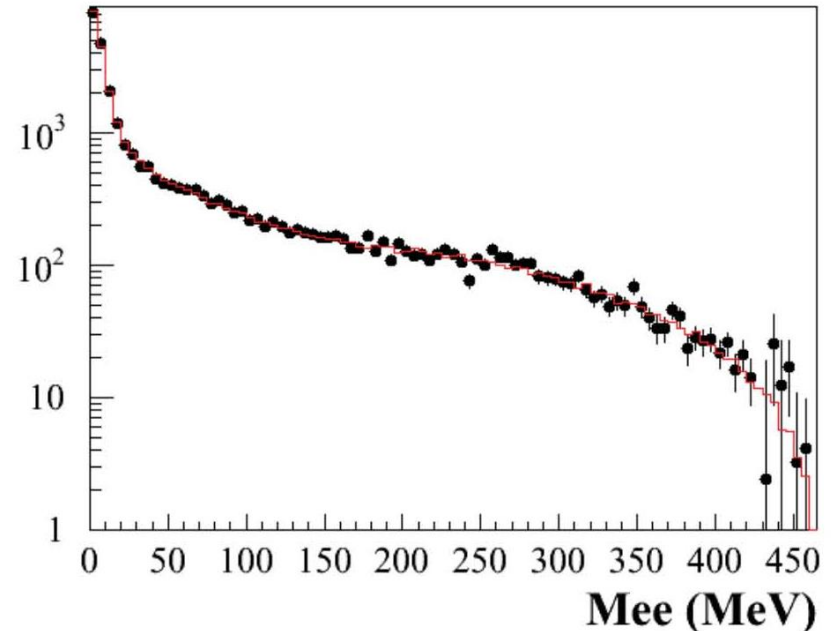
Questi eventi vengono in gran parte rimossi individuando la posizione del vertice formato dalla coppia di tracce

Ed ecco finalmente le distribuzioni di massa invariante per le due categorie di eventi

$\pi^+\pi^-\pi^0$ tag

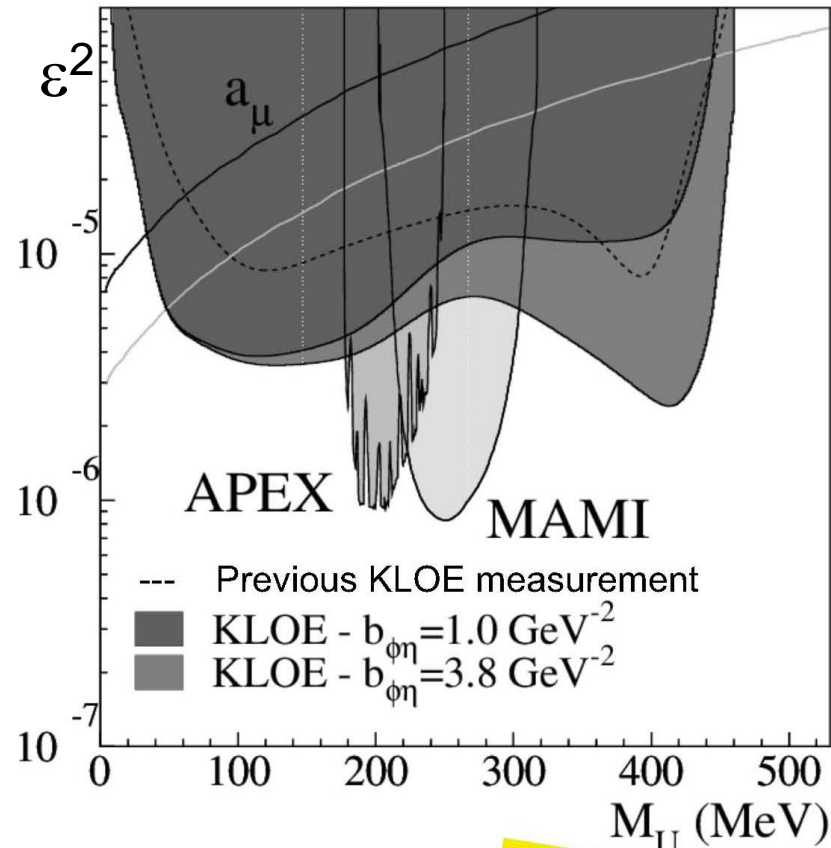


$\pi^0\pi^0\pi^0$ tag



Damn it! Niente picchi, niente viaggio a Stoccolma!

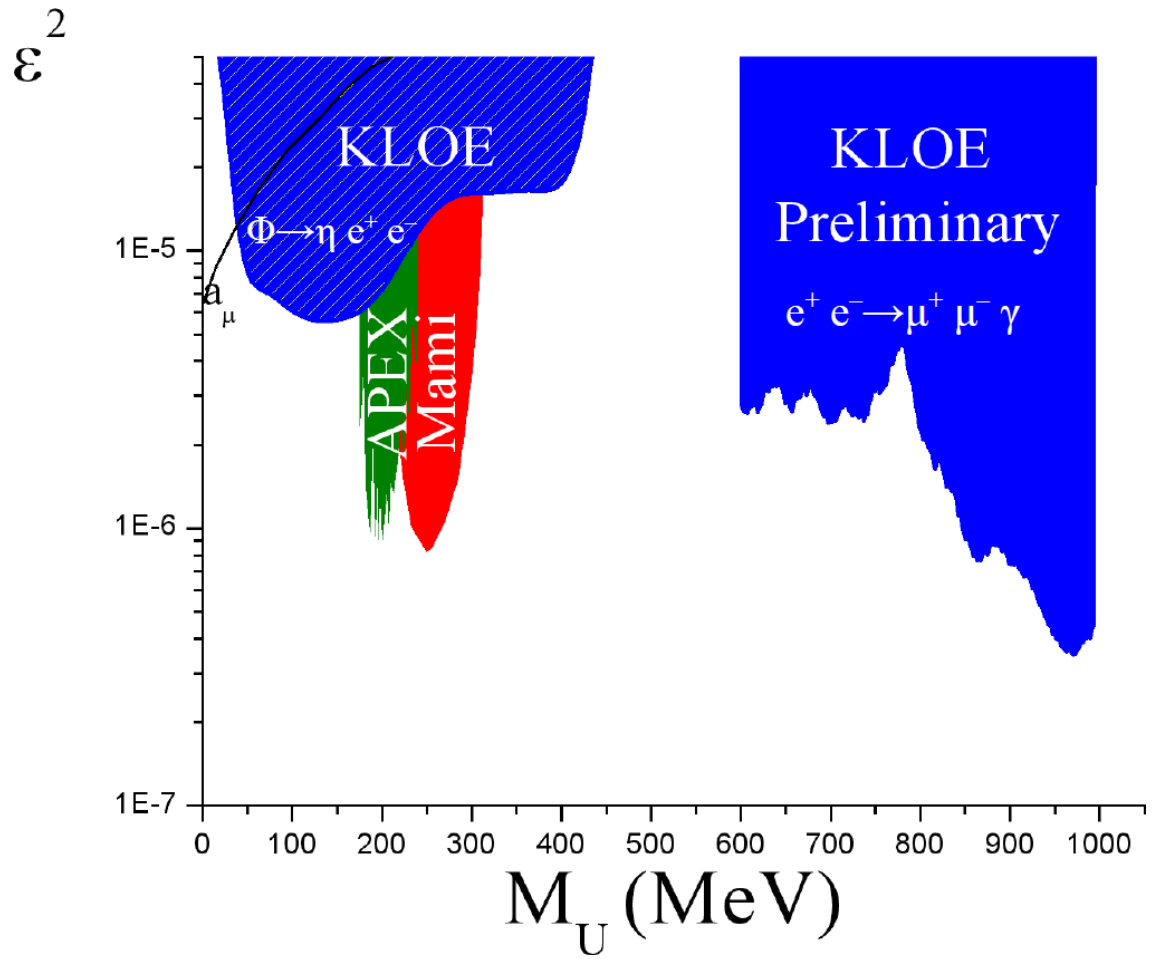
Questo risultato nullo, ci da' comunque la possibilita' di produrre dei valori di esclusione sull'esistenza del bosone U in funzione dei due parametri liberi della teoria



$$\epsilon^2 \leq 1.5 \times 10^{-5} \text{ @ 90\% CL for } 30 < M_U < 420 \text{ MeV}$$

$$\epsilon^2 \leq 5.0 \times 10^{-6} \text{ @ 90\% CL for } 60 < M_U < 190 \text{ MeV}$$

Utilizzando gli eventi $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ siamo stati inoltre in grado di estendere il nostro limite per valori di M_U piu' alti (questo risultato e' ancora preliminare pero')



Abbiamo visto in breve un esempio di come si progetta, costruisce e gestisce un moderno esperimento di fisica delle alte energie.

KLOE e' da considerarsi un caso di esperimento di dimensioni medio-piccole. Eppure considerate che abbiamo cominciato a disegnarlo nei primi anni 90 e continueremo ad utilizzarlo ancora per qualche anno, probabilmente

Per ottenere i risultati che vi ho mostrato (e molti altri ancora in effetti) ci e' voluto il lavoro di anni di un paio di centinaia di fisici ed ingegneri (molti dei quali si sono succeduti nel tempo)

Decine di studenti di varie nazioni si sono laureati e/o hanno conseguito i loro dottorati usando i dati di KLOE. Questo e' uno dei motori essenziali per il funzionamento di un esperimento. Senza giovani non si va avanti!

Naturalmente non si va avanti nemmeno senza soldi. Il complesso DAΦNE/KLOE e' costato circa 100 M€. A questi vanno poi aggiunti i costi di operazione/manutenzione degli apparati che ammontano a qualche milione l'anno.

Il flusso di questi vitali finanziamenti puo' essere garantito solo da una diffusa cosapevolezza a livello politico e di opinione pubblica intorno alla importanza della ricerca fondamentale. Di questi tempi, la vita e' dura....