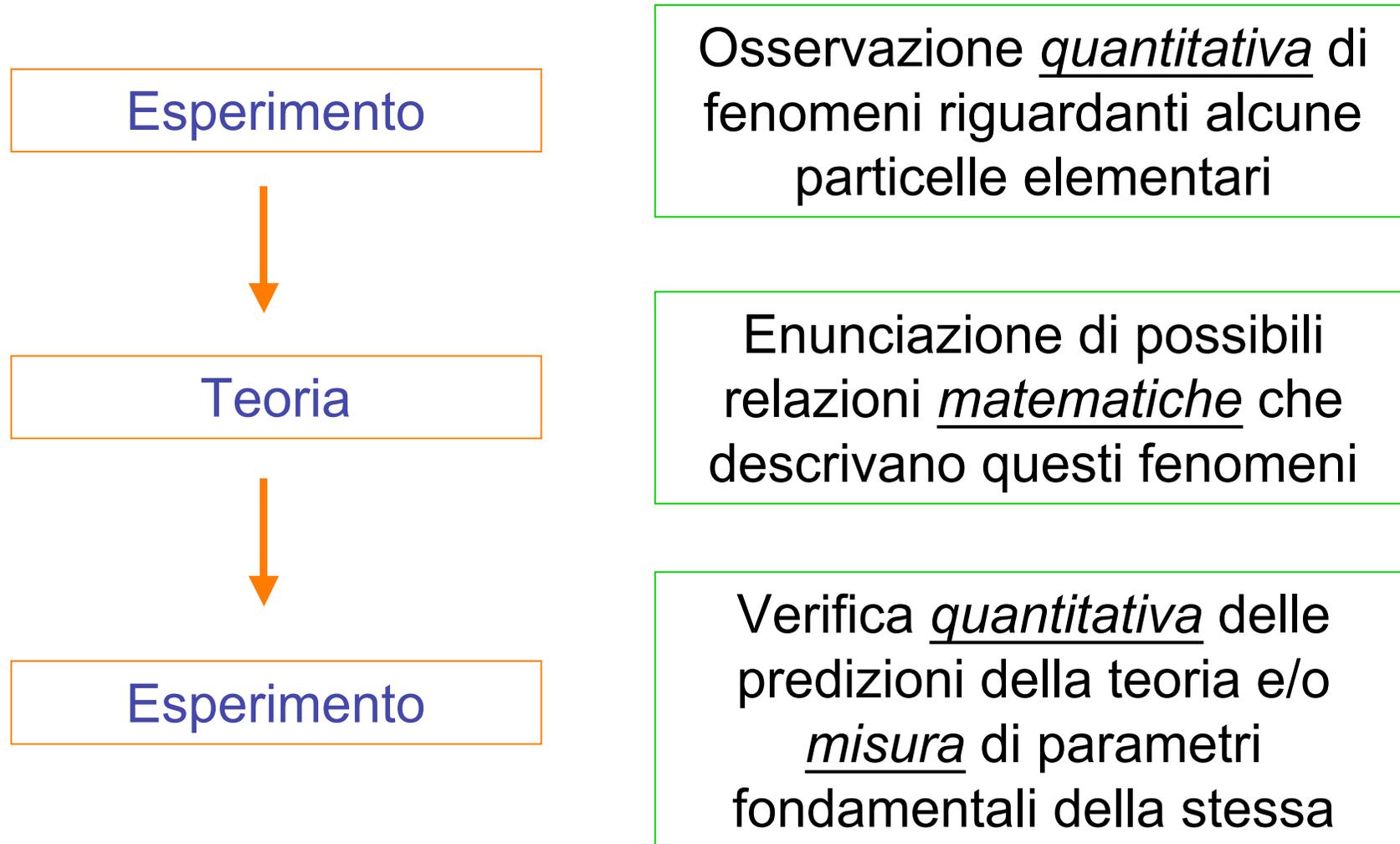


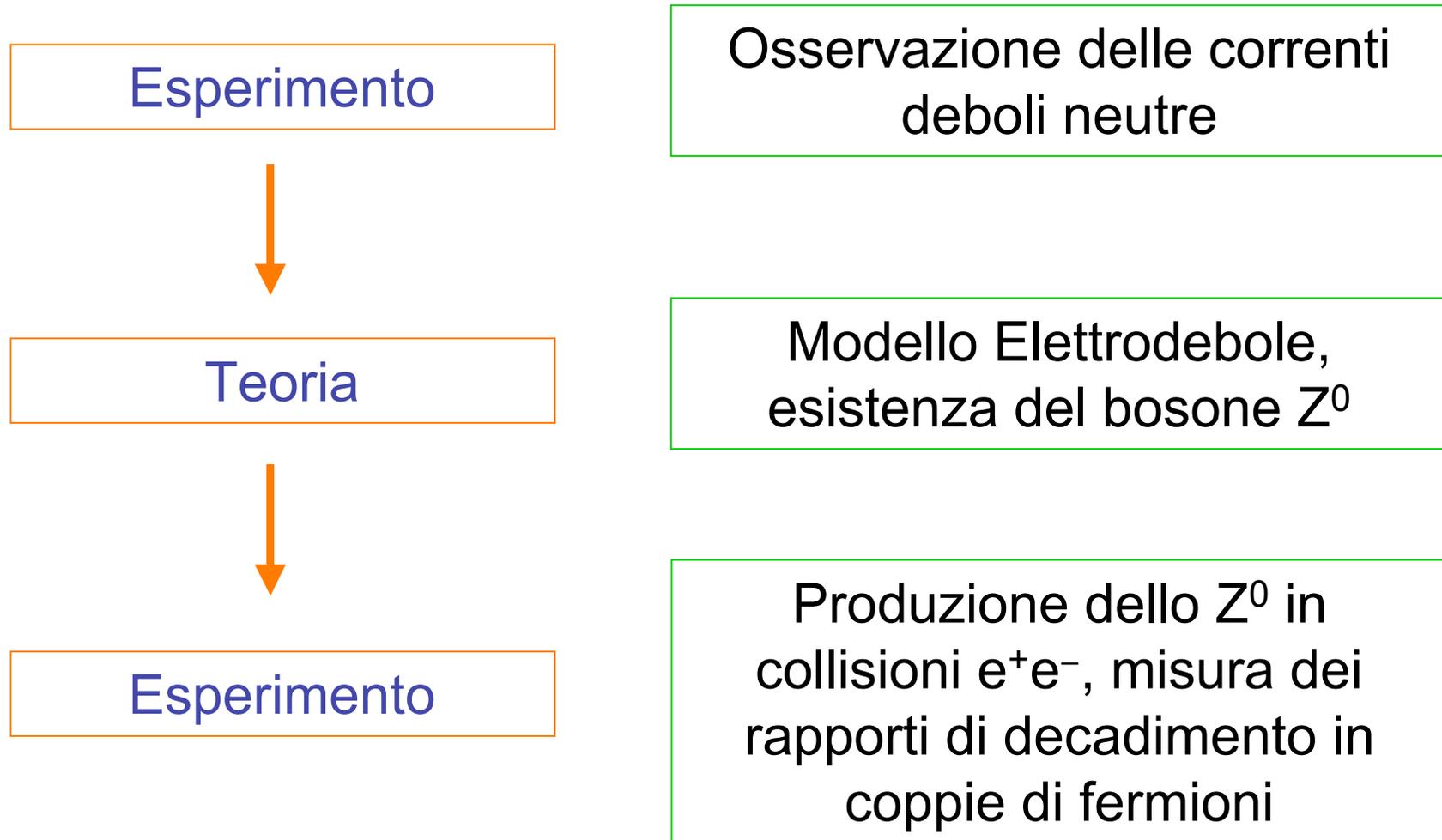
# Fisica delle Particelle: esperimenti

Fabio Bossi (LNF-INFN)  
[fabio.bossi@Inf.infn.it](mailto:fabio.bossi@Inf.infn.it)

## Il processo scientifico di conoscenza



## Il processo scientifico di conoscenza



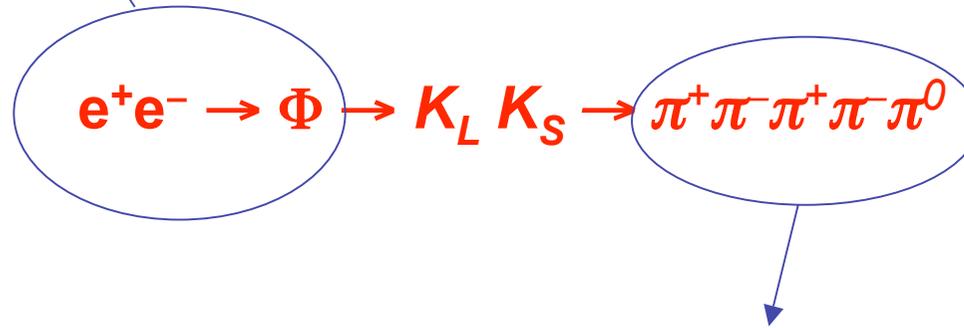
## Come funziona un esperimento di F.d.P.?

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

# ACCELERATORI DI PARTICELLE

Un fascio di particelle che colpisce un bersaglio o collide con un altro fascio produce *reazioni nucleari*, *annichilazioni* e *creazione di nuove particelle*

Il tipo di reazioni prodotte e' determinato esclusivamente dalla *natura* delle particelle collidenti, dalla loro *energia*, e dalla *frequenza* della collisioni

In natura avvengono continuamente reazioni di questo tipo (*raggi cosmici*), ma in luoghi e tempi *non controllabili a priori*

I fisici hanno sviluppato tecniche per produrre in laboratorio ed accelerare fasci di particelle di vario tipo (*elettroni*, *protoni*, *pioni* ecc...) ad energie ed intensita' sempre piu' elevate

## ACCELERATORI DI PARTICELLE

Una particella carica sottoposta ad un potenziale elettrico  $V$ ,  
varia la propria energia *proporzionalmente* a  $V$  ed alla sua  
carica  $q$

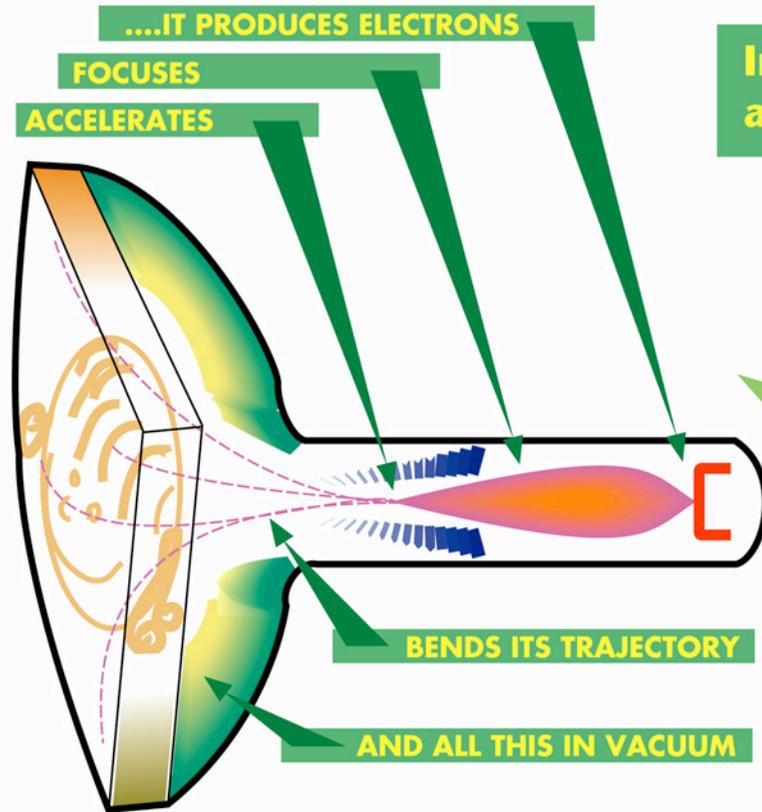
$$\Delta E = qV$$

Definiamo *elettronvolt* (**eV**), l'energia acquisita da un  
elettrone sottoposto ad un potenziale elettrico di 1 volt

Multipli dell'eV (molto usati in F.d.P) sono:

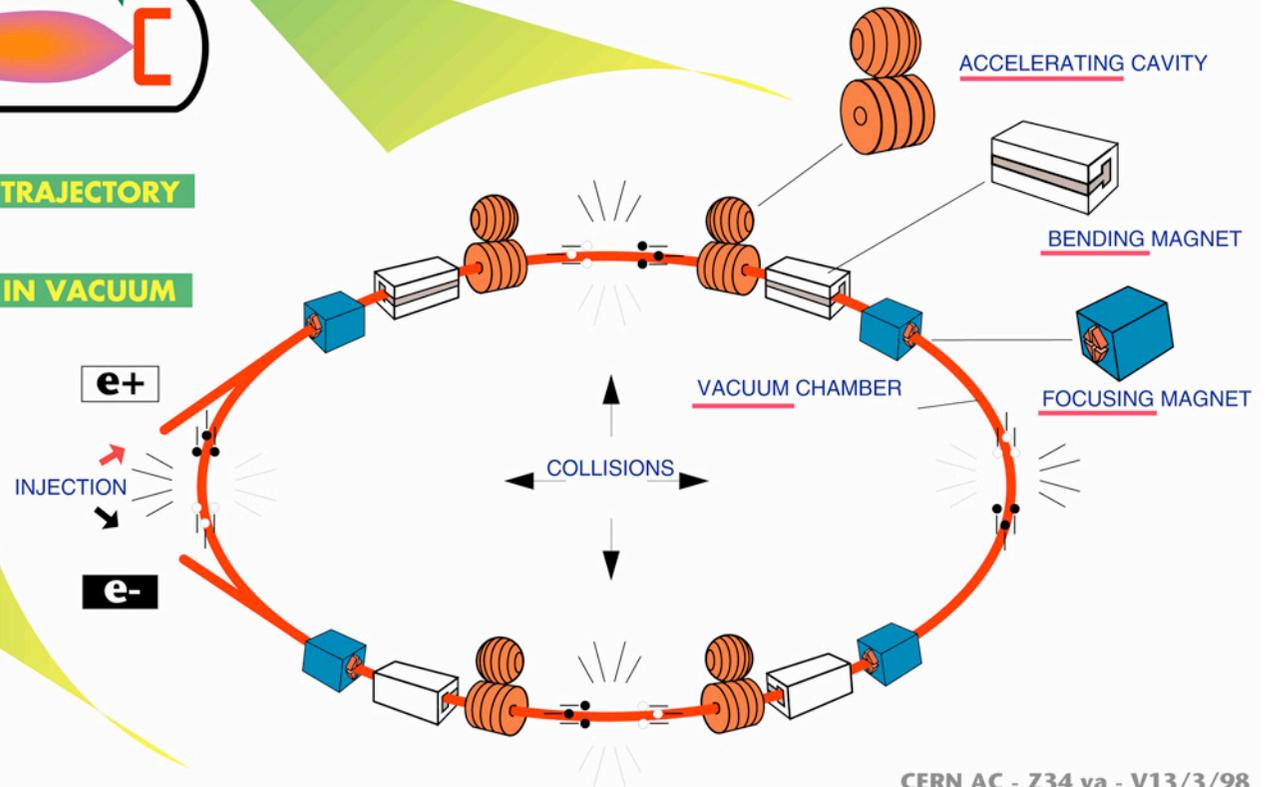
- Il *Megaelettronvolt* (**MeV**) =  $10^6$  eV
- Il *Gigaelettronvolt* (**GeV**) =  $10^9$  eV

# DID YOU KNOW YOUR TELEVISION SET IS AN ACCELERATOR ?



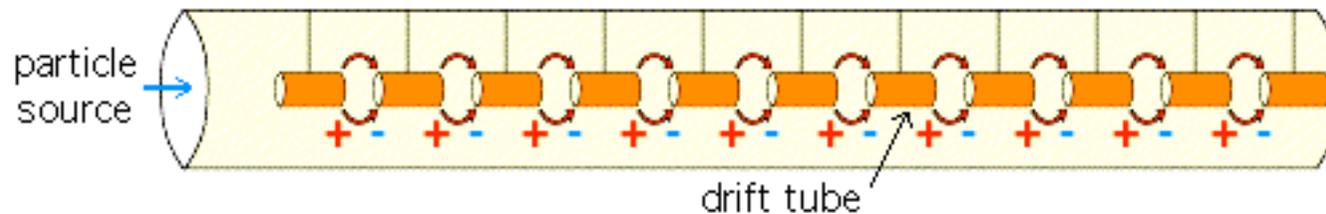
In your TV set, the electrons are accelerated to 20000 volts.

In LEP, they are accelerated to 100 000 000 000 volts.



## ACCELERATORI LINEARI (LINAC)

Come un enorme tubo catodico, un Linac e' costituito da una serie di elementi acceleranti disposti uno di seguito all'altro e opportunamente raccordati



Attualmente si riescono a produrre campi acceleranti di  
**20-30 MeV/m**

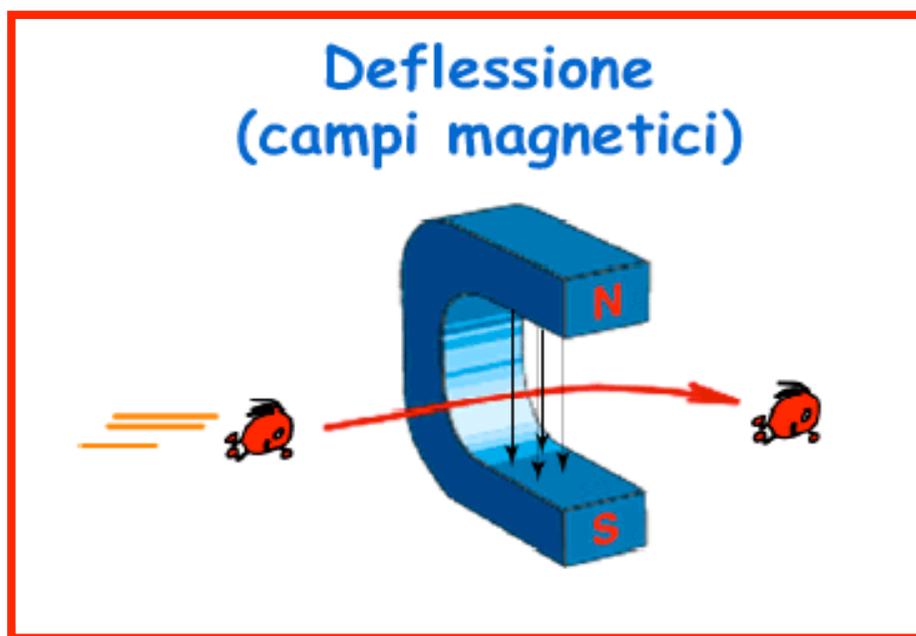
**I.L.C.** che aspira a raggiungere una energia di **500 GeV**  
dovra' essere lungo ~ **30 Km**

## IL LINAC DI DAΦNE A FRASCATI



$L \sim 60 \text{ m}$        $E_{\text{max}} = 750 \text{ MeV}$

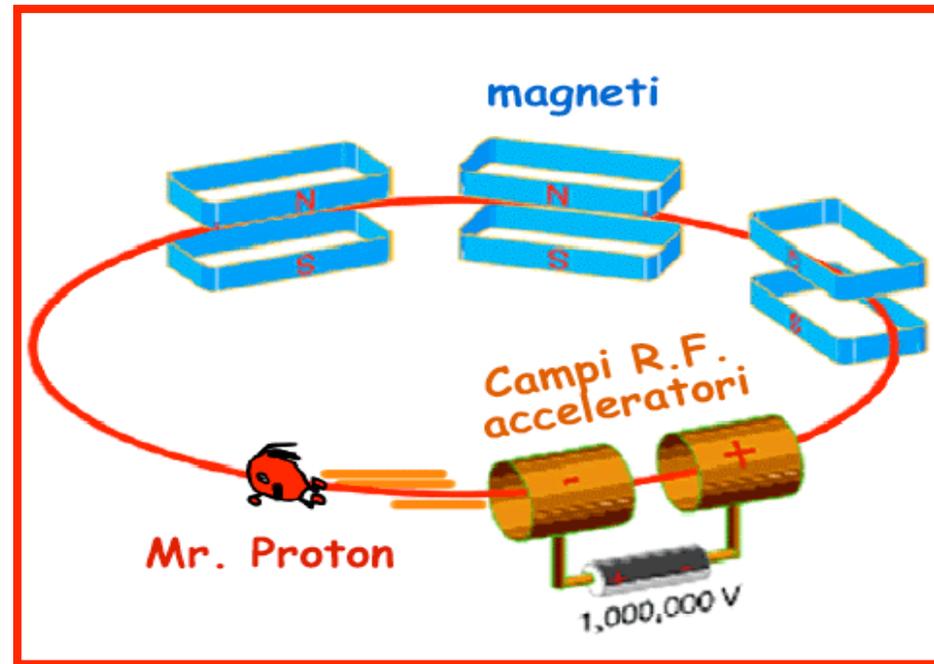
Una particella carica, sottoposta ad un *campo magnetico* perpendicolare alla sua direzione di moto, viene deflessa da una forza proporzionale alla sua *velocità*  $v$  e all'intensità del campo  $B$



$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Inoltre il *segno* della carica (+ o -) e la *direzione del campo* (in su o in giu') determinano se la deflessione avviene *verso sinistra* o *verso destra* rispetto alla direzione del moto

*Questo consente di mantenere le particelle lungo un'orbita circolare, sfruttando sempre i medesimi elementi acceleranti per il “rifornimento” di energia*



Inoltre consente di far circolare particelle di segno opposto (per esempio  $e^+$  ed  $e^-$ ) nello stesso anello, in direzioni opposte, facendole **collidere** in ben determinati punti dello stesso

Questo principio degli *anelli di accumulazione* e' stato sviluppato a Frascati negli anni 60 dal geniale fisico austriaco *Bruno Touschek*



Il primo anello di accumulazione (*Ada*) e' tuttora conservato in questo laboratorio

## UNA FORMULA FONDAMENTALE

La *frequenza* con cui avvengono le collisioni e' determinata da un parametro fondamentale dell'acceleratore: la Luminosita'

Numero di particelle per fascio

$$L = \frac{N^{e^+} N^{e^-}}{\sum_x \sum_y} \leftrightarrow f_c$$

Frequenza degli incroci tra i fasci

N.B. : non sempre ad un incrocio corrisponde una collisione!

Dimensioni trasverse dei fasci

La luminosita' si misura dunque in  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Generalmente si possono “impacchettare”  $\sim 10^{11}$   
particelle per fascio

La frequenza di rivoluzione dipende dalla lunghezza  
della macchina ed e' a DAΦNE di  $\sim 3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$

Le dimensioni dei fasci sono minimizzate con l'uso di  
magneti speciali detti *quadrupoli*

A DAΦNE  $\Sigma_x \sim 2 \text{ mm}$   $\Sigma_y \sim 0.015 \text{ mm}$

$$L = \frac{10^{11} \times 10^{11}}{0.2 \times 0.0015} \times 3 \times 10^6 = 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Ma la probabilità con cui avvengono le collisioni utili dipende solo dal tipo di reazione prodotta (cioè sostanzialmente da Madre Natura)

Il parametro che quantifica questa probabilità è la cosiddetta sezione d'urto ( $\sigma$ ) che si misura in  $\text{cm}^2$

La frequenza  $f$  di eventi di sezione d'urto  $\sigma$ , prodotti da un collider di luminosità  $L$  è dunque data da:

$$f = L \times \sigma \quad \text{s}^{-1}$$

*dipende dal collider*

*dipende dalla natura*

Le sezioni d'urto per processi nucleari o subnucleari sono generalmente molto piccole, dell'ordine di  $10^{-30} \div 10^{-33} \text{ cm}^2$

processo	$E(\text{GeV})$	$L(\text{m})$	$L(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$	$\sigma(\text{cm}^2)$	$f(\text{s}^{-1})$	
$e^+e^- \rightarrow Z^0$	90	LEP	27000	$3 \times 10^{31}$	$3 \times 10^{-32}$	$\sim 1$
$e^+e^- \rightarrow \Phi$	1	DAΦNE	100	$10^{32}$	$3 \times 10^{-30}$	$\sim 300$

Attenzione: in generale in un collider vengono prodotti piu' processi fisici concorrenti alla stessa energia!

A DAΦNE per esempio, la frequenza complessiva di eventi fisici e' di circa  $1000 \text{ s}^{-1}$  (1 kHz)

*E' possibile produrre fasci di particelle neutre?*

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

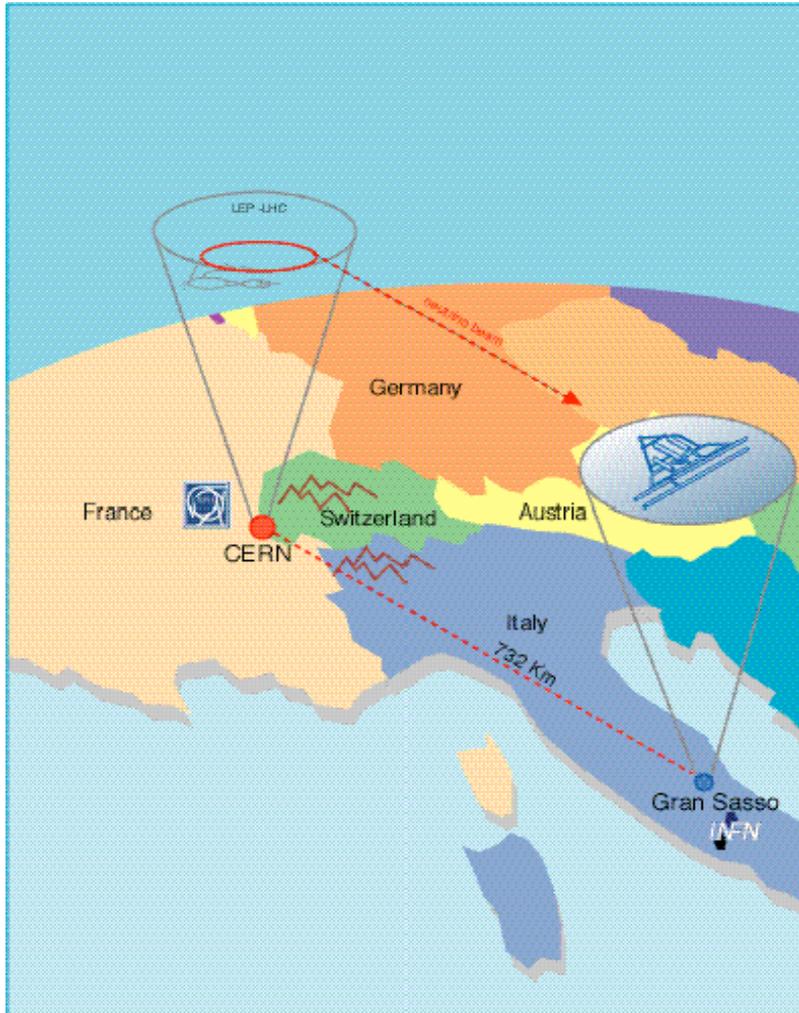


*Particelle cariche deflesse da campi magnetici*

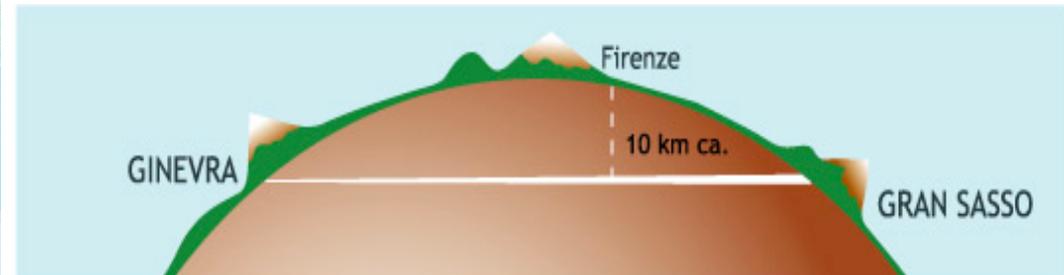
In questo modo si possono selezionare fasci di  $K^0$ ,  $\nu$ ...



## CNGS CERN to Gran Sasso Neutrino Project



Un fascio di  $\nu_{\mu}$  viene  
prodotto al CERN di  
Ginevra e rivelato al Gran  
Sasso dopo un viaggio di  
**730 km**



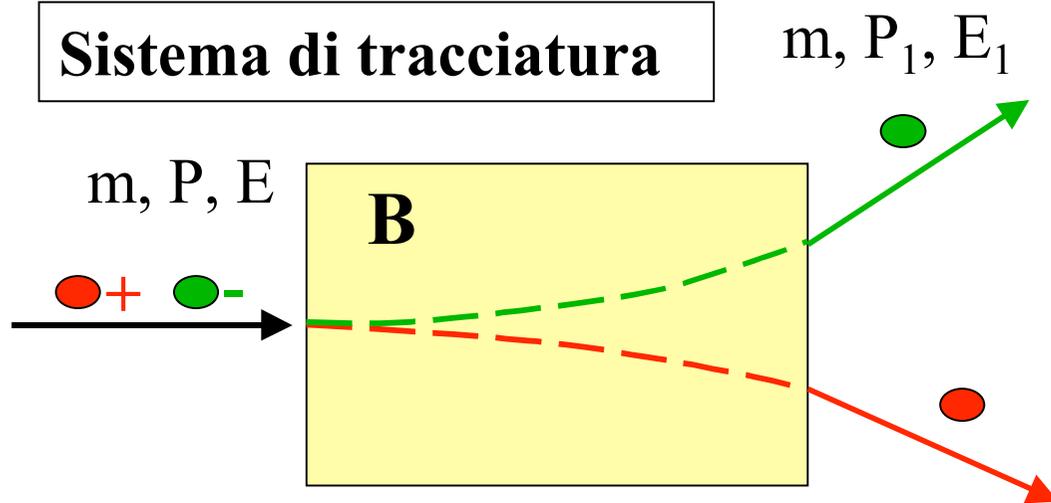
## RIVELATORI DI PARTICELLE

I rivelatori di particelle sono strumenti che producono un *segnale osservabile* al passaggio di una particella in un determinato mezzo.

Esistono molti diversi tipi di rivelatore, ottimizzati per rivelare e misurare *tipi diversi* di particelle ed *informazioni fisiche diverse* (energie, momenti...)

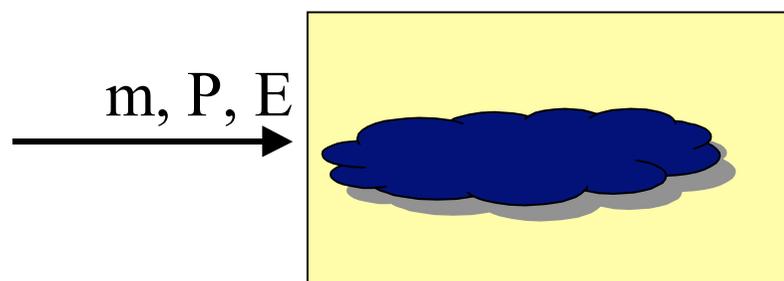
In generale un apparato di F.d.P. sfrutta le informazioni di *parecchi rivelatori* opportunamente combinati

## Sistema di tracciatura



- Il sistema di tracciatura determina la traiettoria della particella
- Se immerso in un campo magnetico **B** si riescono a determinare anche la carica Q ed il momento P
- La particella subisce una minima perdita d'energia nel sistema

## Sistema Calorimetrico

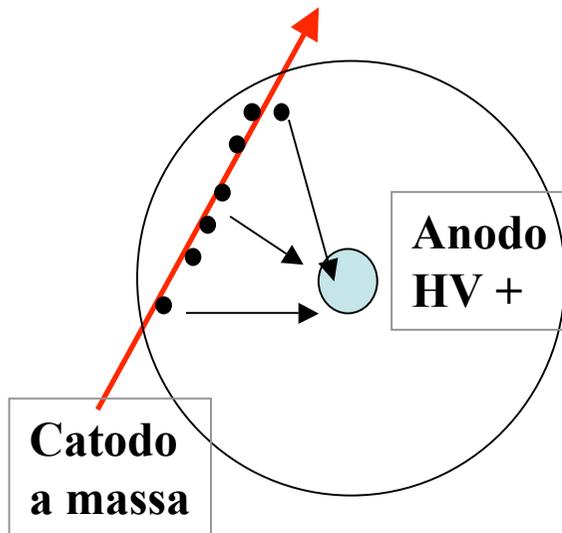


- In questo caso invece la particella viene quasi completamente assorbita
- Il segnale è proporzionale alla sua energia:

$$S = K E$$

## RIVELATORI A IONIZZAZIONE

- Le particelle cariche che attraversano un gas **lo ionizzano** creando delle coppie elettrone ( $e^-$ ) Ione ( $X^+$ ) (**Ionizzazione primaria**).
- Gli  $e^-$  emessi ( **$\delta$ -rays**) possono produrre a loro volta **Ionizzazione secondaria**.



In presenza di **campo elettrico** gli elettroni viaggiano verso l'anodo (gli ioni verso il catodo), **producendo un segnale elettrico**

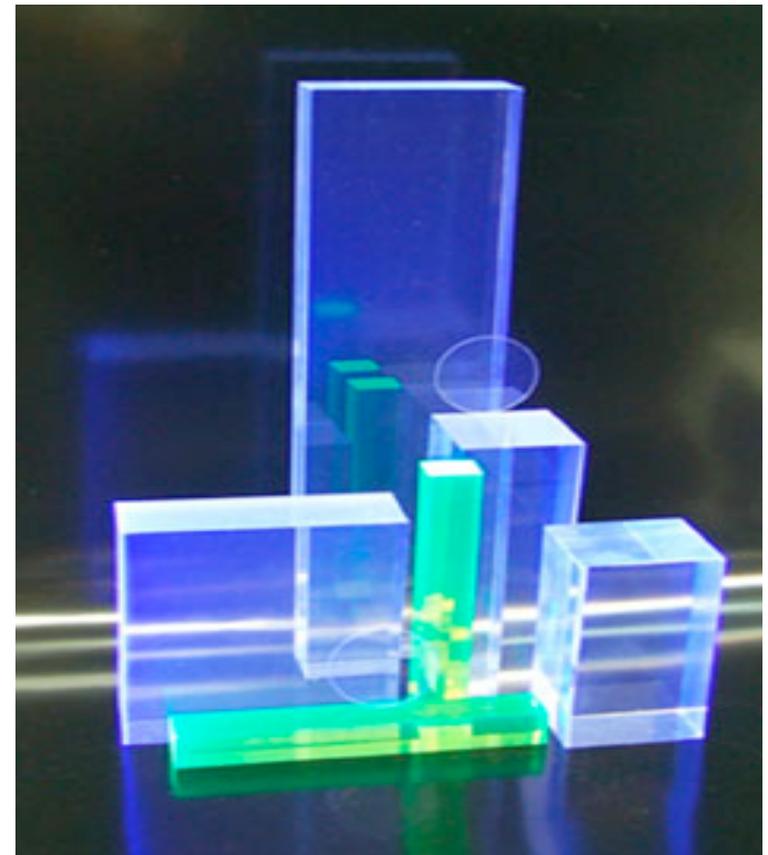
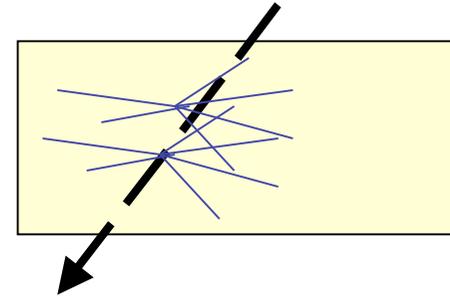
La ionizzazione e' utilizzata principalmente nei rivelatori traccianti

## RIVELATORI A SCINTILLAZIONE

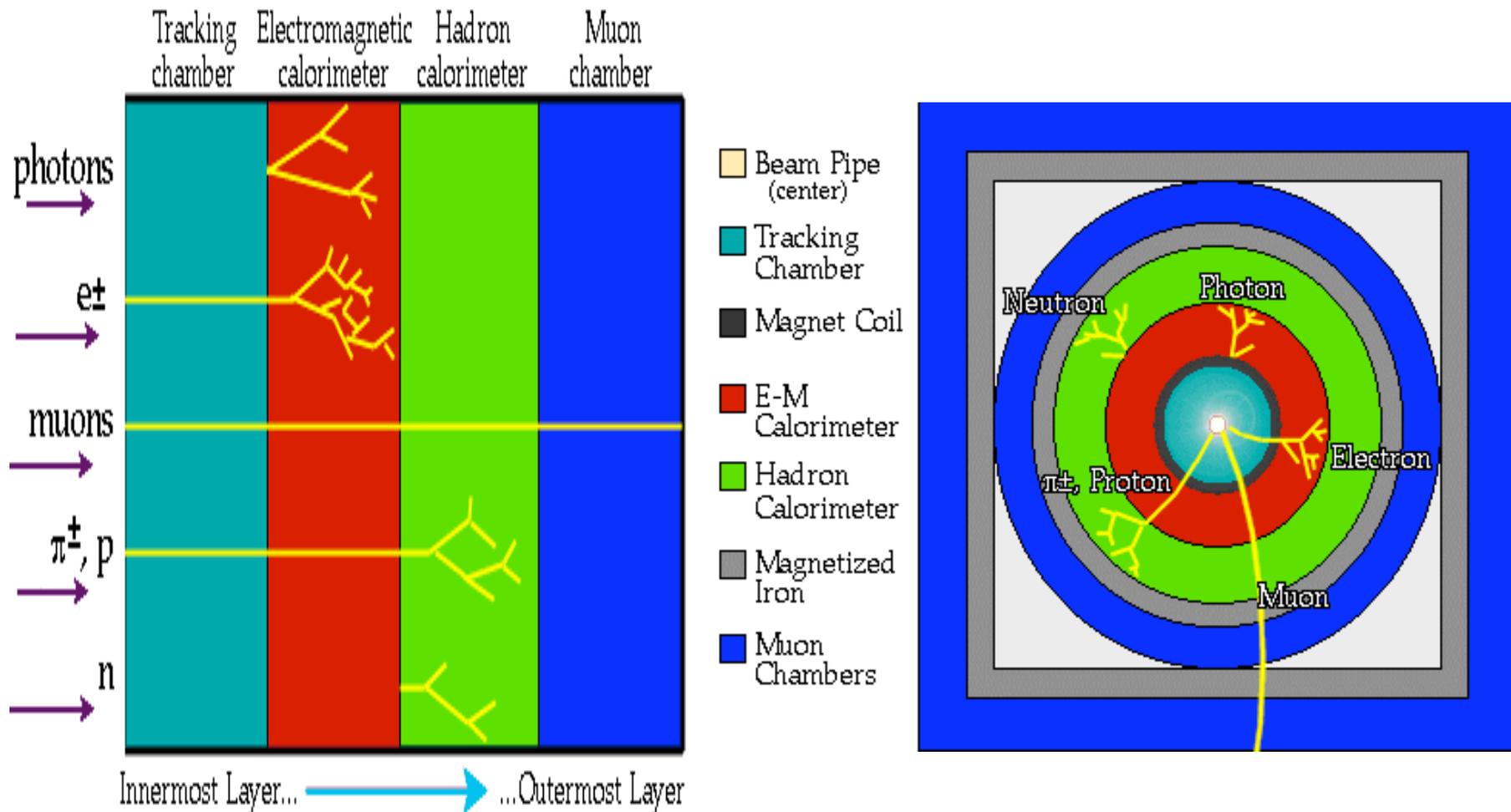
Una particella carica, attraversando uno scintillatore, perde energia eccitando gli atomi del materiale. Questi ultimi, diseccitandosi, *emettono luce visibile* (detta *luce di scintillazione*).

Esistono differenti tipi di materiali scintillanti, sia sotto forma di *cristalli* che di *materiali plastici*

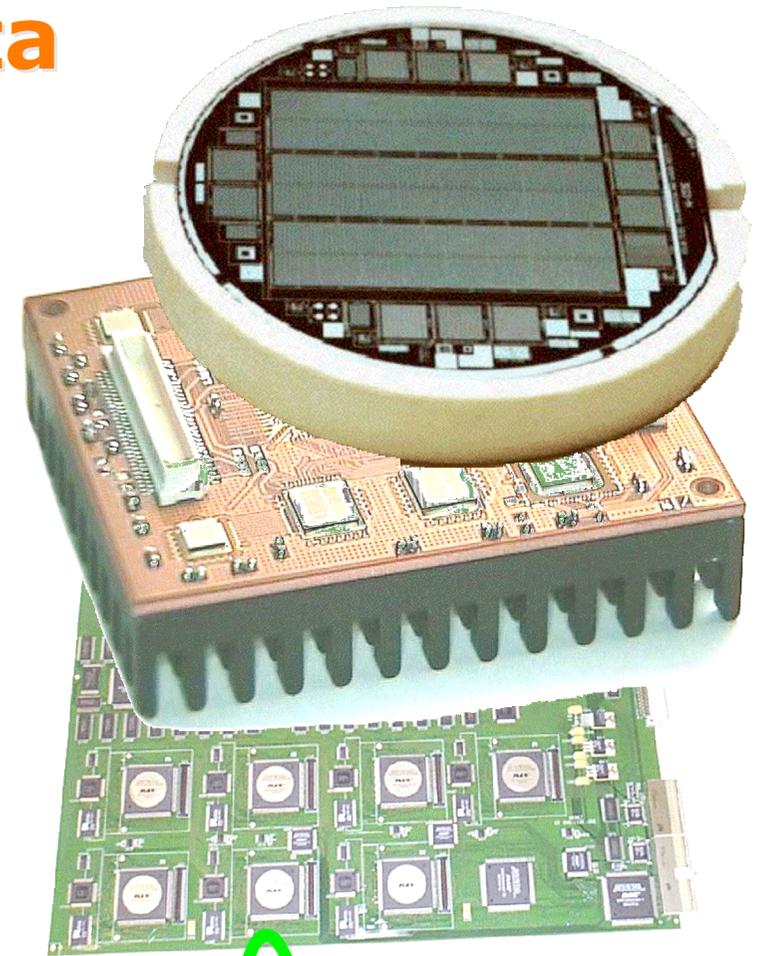
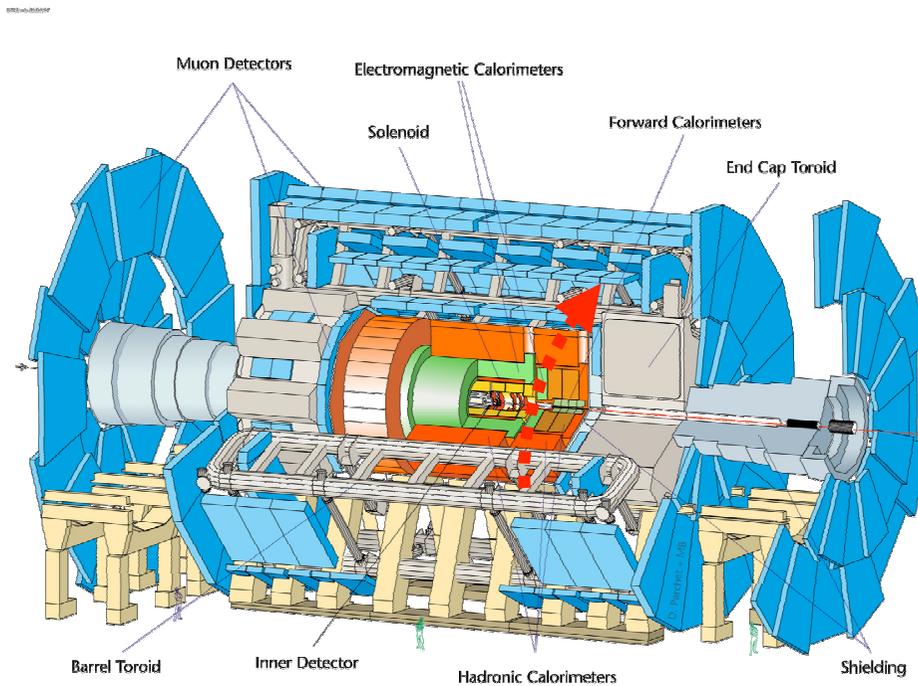
La scintillazione e' utilizzata principalmente nei calorimetri



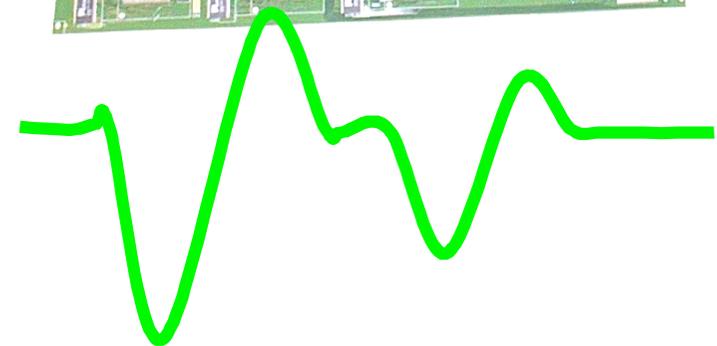
Il numero e il tipo di rivelatori usati e le dimensioni di un esperimento sono dettate dagli obiettivi di misura da raggiungere e dal tipo di acceleratore utilizzato



# Electronica specializzata



**raccoglie i segnali dei rivelatori**

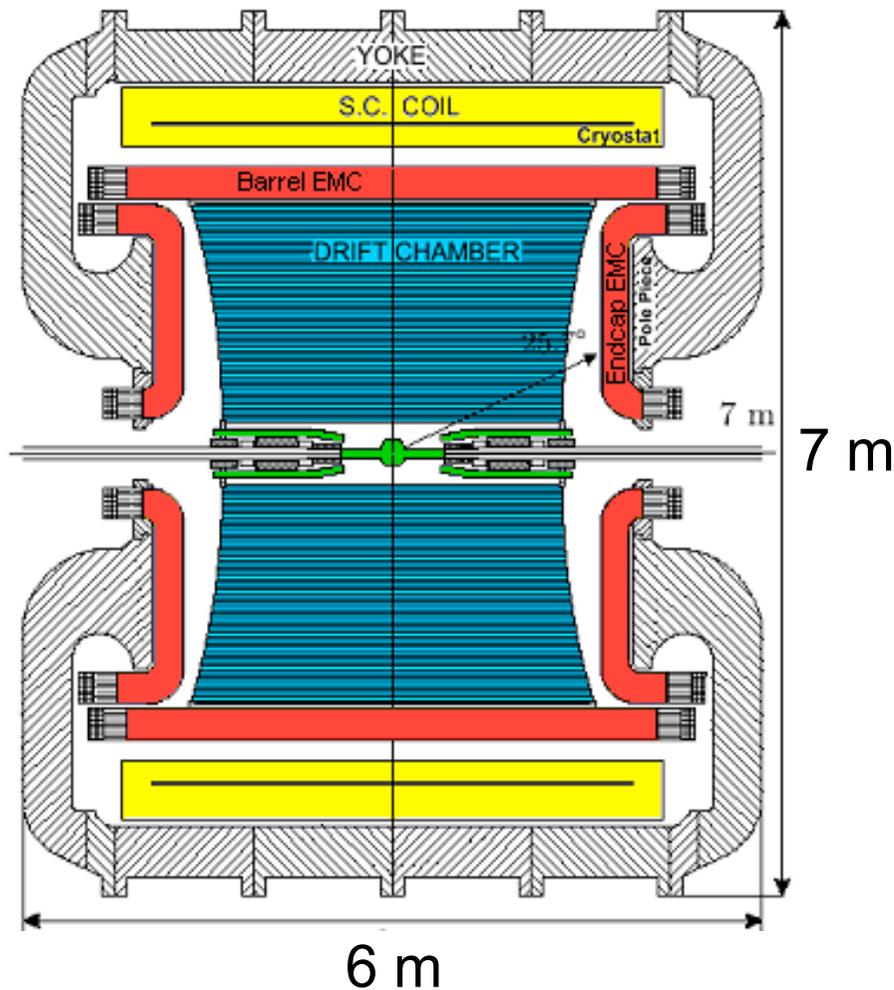




- I dati vengono analizzati online

- da migliaia di computers

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

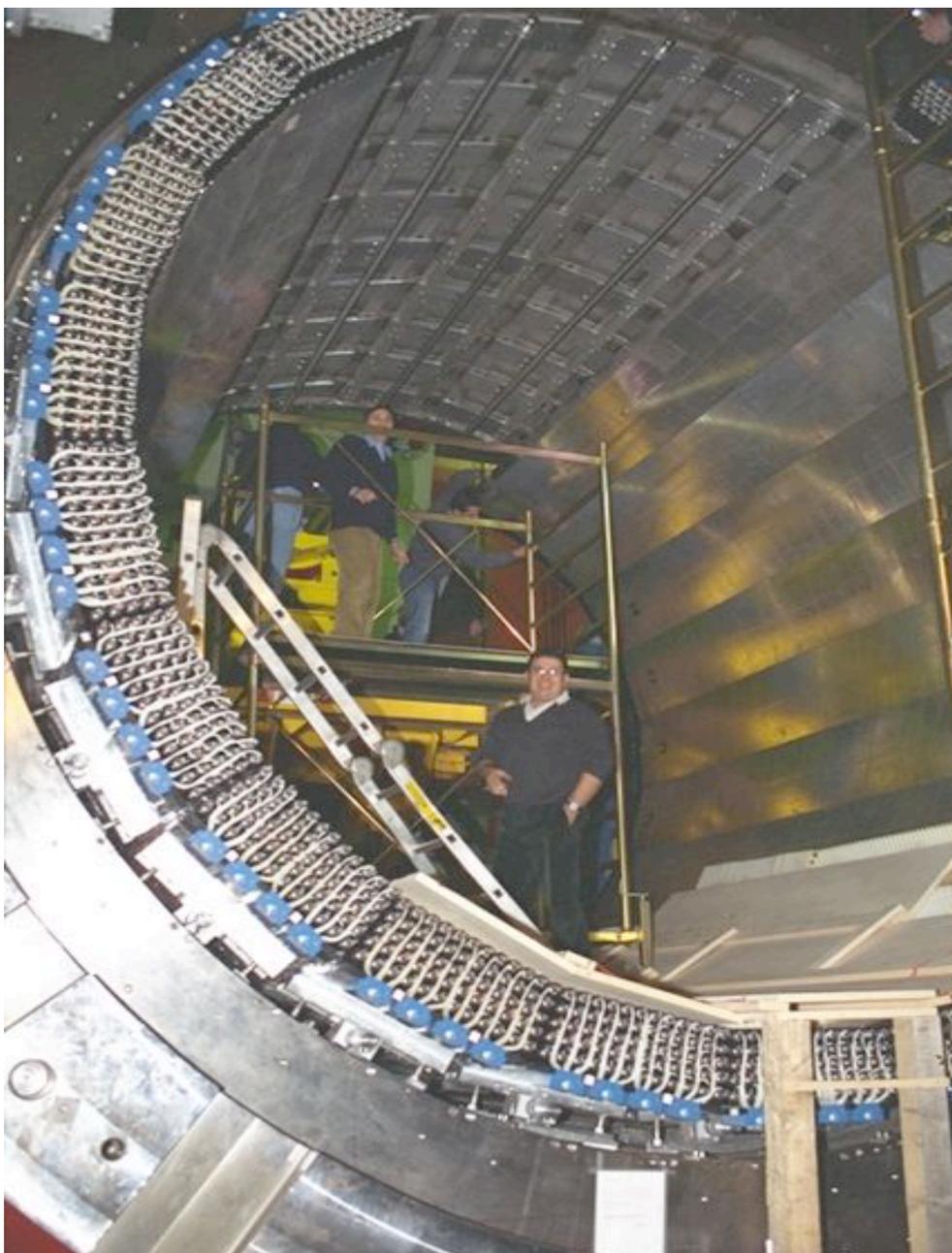
I principali vantaggi di questa tecnica sono:

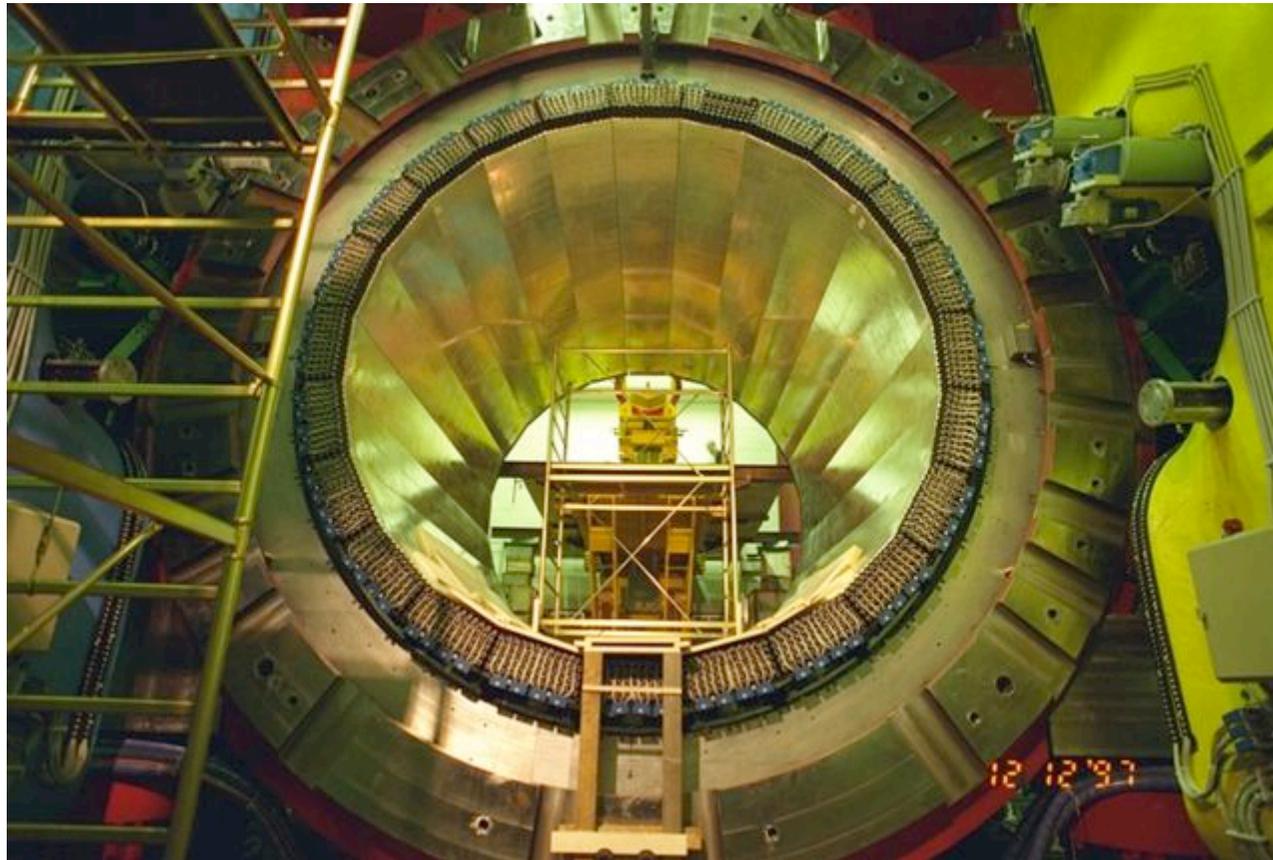
- A) Grande velocita' di risposta ( $\sim 20$  ns)
- B) Grande precisione nella misura dei tempi di impatto delle particelle ( $\sim 100$  ps)
- C) Possibilita' di lavorare i moduli nelle forme preferite: grande ermeticita'

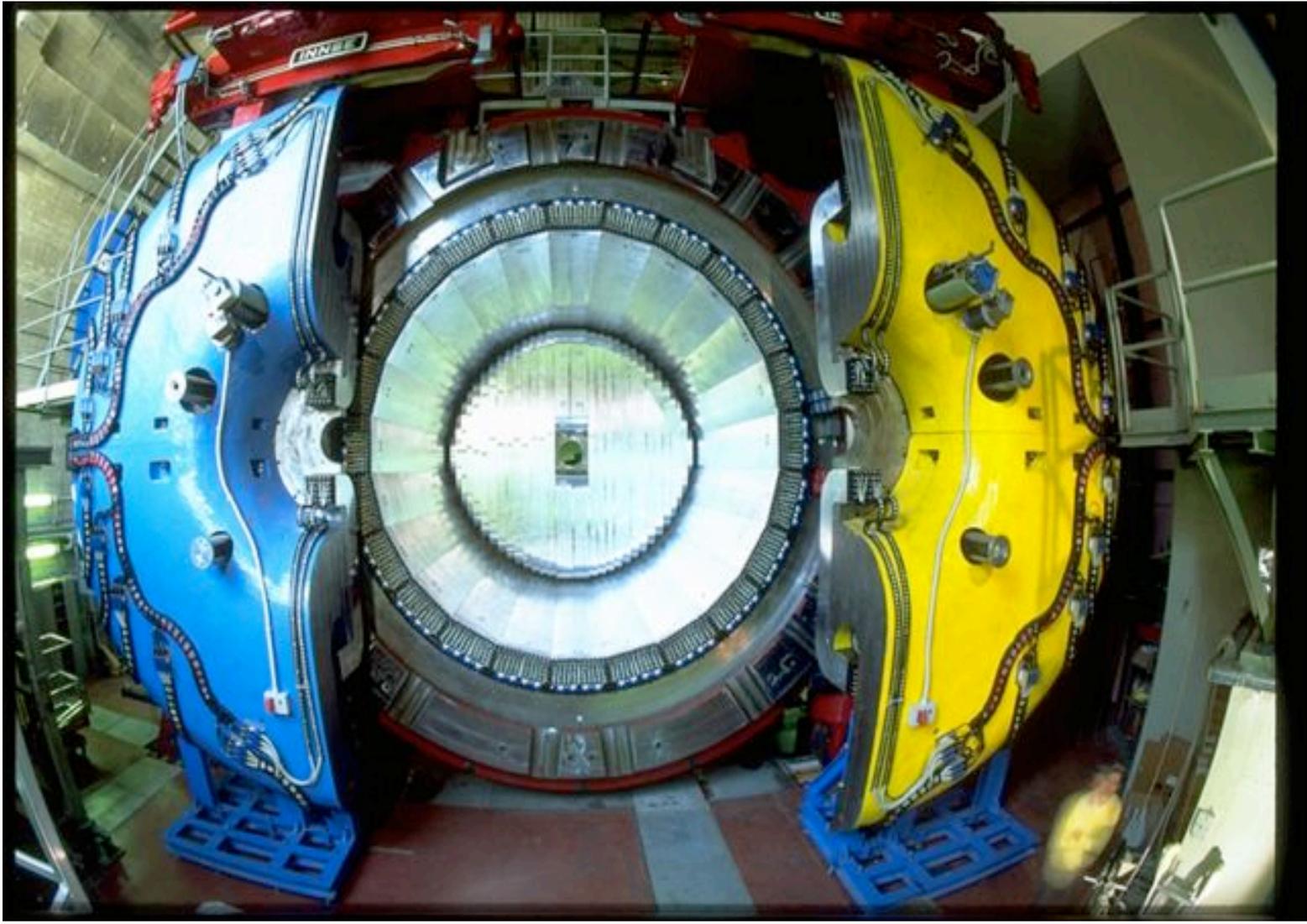
Piccoli svantaggi di questa tecnica sono:

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





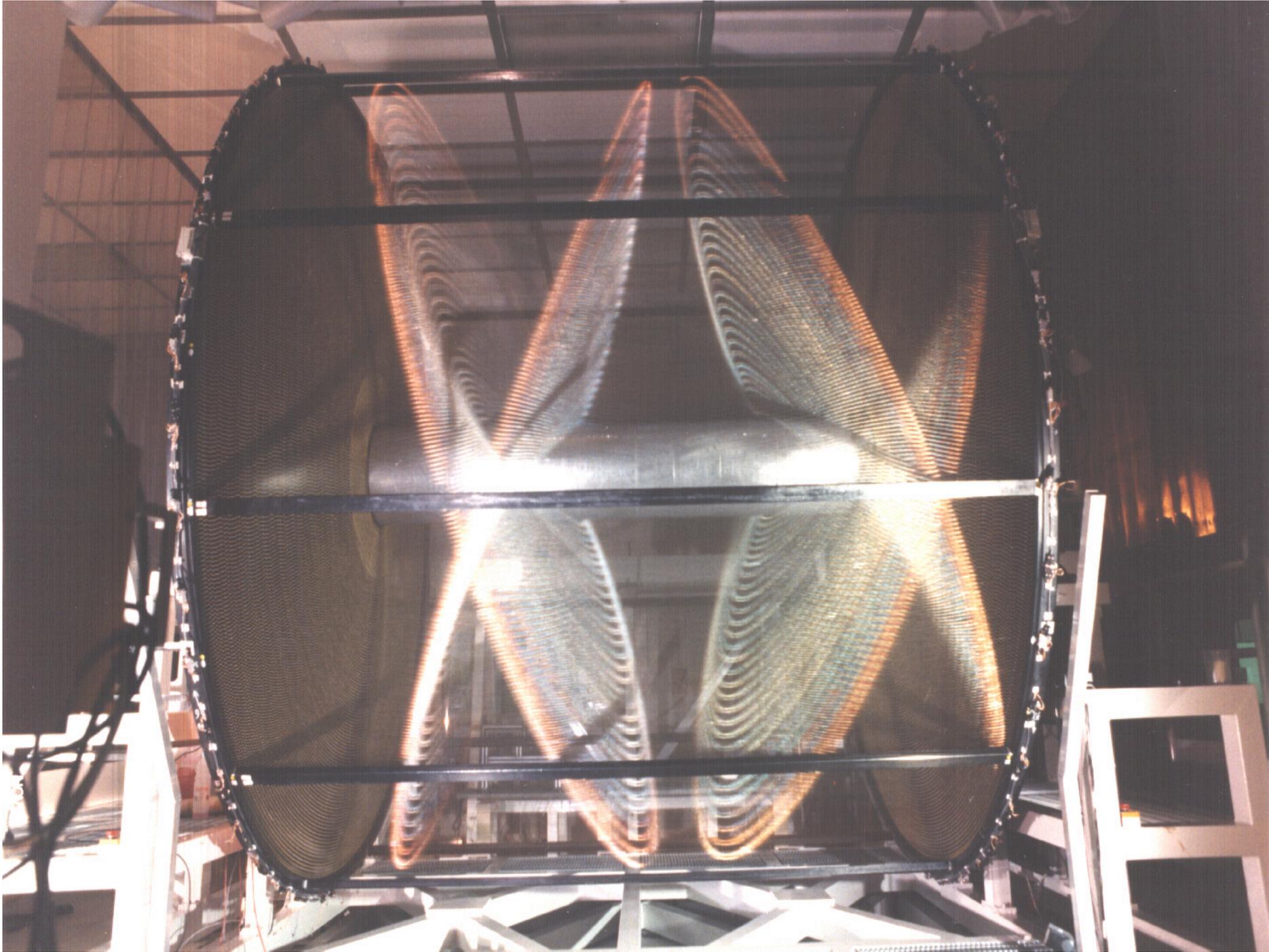


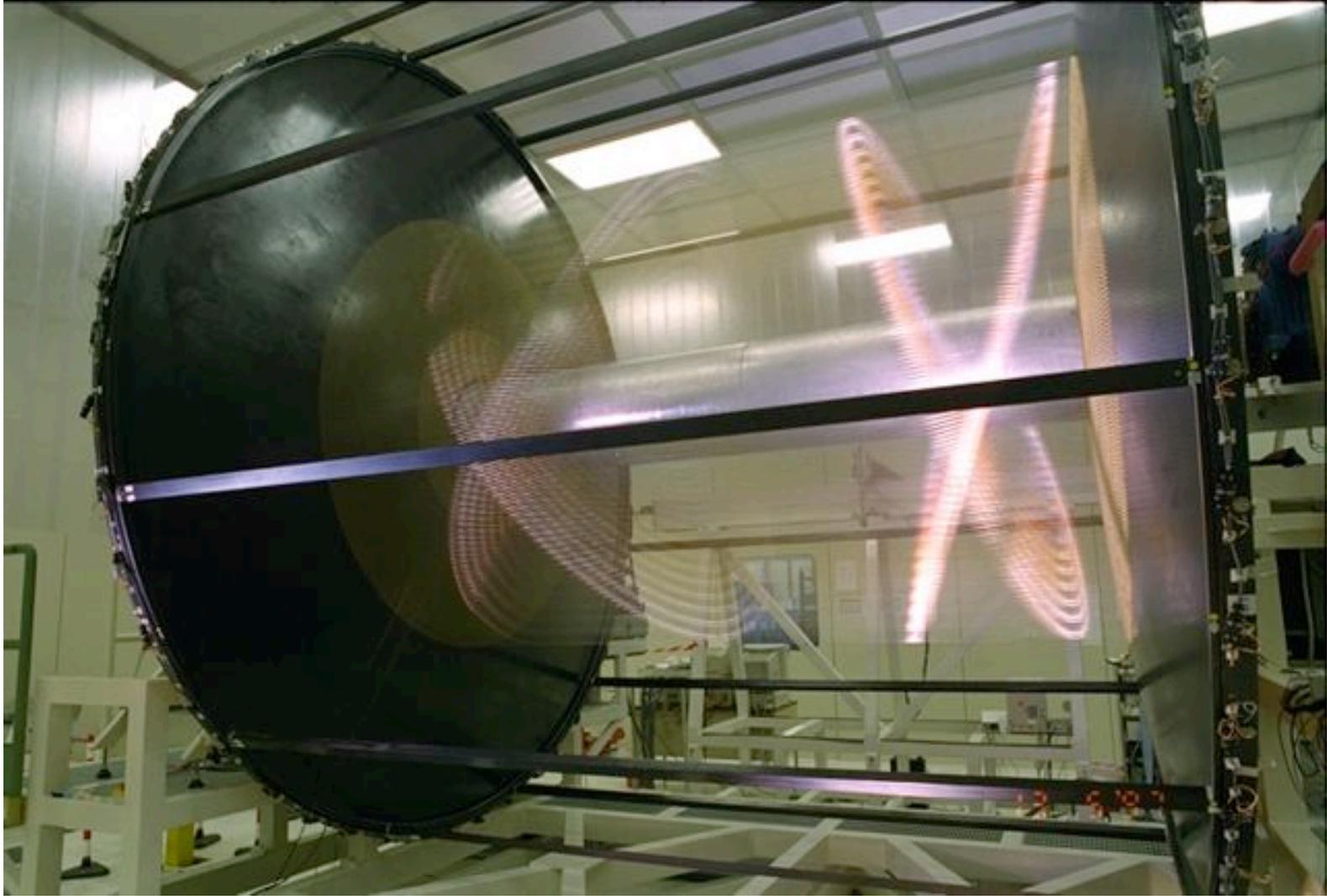


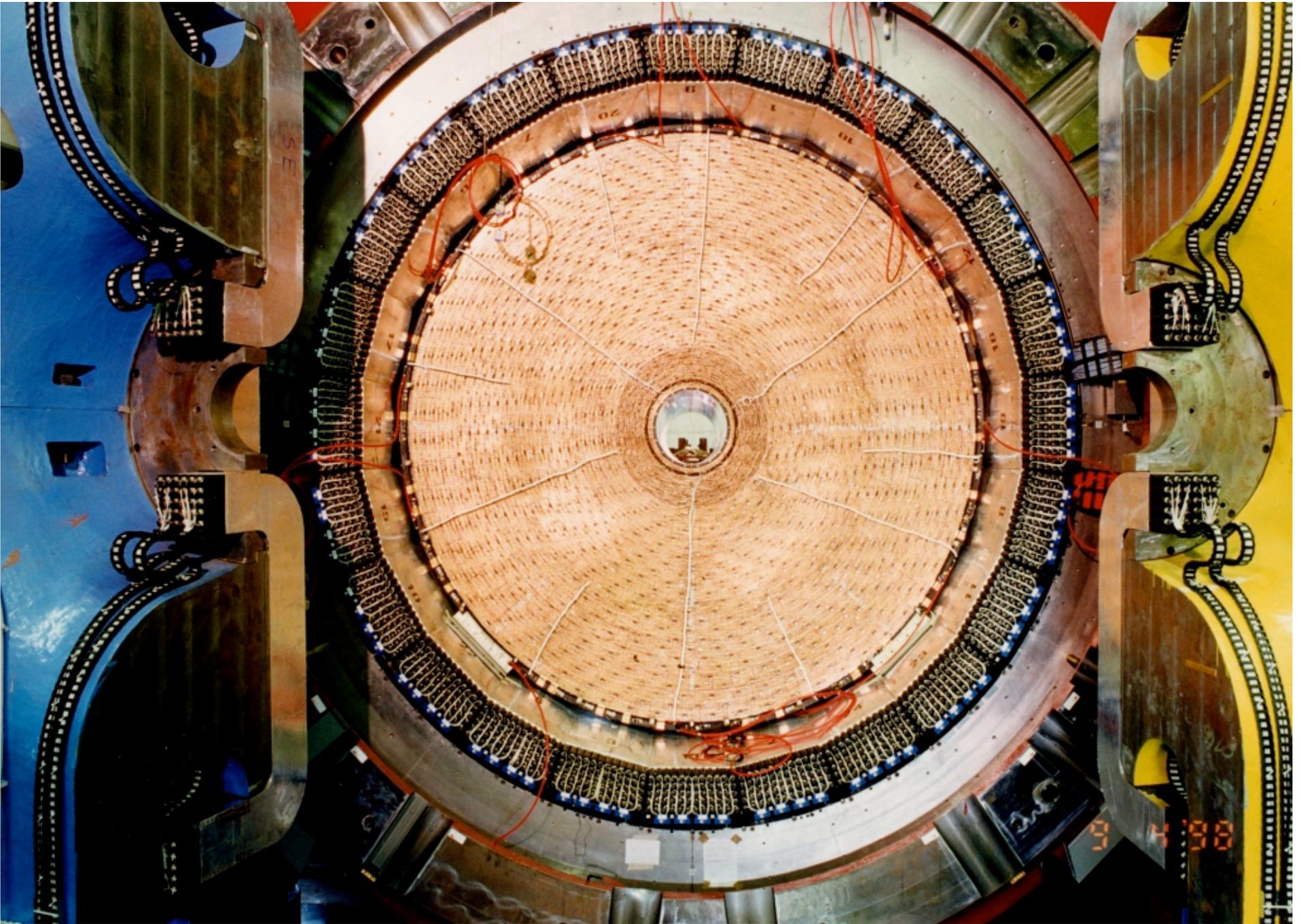
La *camera a deriva* consta di > 50000 fili di cui ~  
12000 sono quelli “di senso”

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!*







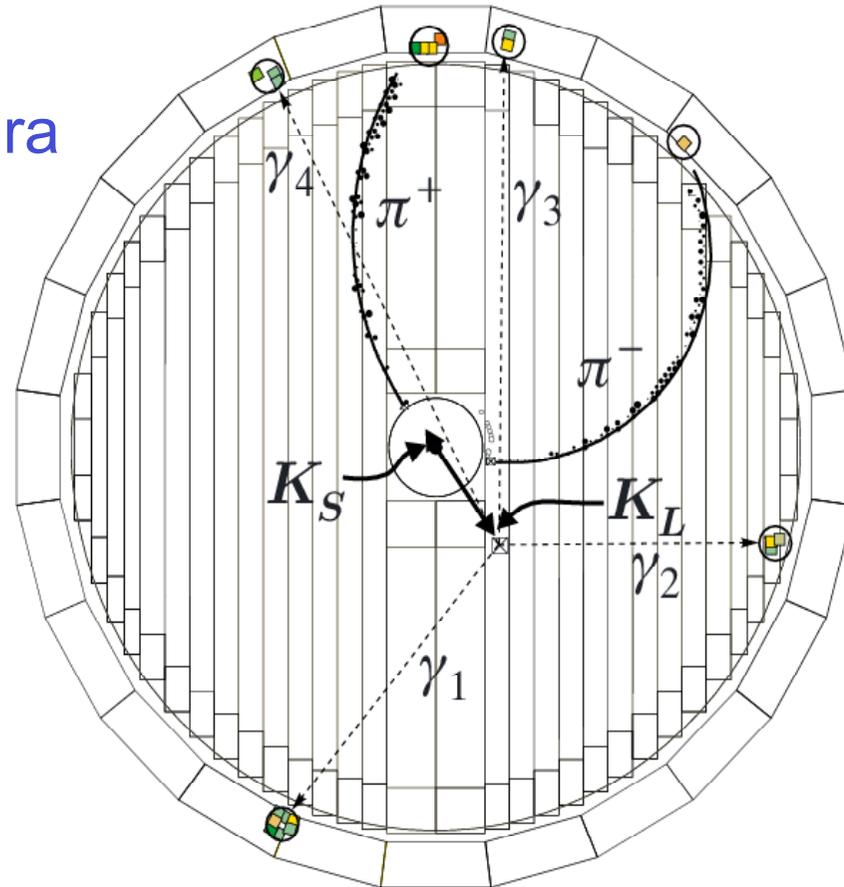




Esempio di  $\phi \rightarrow K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$   
 $K_L \rightarrow \pi^0\pi^0$

*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

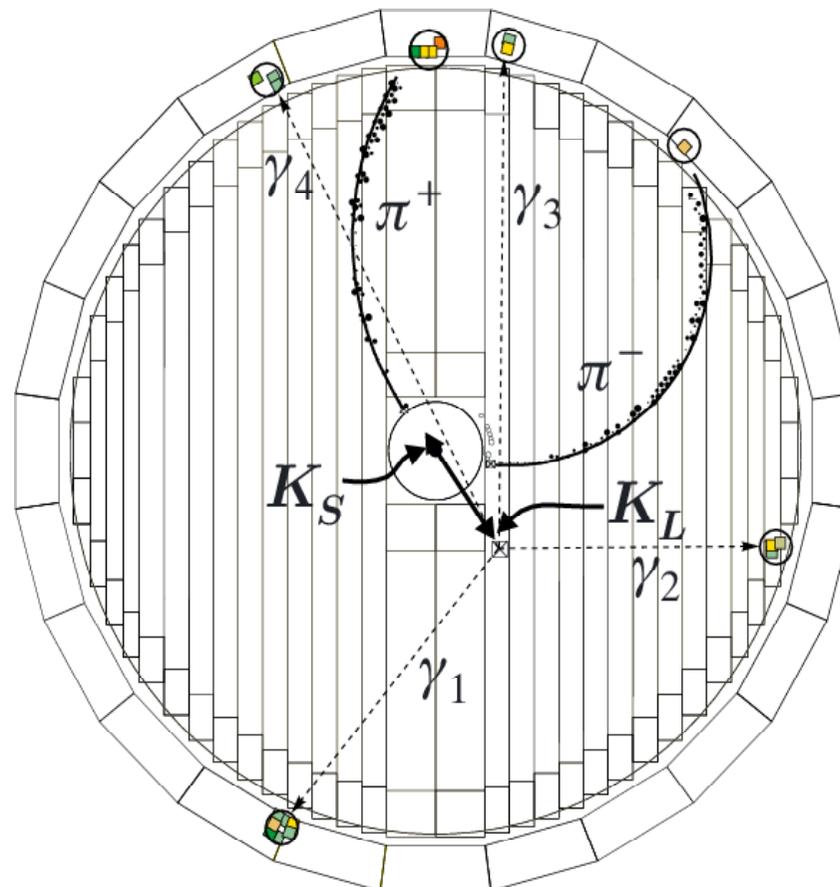
*Le energie ed i tempi di arrivo*  
dei depositi calorimetrici

***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) Marcare la presenza di un  $K_S$  osservando il  $K_L$  nell'emisfero opposto
- 2) Cercare eventi con 6 depositi di energia (2 fotoni per ciascun  $\pi^0$ ) e *nessuna* traccia
- 3) Chiudere la cinematica dell'evento

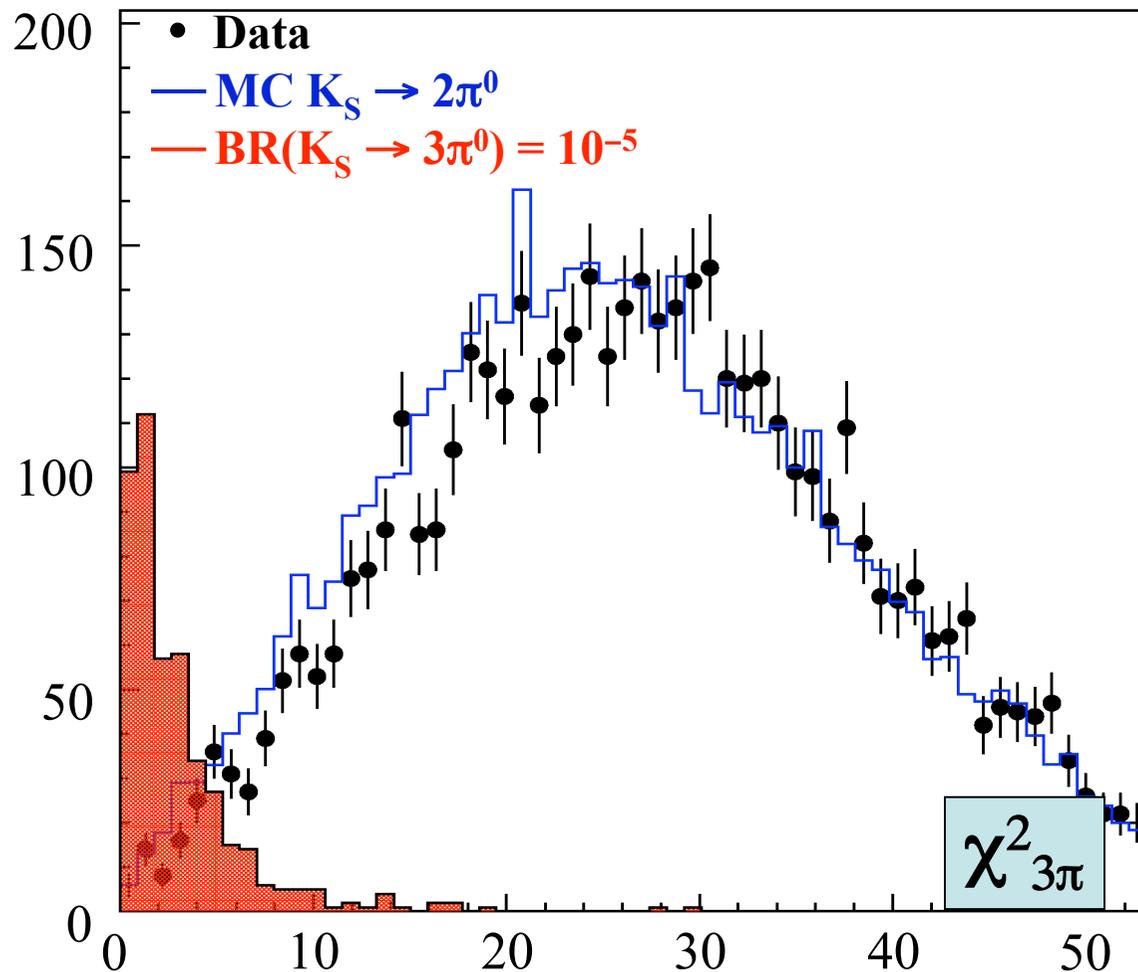
*Sembra facile!*

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'e' evidenza di segnale*

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

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?*