

I rivelatori di particelle nella fisica sub-nucleare



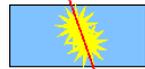
 Cosa sono e a cosa servono I rivelatori di particelle

 Idee generali alla base dei rivelatori di particelle

 Il passaggio delle particelle all'interno dei materiali: principi generali



 Gli scintillatori



 I rivelatori a gas



 I rivelatori a stato solido



 Identificazione di particelle



 Altri usi dei rivelatori di particelle

Bibliografia

◆ Libri di Testo

- K. Kleinknecht, *Detectors for particle radiation*, 2nd edition, Cambridge University press 1998
- W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, 2nd edition, Springer 1994

◆ Articoli di rassegna

- *Experimental techniques in high energy physics*, T. Ferbel (editor), World Scientific 1991
- *Instrumentation in High Energy Physics*, F. Sauli (editor), World Scientific 1992

◆ Altre fonti

- *Review of Particle Physics*, (Eur. Phys. Jou. C, Vol. 15 N.1- 4, 2000)
- <http://training.web.cern.ch/Training/ACAD/Transparencies/Joram300398/pd1/index.html>
- *The Particle Detector Briefbook*, <http://rkb.home.cern.ch/rkb/titleD.html>
- TERA foundation home page http://www.tera.it/index_it.html

Definizioni e unita` di misura

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

- Energia E misurata in eV
- impulso p misurato in eV/c
- massa m_0 misurata in eV/c²

$$\mathbf{b} = \frac{v}{c}$$

$$\mathbf{g} = \frac{1}{\sqrt{1 - \mathbf{b}^2}}$$

$$E = m_0 \mathbf{g} c^2$$

$$p = m_0 \mathbf{g} \mathbf{b} c$$

$$\mathbf{b} = \frac{p c}{E}$$

ma quanta energia e` 1 eV? $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ Kg}$



$$m_{\text{ape}} = 1 \text{ g} = 5.8 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

$$v_{\text{ape}} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{\text{ape}} = 10^{-3} \text{ J} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$E_{\text{LHC}} = 14 \cdot 10^{12} \text{ eV}$$

tuttavia volendo riabilitare LHC...

L'energia totale di LHC:

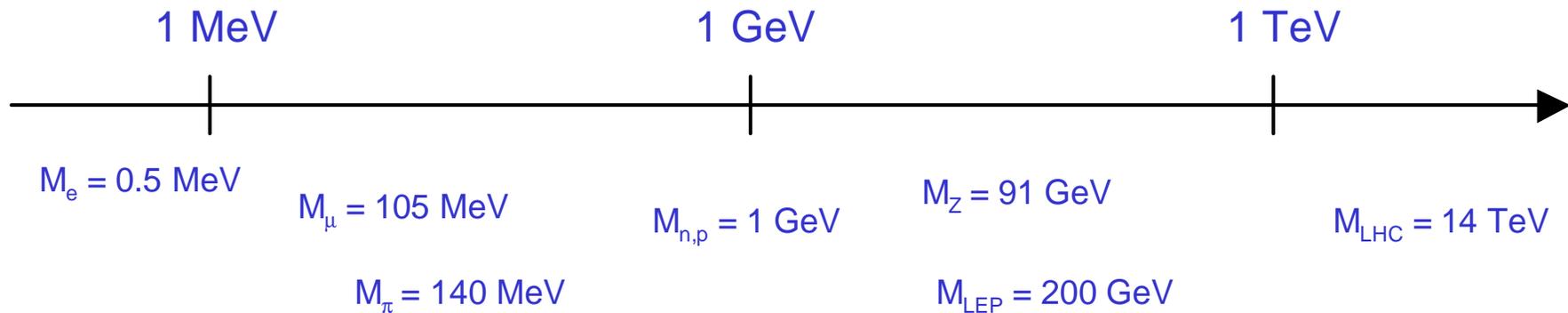
10^{14} protoni * $14 \cdot 10^{12} \text{ eV} \approx 10^8 \text{ J}$ questo corrisponde a



$$m_{\text{camion}} = 100 \text{ T}$$

$$v_{\text{camion}} = 120 \text{ Km/h}$$

Alcuni valori di massa ed energia...



Valori tipici di lunghezze

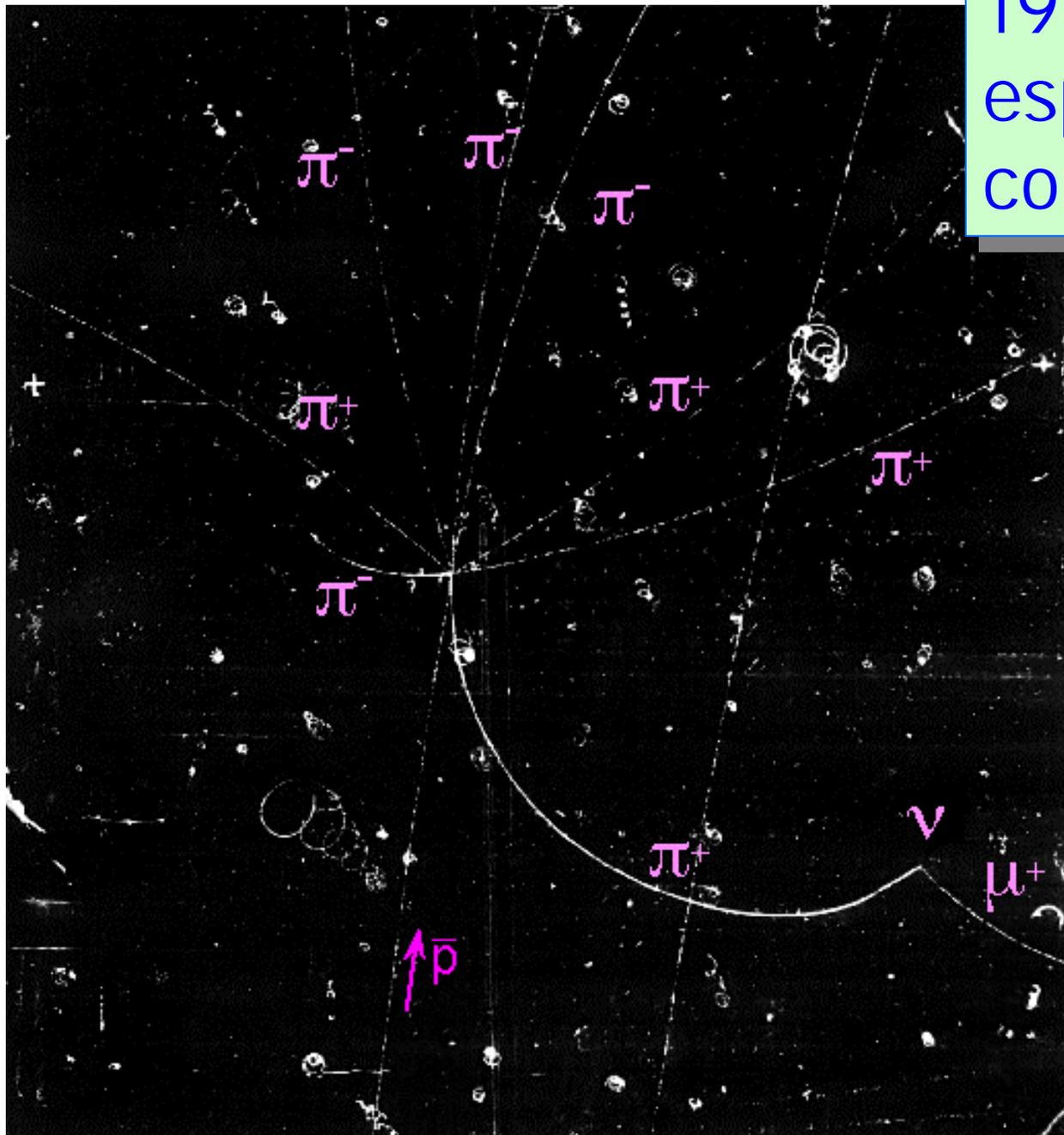
- 1 μm (10^{-6} m) risoluzione spaziale dei rivelatori
- 1 nm (10^{-9} m) lunghezza d'onda della luce verde 500 nm
- 1 \AA (10^{-10} m) dimensione dell'atomo
- 1 fm (10^{-15} m) dimensione del protone

Valori tipici di tempo

- 1 μs (10^{-6} s) tempo di deriva di un elettrone in 5 cm di Ar
- 1 ns (10^{-9} s) un elettrone relativistico percorre 30 cm
- 1 ps (10^{-12} s) vita media di un mesone B

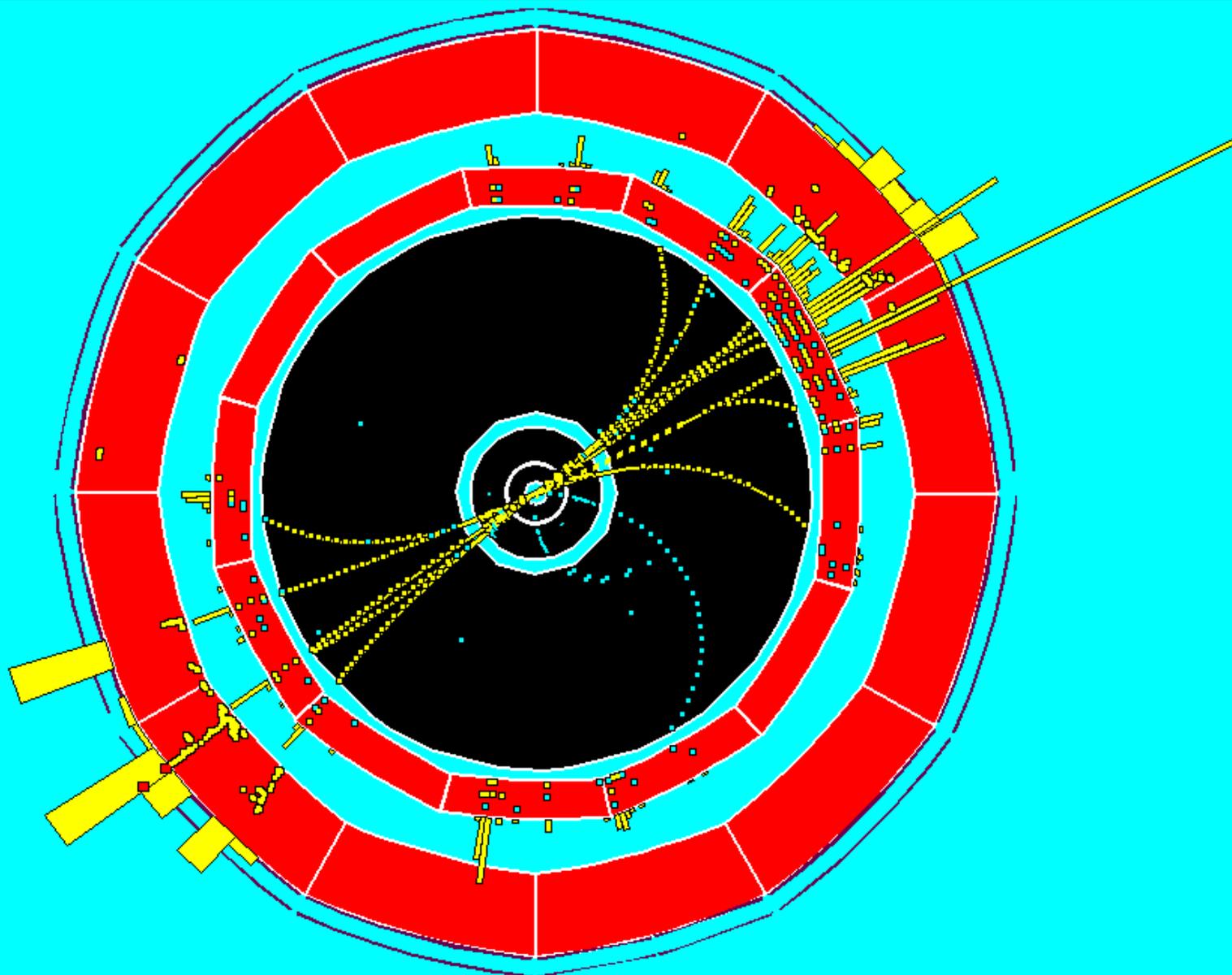
spesso per semplificare le formule si pone $\eta = c = 1 \rightarrow E^2 = \vec{p}^2 + m_0^2 \rightarrow [E] = [m] = [p] = \text{eV}$

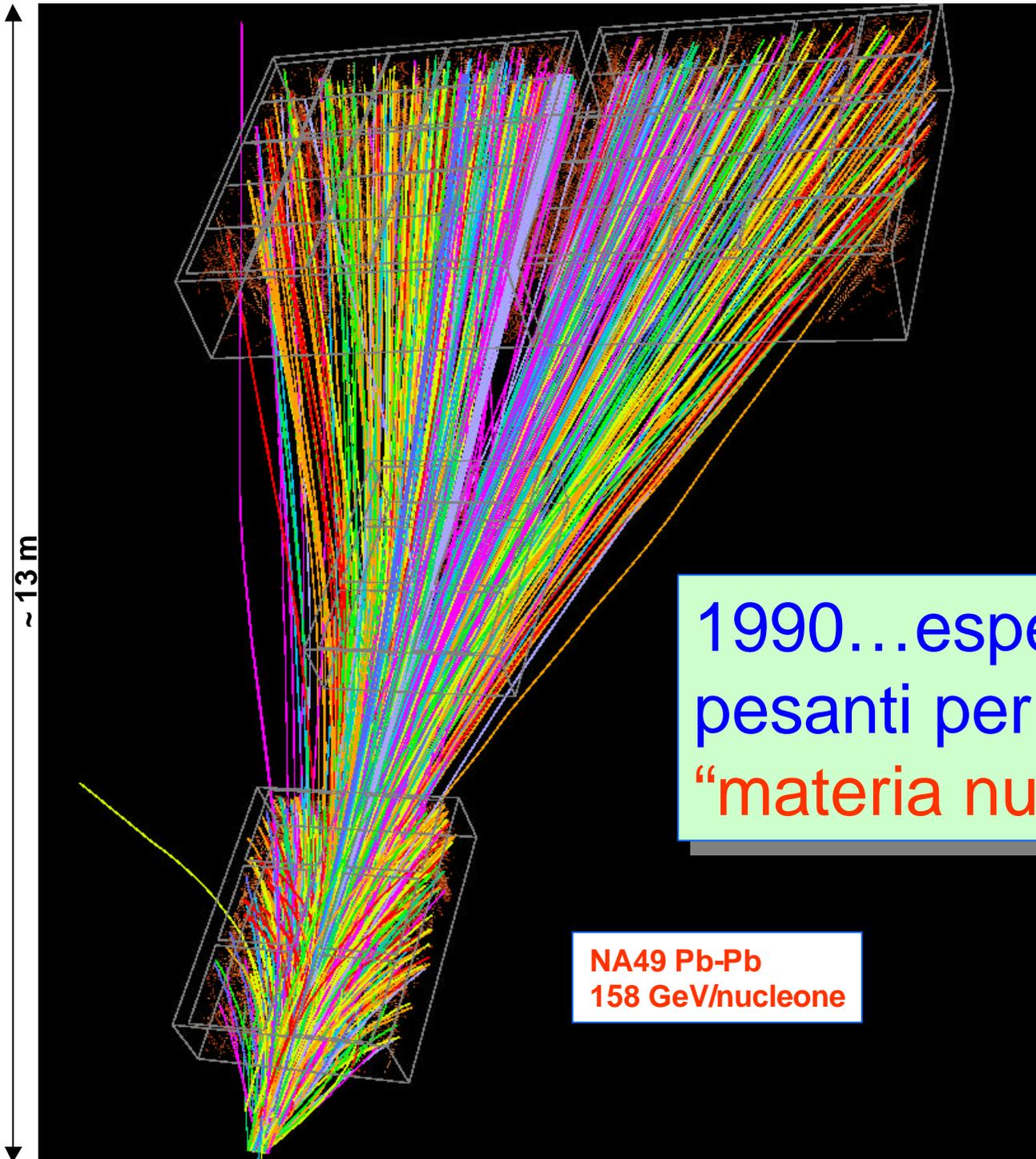
1960...
esperimenti
con camere a bolle



1980...decadimento di uno Z^0 in adroni

 ALEPH





~13 m

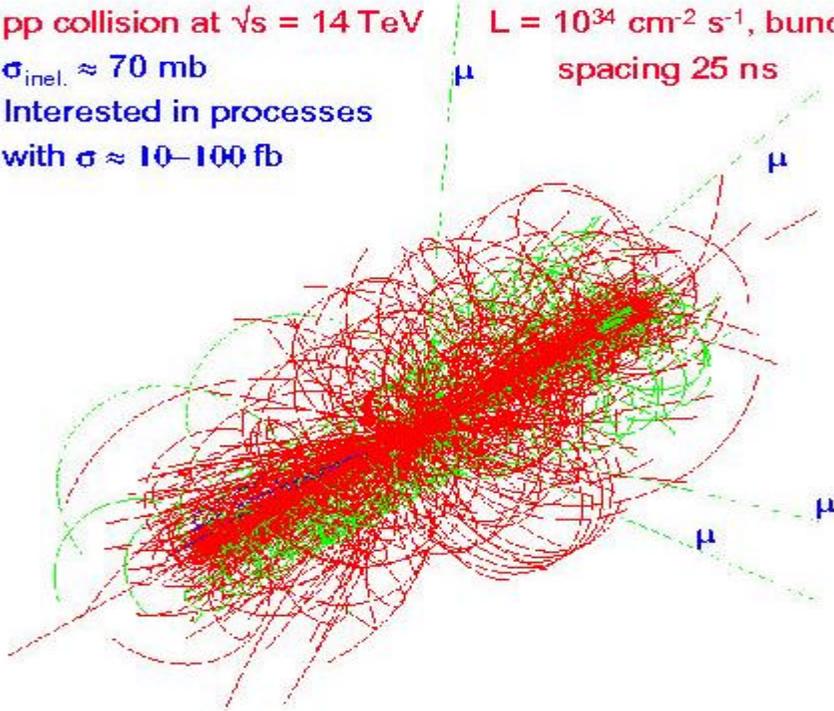
1990...esperimenti con ioni pesanti per studiare la "materia nucleare primordiale"

NA49 Pb-Pb
158 GeV/nucleone

2000...esperimenti a LHC

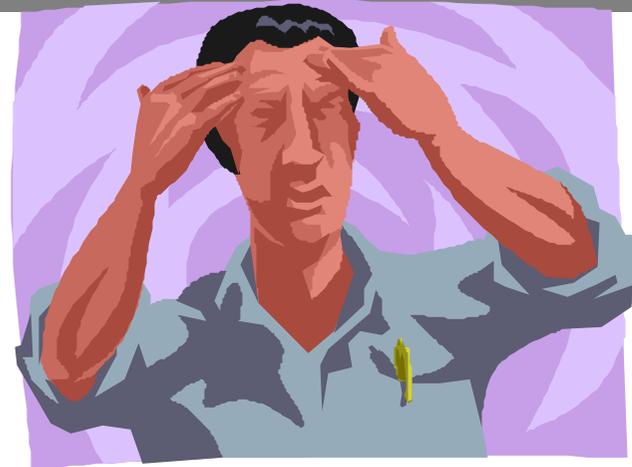
Evento simulato $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$

pp collision at $\sqrt{s} = 14$ TeV $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, bunch
 $\sigma_{\text{inel.}} \approx 70 \text{ mb}$ spacing 25 ns
Interested in processes
with $\sigma \approx 10\text{--}100 \text{ fb}$



~ 23 eventi sovrapposti
~ 1900 particelle cariche + 1600 neutre da rivelare
contemporaneamente

La complessita` degli eventi diventa enorme!

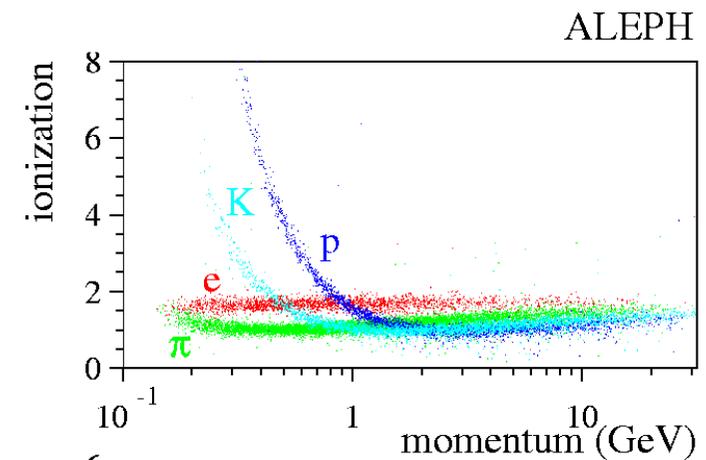
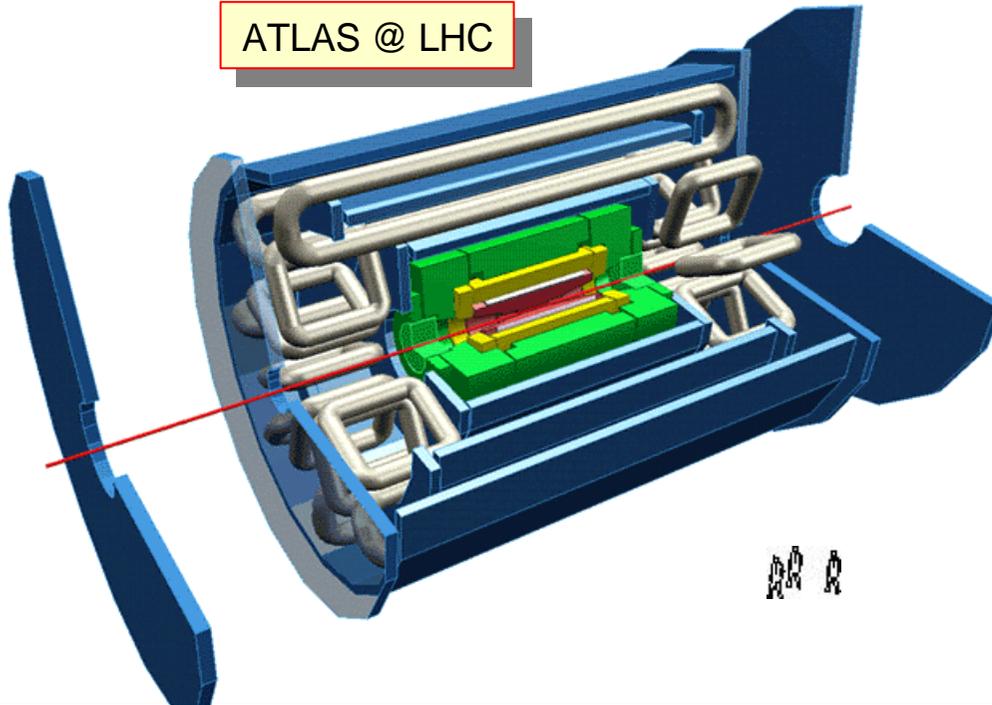


Cosa sono i rivelatori di particelle I

I rivelatori di particelle sono strumenti elettro-meccanici inventati per poter misurare i deboli segnali prodotti dalle particelle sub-atomiche.

grazie ai rivelatori di particelle e' stato possibile "vedere" le particelle sub-atomiche e determinare le loro caratteristiche.

ATLAS @ LHC

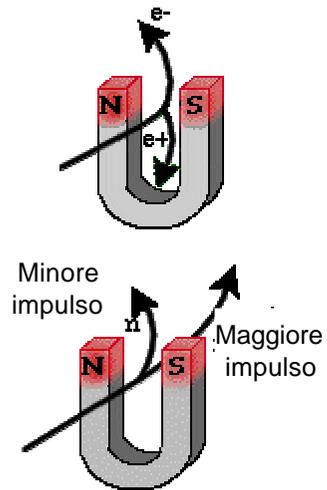


Esistono **rivelatori diversi** con caratteristiche specifiche ottimizzate per effettuare le misure necessarie; nei **moderni esperimenti** di fisica si usano **insiemi complessi di piu` rivelatori**. Combinando opportunamente i dati rivelati si e` in grado di determinare traiettorie, velocita`, masse, cariche elettriche.

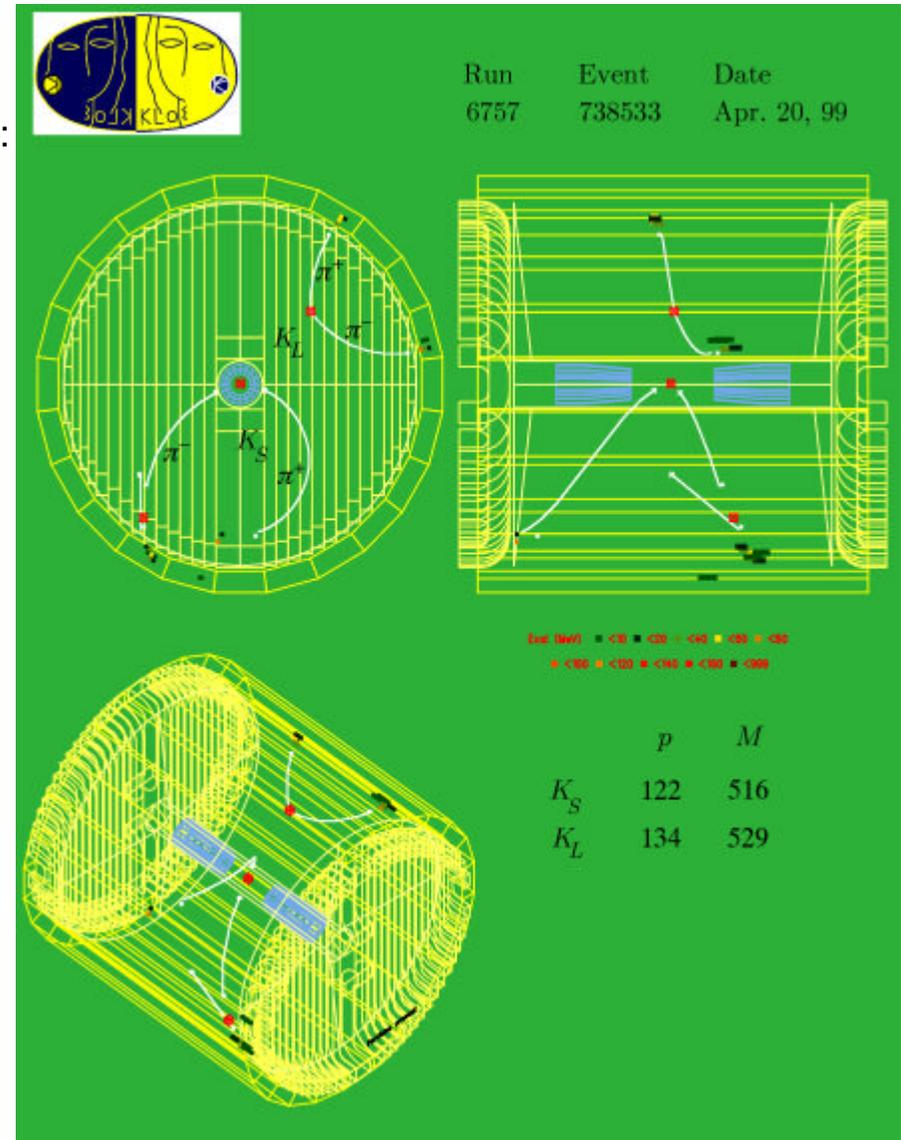
Cosa sono i rivelatori di particelle I I

Il **rivelatore ideale** di particelle ha le seguenti caratteristiche:

- **accettanza completa** e fitta segmentazione
- ricostruisce le **tracce ed identifica** tutte le particelle
- effettua misure di **impulso e/o di energia**
- ha tempo morto nullo → **velocità di risposta elevata**



Si utilizzano rivelatori magnetici per determinare la carica e l'impulso delle particelle



Rivelatori di particelle: principi generali

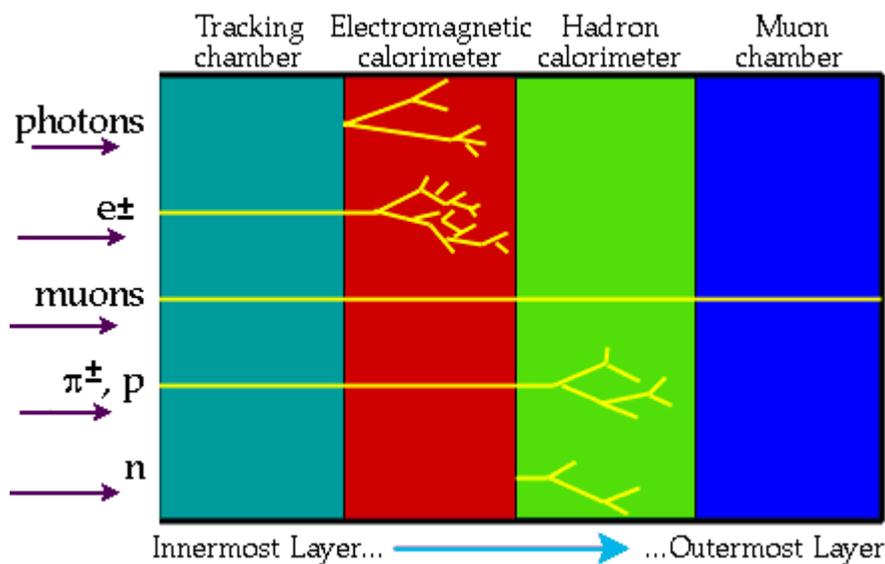
I processi che ci permettono di rivelare le particelle sub-nucleari sono diversi:

Le **particelle cariche** sono rivelate attraverso la loro interazione elettromagnetica con gli elettroni atomici dei mezzi attraversati

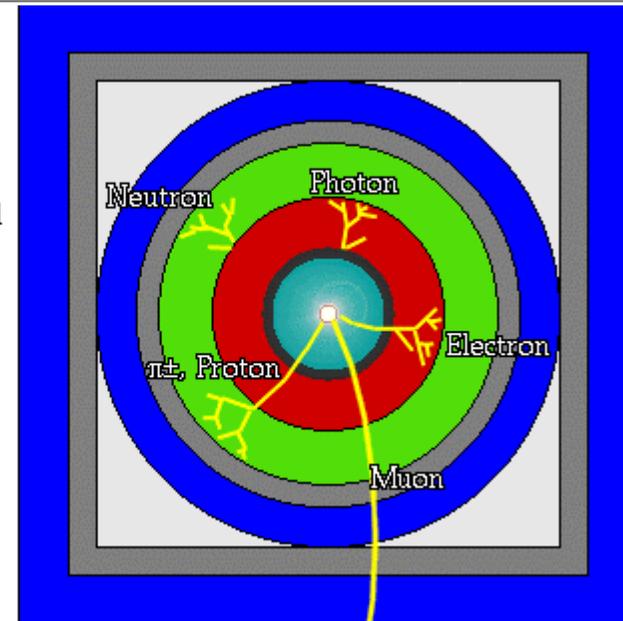
I **fotoni** vengono rivelati indirettamente attraverso gli elettroni che essi producono per **effetto fotoelettrico**, **diffusione Compton** o **produzione di coppie**

I **neutroni** subiscono interazioni forti con i nuclei dei materiali producendo **particelle secondarie cariche**

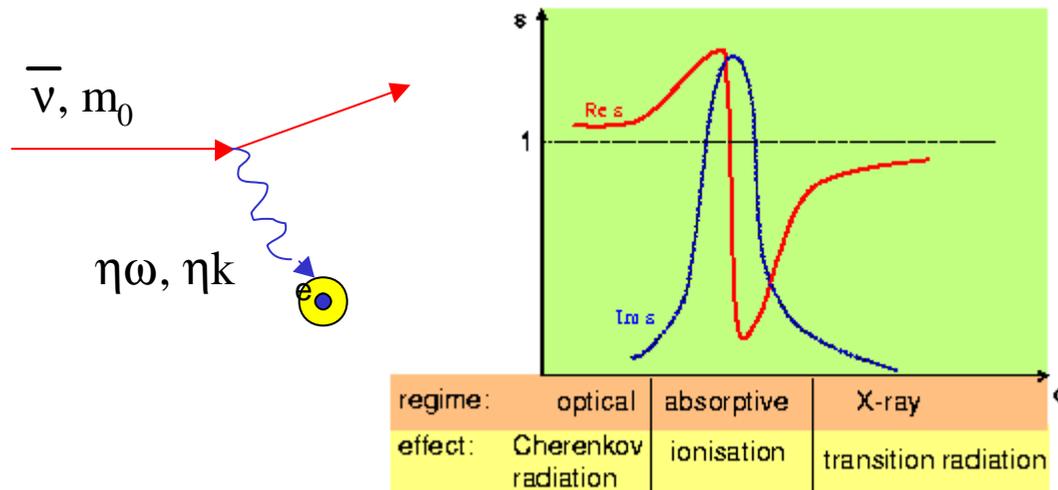
Le particelle più difficili da rivelare sono i **neutrini** che possono avere solo interazioni deboli con i nuclei o gli elettroni. In questi processi si ha emissione di leptoni



- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Le particelle cariche nella materia



$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = - \int_{\infty}^0 N E \frac{d\sigma}{dE} \eta d\omega$$

N: densita` di elettroni

In un mezzo l'energia e l'impulso di un fotone sono legati dalla relazione $\omega^2 = \frac{k^2 c^2}{\epsilon}$ con $\epsilon = n^2$ se $E_\gamma < \text{en. di eccitazione del materiale}$ e se $b \gtrsim 1/n$ i fotoni sono reali → **luce Cherenkov**

Se $2\text{eV} < E_\gamma < 5\text{KeV}$ i fotoni scambiati sono virtuali → **eccitazione/ionizzazione**

Se $E_\gamma > 5\text{KeV}$ (X ray region) l'effetto Cherenkov non puo` avvenire perche` la velocita` limite e` $> c$ tuttavia luce puo` essere emessa se si presentano discontinuita` → **radiazione di transizione**

La formula di Bethe-Bloch

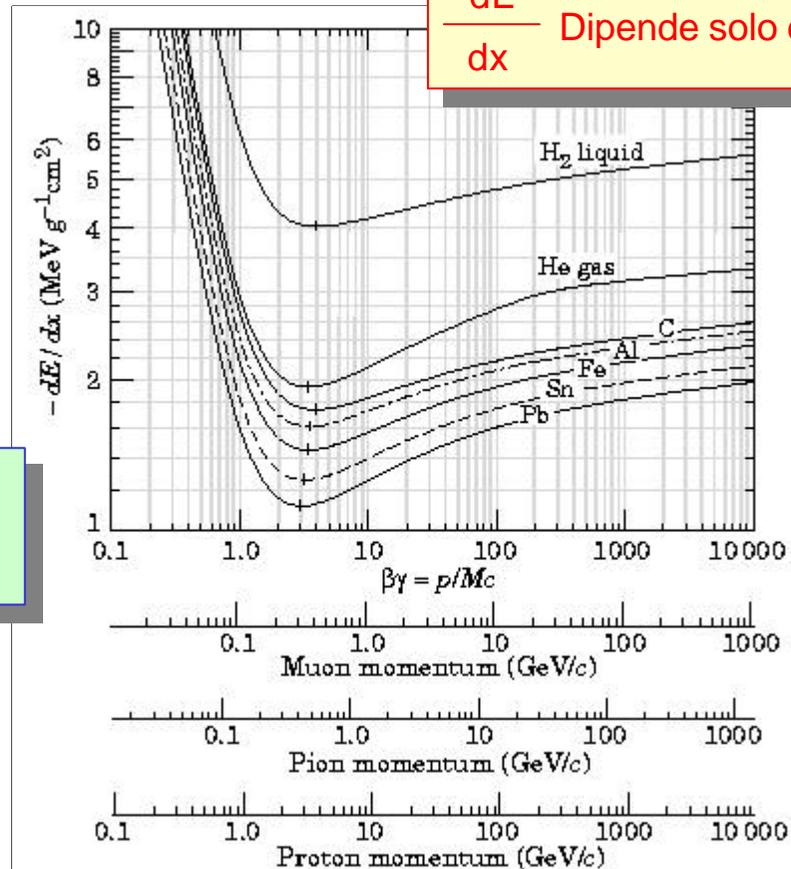
Esprime la perdita di energia per ionizzazione di una particella carica “pesante” ($m \gg m_e$)

$$I < dE < T^{\max}$$

I pot. di eccitazione medio $I \approx I_0 Z$; $I_0 = 10 \text{ eV}$

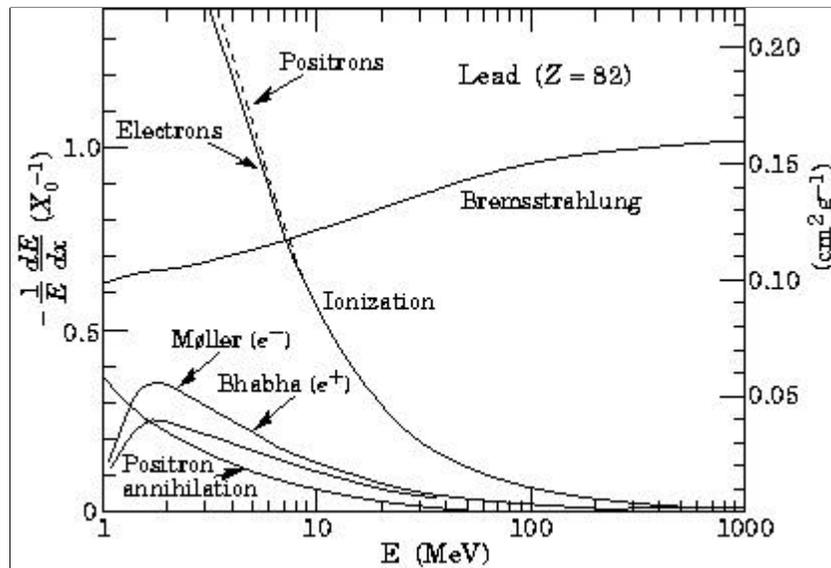
Per e^+ e^- la massa del bersaglio e del proiettile sono uguali, ed inoltre si deve tener conto del fenomeno Bremsstrahlung.

$\frac{dE}{dx}$ Dipende solo da β non da m



$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} T^{\max} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

Perdita di energia di elettroni e positroni

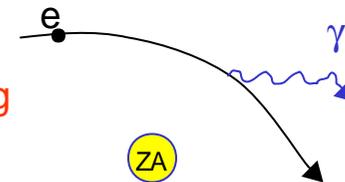


$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{E}{X_0}$$

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} \text{ A}}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})}$$

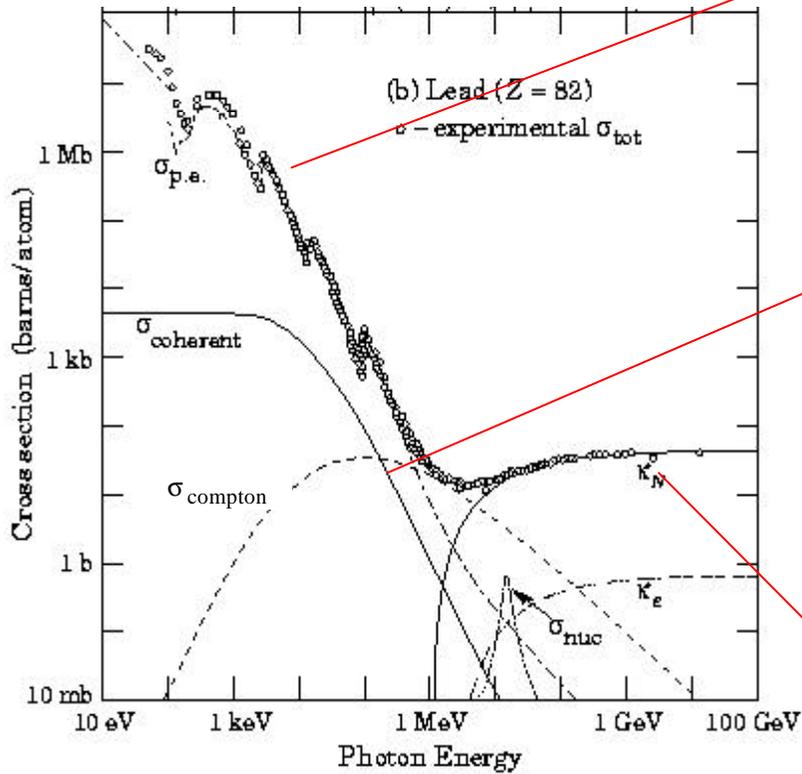
Lunghezza di radiazione

Per energie di elettroni/positroni > 10 MeV entra in gioco il fenomeno della Bremsstrahlung emissione di fotoni dovuta all'effetto accelerante del campo Coulombiano dei nuclei

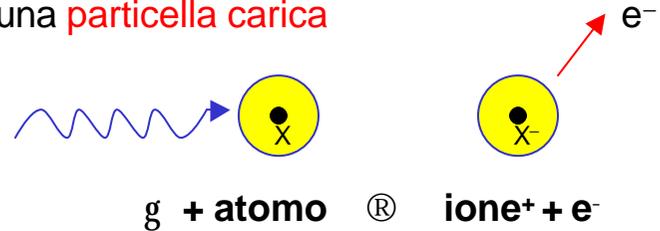


Rivelazione di fotoni

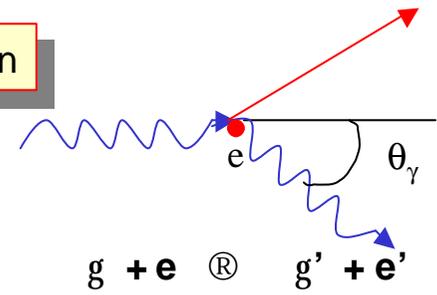
Per poter essere rivelato un **fotone** deve **creare o cedere** energia ad una **particella carica**



Effetto fotoelettrico

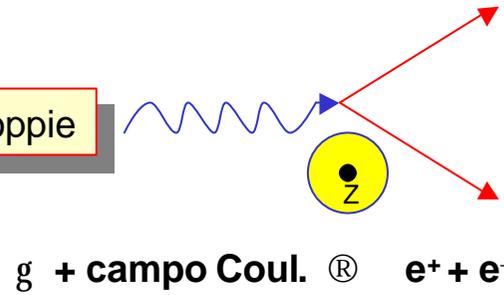


Diffusione Compton



E' un fenomeno di diffusione da parte di un elettrone quasi libero

Produzione di coppie

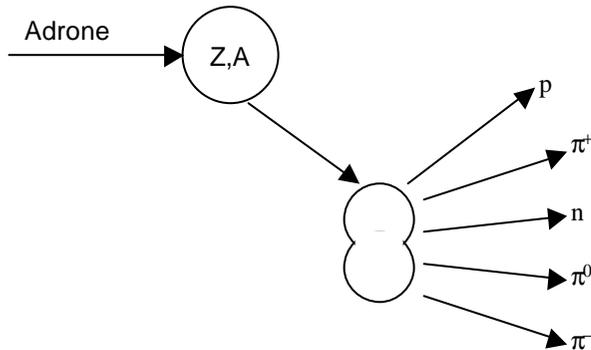


$\sigma_{\text{foto}} \propto Z^5$

Solo se $E_\gamma > m_e c^2$

Rivelazione di adroni

Gli adroni subiscono interazioni nucleari che determinano eccitazione o rottura del nucleo.

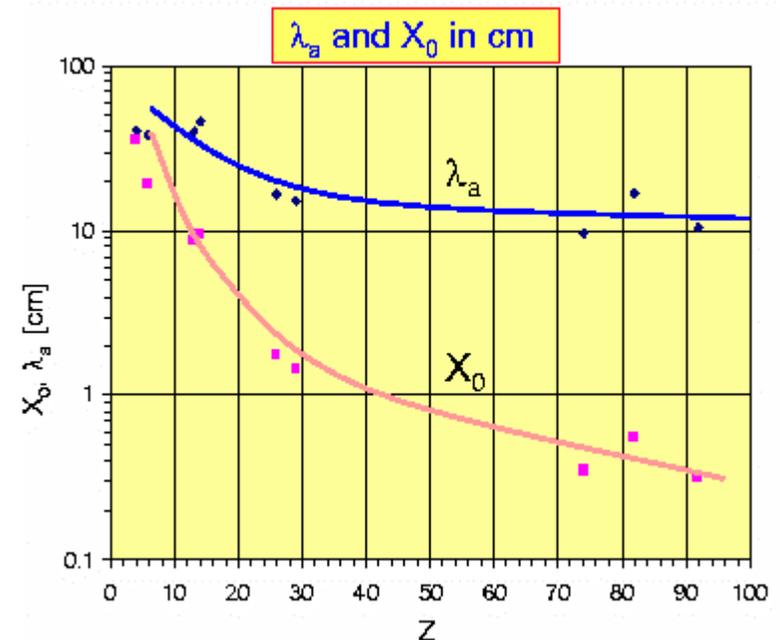


La molteplicità $\propto \ln(E)$

In analogia con l'interazione elettromagnetica si definisce il **coefficiente di assorbimento adronico** $\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}}$

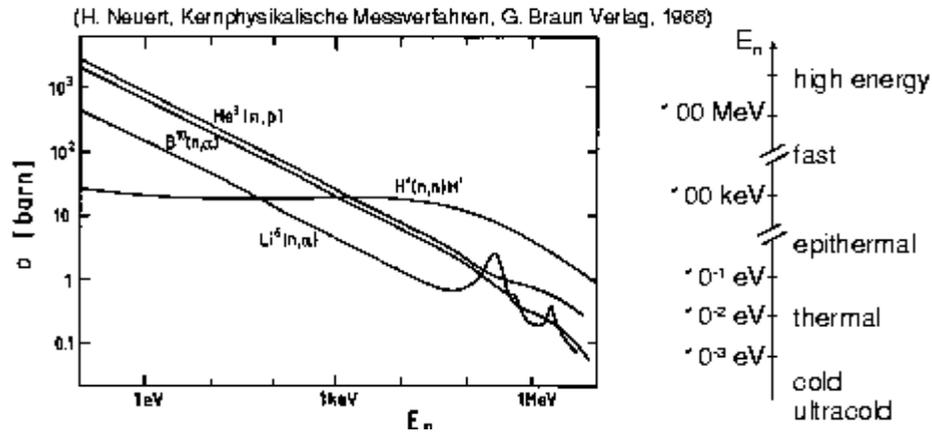
Material	Z	A	ρ [g/cm ³]	X_0 [g/cm ²]	λ_a [g/cm ²]
Hydrogen (gas)	1	1.01	0.0899 (g/l)	63	50.8
Helium (gas)	2	4.00	0.1786 (g/l)	94	65.1
Beryllium	4	9.01	1.848	65.19	75.2
Carbon	6	12.01	2.266	43	86.3
Nitrogen (gas)	7	14.01	1.25 (g/l)	38	87.8
Oxygen (gas)	8	16.00	1.428 (g/l)	34	91.0
Aluminium	13	26.98	2.7	24	106.4
Silicon	14	28.09	2.33	22	106.0
Iron	26	55.85	7.87	13.9	131.9
Copper	29	63.55	8.96	12.9	134.9
Tungsten	74	183.85	19.3	6.8	185.0
Lead	82	207.19	11.35	6.4	194.0
Uranium	92	238.03	18.95	6.0	199.0

For $Z > 6$: $\lambda_a > X_0$



Rivelazione di neutroni

Non avendo carica l'interazione dei **neutroni** e' basata su **interazioni forti e deboli**



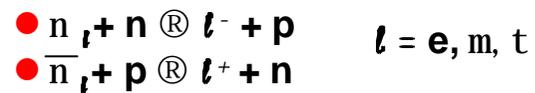
Reazioni attraverso le quali e' possibile rivelare i neutroni:

- $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{He}$
 - $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$
 - $n + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^3\text{H}$
 - $n + p \rightarrow n + p$
- 123 $E_n < 20 \text{ MeV}$
- $E_n < 1\text{GeV}$

...inoltre per neutroni termici ($E_n \approx 1/40 \text{ eV}$) si possono avere fenomeni di fissione e per neutroni $E_n > 1\text{GeV}$ fenomeni di cascata adronica

Rivelazione di neutrini

Come per i neutroni anche i neutrini sono rivelati con processi indiretti



La sezione d'urto del processo $n + \nu_e \rightarrow e^- + p$ è circa 10^{-43} cm^2

l'efficienza di rivelazione

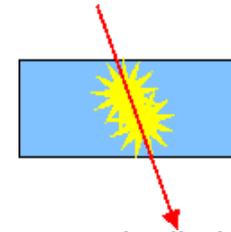
$$\epsilon = \sigma \cdot \rho \frac{N_A}{A} d$$

→ 1 m di Ferro $\epsilon \approx 5 \cdot 10^{-17}$

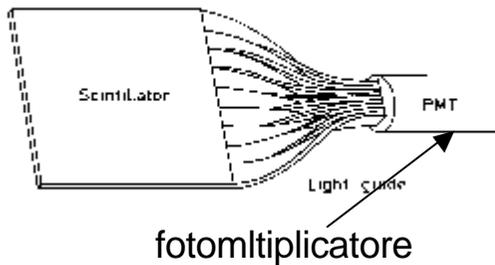
Per rivelare ν occorrono flussi elevati e rivelatori estremamente massicci (ktons)

In esperimenti agli acceleratori, dove si disponga di detector "ermetici", le proprietà dei neutrini possono essere dedotte indirettamente una volta che si sono misurate tutte le altre particelle presenti nell'evento

Rivelatori a scintillazione I



Un **rivelatore a scintillazione** ha essenzialmente due funzioni: convertire l'energia rilasciata da un particella ionizzante in luce visibile e trasportarla verso un apparecchio (fotomoltiplicatore, fotodiode etc...) in grado di convertirla in un segnale elettrico.



Si tratta di materiali (organici o inorganici) che se eccitati dal rilascio di energia di una particella ionizzante, si diseccitano attraverso emissione di luce nel visibile

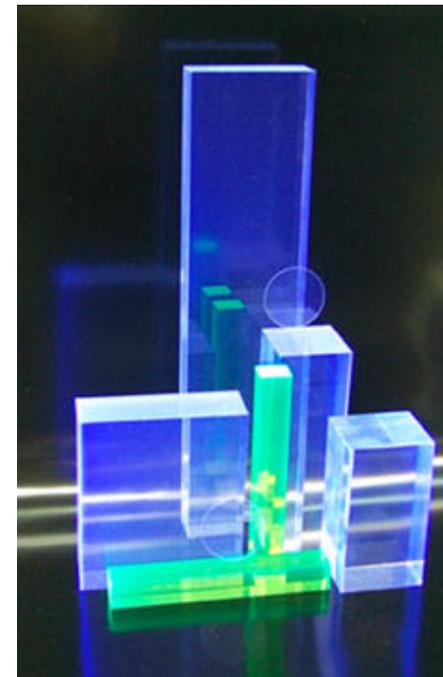
Gli scintillatori inorganici ad alto Z (BGO , $PBWO_4$) sono adatti anche per rivelare γ

diversi tipi di fotomoltiplicatori

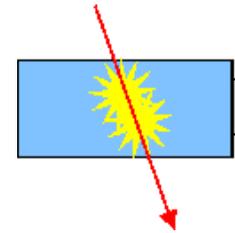


Gli scintillatori sono rivelatori multiuso:

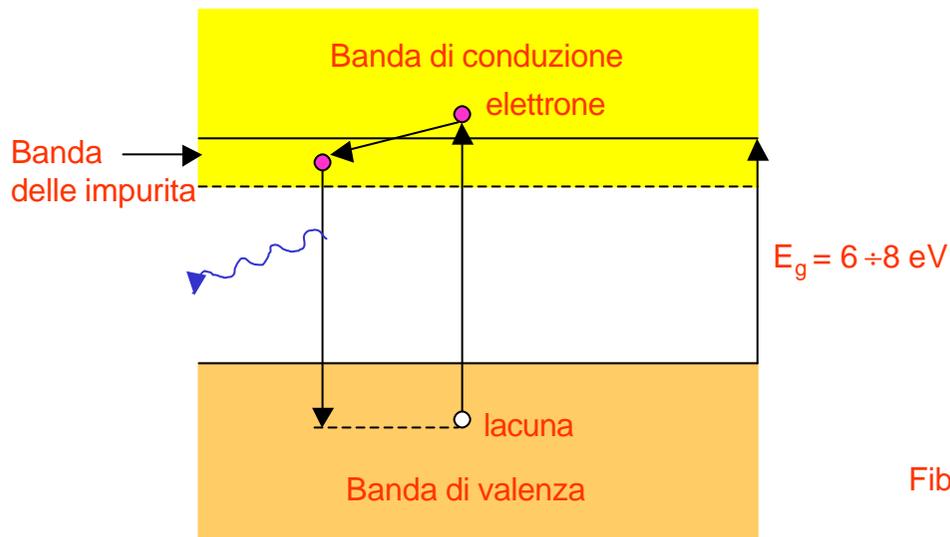
- calorimetri
- misure di tempo di volo
- rivelatori traccianti (fibre)
- contatori di trigger/veto



Rivelatori a scintillazione I I



1. **Scintillatori inorganici (NaI, CsI, BGO, BaF₂ ...)**
sono cristalli ionici drogati con impurita`.
I tempi di emissione ~ 100 ns

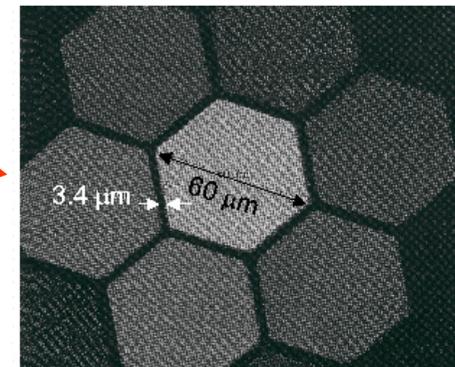


2. **Scintillatori organici (BC102 ...)**

sono complesse molecole organiche in cui si ha emissione di luce nell'ultravioletto in seguito all'eccitazione di livelli vibrazionali molecolari. All'interno del materiale si aggiungono sostanze "wave shifter" per trasportare l'emissione nel visibile.
I tempi di emissione < 10 ns

Gli **scintillatori organici** hanno una risposta luminosa mediamente peggiore di quelli inorganici, ma sono piu` veloci. Inoltre possono essere prodotti facilmente di grosse e svariate dimensioni (fibre scintillanti). Hanno una minore lunghezza di attenuazione.

Fibre scintillanti a sezione esagonale



Gli **scintillatori inorganici** hanno una migliore risposta luminosa, ma sono piu` lenti. La risposta luminosa si misura in fotoelettroni per MeV. Il materiale piu` efficiente e` NaI con 40.000 p.e./MeV. La risposta luminosa varia con la temperatura

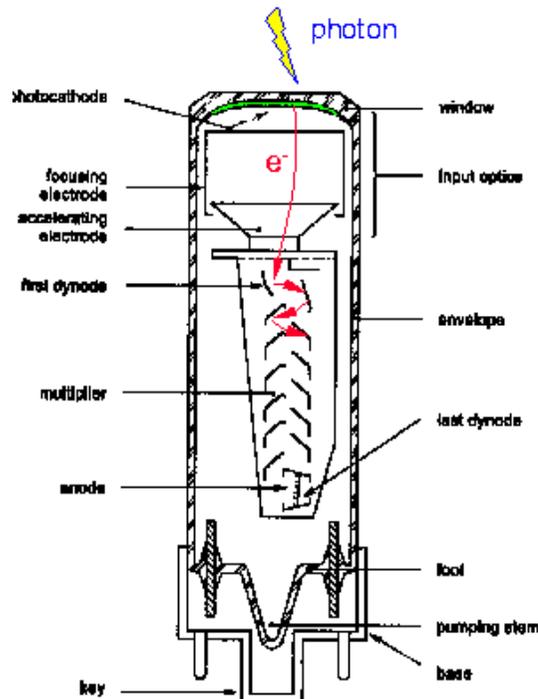
Fotorivelatori



Sono gli apparecchi con cui la luce prodotta dalle particelle e` trasformata in un segnale elettrico.

Devono avere alta sensibilita`. Un parametro che li caratterizza e` l'Efficienza Quantica $Q.E. = N_{p.e.}/N_{fotoni}$

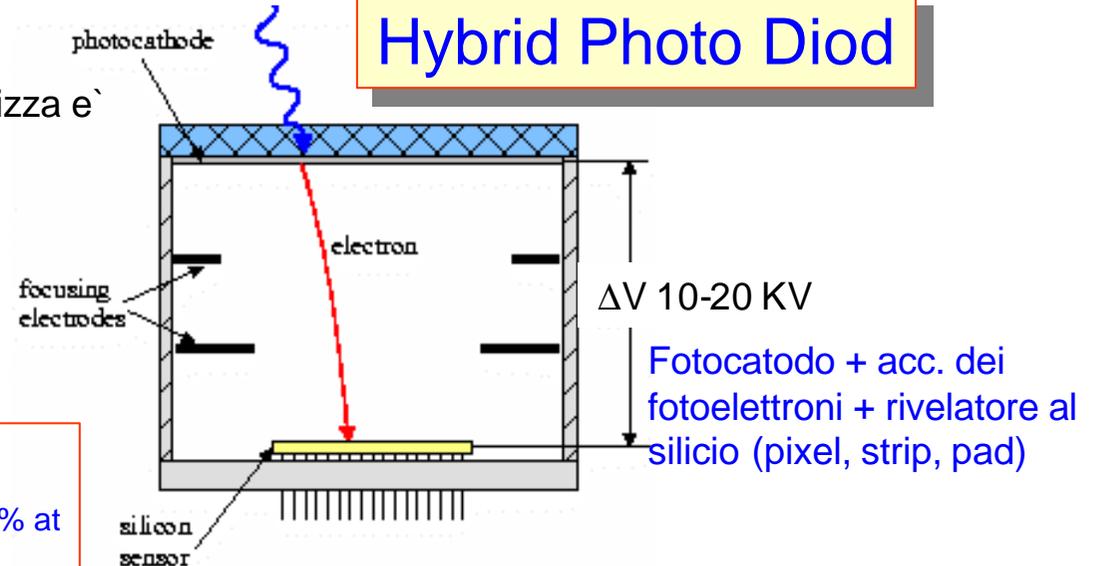
Fotomoltiplicatori



PHILIPS XP2020

P.C. diameter 44 mm
 Bialkali P.C Q.E. = 25% at λ_{max} 400 nm
 Gain max 10^8

Hybrid Photo Diode

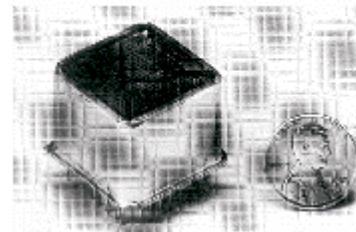


Fotocatodo + acc. dei fotoelettroni + rivelatore al silicio (pixel, strip, pad)

Rivelazione del singolo fotone con alta risoluzione
 Guadagno modesto $\sim 10^3$
 Possono lavorare in campo magnetico

Multi Anode PM

example: Hamamatsu R5900 series.



Up to 8x8 channels.
 Size: 28x28 mm².
 Active area 18x18 mm² (41%).
 Bialkali PC: Q.E. = 20% at λ_{max} = 400 nm. Gain $\approx 10^6$.



Rivelatori a gas I

le particelle cariche attraversando un gas lo ionizzano

Spesso gli elettroni prodotti hanno sufficiente energia per effettuare ulteriori ionizzazioni

Ionizzazione primaria

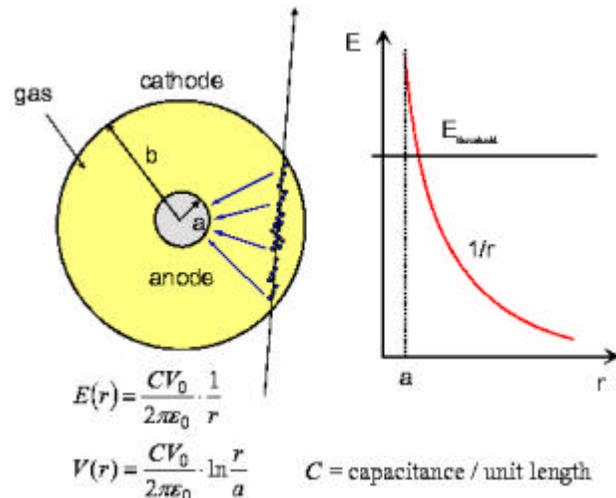
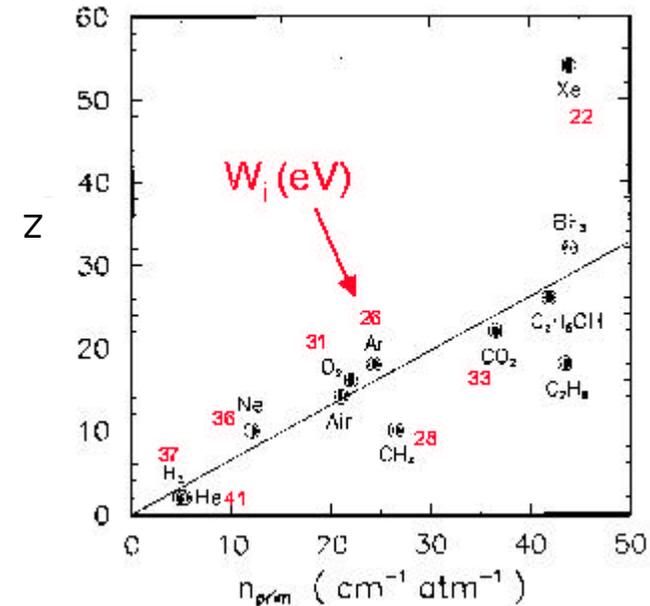
Ionizzazione totale $\approx 3, 4$ volte ionizzazione primaria

$$n_{\text{total}} = \frac{\Delta E}{W_i}$$

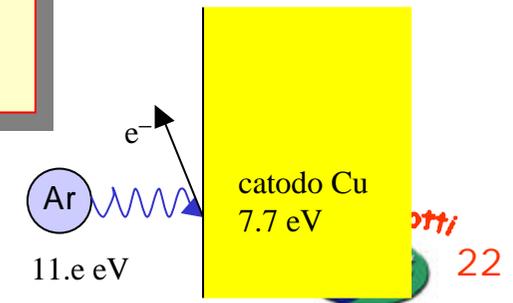
W_i = potenziale di estrazione

$$\Delta E = dE/dx \Delta x$$

Una m.i.p perde circa 2 MeV in un cm di Ar ≈ 100 coppie e^- /ione
 troppo poche per essere rivelate \rightarrow occorre amplificare il segnale

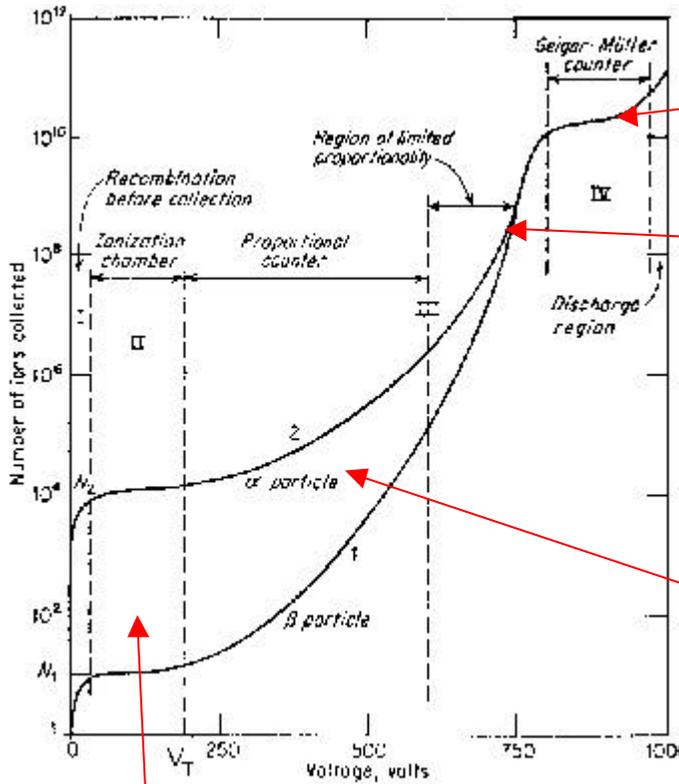


Si usano gas nobili perché avendo le shell complete dissipano l'energia trasferita solo attraverso la ionizzazione. Si aggiungono basse percentuali di idrocarburi per evitare scariche.





Rivelatori a gas I I

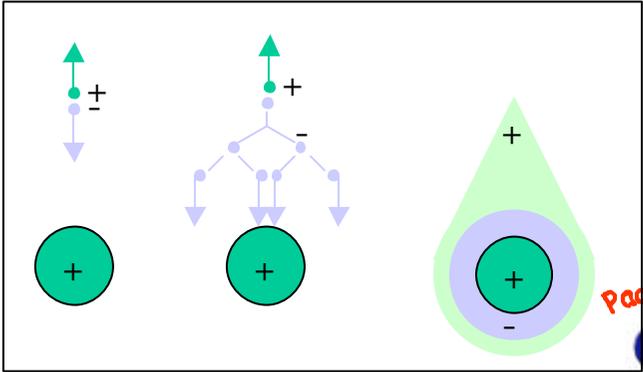


Regione Geiger. La scarica interessa tutta la lunghezza del filo e viene interrotta interrompendo HV

E' detta anche regione di "streamer limitato" si formano piu' valanghe e si perde la proporzionalita`

Si ha moltiplicazione delle cariche prodotte dalla ionizzazione primaria con produzione di una "valanga" $amp \propto \Delta E$

La carica e' raccolta senza moltiplicazione



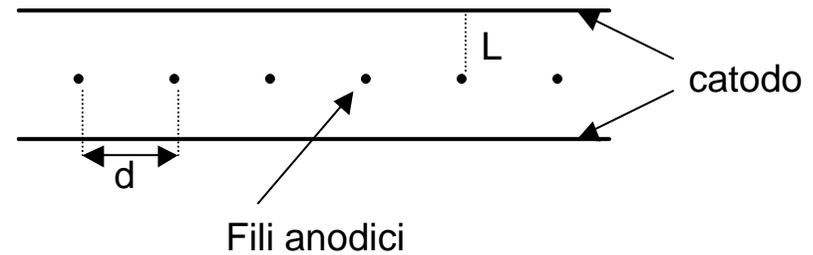
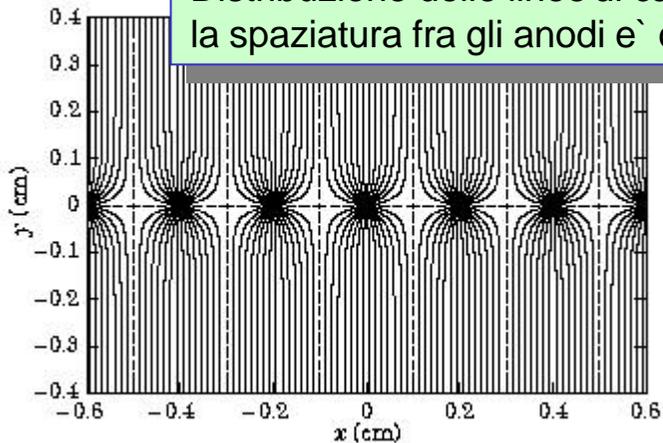
Paola Gianotti



Multiwire Proportional Chambers

G. Charpack et al. 1968. Premio Nobel 1992

Distribuzione delle linee di campo in una MWPC
la spaziatura fra gli anodi e` di 2 mm

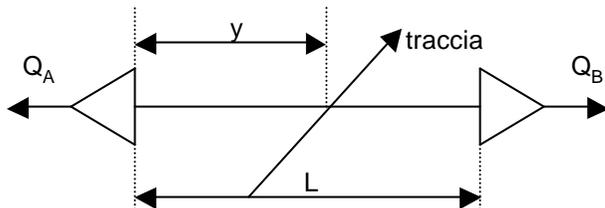


Le migliori risoluzioni spaziali ottenute sono ~ 100 μm

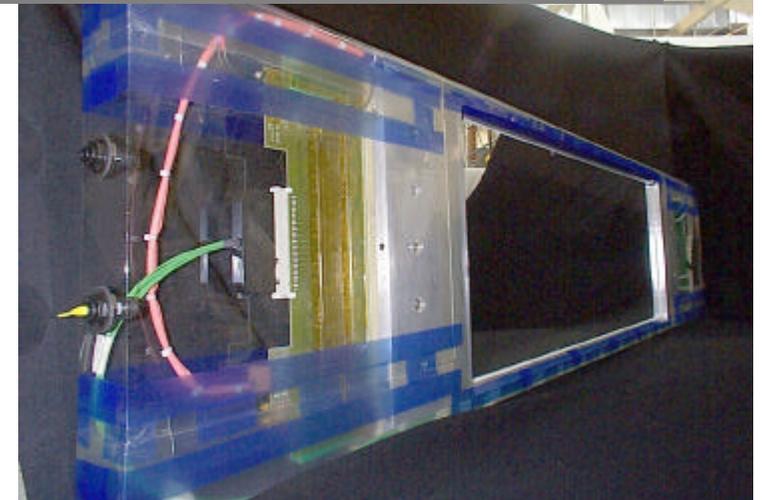
Una delle "low mass MWPC" dell'esperimento FINUDA

La coordinata z puo` essere determinata in vari modi:

- divisione di carica (fili resistivi ~ 2KΩ/m)
- tempo di arrivo alle due estremita` del filo
- piani incrociati di fili
- induzione su strisce catodiche segmentate

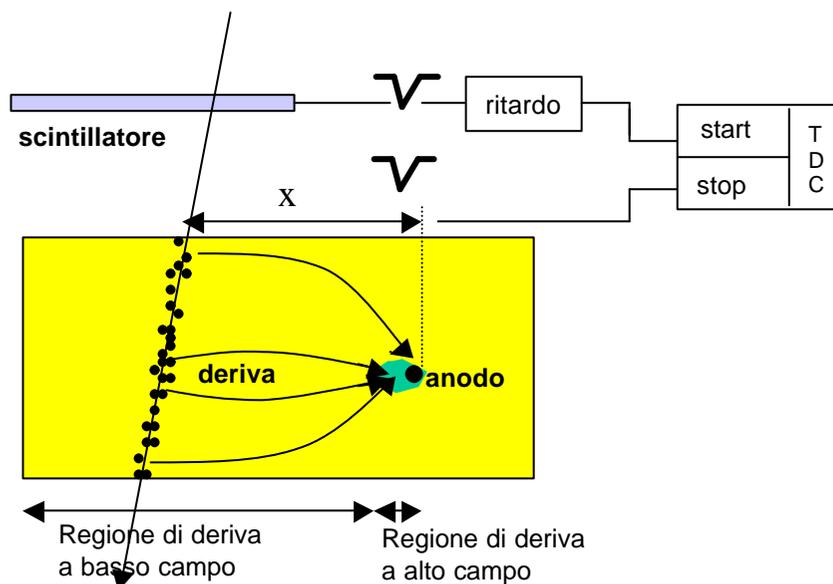


$$\frac{y}{L} = \frac{Q_B}{Q_A + Q_B}$$

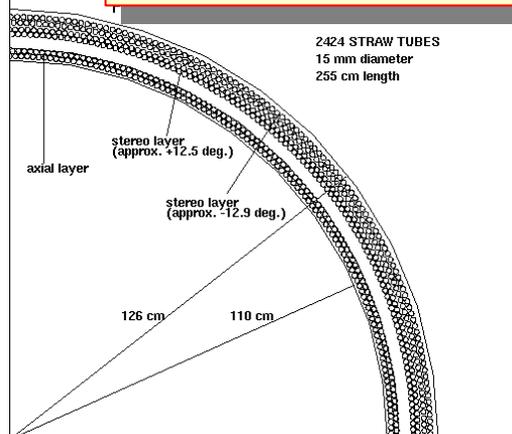


Camere a deriva

La traccia della particella si ricostruisce attraverso la misura del tempo di deriva rispetto ad un riferimento esterno: $x = \int v_d(t) dt$



Geometria degli straw tube dell'esperimento FINUDA



Con i suoi 52140 fili la camera a deriva di KLOE è la più grande finora costruita



Gli straw tubes sono camere a deriva cilindriche "moncanale". Per ottenere informazioni sulle diverse coordinate spaziali si possono usare piani incrociati di tubi.

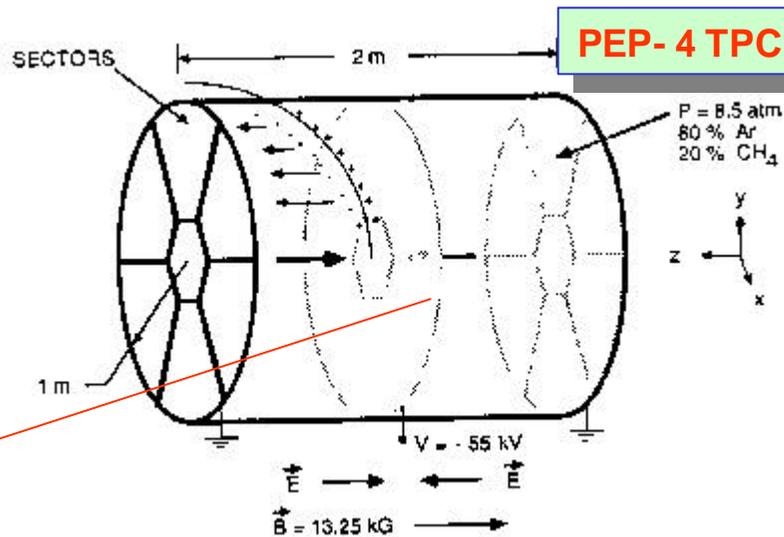
Time Projection Chamber

È l'unico rivelatore a gas che permette di ricostruire le tracce in 3D.

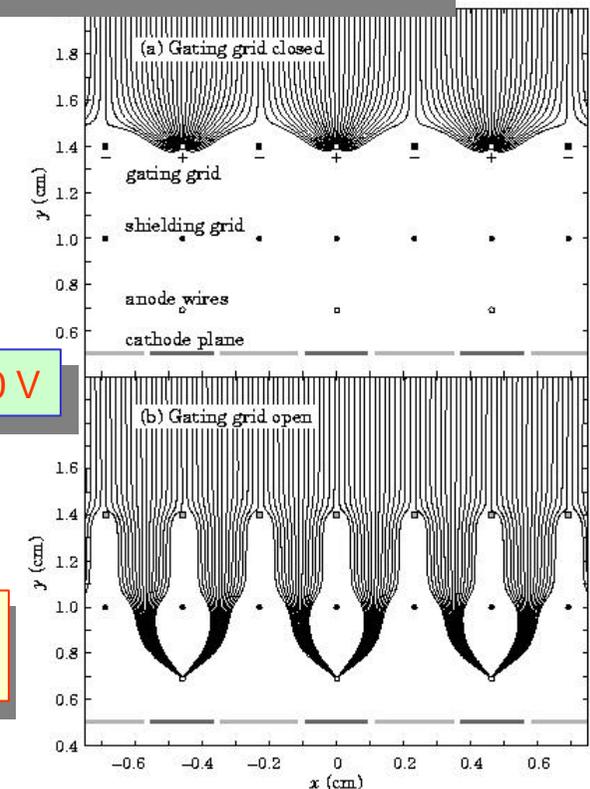
Si tratta di un grosso volume di gas separato da un setto a potenziale negativo. Le cariche create dalla ionizzazione migrano verso i "piatti" terminali che sono segmentati ed equipaggiati con MWPC.

Novità principale: **campo elettrico e campo magnetico paralleli** → **si riduce enormemente il fenomeno della diffusione.**

Occorre conoscere con precisione la velocità di deriva → **gas con alta purezza (no impurità el. neg.)**
controlli precisi di pressione e temperatura



Problemi di deriva degli ioni negativi



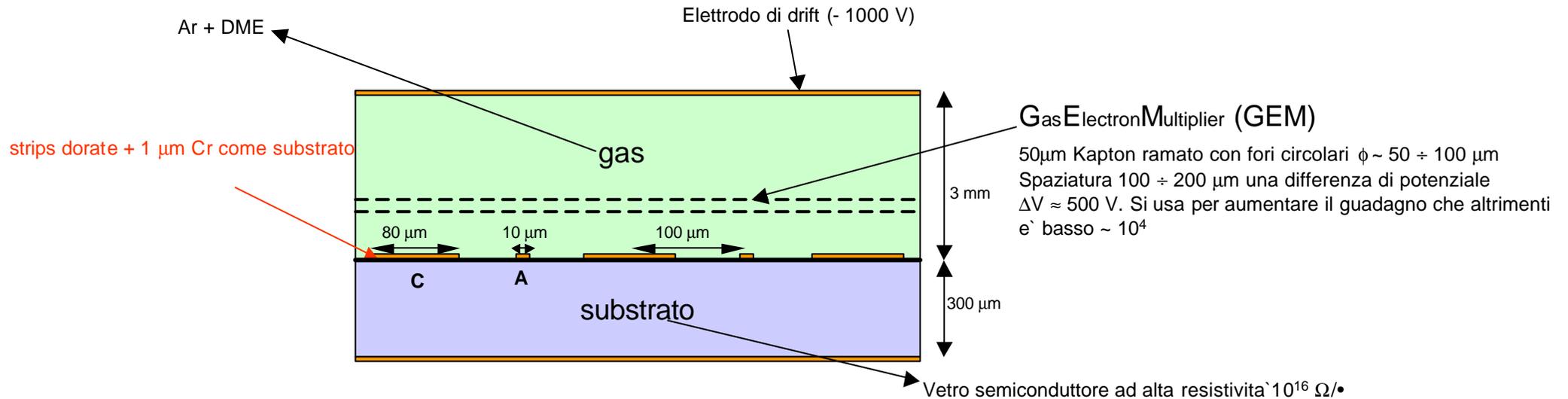
$V_g \approx 150 \text{ V}$

Le coordinate x-y si ottengono dagli hit sui fili e sul catodo segmentato delle MWPC poste sui piatti, la z dal tempo di drift. Si fanno anche misure di dE/dx

Microstrips a gas

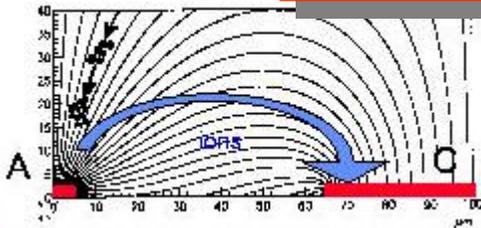
Le MWPC e le camere a deriva hanno limiti intrinseci sulla risoluzione spaziale ottenibile e tempi morti considerevoli dovuti alla migrazione degli ioni positivi (massima freq. 10^4 mm^{-2}).

Per superare questi limiti sono state sviluppate le Microstrips a gas

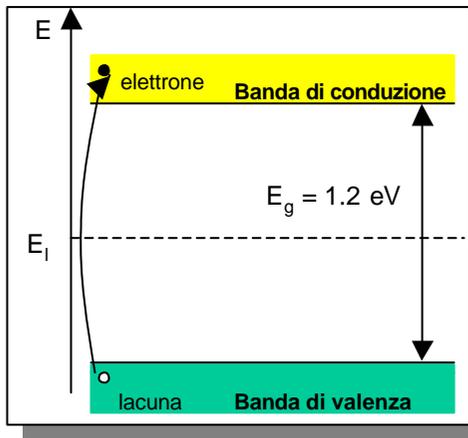


Gli elettrodi sono ottenuti depositando sottili strati metallici con tecniche litografiche

Linee di campo all'interno di MSGC: gli ioni non devono viaggiare lungo tutto il rivelatore. Si raggiungono frequenze di conteggio di 10^6 mm^{-2}

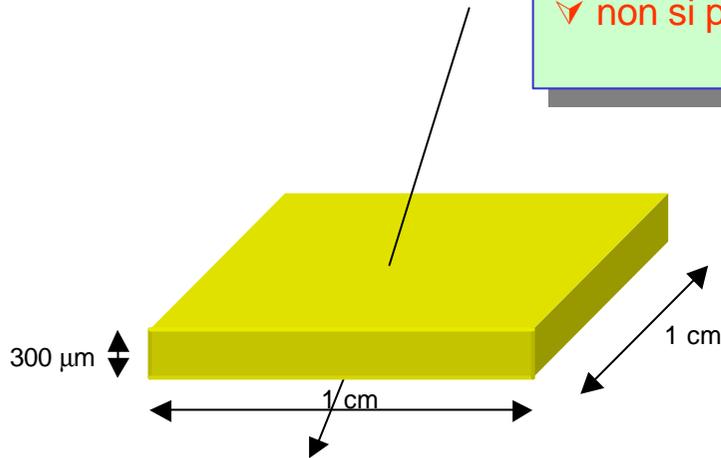


Rivelatori a stato solido I



I semiconduttori hanno una struttura atomica che li rende molto adatti per la rivelazione di particelle:

- ▲ $E_g = 1.12 \text{ eV}$
- ▲ $E \text{ (e-lacuna)} = 3.6 \text{ eV}$ ($\sim 30 \text{ eV}$ nei gas)
- ▲ alta densità $2.33 \text{ g/cm}^3 \rightarrow \Delta E/\Delta x$ elevato. Una M.I.P rilascia $\sim 3.9 \text{ GeV/cm}$ producendo $\sim 10^6$ coppie e-lacuna (in gas 2 MeV/cm , 100 coppie)
- ▲ la mobilità dei portatori di carica è alta: $\mu_e = 1450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_l = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- ▲ la rigidità del silicio permette di costruire rivelatori che si autosostengono
- ▼ non si può avere moltiplicazione di carica



In un semiconduttore **non drogato** (intrinseco) il numero di elettroni liberi (n) e di lacune (p) è uguale. A temperatura ambiente nel **Silicio** $n = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ se una M.I.P. attraversa un $300 \mu\text{m}$ di spessore produce $3.2 \cdot 10^4$ coppie e-lacuna che si ricombinano con le $4.5 \cdot 10^8$ già presenti \rightarrow occorre "suotare" il rivelatore dalle cariche libere:

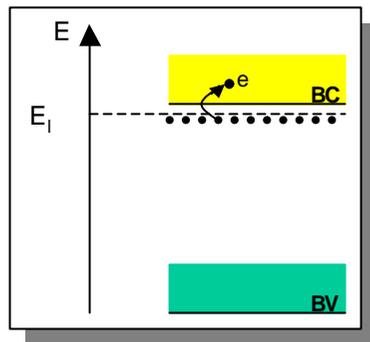
- rivelatori a basse temperature
- giunzioni n-p polarizzate

Rivelatori a stato solido I I

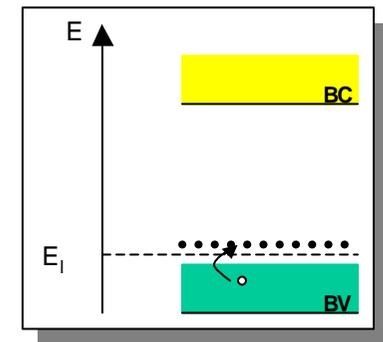


Aggiungendo piccole quantità di materiali estranei (drogaggio) è possibile modificare struttura del semi-conduttore:

- Aggiungendo elementi del V gruppo (i.e. As) si ottengono semiconduttori di tipo n;
- Aggiungendo elementi del III gruppo (i.e. B) si ottengono semiconduttori di tipo p;



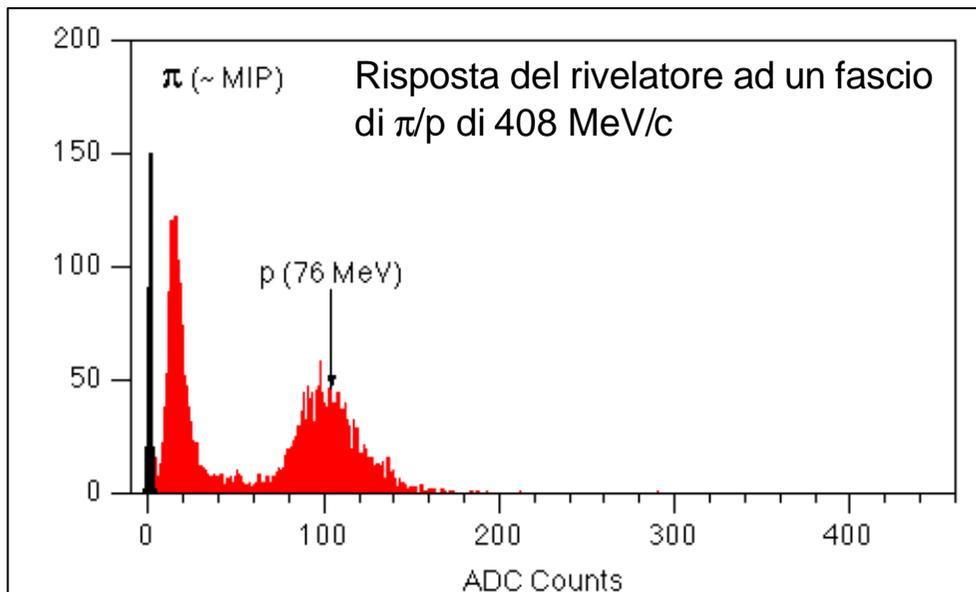
	Semiconduttori per rivelatori	Semiconduttori per elettronica
Drogaggio	$10^{12} / \text{cm}^3$ (n^-) $10^{15} / \text{cm}^3$ (p^+)	$10^{17(18)} / \text{cm}^3$
Resistività	5 k Ω /cm	1 Ω /cm



Tipo n: aggiungendo elementi del V gruppo (donaori) si aumenta il numero n di elettroni liberi

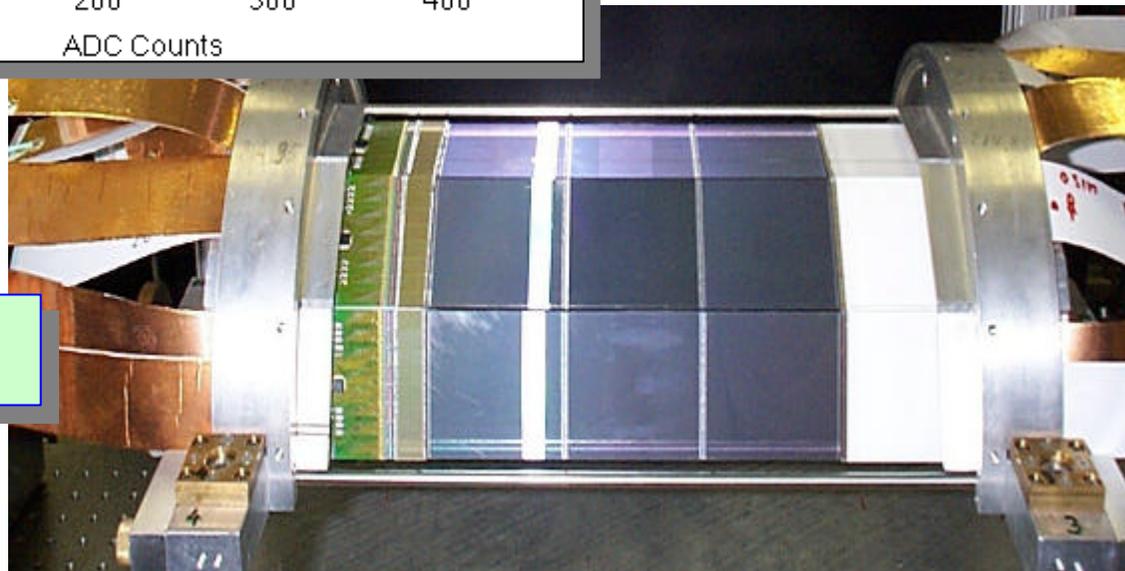
Tipo p: aggiungendo elementi del III gruppo (accettori) si aumen il numero p di lacune libere

Il rivelatore di vertice dell'esperimento FINUDA



Ogni modulo è costituito da 3 wafer di silicio di spessore 300 μm "double sided". I moduli sono incollati su un supporto di vetro di 100 μm che funge anche da "fan-out"

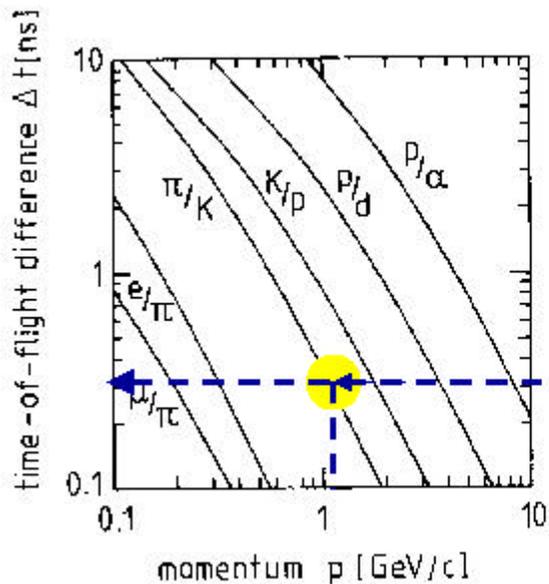
La risoluzione spaziale del rivelatore è di $\sim 30 \mu\text{m}$



Identificazione delle particelle I

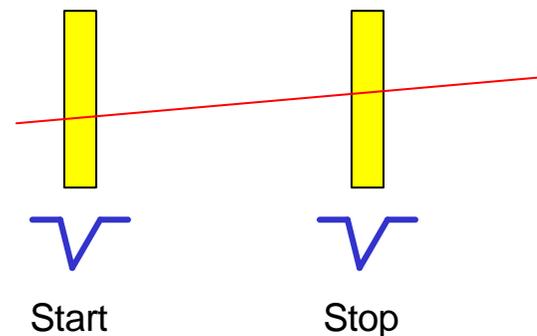


Tempo di volo



Dt per un cammino $L = 1$ m

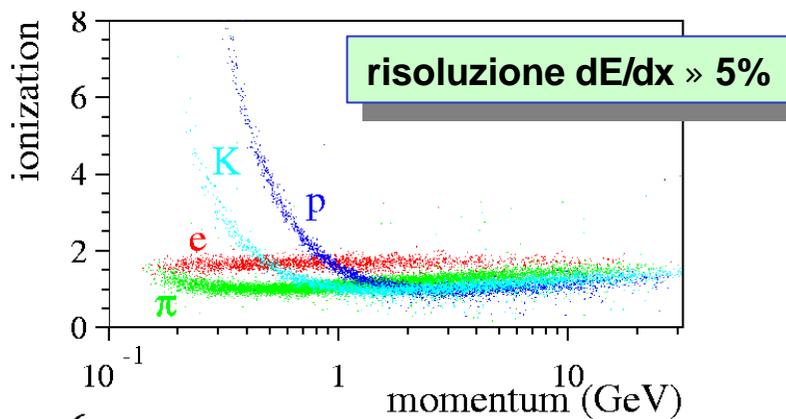
$$t = \frac{L}{\beta c}$$



$S_t = 300$ ps
separazione p/K
fino ad 1 GeV/c

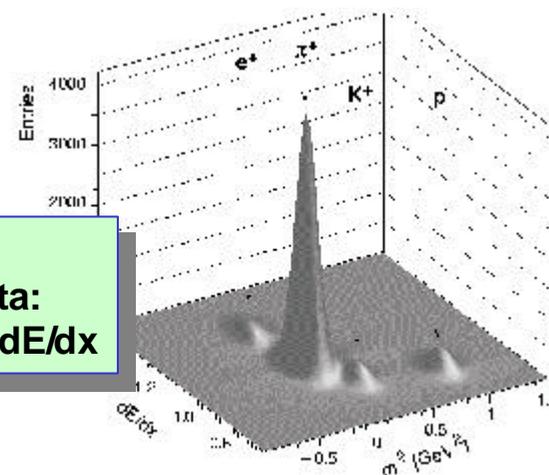
Perdita di energia

ALEPH TPC



risoluzione $dE/dx \gg 5\%$

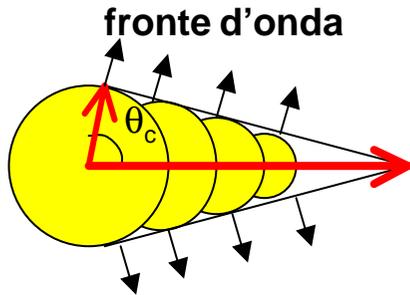
NA49
misura combinata:
tempo di volo + dE/dx



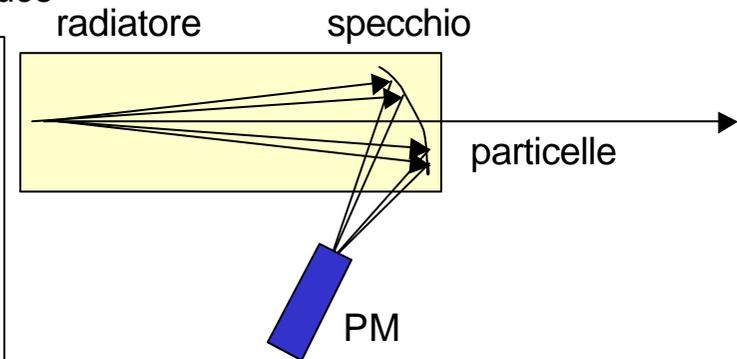
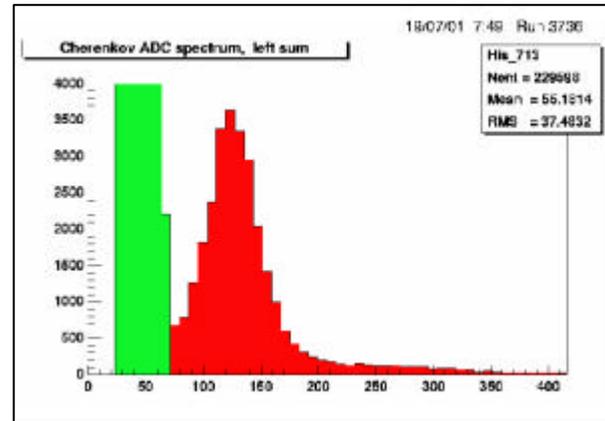
Paola Gianotti



I dentificazione delle particelle I I

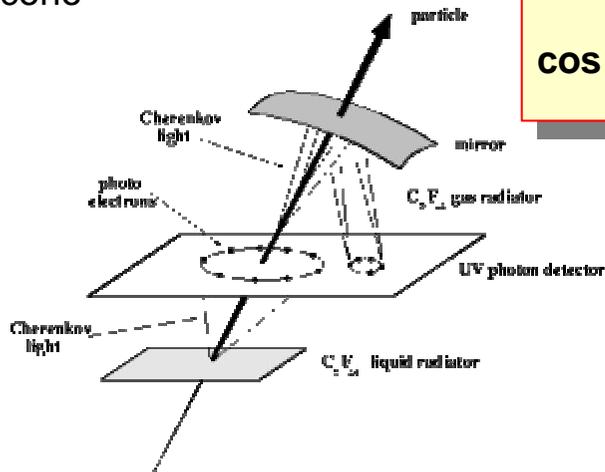


Cherenkov a soglia: solo le particelle con velocità $\beta > 1/n$ producono luce

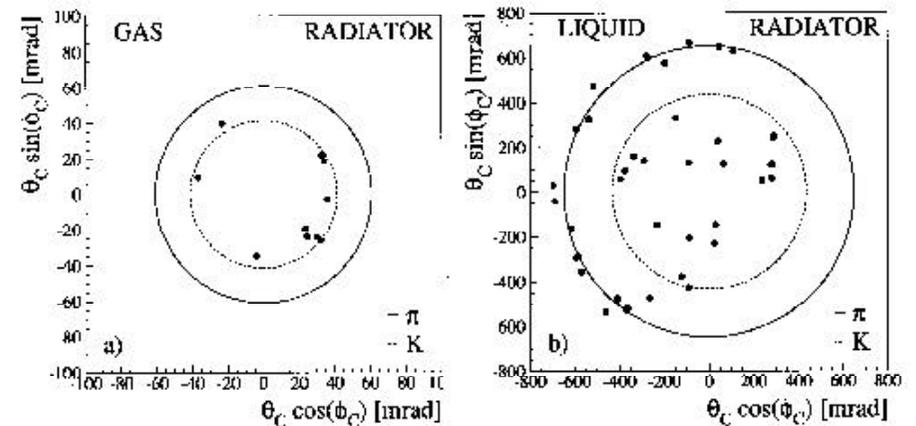


DELPHI RICH

Ring imaging e RICH: viene misurato l'angolo di apertura del cono



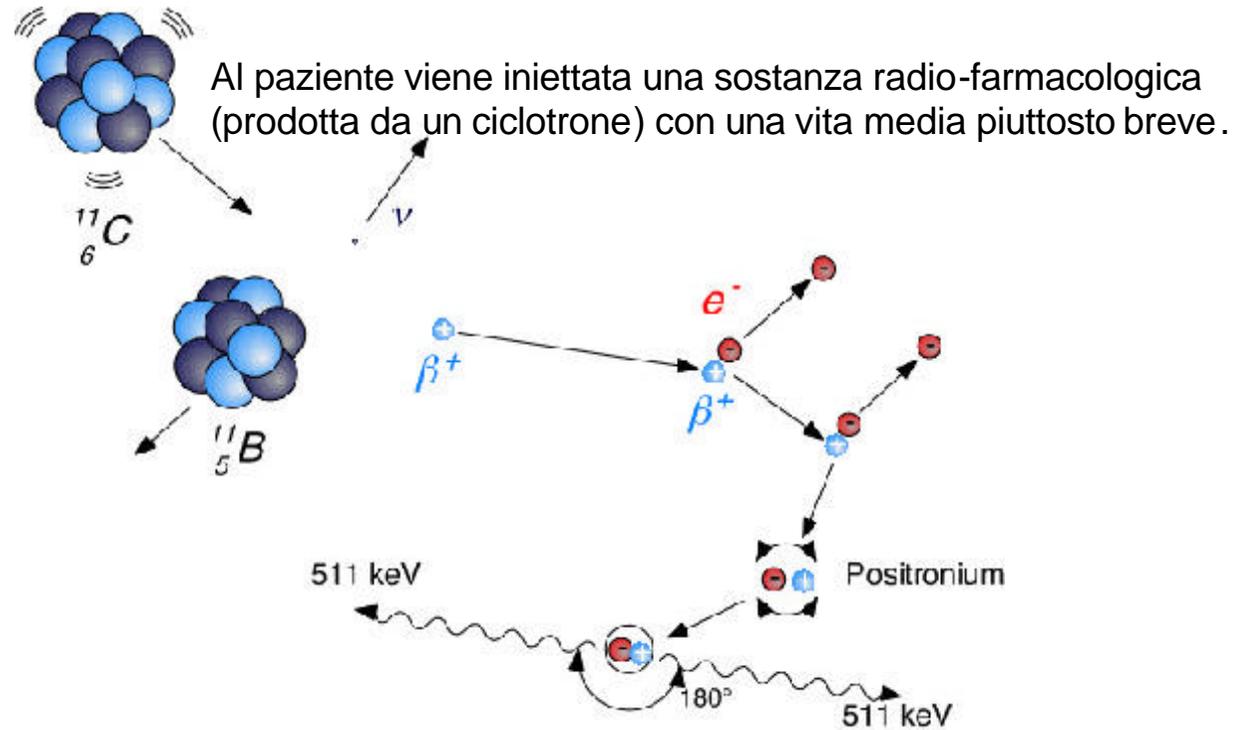
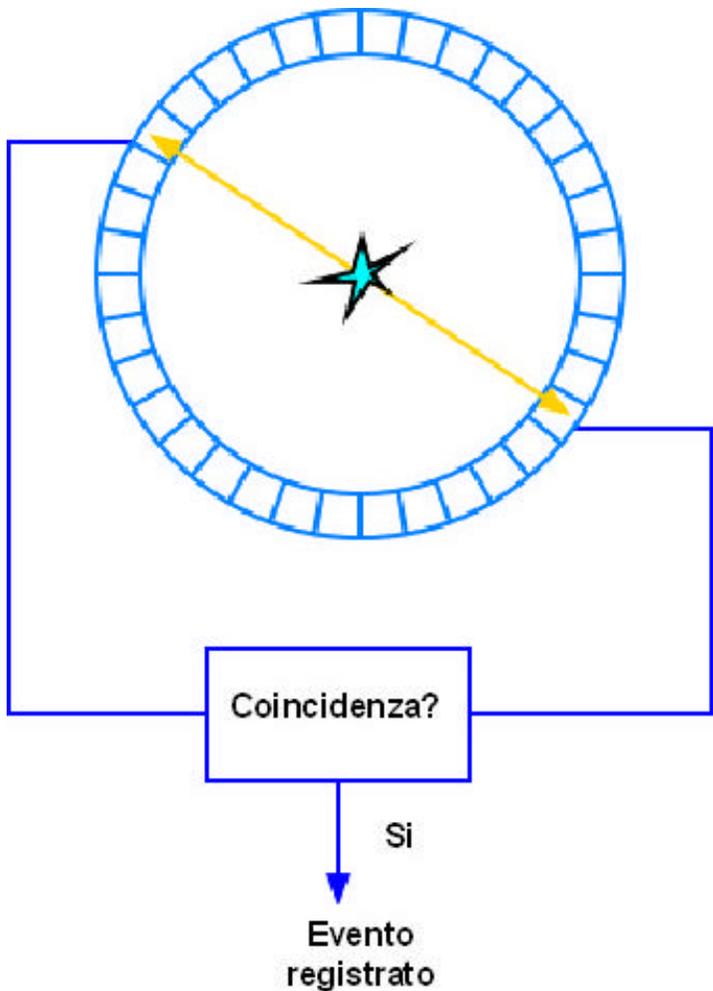
$$\cos \theta_c = \frac{1}{bn}$$



Positron Electron Tomography I

Si tratta di una moderna tecnica medica per visualizzare organi interni.

Un apparecchiatura PET ha ~ 10.000 rivelatori di g
rivalenti BGO di spessore 3 cm



La sostanza iniettata raggiunge l'organo che si vuole visualizzare (cuore, cervello etc...) dove emette positroni → l'annichilazione dei positroni con gli elettroni presenti del corpo produce 2 γ emessi in direzione opposta

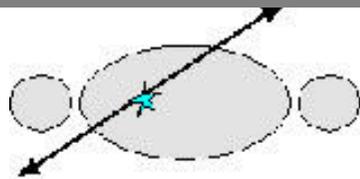


Positron Electron Tomography I I

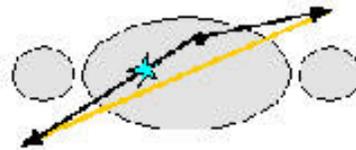


Le risoluzioni spaziali ottenibili con la PET dipendono dal radioisotopo usato ~ 2 mm Φ
4 mm z

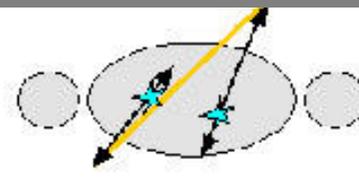
Per ricostruire immagini tridimensionali sono necessari software di ricostruzione molto sofisticati che tengano conto dei fenomeni di diffusione attenuazione falsi eventi.



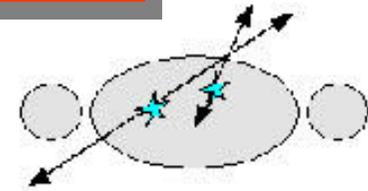
Evento "pulito"



Evento con scattering

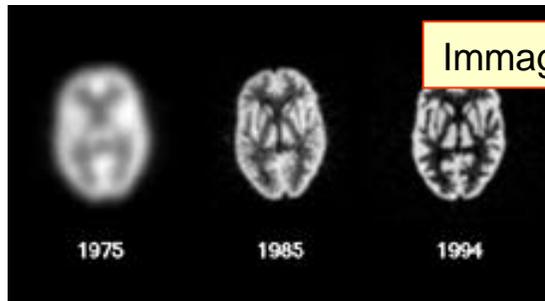
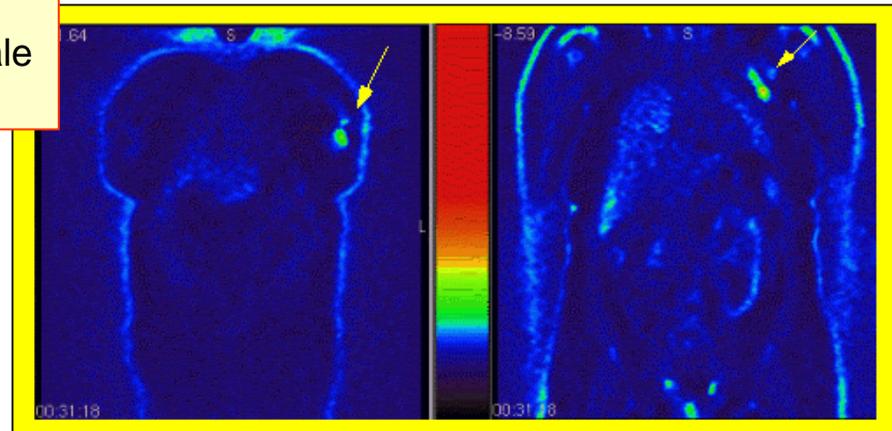


Evento casuale



Evento multiplo

Immagine di un tumore al seno ottenuta con la tecnica PET, la dimensione della massa tumorale è di qualche mm



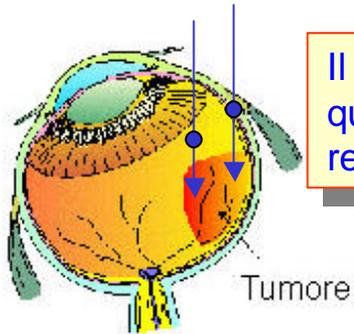
Immagini del cervello

La PET oggi è molto diffusa e praticata grazie anche agli enormi progressi fatti nella produzione di cristalli BGO a basso costo da parte degli esperimenti di fisica delle particelle.

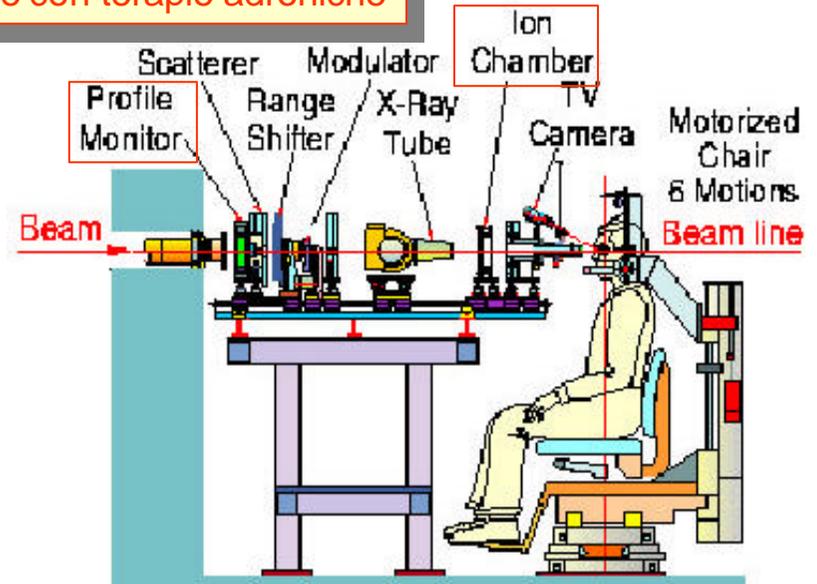
Adroterapia

Gli "Adroni" possono essere usati nella terapia di forme tumorali particolari. Infatti portati all'energia giusta da una macchina acceleratrice, sono in grado di danneggiare i tessuti malati soltanto alla fine del loro percorso nel corpo del paziente, in corrispondenza del tumore stesso

I melanomi oculari sono curabili quasi esclusivamente con terapie adroniche



Il trattamento con protoni permette di depositare quantità di energia controllate direttamente nella regione tumorale



Il Ministro della Sanità ha approvato un programma di ricerca clinica avente come scopo il trattamento dei melanomi oculari con fasci di protoni da 70 MeV presso i LNS (progetto CATANA). Per produrre il fascio di protoni di uso terapeutico si utilizzerà il Ciclotrone Superconduttore presente ai LNS



TERA è acronimo per "Terapia con Radiazioni Adroniche". La Fondazione TERA, ha come scopo lo sviluppo, in Italia e all'estero, delle tecniche di radioterapia basate sull'uso di particelle adroniche e, più in generale, delle applicazioni della fisica e dell'informatica alla medicina e alla biologia.