

Rivelatori di particelle

G. Finocchiaro
INFN-LNF

Stages estivi - Giugno 2009

Conosciamo molte particelle...

Conosciamo molte particelle...

Meson Summary Table

See also the table of suggested $q\bar{q}$ quark-model assignments in the Quark Model section.

• Indicates particles that appear in the preceding Meson Summary Table. We do not regard the other entries as being established

| LIGHT UNFLAVORED ($S = C = B = 0$) | | STRANGE ($S = \pm 1, C = B = 0$) | | CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm 1$) | |
|---|------------|---------------------------------------|------------|---|------------|
| J^P | J^P | J^P | J^P | J^P | J^P |
| π^\pm | $1^-(0^-)$ | $\phi(1680)$ | $0^-(1^-)$ | K^\pm | $1/2(0^-)$ |
| π^0 | $1^-(0^+)$ | $\rho_3(1690)$ | $1^+(3^-)$ | K^0 | $1/2(0^-)$ |
| η | $0^+(0^+)$ | $\rho(1700)$ | $1^+(1^-)$ | K_S^0 | $1/2(0^-)$ |
| $f_0(600)$ | $0^+(0^+)$ | $a_2(1700)$ | $1^-(2^+)$ | K_L^0 | $1/2(0^-)$ |
| $\rho(770)$ | $1^+(1^-)$ | $f_0(1710)$ | $0^+(0^+)$ | $K_1^*(800)$ | $1/2(0^+)$ |
| $\omega(782)$ | $0^-(1^-)$ | $\eta(1760)$ | $0^+(0^+)$ | $K^*(892)$ | $1/2(1^-)$ |
| $\eta'(958)$ | $0^+(0^+)$ | $\pi(1800)$ | $1^-(0^+)$ | $K_1(1270)$ | $1/2(1^+)$ |
| $f_0(980)$ | $0^+(0^+)$ | $f_2(1810)$ | $0^+(2^+)$ | $K_1(1400)$ | $1/2(1^+)$ |
| $a_0(980)$ | $1^-(0^+)$ | $X(1835)$ | $?^?(?^+)$ | $K^*(1410)$ | $1/2(1^-)$ |
| $\phi(1020)$ | $0^-(1^-)$ | $\phi_3(1850)$ | $0^-(3^-)$ | $K_2^*(1430)$ | $1/2(0^+)$ |
| $h_1(1170)$ | $0^-(1^+)$ | $\eta_2(1870)$ | $0^+(2^+)$ | $K_2^*(1430)$ | $1/2(2^+)$ |
| $b_1(1235)$ | $1^+(1^+)$ | $\pi_2(1880)$ | $1^-(2^+)$ | $K(1460)$ | $1/2(0^-)$ |
| $a_1(1260)$ | $1^-(1^+)$ | $\rho(1900)$ | $1^+(1^-)$ | $K_3(1580)$ | $1/2(2^-)$ |
| $f_2(1270)$ | $0^+(2^+)$ | $f_2(1910)$ | $0^+(2^+)$ | $K(1630)$ | $1/2(2^?)$ |
| $f_1(1285)$ | $0^+(1^+)$ | $f_2(1950)$ | $0^+(2^+)$ | $K_1(1650)$ | $1/2(1^+)$ |
| $\eta(1295)$ | $0^+(0^+)$ | $\rho_3(1990)$ | $1^+(3^-)$ | $K^*(1680)$ | $1/2(1^-)$ |
| $\pi(1300)$ | $1^-(0^+)$ | $f_2(2010)$ | $0^+(2^+)$ | $K_2(1770)$ | $1/2(2^-)$ |
| $a_2(1320)$ | $1^-(2^+)$ | $f_0(2020)$ | $0^+(0^+)$ | $K_3^*(1780)$ | $1/2(3^-)$ |
| $f_0(1370)$ | $0^+(0^+)$ | $a_4(2040)$ | $1^-(4^+)$ | $K_2(1820)$ | $1/2(2^-)$ |
| $h_1(1380)$ | $?^-(1^+)$ | $f_4(2050)$ | $0^+(4^+)$ | $K(1830)$ | $1/2(0^+)$ |
| $\pi_1(1400)$ | $1^-(1^+)$ | $\pi_2(2100)$ | $1^-(2^+)$ | $K_2^*(1950)$ | $1/2(0^+)$ |
| $\eta(1405)$ | $0^+(0^+)$ | $f_0(2100)$ | $0^+(0^+)$ | $K_2^*(1980)$ | $1/2(2^+)$ |
| $f_1(1420)$ | $0^+(1^+)$ | $f_2(2150)$ | $0^+(2^+)$ | $K_2^*(2045)$ | $1/2(4^+)$ |
| $\omega(1420)$ | $0^-(1^-)$ | $\rho(2150)$ | $1^+(1^-)$ | $K_2(2250)$ | $1/2(2^-)$ |
| $f_2(1430)$ | $0^+(2^+)$ | $\phi(2170)$ | $0^-(1^-)$ | $K_3(2320)$ | $1/2(3^+)$ |
| $a_0(1450)$ | $1^-(0^+)$ | $f_0(2200)$ | $0^+(0^+)$ | $K_4^*(2380)$ | $1/2(5^-)$ |
| $\rho(1450)$ | $1^+(1^-)$ | $f_2(2220)$ | $0^+(2^+)$ | $K_4(2500)$ | $1/2(4^-)$ |
| $\eta(1475)$ | $0^+(0^+)$ | or 4^+ | | $K(3100)$ | $?^?(?^?)$ |
| $f_0(1500)$ | $0^+(0^+)$ | $\eta(2225)$ | $0^+(0^+)$ | | |
| $f_1(1510)$ | $0^+(1^+)$ | $\rho_3(2250)$ | $1^+(3^-)$ | | |
| $f_2'(1525)$ | $0^+(2^+)$ | $f_2(2300)$ | $0^+(2^+)$ | | |
| $f_2(1565)$ | $0^+(2^+)$ | $f_4(2300)$ | $0^+(4^+)$ | | |
| $\rho(1570)$ | $1^+(1^-)$ | $f_0(2330)$ | $0^+(0^+)$ | | |
| $h_1(1595)$ | $0^-(1^+)$ | $f_2(2340)$ | $0^+(2^+)$ | | |
| $\pi_1(1600)$ | $1^-(1^+)$ | $\rho_3(2350)$ | $1^+(5^-)$ | | |
| $a_1(1640)$ | $1^-(1^+)$ | $a_6(2450)$ | $1^-(6^+)$ | | |
| $f_2(1640)$ | $0^+(2^+)$ | $f_0(2510)$ | $0^+(6^+)$ | | |
| $\eta_2(1645)$ | $0^+(2^+)$ | | | | |
| $\omega(1650)$ | $0^-(1^-)$ | | | | |
| $\omega_3(1670)$ | $0^-(3^-)$ | | | | |
| $\pi_2(1670)$ | $1^-(2^-)$ | | | | |

76

Baryon Summary Table

This short table gives the name, the quantum numbers (where known), and the status of baryons in the Review. Only the baryons with 3- or 4-star status are included in the main Baryon Summary Table. Due to insufficient data or uncertain interpretation, the other entries in the short table are not established baryons. The names with masses are of baryons that decay strongly. For N , Δ , and Ξ resonances, the πN partial wave is indicated by the symbol L_{2J} , where L is the orbital angular momentum (S, P, D, \dots), I is the isospin, and J is the total angular momentum. For Λ and Σ resonances, the KN partial wave is labeled $L_{I,2J}$. The nucleon is a pole in the P_{11} wave, and similar comments apply to the Λ and Σ .

| $c\bar{c}$ | | $b\bar{b}$ | | NON- $q\bar{q}$ CANDID. | |
|-----------------|----------|-----------------|----------|-------------------------|---------------|
| J^P | J^P | J^P | J^P | J^P | J^P |
| $\eta_c(1S)$ | $0^+(0)$ | $\eta_b(1S)$ | $0^+(0)$ | Λ | P_{01} **** |
| $J/\psi(1S)$ | $0^-(1)$ | $\gamma(1S)$ | $0^-(1)$ | $\Lambda(1405)$ | S_{01} **** |
| $\chi_{c0}(1P)$ | $0^+(0)$ | $\chi_{b0}(1P)$ | $0^+(0)$ | $\Lambda(1520)$ | D_{03} **** |
| $\chi_{c1}(1P)$ | $0^+(1)$ | $\chi_{b1}(1P)$ | $0^+(1)$ | $\Lambda(1600)$ | P_{01} **** |
| $h_c(1P)$ | $?^?(1)$ | $\chi_{b2}(1P)$ | $0^+(2)$ | $\Lambda(1670)$ | S_{01} **** |
| $\chi_{c2}(1P)$ | $0^+(2)$ | $\gamma(2S)$ | $0^-(2)$ | $\Lambda(1690)$ | D_{03} **** |
| $\eta_c(2S)$ | $0^-(0)$ | $\chi_{b2}(2P)$ | $0^+(2)$ | $\Lambda(1800)$ | S_{01} **** |
| $\psi(2S)$ | $0^-(1)$ | $\gamma(3S)$ | $0^-(3)$ | $\Lambda(1810)$ | P_{01} **** |
| $\psi(3770)$ | $0^-(1)$ | $\gamma(4S)$ | $0^-(4)$ | $\Lambda(1820)$ | F_{05} **** |
| $X(3872)$ | $0^?(?)$ | $\gamma(10860)$ | $0^-(1)$ | $\Lambda(1830)$ | D_{05} **** |
| $\chi_{c2}(2P)$ | $0^+(2)$ | $\gamma(11020)$ | $0^-(1)$ | $\Lambda(1890)$ | P_{03} **** |
| $X(3940)$ | $?^?(?)$ | | | $\Lambda(2000)$ | * |
| $X(3945)$ | $?^?(?)$ | | | $\Lambda(2020)$ | F_{07} * |
| $\psi(4040)$ | $0^-(1)$ | | | $\Lambda(2100)$ | G_{07} **** |
| $\psi(4160)$ | $0^-(1)$ | | | $\Lambda(2110)$ | F_{05} **** |
| $X(4260)$ | $?^?(?)$ | | | $\Lambda(2250)$ | D_{03} * |
| $X(4360)$ | $?^?(?)$ | | | $\Lambda(2325)$ | H_{09} **** |
| $\psi(4415)$ | $0^-(1)$ | | | $\Lambda(2350)$ | ** |
| | | | | $\Lambda(2585)$ | ** |

...ma ne riveliamo direttamente solo alcune

- Le particelle si differenziano per le loro caratteristiche: massa a riposo, momento angolare, numeri quantici, e

vita media, τ

π^0 ha $\tau \sim 0.8 \cdot 10^{-16}$ sec (decadimento elettromagnetico);

ρ^0 ha $\tau \sim 0.4 \cdot 10^{-23}$ sec; (decadimento forte);

π^+ ha $\tau \sim 2.6 \cdot 10^{-8}$ sec; μ^+ ha $\tau \sim 2 \cdot 10^{-6}$ sec (decadimento debole);

- Il tempo subisce una dilatazione a causa della relatività speciale, di un fattore

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad t = \gamma \tau$$

- Ad esempio un μ^+ che viaggia a velocità 0.95c ci appare vivere 10 volte più a lungo

- Di fatto, si rivelano solo particelle “stabili”

– e, p, n, K, π , μ , γ

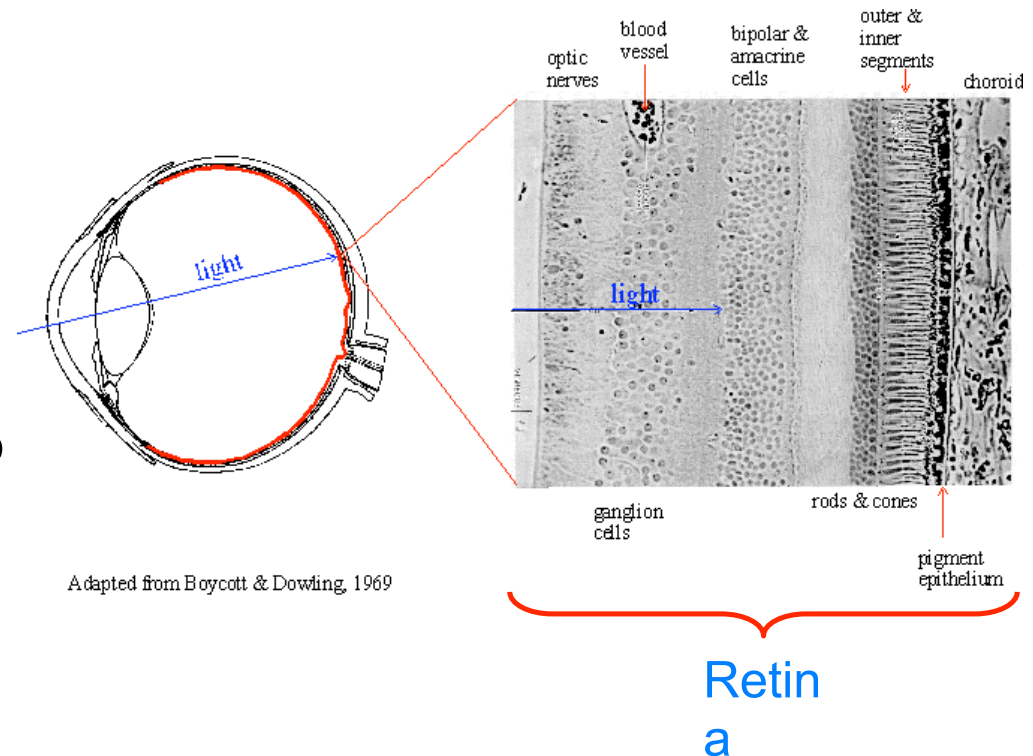
LNF - stages estivi 2009

G. Finocchiaro

3

Il più antico rivelatore di particelle

- Alta sensibilità ai fotoni
- Buona risoluzione spaziale
- Range dinamico molto elevato ($1:10^{14}$) +adattamento automatico della soglia
- Discriminazione in energia (lunghezza d'onda)
- Velocità limitata ($\sim 10\text{Hz}$, incluso il “processing”)



Il primo rivelatore di fotoni dell'era moderna



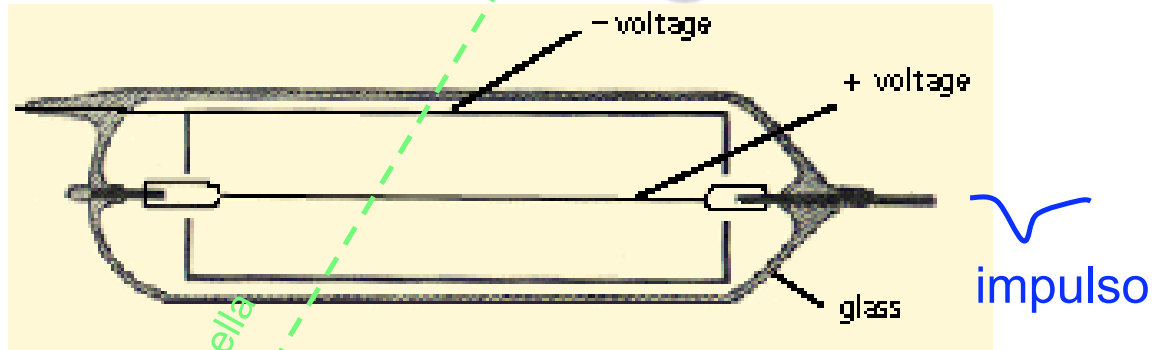
W.C. Roentgen:
primo Premio Nobel per la
Fisica, 1901



La mano della S.ra Roentgen

- AgBr + energia → Ag metallico
- Lastra fotografica impressionata
- Eccellente risoluzione spaziale
- Buon range dinamico
- Nessuna risoluzione temporale

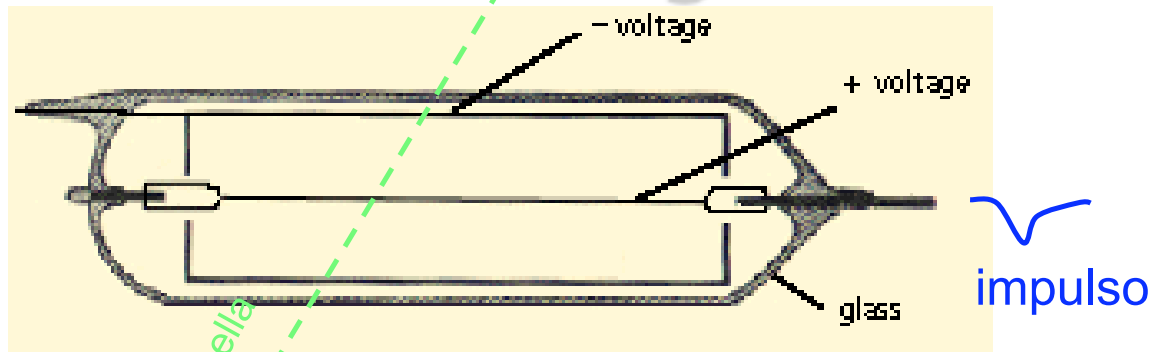
Segnali elettrici!



H. Geiger

Contatore Geiger-Muller ~1910
Primo segnale elettrico da una particella

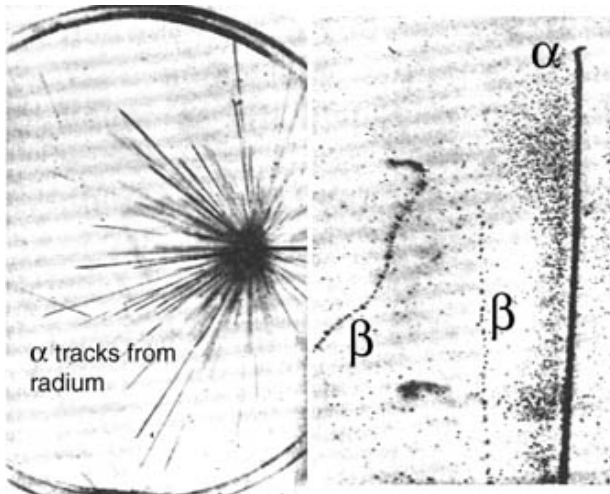
Segnali elettrici!



H. Geiger

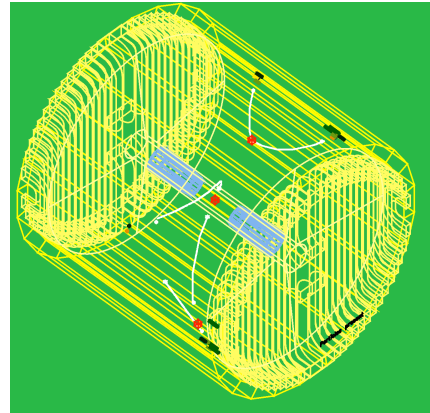
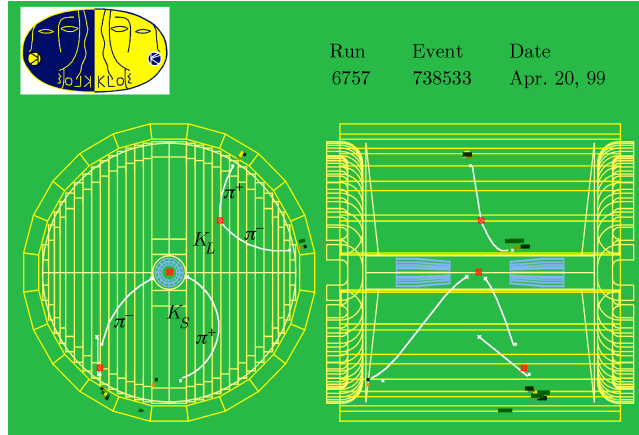
Contatore Geiger-Muller ~1910
Primo segnale elettrico da una particella

... e poi:

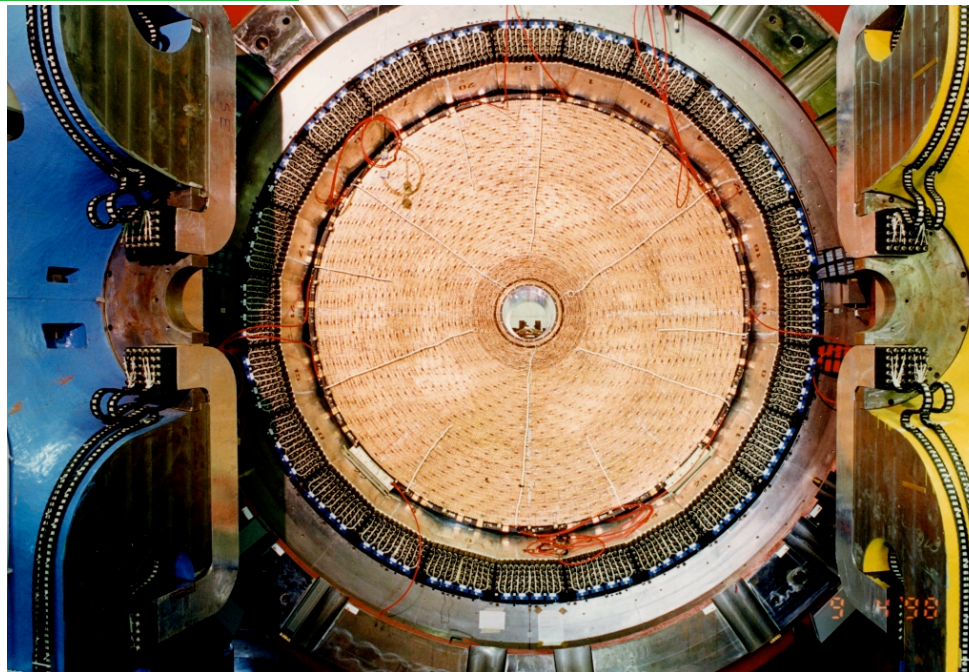


Camera a nebbia ~1912
Primo rivelatore di traccia

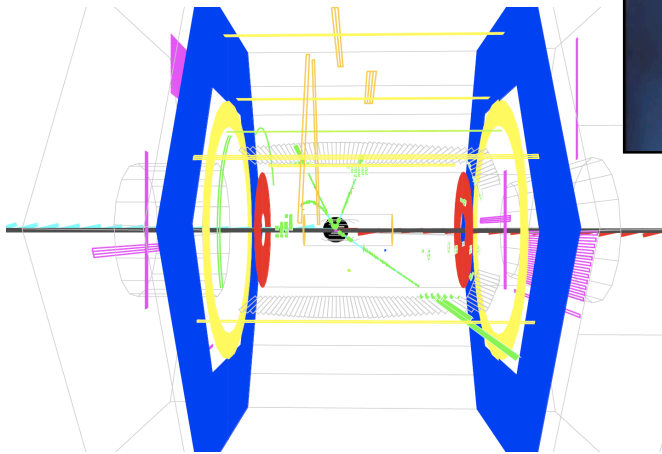
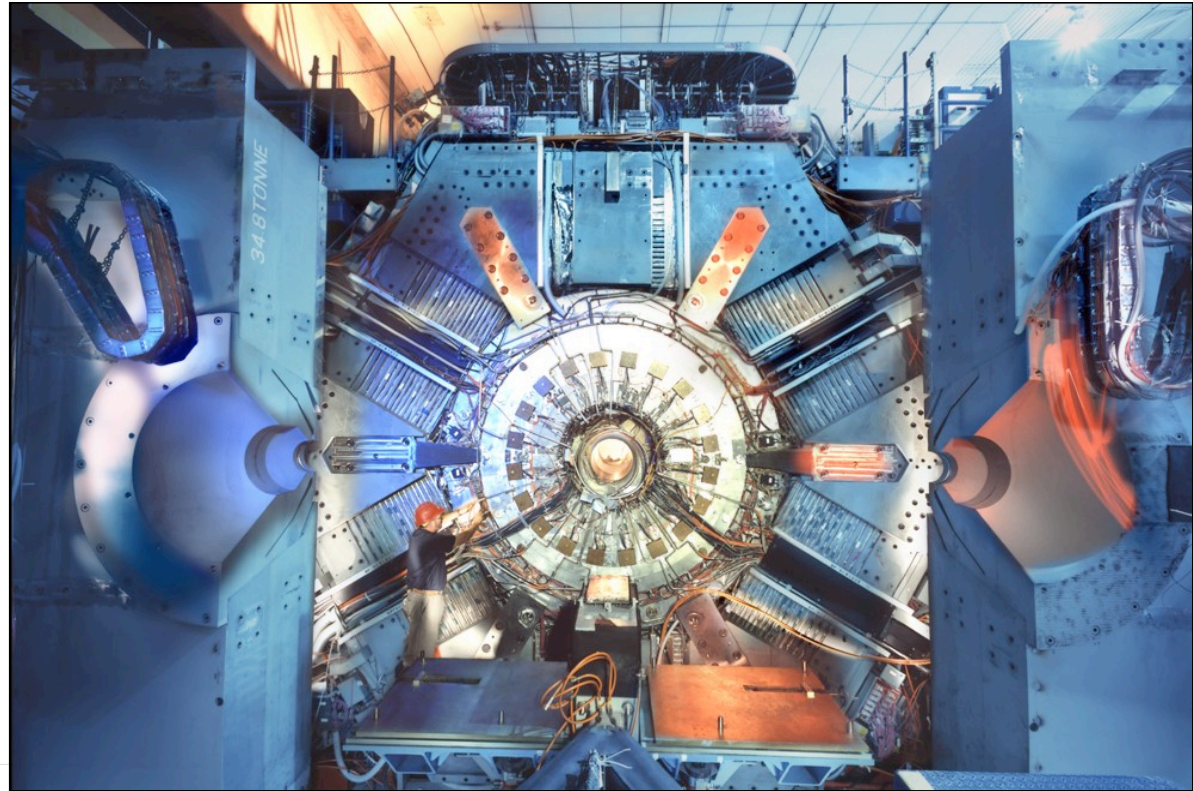
KLOE!



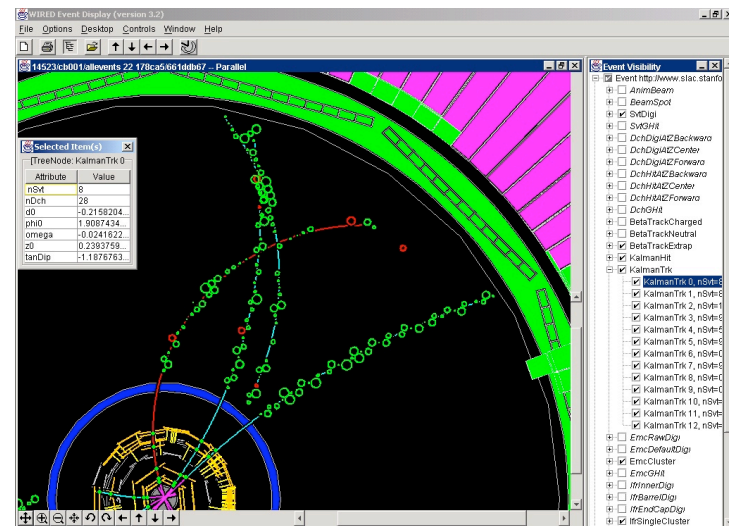
Primo evento candidato $K_S K_L$ nel rivelatore KLOE (LNF)



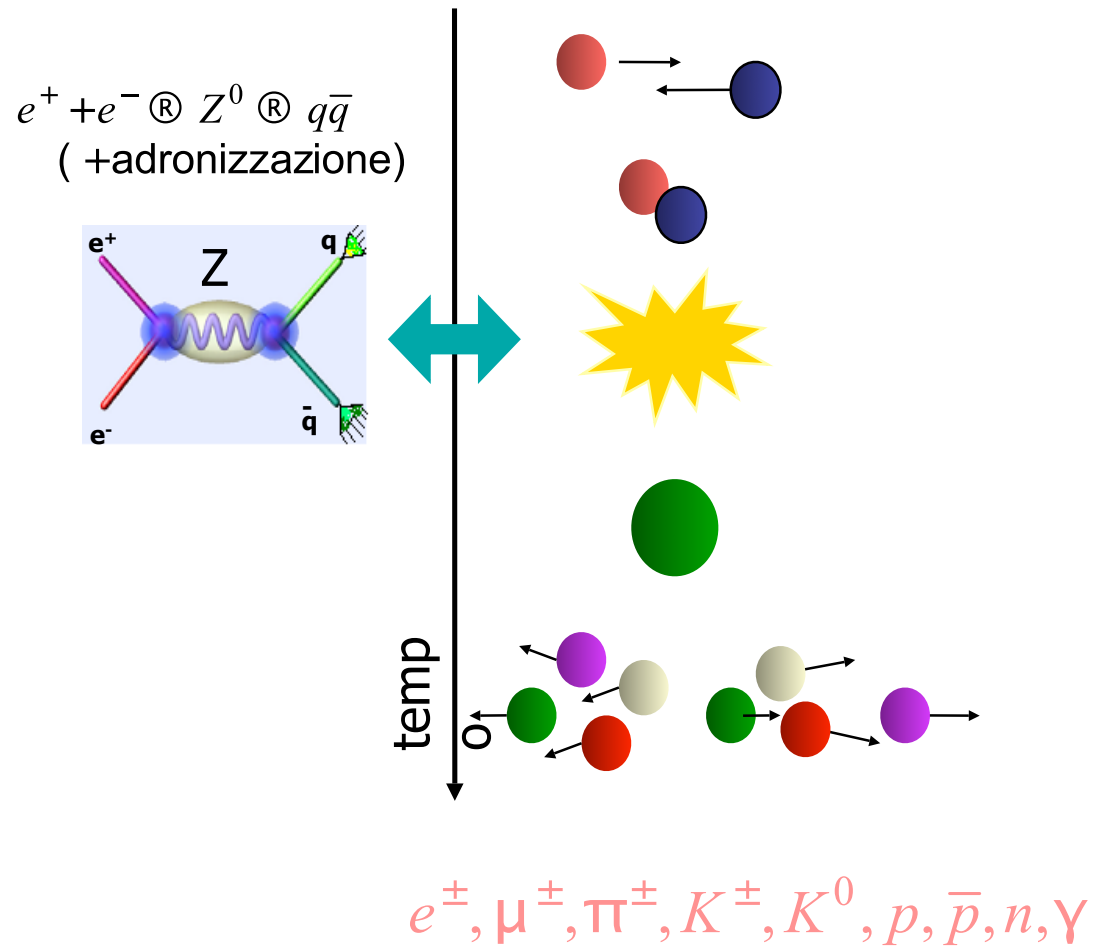
BABAR



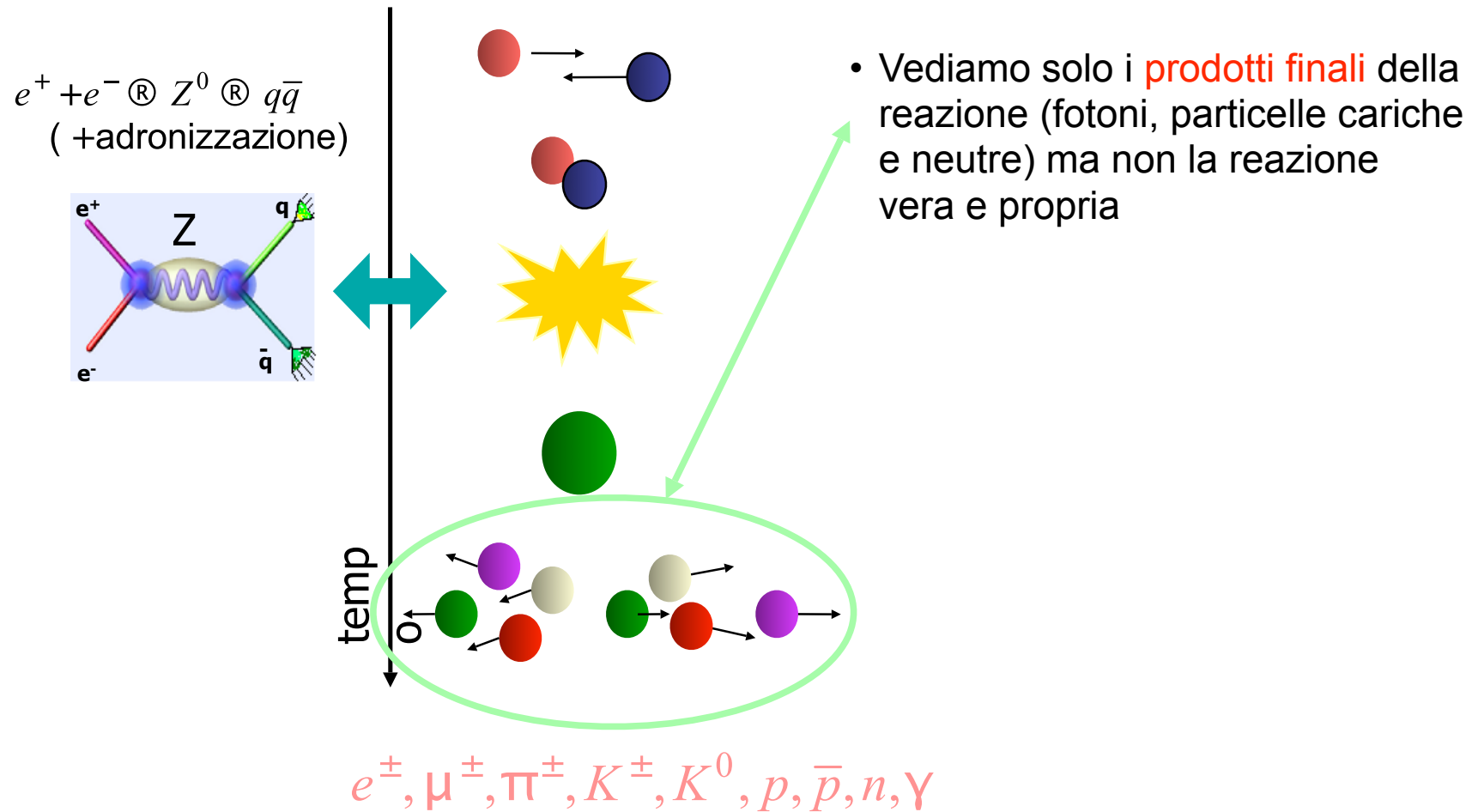
Due eventi nel rivelatore
BABAR (SLAC)



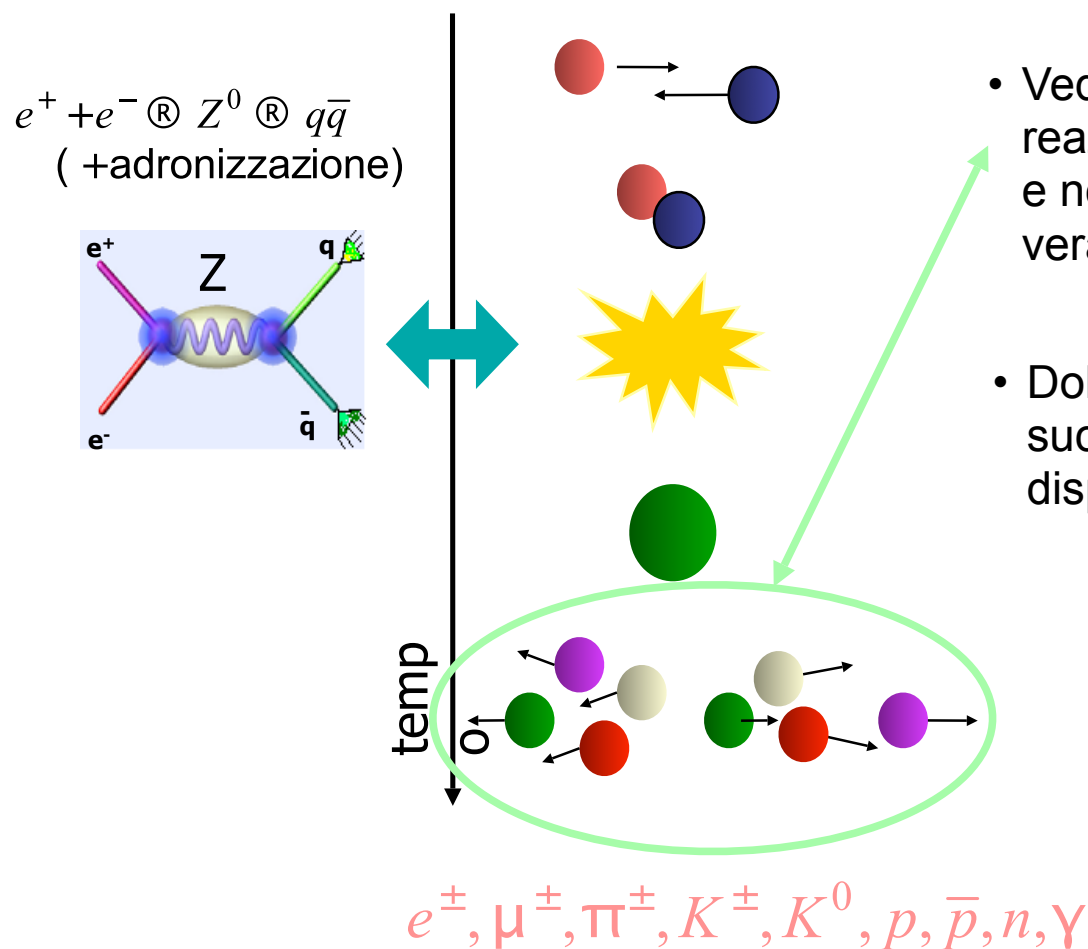
(Visione semplificata di) Una reazione di fisica delle particelle



(Visione semplificata di) Una reazione di fisica delle particelle



(Visione semplificata di) Una reazione di fisica delle particelle



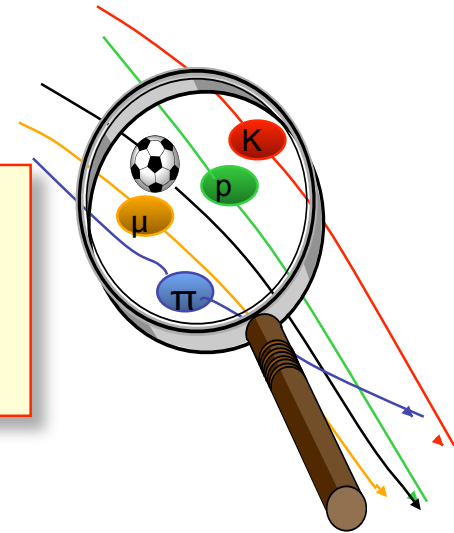
- Vediamo solo i **prodotti finali** della reazione (fotoni, particelle cariche e neutre) ma non la reazione vera e propria
- Dobbiamo ricostruire quello che è successo partendo dagli indizi a disposizione



Cosa sono i rivelatori di particelle

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

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 siamo in grado di determinare traiettorie, velocità, masse, cariche elettriche.



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

- o **accettanza completa** e fitta segmentazione
 - ✓ tutte le particelle prodotte sono rivelate
- o effettua misure *precise* di **impulso ed energia**
- o ricostruisce le **tracce ed identifica** tutte le particelle
- o tempo morto nullo ➔ **velocità di risposta elevata**

Principi generali

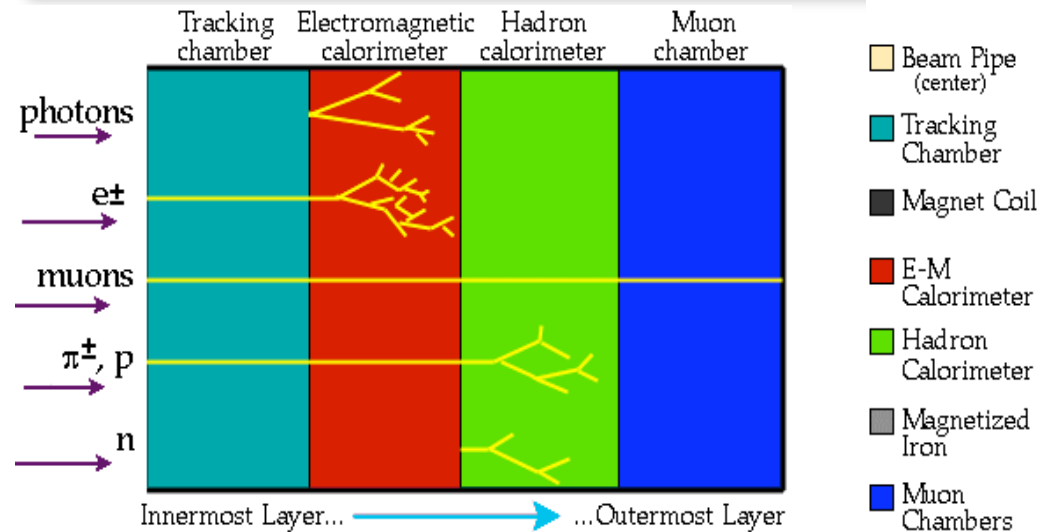
I processi che permettono di rivelare le particelle sub-nucleari sono diversi:

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**

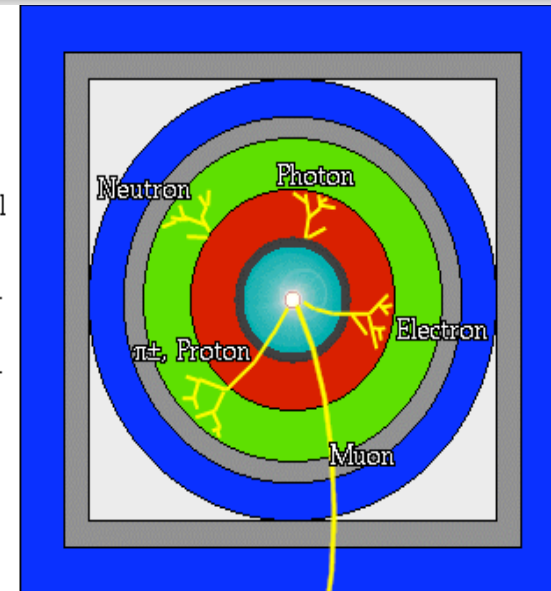
I **neutroni** subiscono interazioni forti con i nuclei dei materiali producendo **particelle secondarie cariche**

Le particelle piu` 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



LNF - stages estivi 2009

G. Fin



Definizioni e unità di

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

Energia E misurata in eV

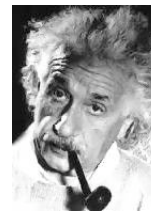
impulso p misurato in eV/c

massa m_0 misurata in eV/c²

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$E = m_0 \gamma c^2$$



$$p = m_0 \gamma \beta c$$

$$\beta = \frac{pc}{E}$$

ma quanta energia è 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:

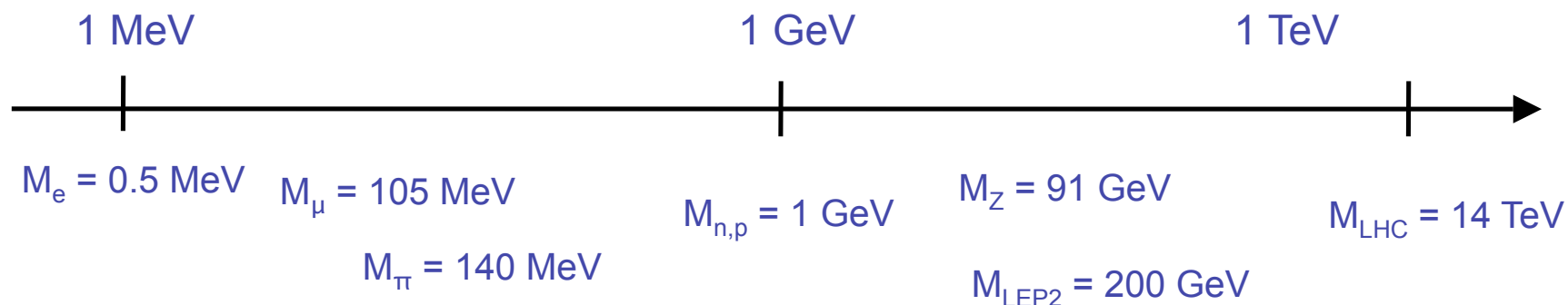
10^{14} protoni $\rightarrow 10^{14} \cdot 10^{12} \text{ eV} \rightarrow 10^8 \text{ J}$ questo corrisponde a



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

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

Alcuni valori di massa ed energia:



Valori tipici di lunghezze

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

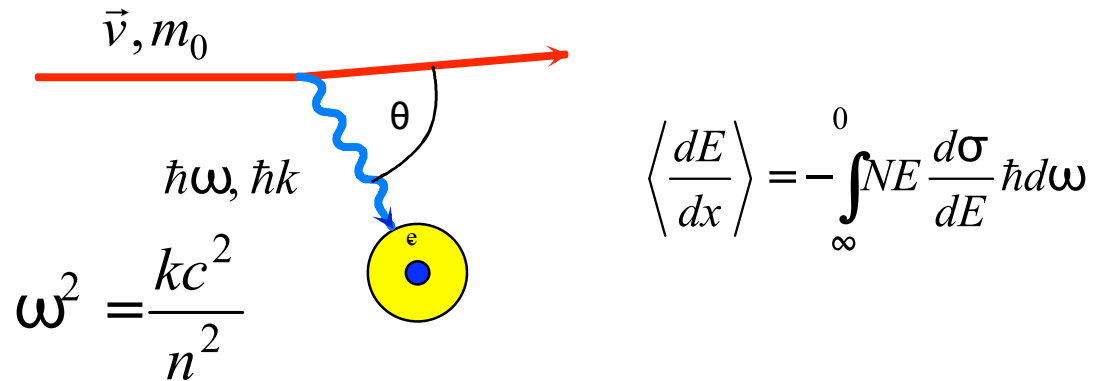
Valori tipici di tempo

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

spesso per semplificare le formule si pone

$$\hbar = c = 1 \rightarrow E^2 = p^2 + m_0^2 \rightarrow [E] = [m] = [p] = \text{eV}$$

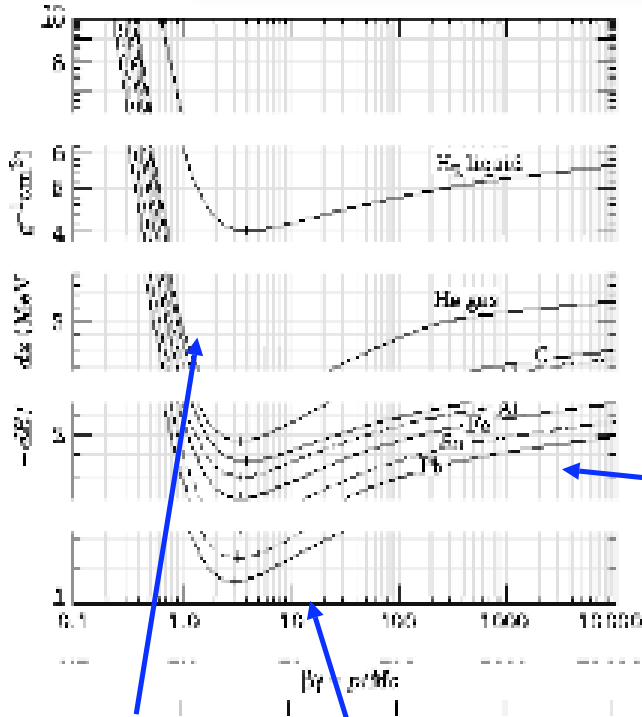
Particelle cariche nella materia



- Scambio di energia con gli elettroni atomici del materiale attraversato (viene emesso un fotone di energia $E_\gamma = \hbar\omega$). Diverse possibilità:
 - $E_\gamma <$ energia di ionizzazione, e $\beta > 1/n$ (più veloce della luce!): il fotone è reale \rightarrow **effetto Cherenkov** (discusso più tardi)
 - $2\text{eV} < E_\gamma < 5\text{KeV}$ fotone virtuale \rightarrow **eccitazione/ionizzazione**
 - $E_\gamma > 5\text{KeV}$ (raggi X) \rightarrow radiazione di transizione (non la discuto)

La formula di Bethe-Bloch

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



$Z/A = 1$
"plateau
di Fermi"

Perdita **media** di energia per ionizzazione di una particella carica "pesante" ($m \gg m_e$)

$Z/A \sim 0.5$

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \ln \beta^2 \gamma^2$$

"risalita relativistica"

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{1}{\beta^2}$$

$\beta\gamma \approx 3-4$: MIPs
(minimum ionizing particles)

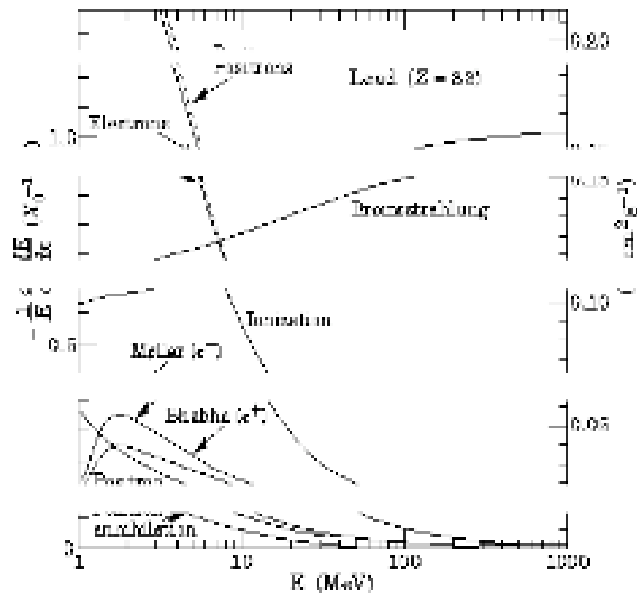
- ✓ in $[\text{MeV g}^{-1} \text{ cm}^2]$
- ✓ dipende solo da β , non da m
- ✓ $I < dE < T_{\max}$
- ✓ I = potenziale di ionizzazione medio
 - ✓ $I \sim Z I_0$, con $I_0 \sim 10 \text{ eV}$

Perdita di energia di elettroni e positroni

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

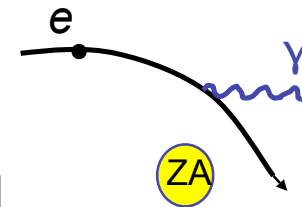
Per $e^+ e^-$ le cose cambiano:

- la massa del bersaglio e del proiettile sono uguali
- Bremsstrahlung.



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

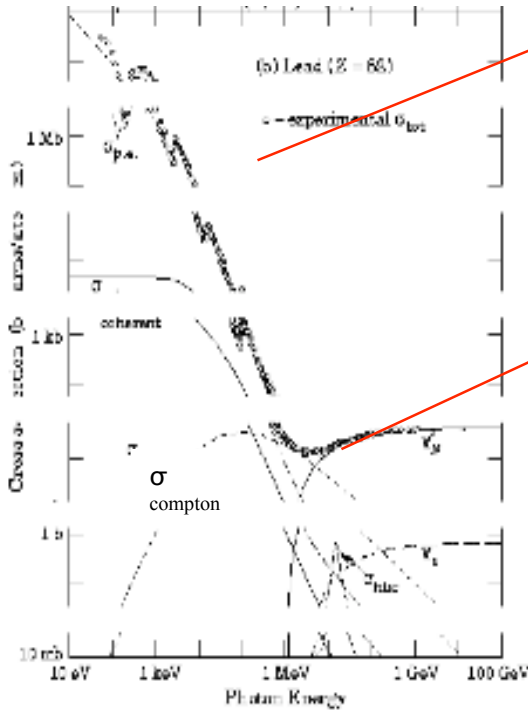
Lunghezza di radiazione



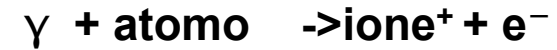
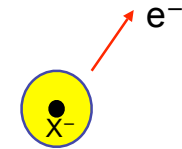
Per energie di elettroni/positroni > 10 MeV entra in gioco il **fenomeno della Bremsstrahlung**:
emissione di fotoni dovuta all'effetto accelerante del campo Coulombiano dei nuclei

Rivelazione di fotoni

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



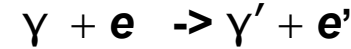
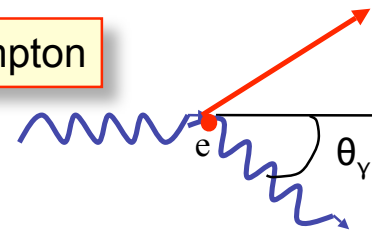
Effetto fotoelettrico



Vengono estratti principalmente elettroni delle shell K

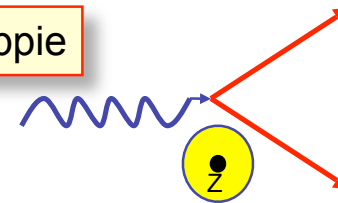
$$\sigma_{\text{foto}} \propto Z^5$$

Diffusione Compton



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

Produzione di coppie

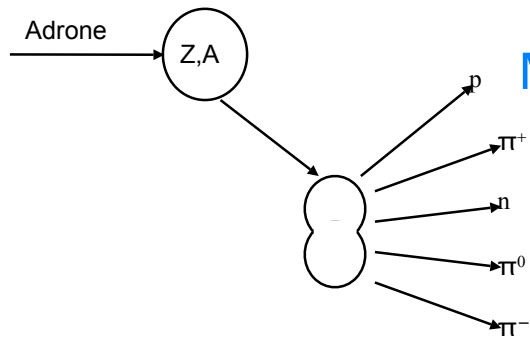


Solo se

$$E_{\gamma} > m_e c^2$$

Rivelazione di adroni

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



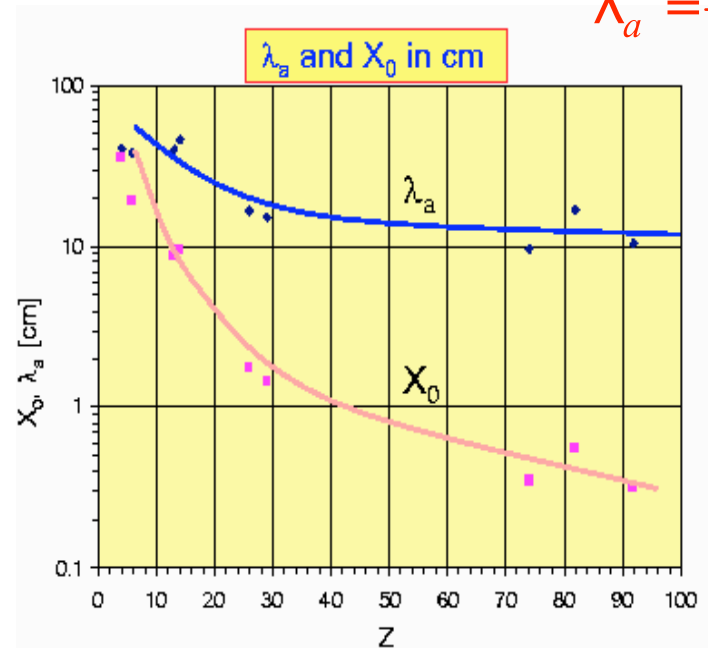
Molteplicità $\sim \ln(E)$

In analogia con l'interazione e.m. si definisce il **coefficiente di assorbimento adronico**

$$\lambda_a = \frac{A}{N_A \sigma_{inel}}$$

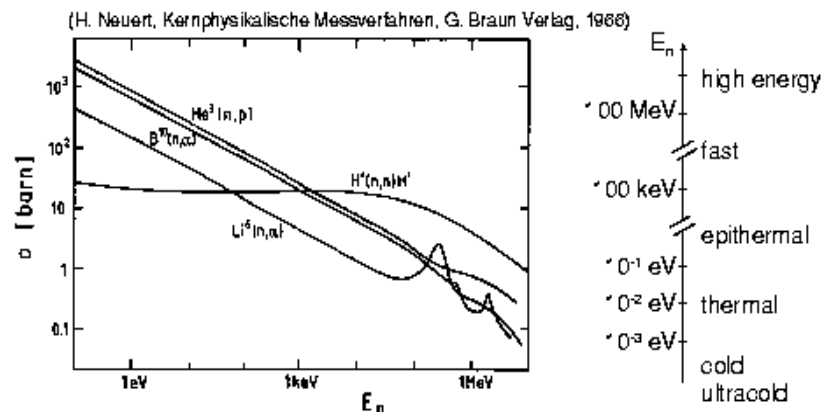
| Material | Z | A | ρ [g/cm ³] | X_0 [g/cm ²] | λ_a [g/cm ²] |
|----------------|----|--------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Hydrogen (gas) | 1 | 1.01 | 0.0899 (g/l) | 63 | 50.8 |
| Helium (gas) | 2 | 4.00 | 0.1786 (g/l) | 94 | 65.1 |
| 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

I neutroni non hanno carica → interagiscono con la materia tramite **interazioni forti e deboli**



Reazioni attraverso le quali è possibile rivelare i neutroni:

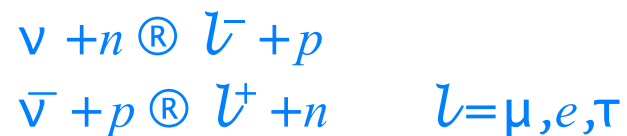
- $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + {}^3\text{He}$
 - $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$
 - $n + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^3\text{H}$
 - $n + p \rightarrow n + p$
- $E_n < 20$
MeV

$E_n < 1\text{GeV}$

...inoltre per neutroni termici ($E_n < 0.1$ eV) si possono avere fenomeni di fissione e per neutroni $E_n > 1\text{GeV}$ fenomeni di cascata adronica

Rivelazione di neutrini

Anche i neutrini sono rivelati con processi indiretti



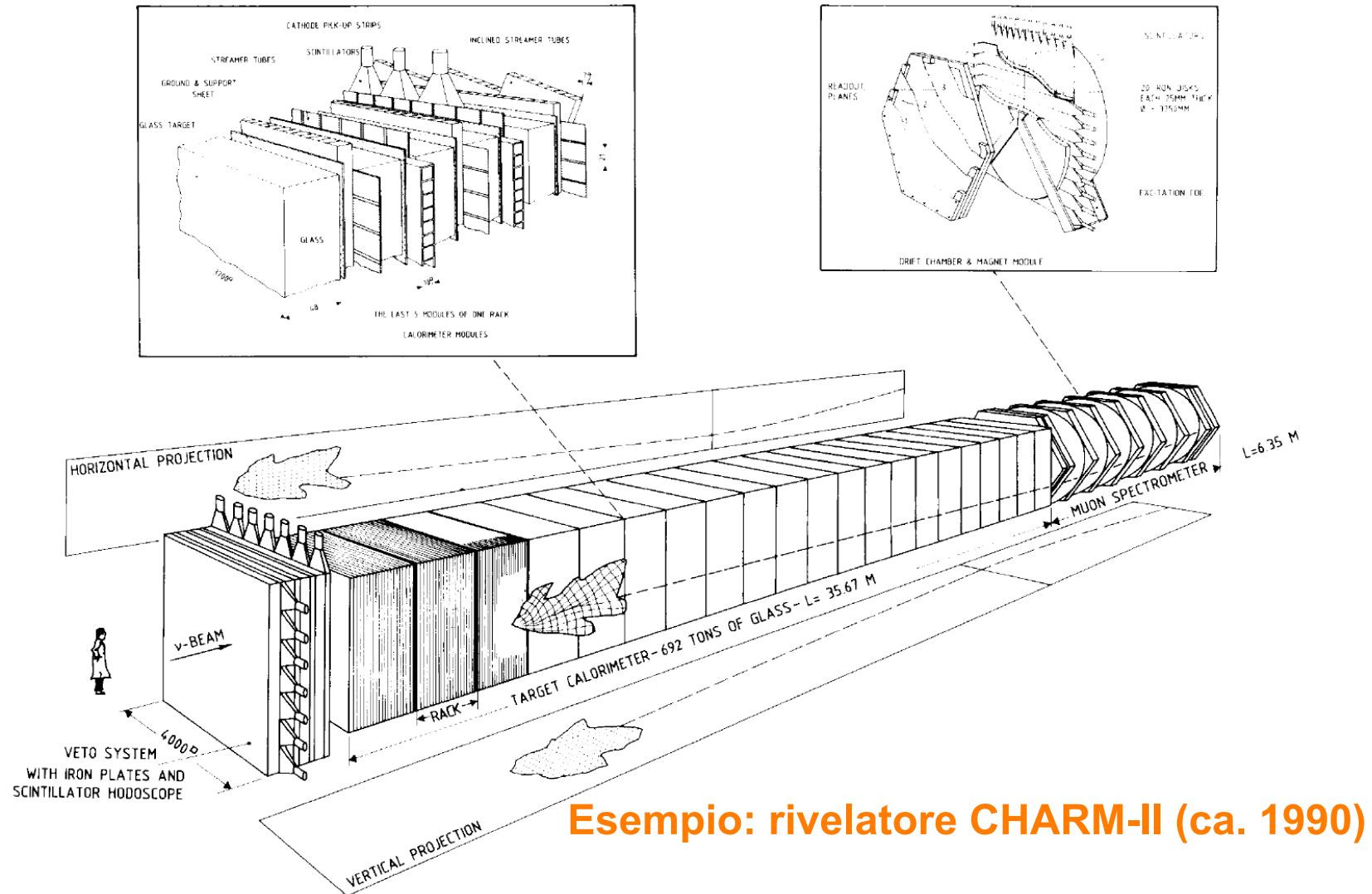
Piccolo problema:

sezioni d'urto $\sigma \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$!!

Efficienza di rivelazione: $\epsilon_{\text{riv}} = \sigma \rho N_A / Ad \rightarrow$ in 1 m di Fe $\epsilon \sim 5 \times 10^{-17}$

Per rivelare i ν occorrono flussi elevati e rivelatori MOLTO massicci (~kTon)

Rivelazione di neutrini



Esempio: rivelatore CHARM-II (ca. 1990)

Rivelazione di neutrini

Altrimenti...

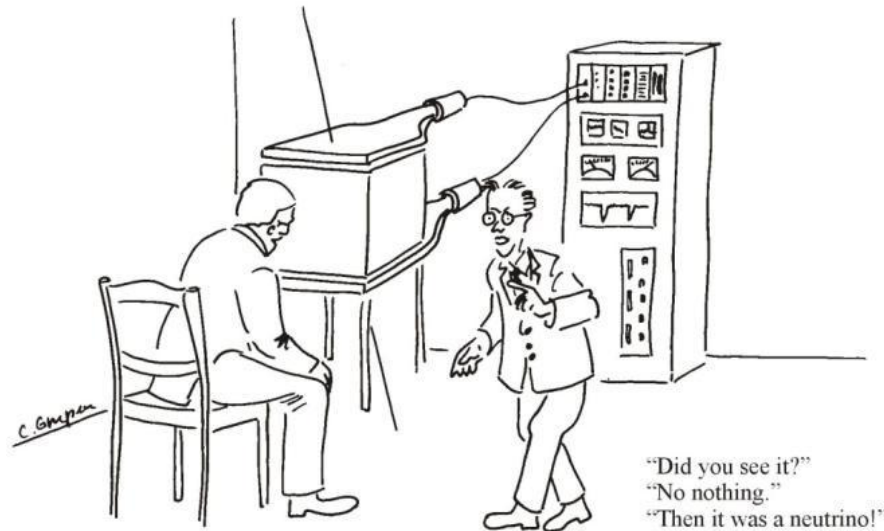
Rivelazione di neutrini “in negativo”

Rivelazione di neutrini “in negativo”

Misura dell'impulso totale $P_{TOT} = \sum p_i$

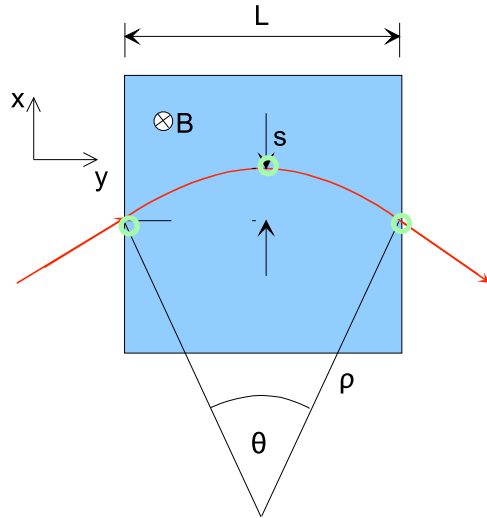
L'impulso mancante puo' essere attribuito a particelle che non interagiscono (ν) se:

- È noto con precisione lo stato iniziale
 - esperimenti agli acceleratori e^+e^- ,
- Il rivelatore è **ermetico**



Misura dell'impulso di una particella carica

Deflessione in un campo magnetico $\frac{mv^2}{\rho} = q(v \times B) \quad \textcircled{R} \quad p_T = qB\rho$

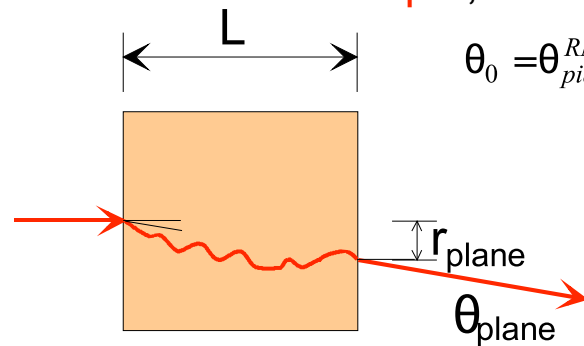


$$p_T \text{ (GeV/c)} = 0.3 B \rho \text{ (T m)}$$

L'errore su p_T dipende dalla precisione e dal numero delle misure di posizione

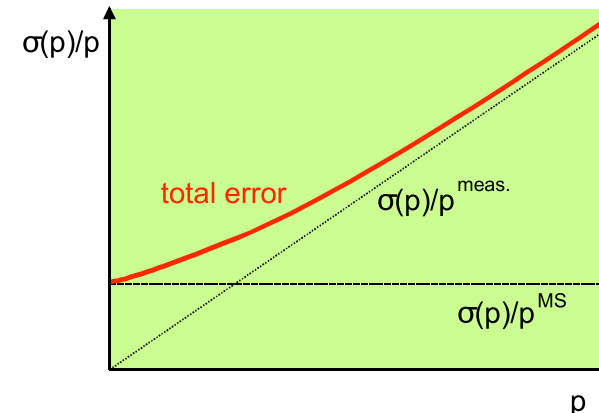
$$\left. \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right|^{risol.} = \frac{\sigma(x) p_T}{0.3 B L^2} \sqrt{720/(N+4)}$$

Una particella carica attraversando uno strato di materiale effettua molte collisioni
 → **diffusione multipla**, che deteriora la misura di posizione, e quindi di impulso



$$\theta_0 = \theta_{piano}^{RMS} \propto \frac{1}{p} \sqrt{\frac{L}{X_0}}$$

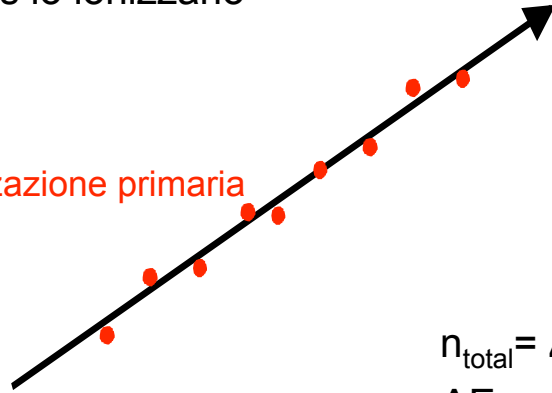
$$\left. \frac{\sigma(p)}{p} \right|^{MS} = 0.045 \frac{1}{B \sqrt{L X_0}}$$



Rivelatori a gas: ionizzazione

Le particelle cariche attraversando un gas lo ionizzano

Ionizzazione primaria

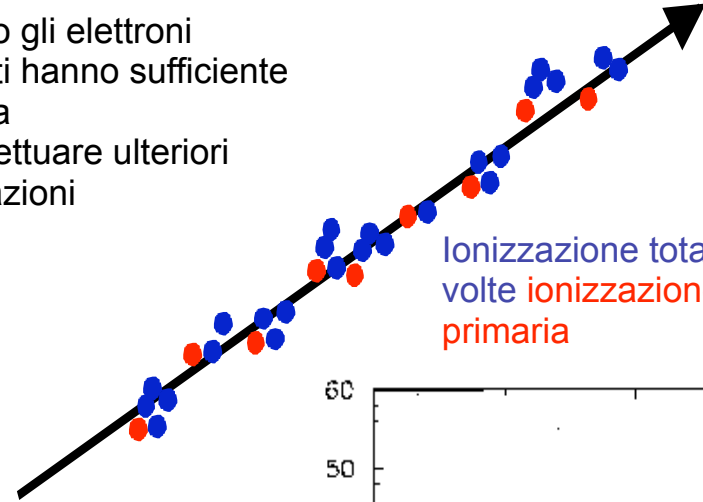


Spesso gli elettroni prodotti hanno sufficiente energia per effettuare ulteriori ionizzazioni

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

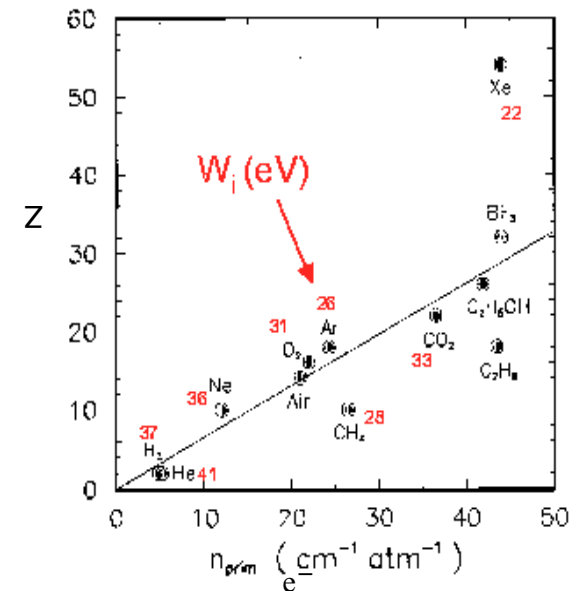
$$\Delta E = dE/dx \Delta x$$

W_i = potenziale di estrazione



Ionizzazione totale ~ 3, 4 volte ionizzazione primaria

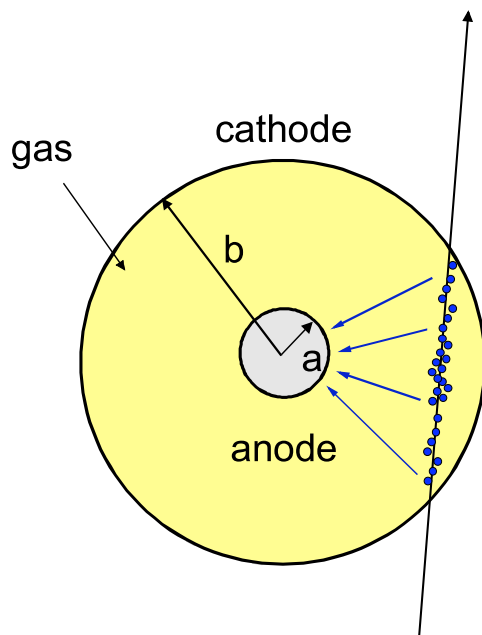
I gas nobili hanno le shell elettroniche complete, e dissipano l'energia trasferita solo attraverso la ionizzazione.
Non hanno affinità elettronica e
Si aggiungono basse percentuali di idrocarburi per evitare scariche.



Una MIP perde circa 2 MeV in un cm di Ar ~100 coppie e⁻ /ione
troppo poche per essere rivelate → occorre amplificare il segnale

Rivelatori a gas: amplificazione

Un caso semplice: tubo cilindrico con filo al centro

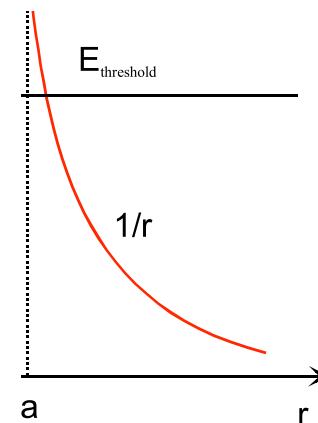


Il campo elettrico è:

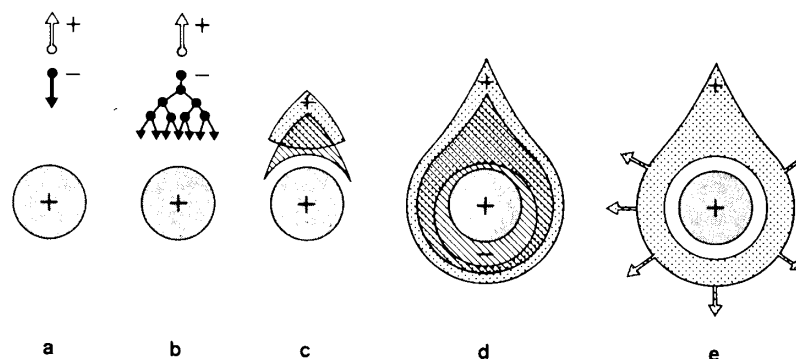
$$E(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

$$V(r) = \frac{CV_0}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{a}$$

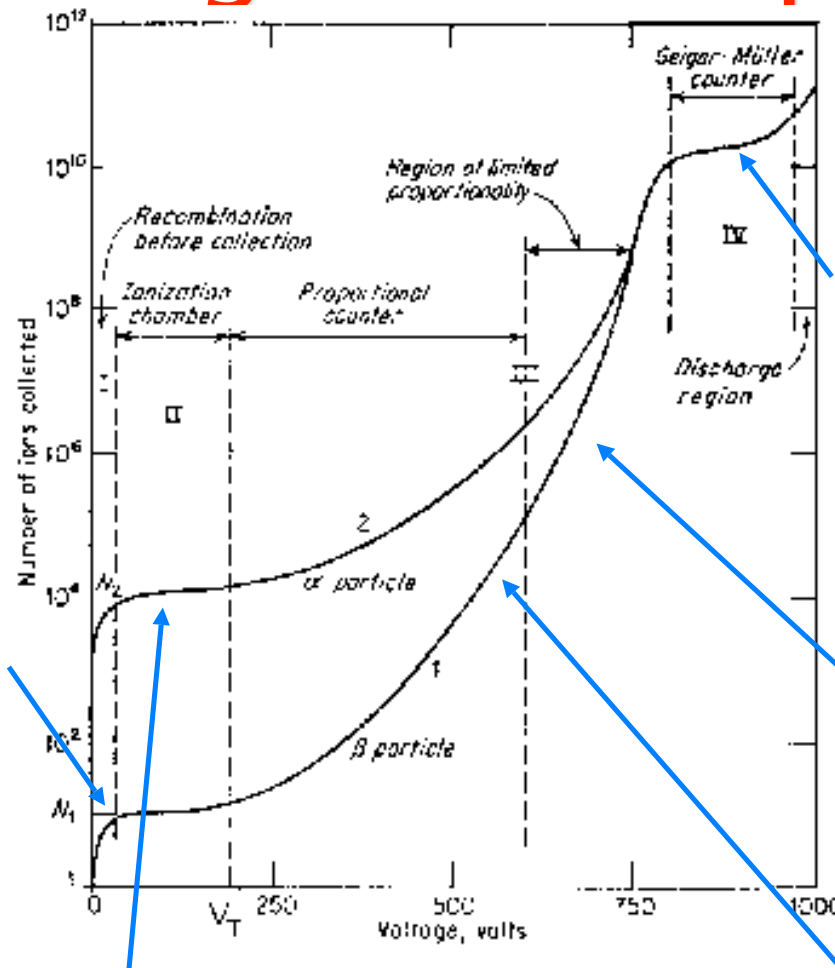
C = capacità/cm



- ⚡ Gli elettroni viaggiano verso il filo (“drift” o “deriva”) e vedono un campo elettrico che cresce come $1/r$
- ⚡ Quando $E >$ qualche kV/cm, inizia un processo a valanga



Diversi regimi di amplificazione



ricombinazione: gli elettroni prodotti si ricombinano con gli atomi del gas.

ionizzazione: la carica è raccolta senza moltiplicazione delle coppie ione-elettrone.

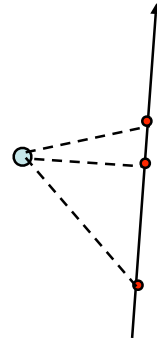
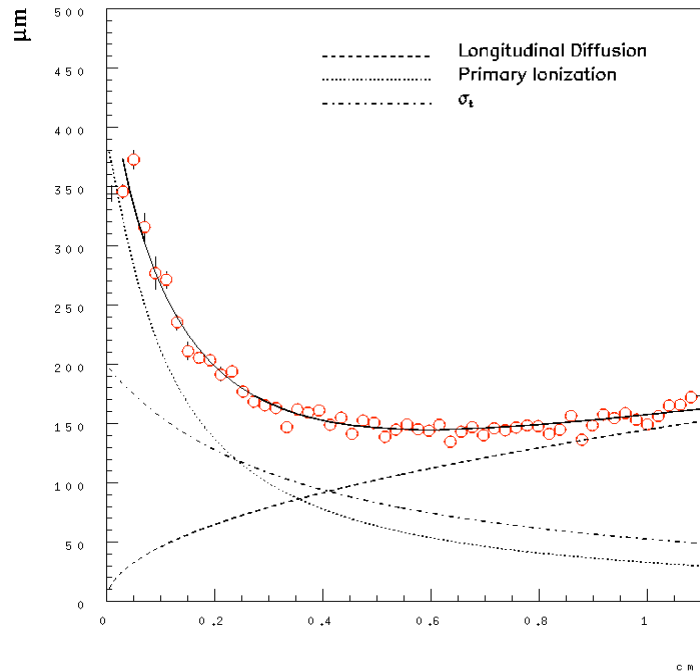
Proporzionale: moltiplicazione a valanga. Il segnale dell'apparato è proporzionale alla ionizzazione → misura di dE/dx e guadagno 10^4-10^6

geiger: grossa fotoemissione, il filo anodico è tutto coinvolto, scarica eliminata solo abbassando HV.

proporzionale limitato → saturazione → streamer Forte emissione di fotoni, valanghe secondarie, alti guadagni (10^{10}) → elettronica semplice.

Risoluzione spaziale

ESEMPIO: Fit alla risoluzione spaziale in funzione della distanza della traccia dal filo di segnale nella camera a deriva di KLOE (vedi dopo), con una miscela di gas 90%He - 10% isobutano



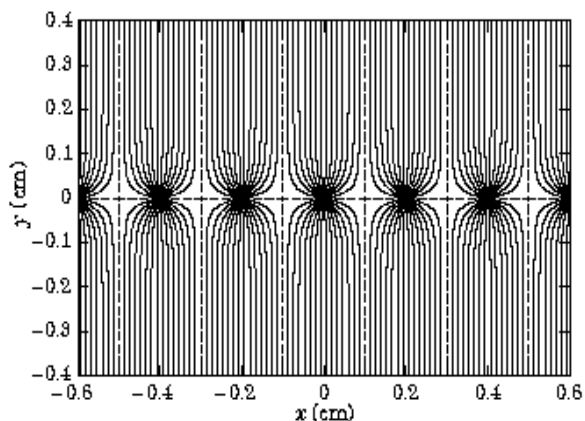
Diversi contributi:

- statistica di ionizzazione
 - soprattutto vicino al filo, teorema di Pitagora
 - ✓ $n_p = 12.9 \pm 0.1$ cluster/cm
- Diffusione longitudinale
 - moto casuale nel gas
 - ✓ $\sigma_D = 140 \mu\text{m}$ per 1cm di drift
- fluttuazioni connesse col l'elettronica
 - rumore
 - fluttuazioni di amplificazione
 - ✓ $\sigma_t = 4.8 \pm 0.2$ ns
- fluttuazioni del percorso degli elettroni
 - ne parliamo dopo (trascurabili nel caso specifico)

Multiwire Proportional Chambers

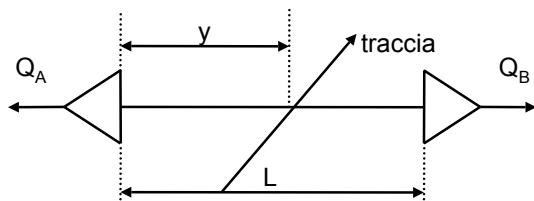
G. Charpack et al. 1968. Premio Nobel 1992

Linee di campo in una MWPC. La spaziatura fra gli anodi e' di 2 mm



La coordinata z puo` essere determinata in vari modi:

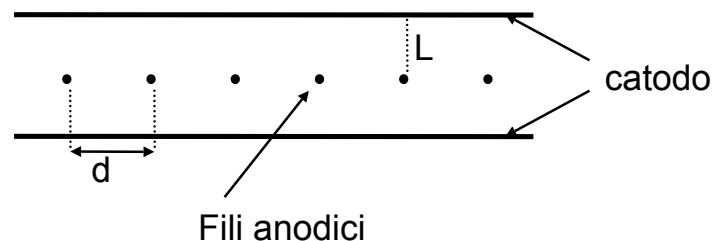
- divisione di carica (fili resistivi ~ 2KΩ/m)
- tempo di arrivo alle due estremita` del filo
- piani incrociati di fili
- induzione su strisce catodiche segmentate



LNF - stages estivi 2009

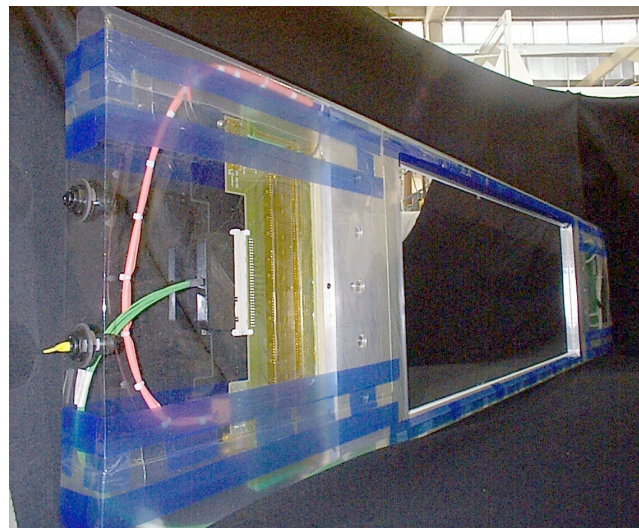
$$\frac{y}{L} = \frac{Q_A}{Q_A + Q_B}$$

G. Finocchiaro



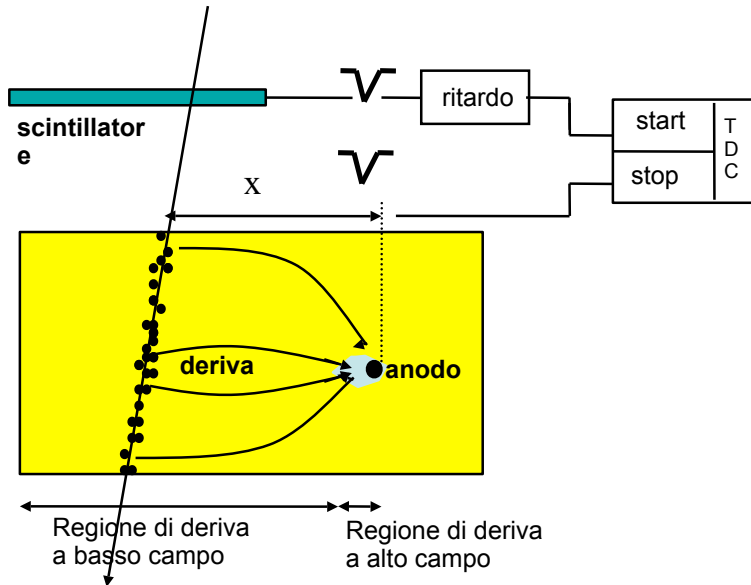
Le migliori risoluzioni spaziali ottenute sono ~ 100 μm

Una delle "low mass MWPC" dell'esperimento FINUDA

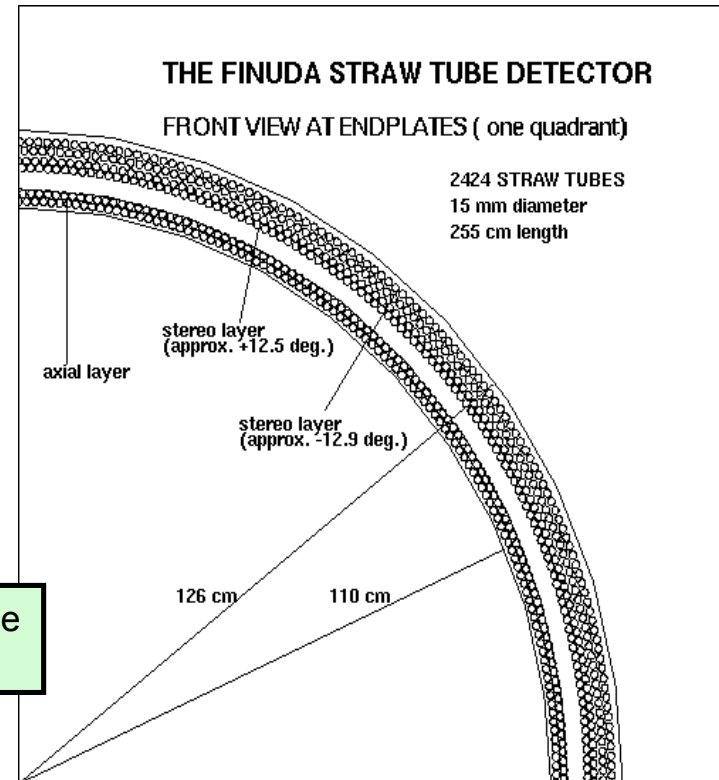


Camere a deriva

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



Geometria degli straw tube dell'esperimento FINUDA



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

La camera a deriva di KLOE

Il catodo non è più un tubo, ma un reticolo di fili

- meno materiale possibile!

Diametro 4 m

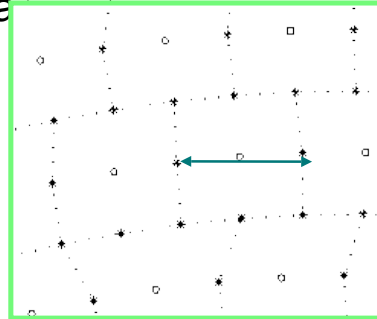
la cella elementare ~ quadrata

12582 fili di sense +

38622 di campo +

936 di guardia =

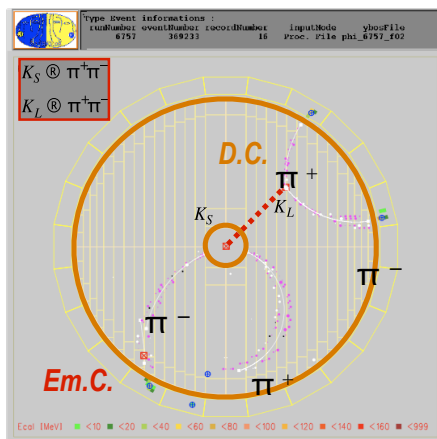
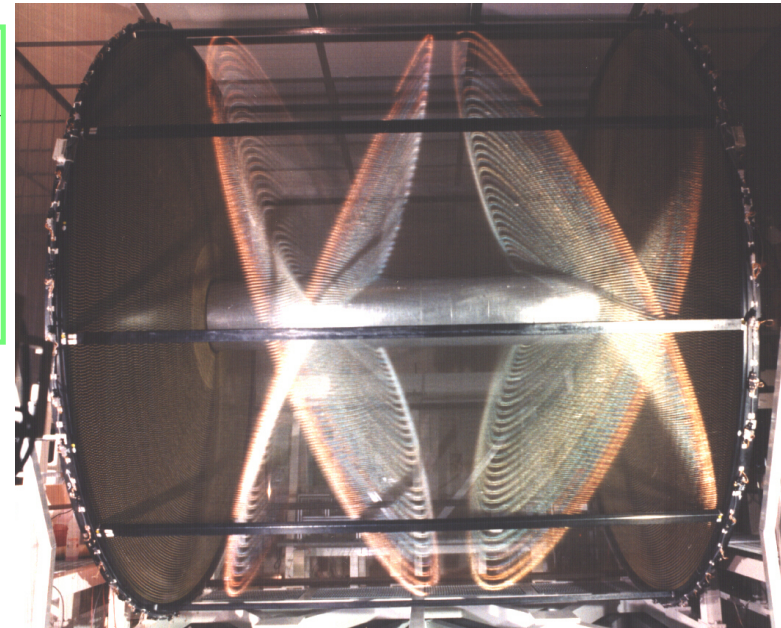
52140 fili



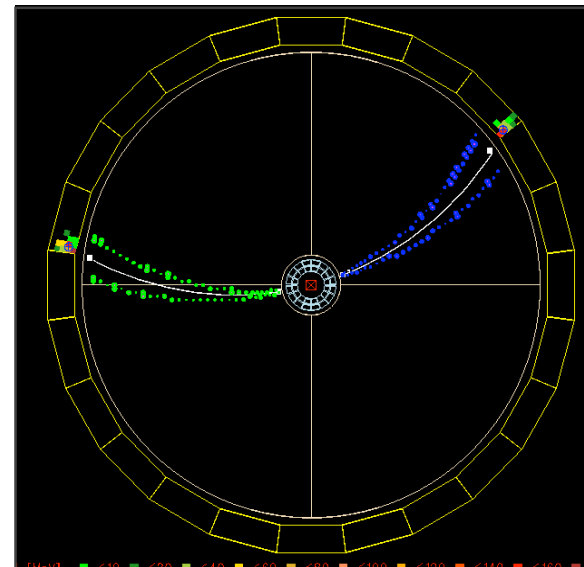
3x3cm
2

La forza complessiva dei fili sui piatti della camera è di 3.5 ton. La struttura completamente in fibra di carbonio garantisce deformazioni ~1mm

- La più grande camera a deriva mai costruita!
- Tutti i fili sono disposti in maniera stereoscopica per la misura della coordinata z



LNF - stages estivi 2009



G. Finocchiaro

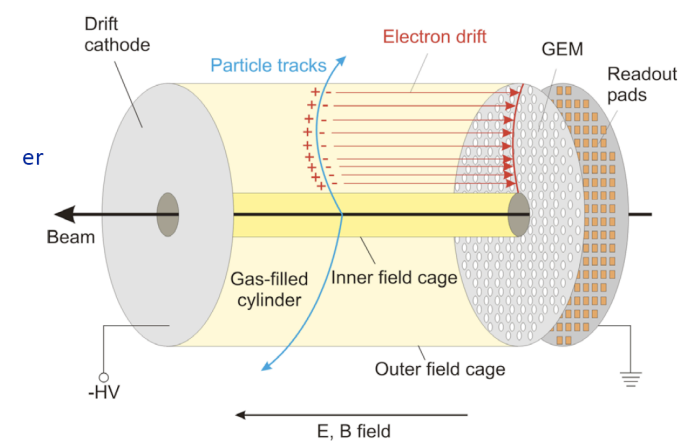
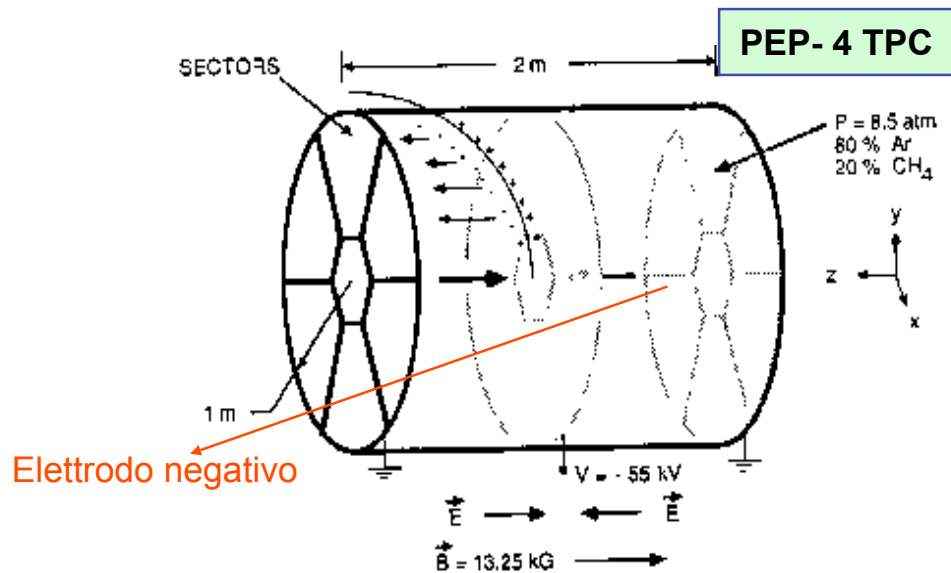
Time Projection Chamber

Grande 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 ad esempio 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



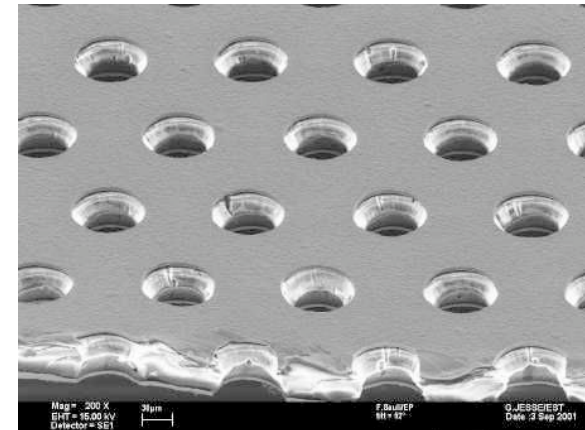
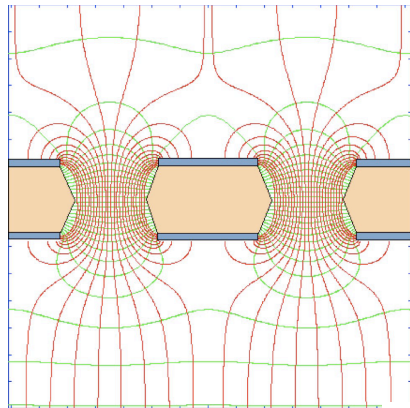
Le coordinate x-y si ottengono dagli hit sui fili e sul catodo segmentato delle MWPC poste sui piatti, la z dal tempo di drift. Si fanno anche misure di dE/dx

Gas Electron Multiplier (GEM)

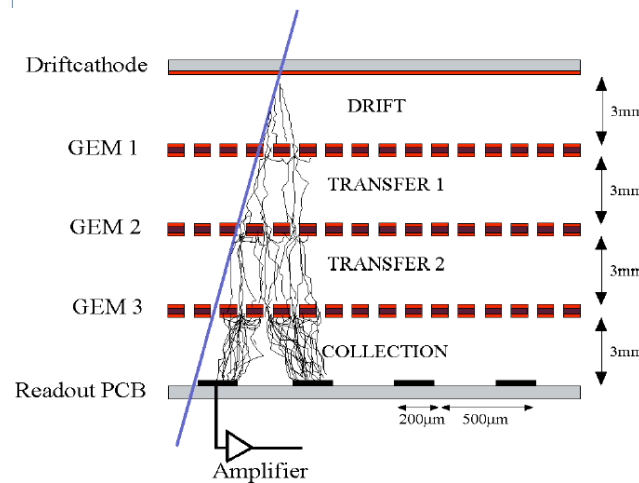
Le MWPC e le camere a deriva hanno limiti intrinseci sulla risoluzione spaziale ottenibile e tempi morti considerevoli dovuti alla migrazione degli ioni positivi (massima freq. 10^4 Hz mm^{-2}).

Per superare questi limiti sono stati sviluppati vari tipi di rivelatori a gas "micro pattern", tra cui le GEM

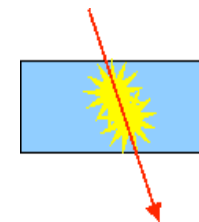
50 μm Kapton ramato con fori circolari $\varnothing \sim 50 \div 100 \mu\text{m}$
Spaziatura 100 \div 200 μm . $\Delta V \sim 500 \text{ V}$. Campi elettrici fino a 100kV/cm!



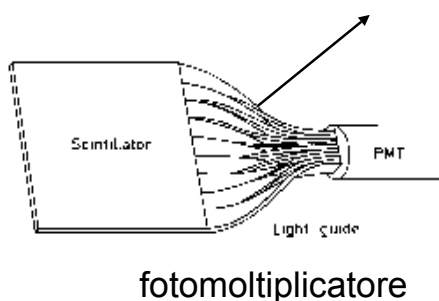
Anche in serie \rightarrow guadagni elevati pur con piccole differenze di potenziale su ciascuna GEM



Rivelatori a scintillazione



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.

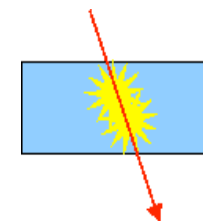


Si tratta di materiali (organici o inorganici) che se eccitati dal rilascio di energia di una particella ionizzante, si diseccitano attraverso emissione di luce nello spettro visibile

Gli scintillatori sono rivelatori multiuso:

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

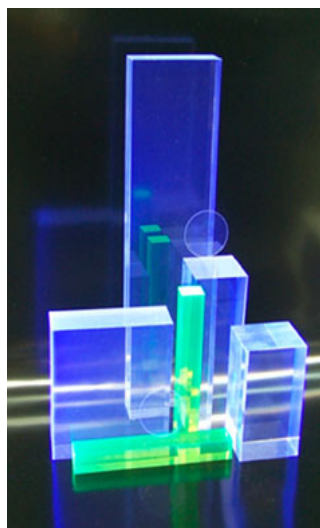
Rivelatori a scintillazione II



1. Scintillatori inorganici (NaI, CsI, BGO, BaF₂ ...)

sono cristalli ionici drogati con impurita`. I tempi di emissione sono ~ 100 ns

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



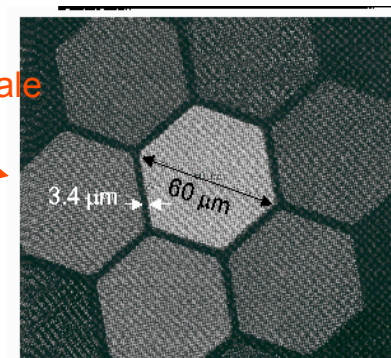
LNF - stages estivi 2009

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 sono < 10 ns

Gli **scintillatori organici** hanno una risposta luminosa mediamente minore 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



[H. Leutz, NIM A 364 (1995) 422]

Gli scintillatori inorganici ad alto Z (BGO, PBWO₄) sono adatti anche per rivelare γ

Fotorivelatori: fotomoltiplicatori

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 $Q.E. = N_{p.e.}/N_{fotoni}$

Il fotone stimola l'emissione di un elettrone dal catodo per effetto fotoelettrico

L'elettrone viene accelerato da un campo elettrico, ed moltiplicato (di un fattore 3-50) sui "dinodi".

Il guadagno totale e':

$$M = \prod_{i=1}^N g_i$$

Per 10 dinodi con $g=4$

$$M=4^{10} \sim 10^6$$

Risoluzione in energia:

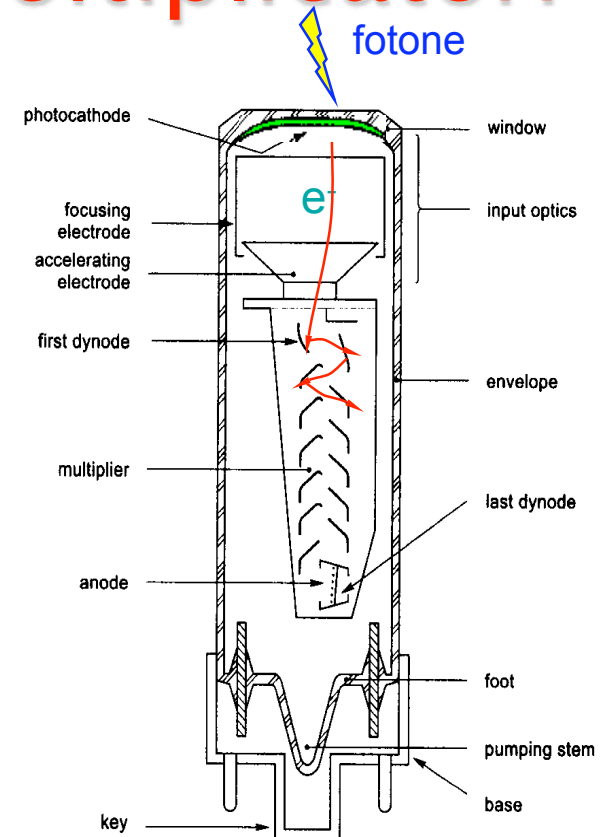
- fluttuazioni sulla moltiplicazione

Molto sensibili ai campi magnetici

- vanno schermati



G. Finocchiaro

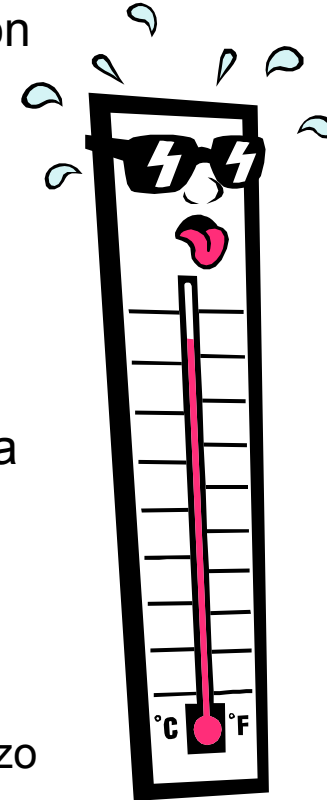


Non ho tempo di parlare di piu' moderni fotorivelatori (APD, SiPM) molto interessanti, che risolvono parecchi dei problemi dei fotomoltiplicatori

Calorimetri

- ✦ Misura dell'energia per **assorbimento totale**, combinato con la ricostruzione spaziale.
- ✦ La calorimetria e' un **metodo distruttivo**
- ✦ **Risposta del rivelatore** $\propto E$
- ✦ Funziona per particelle cariche e neutre
- ✦ Il meccanismo base e' la formazione di sciame elettromagnetici o adronici.
- ✦ Come sempre, per essere misurata, l'energia e' convertita in ionizzazione o eccitazione della materia.
- ✦ Due grandi classi:
 - **Calorimetri omogenei**: tutto il volume e' "sensibile", cioe' produce un segnale. Generalmente da scintillatori ad alto Z
 - **Calorimetri a campionamento**: il mezzo passivo (molto pesante) funziona da assorbitore e genera lo sciame. Il mezzo passivo lo rivela

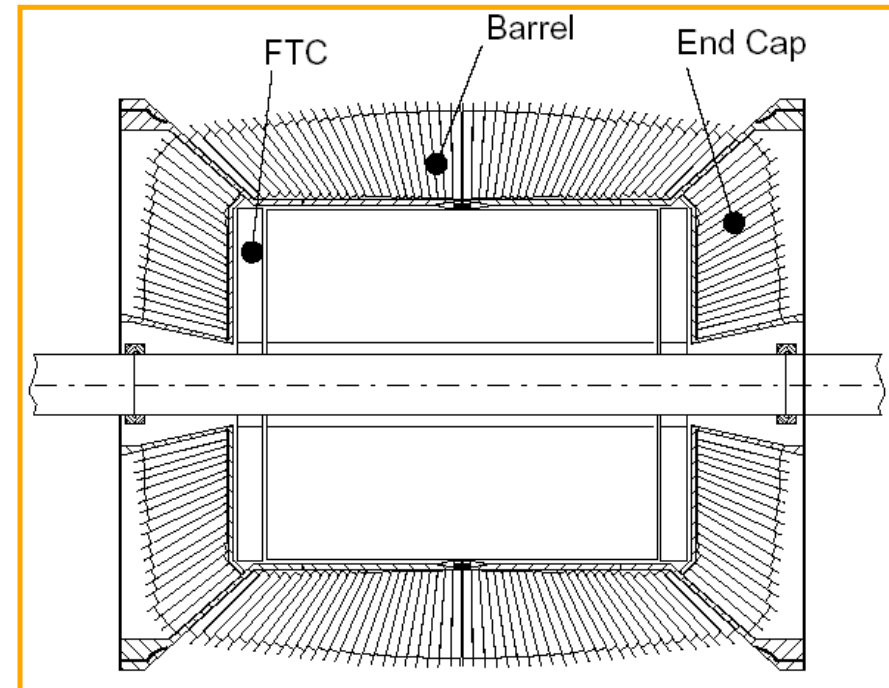
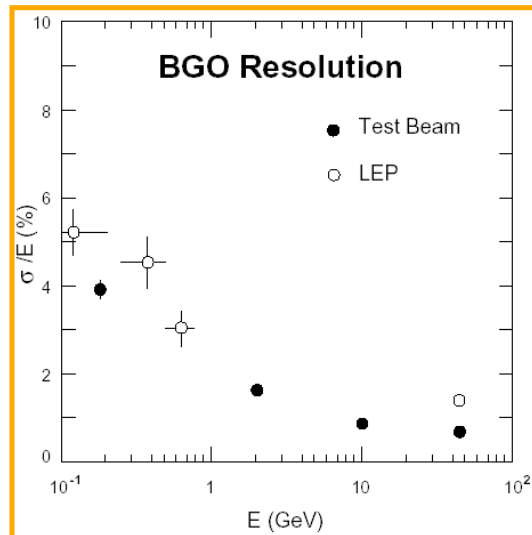
- ✦ Risoluzione in energia:
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E}$$
 - a) termine stocastico (fluttuazioni, tra cui quelle della frazione di sciame campionato)
 - e' di solito minore nei calorimetri omogenei
 - b) disuniformita', calibrazione
 - c) elettronica



Calorimetri omogenei

Esempio: il calorimetro a cristalli di BGO di L3

Eccellente risoluzione spaziale



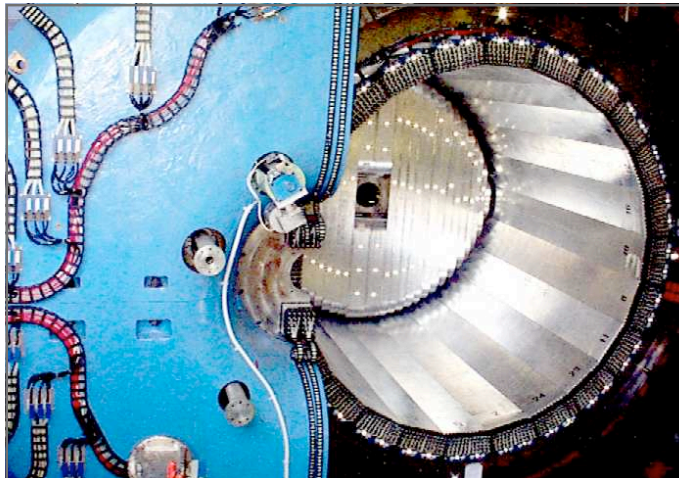
- 11,000 cristalli di BGO (orto-germanato di bismuto) scintillante;
- piramidi $20 \times 20 \rightarrow 30 \times 30$ mm², lunghe 240 mm;
- $X_0 = 11.3$ mm $\rightarrow 21 X_0$;

Calorimetri a campionamento

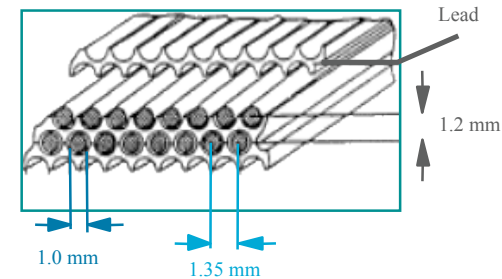
Esempio: il calorimetro di KLOE

Fibre scintillanti di 1 mm di diametro incollate tra sottili piani di piombo (0.5 mm). 200 strati per un totale di 25 cm (15 X_0) di spessore. Lettura tramite fototubi in 5 piani lungo la direzione di sviluppo dello sciami

- molti fotoelettroni, 2000 p.e./ GeV
- buona risoluzione energetica (piccoli spessori assorbenti)
- alta efficienza



LNF - stages estivi 2009



- 50%-50% Volume Pb-Scifi
- Lunghezza delle fibre fino a 4.3 m (per un totale di 13000 km)
- Numero di Fotomoltiplicatori: 5000



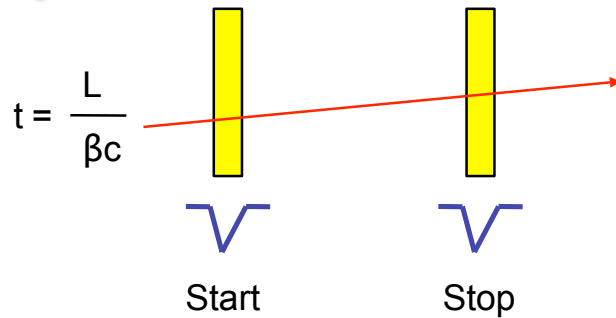
Risoluzioni misurate:

$$\sigma_E/E = 5.7\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

$$\sigma_t = 54 \text{ ps} / \sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 50 \text{ ps}$$

Alta efficienza fino a 20 MeV

Identificazione delle particelle: tempo di volo



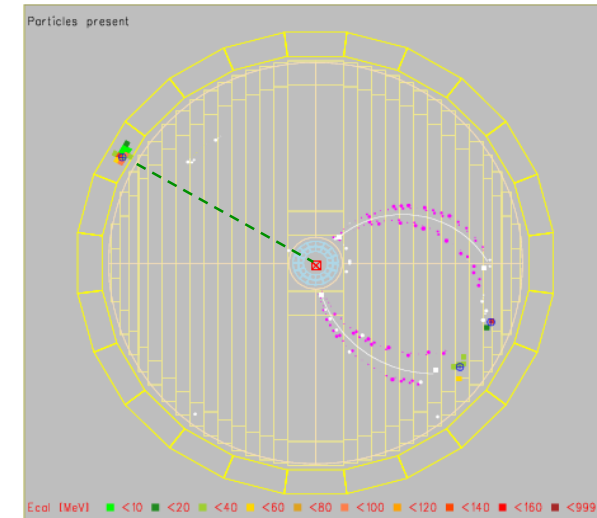
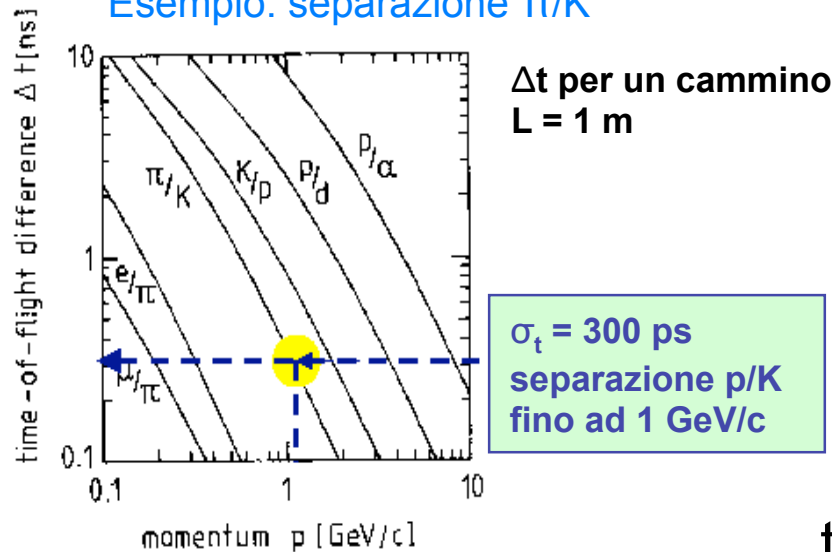
$$\beta = \frac{pc}{E}$$

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

$\beta + p$ identifica la particella
in modo univoco

Altro esempio: KS tagging in KLOE

Esempio: separazione π/K



$$t_\gamma = R/c = 6.6 \text{ ns}$$

$$t_K = R/\beta c = 22.6 \text{ ns}$$

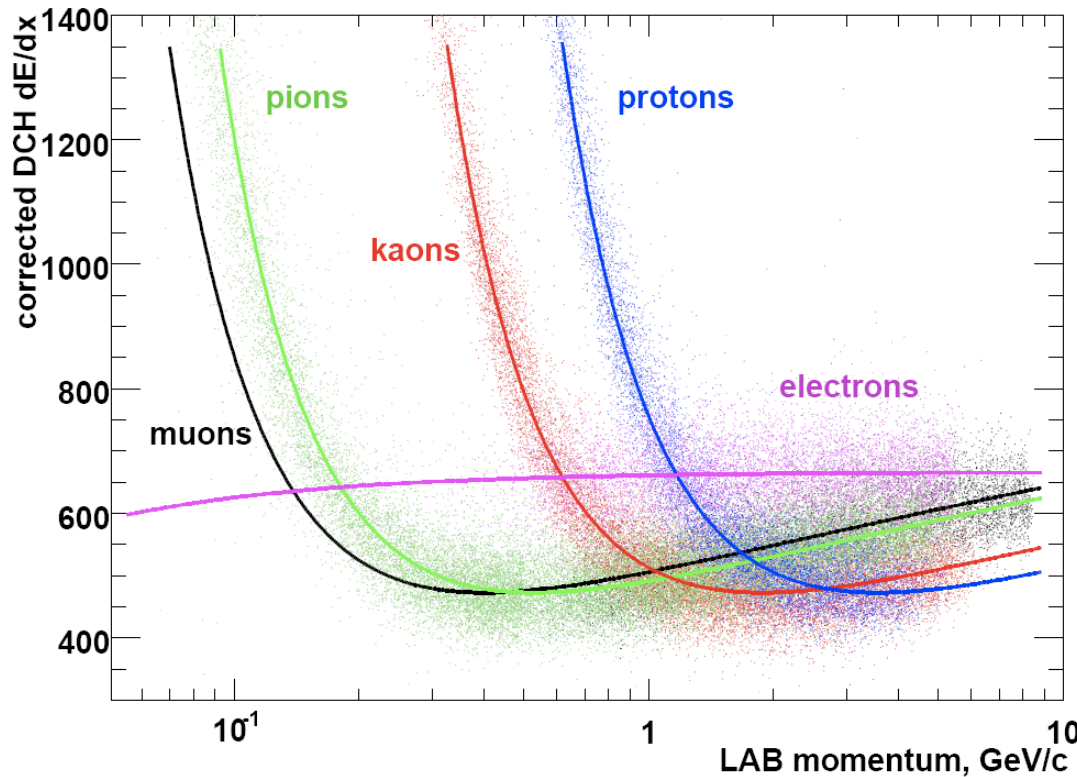
$$\sigma_t \sim 250 \text{ ps}$$

Identificazione delle particelle: perdita di energia



Bethe-block, ricordate?

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

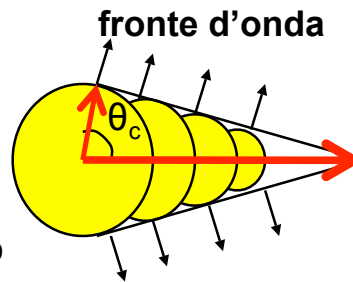


**dE/dx in funzione dell'impulso
nella camera a deriva di
BABAR**

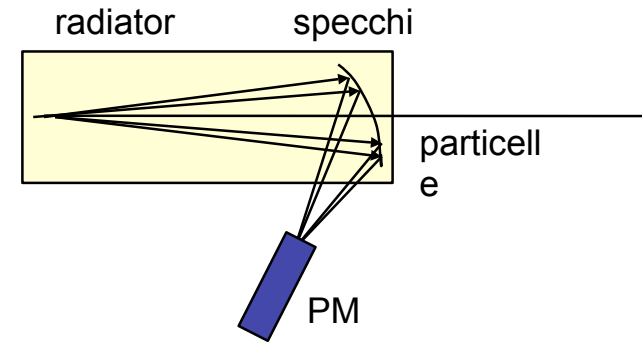
Identificazione delle particelle: effetto Cherenkov



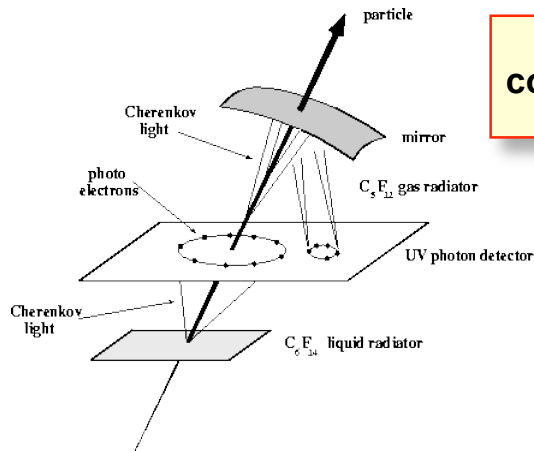
emissione di radiazione elettromagnetica da parte di una particella in moto ad una velocità superiore alla velocità della luce nel mezzo attraversato (non viola la relatività ristretta...)



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

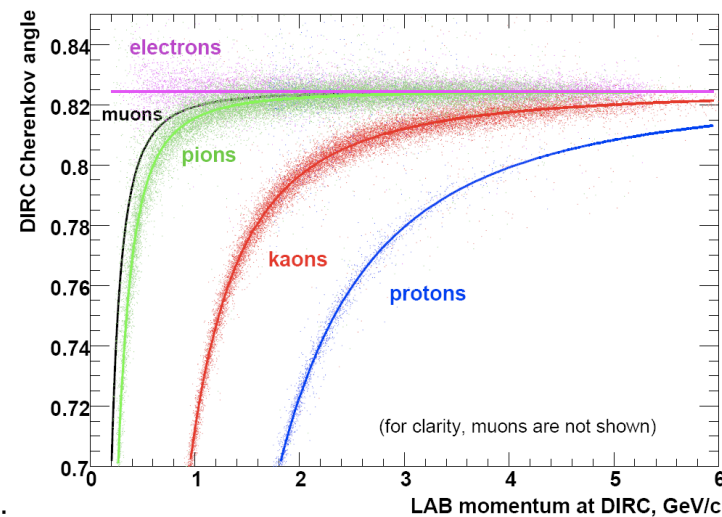


Ring imaging e RICH: viene misurato l'angolo di apertura del cono

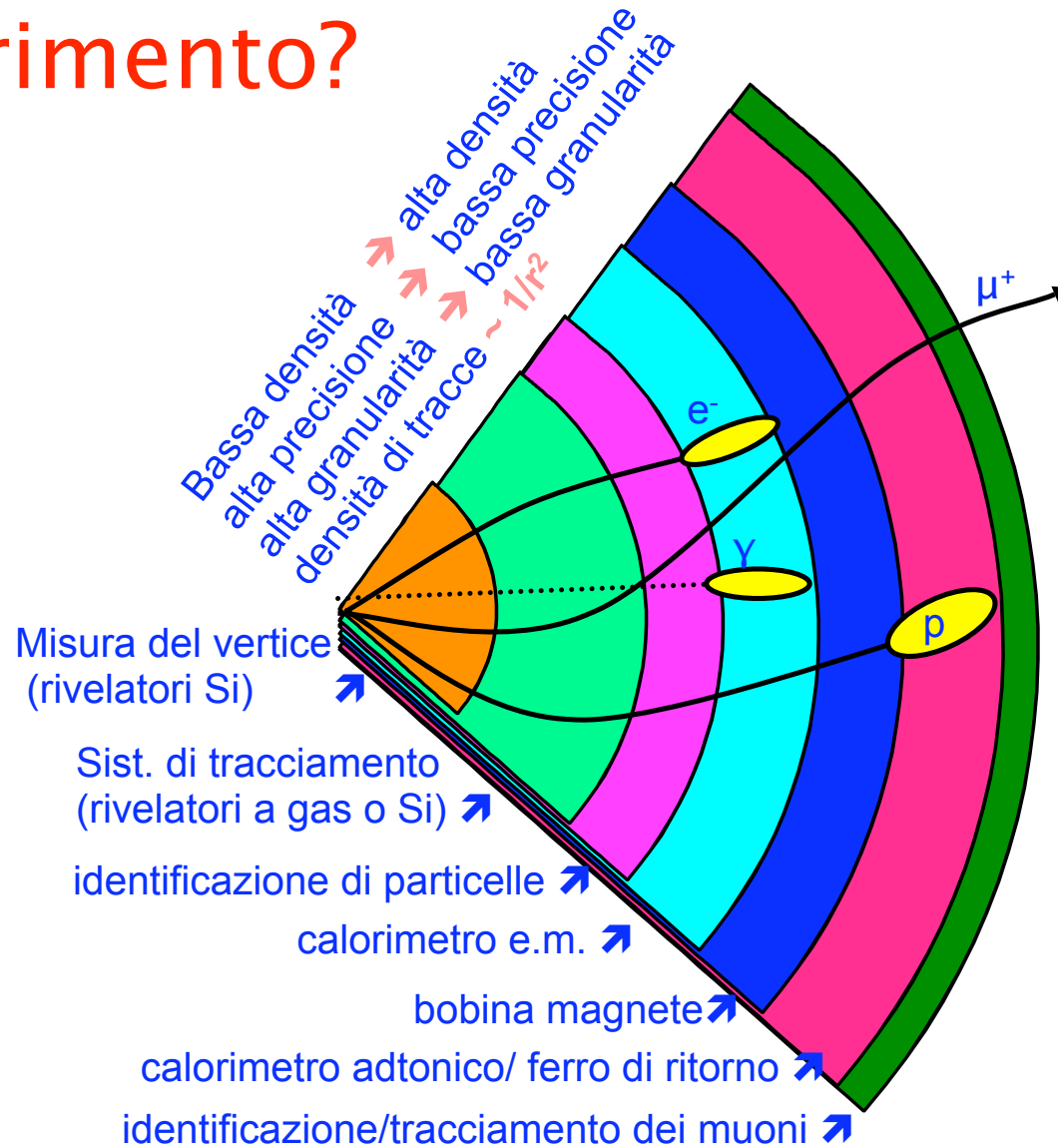


$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

θ_{ch} in funzione dell'impulso a



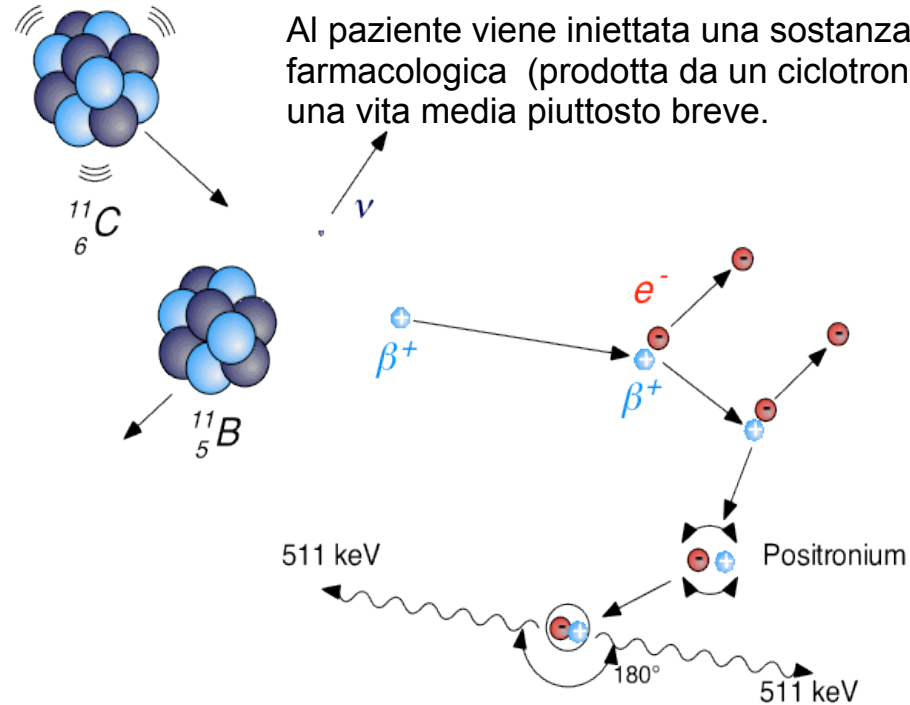
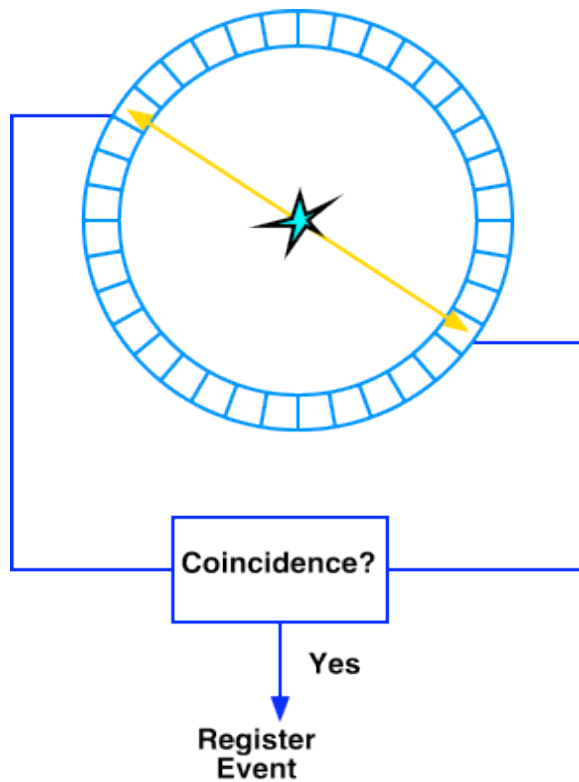
In che ordine disponiamo i rivelatori in un esperimento?



Positron Emission Tomography I

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

Un'apparecchiatura PET ha ~ 10.000 rivelatori di γ : rivelatori BGO di spessore 3 cm



Al paziente viene iniettata una sostanza radiofarmacologica (prodotta da un ciclotrone) con una vita media piuttosto breve.

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

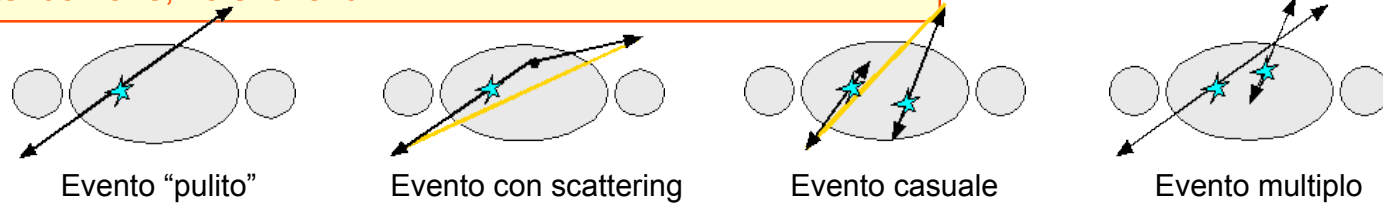


Positron Emission Tomography II



Le risoluzioni spaziali ottenibili con la PET dipendono dal radioisotopo usato: $\sim 2 \text{ mm } \varphi$; $4 \text{ mm } z$

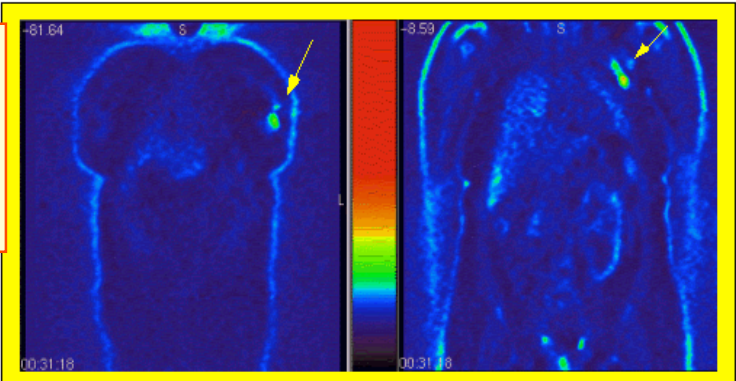
Per ricostruire immagini tridimensionali sono necessari software di ricostruzione molto sofisticati, che tengano conto dei fenomeni di diffusione, attenuazione, falsi eventi.



Immagini del cervello



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

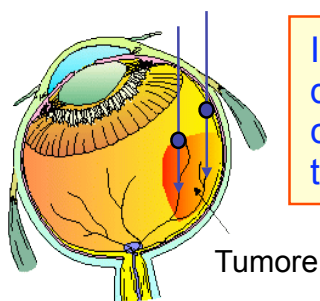


La PET oggi e` molto diffusa e praticata grazie anche agli enormi progressi fatti nella produzione di cristalli BGO a basso costo da parte degli esperimenti di fisica delle particelle.

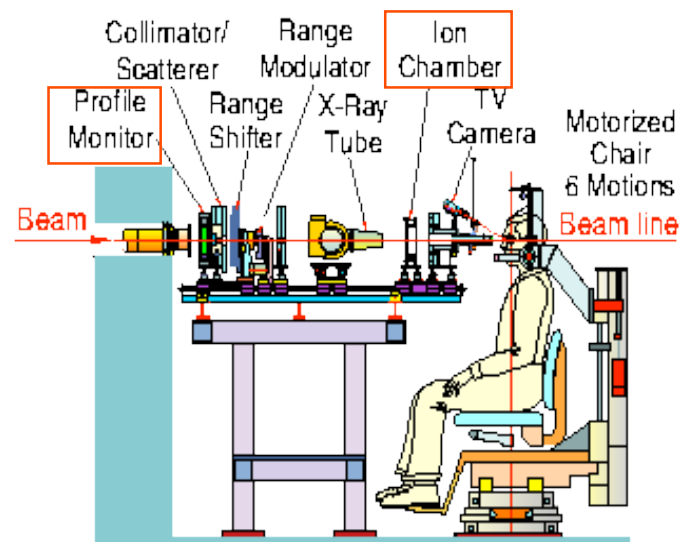
Adroterapia

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 Ministero 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.



Fine

- Spero sia stato (almeno un po') interessante...
- Domande?