

Caratterizzazione di un tracciatore a fibre scintillanti

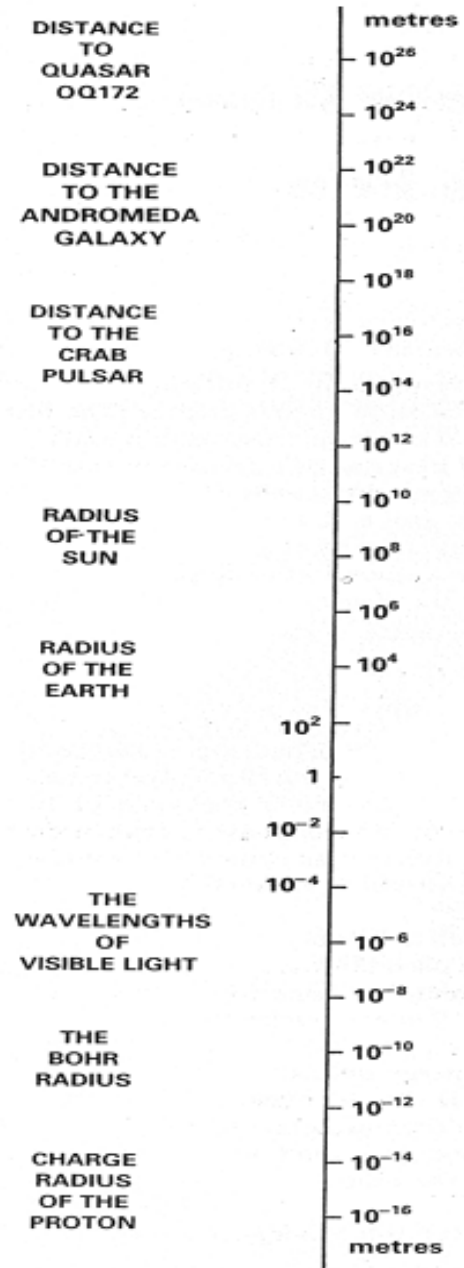
Stage estivi 2012 INFN – Laboratori Nazionali di Frascati

Mario Anelli, Rossano Rosellini, Marco Toppi

Fisica delle Particelle: alla ricerca dei costituenti fondamentali della materia

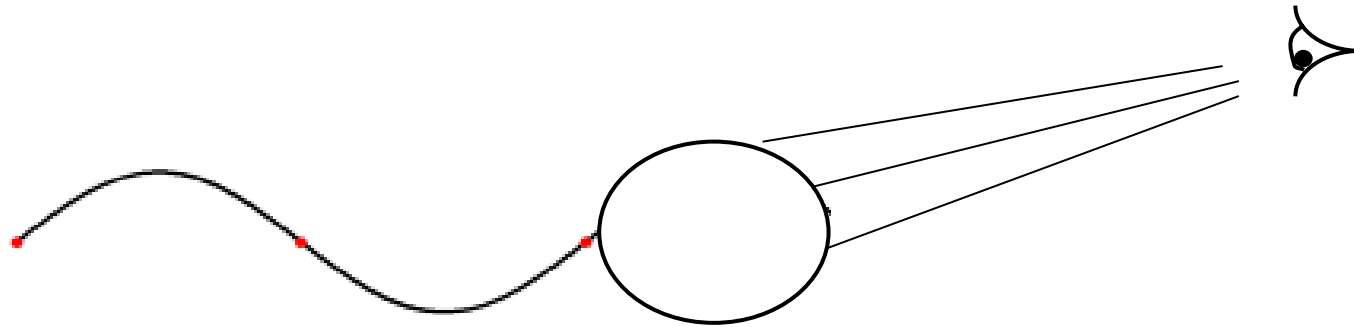
- Sin dall'antichità l'uomo si è chiesto quali fossero i costituenti fondamentali della materia.
- Oggi la fisica delle particelle elementari si pone l'obiettivo di rispondere al medesimo quesito.
- Alla fine dell'800, era convinzione diffusa che la materia fosse in ultima analisi composta da atomi che si legassero tra loro in strutture più complesse.
- Si può dire che la fisica delle particelle è incominciata con la scoperta dell'elettrone da parte di Thomson nel 1897 che ne misurò il rapporto tra carica e massa e enunciò un suo modello atomico.
- Nel 1900 è stata scoperta la radioattività α , β e γ dai Curie, Becquerel e Rutherford.
- Nel 1905 il fotone (dell'effetto fotoelettrico di Einstein) viene identificato come il quanto (di Planck) del campo elettromagnetico
- Nel 1911 Rutherford scopre il nucleo atomico (1913: modello atomico di Bohr).
- Dal 1912 con la scoperta dei raggi cosmici, che costituivano una sorgente di energia elevata, sono state scoperte via via nuove particelle grazie a nuove tecniche di rivelazione.
- Nel 1932 Chadwick scopre il neutrone e Anderson il positrone (la prima anti-particella).
- La scoperta di nuove particelle elementari nei raggi cosmici stimolò la creazione e lo sviluppo degli acceleratori di particelle
- Gli esperimenti condotti negli anni '50 e '60 agli acceleratori di particelle hanno dimostrato che protoni e neutroni fanno parte di una famiglia di particelle, gli *adroni* e che questi non sono particelle elementari ma sono a loro volta costituiti da una struttura a *quark*.

Lunghezze nell'universo

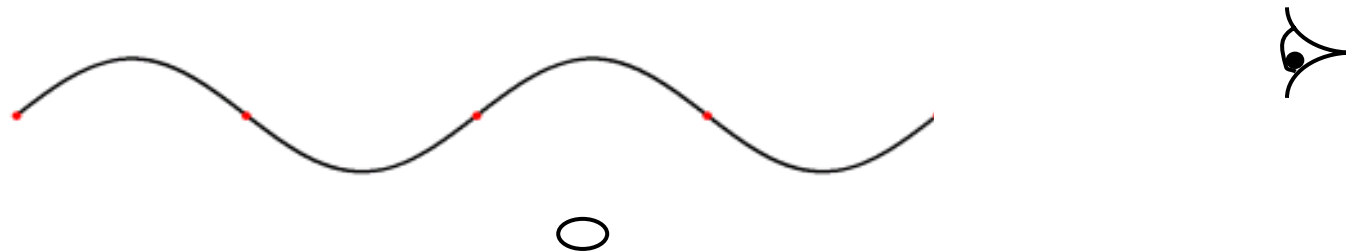


Potere risolutivo di una particella

Per “vedere” un oggetto occorre illuminarlo con una lunghezza d’onda che sia comparabile o inferiore alle dimensioni dell’oggetto e che, interagendo con esso, ne venga diffusa tutto intorno, colpendo l’occhio.



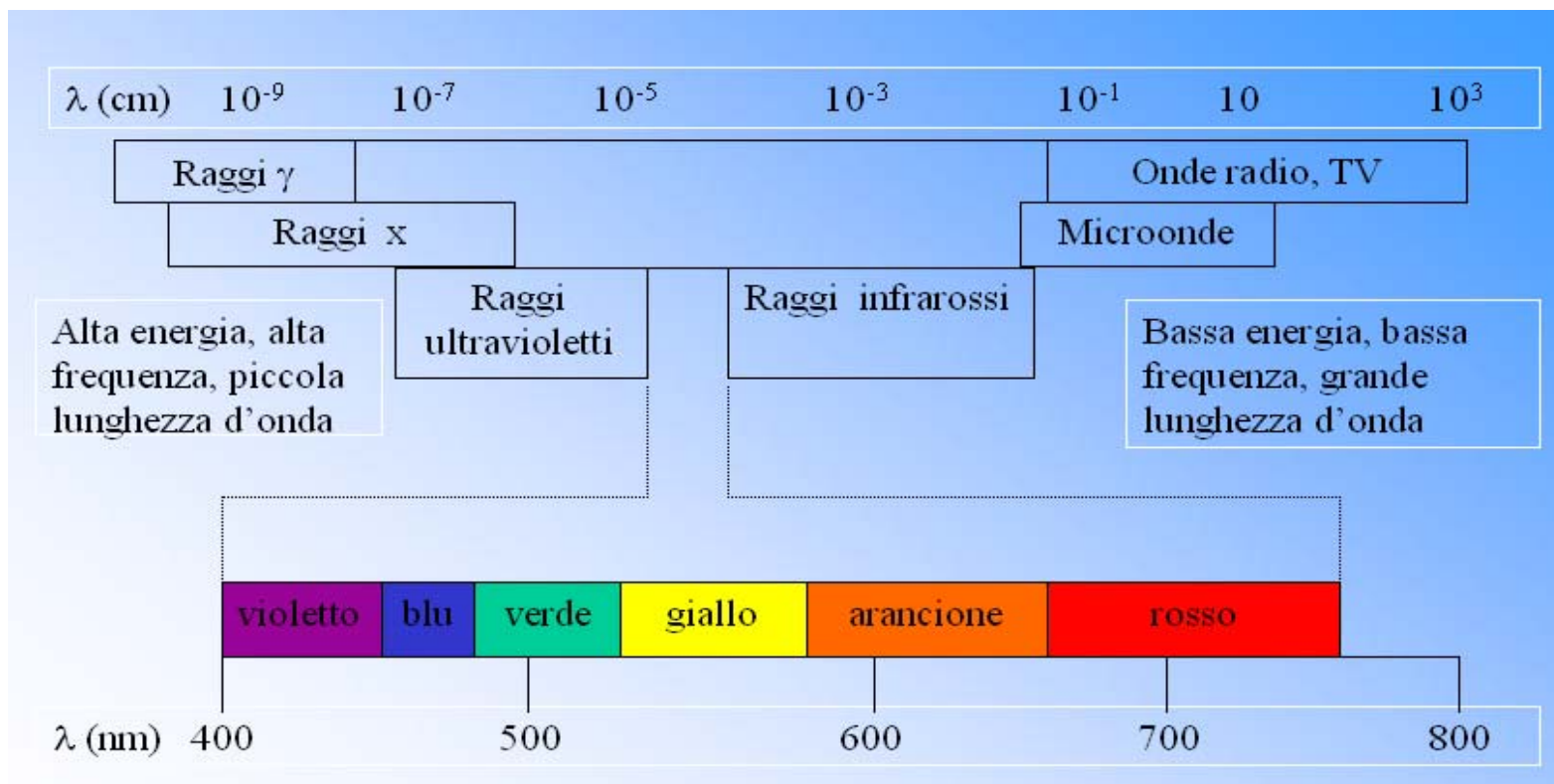
Se l’oggetto è più piccolo della lunghezza d’onda della luce usata per illuminarlo, esso sarà “avvolto” dalla luce, che non potrà così interagire con esso. L’oggetto non può essere osservato.



Con la luce visibile (e con l'uso di un microscopio ottico) possiamo risolvere oggetti con dimensioni maggiori o uguali del nanometro, come le micromolecole. Per risolvere l'atomo che ha dimensione $r_{\text{atomo}} \sim 10^{-10}$ m, occorre adoperare i raggi X che hanno lunghezze d'onda dell'ordine di:

$$\lambda \sim 10^{-7} \text{ m} - 10^{-11} \text{ m}$$

Con i raggi γ che hanno lunghezze d'onda inferiori a 10^{-11} m si possono sondare oggetti di dimensioni più piccole come nuclei o nucleoni.



Per “illuminare” oggetti molto piccoli, come i nuclei o i nucleoni, si possono adoperare anche particelle materiali, che vengono diffuse dalle particelle bersaglio.

Infatti ad una particella dotata di impulso p è associata una lunghezza d’onda data dalla relazione di de Broglie:

$$\lambda = \frac{\hbar}{p}$$

La relazione di de Broglie (1924) afferma quindi che i sistemi materiali possono presentare, oltre ad un aspetto corpuscolare, anche un aspetto ondulatorio ed è per questo che particelle di impulso appropriato possono essere adoperate per “illuminare” oggetti di piccola dimensione.

La distanza minima che possiamo sondare con una particella di impulso p è fornita dal principio di indeterminazione di Heisenberg:

$$p \cdot \Delta x \geq \hbar \quad \Rightarrow \quad \Delta x \geq \frac{\hbar}{p} = \lambda$$

La lunghezza d'onda λ ci dà quindi una stima della taglia minima che si può sondare con una particella di un certo impulso p , all'inverso, ci dice quale impulso deve avere una particella per sondare oggetti di una determinata dimensione.

La Radioattività

- Alla fine del '800 Becquerel e i coniugi Curie scoprirono che alcuni minerali, contenenti uranio, radio e polonio, erano *attivi*, ovvero avevano la proprietà di impressionare delle lastre fotografiche poste nelle loro vicinanze. Le lastre fotografiche, una volta sviluppate, presentavano delle macchie scure.
- La radioattività è un fenomeno nucleare in cui un nucleo atomico instabile si frantuma spontaneamente per raggiungere una configurazione più stabile, emettendo una o più particelle.
- Per descrivere quantitativamente il decadimento radioattivo, è necessaria una descrizione macroscopica del fenomeno, considerando un elevato numero di nuclei identici
- Il decadimento radioattivo è un processo statistico. La probabilità di decadimento è espressa dalla *costante di decadimento* λ legata al *tempo di vita media* τ :

$$\lambda = \frac{1}{\tau}$$

- In un insieme di N nuclei radioattivi identici il numero totale di decadimenti per unità di tempo sarà in media λN (*attività*). I nuclei in un campione decadono con un tasso dato da $-\Delta N/\Delta t$:

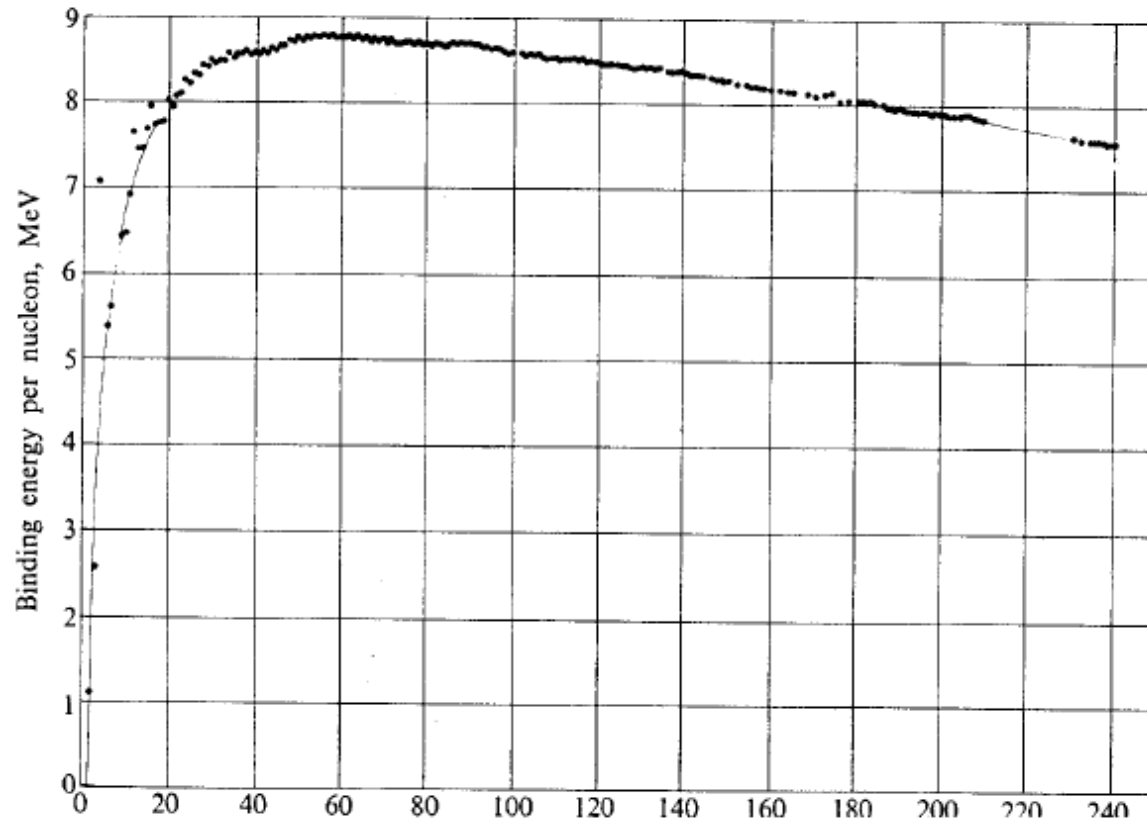
$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \quad \Rightarrow \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}$$

- L'unità di misura dell'attività è il Becquerel: 1 Bq = 1 disintegrazione/s

La Radioattività

- In natura esistono 90 elementi chimici ognuno dei quali è caratterizzato da un suo *numero atomico* Z , pari al numero di protoni nel nucleo.
- Per ogni elemento esistono diversi *isotopi* caratterizzati da un diverso numero di neutroni nucleari.
- Ogni isotopo è caratterizzato dal *numero di massa* A pari alla somma del numero di protoni e neutroni nucleari.
- Gli isotopi presenti in natura sono quasi tutti stabili. Tuttavia, alcuni isotopi naturali, e quasi tutti gli isotopi artificiali, presentano nuclei instabili, a causa di un eccesso di protoni e/o di neutroni. Tale instabilità provoca la trasformazione spontanea in altri isotopi, e questa trasformazione si accompagna con l'emissione di particelle. Questi isotopi sono detti isotopi *radioattivi*, o anche *radioisotopi*.
- La radioattività naturale è dovuta principalmente ai radioisotopi primordiali (hanno tempi di vita di circa 10^9 anni) ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th .
- L'uranio e il torio danno vita a tre lunghe catene di decadimento alle quali appartengono la maggior parte degli isotopi radioattivi (tra cui radio, radon e polonio).

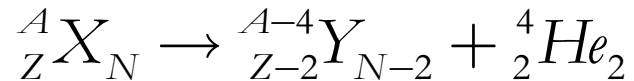
Andamento di B/A in funzione di A



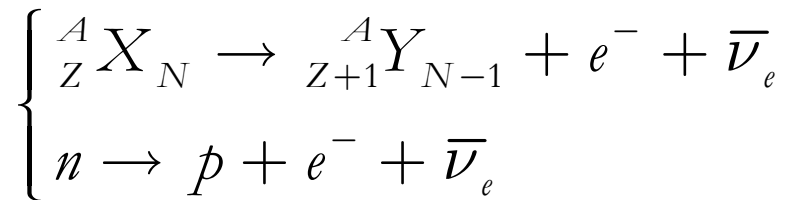
Principali processi di decadimento

➤ Rutherford classificò i decadimenti radioattivi osservati sotto il nome di decadimento α , β e γ

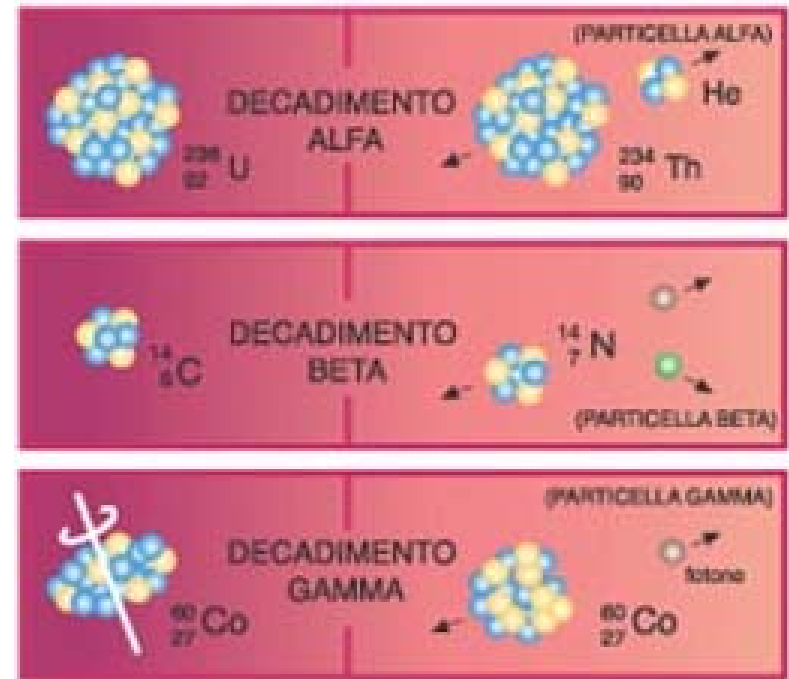
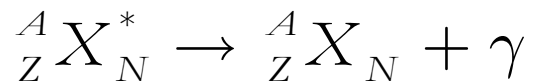
- Decadimento α : il nucleo emette un nucleo di elio He (particella α) composto da due n e due p .



- Decadimento β : il nucleo emette un elettrone (raggio β) e un neutrino in seguito alla trasformazione di un n in un p .

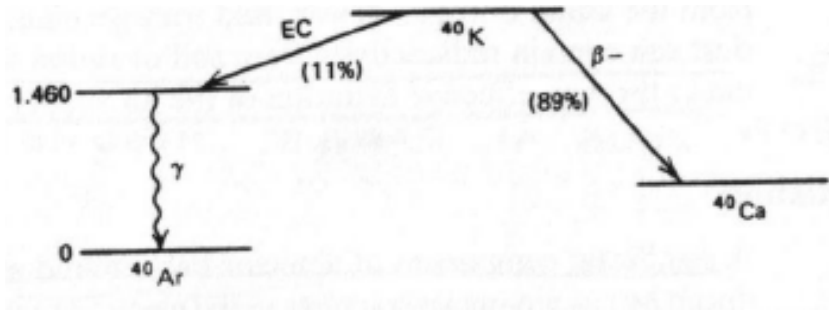


- Decadimento γ : un nucleo eccitato si diseccita emettendo un fotone γ

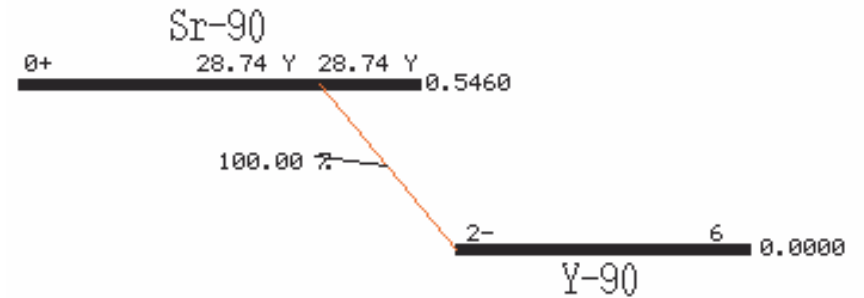


Esempi di decadimenti

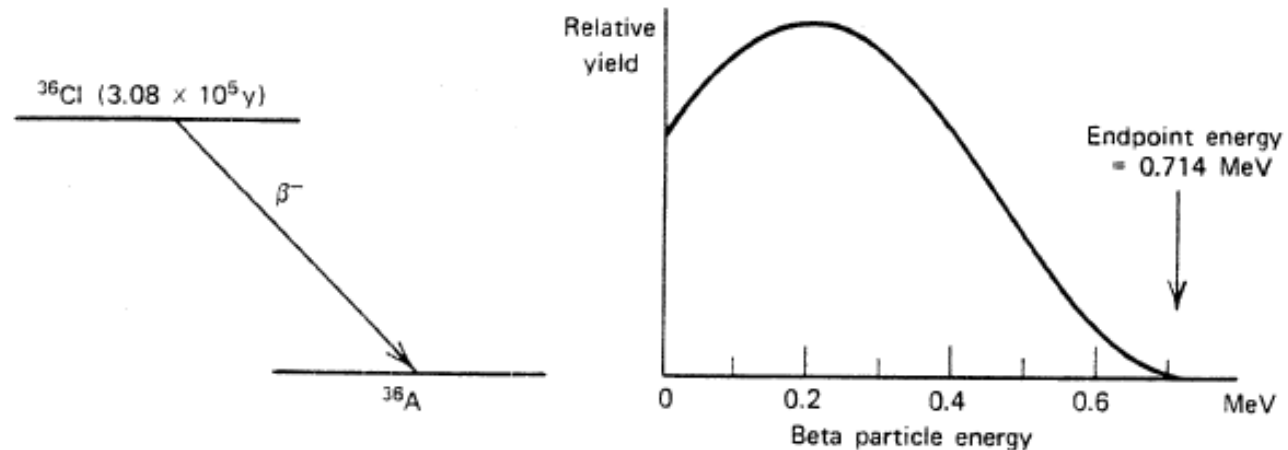
Decadimento del ^{40}K



Decadimento del ^{90}Sr



Decadimento del ^{36}Cl

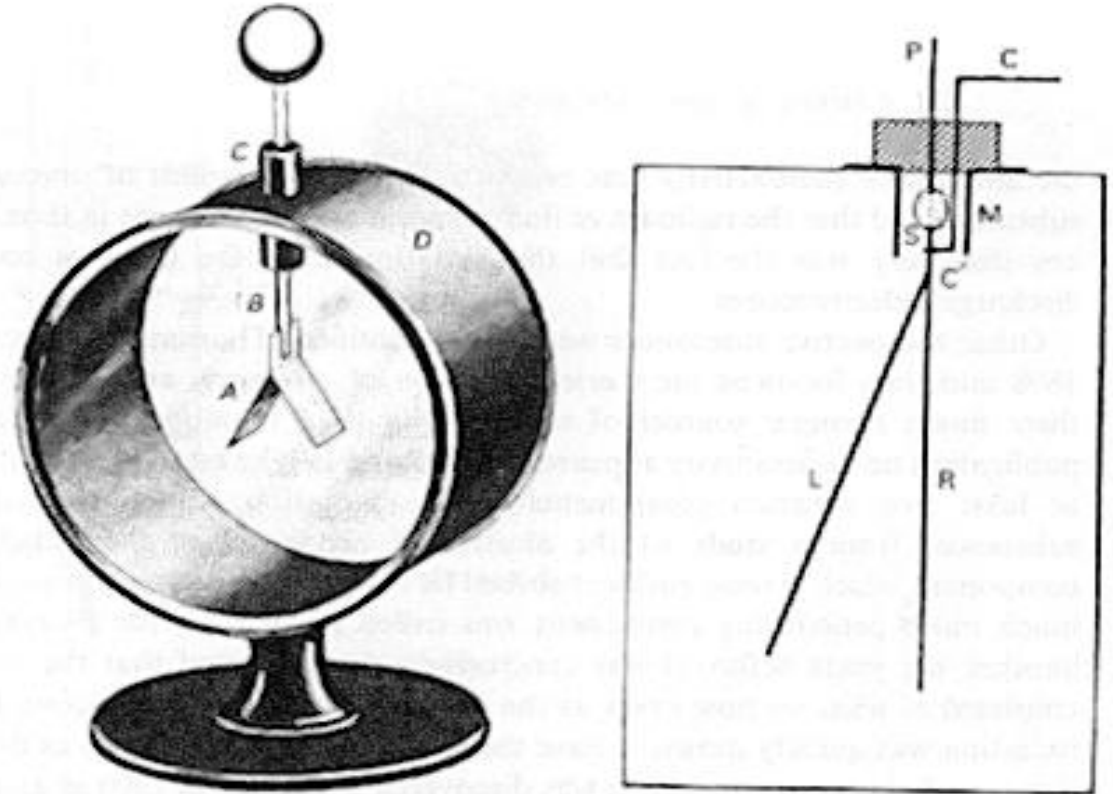


Storia dei raggi cosmici - 1

1785 Coulomb scopre che una sfera
metallica carica
Perde gradualmente la sua carica

Con la scoperta della radioattività
Wilson ipotizza che la radiazione viene
da fuori, raggi X o gamma

1903 Rutherford nota che la
ionizzazione (ossia la scarica)
è minore se il contenitore non contiene
materiali radioattivi



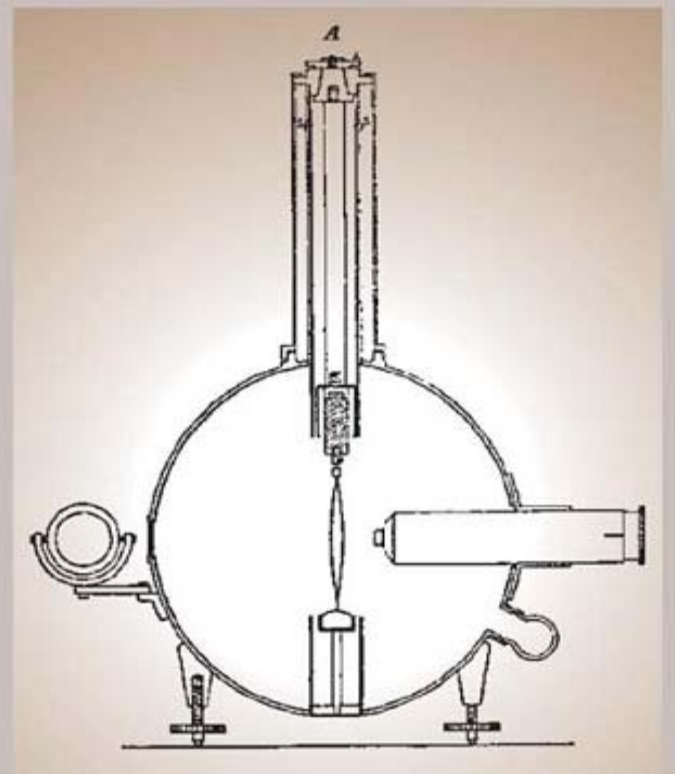
Storia dei raggi cosmici - 2

1909: Wulf: Wulf migliora gli elettroscopi a foglie, riesce a misurare una coppia di ioni al secondo

1910: torre Eiffel misura che la ionizzazione aumenta invece di diminuire

1909-1911 Gockel fa dei voli su pallone a 4500m ma la pressione del contenitore varia al variare dell'altezza. Misura un aumento ma non giunge a conclusioni definitive

Figure 2. Theodor Wulf's 1909 electro-scope. Shown in cross section is the instrument's 17-cm-diameter zinc cylinder with its pair of flexible wires below the access tower A. The wires are pushed apart by static electricity, and the microscope peering in from the right measures their separation, illuminated by light from the mirror at left. The air in the cylinder was kept dry by sodium in the small recess below the microscope. (Adapted from ref. 1.)



Tour Eiffel (Wulf, 1910) : 6×10^6 ions/m³ measured at ground

3×10^6 ions/m³ expected at 80 m

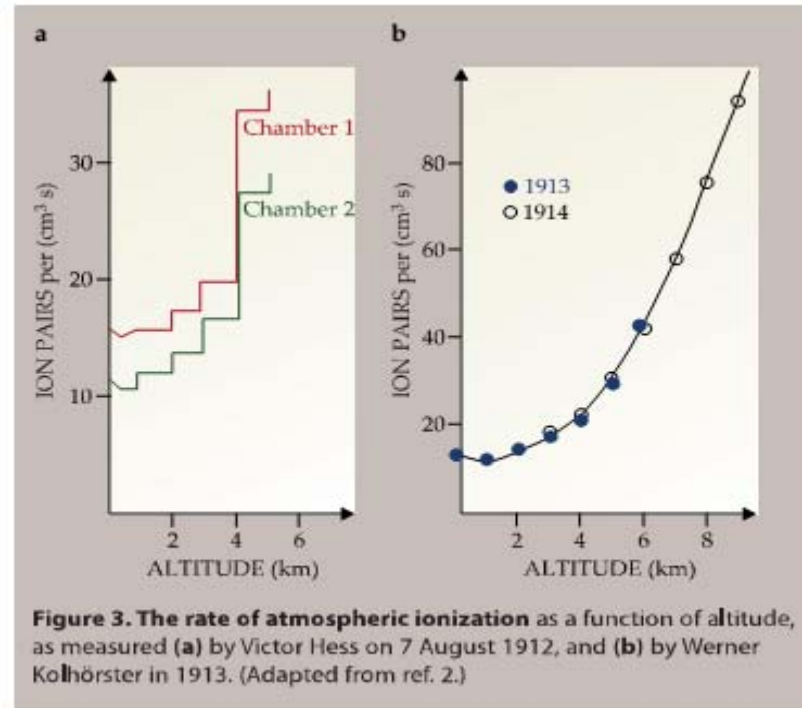
~ zero expected at 330 m

$3,5 \times 10^6$ ions/m³ measured at 330 m

Storia dei raggi cosmici - 3



Victor Hess: 10 voli su pallone 1911-1913



The results of the present observations seem to be most readily explained by assuming that radiation of very high penetrating power enters the atmosphere from above, and can still produce a part of the ionization observed in closed vessels at the lowest altitudes.⁴

I raggi cosmici (I)

La **radiazione cosmica** che incide sulla sommità dell'atmosfera terrestre è costituita da tutte le **particelle cariche stabili** e dai **nuclei atomici** con vite medie > 1 milione di anni. Si definiscono **raggi cosmici primari** le particelle che vengono prodotti ed accelerate localmente da una sorgente astrofisica (per es. una supernova). I **raggi cosmici secondari** sono quelli prodotti dall'urto dei raggi cosmici primari con il gas interstellare (l'insieme delle particelle presenti nello spazio tra le stelle).

I raggi cosmici primari sono prevalentemente: **elettroni, protoni, nuclei di Elio, Carbonio, Ossigeno e Ferro** (che si formano nelle stelle).

Altri nuclei come Litio, Berillio, Boro sono raggi secondari perché non vengono prodotti nelle stelle. Le antiparticelle: anti-elettroni (o positroni) e antiprotoni sono raggi cosmici secondari.

A parte l'attività solare (solar flares), la radiazione cosmica proviene dall'esterno del sistema solare e sull'atmosfera terrestre giunge un **flusso isotropo** di particelle. La radiazione che giunge sull'atmosfera è costituita prevalentemente da nuclei atomici di:

H (protoni): $\sim 10.000/\text{m}^2 \text{ s sr}$ (con energia $> 1 \text{ GeV}$)

He (1/20-esimo) C (1/350) Fe (1/6000)

I raggi cosmici (II)

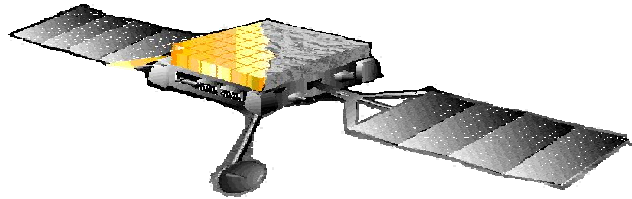
Urtando l'atmosfera terrestre (cioè H, N, O dell'aria), i raggi cosmici producono delle particelle che a loro volta possono interagire o decadere. Se l'energia iniziale è sufficiente si genera un vero e proprio **sciame di particelle** (**Extensive Air Shower**). Al suolo possono arrivare anche milioni di particelle contemporaneamente (prodotte da un'unica particella iniziale) su un'area di alcuni km².

Le particelle cariche più numerose al livello del suolo sono i **muoni** (che sono simili agli elettroni ma con massa pari a circa 200 volte). I muoni possono avere carica positiva μ^+ o negativa μ^- . La maggior parte dei muoni sono prodotti a circa 15 km di quota. La loro energia media al suolo è ~ 4 GeV.

Il flusso totale di muoni al suolo, con energia > 1 GeV è $\sim 70/\text{m}^2 \text{ s sr}$, che corrisponde a:
FLUSSO DI MUONI \sim un muone per cm² al minuto per un rivelatore orizzontale).

Siccome i muoni non contengono quark (sono leptoni), essi non subiscono interazioni nucleari. Perdono energia solo a causa di interazioni "elettromagnetiche". Di conseguenza sono molto penetranti. Quasi tutti i muoni **attraversano il nostro rivelatore senza fermarsi** al suo interno e **perdendo una quantità di energia fissata**, che dipende essenzialmente dal materiale che costituisce il rivelatore e dallo spessore di materiale attraversato.

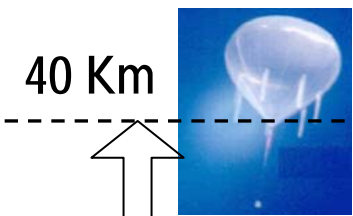
I raggi cosmici (III)



Studio Diretto

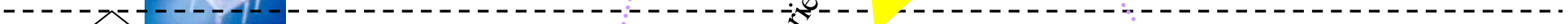


300 Km



40 Km

Atmosfera



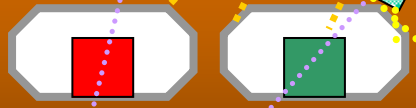
Particelle Secondarie

Raggi Cosmici

Neutrini

muoni

Studio Indiretto

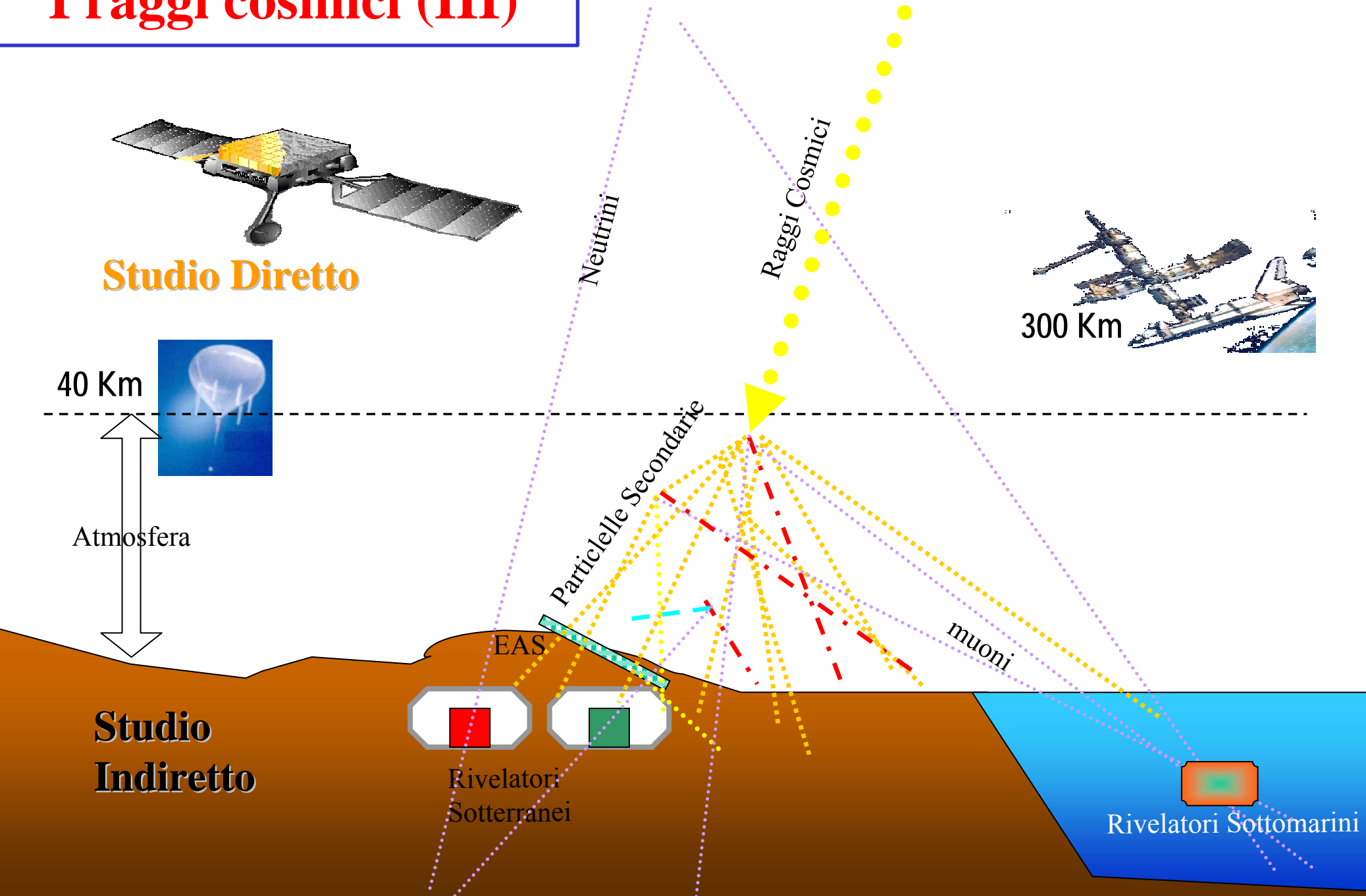


Rivelatori Sotterranei

EAS



Rivelatori Sottomarini



Interazione della radiazione con la materia

- Il funzionamento di un qualunque tipo di rivelatore di radiazione dipende principalmente dal modo in cui la radiazione interagisce con il materiale che compone il rivelatore stesso.
- Si possono considerare due diversi tipi di radiazione:
 - Particelle cariche
 - Particelle neutre
- La radiazione carica interagisce con la materia tramite la forza di Coulomb. Questo comporta:
 - Perdita di energia della particella
 - Deflessione della particella
- Nel caso di radiazione neutra l'energia della radiazione incidente viene trasferita :
 - ad elettroni (nel caso di fotoni γ o X)
 - ai nuclei degli atomi costituenti (nel caso di neutroni)

Interazione di particelle cariche pesanti

- Avvengono principalmente i due seguenti processi:
 1. Lo scattering inelastico con gli elettroni atomici del materiale
 2. Lo scattering elastico con i nuclei
- Le particelle cariche pesanti interagiscono con la materia principalmente per mezzo della forza di Coulomb che si esercita tra la loro carica positiva e la carica negativa degli elettroni atomici.
- Tali particelle possono interagire anche con i nuclei ma il bersaglio nucleare offre una sezione molto piccola rispetto al bersaglio atomico.
- Essendo gli elettroni atomici leggeri, le particelle incidenti trasferiscono energia negli urti elettronici senza deviare dalla loro traiettoria
- L'impulso ceduto dalla particella agli elettroni può:
 - innalzare l'elettrone atomico ad una shell più alta, eccitando così l'atomo
 - rimuovere l'elettrone dall'atomo, che così viene ionizzato

Perdita di energia per ionizzazione

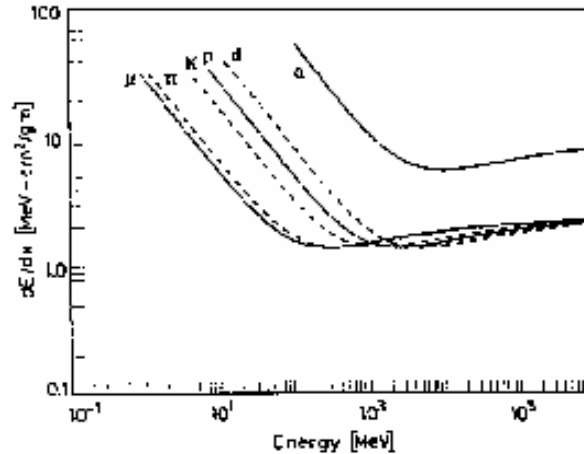
- Le collisioni con gli elettroni atomici sono di natura statistica
- Allora si lavora con la media di energia persa per unità di lunghezza di cammino, detta *potere frenante* S .
- Il calcolo quantistico di tale grandezza è stato fatto da Bethe e Bloch:

$$S = - \frac{\Delta E}{\Delta x} \propto \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{v^2}$$

- dove Z ed A il numero ed il peso atomico del materiale assorbitore, ρ la densità del materiale assorbitore, z il numero atomico della particella incidente e v la sua velocità.

Dipendenza dall'energia

- L'andamento della formula di Bethe-Bloch con l'energia cinetica della particella, è dato da:



- A causa dell'aumento del potere frenante al diminuire dell'energia, viene depositata più energia per unità di lunghezza alla fine del percorso della particella piuttosto che all'inizio:

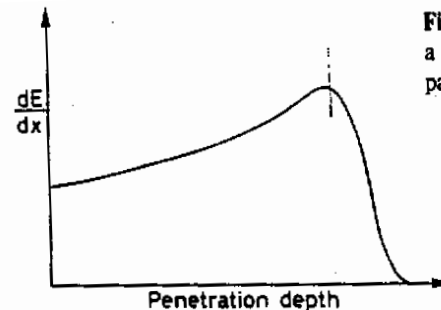
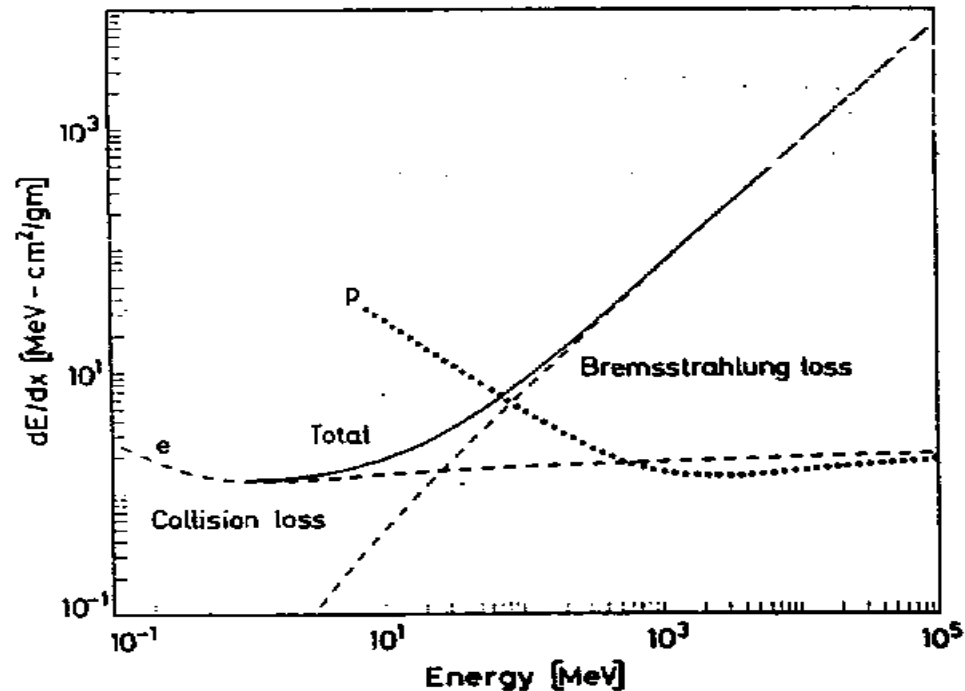


Fig. 2.5. A typical Bragg curve showing the variation of dE/dx as a function of the penetration depth of the particle in matter. The particle is more ionizing towards the end of its path

- Il picco che si vede alla fine della traiettoria viene chiamato *Picco di Bragg*.

Perdita di energia per elettroni e positroni

- Per queste particelle leggere bisogna considerare due processi di perdita di energia:
 - una perdita di energia per ionizzazione (come per le particelle pesanti, regolata dalla Bethe-Bloch)
 - l'emissione di radiazione elettromagnetica dovuta allo scattering nel campo elettrico di un nucleo (*bremsstrahlung*)
- Per energie di decine di MeV la perdita di energia per *bremsstrahlung* è comparabile con la perdita di energia per ionizzazione. Ad energie superiori il fenomeno di *bremsstrahlung* domina completamente:



Perdita di energia per bremsstrahlung

- Classicamente questa può essere compresa come la radiazione emessa dall'accelerazione dell'elettrone che devia dalla sua traiettoria rettilinea a causa dell'attrazione elettrica di un nucleo.
- Dall'elettromagnetismo classico si sa che una carica elettrica accelerata irraggia energia elettromagnetica (*formula di Larmor*) al ritmo di:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{2e^2}{3c^3} \langle a \rangle^2 \propto \frac{1}{m^2}$$

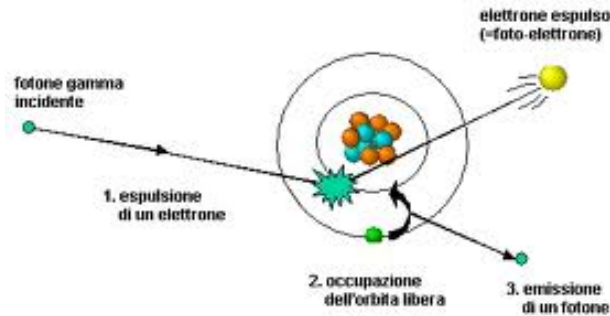
- Si capisce allora perché tale processo è tanto più vero per elettroni e positroni piuttosto che per le particelle cariche pesanti

Rivelazione di fotoni

- Un fotone non crea una ionizzazione o un'eccitazione diretta del materiale che attraversa: la sua rivelazione è strettamente legata al fatto di subire un'interazione che trasferisca la sua energia ad un elettrone nel materiale assorbente
- Affinché un rivelatore sia funzionale come spettrometro di fotoni deve svolgere due funzioni distinte:
 - deve funzionare come mezzo di conversione in cui i fotoni incidenti hanno una probabilità ragionevole di interagire per produrre uno o più elettroni
 - deve essere in grado di fermare gli elettroni secondari, cosicché la loro energia possa contribuire al segnale di uscita
- Le più significative interazioni dei fotoni con la materia sono:
 - l'assorbimento fotoelettrico, rilevante per fotoni di basse energie (fino ad alcune centinaia di keV)
 - la produzione di coppie, importante per fotoni di alte energie (oltre 5-10 MeV)
 - lo scattering Compton, che è il processo più probabile nell'intervallo di energia compreso tra gli estremi sopra menzionati

L'effetto fotoelettrico

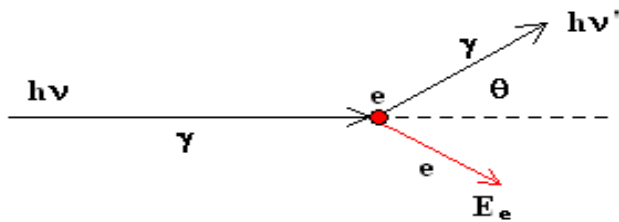
- In tale processo un fotone viene assorbito da un atomo e in corrispondenza viene prodotto un fotoelettrone da un orbitale dell'atomo assorbitore



- L'energia cinetica di tale elettrone è data da: $E_e = h\nu - E_b$ dove E_b è l'energia di legame dell'elettrone, e $h\nu$ è l'energia del fotone incidente
- La creazione di una “buca” negli orbitali causa un processo di riorganizzazione degli elettroni all'interno dell'atomo, con conseguente emissione di un raggio X caratteristico o di elettroni Auger
- La probabilità che tale processo avvenga cresce molto per materiali assorbitori con alto numero atomico Z e decresce per fotoni con alte energie $h\nu$
- Per questo si utilizzano materiali di alto Z per schermare i fotoni

Lo scattering Compton

- Questo processo consiste nello scattering di un fotone su un elettrone libero o quasi libero
- Sebbene gli elettroni siano legati nella materia, quando l'energia del fotone incidente è molto più alta dell'energia di legame degli elettroni, questi ultimi possono essere considerati liberi in prima approssimazione
- Applicando al processo in figura la conservazione dell'energia e della quantità di moto, si ottengono le relazioni:



$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)}$$

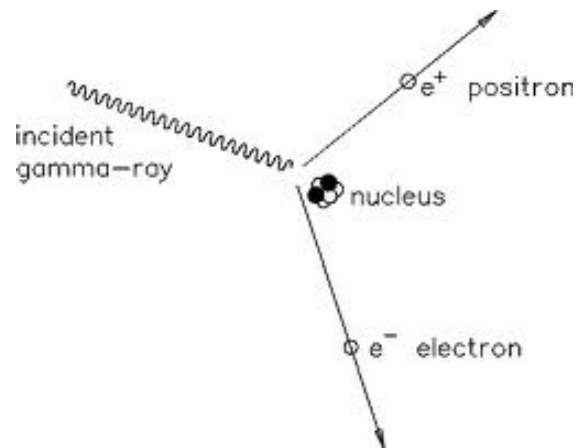
$$E_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\gamma(1 - \cos \theta)}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)}$$

dove: $\gamma = h\nu / m_e c^2$

- La probabilità di scattering Compton, per atomo assorbitore, dipende dal numero di elettroni disponibili come bersagli e quindi cresce linearmente con Z

Produzione di coppie

- Questo processo corrisponde alla creazione di una coppia elettrone-positrone nel punto in cui il fotone incidente si annichila
- L'energia minima richiesta è pari a $2m_e c^2$ ovvero 1.022 MeV, ma il processo inizia ad essere importante per energie di 5-10 MeV
- L'energia in eccesso si ritrova come energia cinetica per la coppia elettrone-positrone:
- Il positrone si annichila molto rapidamente con un elettrone nel mezzo, creando due fotoni di energia 0.511 MeV l'uno $E_e + E_{e^+} = h\nu - 2m_e c^2$
- Il tempo richiesto per la ricombinazione è piccolo, così l'annichilazione appare in coincidenza virtuale con la creazione della coppia
- La probabilità che avvenga la produzione di coppie è proporzionale a Z^2



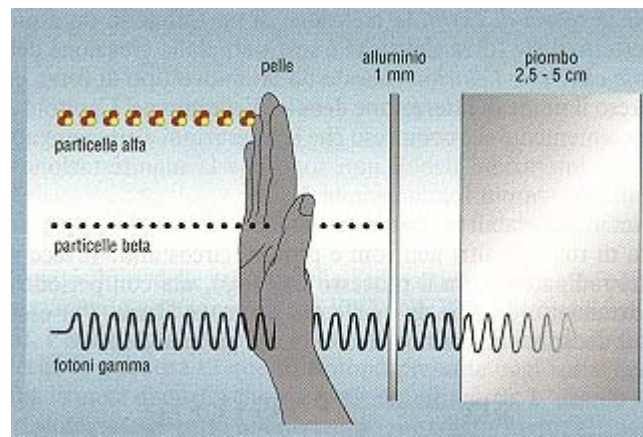
Assorbimento dei fotoni nella materia

- Quando un fascio di fotoni penetra in un mezzo, a causa delle interazioni con il mezzo stesso l'intensità del fascio decresce esponenzialmente:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

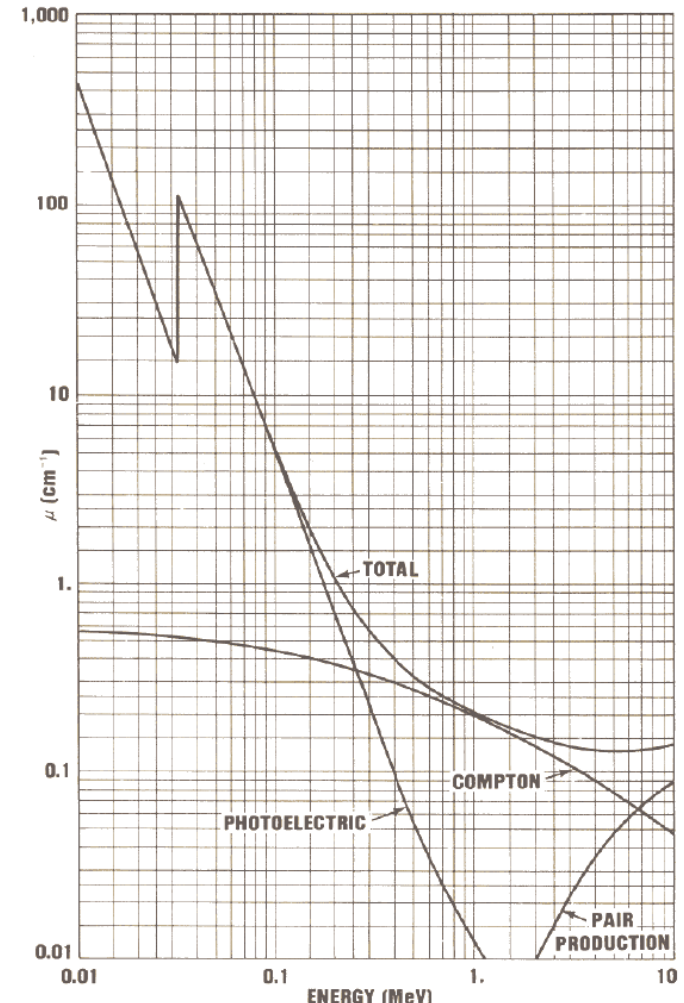
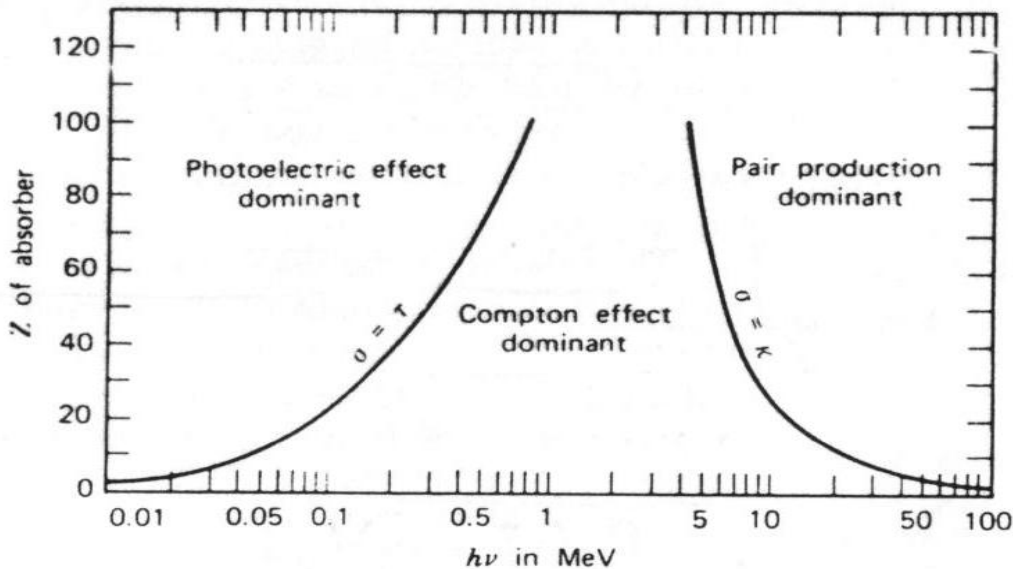
dove $I(x)$ rappresenta il numero di fotoni ancora presenti alla profondità x , essendo I_0 il numero di fotoni iniziale. Il coefficiente di attenuazione μ rappresenta la probabilità di interazione per unità di percorso ed ha come dimensioni l'inverso di una lunghezza

- In conclusione la radiazione gamma presenta le due seguenti caratteristiche:
 - La radiazione gamma è molto più penetrante della radiazione carica, essendo le sezioni d'urto dei tre processi visti molto minori della sezione d'urto dello scattering inelastico di elettroni
 - Un fascio di fotoni che passa in uno spessore di materiale non perde energia come una particella carica, ma viene attenuato in intensità



Confronto tra i tre processi

- L'importanza relativa dei tre principali tipi di interazione dei fotoni al variare dell'energia dei fotoni e del numero atomico del mezzo assorbitore è data da:



Riassunto

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

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 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

Caratteristiche di un rivelatore

- Il principio di funzionamento di ogni rivelatore di particelle è il trasferimento dell'energia della radiazione alla massa del rivelatore, dove è convertita in un segnale elettrico
- La relazione tra l'energia della radiazione e la carica totale, o l'ampiezza del segnale di uscita, è detta risposta del rivelatore
- Sensibilità: è la capacità del rivelatore di produrre un segnale utilizzabile per un determinato tipo di radiazione ed energia
- Risoluzione energetica: è la capacità del rivelatore di distinguere tra valori di energia prossimi tra loro
- Tempo di risposta: è il tempo necessario al rivelatore per formare il segnale in seguito al passaggio di radiazione
- Efficienza temporale: è il tempo minimo necessario al rivelatore per registrare un evento e rendersi disponibile a rivelarne un altro
- Efficienza di rivelazione: è definita come il rapporto tra gli eventi registrati dal rivelatore e quelli emessi dalla sorgente

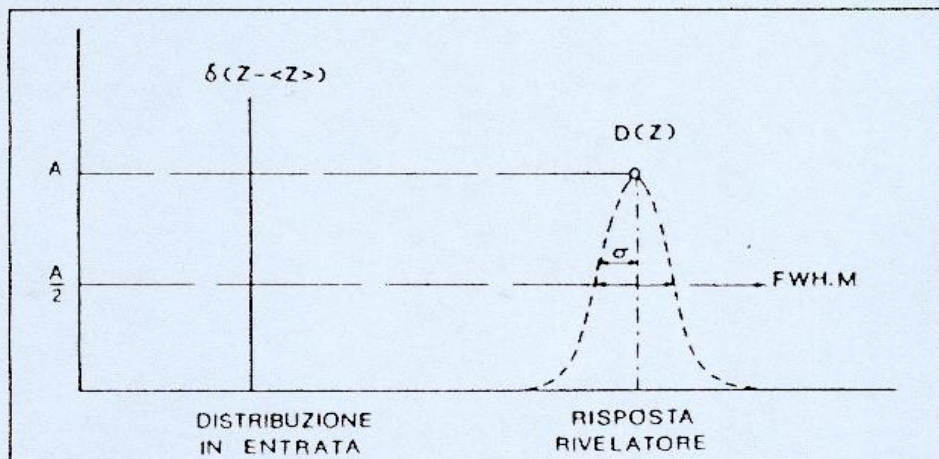
Rivelatori di particelle: requisiti di un rivelatore

La valutazione di alcune caratteristiche del segnale prodotto dal rivelatore (ampiezza, tempo) permette di determinare il valore di alcune quantità (energia ceduta, tempo di arrivo della particella) con una risoluzione propria del rivelatore.

La risposta z di un rivelatore ad un segnale in ingresso Z è distribuita secondo una curva gaussiana, la cui “deviazione standard” rappresenta la **risoluzione del rivelatore**.

L' **efficienza di un rivelatore** è il rapporto $\varepsilon = N_R / N_I$ tra il numero di particelle segnalate dal rivelatore e il numero di particelle incidenti sul rivelatore.

Il **rumore** è dato dai segnali prodotti dal rivelatore che non corrispondono ad un evento fisico (una particella) ma sono dovuti a fluttuazioni intrinseche del sistema (per es. rumore elettronico).



REQUISITI DI UN RIVELATORE

Alta efficienza ($\sim 100\%$)

Basso rumore

Piccola risoluzione (cioè alta precisione) per tutte le grandezze fisiche misurate.

Stabilità delle prestazioni nel tempo.

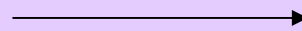
Facilità di calibrazione.

Scintillatori: definizione

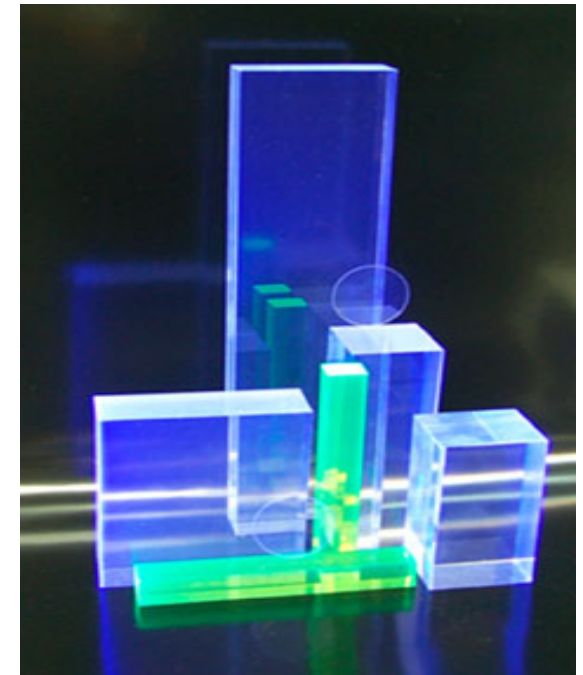
Una particella carica, attraversando uno scintillatore, perde energia eccitando gli atomi del materiale. Questi ultimi, diseccitandosi, emettono luce visibile (detta luce di scintillazione). Quindi gli scintillatori sono dei materiali (organici o inorganici) che, quando vengono attraversati da una particella carica, emettono luce in un **tempo brevissimo** ($< 10^{-7}$ sec) ed in quantità **proporzionale** all'energia persa dalla particella nell'attraversarli.

Gli scintillatori organici, devono il fenomeno della FLUORESCENZA alla struttura dei livelli energetici di una singola molecola, mentre quelli inorganici sono costituiti da cristalli contenenti dei centri di luminescenza dovuti ad impurità o difetti reticolari.

Esempio di materiali scintillanti

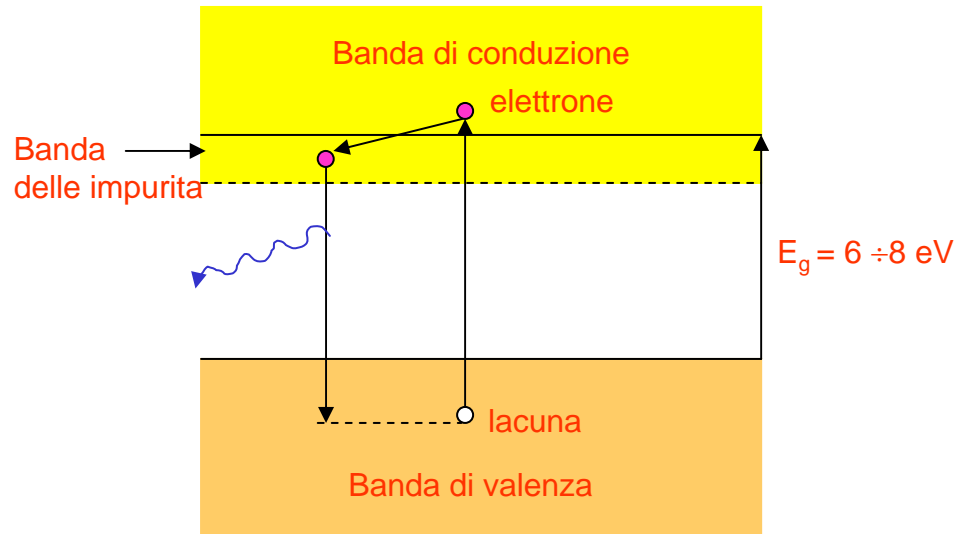


Gli scintillatori inorganici con alto numero atomico Z (BGO, PbWO_4) sono adatti anche per rivelare i fotoni (quanti di luce), pur non essendo particelle cariche.



Scintillatori organici e inorganici

Scintillatori inorganici (NaI, CsI, BGO, BaF₂ ...)
sono cristalli ionici drogati con impurita`.
I tempi di emissione ~ 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 fotoni/MeV. La risposta luminosa varia con la temperatura.

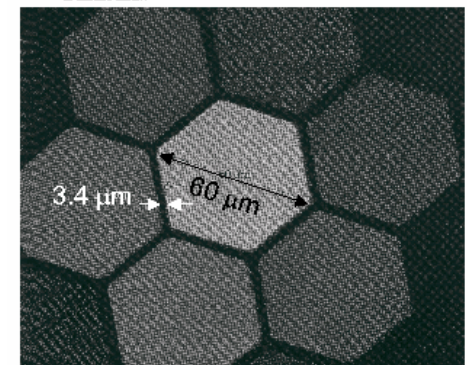
Scintillatori organici (BC102 ...)

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 per trasportare l'emissione nel visibile ("wave shifter").
I tempi di emissione sono $< 10 \text{ ns}$

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).

Fibre scintillanti a sezione esagonale



Struttura di un rivelatore a scintillazione

La luce emessa da uno scintillatore viene trasportata attraverso una **guida di luce** ad uno strumento detto **fotomoltiplicatore**, che genera un impulso elettrico le cui caratteristiche dipendono dal segnale luminoso prodotto al suo ingresso. L'insieme scintillatore - guida di luce - fotomoltiplicatore costituisce un contatore a scintillazione.

La luce di scintillazione è emessa **isotropicamente**. Quindi solo una parte di essa raggiunge direttamente la guida di luce; il resto la raggiunge solo dopo un certo numero di **riflessioni**. La luce che arriva al fotocatodo è perciò solo una frazione di quella emessa. Lo scintillatore viene accoppiato otticamente ad una guida di luce che ha lo scopo di raccordare una superficie dello scintillatore con quella del fotomoltiplicatore.

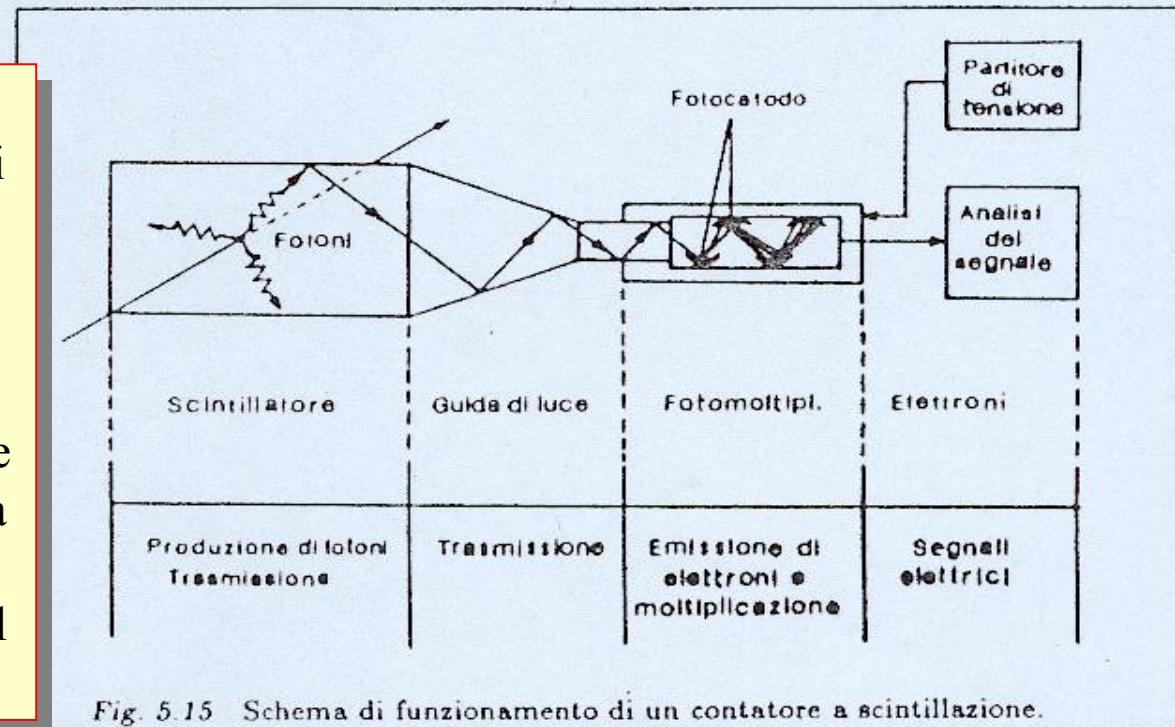


Fig. 5.15 Schema di funzionamento di un contatore a scintillazione.

Il fotomoltiplicatore: descrizione

Il fotomoltiplicatore (PM) e' racchiuso in un' ampolla di vetro, che contiene:

Un **fotocatodo**:

materiale semitrasparente fotosensibile capace di emettere elettroni quando viene colpito dalla luce;

un' **ottica di ingresso**:

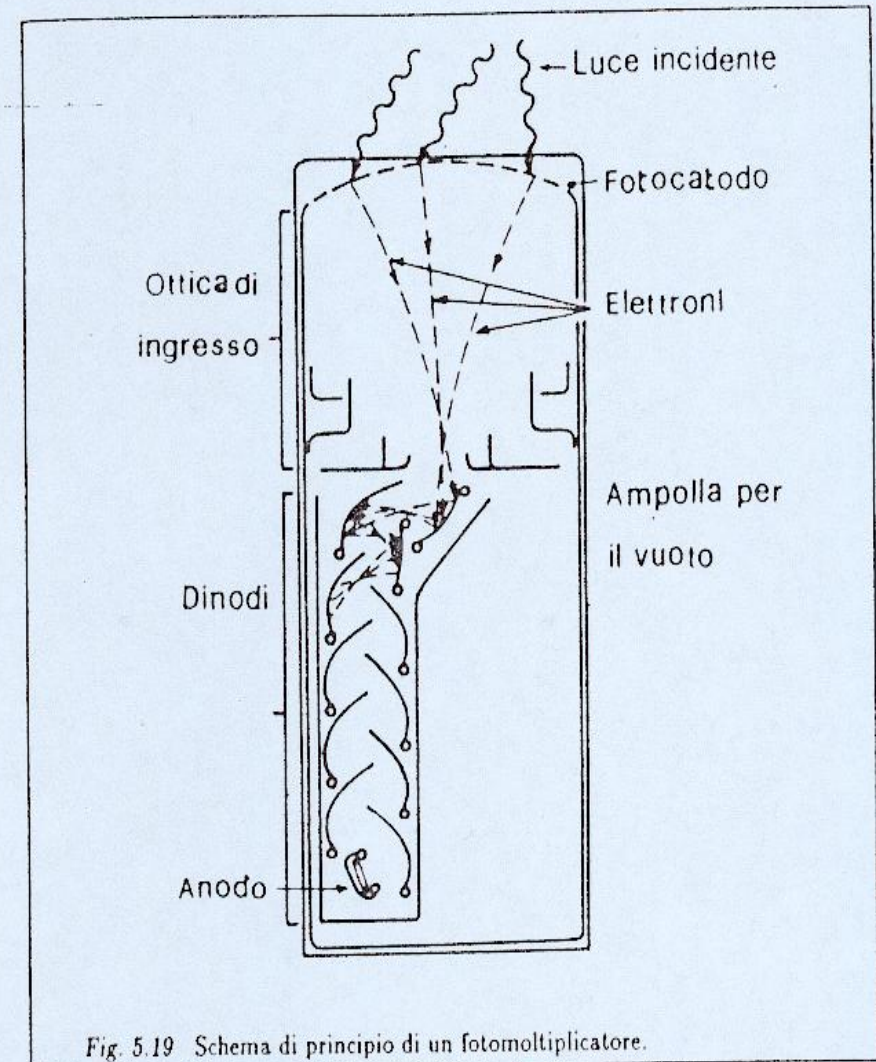
un insieme di elettrodi che convogliano gli elettroni emessi dal fotocatodo sul primo dinodo;

i **dinodi**:

serie di elettrodi a tensione crescente capaci di provocare l'emissione di altri elettroni, definiti per questo **elettroni secondari**; ogni dinodo amplifica di 3-4 volte il numero di elettroni;

un **anodo**:

l'ultimo elettrodo che raccoglie tutti gli elettroni creati nelle emissioni secondarie



Il fotocatodo

Il fotocatodo converte la luce incidente in una **corrente di elettroni** (detti fotoelettroni) per mezzo dell'effetto fotoelettrico. Per facilitare il passaggio di questa luce, il **materiale fotosensibile** è depositato in uno strato sottile all'interno del vetro (o quarzo) della finestra di ingresso del fotomoltiplicatore.

L'efficienza quantica $\varepsilon(\lambda)$ è il rapporto tra il numero di fotoelettroni rilasciati e il numero di fotoni incidenti sul catodo e dipende dalla lunghezza d'onda λ dei fotoni incidenti.

La massima efficienza si ha nella maggior parte dei casi per lunghezza d'onda $\lambda = 400 \div 440$ nm (luce blu) e vale circa $\varepsilon(\lambda) = 10 \div 30$ %

Il **materiale fotosensibile** deve avere un'alta efficienza quantica. Nella maggior parte dei casi si tratta di materiali semiconduttori formati con antimonio con l'aggiunta di uno o più metalli alcalini (es. Cesio).

I dinodi

I dinodi sono degli elettrodi di emissione secondaria, posti tra il fotocatodo e l'anodo del fotomoltiplicatore. Servono ad amplificare la debole corrente primaria di elettroni estratti dal fotocatodo.

Il guadagno di ogni elettrodo si chiama *secondary emission factor* K .

I dinodi sono composti da un sottile strato di materiale (con buona capacità di emissione) depositato su una struttura metallica. Per esempio si usano delle leghe di metallo alcalino + metallo "nobile" (Ag-Mg, Cu-Be, ...).

Se indichiamo con n il numero di fotoelettroni prodotti dal fotocatodo, con d il numero di dinodi e con K il coefficiente di moltiplicazione per emissione secondaria, il numero di elettroni che raggiungono l'anodo è $n K^d$.

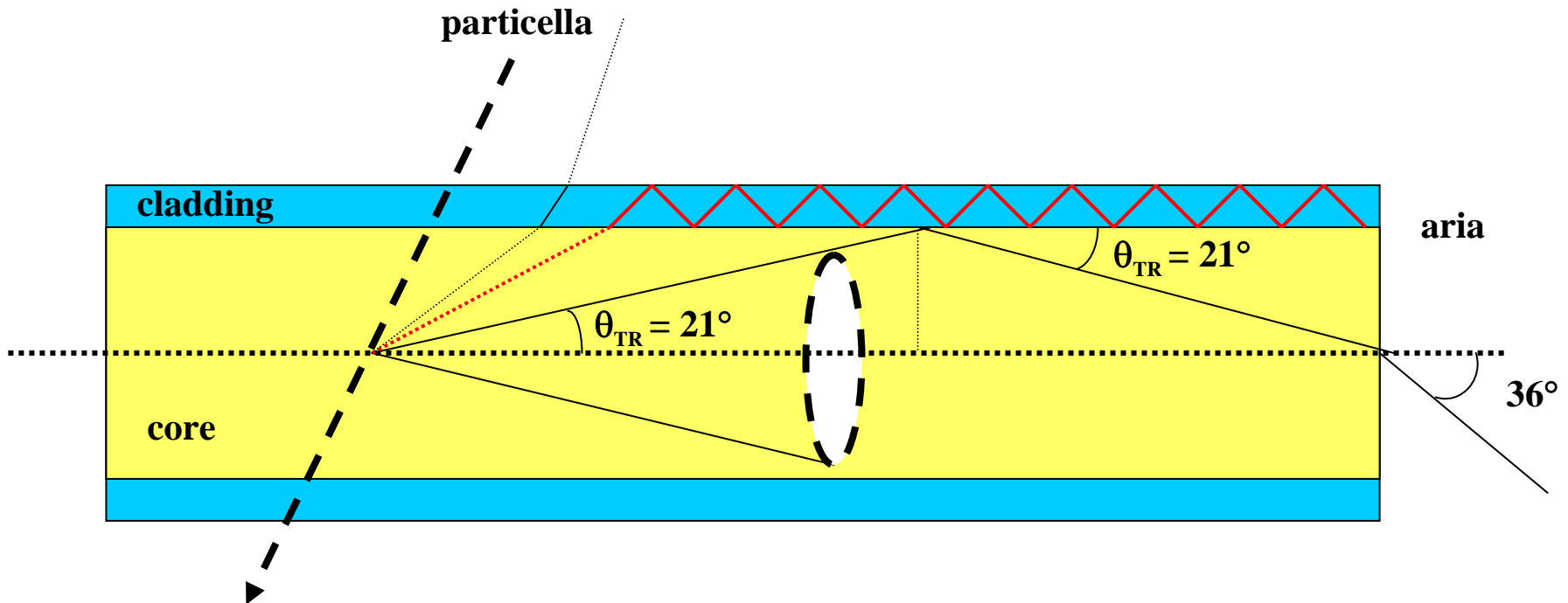
Tipicamente $d=10 \div 14$ e $K=3 \div 4 \Rightarrow$ il guadagno del fotomoltiplicatore è $K^d \sim 10^5 \div 10^7$.

Il guadagno $G = K^d$ dipende dalla tensione di alimentazione applicata in quanto varia la costante $K \implies \mathbf{G(HV)/G(HV_0) \approx (HV/HV_0)^d}$

Le fibre scintillanti

Uno scintillatore puo` essere realizzato sotto forma di una fibra ottica. La fibra e` costituita da un nucleo interno chiamato “**core**” e da un rivestimento trasparente detto “**cladding**”. Il core e` un materiale plastico (polistirene) opportunamente “drogato” con **molecole organiche**, l’indice di rifrazione e` $n_1=1.6$. Il cladding e` costituito di plexiglass $n_2=1.49$.

La luce nella fibra si propaga nel **core** per **riflessioni multiple**, procedendo entro un cono di apertura $\Theta_{TR}=21^\circ$ (angolo di trapping, cioe` di “intrappolamento” della luce).



Rivelazione di particelle con fibre scintillanti

Realizzazione di un rivelatore di particelle elementari basato sull'uso di fibre scintillanti.

Calibrazione e test del rivelatore per mezzo di una sorgente radioattiva e dei raggi cosmici.

Realizzazione di misure significative per determinare le caratteristiche del rivelatore:

- curva di guadagno del fotomoltiplicatore;
- lunghezza di attenuazione della luce nelle fibre;
- spettri di carica (con raggi cosmici);
- verifica della curva di attenuazione;
- misura di posizione tramite differenza dei tempi.

Esperimento proposto da: M.Anelli, C.Forti, F.Happacher, S.Miscetti

Applicazioni dei rivelatori a scintillazione

I rivelatori a scintillazione hanno diverse applicazioni:

1. misure di **energia**: con gli scintillatori si puo` realizzare un **calorimetro**, che e` un rivelatore che permette di misurare l'energia persa dalla particella mentre lo attraversa (se la particella si ferma al suo interno, ne viene misurata tutta l'energia).
2. misure di **tempo di volo**, cioe` del tempo in cui la particella attraversa un certo spazio (lo spazio tra due rivelatori): se ne ricava la velocita` della particella.
3. rivelatori traccianti: utilizzando le fibre scintillanti (di sezione molto piccola) si possono costruire dei rivelatori a scintillazione che forniscono con precisione il punto di passaggio della particella e permettono di ricostruirne la traiettoria (**traccia**).
4. contatori di **trigger/veto**: quando la presenza di un segnale in uno o piu` rivelatori serve per **selezionare o scartare** un evento prima che esso venga acquisito dai circuiti elettronici e memorizzato dai computer (come vedremo nel nostro esperimento).

Lunghezza di attenuazione

Le fibre scintillanti presentano una **attenuazione esponenziale della luce** trasmessa in funzione della distanza percorsa dalla luce stessa.

$I(x) = I(0) e^{-x/\lambda}$ dove:

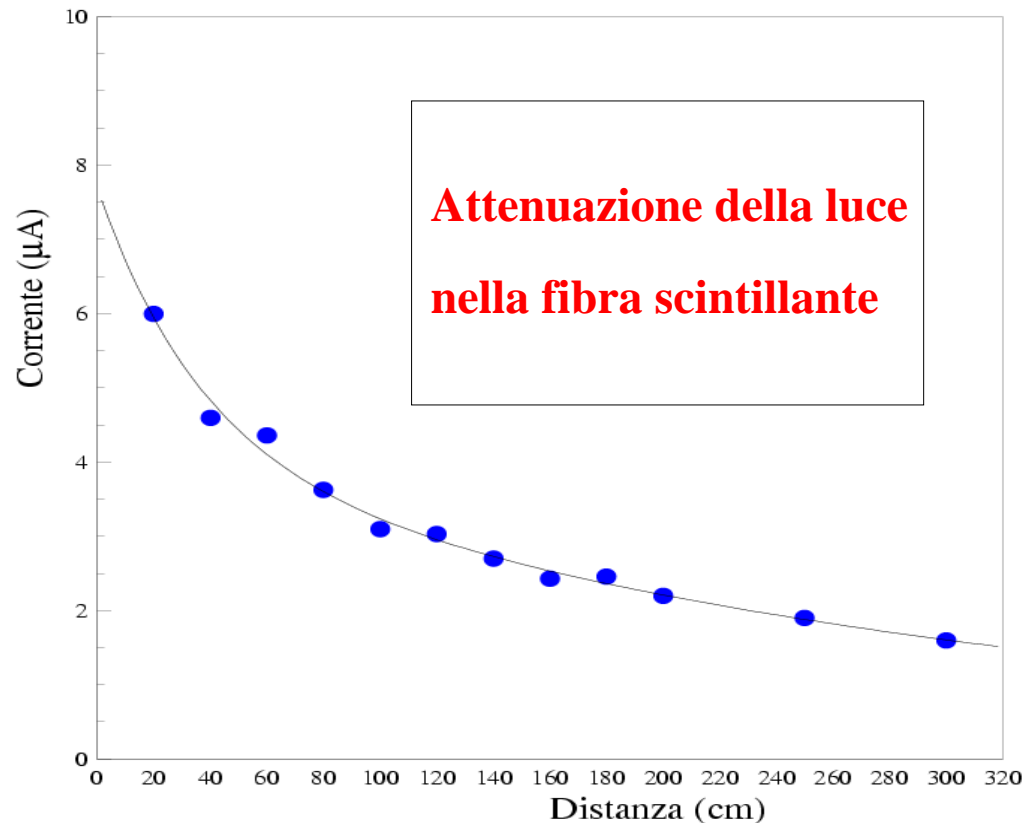
x = distanza percorsa dalla luce

λ = lunghezza di attenuazione

La lunghezza di attenuazione e' la distanza per cui la luce inizialmente prodotta si e' attenuata di un fattore "e" [$\ln(e)=1$] (cioe' $e \sim 2.7$).

Le fibre scintillanti hanno il vantaggio di avere una grande lunghezza di attenuazione ($\lambda=3\div 4$ m) e quindi il loro impiego e' consigliato nel caso di rivelatori "lunghi".

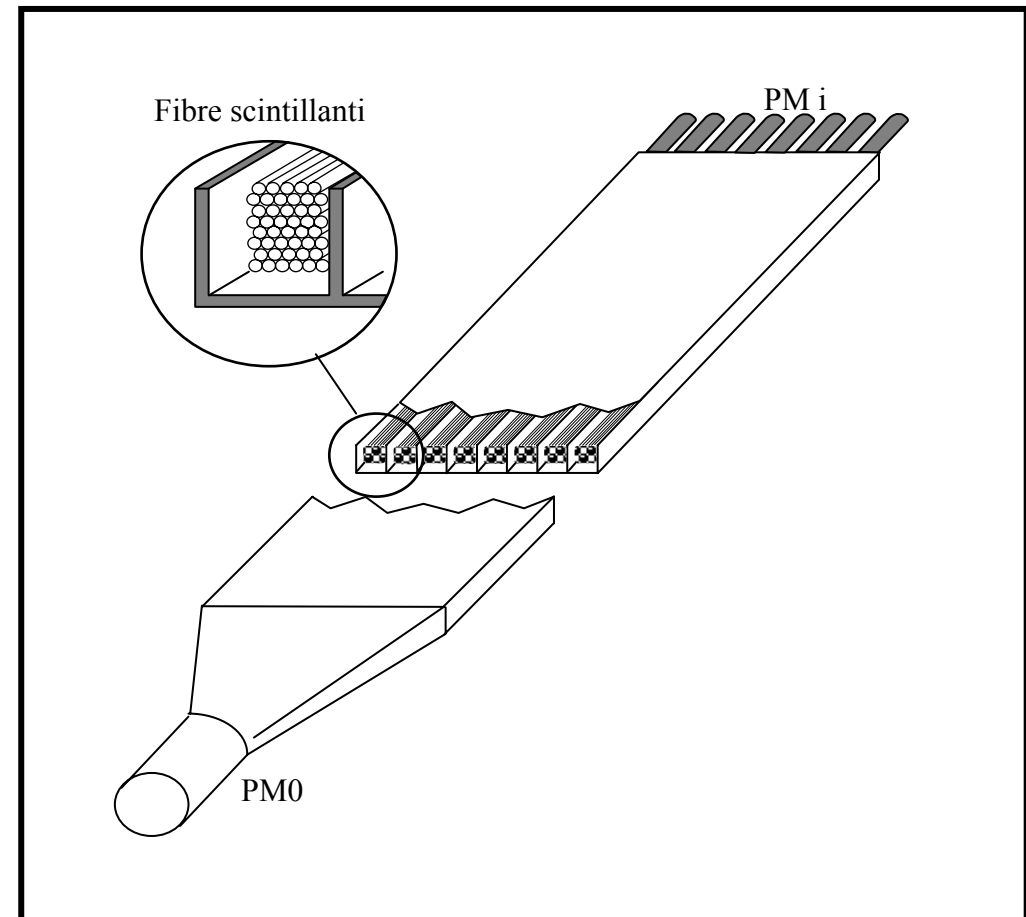
2002/06/27 17.55



Setup sperimentale (I)

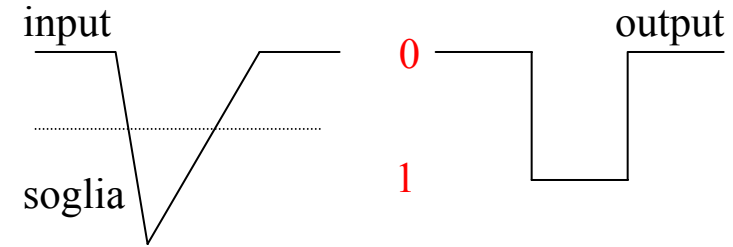
Nella nostra misura abbiamo utilizzato un rivelatore suddiviso in otto **canali** a fibre scintillanti aventi una sezione di $2 \times 2 \text{ cm}^2$ costituiti ognuno da circa 150 fibre di 1 mm di diametro.

Il contatore è stato ricoperto da un foglio di alluminio per evitare infiltrazioni di luce dall'esterno. La lunghezza delle fibre è di 350 cm per una larghezza totale di 16 cm. Da un lato tutte le fibre sono state connesse ad un fotomoltiplicatore PM0 sul cui fotocatodo abbiamo posto del grasso ottico avente lo stesso indice di rifrazione delle fibre; in questo modo la luce proveniente dalle fibre prosegue il suo percorso verso il fotocatodo senza subire deviazioni.

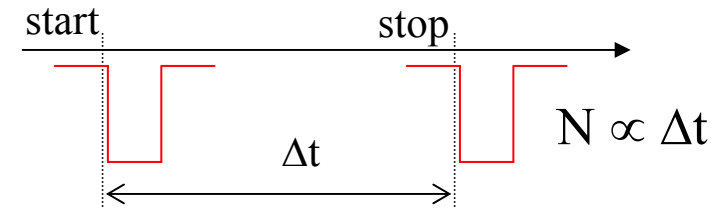


Strumentazione utilizzata

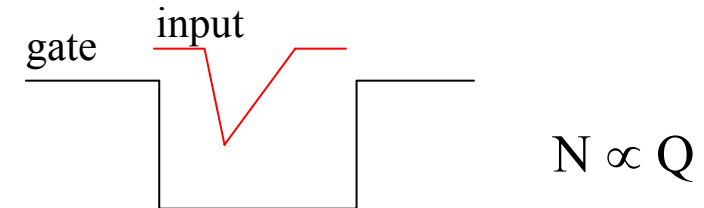
Discriminatori a soglia DISCR: circuiti che trasformano il segnale analogico proveniente dal fotomoltiplicatore in un segnale **digitale** (di valore 0 o 1), se il segnale in ingresso supera un certo valore minimo (detto soglia).



I **TDC** (Time to Digital Converter) forniscono un numero di conteggi N proporzionale al tempo di arrivo della particella (stop).



Gli **ADC** (Analog to Digital Converter) forniscono un numero di conteggi N proporzionale alla carica elettrica totale Q del segnale del PM, a sua volta proporzionale all'energia persa dalla particella nelle fibre.



Gli **SCALER** contano il numero di segnali digitali in ingresso.

Tutte le informazioni lette tramite un **Controllore CAMAC** vengono poi inviate ad un computer che acquisisce e memorizza i dati.

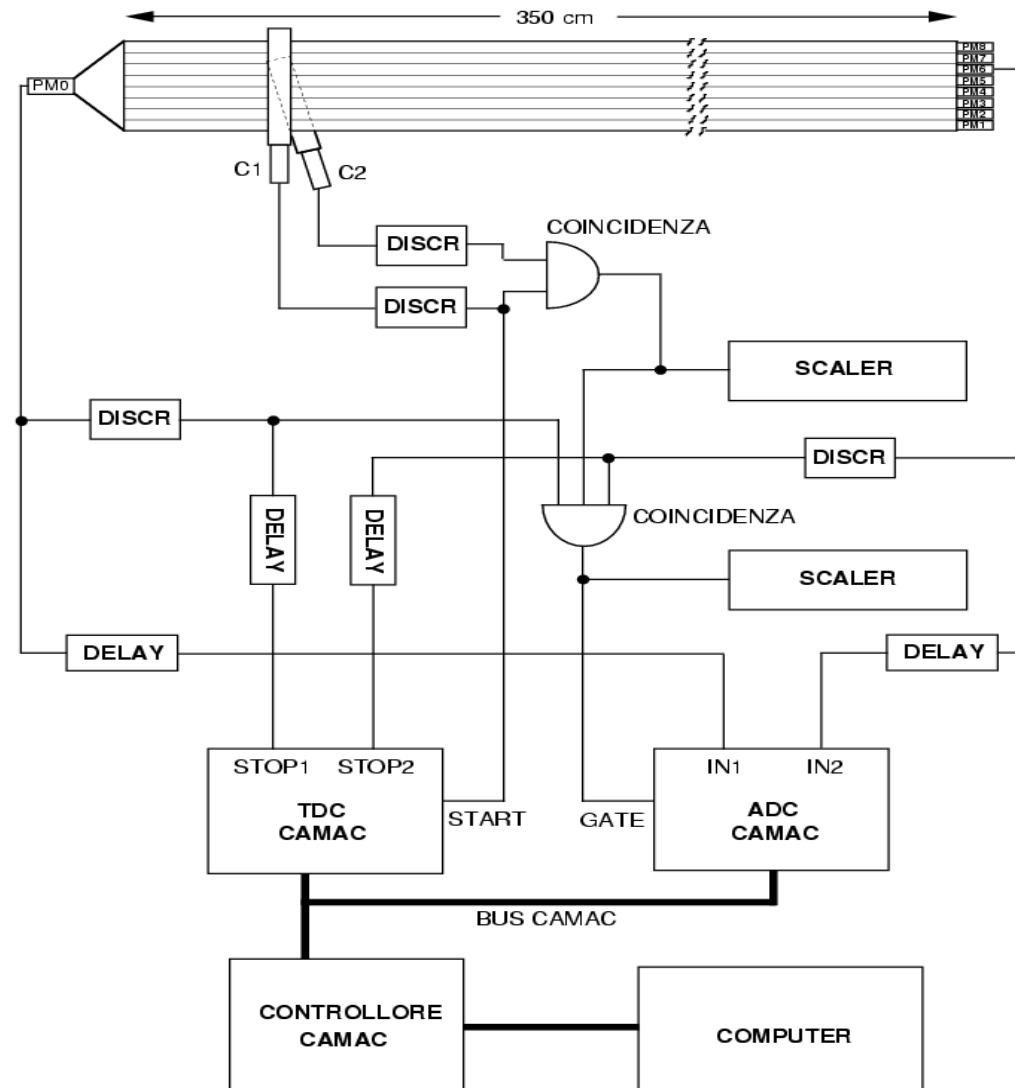
Setup sperimentale (II)

Quando una particella attraversa entrambi i contatori a scintillazione C_1 e C_2 , posti uno al di sopra delle fibre, l'altro al di sotto, i segnali così prodotti vengono inviati ai discriminatori **DISCR**.

Anche i segnali provenienti dai **PM** alle estremità delle fibre vengono discriminati ed inviati a formare una coincidenza insieme ai segnali C_1 e C_2 .

La coincidenza $C_1 * C_2 * PM0 * PMi$ fornisce un segnale di “**trigger**” (impulso di comando).

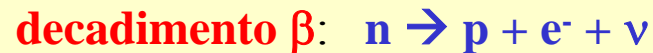
Se scatta il trigger l'evento viene acquisito (registrato) in quanto si considera non casuale (per es. non dovuto a rumore elettronico) il fatto che i contatori si siano accesi “simultaneamente”. In pratica il trigger identifica il passaggio di una particella.



Calibrazione relativa con sorgente radioattiva

Per ogni elemento chimico di **numero atomico Z** (numero di protoni nel nucleo) ci sono diversi **isotopi**: nuclei con diverso numero totale di nucleoni A (quindi un diverso numero di neutroni $N = A - Z$). Un difetto od un eccesso di neutroni, rispetto alla combinazione piu' stabile, porta ad un nucleo instabile (radioattivo) che tende a decadere, cioe` a trasformarsi in un nucleo maggiormente stabile.

Nel nostro caso, abbiamo una sorgente di **Sr (A=90, Z=38)** con due neutroni in eccesso rispetto allo Stronzio allo stato fondamentale Sr (A=88, Z=38). Con un tempo di dimezzamento $t_{1/2} = 28.5$ anni si trasforma in **Y (A=90, Z=39)** attraverso un



L'elettrone emesso ha un'energia massima : **$E_1=546$ keV**.

Il nucleo di Yttrio prodotto e` a sua volta instabile e decade "immediatamente" in Zirconio **Zr (A=90, Z=40)** emettendo un elettrone di energia massima **$E_2=2283$ keV**.

Questi elettroni rilasciano energia nelle fibre, permettendoci di **monitorare** la risposta di ogni canale **PMi** (cioe` di ogni pacchetto di fibre). In questo modo possiamo **equalizzare** (o intercalibrare) i canali, cioe` regolare la tensione di alimentazione di ogni fotomoltiplicatore PMi in modo che vi sia lo **stesso segnale** in uscita per ogni canale (partendo da una medesima energia rilasciata nelle fibre, dovuta alla sorgente).

Altre sorgenti di calibrazione

Anche se le sorgenti costituiscono un metodo veloce di controllo, non sono semplici da utilizzare in esperimenti con rivelatori grandi e/o dotati di un numero elevato di canali.

In questi casi si preferisce utilizzare:

- eventi di fisica noti dell'esperimento stesso
- fasci di particelle note di energia definita (fasci di test)
- i **raggi cosmici**, fonte naturale e costante di particelle.

Setup iniziale e possibili misure

Prima di utilizzare il rivelatore, occorre stabilire i valori di alcuni parametri (soglie dei discriminatori, tensione di lavoro dei fototubi). A tale scopo effettuiamo le seguenti operazioni :

1. Misura del plateau in soglia
2. Misura del plateau in tensione
3. Intercalibrazione dei canali dei fotomoltiplicatori PMi

Quindi, con il nostro setup sperimentale, possiamo realizzare alcune misure per monitorare il funzionamento del rivelatore e verificarne le principali caratteristiche:

1. Lunghezza di attenuazione della luce nelle fibre
2. Spettri di carica
3. Verifica della curva di attenuazione
4. Misura di posizione tramite differenza dei tempi

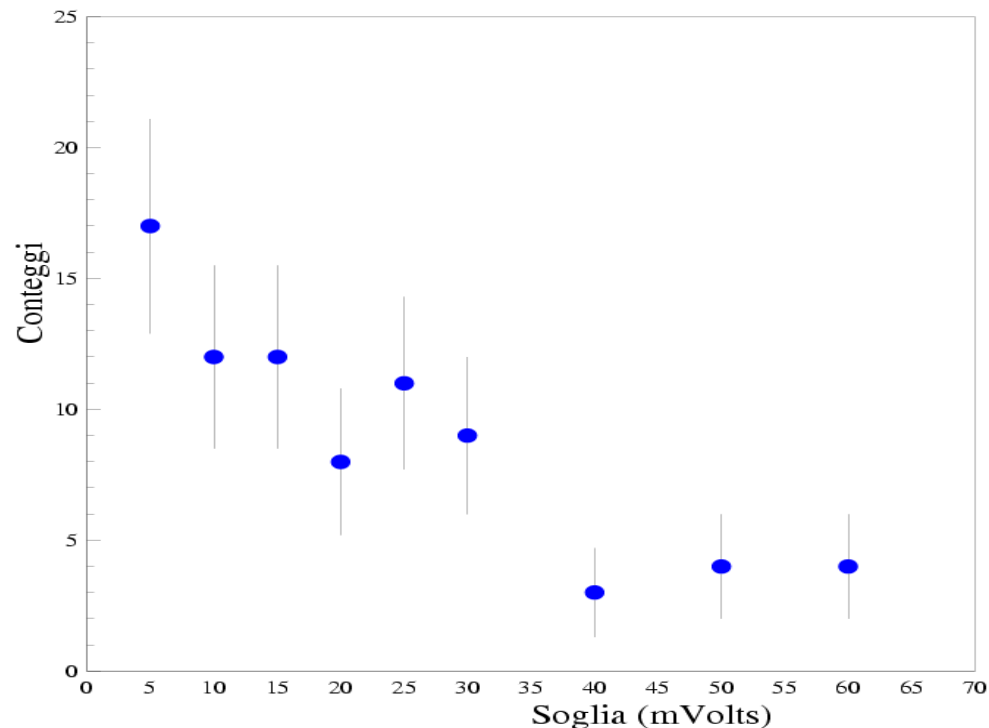
Plateau in soglia

Si misurano i conteggi al variare della **tensione di soglia del discriminatore**. La curva mostra un andamento prima decrescente e poi stabile, tipico di una curva di soglia. La zona “piatta” e’ detta “plateau” e permette di definire il valore della soglia da impostare.

Se la soglia scelta e’ **troppo bassa**, **non vengono filtrati gli eventi rumorosi**.

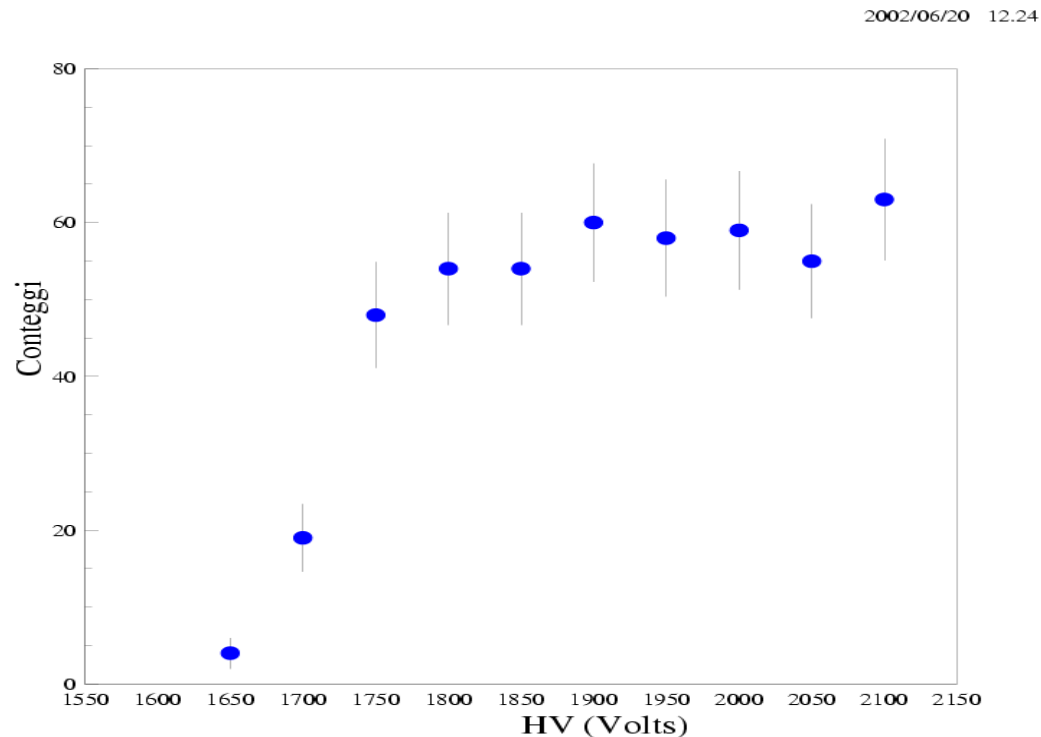
Se la soglia e’ **troppo alta**, non vengono acquisiti eventi “buoni” (**diminuisce l’efficienza**).

2002/06/20 12.24



Plateau in tensione

Si misura il numero di **conteggi** (in un intervallo di tempo fissato) che rappresenta il numero di particelle rivelate in funzione della **tensione di alimentazione** applicata al fotomoltiplicatore. Si puo` notare che l'efficienza del rivelatore cresce al variare della tensione, fino a raggiungere un valore di “plateau”. La **tensione di lavoro** viene scelta in questa zona, per avere la massima **stabilita`** del rivelatore (cioe` efficienza stabile nel tempo).



Intercalibrazione dei canali

Gli elettroni emessi dalla sorgente rilasciano energia nota nelle fibre, permettendoci di **monitorare** la risposta di ogni canale **PMi**.

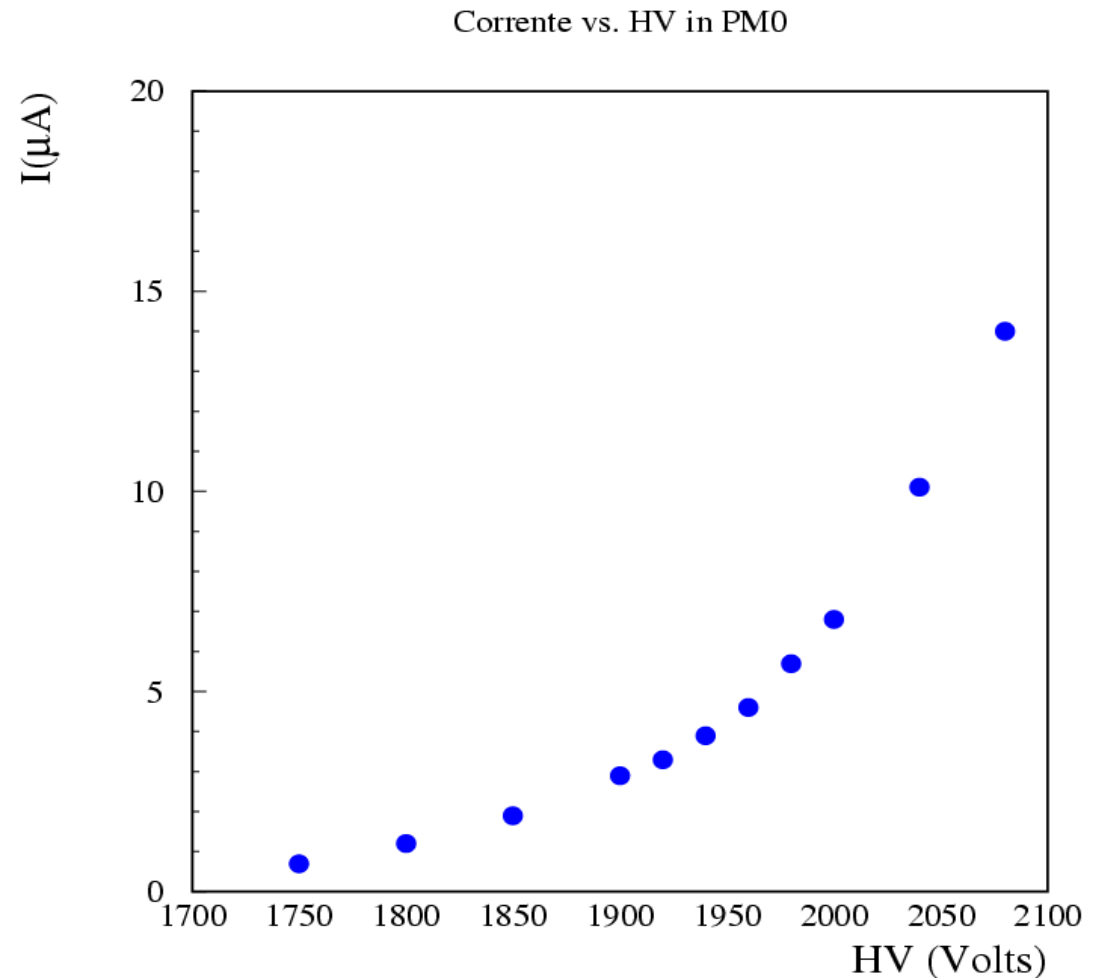
Si misura la corrente in ogni canale **PMi** in funzione dell'alta tensione (HV) e si sceglie la tensione di alimentazione di ogni fotomoltiplicatore PMi in modo che vi sia la **stessa corrente** in uscita per ogni canale. In questo modo possiamo **equalizzare** (o intercalibrare) i canali.

Nell'esempio qui sotto, abbiamo equalizzato tutti i canali rispetto al PM8.

PM	HV (Volt)	i (μA)	Nuova HV	Nuova i
1	1150	2.9	1110	2.3
2	1170	3.1	1120	2.3
3	1220	2.8	1180	2.3
4	1270	3.7	1180	2.3
5	1130	3.8	1050	2.3
6	1230	3.1	1180	2.3
7	1210	3.3	1150	2.3
8	1050	2.3	invariata	invariata

Curva di guadagno del fotomoltiplicatore (I)

Utilizzando la sorgente radioattiva, posta ad una certa distanza fissata da PM0, possiamo misurare come la corrente nel fotomoltiplicatore dipende dall'alta tensione ad esso applicata.



Curva di guadagno del fotomoltiplicatore (II)

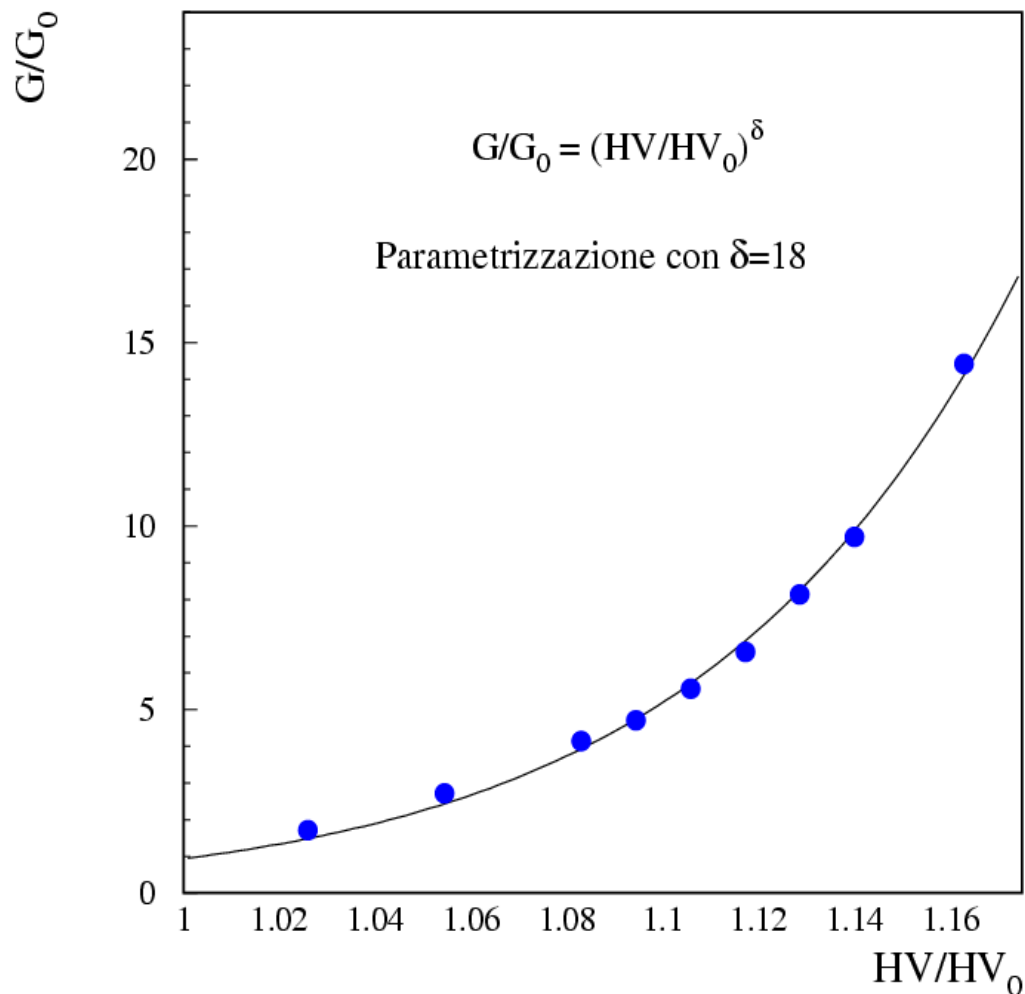
Se indichiamo con δ il numero di dinodi e con K il coefficiente di moltiplicazione per emissione secondaria, il guadagno del fotomoltiplicatore e' K^δ ($10^5 \div 10^6$).

Siccome K e' proporzionale all'alta tensione di alimentazione del fotomoltiplicatore HV , se chiamiamo G_0 il guadagno alla tensione HV_0 , allora il guadagno G alla tensione HV soddisfa la relazione:

$$G/G_0 = (HV/HV_0)^\delta$$

ed essendo $G \propto i$ (corrente nel PM), il rapporto dei guadagni e' uguale al rapporto delle correnti:

$$G/G_0 = i/i_0$$



Lunghezza di attenuazione (con Sr⁹⁰)

Si puo` misurare la lunghezza di attenuazione delle fibre ponendo la sorgente radioattiva a diverse distanze dal fotomoltiplicatore e misurando la corrente in funzione della distanza.

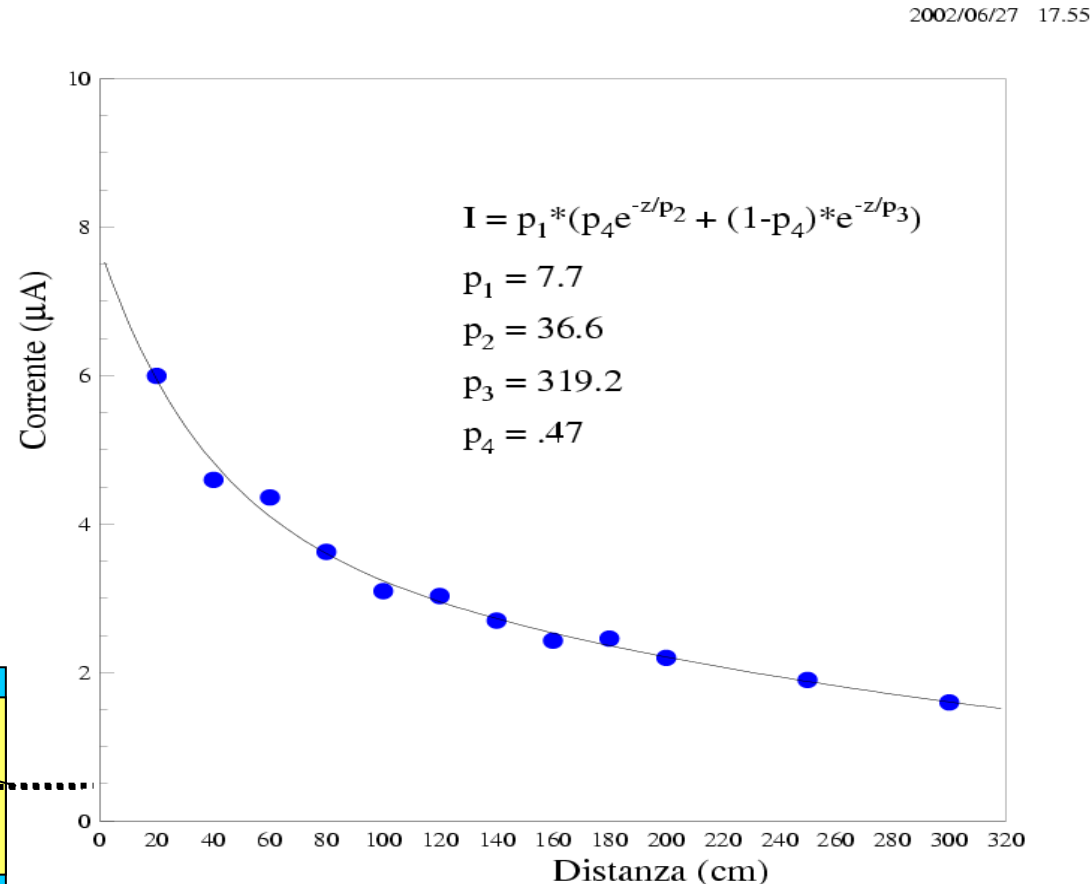
$I(x) = I(0) e^{-x/\lambda}$ dove:

x = distanza percorsa dalla luce

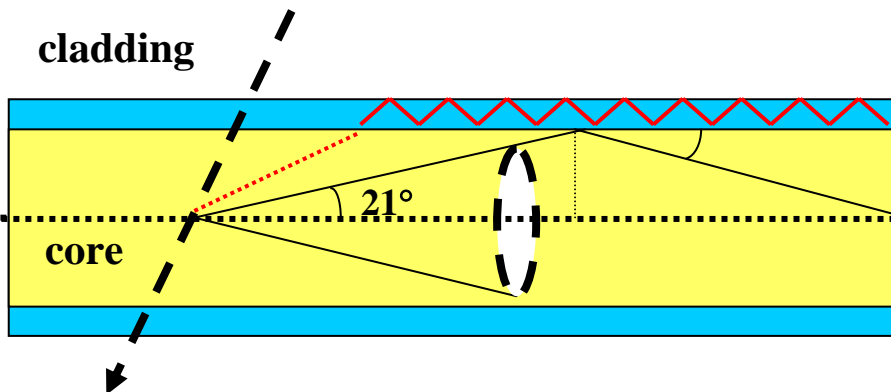
λ = lunghezza di attenuazione

Parametrizzando la curva si ottiene la lunghezza di attenuazione delle fibre (cioe` del **core**):

$$\lambda = 319.2 \text{ cm}$$



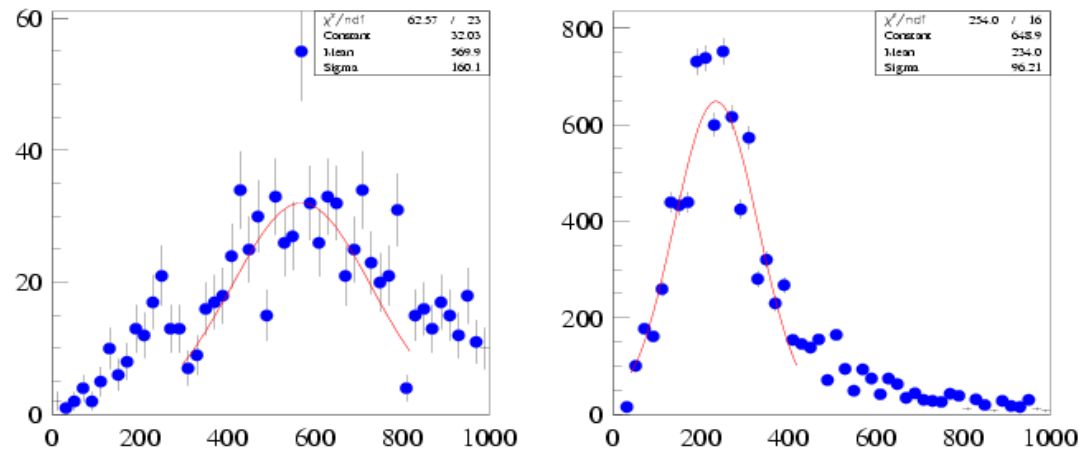
cladding



core

Spettri di carica (con raggi cosmici)

2002/07/01 14.29



Le figure mostrano le distribuzioni di carica (in conteggi di ADC) dei segnali dovuti alle particelle che attraversano una zona del rivelatore di circa 2x5 cm².

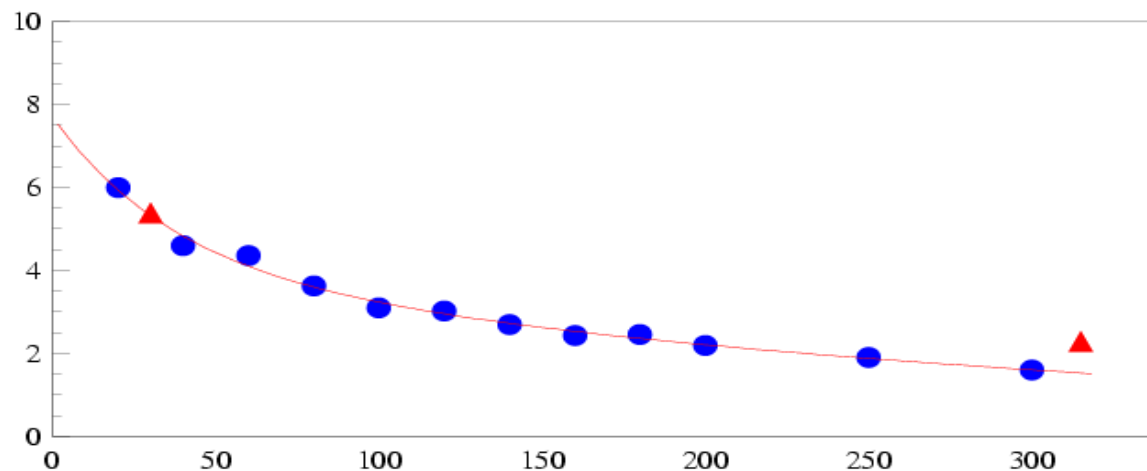
Lo spettro di sinistra e' stato effettuato ad una distanza di 30 cm dal fotocatodo del fotomoltiplicatore PM0. Quello di destra a una distanza di 315 cm da PM0.

I due spettri mostrano due distinte curve gaussiane. Benché l'energia rilasciata dalle particelle sia la stessa nei due casi, il segnale prodotto dal fotomoltiplicatore nel secondo caso e' molto minore (meno della metà) a causa dell'**attenuazione** della luce nella fibra.

Verifica della curva di attenuazione

Abbiamo misurato la posizione del **picco** degli spettri di carica utilizzando l'energia rilasciata dai **raggi cosmici** nel rivelatore. Conoscendo i valori delle distanze dal fotomoltiplicatore PM0 (30 cm e 315 cm), possiamo verificare se queste misure sono in accordo con la curva di attenuazione determinata con la **sorgente**.

La figura qui sotto riporta le posizioni dei picchi con dei triangoli rossi. Notiamo che i due valori di energia misurati alle due distanze considerate seguono l'andamento della curva di attenuazione precedentemente ricavata con la sorgente.



Misura di posizione tramite differenza dei tempi

Per localizzare la **posizione** di attraversamento della particella nelle fibre si misurano i tempi di arrivo della luce sui due fototubi posti alle estremita' del contatore, T_{PM0} e T_{PMi} e la loro differenza Δt .

La velocita' della luce nelle fibre e' nota ($v \sim 17 \text{ cm/ns}$), percio' se L e' la lunghezza totale delle fibre e poniamo la coordinata $z = 0$ al centro del contatore:

$$T_{PM0} = T_0 + (L/2 - z)/v$$

$$T_{PMi} = T_0 + (L/2 + z)/v \quad \text{da cui } z = v \cdot \Delta t/2$$

