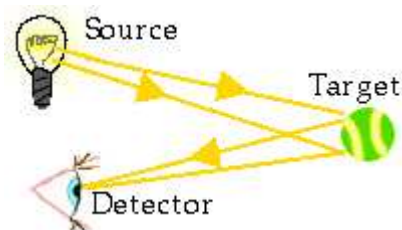


Liceo scientifico Leonardo Da Vinci

## Esplorando la fisica nucleare: i rivelatori di particelle

### • COSA SONO?

Per rivelatori di particelle, si intende quegli strumenti utilizzati per *rivelare, tracciare e identificare* particelle: nel momento in cui vengono colpiti da una particella essi hanno il compito di produrre un segnale osservabile. Per questo sono costituiti generalmente da una parte detta attiva che interagisce effettivamente con la radiazione e da un lettore di segnale che genera l'impulso e lo trasmette all'archivio dati, per misurarne successivamente la pericolosità.



Anche l'occhio umano può essere considerato un rivelatore di particelle. Esso è in grado di osservare i fotoni di cui è composta la luce detta appunto visibile. Se vediamo un oggetto è perché i fotoni rimbalzano su di esso e colpiscono il nostro occhio.

Le particelle, però, non possono essere viste direttamente: solo la loro *interazione con la materia* può essere misurata.

In genere questi rivelatori non indicano solo la presenza o il passaggio di una radiazione, che rimane comunque la funzione principale, ma attraverso una successiva elaborazione delle misure forniscono anche un certo numero di informazioni sull'istante in cui si è verificata l'interazione tra la radiazione e il rivelatore, il percorso della particella, l'energia dei processi di interazione, la velocità, la massa e la quantità di moto delle particelle.

**Essi vengono classificati nel seguente modo, in base a come viene rivelato il passaggio della particella:**

**1) Visualizzatori:** Sono detti anche **camere a tracce**, perché la radiazione che li attraversa lascia una traccia al proprio passaggio. Tale traccia è opportunamente amplificata da alcuni particolari accorgimenti visivi, e può essere osservata direttamente oppure fotografata.

**2) Contatori:** Sono i rivelatori in cui il passaggio della radiazione produce un impulso di corrente elettrica oppure di luce, che mette in azione un dispositivo di conteggio.

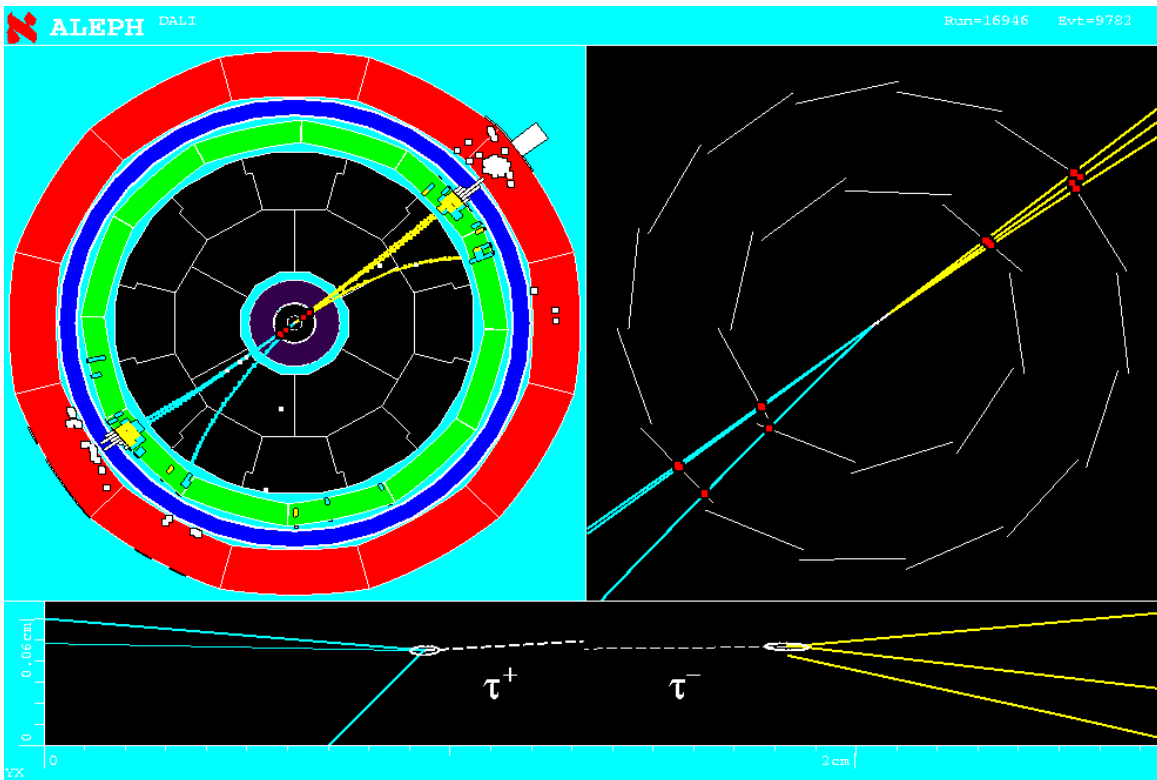
**Le caratteristiche tecniche dei rivelatori di particelle si dividono in tre classi fondamentali:**

**1) Sensibilità:** capacità di produrre un *segnale utile* per un certo tipo di *radiazione e di energia*. Nessun rivelatore può essere sensibile a tutti i tipi di radiazione. Ogni rivelatore è progettato per essere sensibile ad un tipo di radiazione in un certo intervallo di energia.

**2) Risposta:** tipo di segnale utile prodotto. Spesso il segnale prodotto da un rivelatore è un *impulso di corrente* la cui ampiezza è proporzionale all'energia rilasciata dalla particella.

**3) Risoluzione:** differenza minima di una grandezza fisica misurata (es. energia) necessaria perché il rivelatore possa distinguere due misure vicine. Si esprime in termini di *deviazione standard* della distribuzione della grandezza misurata.

**Es.:** Risoluzione spaziale. E' la distanza minima alla quale un rivelatore distingue il passaggio di due particelle.



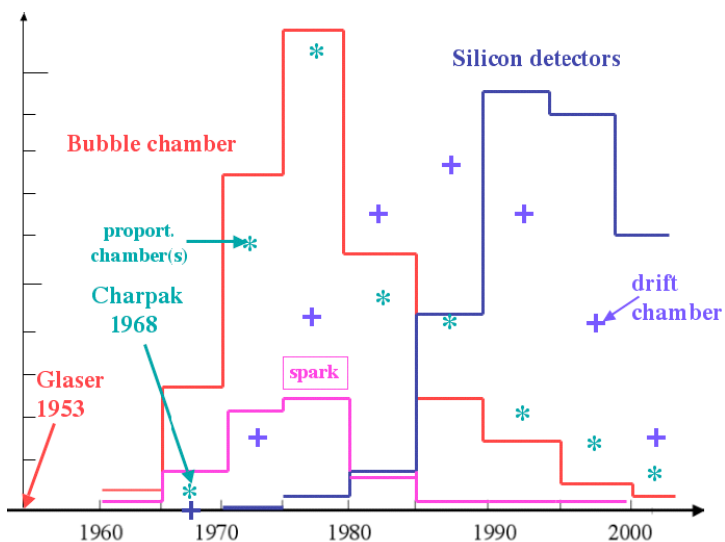
Vita media del tau  $\tau=290 \times 10^{-15}\text{sec} \Rightarrow c\tau= 87 \mu\text{m}$

- **QUALI SONO?**

Esistono svariate tipologie di rivelatori, derivanti dalle due categorie sopra elencate, dalle quali è possibile effettuare una seconda classificazione:

- RIVELATORI A GAS
- RIVELATORI A SCINTILLAZIONE
- RIVELATORI A SEMICONDUZIONE
- LE EMULSIONI NUCLEARI
- I CALORIMETRI
- LE CAMERE A BOLLE
- GLI SPETTROMETRI MAGNETICI

Nel corso del tempo la scienza sperimentale ha messo a punto metodi sempre più precisi per rivelare le particelle, ecco, sinteticamente, l'evoluzione del metodo di rilevazione.



- Le **camere a nebbia** hanno dominato gli anni '50
- Le **camere a bolle** hanno avuto il top negli anni 1960-1985
- Le **camere a fili (MWPC)** hanno dominato dal 1980
- Dall'inizio del 1990 si utilizzano **rivelatori allo stato solido**, dapprima piccoli ora anche molto vasti (CMS ~200 m<sup>2</sup> di Silicio)

Orbene, prenderemo alcune di queste tipologie, o ulteriori loro suddivisioni, e le analizzeremo nello specifico:

## 1. EMULSIONE FOTOGRAFICA (O NUCLEARE)

L'annerimento di lastre fotografiche fu il primo effetto osservato di radiazioni nucleari (Becquerel, 1896).

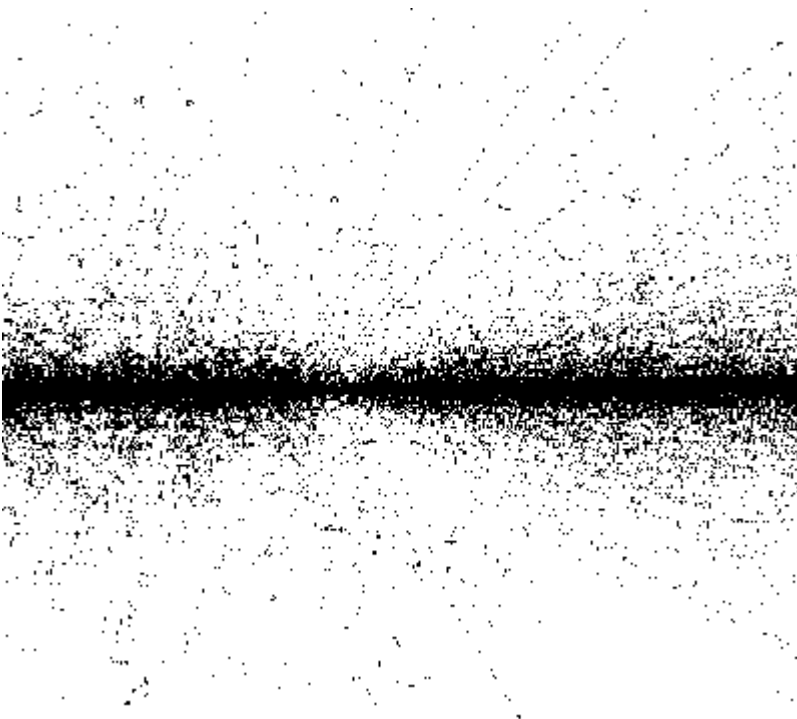
Ancor oggi per la rivelazione di tracce di particelle singole vengono utilizzate particolari emulsioni fotografiche arricchite di bromuro di argento. Quest'ultimo viene impiantato all'interno delle emulsioni, costituite da particolari sostanze gelatinose, in camere oscure e in strette condizioni di temperatura e umidità fino ad ottenere delle lastre.

Per ottenere un tracciamento completo varie lastre possono essere assemblate in configurazioni a sandwich; ad esempio nell'esperimento CHORUS al Cern sono stati utilizzati rivelatori costituiti da 30 lastre fino a costituire una pila di circa 300 kg, che viene esposta per periodi di circa 150 giorni per la rivelazione dei neutrini.

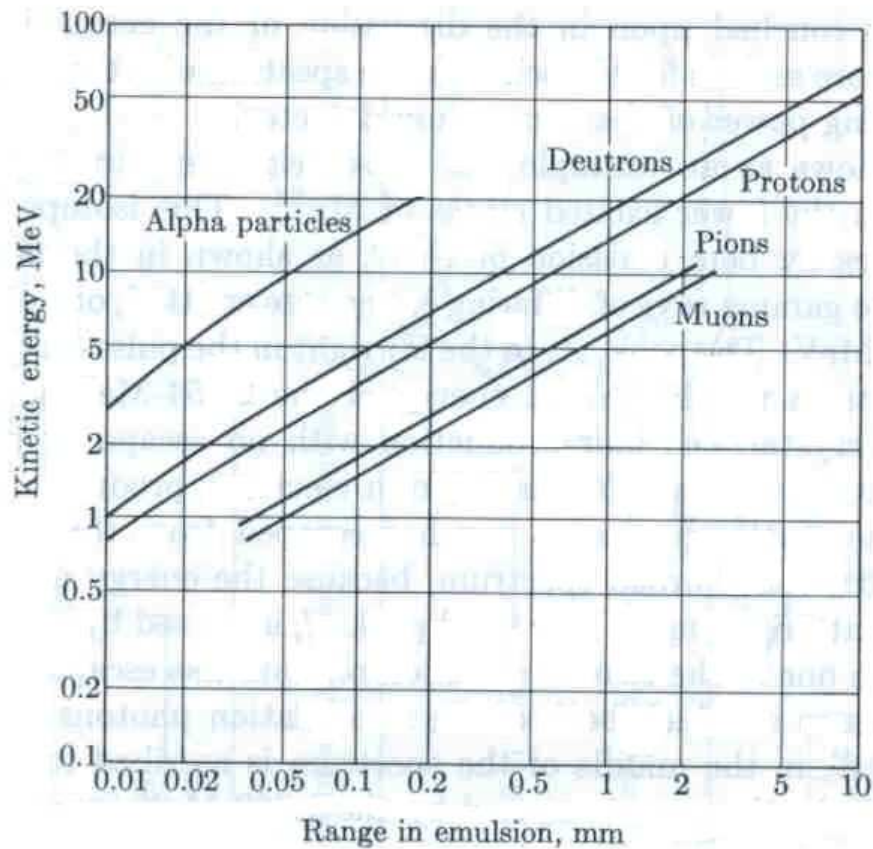
Dopo il periodo di esposizione le pile vengono aperte e le varie lastre sono trattate e sviluppate chimicamente.

Lo sviluppo fotografico trasforma i cristalli eccitati dal passaggio della particella in sfere di argento metallico, con un diametro minore del  $\mu\text{m}$ , e rimuove il bromuro di argento non ionizzato.

I grani di argento, non visibili ad occhio nudo, sono pienamente riflettenti e appaiono come minuscoli punti neri sullo sfondo bianco della luce trasmessa:



Può essere interessante osservare un grafico del range di particelle in una emulsione nucleare:



Il percorso di una particella che attraversa una emulsione fotografica è funzione dell'energia della particella e può essere trovato nelle tavole che danno la relazione percorso-energia.

## 2. CONTATORI GEIGER-MÜLLER

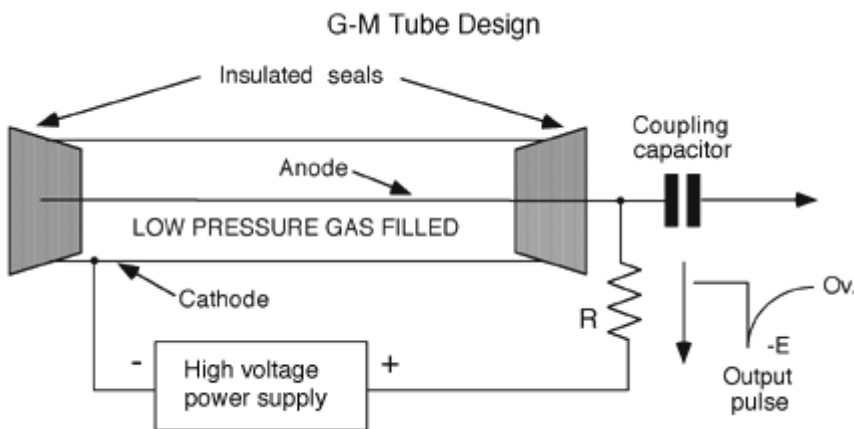
Un contatore Geiger-Müller è composto da un catodo cilindrico di 1-10 cm di diametro con una lunghezza che è da due a dieci volte maggiore. Esso opera nella regione E della curva segnale d'uscita-potenziale in un rivelatore a gas.



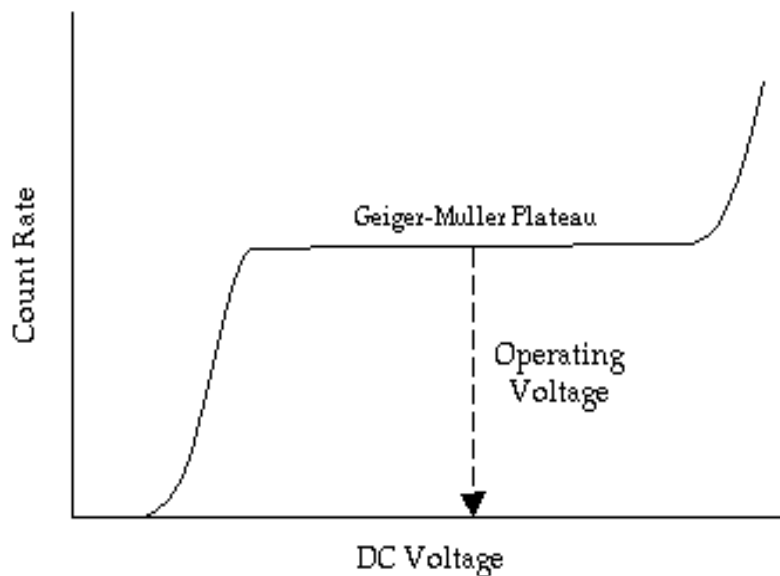
Un esempio di un piccolo contatore Geiger ad uso didattico. Vedi anche delle ulteriori immagini di contatori Geiger

di tipo storico o impiegate in esperimenti didattici.

In questi dispositivi la carica raccolta è indipendente dalla ionizzazione primaria. Infatti oltre alla ionizzazione si hanno fenomeni quali l'eccitazione seguita da emissione di luce visibile e ultravioletta. Una piccola parte di tali fotoni dà luogo ad emissione di fotoelettroni che generano nuova ionizzazione, tramite il processo della moltiplicazione a valanga. Nella regione di funzionamento di un contatore Geiger-Müller basta una sola coppia primaria per dar luogo ad una scarica a valanga completa e, quindi, l'ampiezza dell'impulso in uscita non è più una misura della ionizzazione primaria. Da ciò si comprende che un contatore Geiger può essere utilizzato come contatore di radiazione e non in esperimenti di spettroscopia.



Un grafico ottenuto riportando in ascisse le tensioni applicate, ed in ordinate il numero degli impulsi registrati in un intervallo di tempo T (uguale naturalmente per tutte le misure) si chiama "curva caratteristica del contatore" ed ha l'andamento mostrato nella figura sottostante:



Tale curva presenta una zona lunga centinaia di Volt a piccola pendenza che viene chiamata "plateau" del contatore.

La tensione di lavoro del contatore viene scelta a circa 1/3 di tutto il plateau, in modo che

eventuali variazioni nella tensione di alimentazione  $V$  del contatore non lo portino al di fuori della regione di lavoro; d'altra parte, l'applicazione di una tensione più alta può produrre cariche spurie all'interno del rivelatore.

Impieghi vari:

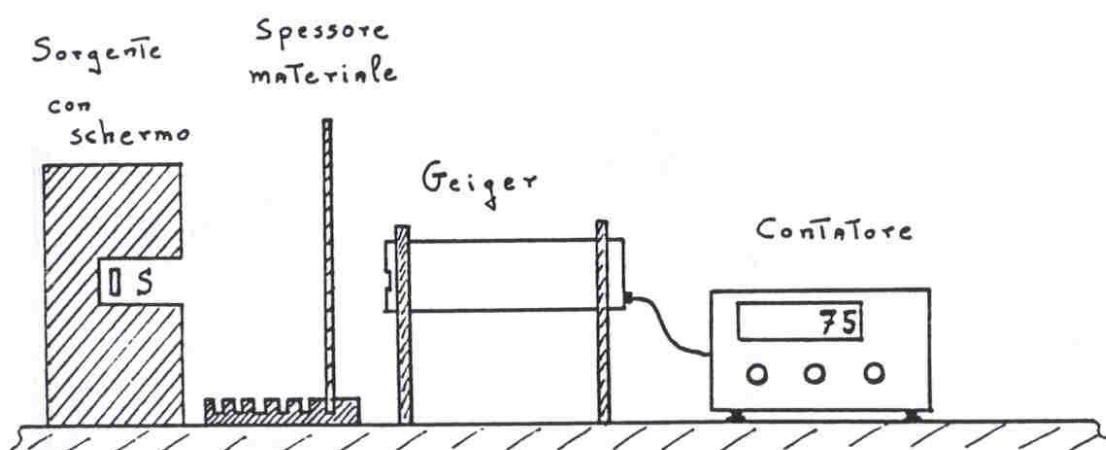
In base alla geometria essi possono funzionare come rivelatori di raggi  $\beta$ ,  $\gamma$  o  $X$ .

I contatori per raggi  $\beta$  devono poter offrire devono un piccolissimo assorbimento agli elettroni e per tale motivo una parte del tubo viene provvista di una finestra ricoperta da un materiale molto sottile, di bassa densità e di resistenza meccanica sufficiente a sopportare la differenza tra pressione interna ed esterna. Solitamente tali finestre sono fatte in mica.

I contatori per raggi  $\gamma$  funzionano a causa della ionizzazione dovuta agli elettroni prodotti per effetto fotoelettrico, per effetto Compton o per creazione di coppie dall'interazione dei raggi  $\gamma$  con le pareti o con il gas di riempimento. A causa della bassa probabilità di interazione con il gas, occorre affidarsi all'interazione con le pareti e utilizzare contatori senza finestra e con spessori notevoli delle pareti metalliche. Con tutto ciò l'efficienza risulta molto bassa.

I contatori per raggi  $X$  sono simili a quelli per raggi  $\beta$ . Infatti poiché i raggi  $X$  sono fotoni con energie più basse dei raggi  $\gamma$ , occorrono contatori con pareti sottili e con finestra di mica, in modo che l'interazione avvenga con le molecole del gas. Generalmente i gas impiegati sono l'argon, il krypton e lo xenon.

I rivelatori Geiger-Müller possono avere anche altri impieghi come ad esempio la misura del coefficiente di assorbimento per raggi  $\alpha$  o  $\beta$  nell'attraversare un mezzo materiale. Ciò può essere ottenuto misurando il numero di conteggi in un tempo fissato in assenza di materiale e vedendo come questo varia interponendo fra sorgente e contatore il materiale di volta in volta con spessori diversi. Una rappresentazione schematica dell'esperimento è data di seguito:





### 3. SPETTROMETRI MAGNETICI

Uno spettrometro magnetico, più che essere un rivelatore in se stesso, sfrutta le proprietà del campo magnetico per deflettere in modo opportuno particelle cariche che devono essere rivelate comunque da altri rivelatori. Sistemi di rivelazione basati su campi magnetici possono avere svariate configurazioni e hanno diverse applicazioni, sia per la misura dell'impulso di una particella, sia per la misura della massa (vedi ad esempio i primi spettrometri di massa), e in generale nei sistemi di tracciamento.

In generale la forza di Lorentz fa sì che le particelle cariche seguano delle traiettorie circolari, o elicoidali, intorno alla direzione del campo. Il raggio di bending della traccia è legato alla intensità del campo magnetico e alla componente perpendicolare dell'impulso. La comprensione delle prestazioni di uno spettrometro magnetico è comunque legata allo studio dell'ottica magnetica e va fatto con opportune tecniche di simulazione.

La forma di uno spettrometro magnetico dipende anche dalla particolare applicazione, se si tratta ad esempio di esperimenti a bersaglio fisso, oppure di esperimenti presso un collider. Anche negli esperimenti di fisica nucleare alle basse energie vengono adoperati spettrometri magnetici, sia per l'identificazione della massa dei nuclei prodotti, che per la misura dell'impulso delle particelle; essi hanno in genere buona risoluzione e angoli solidi (quindi efficienza di rivelazione) piccoli, e fanno uso di opportuni rivelatori di piano focale.

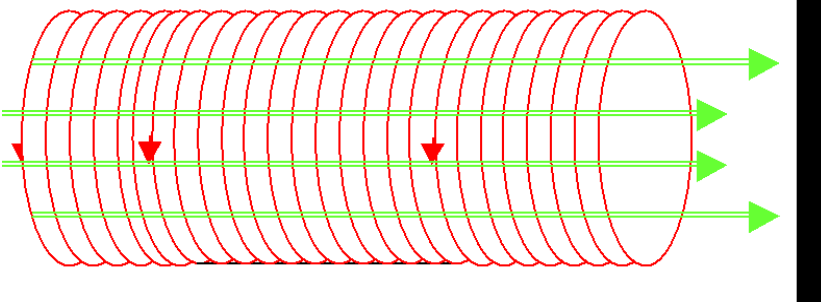




Magnete dell'esperimento CMS:

solenoide superconduttore di niobio-titanio, operato a  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$

Intensità del campo:  $3.8\text{ T}$   
( $\sim 76000$  volte il campo magnetico



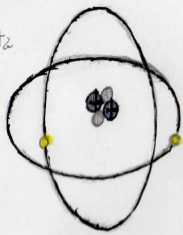
Le frecce verdi indicano il campo magnetico mentre le rosse quello elettrico

## Rivelazione di particelle cariche

$t=0$



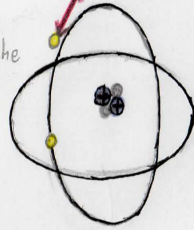
Particella carica di alta energia prodotta da un evento



Atomo del materiale del rivelatore

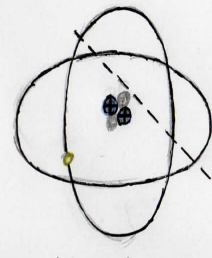
$t=1$

Interazione coulombiana che può espellere un elettrone dall'atomo



$t=2$

La particella perde pochissima energia e la velocità non varia apprezzabilmente



L'atomo viene ionizzato

Elettrone espulso

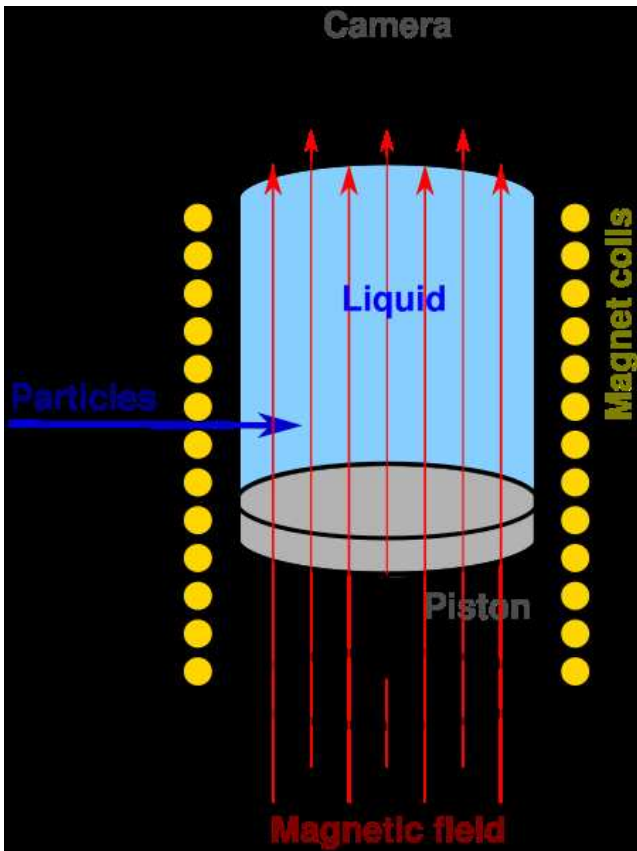
*Luca Loner*

Nel disegno è illustrato il procedimento di rivelazione di particelle cariche di alta energia prodotte da un evento, tramite l'interazione coulombiana che avviene con gli atomi di cui è composto il nucleo. Per poi studiarne il comportamento.

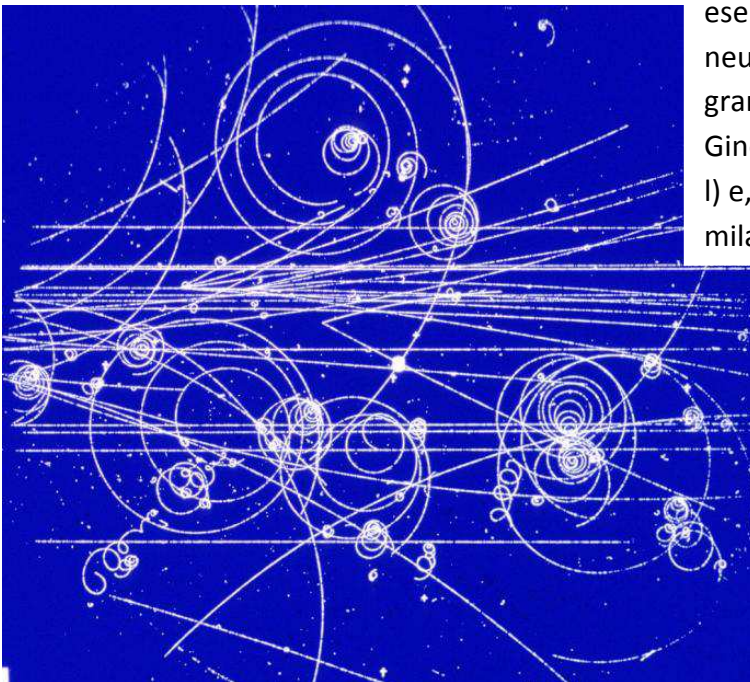
La particella carica ionizza l'atomo in modo tale che espella un elettrone.

## 4. CAMERE A BOLLE

Il disegno che si forma è visibile come dato (ed anche piuttosto bello da guardare)



La camera a bolle è un dispositivo, ideato nel 1952 da D. A. Glaser, per rendere visibile (e quindi fotografabile) il percorso di particelle ionizzanti. Consiste in un contenitore in cui un liquido (spesso idrogeno, ma anche deuterio, elio, etc..) viene mantenuto in condizioni di temperatura e pressione tali da essere appena al di sotto del punto di ebollizione. Diminuendo bruscamente la pressione, il liquido si viene a trovare al di sopra del punto di ebollizione e si sviluppano quindi delle bolle di vapore, che si concentrano per lo più intorno agli ioni prodotti dal passaggio nella camera di una particella carica. Le bollicine rendono così visibile il tragitto della particella, tragitto che può essere anche fotografato. Le camere a bolle a idrogeno liquido costituiscono uno degli strumenti più importanti per lo studio delle reazioni nucleari con protoni e delle interazioni dei protoni con altre particelle, per esempio le interazioni elettrone-protone e neutrone-protone. Tra le camere a bolle più grandi ricordiamo la Gargamelle del Cern di Ginevra (usata dal 1971, con un volume di 12 mila l) e, sempre al Cern, la Bebc (nella foto), di 40 mila l.



## 5. RIVELATORI CHERENKOV



- **Effetto Cherenkov:** L'effetto Cherenkov consiste nell'emissione di radiazione elettromagnetica luminosa di un caratteristico colore azzurro ( in Star Trek, le astronavi, mentre sono a curvatura, viaggiano immerse in un tunnel composto dall'effetto Čerenkov caratterizzato dalla tipica radiazione azzurra), che si propaga con un fronte d'onda conico,



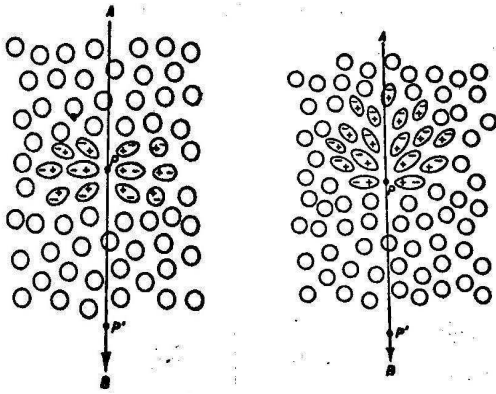
da parte di un materiale le cui molecole sono polarizzate da una particella carica in moto che lo attraversa. Esso si manifesta solo quando la velocità della particella subatomica nel mezzo attraversato risulta superiore alla velocità di fase della luce nello stesso mezzo. Più in generale si parla di radiazione Cherenkov, quando il mezzo attraversato non è "trasparente" alla luce visibile. È così chiamato in

omaggio al fisico sovietico Pavel Alekseevič Čerenkov, che ha ricevuto il premio Nobel per la fisica nel 1958 per studi su questo fenomeno.



Secondo la teoria della relatività, nessuna particella è in grado di raggiungere una velocità superiore a quella della luce nel vuoto ( $c$ ), ma nel caso in cui dovesse attraversare un mezzo denso la velocità di fase della luce risulterebbe più bassa di quella nel vuoto, e in un mezzo con indice di rifrazione  $n$  varrà  $c/n$ . Può avvenire che una particella superi la velocità di fase della luce nel mezzo (pur tuttavia rimanendo al limite pari a  $c$ ). Se tale particella è carica elettricamente si verifica l'effetto Čerenkov, ovvero l'emissione di radiazioni gamma  $\gamma$ .

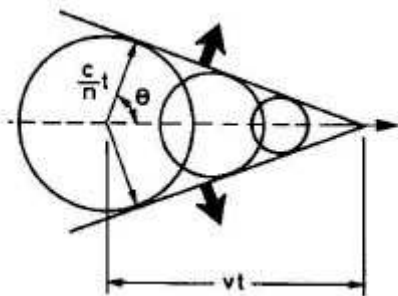
**Polarizzazione del mezzo:**



Se  $v < c/n$ , i dipoli sono disposti simmetricamente intorno al cammino della particella  $\rightarrow$  nessuna radiazione  $\rightarrow$  si verificerà un'emissione di radiazione

Se  $v > c/n$  la simmetria è rotta e si ha momento di dipolo non radiante viene emessa

L'energia spesa dalla particella nel polarizzare gli atomi del mezzo viene restituita dal mezzo nel processo di diseccitazione sotto forma di radiazione coerente. Ciò è dovuto al fatto che la particella carica, lungo la sua traiettoria, induce dei momenti di dipolo temporanei negli atomi o



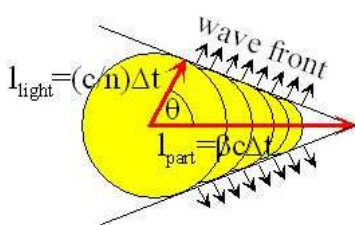
nelle molecole del mezzo. Ritornando alla configurazione iniziale, le molecole producono radiazione elettromagnetica. Se la particella viaggia lentamente, tale perturbazione si rilassa elasticamente e si ha un ritorno all'equilibrio meccanico non appena la particella è passata. Se invece la velocità della particella è sufficientemente elevata rispetto al tempo di risposta del mezzo (e ciò si verifica quando la velocità della particella nel mezzo attraversato risulta superiore alla velocità

della luce nello stesso mezzo) allora l'energia prodotta da questa perturbazione si irradia come un'onda d'urto coerente formando un cono d'onda composto da onde meccaniche.

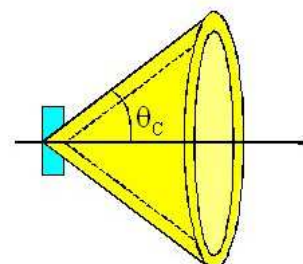
La radiazione Cherenkov è emessa poiché la particella carica polarizza gli atomi lungo la sua traccia così che essi diventano dipoli elettrici. La variazione nel tempo della carica di dipolo porta all'emissione di radiazioni elettromagnetiche.

Prevista dalla teoria di Maxwell, l'esistenza di tali radiazioni fu provata sperimentalmente dal fisico russo Pavel Cherenkov nel 1934.

Il' ja Frank & Igor Tamm calcolarono lo spettro della radiazione e la relazione tra angolo di emissione e indice di rifrazione del mezzo.



$$\cos \theta_C = \frac{1}{n\beta} \text{ with } n = n(\lambda) \geq 1$$



L'angolo tra i fotoni emessi e la traccia della particella carica può essere calcolato tramite le seguenti considerazioni geometriche

$\cos \theta = \frac{1}{n} \cdot \frac{c}{v}$  dove  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo,  $c$  è la velocità della luce nel vuoto (e di conseguenza  $\frac{c}{v}$  la velocità della luce nel mezzo) e  $v$  è la velocità della particella carica.

Per particelle relativistiche, il rapporto tra la velocità della particella  $v$  e la velocità della luce  $c$  è

indicato con  $\beta = \frac{v}{c}$ , e l'angolo di Cherenkov risulta essere:  $\cos \theta = \frac{1}{n \cdot \beta}$

Si può notare che l'angolo massimo si ha quando la particella si muove all'incirca alla velocità  $c$ . In

tal caso, la relazione diventa:  $\cos \theta_{\max} = \frac{1}{n}$

Con l'effetto Cherenkov si costruiscono contatori che segnalano il passaggio di particelle cariche, possono essere:

- A soglia (richiedono un minimo di fotoelettroni, non misurano  $q$ )
- Differenziali (selezionano un piccolo range di angolo Cherenkov)

## Contatore Cherenkov:

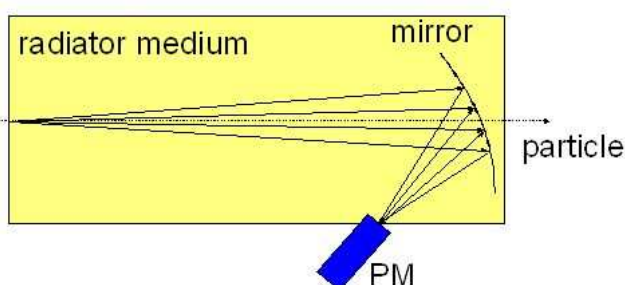
I contatori basati sull'effetto Cherenkov generalmente vengono utilizzati per misurare la velocità  $\beta$  delle particelle cariche come negli esperimenti agli acceleratori, su pallone atmosferico o nello spazio.

Se dal rivelatore Cherenkov otteniamo la velocità della particella secondo la formula:  $v = \beta \cdot c$  e da un'altra parte dell'apparato (ad esempio dalla misura di deflessione in campo magnetico) ne otteniamo l'impulso  $p$  derivante dal prodotto tra massa e velocità ( $p = m \cdot v$ ), il quale, grazie a delle sostituzioni, permette di poter determinare la massa  $m$  riuscendo ad identificare il tipo di particella.

### Componenti rivelatore:

- **Radiatore:** strumento in grado di produrre luce all'attraversamento di particelle cariche di opportuna velocità e di lunghezza  $L$  secondo la legge:  $N_{\text{fotoni}} = N_0 \cdot L \cdot \sin^2 \theta$  dove  $N_{\text{fotoni}}$  è funzione decrescente della lunghezza d'onda della luce emessa
- **Raccolta di luce:** nel caso dei neutrini rende possibile l'individuazione delle tracce dei muoni prodotti nell'interazione neutrino-nucleone
- **Fotorivelatore:** dispositivo in grado di rivelare la radiazione elettromagnetica fornendo in uscita un segnale avente un'intensità di corrente o una differenza di potenziale proporzionale all'intensità della radiazione rilevata

### 5.1) Contatori Cherenkov a soglia:



L'effetto Cherenkov è **a soglia**, solo particelle con velocità superiore al valore definito dall'indice di rifrazione danno un segnale per emissione di luce Cherenkov. Il radiatore viene opportunamente scelto in modo da

discriminare tra particelle relativistiche di uguale impulso e diversa massa.

Si ha emissione di radiazione Cherenkov solo se  $\beta > \frac{1}{n}$

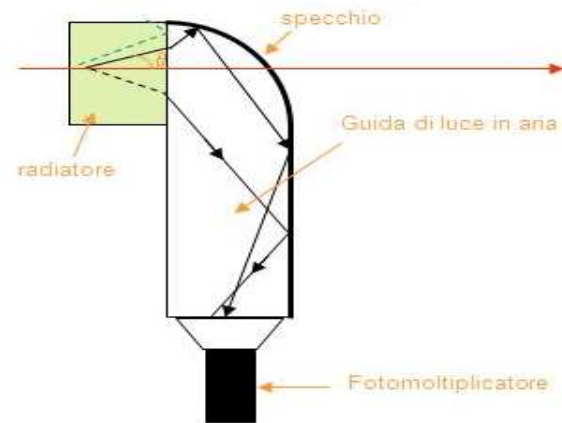
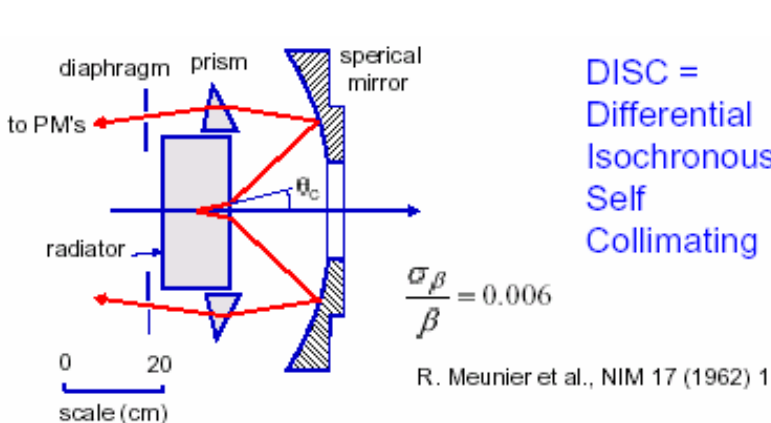
Se consideriamo 2 particelle, in questo caso relativistiche, di masse  $m_1$  ed  $m_2$  e con lo stesso impulso  $p$ . Per distinguerle in un Čerenkov a soglia è necessario che la particella più leggera ( $m_1$ ) emetta luce e l'altra no secondo la formula:

$$\sin^2 \theta = \frac{1}{\gamma^2_2} - \frac{1}{\gamma^2_1} = \frac{m^2_2 \cdot c^4}{p^2 \cdot c^2} - \frac{m^2_1 \cdot c^4}{p^2 \cdot c^2}$$

## 5.2) Contatori Cherenkov Differenziali (Disc):

Tale contatore accetta solo particelle in una finestra di velocità ( $\beta$ ), e poichè tutte le particelle che hanno una velocità  $> \beta_{min} = 1/n$  sono sopra soglia, sappiamo che al crescere di  $\beta$  aumenta l'angolo di Čerenkov fino a raggiungere l'angolo di riflessione totale per cui la luce non entra nella guida di luce.

L'angolo di riflessione totale può essere calcolato dalla legge di



Snell ( $\sin \theta = \frac{1}{n}$ ) e siccome  $\cos$

$$\theta = \frac{1}{n \cdot \beta} \rightarrow \beta_{max} = \frac{1}{\sqrt{(n^2 - 1)}}$$

Dunque la definizione del rivelatore definisce un intervallo angolare preciso per accettare la luce Cherenkov emessa, ovvero l'angolo di emissione della luce dipende da  $\beta$ , e se la direzione della particella in esame è nota è possibile selezionare particelle di un determinato tipo: realizzare cioè

un contatore differenziale in cui l'efficienza è data da  $\frac{\Delta \beta}{\beta} = \tan \vartheta \cdot \Delta \vartheta \sim \frac{\Delta \beta}{\beta} \sim 10^{-7}$

Esso funziona solo per particelle perpendicolari all'asse ottico poichè si utilizza il foccheggiamento ottico della luce e delle fenditure per selezionare la luce emessa ad un determinato angolo. Con tale rivelatore si può selezionare, in un fascio monoimpulsivo, un certo tipo di particella, come i mesoni  $\pi^0$ , variando la pressione del gas nel contatore e quindi il suo indice di rifrazione.

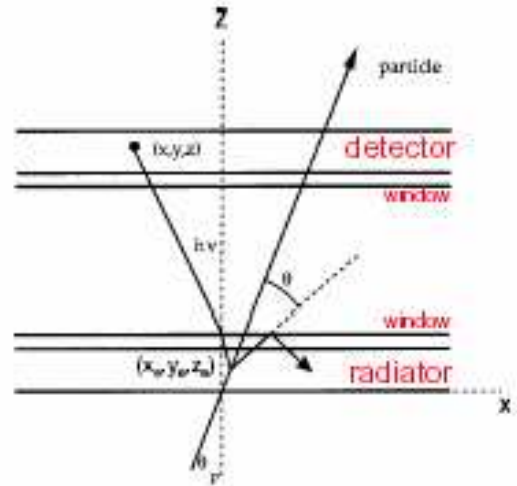
### 5.3 Contatori Cherenkov Rich (Ring Imaging Cherenkov Counter):

I Rich individuano l'ampiezza dell'angolo  $\theta$  intersecando il cono di luce Cherenkov con un piano fotosensibile e sfruttando tale angolo misurano la

velocità delle particelle tramite la formula :  $\cos \theta = \frac{c}{n \cdot v}$   
 mentre uno specchio sferico di lunghezza focale  $f$ ,  
 proietta i fotoni su una circonferenza di raggio  $r = f \theta$   
 $\theta$  indipendente dalla posizione

La determinazione di  $\theta$  richiede:

- $x, y, z$  del fotone
- $x_e, y_e, z_e$  punto di emissione del fotone
- direzione della particella  $\theta_p, \phi_p$



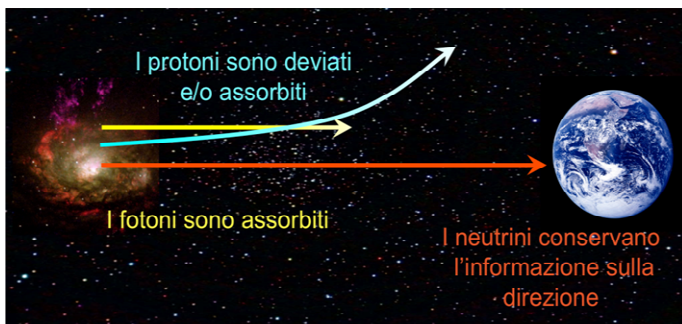
#### • I contatori Cherenkov si usano in:

- Esperimenti sui raggi cosmici (la radiazione Cherenkov delle coppie elettrone positrone prodotte dall'interazione di raggi gamma o raggi cosmici ultraenergetici con l'atmosfera permette di determinarne l'energia)
- Esperimenti di fisica delle alte energie (identificazione delle particelle prodotte da un'interazione grazie alla soglia di produzione di radiazione Cherenkov)

Più precisamente il rilevamento di radiazione Cherenkov è oggi sfruttato nell'astronomia delle

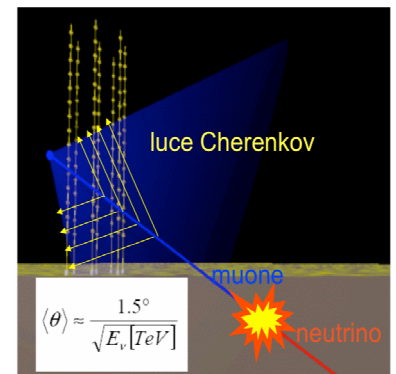
sorgenti gamma e negli esperimenti condotti sui neutrini, rilevando ad esempio i muoni prodotti in acqua, i quali, essendo negativamente carichi, e viaggiando a una velocità superiore a quella di propagazione della luce in acqua, danno luogo all'effetto Cherenkov.

La presenza di neutrini di alta energia nella componente cosmica primaria è sostenuta da numerosi modelli.





I neutrini, privi di carica elettrica e debolmente interagenti con la materia, si propagano nell'Universo senza essere deviati dai campi magnetici e senza essere assorbiti. A differenza di fotoni e protoni, i neutrini conservano l'informazione sulla direzione di provenienza, estendendo l'orizzonte di osservabilità degli eventi e costituendo una valida sonda per l'esplorazione dell'Universo e un importante strumento per lo studio della Cosmologia e della Fisica delle Particelle. Il piccolo valore della sezione d'urto dei neutrini e il piccolo valore del flusso di eventi attesi richiedono l'utilizzo di un volume di rivelazione molto esteso, realizzabile solo sfruttando risorse naturalmente disponibili, quali l'acqua degli oceani o il ghiaccio delle calotte polari. La tecnica di rivelazione adottata è la tecnica Cherenkov. Nella pratica sperimentale, la luce è raccolta per mezzo di dispositivi fotomoltiplicatori (PMT). I telescopi Cherenkov per neutrini sono realizzati, sia in acqua che in ghiaccio, come un reticolo di PMT.



La conoscenza della posizione di ciascun modulo ottico (geometria del rivelatore) è essenziale per l'efficienza degli algoritmi di ricostruzione di tracce. Occorre, inoltre, separare il segnale del fondo, dovuto sia a cause ambientali, sia a tracce non associabili ad eventi di neutrino (neutrino-candidates). Negli apparati sottomarini, il fondo ambientale è costituito dalla radioattività naturale (decadimento del  $^{40}\text{K}$ ) e da fenomeni di bioluminescenza. Le tracce di segnale sono "up-going", cioè provenienti dal basso; le tracce di fondo sono neutrini e muoni atmosferici, prodotti nelle interazioni dei raggi cosmici primari con l'atmosfera. I muoni atmosferici provengono dall'alto ("down-going") e si distinguono selezionando nella ricostruzione le sole tracce "up-going". La massa d'acqua sopra l'apparato ha la funzione di schermo, riducendo gli eventi di fondo. I neutrini atmosferici sono invece "up-going" e la distinzione tra il fondo atmosferico e il segnale astrofisico richiede, in questo caso, un'analisi più approfondita, che include l'individuazione della direzione di provenienza delle tracce (ricerca di sorgenti puntiformi) e la stima dell'energia degli eventi. Inoltre alcuni rivelatori sotterra (come il rivelatore Super-Kamiokande), il quale ha fornito fondamentali risultati sulla fisica delle oscillazioni dei neutrini atmosferici e solari) ad acqua sono utilizzati come contatori Cherenkov per individuare eventuali prodotti di decadimento di un possibile decadimento del protone.

- **Curiosità:** In *Star Trek*, le astronavi, mentre sono a curvatura, viaggiano immerse in un tunnel composto dall'effetto Čerenkov caratterizzato dalla tipica radiazione azzurra

La propulsione a curvatura è un tipo di propulsione che permette alle navi stellari dell'universo fantascientifico di *Star Trek* di viaggiare a velocità superluminali, cioè superiori alla velocità della luce.

## 6. RIVELATORI AL SILICIO

I rivelatori al silicio come suggerito dal nome stesso usano un sottile strato di Silicio come elemento attivo.

Il Silicio viene ionizzato dalle particelle cariche, che creano coppie elettrone(e) lacuna(h) (Ionizzazione primaria).

In presenza di campo elettrico gli elettroni viaggiano verso l'anodo e le lacune verso il catodo, producendo un segnale elettrico.

A differenza dei rivelatori a gas non c'è né Ionizzazione Secondaria né Moltiplicazione a Valanga.

Comparati con gli altri materiali, i semiconduttori godono di proprietà uniche, che li hanno resi molto adatti all'utilizzo per la rivelazione di radiazione ionizzante. Paragonando i semiconduttori ai più comuni rivelatori di particelle, che sono basati sull'utilizzo di gas ionizzato, è possibile apprezzare ancora di più i vantaggi dati dall'utilizzo di tale strumentazione nella struttura dei rivelatori. Ecco di seguito ricordate alcune proprietà fondamentali di tali materiali.

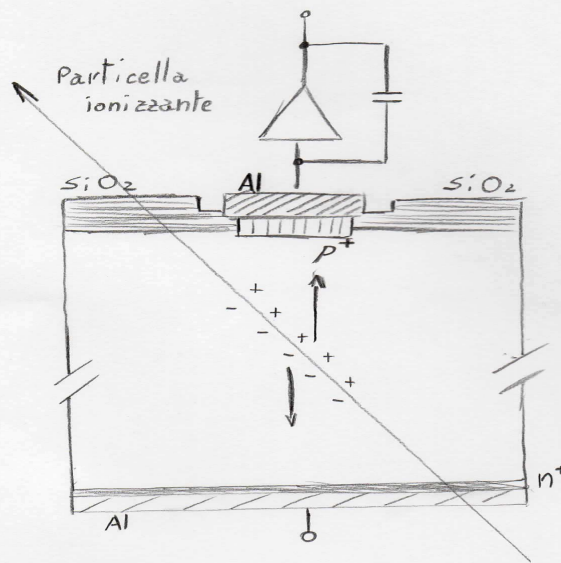
Il piccolo valore dell'energia di gap fa silicio che vi sia un notevole numero di coppie elettrone-lacuna per ogni unità di energia persa dalla radiazione all'interno del semiconduttore, infatti il valore medio dell'energia necessaria per la creazione di una coppia elettrone-lacuna ad esempio nel silicio è di circa 3.6 eV, ed è circa un ordine di grandezza più piccolo di quello di un gas, che è circa 30 eV. La notevole densità dei semiconduttori, (2.33 g/cm<sup>3</sup>), comporta, nel passaggio della radiazione, una notevole perdita di energia per unità di lunghezza attraversata, quindi è possibile costruire dei rivelatori molto sottili, che producono ugualmente un segnale sufficiente per essere raccolto ed analizzato. Infine, una prerogativa unica dei semiconduttori è la possibilità di creare al loro interno degli spazi di carica fissi, drogando il semiconduttore stesso con impurità specifiche.

L'interazione della radiazione con i materiali semiconduttori genera come visto una serie di coppie elettrone-lacuna che fornisce il segnale da analizzare. L'energia persa durante il passaggio della radiazione viene però convertita solo in parte in tale processo di creazione di coppie, dal momento che una parte diventa fononi, i quanti del campo vibrazionale all'interno di un solido, e perciò questa parte viene praticamente persa in energia termica.

La frazione di energia convertita in coppie elettrone-lacuna è una proprietà intrinseca del materiale che dipende solamente in piccola parte dall'energia della radiazione incidente.

La relazione che mi permette di collegare il valore medio del segnale con l'energia assorbita dal rivelatore risulta

$$N = E/e$$



*Substrato base*

dove  $N$  è appunto il valor medi del segnale,  $E$  è l'energia assorbita dal detector ed è l'energia necessaria per la creazione di una coppia elettrone-lacuna. Al valore di  $N$  si può associare una varianza.

Per esempio  $F$  è il fattore di Fano, fattore che tiene conto dell'energia che non viene convertita in informazione rilevabile all'interno del semiconduttore.

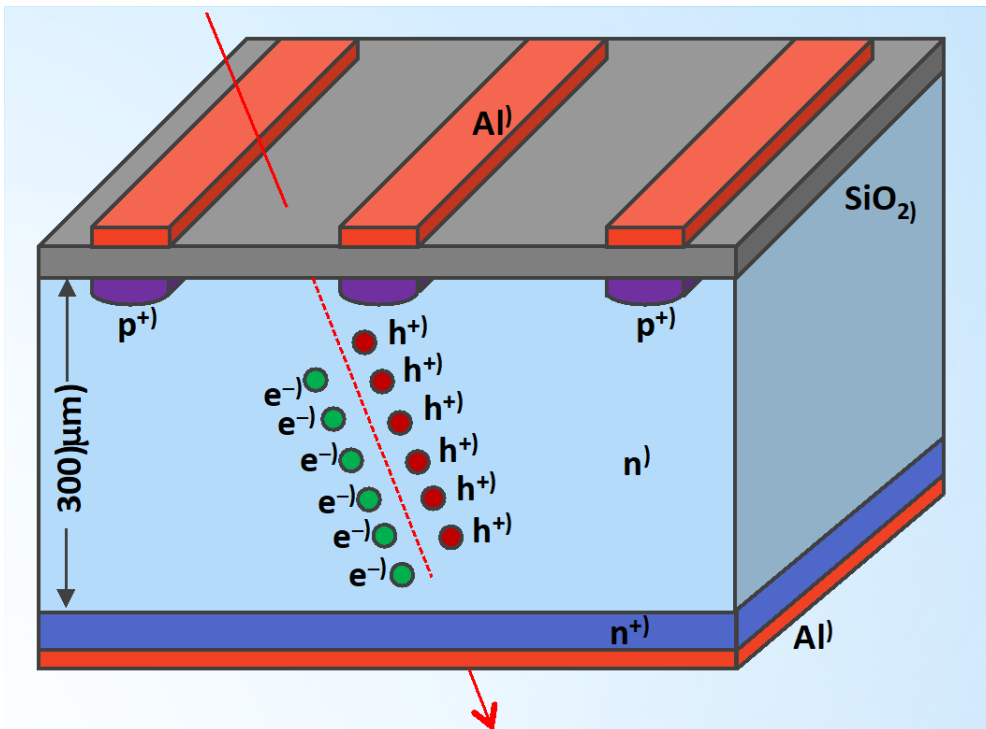
Dopo aver analizzato le principali caratteristiche di questi materiali si può pensare nuovamente alla giunzione p-n, che risulta essere uno strumento adatto al rivelamento di radiazione ionizzante.

Una giunzione p-n può essere utilizzata sia senza alcuna tensione applicata agli estremi, sia in polarizzazione inversa. Quest'ultima configurazione permette di avere a disposizione una più ampia zona svuotata da cariche, che è il volume attivo del rivelatore, disponendo quindi di un volume utile maggiore. I più comuni rivelatori in silicio sono basati sull'utilizzo di un substrato di tipo n, facilmente reperibile nell'industria poichè molto utilizzato in elettronica.

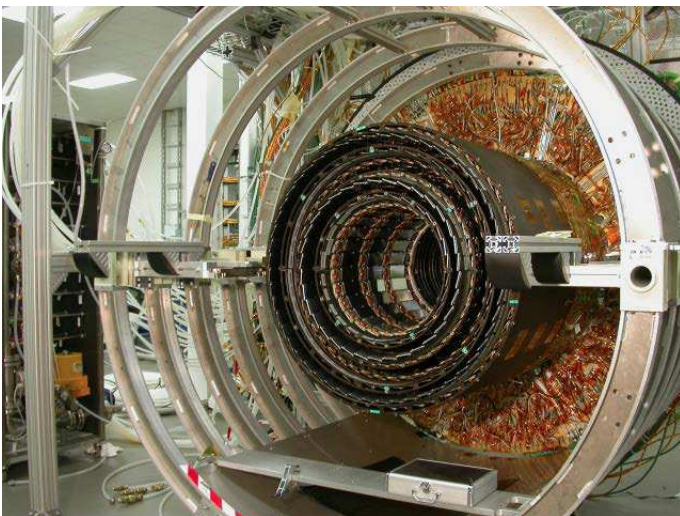
Il diodo consiste di un substrato di tipo n, che nel bulk risulta essere poco drogato, mentre nella parte inferiore n+ in quella superiore p+ è pesantemente drogato.

Lo scopo dell'impianto n+ è sia quello di fornire un buon contatto ohmico fra l'alluminio ed il substrato che quello di garantire un buon svuotamento del substrato stesso. Si definisce contatto ohmico un elettrodo non rettificante, a differenza del diodo, nel quale

le cariche di entrambi i segni possono passare liberamente.  
 Nella giunzione, in assenza di radiazione incidente, scorre solo la piccola corrente di leakage provocata dagli elettroni e dalle lacune generati termicamente, ma il passaggio di radiazione ionizzante rilascia una quantità di energia che va a generare il segnale da raccogliere. Le coppie elettrone-lacuna vengono separate dal campo elettrico e derivate verso gli impianti sul bordo: gli elettroni derivano verso l'impianto n+, mentre le lacune verso quello p+. Una struttura di questo tipo è adatta per il rivelamento dell'energia della radiazione incidente, mentre se si desidera rivelare sia l'energia che la posizione della particella si deve sviluppare un sistema più sofisticato di detector, come le microstrip.



Sono rivelatori ad altissima risoluzione spaziale ( $50\mu\text{m}$ ) usati spesso come *rivelatori di vertice*, in zone molto vicine al punto di collisione dei fasci di particelle.



Volume cilindrico di 1.3 m di raggio:

3 piani di "pixel" (celle di  $100 \times 150 \mu\text{m}$ )

10 piani di "strip" (strisce da  $80 \mu\text{m} \times 10 \text{ cm}$  a  $180 \mu\text{m} \times 25 \text{ cm}$ )

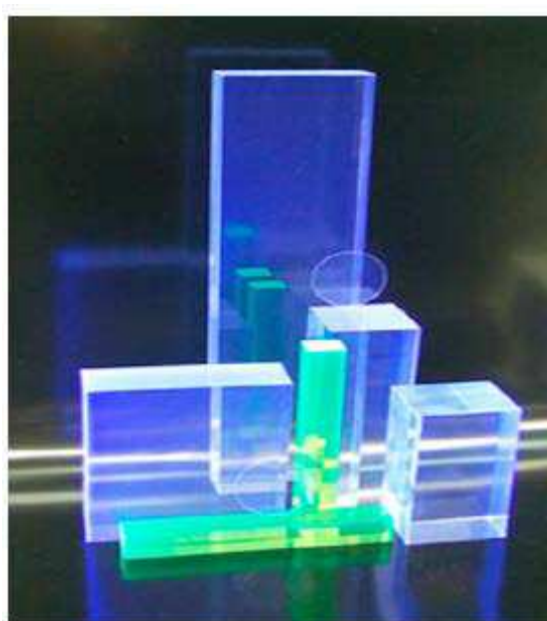
75 milioni di canali di lettura

## 7. RIVELATORI A SCINTILLAZIONE

I rivelatori a scintillazione usano come elemento attivo dei materiali che hanno la proprietà di emettere luce visibile quando sono attraversati da particelle cariche.

Il fenomeno di Scintillazione è causato dalla eccitazione e successiva diseccitazione degli atomi dei materiali scintillanti, che possono essere cristalli o materiali plastici, e vengono utilizzati principalmente nei calorimetri. Il materiale utilizzato deve risultare trasparente alla radiazione emessa.

Negli scintillatori plastici il materiale è più facile da lavorare ed ha delle buone prestazioni, ma tempi leggermente più lunghi.



Un calorimetro è un rivelatore di particelle che misura l'energia di una particella.

La particella interagendo con il calorimetro crea uno sciame e viene completamente assorbita

Il segnale prodotto è proporzionale all'energia della particella:  $S = kE$

**Esistono 2 tipi di calorimetri:**

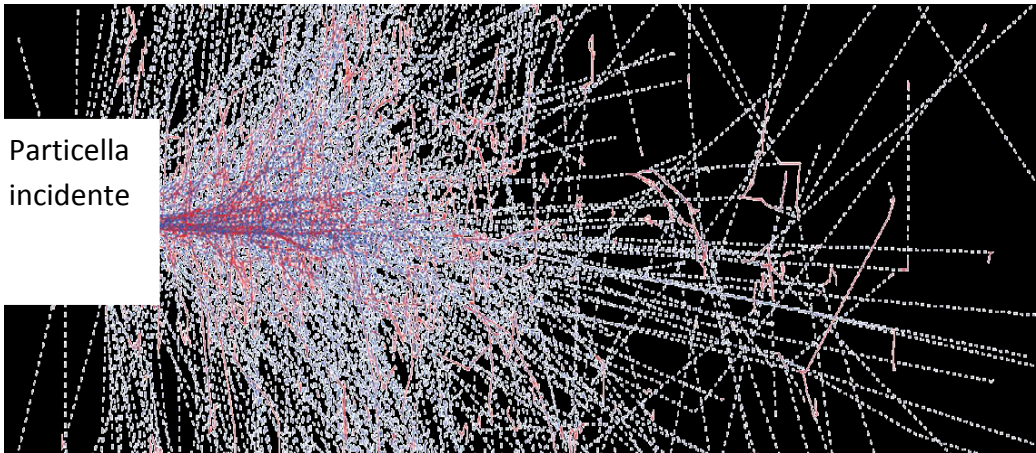
**Calorimetri Elettromagnetici** (rivelazione di elettroni, positroni e fotoni)

**Calorimetri Adronici:**

Sono **adroni** le particelle formate da quark e gluoni, come  $n$ ,  $p$ ,  $\pi$ ,  $k$ ...

- Gli adroni ( $n$ ,  $p$ ,  $\pi$ ,  $k$ ) interagiscono con i nuclei del materiale che attraversano, quindi sciami più complessi di quelli elettromagnetici: più larghi, con componente elettromagnetica,...

• **Calorimetro a campionamento:** strati di materiale denso (ottone e ferro in CMS) che sviluppa e assorbe lo sciame (assorbitore) alternati a strati di scintillatore plastico per rivelare i secondari e misurare energia primaria

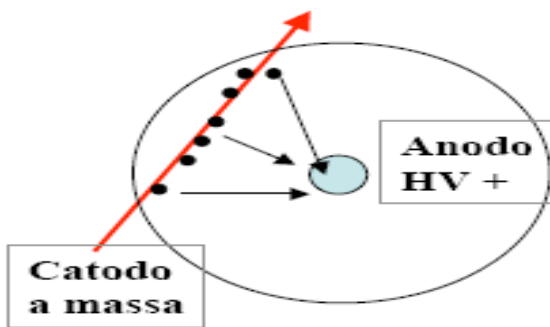


## 8. RIVELATORI A GAS

Questi rivelatori usano un gas come elemento attivo.

Il gas viene ionizzato dalle particelle cariche, che creano coppie elettrone (e<sup>-</sup>) ione (X<sup>+</sup>) (Ionizzazione primaria).

Gli e<sup>-</sup> emessi ( $\delta$ -rays) vengono accelerati applicando un campo elettrico e possono produrre a loro volta Ionizzazione Secondaria innescando una Moltiplicazione a Valanga



La ionizzazione è utilizzata principalmente nei rivelatori traccianti

Un tipico rivelatore a ionizzazione è costituito da un cilindro riempito di gas con al centro un filo metallico posto ad alta tensione (HV  $\approx$  3000V)

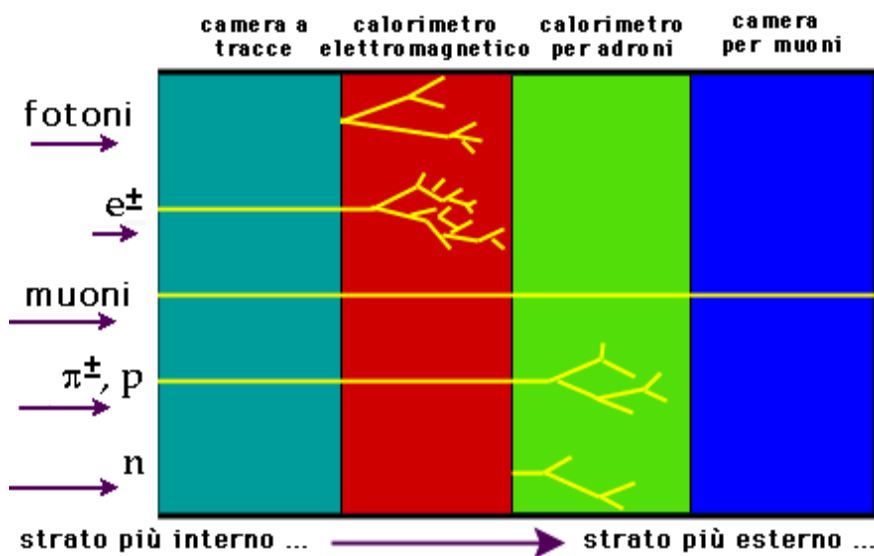
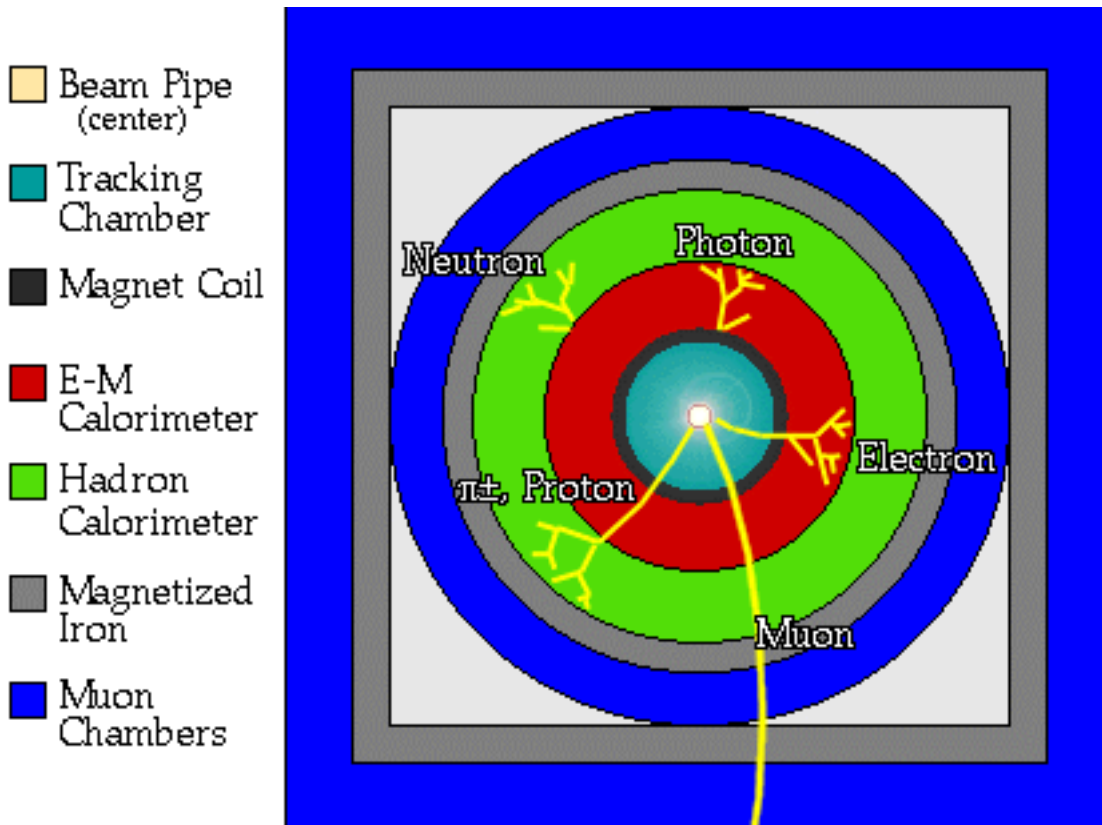
## 9. RIVELATORI AL COLLIDER

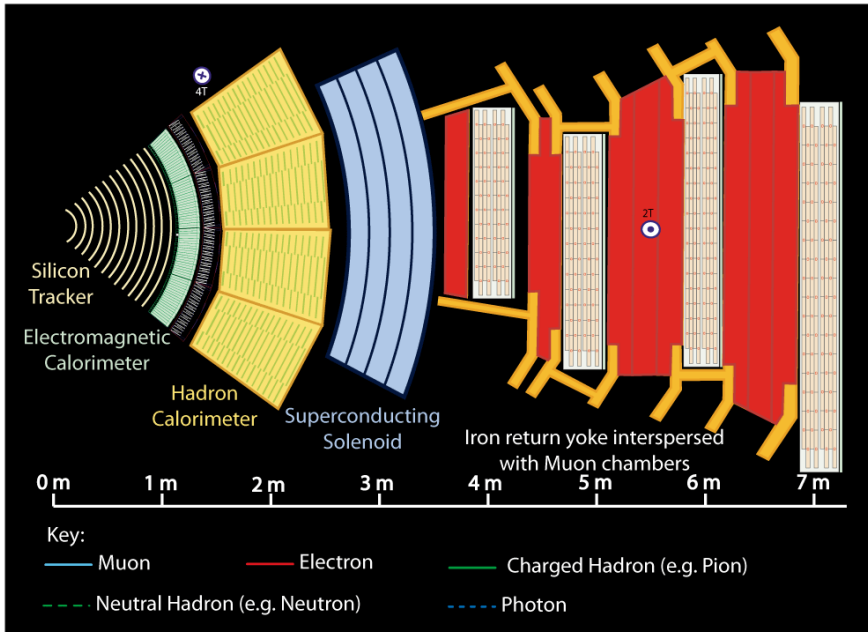
La struttura è composta da tanti strati cilindrici dal centro verso l'esterno:

- Tracciatore per ricostruire la traiettoria delle particelle cariche
- Calorimetro elettromagnetico per assorbire e misurare energie di elettroni e fotoni
- Calorimetro adronico per assorbire e misurare energie di adroni (n, p, ...)



- Rivelatori di muoni (tracciatore esterno)
- Campo magnetico per deviare particelle cariche e misurarne quantità di moto





• **ANALISI DEI DATI RACCOLTI:**

Molti rivelatori hanno un problema: estrarre informazioni da un segnale elettrico analogico.

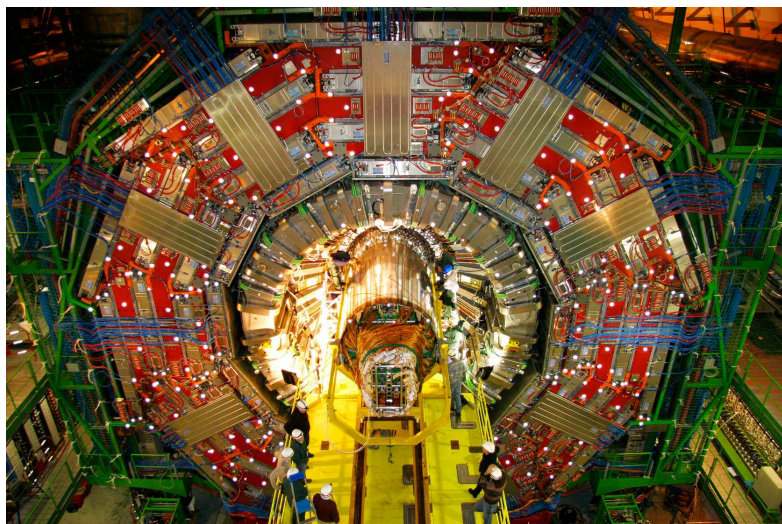
Vantaggi dell' informazione digitale:

- facile da trasportare (non sidegrada durante la trasmissione)
- facile da manipolare
- adatta a essere immagazzinata e distribuita

Si tratta di determinare:

- E' passata una particella? (sì/no, 1 bit)
- Quando?
- Di che energia?

Queste informazioni fornite dal rivelatore sono poi immagazzinate in grandi strutture di raccolta dati, da LHC per esempio sono generati 15 milioni di Gb ogni anno.





- **Lasciamo in seguito i link dei vari siti che ci hanno permesso di realizzare la nostra relazione:**

[www.phys.uniroma1.it](http://www.phys.uniroma1.it)

[www.focus.it](http://www.focus.it)

[www.treccani.it](http://www.treccani.it)

[www.tesionline.it](http://www.tesionline.it)

[www.arpg-serv.ing2.uniroma1.it](http://www.arpg-serv.ing2.uniroma1.it)

[www.fmboschetto.it](http://www.fmboschetto.it)

[www.fisica.unipg.it](http://www.fisica.unipg.it)

[www.roma1.infn.it](http://www.roma1.infn.it)

Orbene il nostro lavoro di relazione si conclude qui, speriamo sia piaciuto e che sia risultato abbastanza esaudiente per una buona conoscenza dei **rivelatori di particelle!**