



Piano Lauree Scientifiche
per la Scienza dei Materiali



SCALA

eSperimenti di fisiCA in Laboratorio

I Rivelatori di Particelle

Silvia Miozzi
INFN Roma Tor Vergata

25 febbraio 2020

RIVELATORI DI PARTICELLE

- Quando una particella attraversa un mezzo rilascia una certa dose di energia o di impulso per la cosiddetta **Interazione Radiazione-Materia**
- I rivelatori di particelle sono strumenti che producono un *segnale osservabile* quando il loro ***elemento attivo*** viene colpito dalla radiazione.
- Il segnale può essere direttamente osservabile oppure può necessitare di un'ulteriore elaborazione da parte di un sistema di lettura

Come si vedono le particelle?

- Quando la radiazione (particelle cariche o fotoni) passa attraverso la materia interagisce con :
 - L'intero atomo
 - Gli elettroni
 - Il nucleo
 - I nucleoni (protoni, neutroni)
- I due processi principali sono
 - Perdita di energia da parte della particella (assorbimento)
 - Deflessione della particella incidente dalla traiettoria iniziale (scattering)

Caratteristiche dei rivelatori

- **Sensibilità:** capacità di produrre un *segnale utile* per un certo tipo di *radiazione e di energia*.
- **Risposta:** tipo di segnale prodotto. Spesso è un *impulso di corrente* la cui ampiezza è proporzionale all'energia rilasciata dalla particella
- **Risoluzione:** capacità di distinzione tra due misure vicine di una grandezza fisica misurata
- **Efficienza:** frazione di particelle rivelate rispetto a quelle incidenti
- **Tempo morto:** tempo necessario al rivelatore per essere di nuovo attivo dopo la rivelazione di una particella e la formazione del segnale

Confronto tra occhio umano e rivelatore di Rutherford

Rivelatore	Occhio umano	Schermo al fluoro
Sensibilità	Fotoni (~ 1 eV)	Alfa (~ 1 MeV)
Risposta	Impulso elettrico	Variazione cromatica
Risoluzione Spaziale	$\sim 100 \mu\text{m}$	~ 1 mm
Efficienza	$\sim 100\%$	$\sim 100\%$
Tempo Morto	0.1 s – 1 s	∞

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.

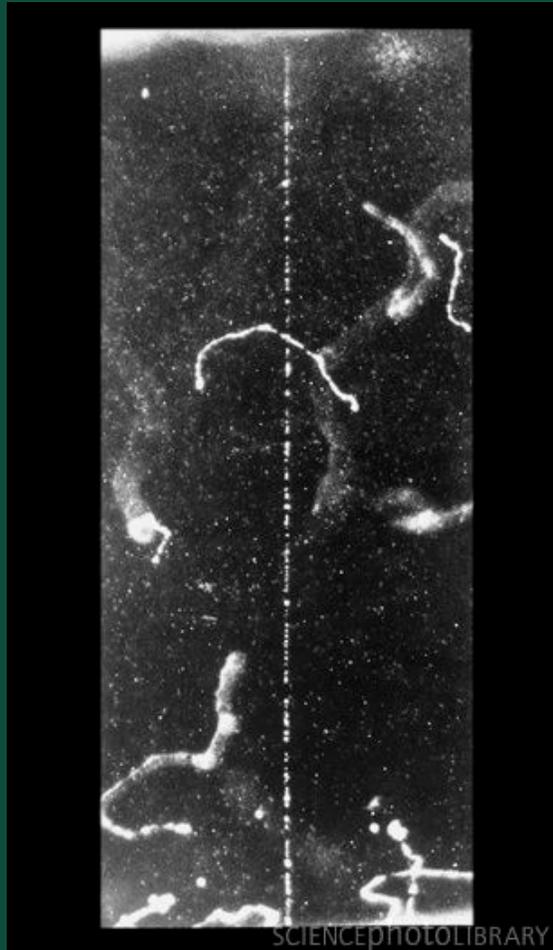
Quali particelle vede un rivelatore?

- Ogni tipo di particella di cui andiamo alla ricerca prima o poi decade in elettroni, fotoni, muoni, un qualche tipo di adrone, neutrini, o nelle loro antiparticelle
- Lo scopo primario di un rivelatore di particelle è quello di riconoscere queste particelle stabili (o stabili per un tempo sufficiente), che chiameremo prodotti di decadimento e di misurarne le proprietà (**carica, energia, impulso**)
- Con un processo di estrapolazione (l'analisi dei dati vera e propria) si cercherà di risalire in un secondo momento a quale possa essere la particella iniziale partendo dalle caratteristiche dei suoi prodotti di decadimento (**leggi di conservazione**)

Interazione radiazione- materia

- Solamente 7 particelle sono direttamente rivelabili
 - **Particelle stabili:**
 - **Protoni, Neutroni, Elettroni, Fotoni**
 - **Particelle con vita media $> 10^{-10}$ s:**
 - **Pioni, Kaoni, Muoni**
 - Le altre particelle (con $\tau < 10^{-10}$ s) sono riconoscibili attraverso la rivelazione dei loro prodotti di decadimento
 - **I Neutrini sono stabili ma non sono facilmente rivelabili**

Camera a nebbia

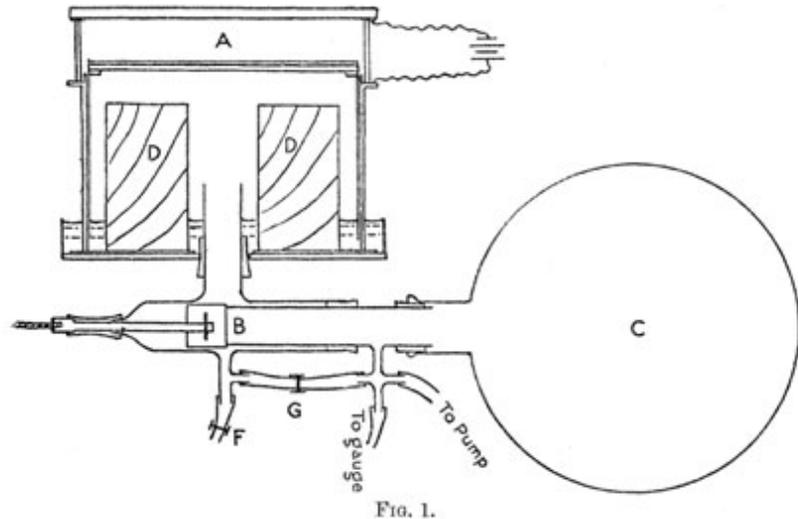


Charles Wilson (1911)



Funzionamento della camera a nebbia di Wilson

p_A = pressione atmosferica
 $p_c \ll p_A$



gas saturo di vapori di una miscela di acqua ed alcool etilico

Nel 1911 Charles Wilson costruisce un dispositivo, che chiamerà cloud chamber per studiare la formazione delle nubi e la conduttività dell'aria in laboratorio

Un rapido spostamento dello stantuffo provoca nella camera un'espansione adiabatica del vapore che passa allo stato instabile di soprassaturazione.

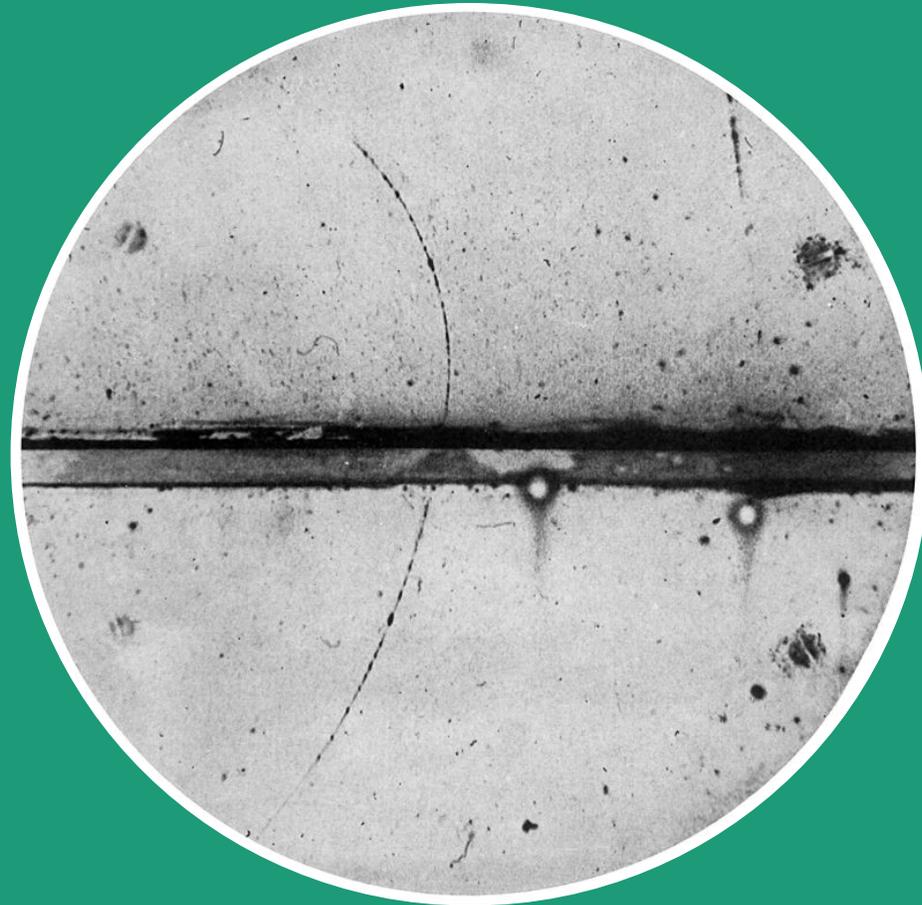
Se una particella elementare carica elettricamente penetra nella scatola ionizza gli atomi con i quali si scontra lungo il proprio tragitto

Inizia il processo di condensazione:

Si crea un fitto susseguirsi di nuclei di condensazione (atomi ionizzati), attorno ai quali il vapore soprassaturo si raccoglie a formare minuscole goccioline

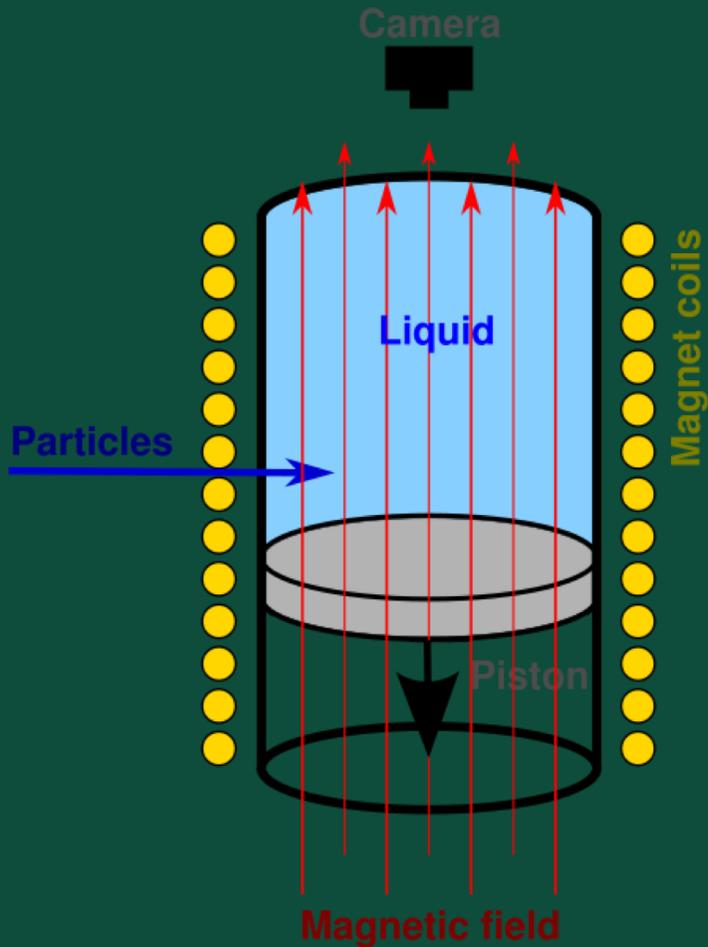
Carl Anderson (1932)

Scoperta del
positrone

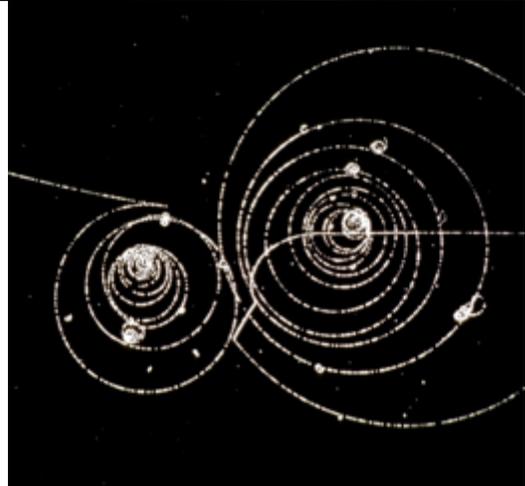
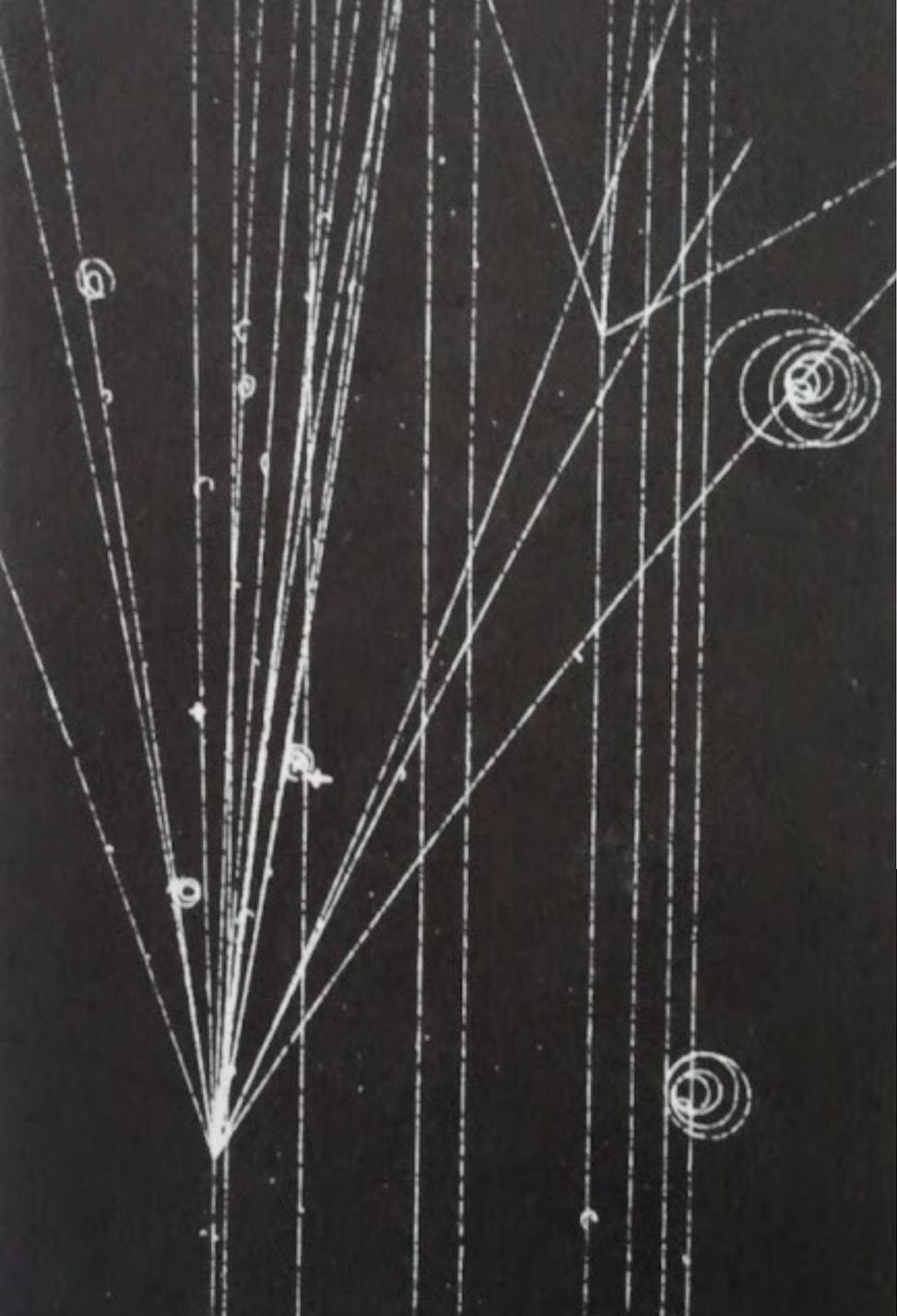


Camera a bolle

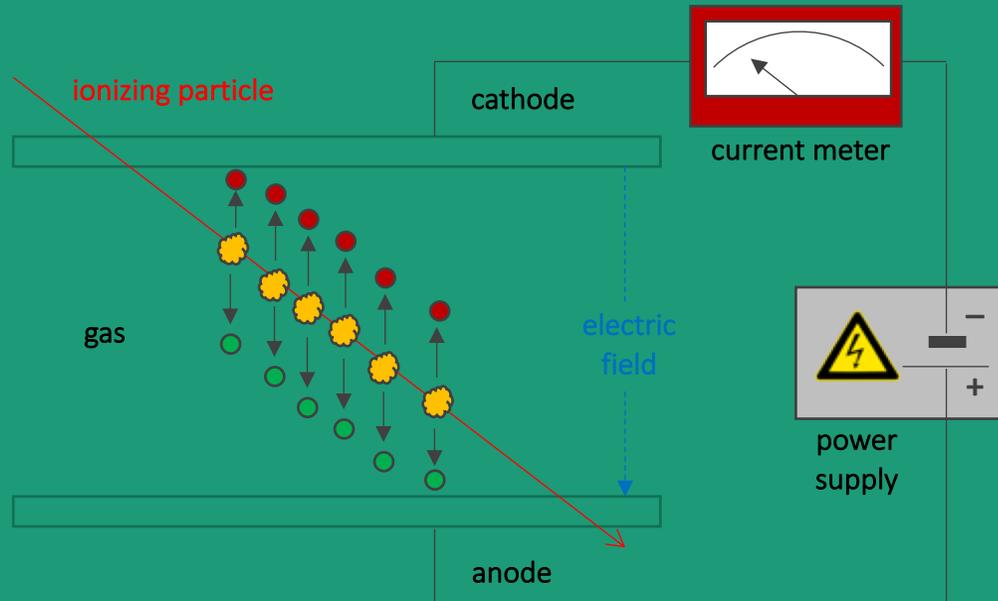
Donald Arthur Glaser (1952)



- Liquido surriscaldato e compresso
- La particella carica ionizza il liquido
- Mentre la particella attraversa il liquido il pistone fa espandere il liquido creando delle bollicine
- Le bollicine tenderanno ad addensarsi dove ci sono particelle cariche libere (ionizzate)
- Utilizzando una macchina fotografica si può fotografare la traccia della particella

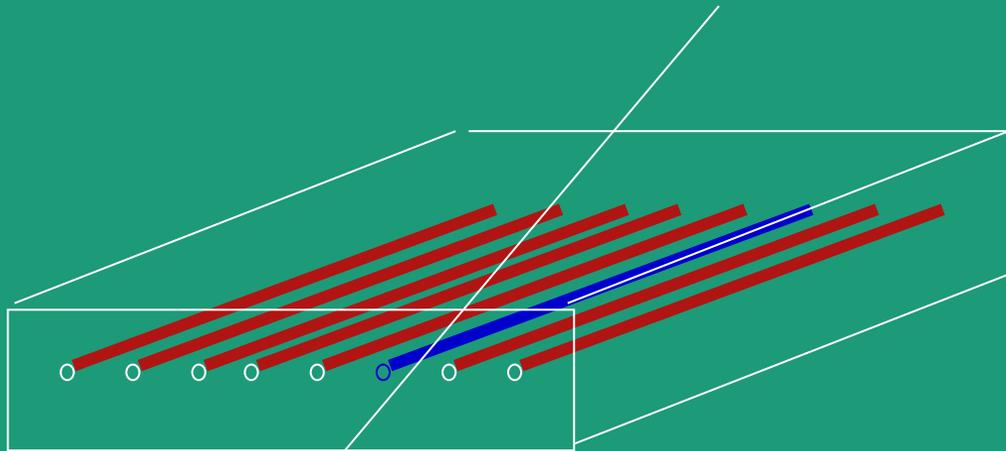
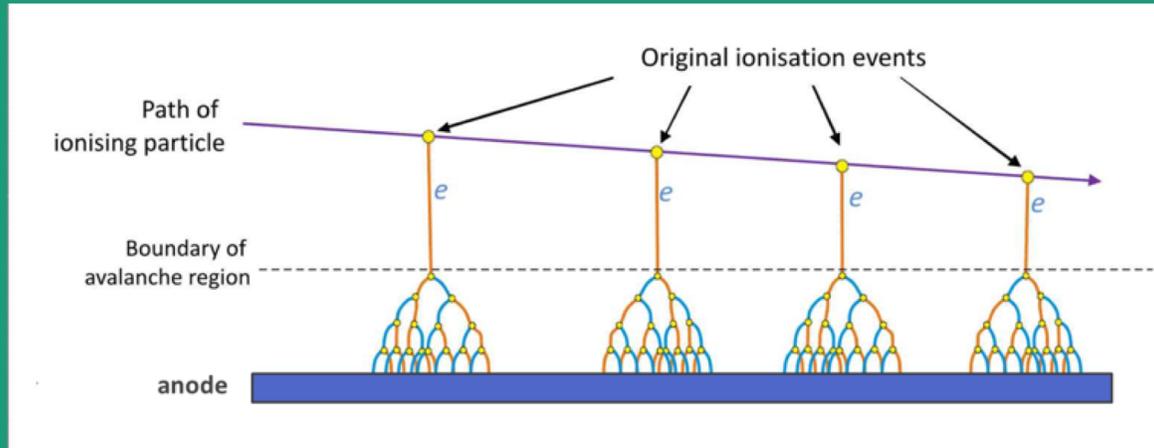


Rivelatori a gas



- Due elettrodi immersi in un gas che producono un campo elettrico
- La particella incidente ionizza il gas (produce coppie elettrone-ione)
- Le cariche si muovono verso gli elettrodi a causa del campo elettrico
- Il movimento delle cariche genera un segnale elettrico misurabile

Camere proporzionali multifilo (MWPC)



Georges Charpak (1968)

- Il segnale elettrico raccolto è proporzionale all'energia rilasciata nel gas dalla particella incidente
- Posizione determinata dai fili che danno segnale
- Coprono grandi superfici

Resistive Plate Chamber

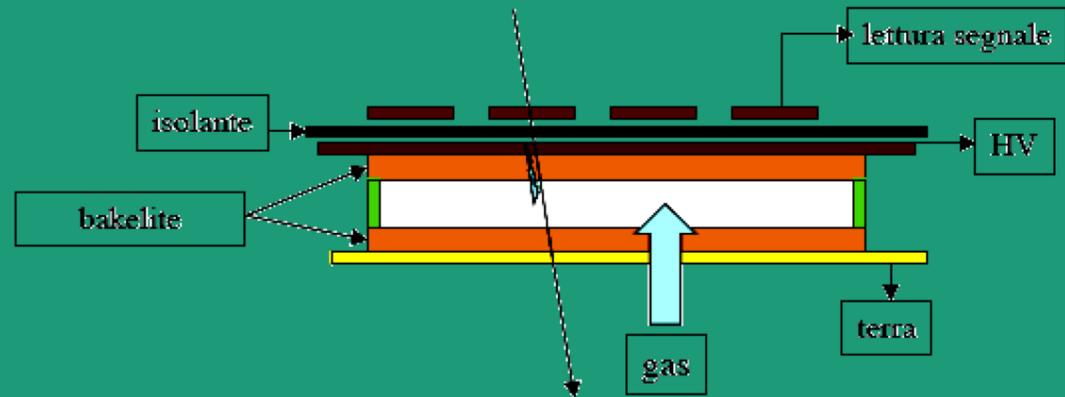
Rinaldo Santonico (1981)

Geometria planare
(campo elettrico uniforme)

Elettrodi resistivi (bakelite)

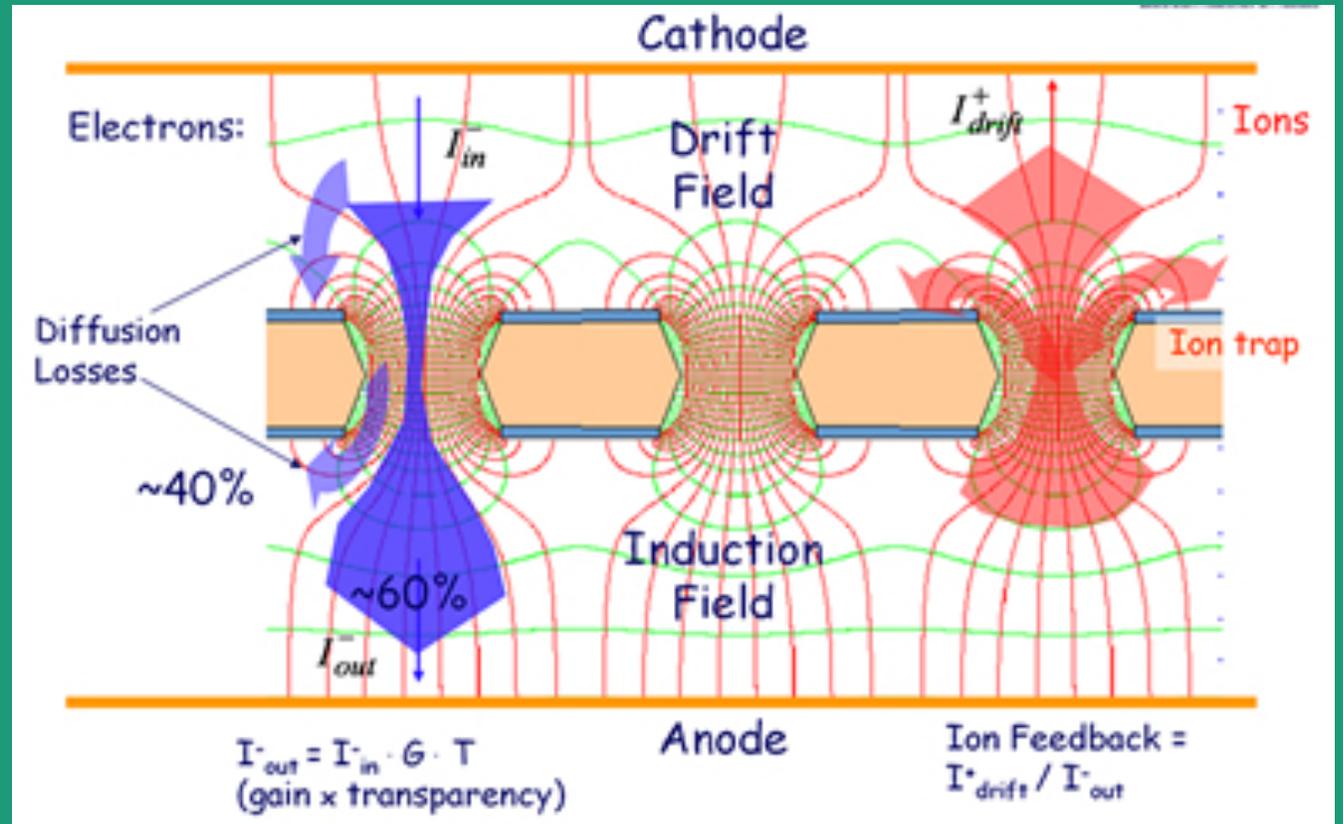
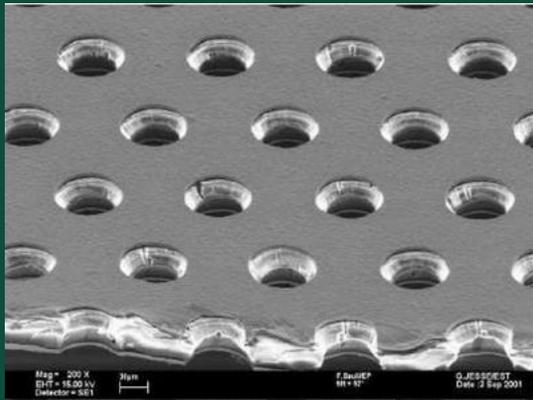
Gap 2,0 mm

Lettura effettuata con strips
esterne al rivelatore isolate dal
piano dell'alta tensione

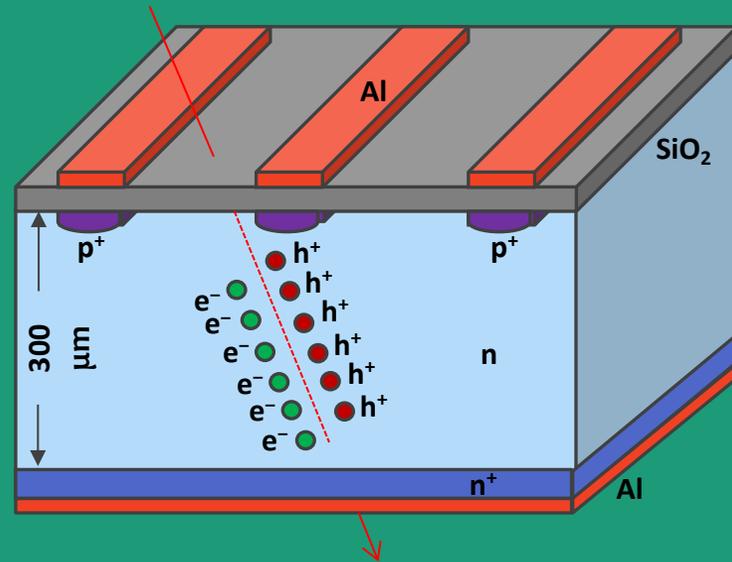


Gas electron multiplier

Fabio Sauli (1997)



Rivelatori a silicio



- Il mezzo attivo è un semiconduttore drogato (Silicio)
- La particella ionizza il mezzo (alta densità, quindi alta ionizzazione)
- La ionizzazione crea coppie elettrone-lacuna
- Le cariche libere si muovono verso gli elettrodi mosse dal campo elettrico
- Il moto delle cariche produce un segnale elettrico

Rivelatori a Scintillazione

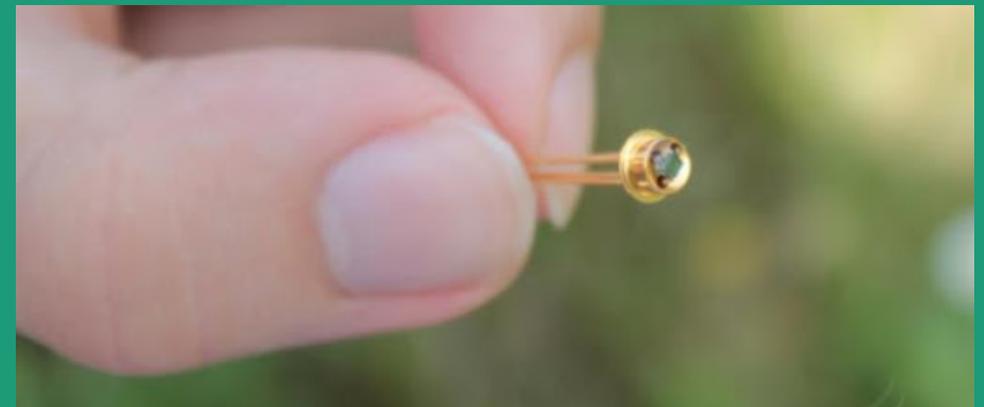
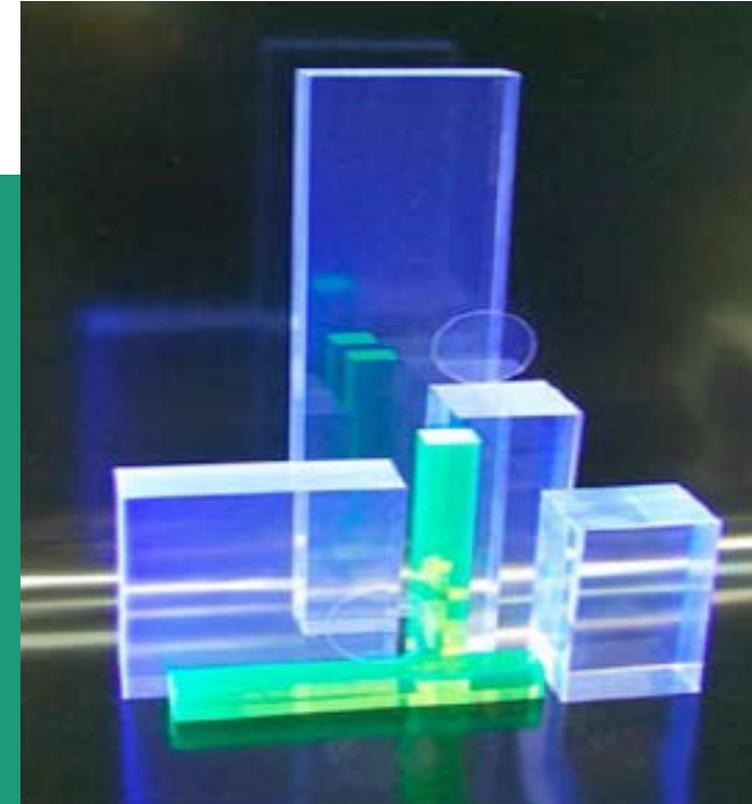
Questi rivelatori usano come elemento attivo dei materiali che hanno la proprietà di *emettere luce visibile* quando sono attraversati da particelle cariche

Il fenomeno di scintillazione è causato dalla eccitazione e successiva diseccitazione degli atomi dei materiali scintillanti

Gli scintillatori possono essere:

- Plastici
- Cristalli
- Liquidi

La luce di scintillazione prodotta dalla particella si propaga all'interno dello scintillatore e viene raccolta da appositi sensori (**Fotomoltiplicatori, fotodiodi...**)

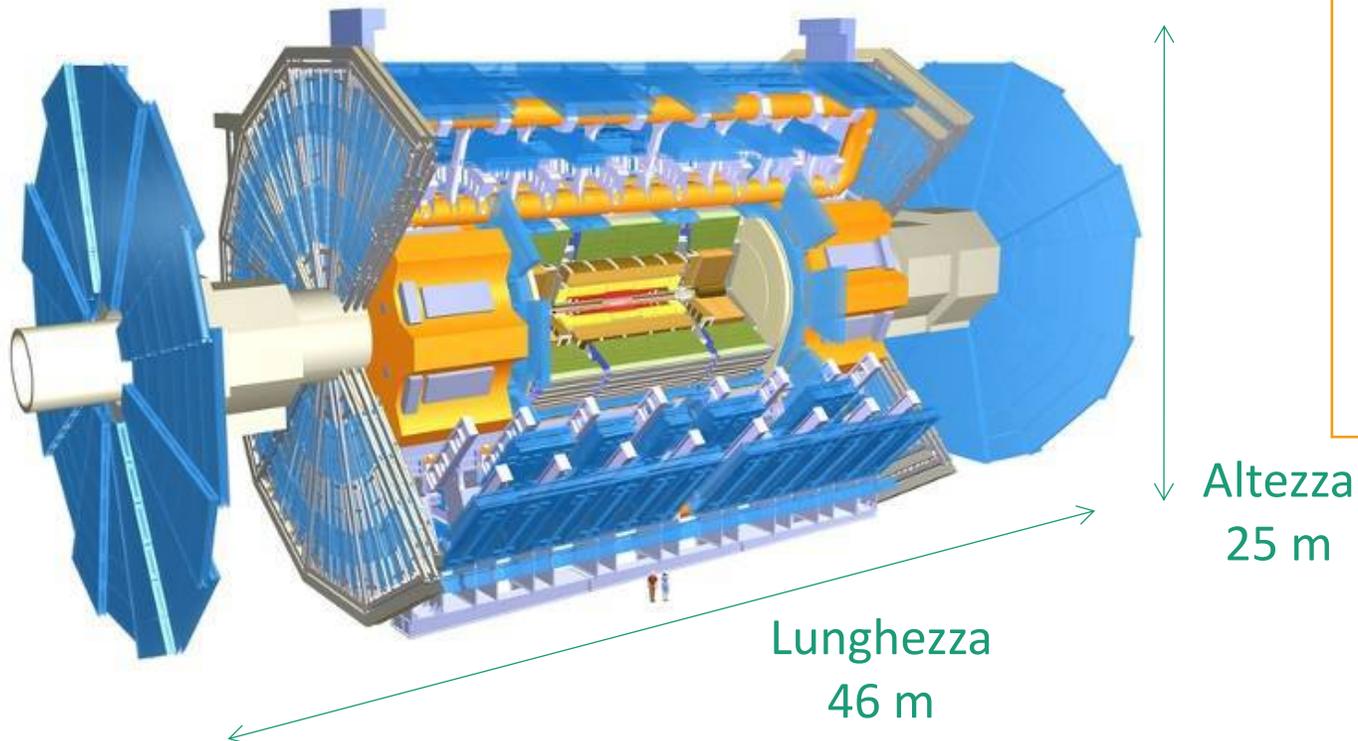


Il rivelatore ATLAS a LHC

Struttura a «cipolla»: diversi tipi di rivelatori uno dentro l'altro a formare strati di rivelazione intorno al punto dove si *scontrano le particelle*.

I rivelatori interni devono avere **un'alta risoluzione spaziale** per distinguere particelle molto vicine.

I rivelatori esterni devono coprire **superfici molto grandi**



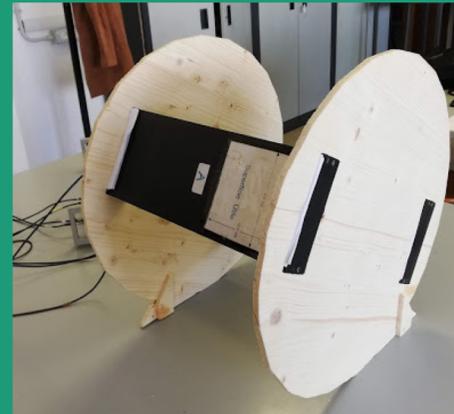
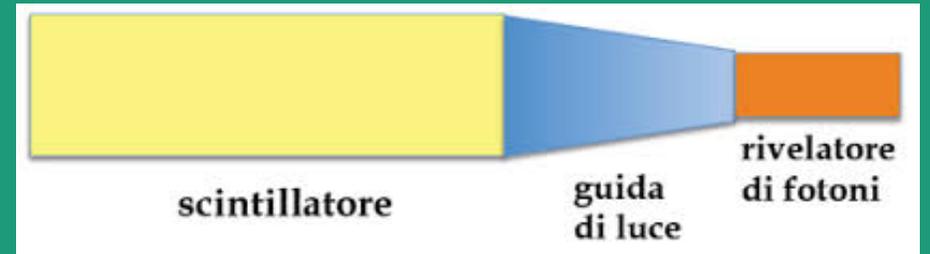
Peso 7000 ton
Superficie rivelatori
6000 m²
100G canali di
elettronica
Costo 400 M€
2100 scienziati
37 nazioni

Cosmic box

Viene detto rivelatore in generale un sistema complesso formato da più parti, la parte sensibile, ossia il rivelatore vero e proprio (nel nostro caso scintillatore + fotomoltiplicatore PM) + l'elettronica che elabora i segnali.

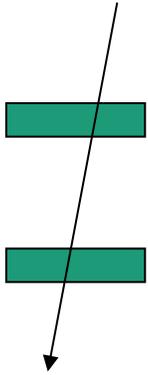
L'elettronica è contenuta nella scatola di metallo dove arrivano i segnali dei due PM che vengono:

- amplificati
- digitalizzati
- messi in coincidenza
- contati

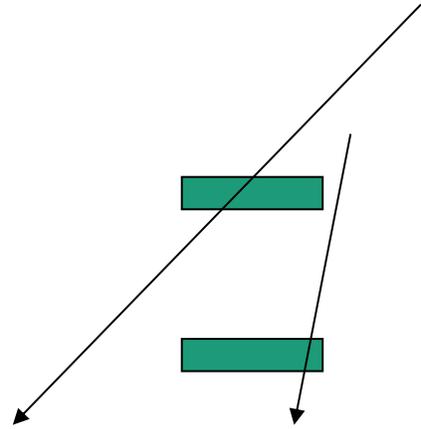


Misure di cosmici in coincidenza

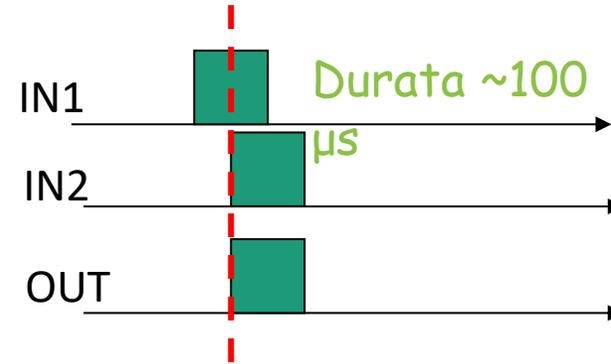
Quando 2 rivelatori segnalano il passaggio di una particella simultaneamente (entro una certa finestra temporale), può trattarsi di un evento casuale o di un vero e proprio processo fisico.



Esempio di un evento vero di coincidenza: la stessa particella passa per entrambi i contatori



Esempio di una coincidenza casuale tra 2 particelle che attraversano i due contatori entro lo stesso intervallo temporale



Stima del rate di coincidenze casuali

$$R_n = nR_{singola}^n \cdot \tau^{n-1}$$

Esempio

$$\text{Area} = 1\text{m}^2$$

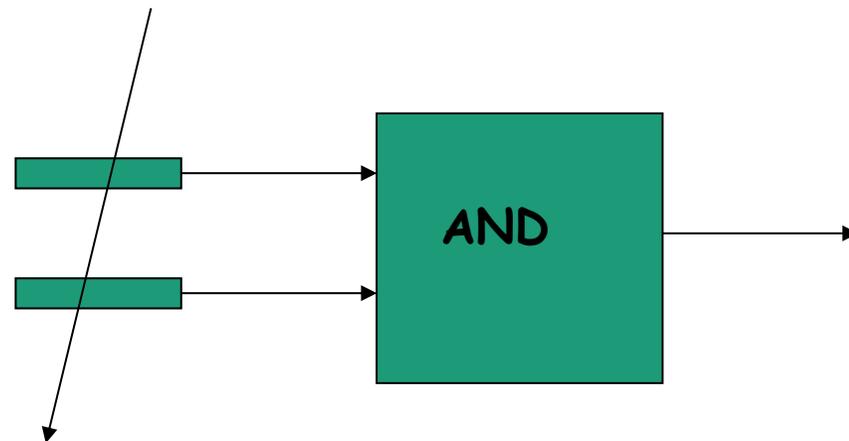
$$R_{singola} = 300 \text{ Hz}$$

$$\tau = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$$

$$R_2 = 2 \times (300)^2 \times 10^{-7} = 1.8 \times 10^{-2} \text{ Hz}$$

$$R_3 = 3 \times (300)^3 \times (10^{-7})^2 = 8.1 \times 10^{-7} \text{ Hz}$$

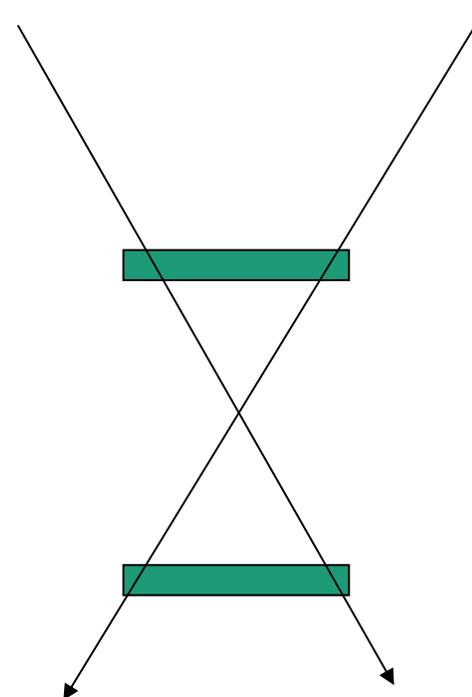
Con i 2 rivelatori piazzati circa verticalmente l'uno sull'altro, si possono misurare i muoni cosmici che attraversano entrambi i contatori, definendo grossolanamente la direzione di provenienza.



La distanza relativa e le dimensioni dei contatori definiscono il cono angolare entro cui i muoni sono rivelati.

Distanze maggiori minor tasso di conteggio

Posizionando i 2 contatori ad un certo angolo rispetto alla verticale, si può misurare grossolanamente la distribuzione angolare dei muoni cosmici secondari, che segue una legge del tipo $\cos^2 \theta$

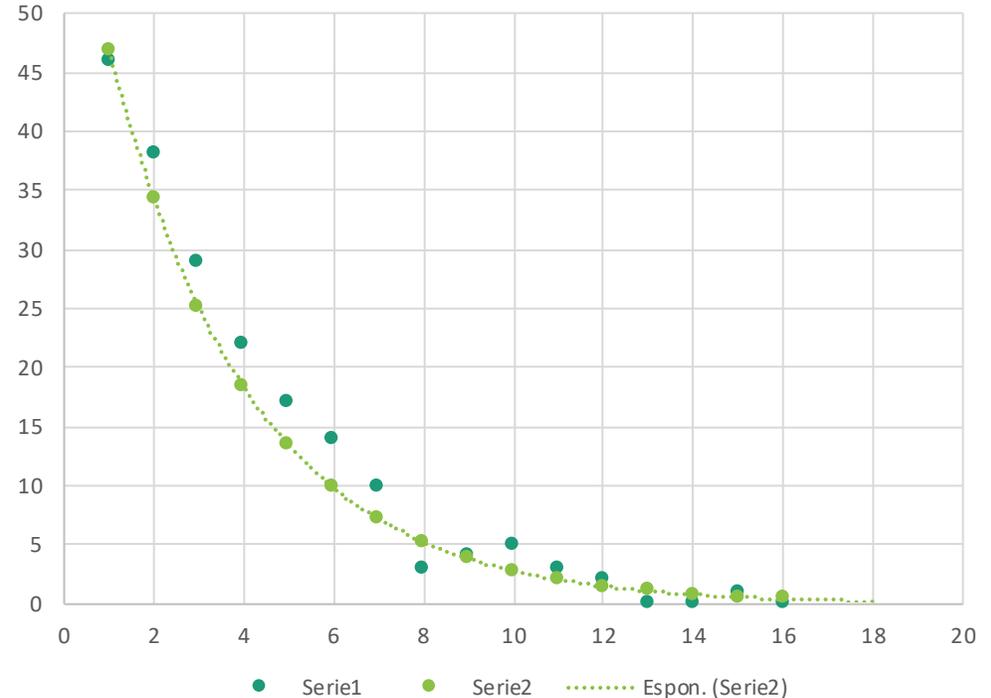


Attività sperimentale 1

Verificare che i raggi cosmici seguono una legge di arrivo temporale tipica degli eventi indipendenti

Se questo è vero la legge che lega l'arrivo tra 1 cosmico e il successivo è una legge esponenziale

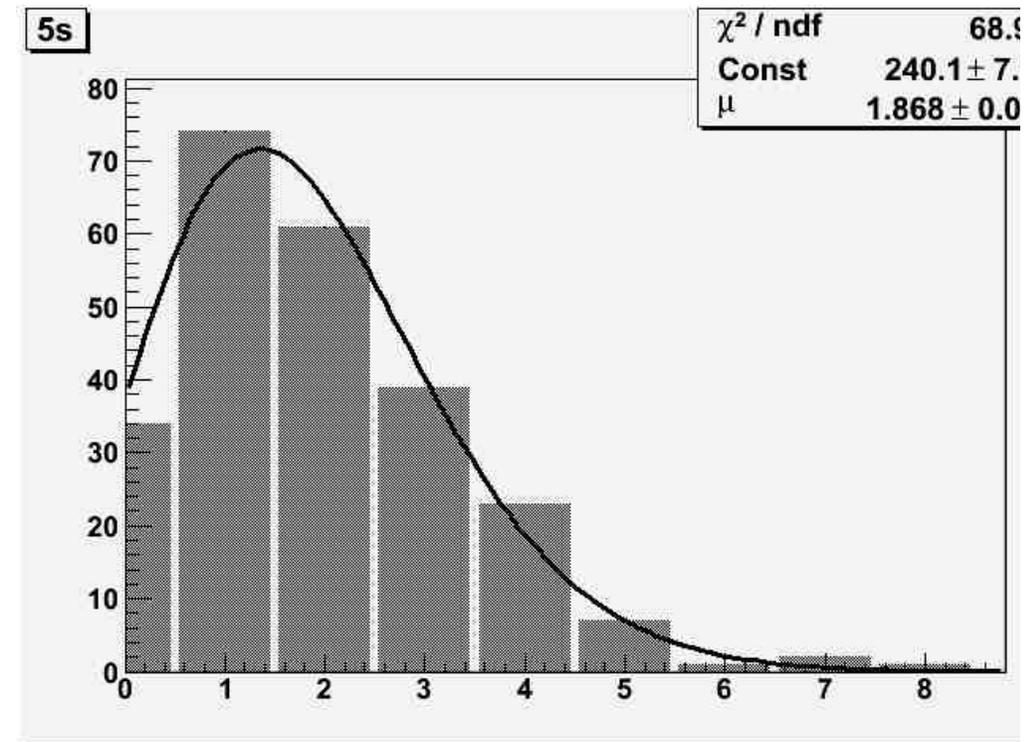
Effettuare almeno 100 misure di intervalli di tempo tra 2 eventi



Attività sperimentale 2

Studio della distribuzione del numero di conteggi

Effettuando una serie di misure di cosmici per brevi intervalli di tempo (ad es. 5-10 s) si può studiare la distribuzione delle misure e confrontarla con la distribuzione attesa di Poisson (per valori piccoli della media) o di Gauss (per valori più grandi)



Attività sperimentale 3

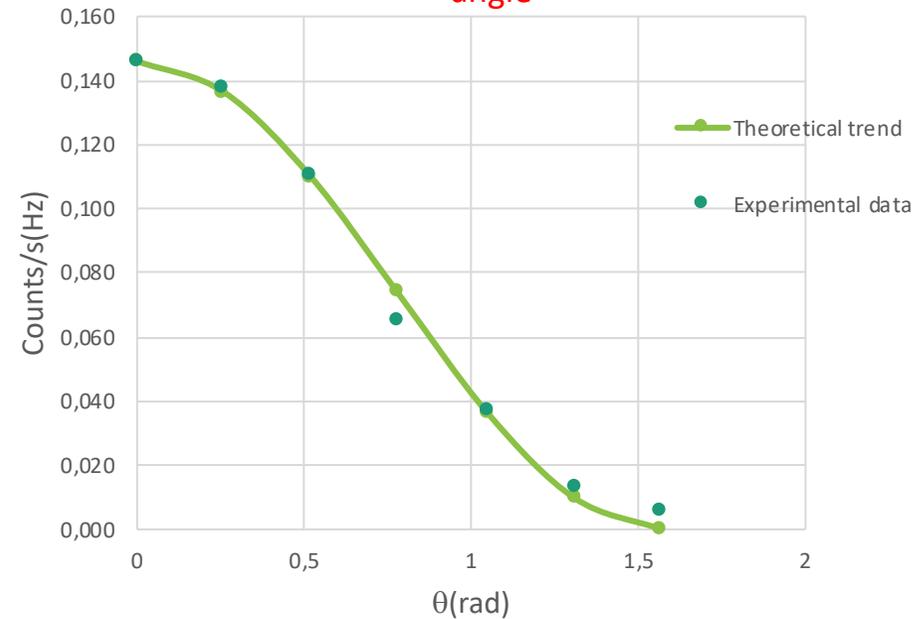
Misura della distribuzione angolare

Effettuare una serie di misure di flussi a diversi angoli rispetto alla verticale e verificare la legge

$$F(\theta) = k \cos^2(\theta)$$

Aspetti sperimentali: valutazione delle indeterminazioni geometriche (Indeterminazione angolare nella configurazione telescopica)

Number of Triple Coincidences as a function of the Zenith angle

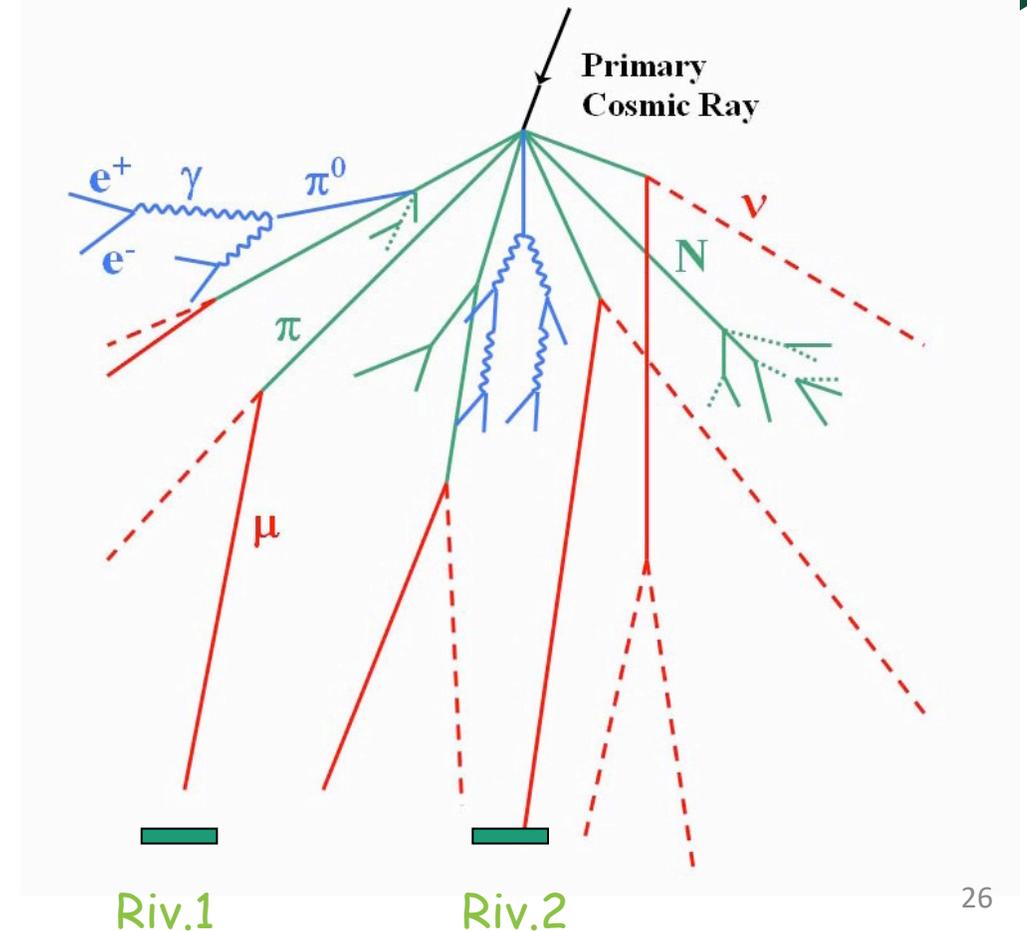


Attività sperimentale 4

Misura sciame atmosferici estesi

Utilizzare un circuito di coincidenza per misurare sciame atmosferici estesi ponendo 2 rivelatori sullo stesso piano orizzontale a diverse distanze relative.

Aspetti sperimentali: studio del fondo dovuto alle coincidenze casuali

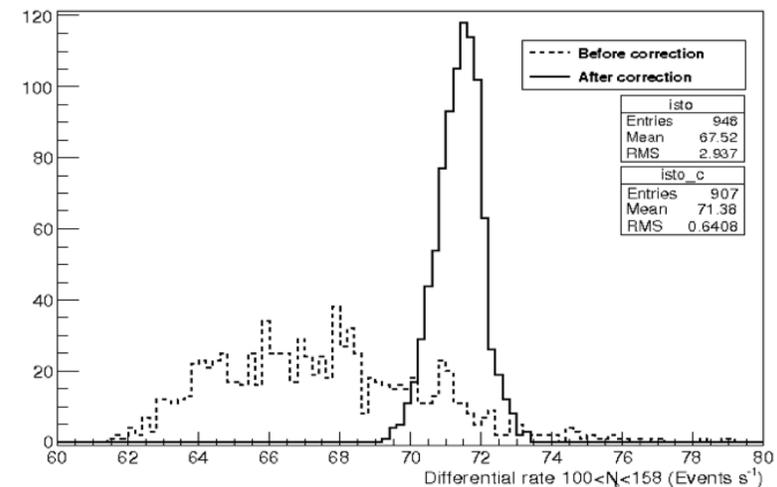
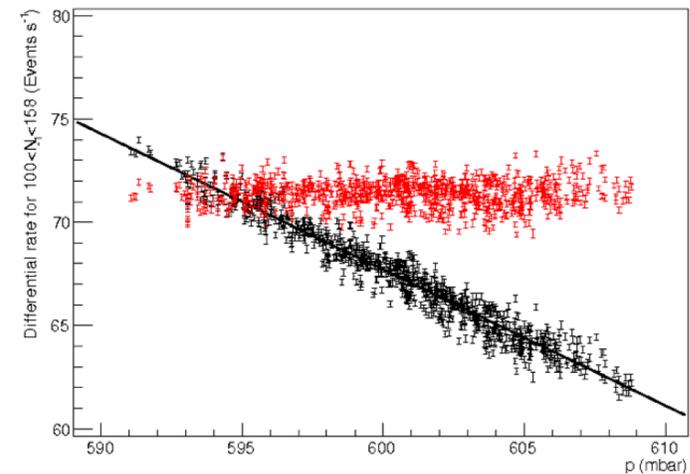


Attività sperimentale 5

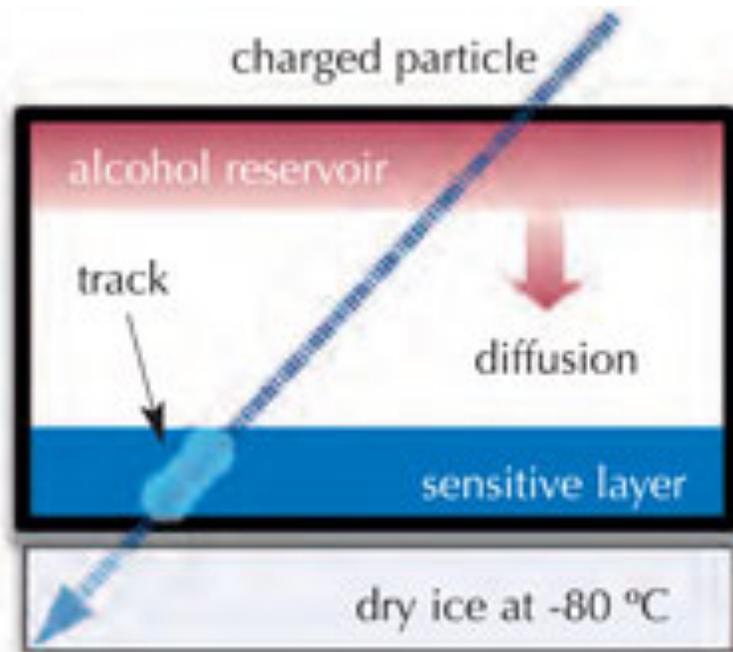
Misura effetto barometrico

Utilizzare un circuito di coincidenza dotato di sensore di pressione per misurare ad intervalli fissi, sufficientemente lunghi, il numero dei conteggi in coincidenza e valori di pressione.

Aspetti sperimentali: misura del coefficiente di anticorrelazione



Costruiamo una camera a nebbia a diffusione



Questa camera a nebbia è fondamentalmente un contenitore a tenuta d'aria riempito con una miscela di aria e vapore d'alcol. L'alcol liquido evapora da un serbatoio e si diffonde attraverso l'aria della camera. Raffreddando la base con del ghiaccio secco (ghiaccio di anidride carbonica che è ad una temperatura costante di -79 °C mentre sublima) si ottiene un intenso gradiente di temperatura lungo la verticale. In questo modo si forma sul fondo una zona di vapore d'alcol sovrassatura. Lo strato sensibile è instabile: ha una quantità di vapore d'alcol freddo in misura maggiore di quella che può mantenere. Il processo di condensazione scatta al passaggio della particella carica con energia sufficiente a ionizzare atomi lungo il suo cammino. Questi ioni sono i nuclei di condensazione attorno ai quali le goccioline di liquido formano una scia

Costruire una camera a nebbia a diffusione

Stage a Tor Vergata