

Rivelatori di Particelle

Daniilo Domenici

Cos'è un Rivelatore di Particelle

Nella *fisica sperimentale*, un **rivelatore di particelle** o **rivelatore di radiazione** è uno strumento usato per *rivelare, tracciare e identificare* particelle, come quelle prodotte per esempio da un **decadimento nucleare**, dalla **radiazione cosmica**, o dalle interazioni in un **acceleratore di particelle**. (Wikipedia)

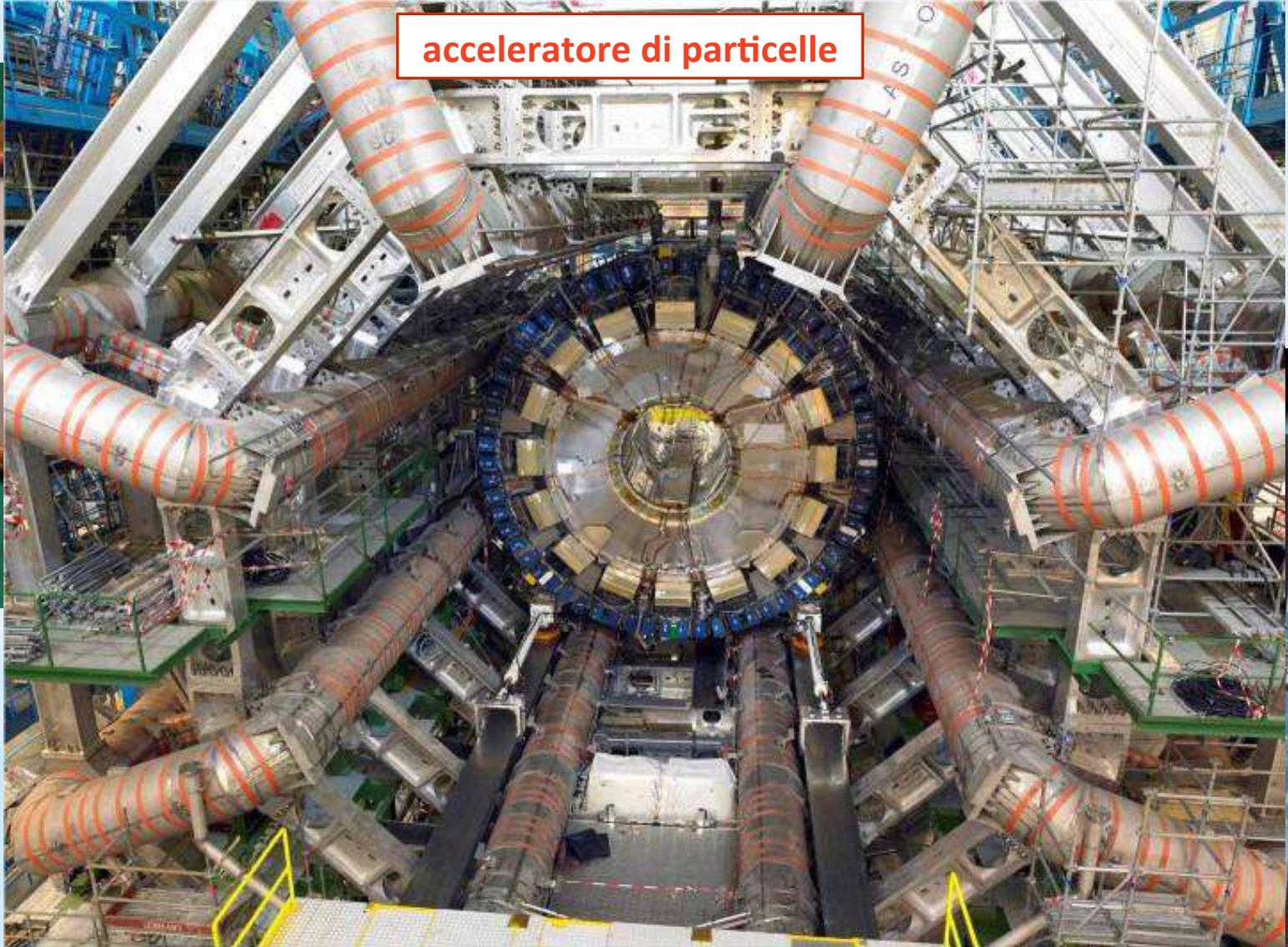
Quando una particella attraversa un mezzo rilascia una certa dose di energia o di momento per la cosiddetta **Interazione Radiazione-Materia**.

I **rivelatori di particelle** sono strumenti che producono un *segnale osservabile* quando il loro *elemento attivo* viene colpito dalla radiazione.

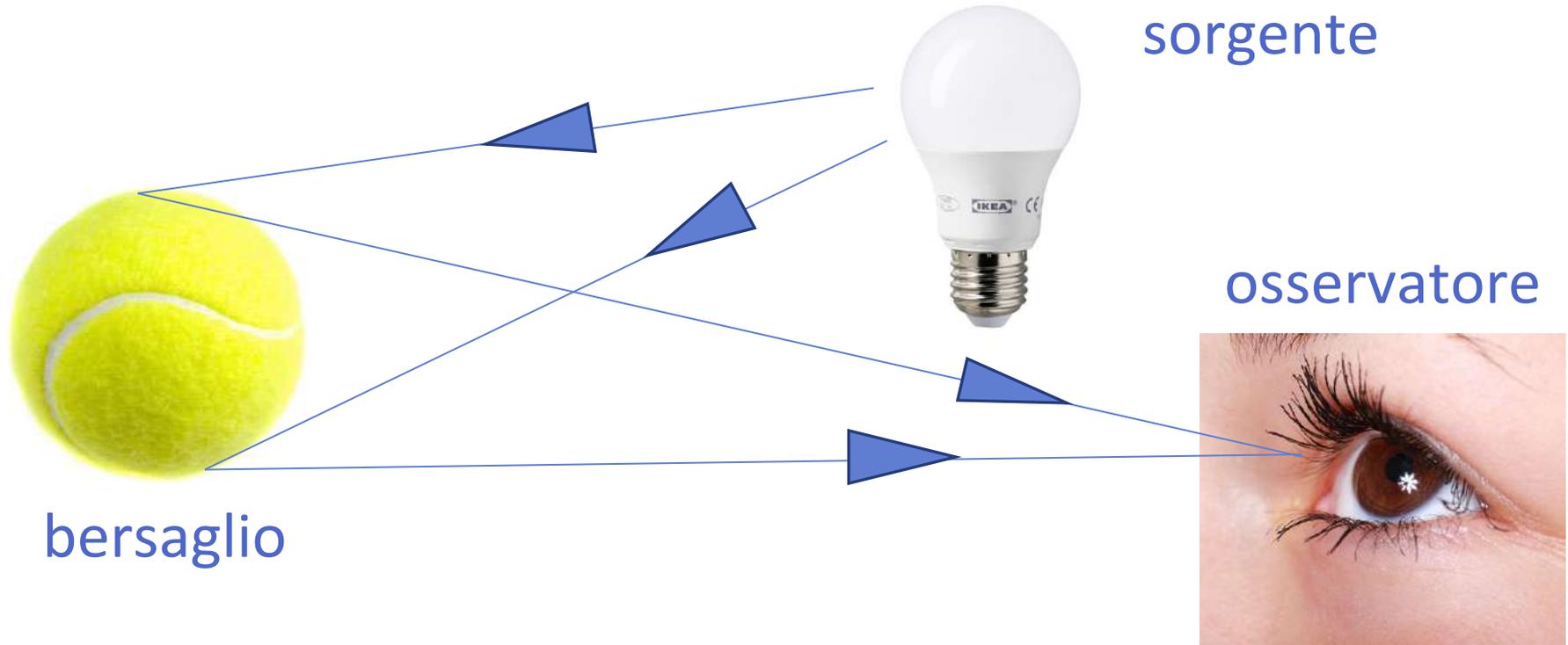
Il segnale può essere direttamente osservabile oppure può necessitare di un ulteriore processamento da parte di un *sistema di lettura*.

Tipi di Rivelatore di Particelle

acceleratore di particelle



Un Rivelatore che abbiamo tutti: l'occhio



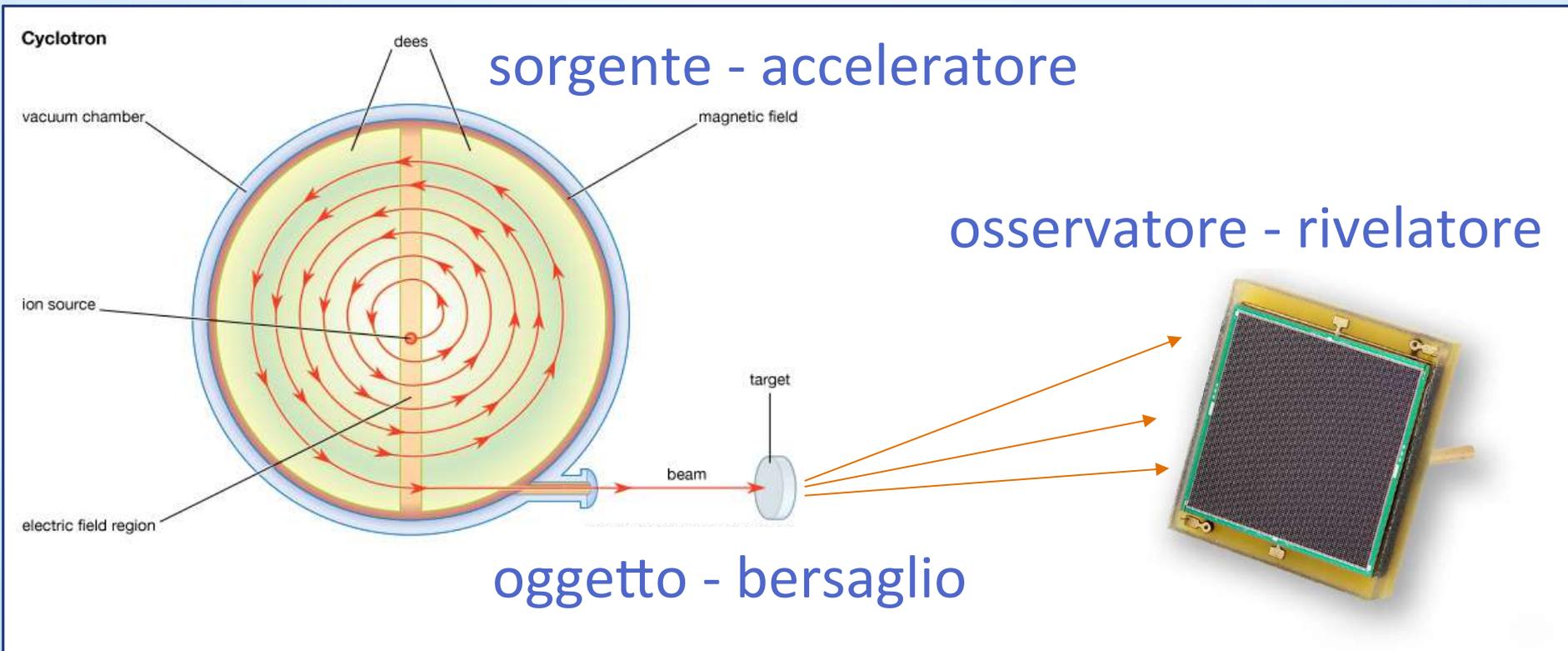
L'occhio umano è un rivelatore di particelle: i **fotoni**

I **fotoni** sono le particelle elementari di cui è costituita la luce

Noi vediamo un oggetto perché viene colpito da fotoni che poi rimbalzano e vengono rivelati dal nostro occhio

Particelle come sonde della Materia

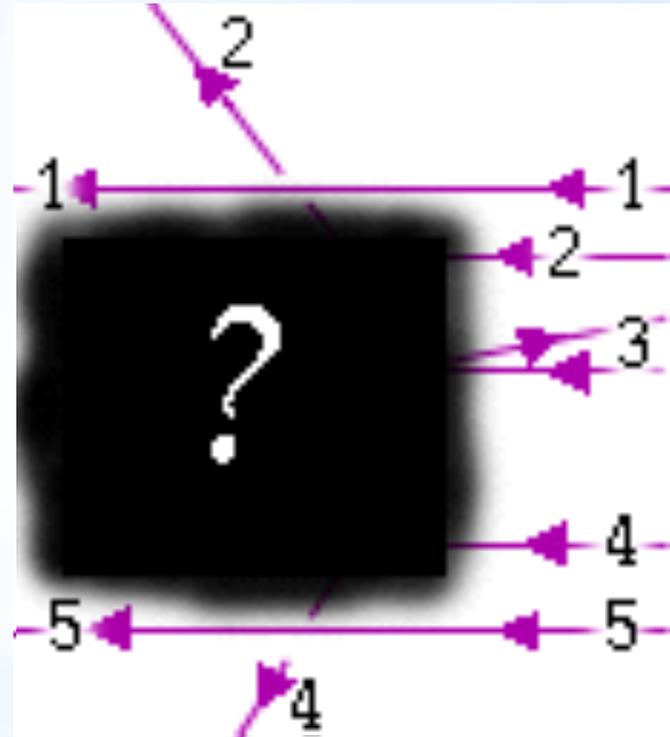
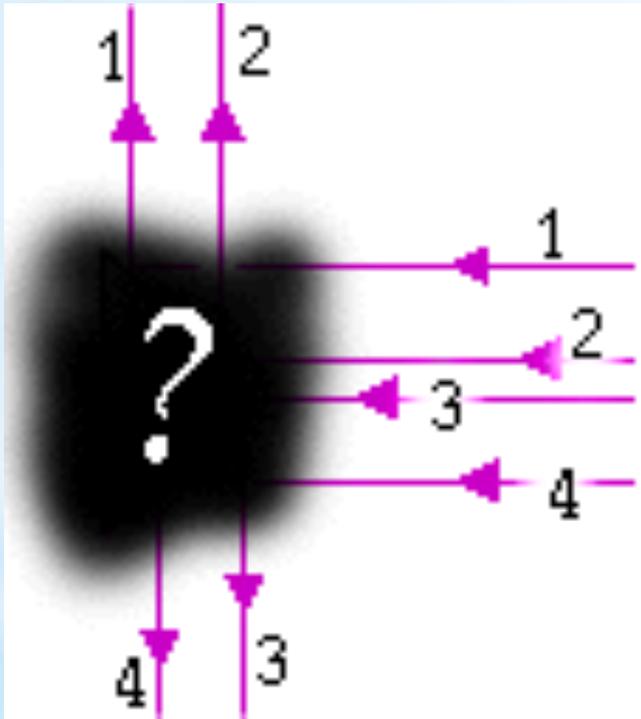
Nello stesso modo facendo rimbalzare particelle riusciamo a capire molte caratteristiche del bersaglio



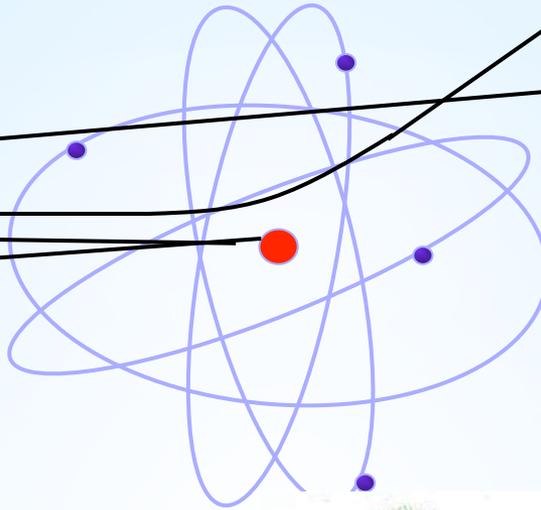
Noi «vediamo» la **materia subatomica** perché la colpiamo con particelle prodotte dagli **acceleratori** che rimbalzano sui **rivelatori**

Particelle come sonde della Materia

Nello stesso modo facendo rimbalzare particelle riusciamo a capire molte caratteristiche del bersaglio



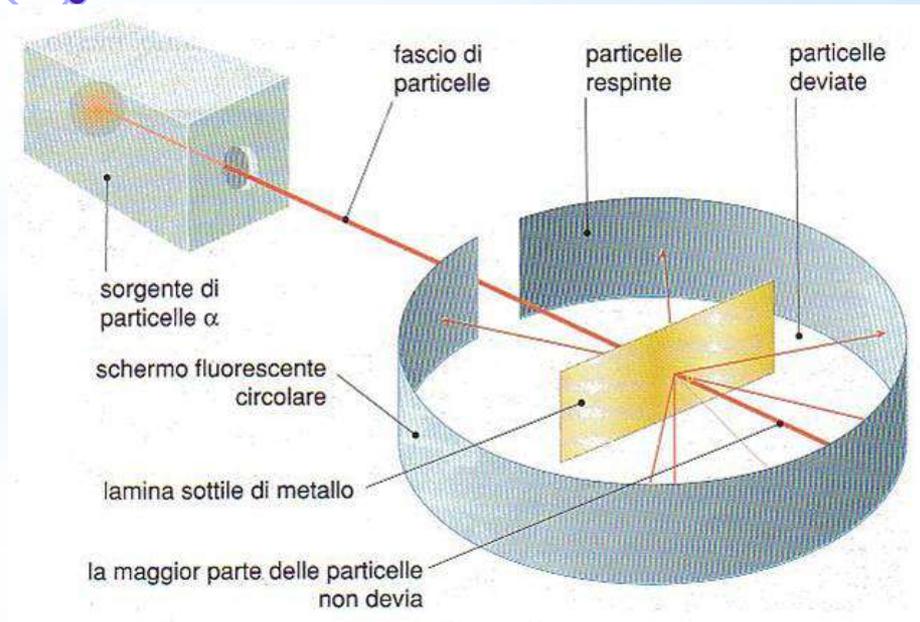
Esperimento di Rutherford



Rutherford capì come è fatto l'atomo e formulò il «Modello planetario»



Ernest Rutherford
Nobel 1908



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. Si esprime in termini di *deviazione standard* della distribuzione della grandezza 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 l'Occhio umano e il Rivelatore di Rutherford

Rivelatore	Occhio umano	Schermo al fluoro
Sensibilità	Fotoni (~ 1 eV)	Alfa (~ 1 MeV)
Risposta	Impulso elettrico	Variazione cromatica
Risoluzione Spaziale	~ 100 μm	~ 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.

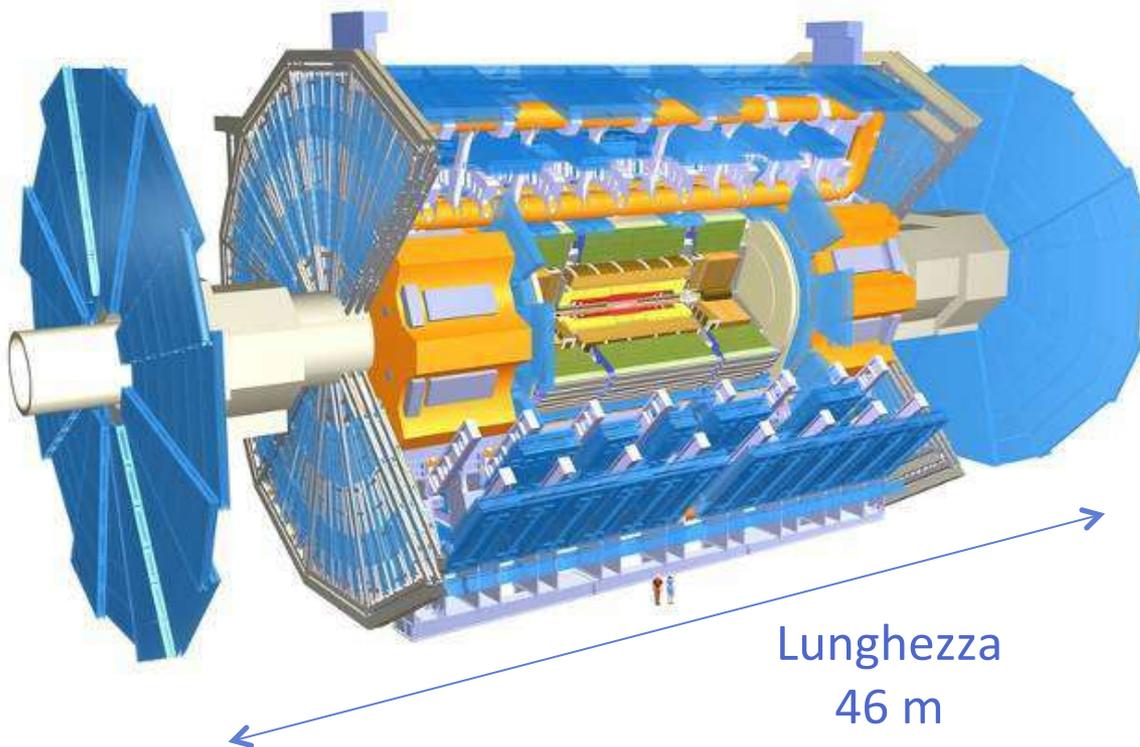
In seguito prenderò principalmente in considerazione i moderni apparati sperimentali agli acceleratori di particelle, che sono costituiti da un insieme di molti rivelatori diversi.

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 le particelle molto vicine.

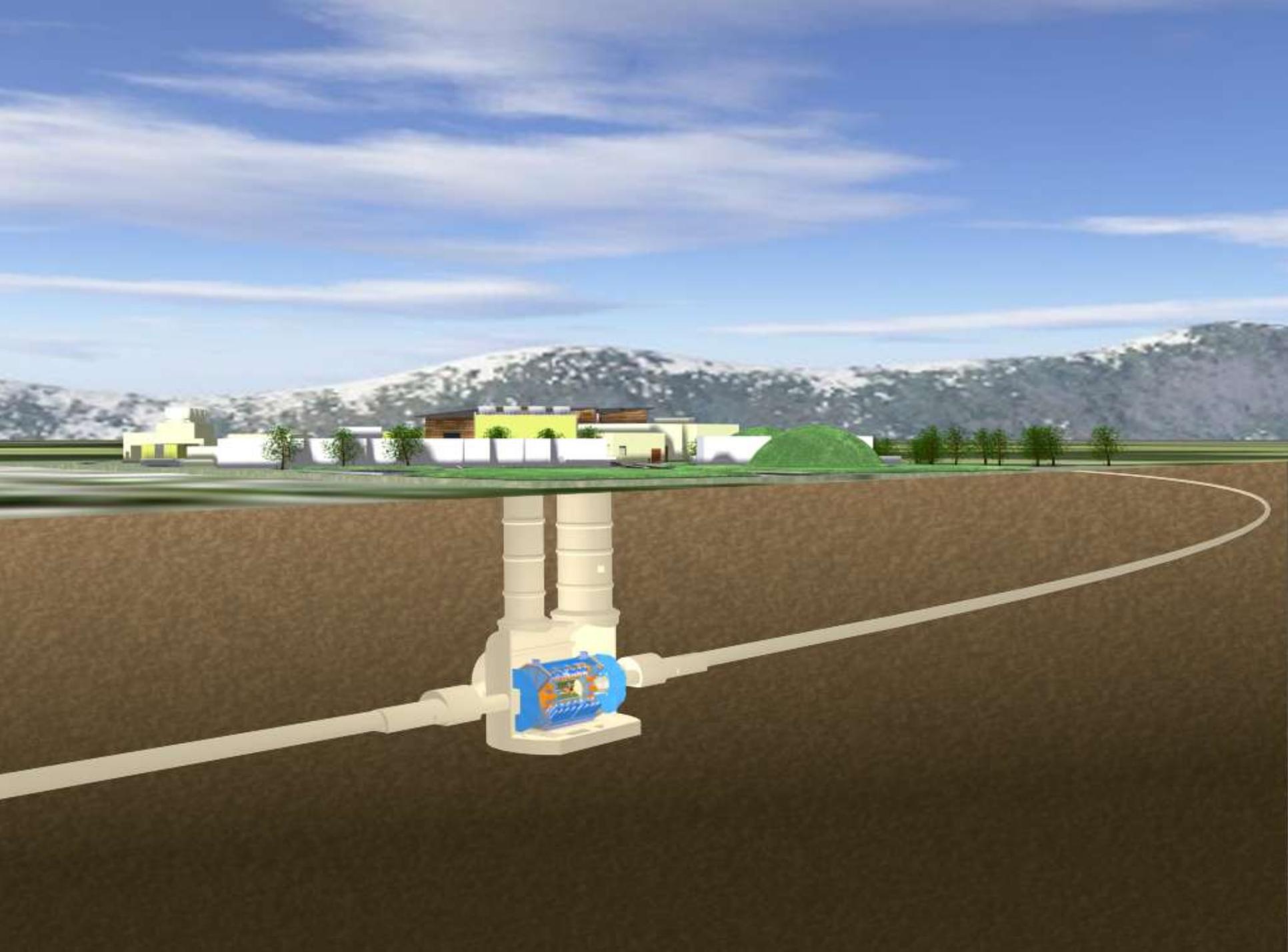
I rivelatori esterni devono coprire **superfici molto grandi**



Lunghezza
46 m

Altezza
25 m

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



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 rivelabili

Urti con gli elettroni atomici (forza elettromagnetica)

Adroni e leptoni carichi

Protoni, Pioni ($\pi^+ \pi^-$), Kaoni ($K^+ K^-$), muoni, elettroni

Urti con i nuclei atomici (forza nucleare forte)

Adroni carichi e neutri

Protoni, Pioni ($\pi^+ \pi^-$), Kaoni ($K^+ K^- K^0$), Neutroni

Irraggiamento e produzione di coppie $e^+ e^-$ (forza elettromagnetica)

Elettroni e fotoni

Tracciatori e Calorimetri

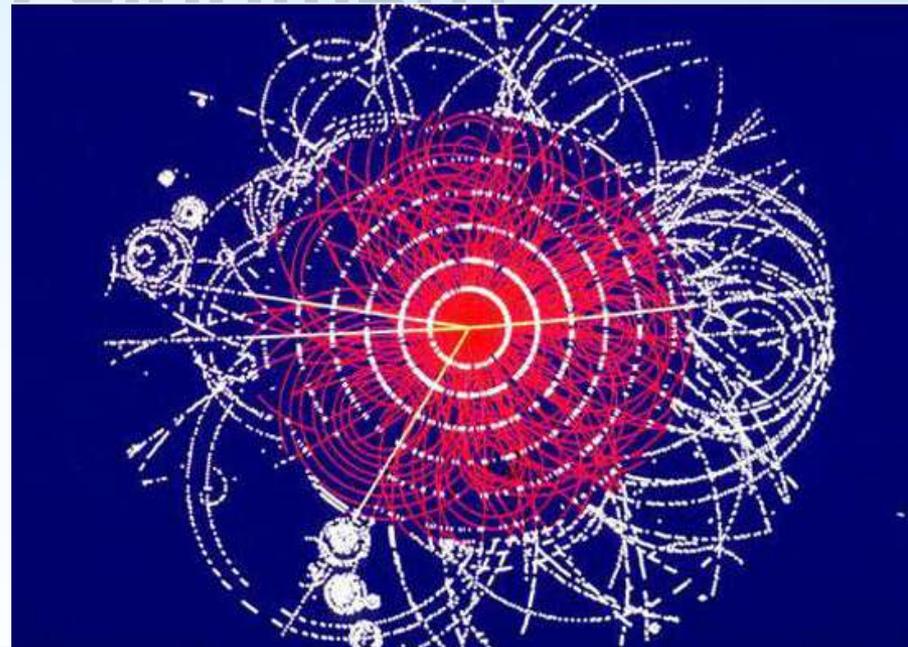
Tracciatori

Sfruttano gli **urti con gli elettroni atomici**

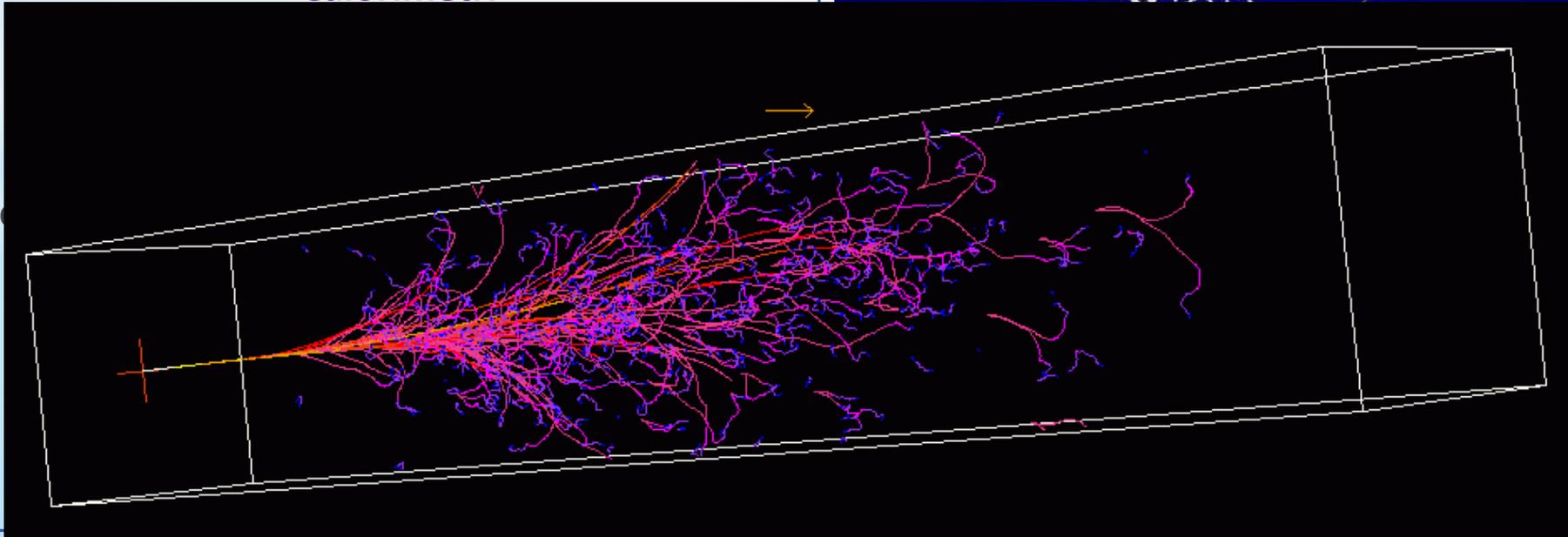
Campionano le tracce delle **particelle cariche:**
protoni, pioni, kaoni, elettroni, muoni

Misurano la **quantità di moto** della particella
(se immersi in un campo magnetico)

La particella esce dal rivelatore non perturbata



Calorimetri



Tracciatori



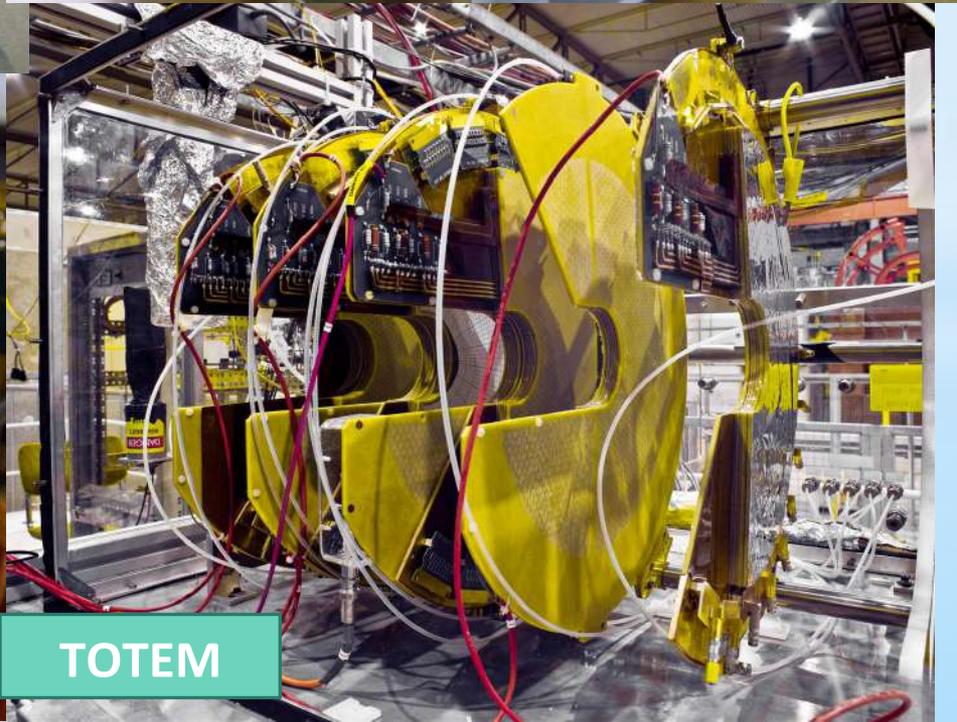
CLEO



KLOE



LHCb



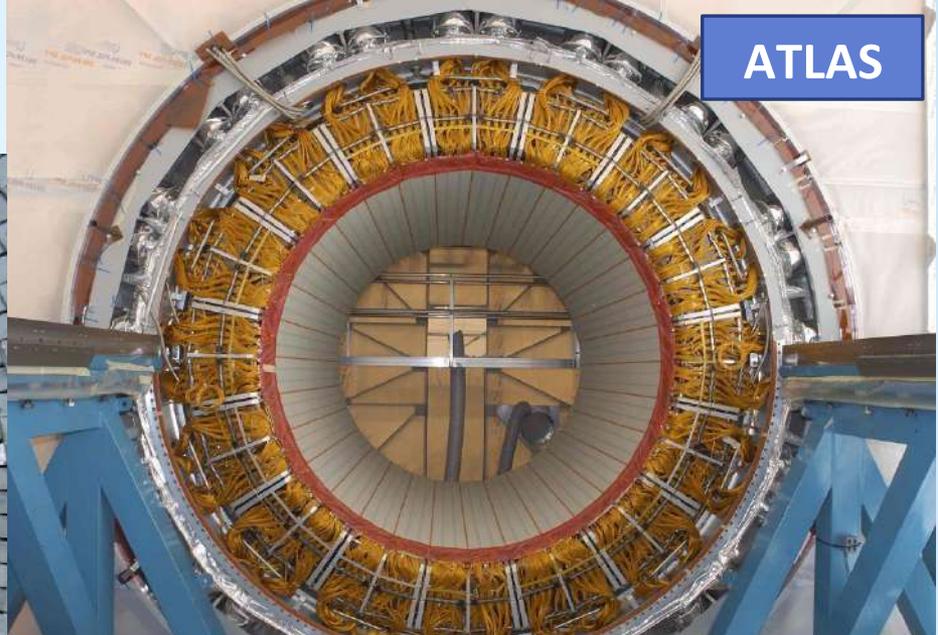
TOTEM

Calorimetri

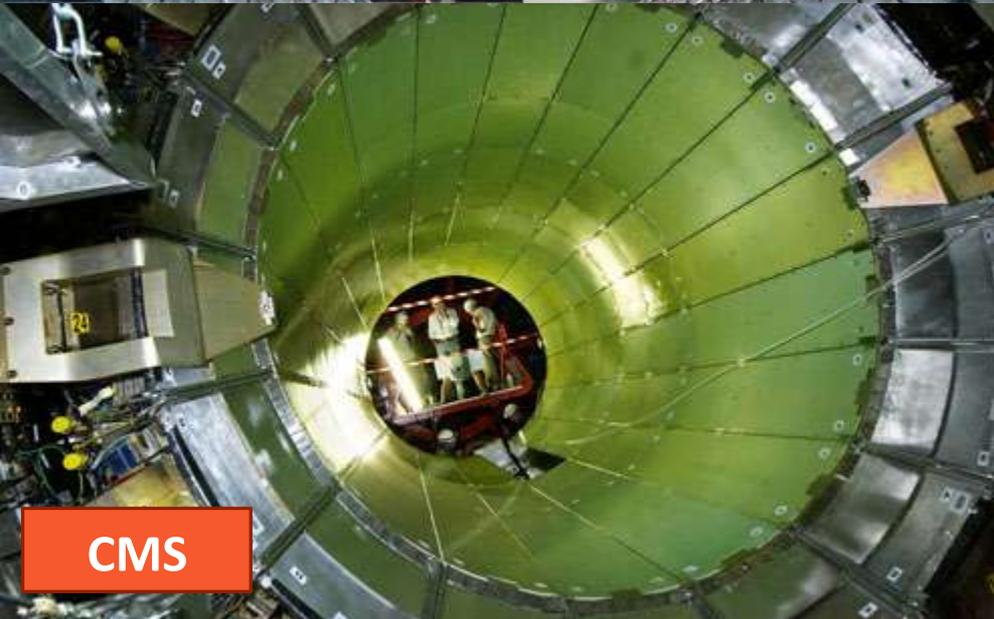
BaBar



ATLAS



CMS



KLOE



Tracciatore: particelle cariche

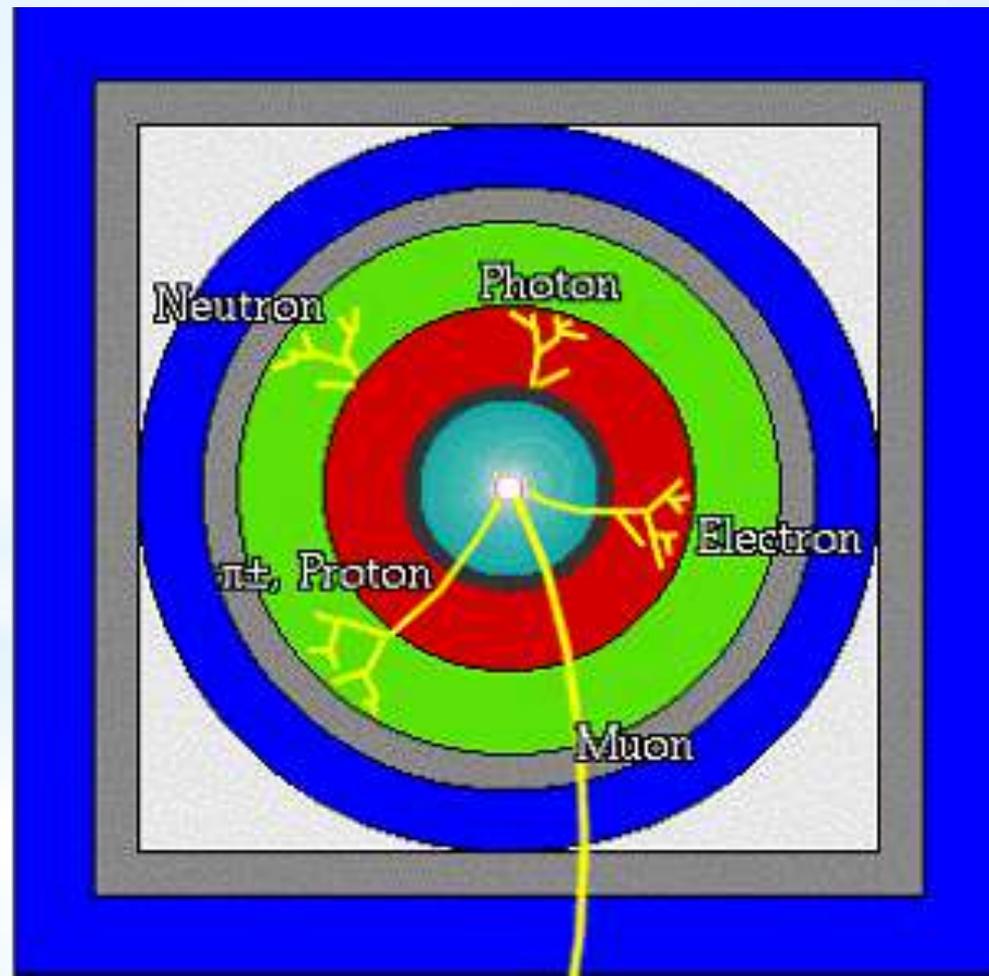
Magnete: piega le tracce delle particelle cariche

Calorimetro EM: elettroni, positroni e fotoni

Calorimetro adronico: adroni carichi e neutri

Rivelatore di Muoni: muoni

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



Analisi degli Eventi

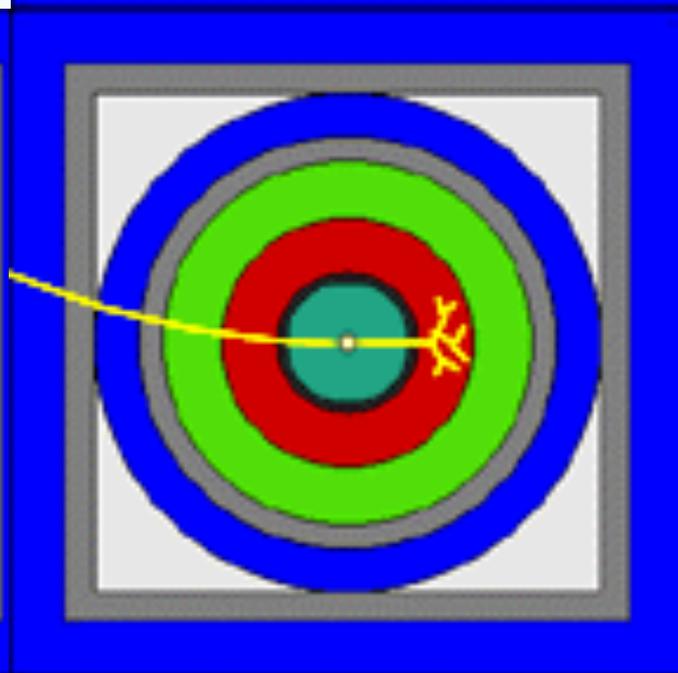
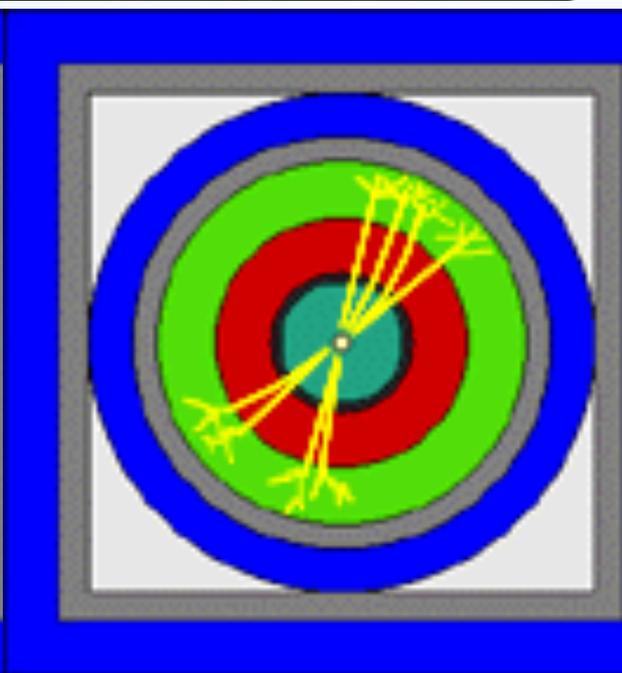
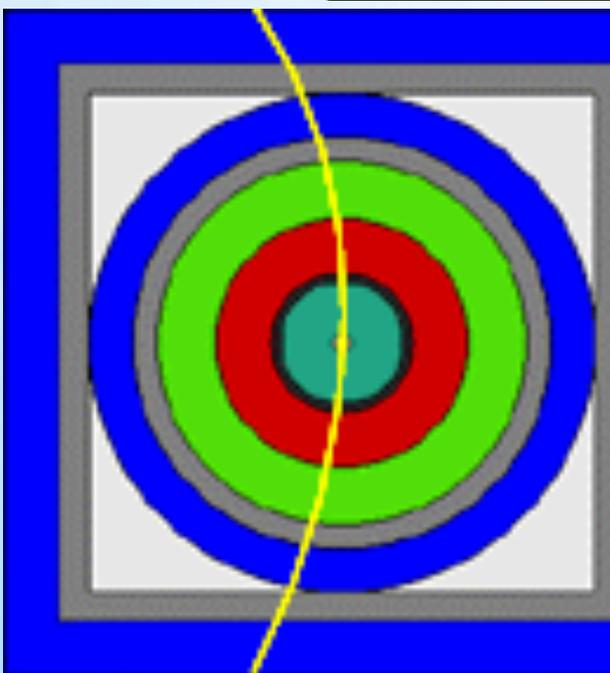
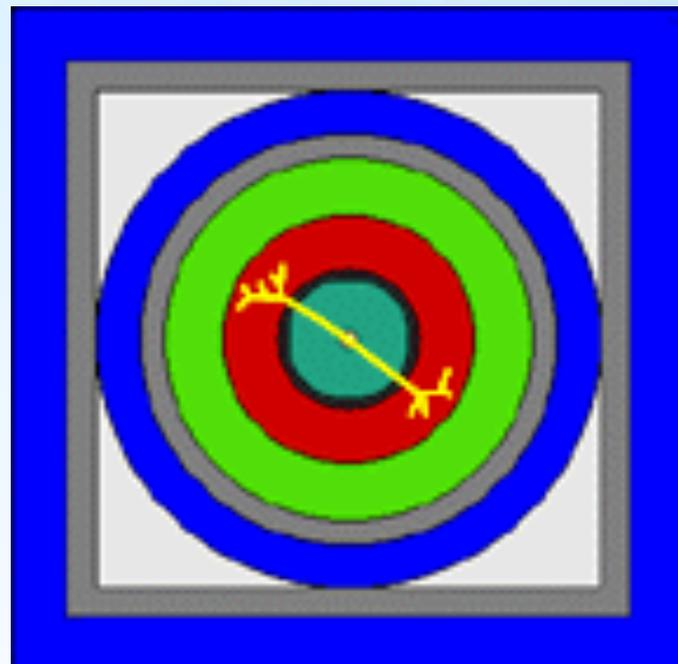
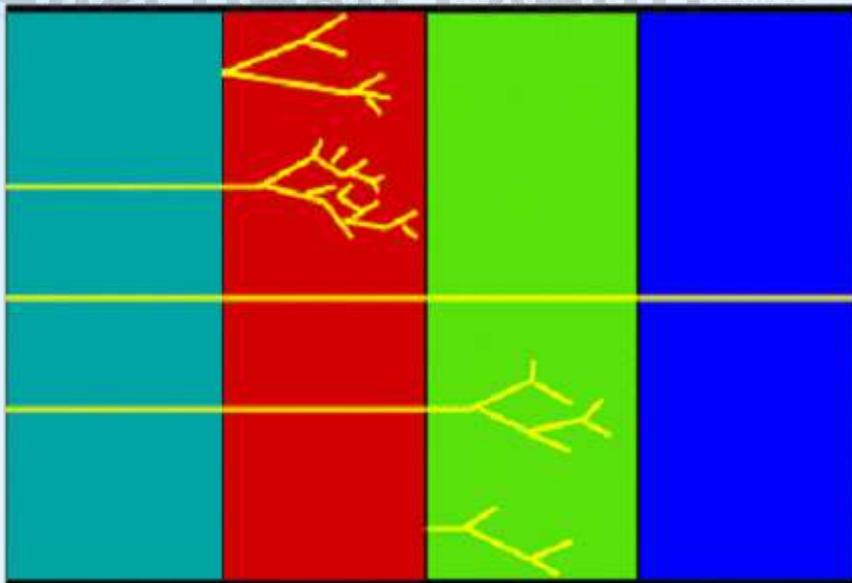
Fotoni →

Elettroni →

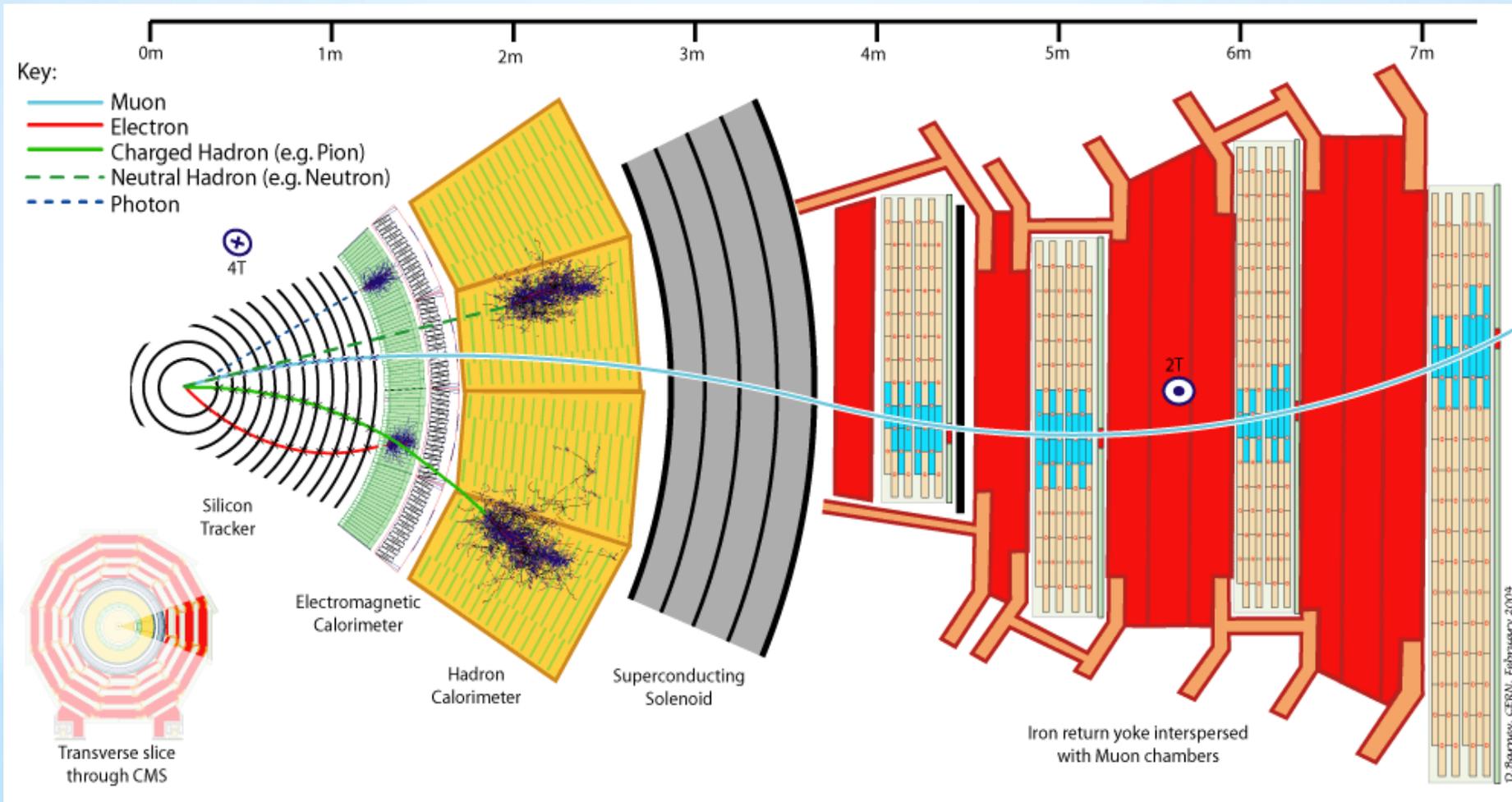
Muoni →

Pioni →

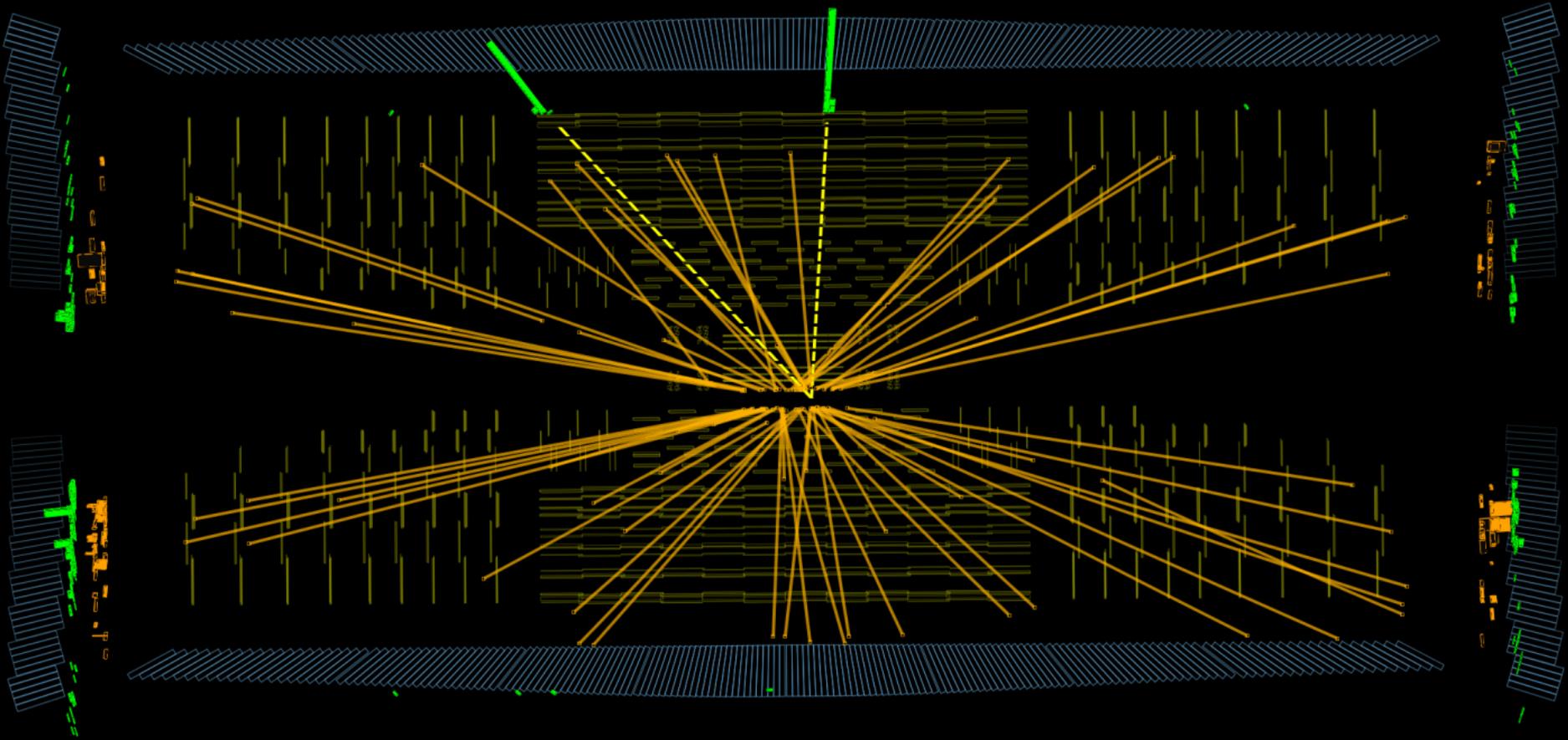
Neutroni →



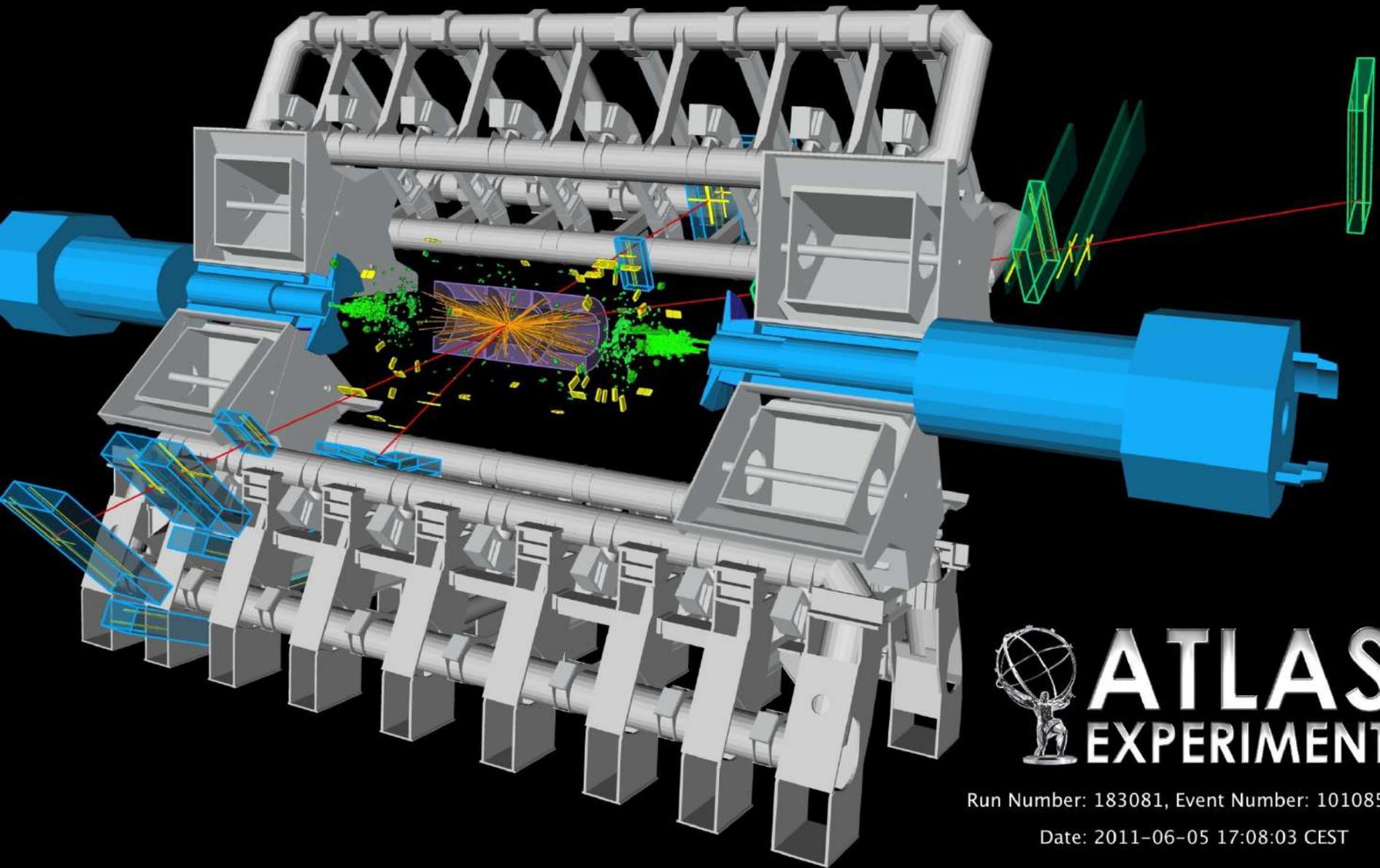
Schema del Rivelatore CMS a LHC



Bosone di Higgs ($H \rightarrow \gamma\gamma$) a CMS



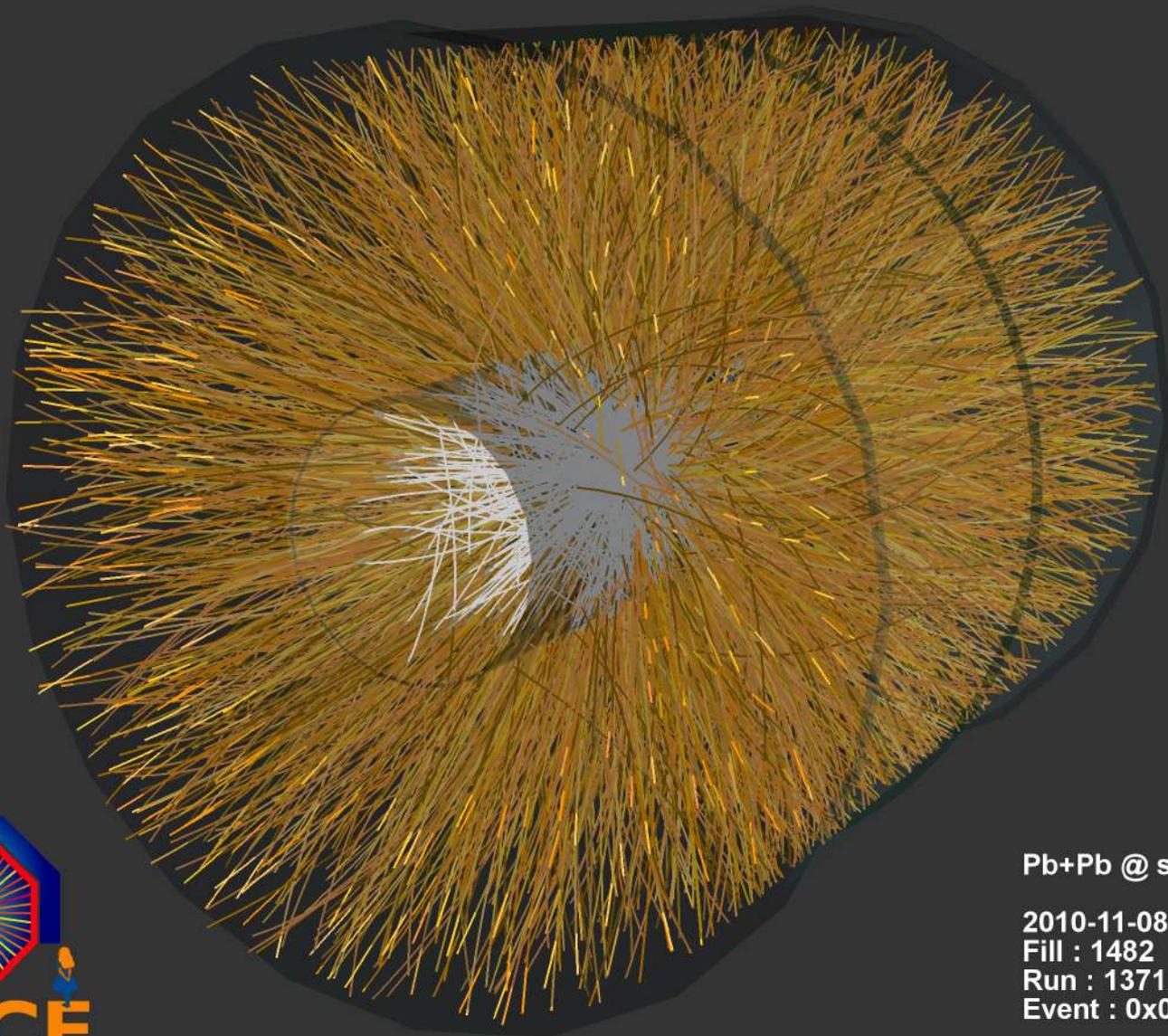
Higgs ($H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$) at ATLAS



ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 183081, Event Number: 10108572

Date: 2011-06-05 17:08:03 CEST



Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV

2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693



Selezione e analisi dati

Un rivelatore a LHC prende **40M** di «foto» al secondo ognuna da **100 MB = 4 PB/s**

La prima selezione è fatta da un hardware sul rivelatore (L1 trigger):
si scelgono le migliori **100k** foto e si comprimono a **1 MB** ognuna = **100 GB/s**

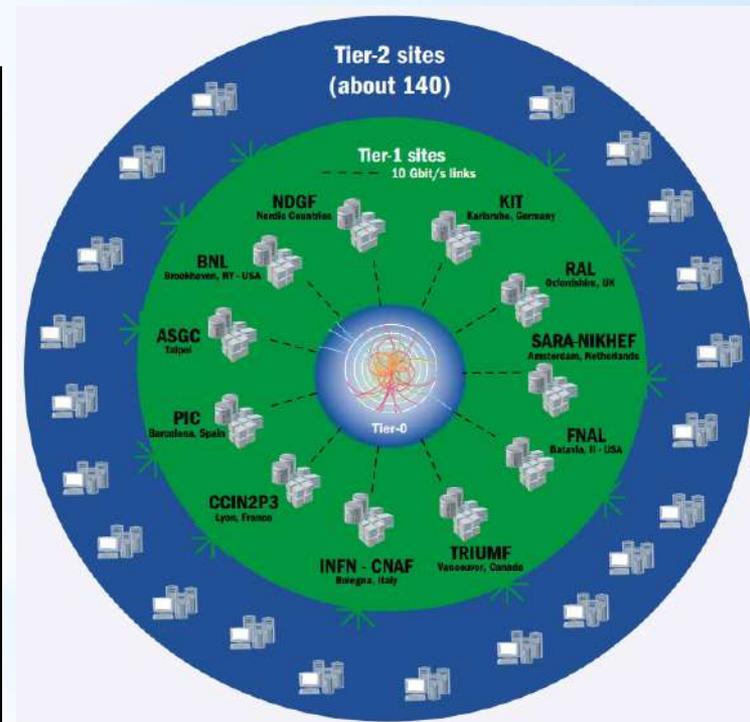
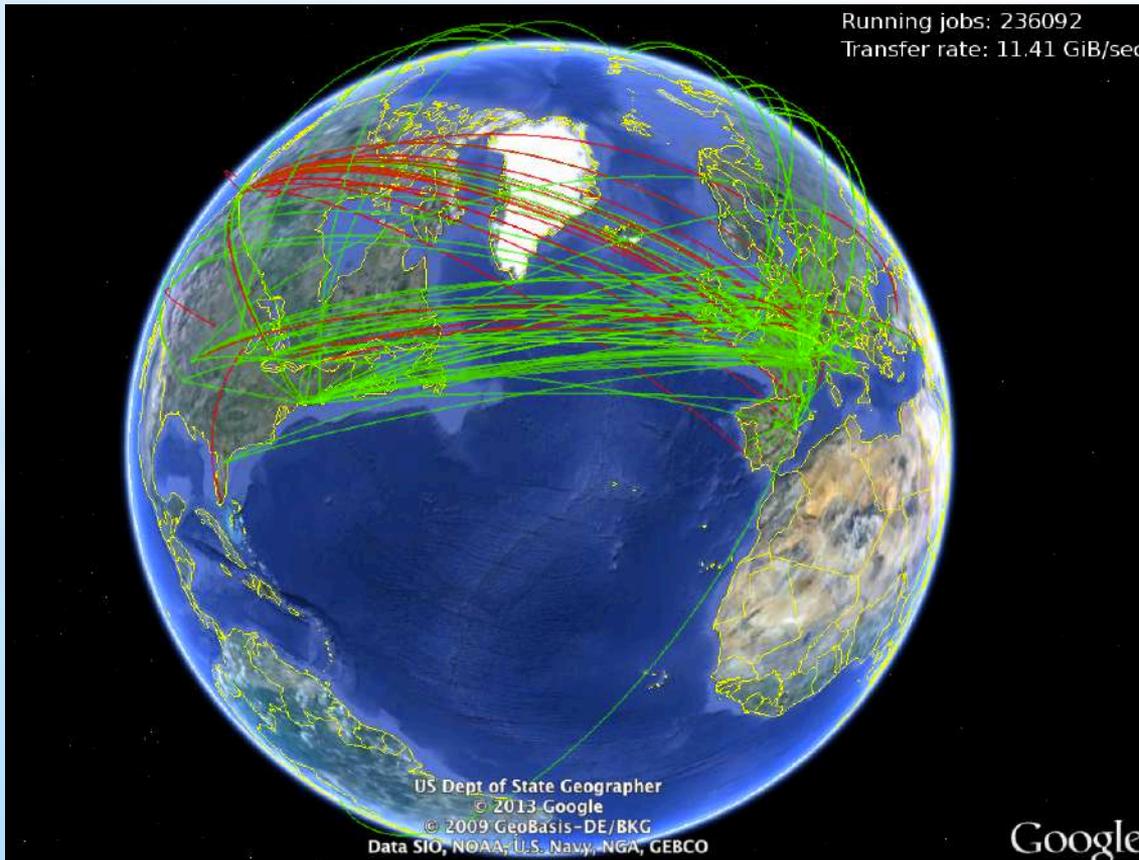
La seconda selezione è fatta da un software (L2 trigger) che gira su 50,000 CPU Intel:
si scelgono le migliori **300** foto e si salvano su disc = **10 PB/y** (3M DVD)



GRID Computing

Questi dati vengono distribuiti in tutto il mondo e analizzati dai ricercatori per mezzo della **GRID**: un'infrastruttura che permette l'accesso trasparente alla potenza di calcolo e allo storage dei dati distribuiti in tutto il mondo

100,000 computer sparsi in 34 paesi e collegati da Internet ultraveloce (10 Gb/s)

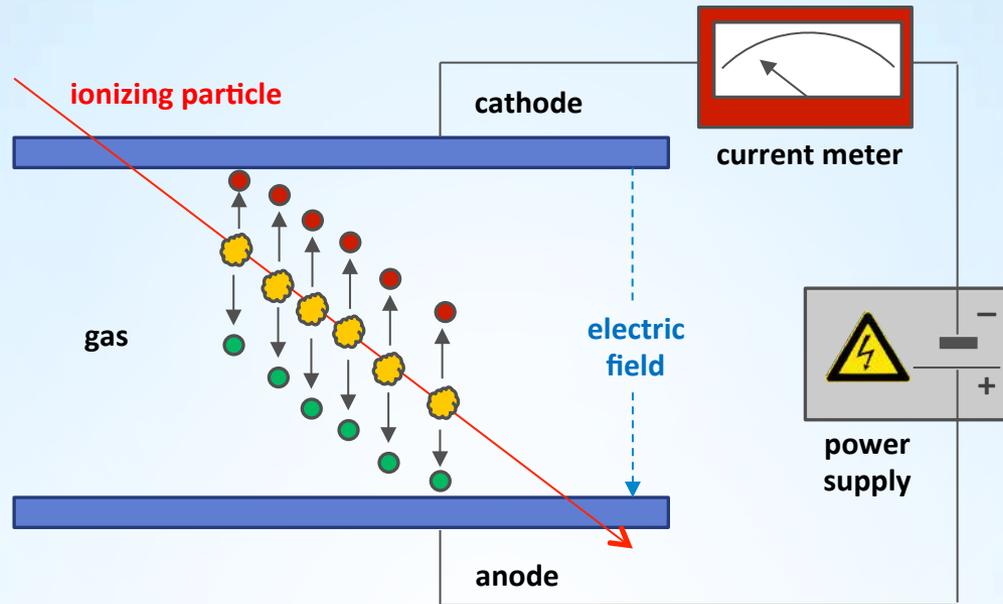


Rivelatori di Particelle

Parte 2

Daniilo Domenici

Rivelatori a Gas: principio di funzionamento



Il rivelatore più semplice è costituito da **due elettrodi immersi in un gas** tra i quali si produce **un campo elettrico**

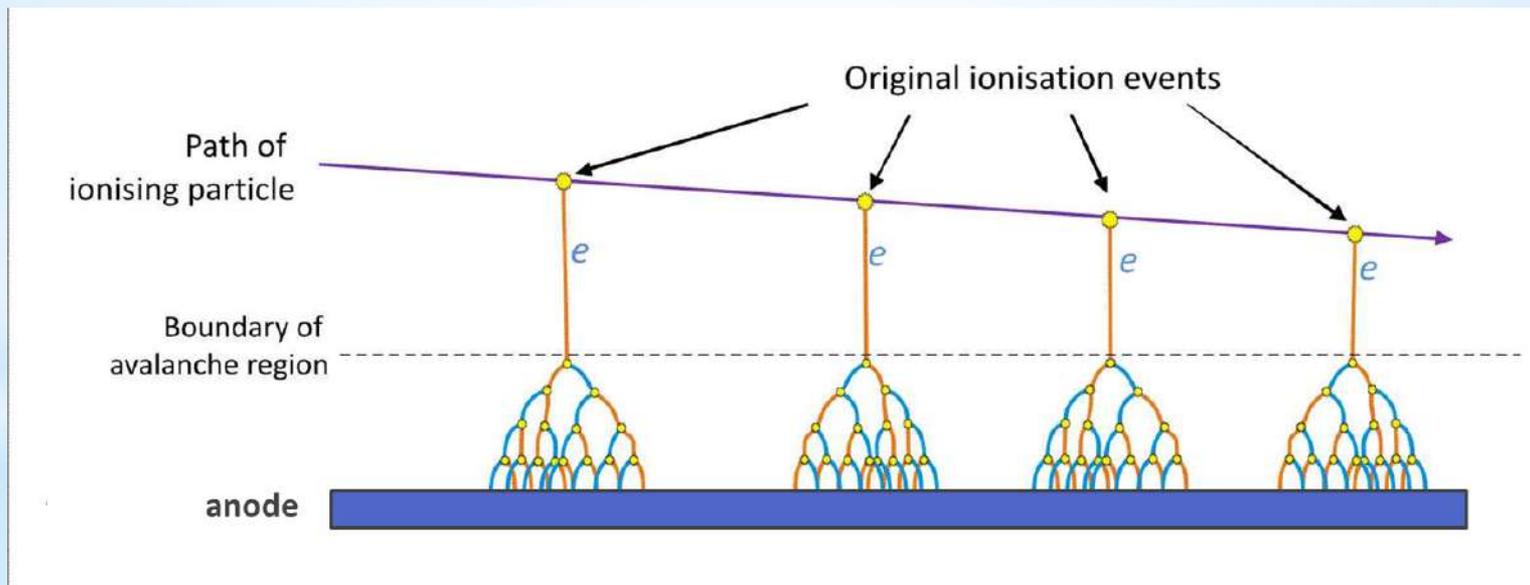
Una **particella ionizzante** che attraversa il rivelatore collide con le molecole del gas e produce **coppie di elettroni e ioni positivi**

Il campo elettrico separa le cariche che muovendosi verso gli elettrodi producono un **segnale elettrico**

Rivelatori a Gas Proporzionali

Se il campo elettrico è sufficientemente intenso gli elettroni vengono accelerati fino ad innescare una **Moltiplicazione a Valanga**

I rivelatori a gas più usati in fisica delle alte energie sono i **Rivelatori Proporzionali**, in cui la carica finale raccolta sull'anodo è proporzionale alla **ionizzazione primaria**, quindi anche all'energia rilasciata nel gas dalla particella ionizzante



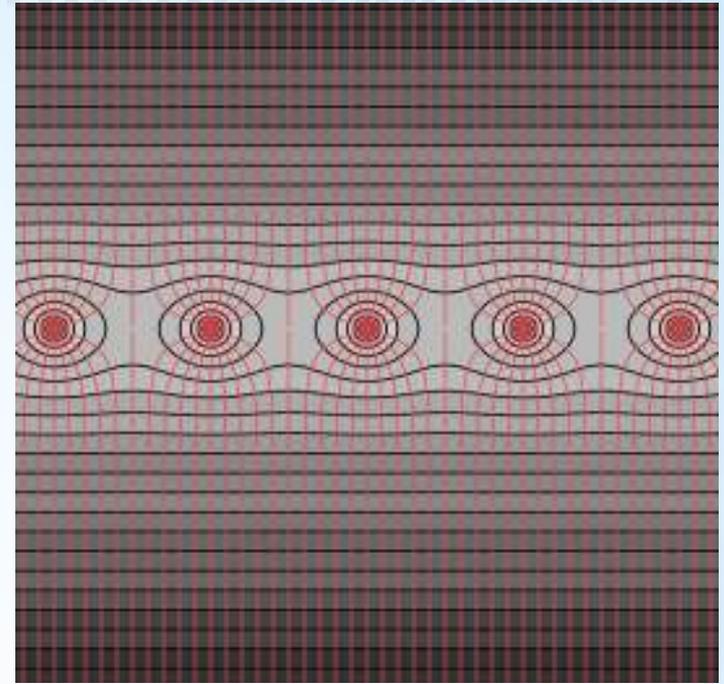
Nei **Contatori Geiger** invece il segnale è indipendente dall'energia rilasciata (impiegati in misure di radioattività ambientale)

Camere Proporzionali Multifilo (MWPC)

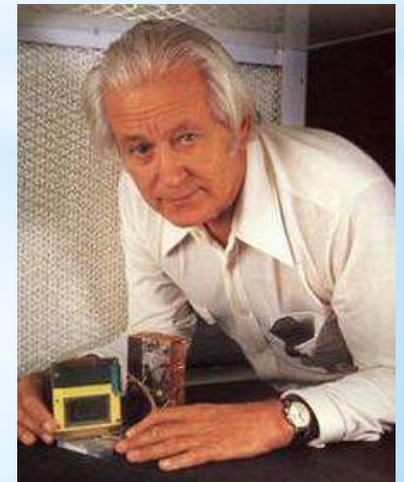
Il rivelatore è formato da **molti fili paralleli** posti a una distanza di **~ 2 mm**

Il segnale elettrico si forma sul filo più vicino alla particella dando una **informazione sulla sua posizione** (tipica risoluzione spaziale **~ 0.1 mm**)

I rivelatori a gas sono usati per coprire grandi superfici



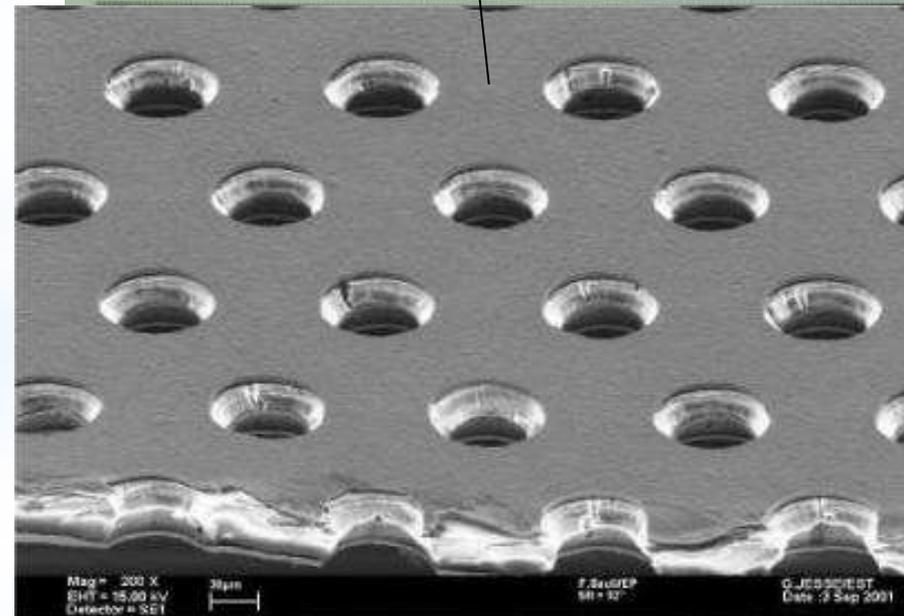
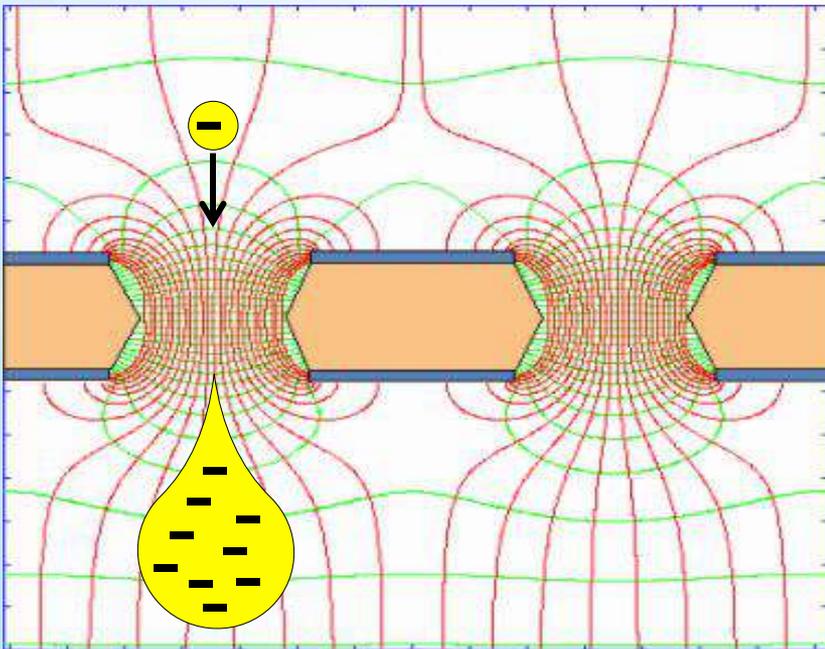
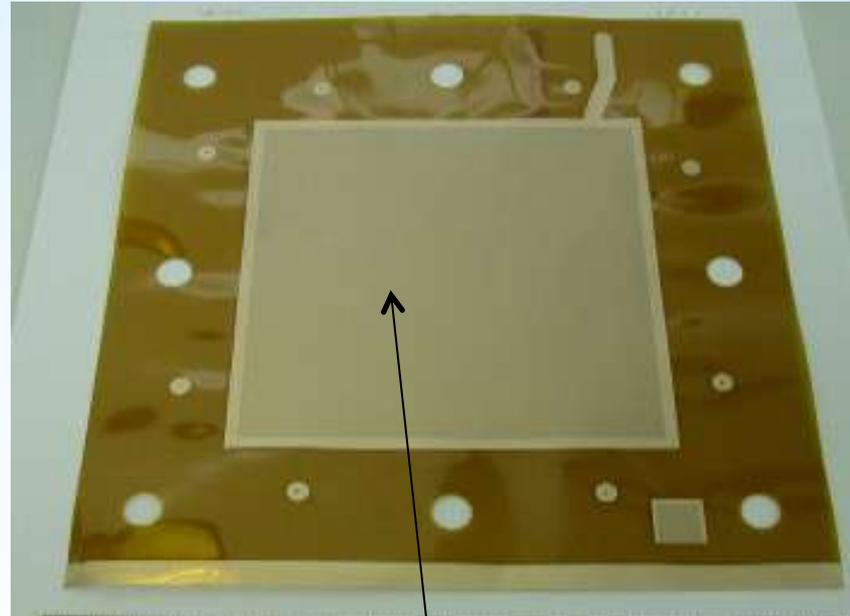
G. Charpak
Nobel 1992



Rivelatori GEM (Gas Electron Multiplier)

Costituiti da un sottile foglio **kapton** ricoperto di **rame** su entrambi i lati e *microforato* (diametro $70\ \mu\text{m}$, distanza $140\ \mu\text{m}$).

Una **differenza di potenziale (400 V)** tra le 2 facce crea un intenso **campo elettrico** all'interno dei fori che innesca la *moltiplicazione a valanga* degli elettroni



Rivelatori a Semiconduttore

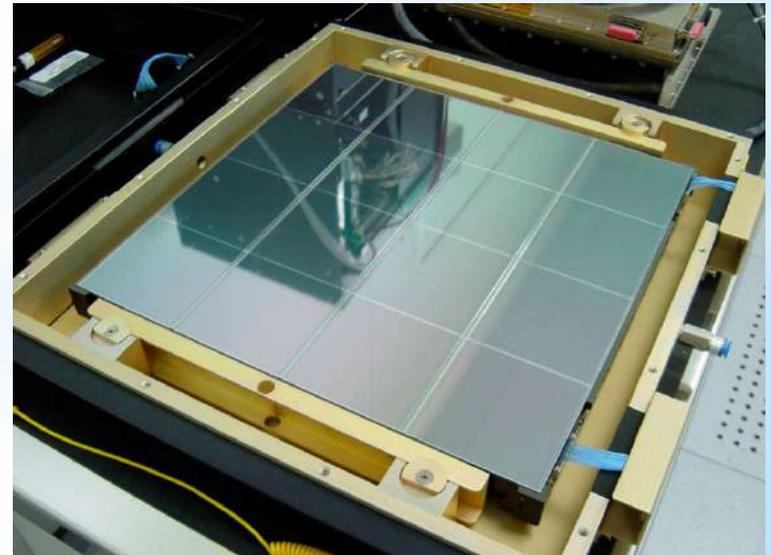
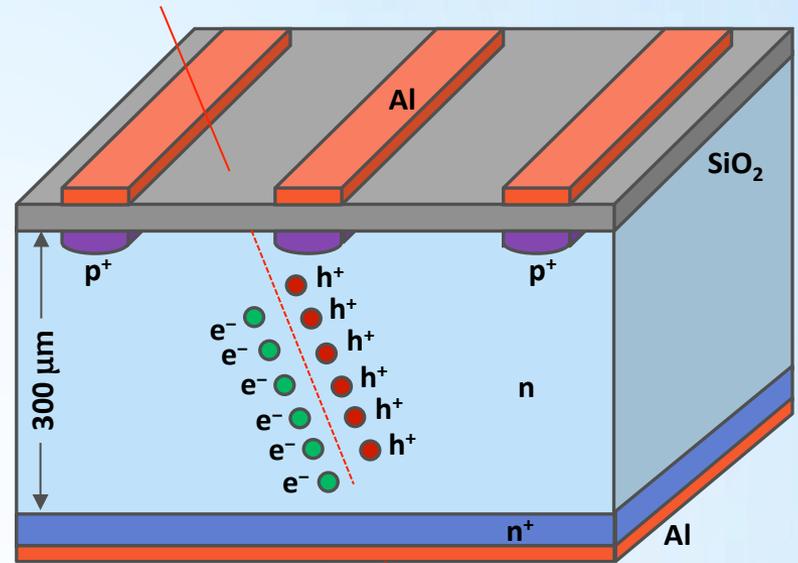
L' elemento attivo è un sottile strato di
Semiconduttore drogato,
principalmente **Silicio**
(ma anche **Ge**, **ZnCdTe**, **Diamante**)

Una **particella ionizzante** che attraversa il rivelatore collide con il materiale semiconduttore e produce **coppie di elettroni (e^-) e lacune positive (h^+)**

Il campo elettrico separa le cariche che muovendosi verso gli elettrodi producono un **segnale elettrico**

A differenza dei rivelatori a gas non c'è **Moltiplicazione a Valanga** perché la carica iniziale è già molto grande

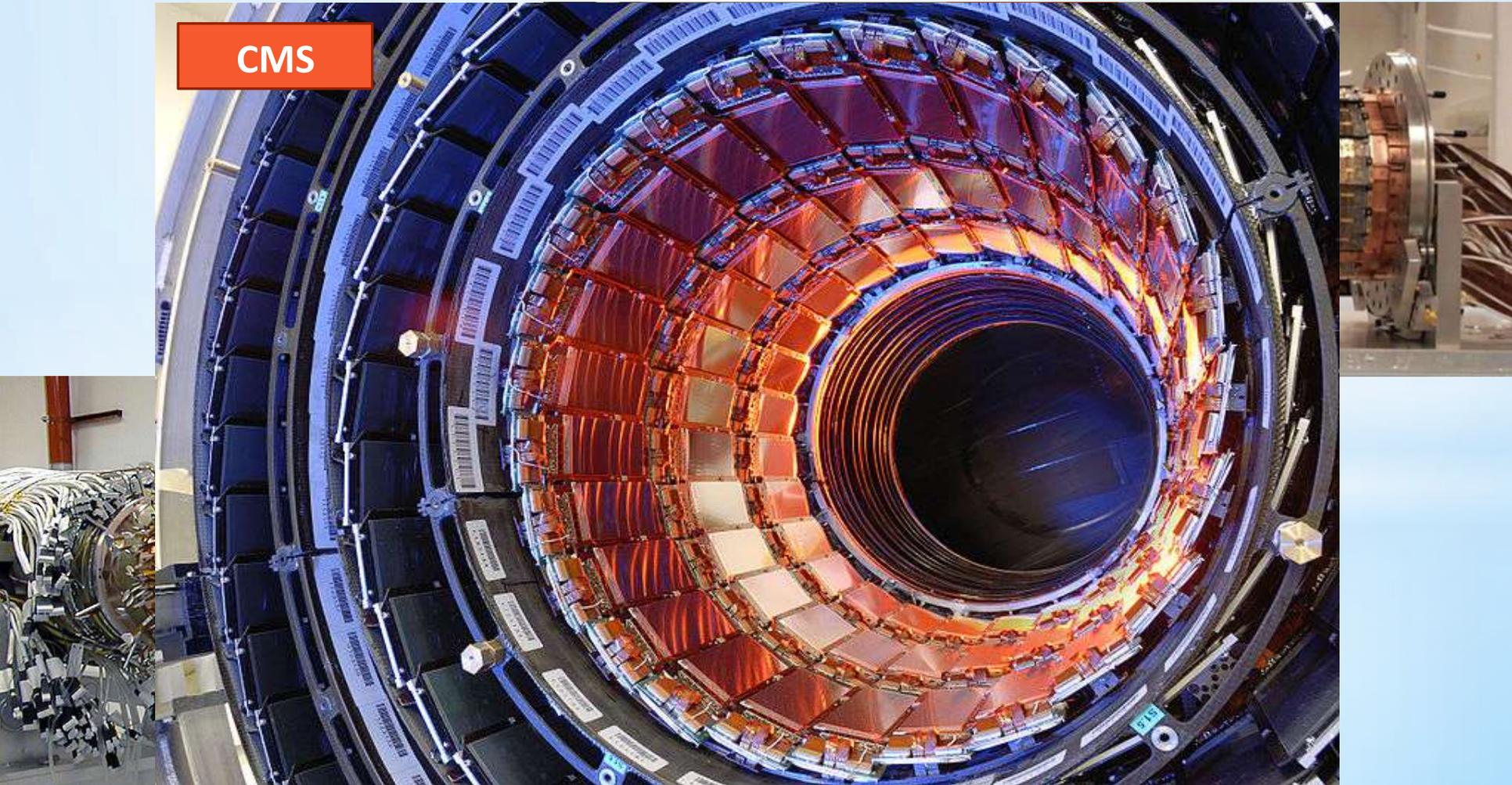
La costruzione sfrutta la tecnologia di realizzazione dei **microchip elettronici**



Rivelatori di Vertice al Silicio

I rivelatori al Silicio sono usati per coprire piccole superfici con una altissima risoluzione spaziale (fino a $\sim 10 \mu\text{m}$) ad esempio come *rivelatori di vertice* in zone molto vicine al punto di collisione dei fasci di particelle

CMS



Rivelatori a Scintillazione

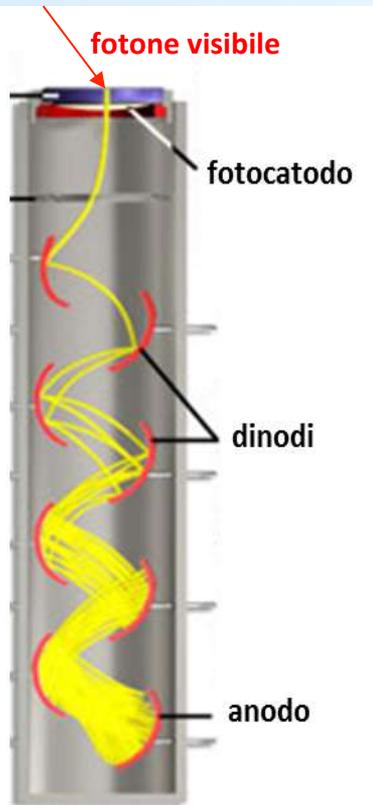
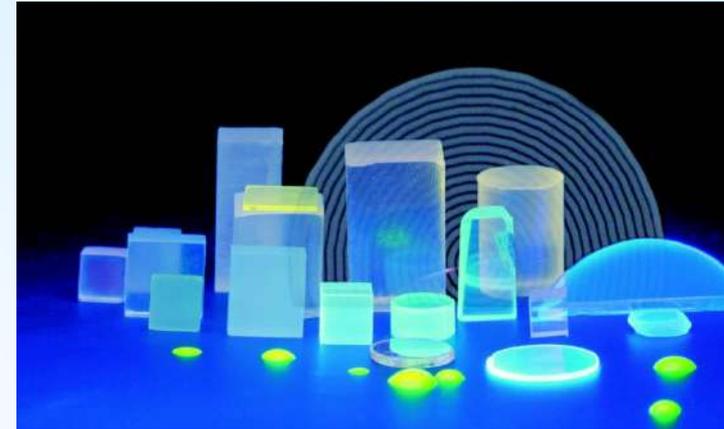
Alcuni materiali hanno la proprietà di **emettere luce visibile** se attraversati da **particelle ionizzanti**

Nal(Tl) - Csl(Tl) - BaF₂ - BGO

PbWO₄ - LYSO - YAP - Polistirene

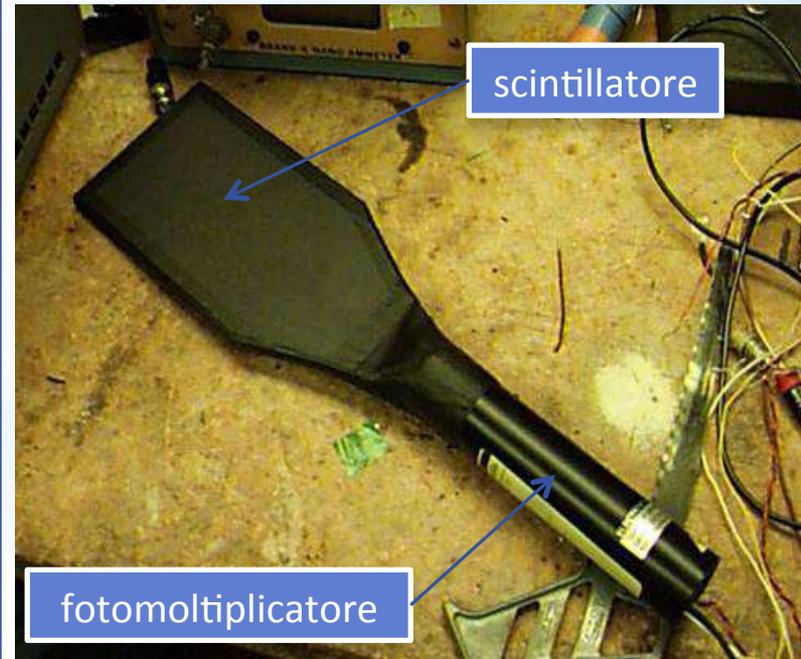
Gli scintillatori sono sempre accoppiati ai

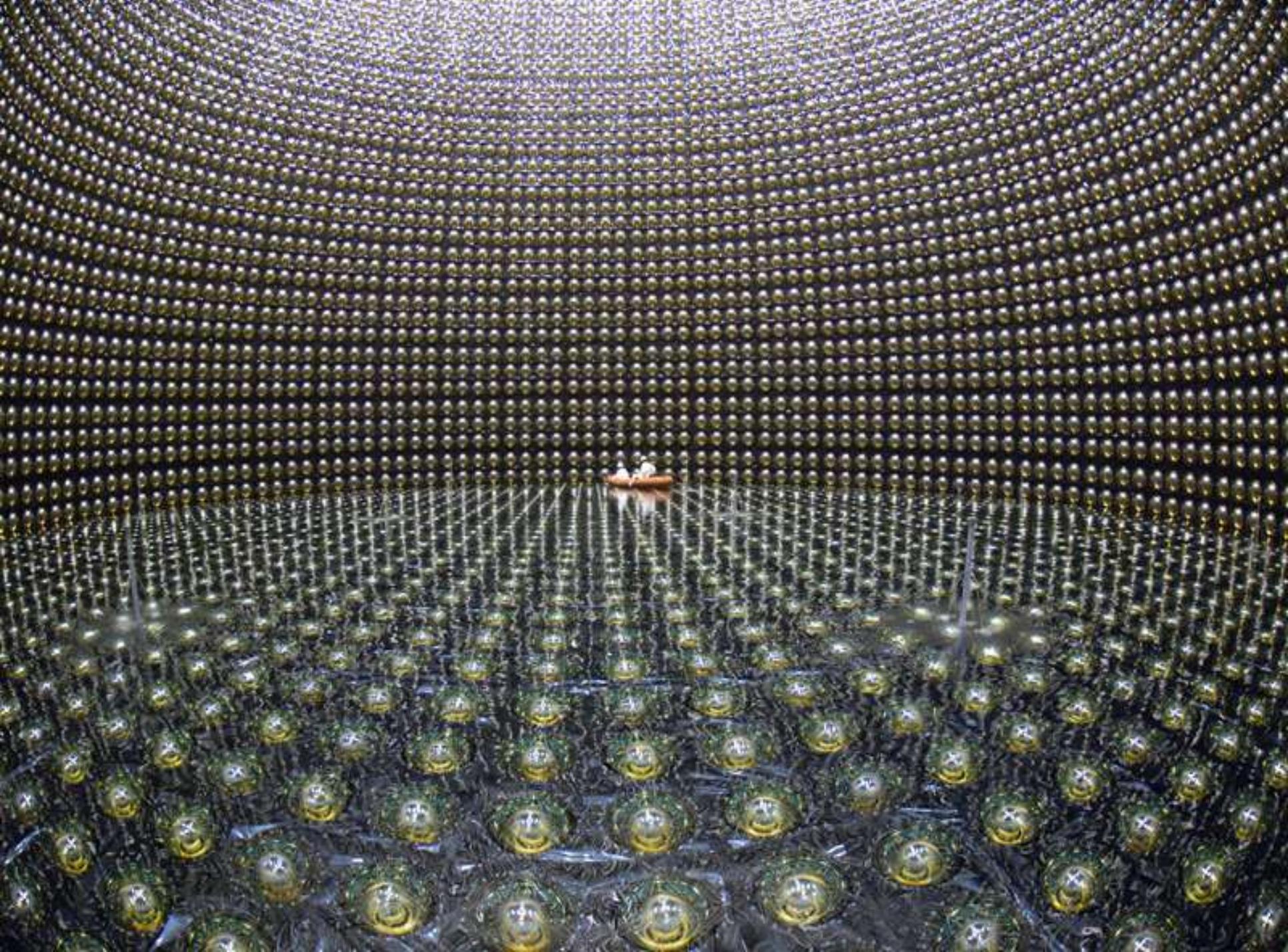
Fotomoltiplicatori



I fotomoltiplicatori sono rivelatori di *luce* basati sull'**Effetto Fotoelettrico** (Einstein Nobel 1921)

I fotoni colpiscono il *fotocatodo* che emette elettroni che moltiplicati dai *dinodi* e raccolti sull'*anodo* creando un *segnale di corrente*



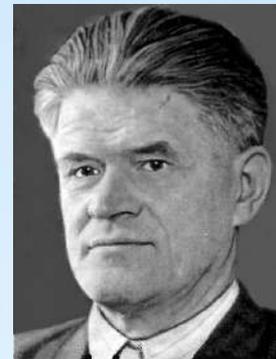


Rivelatori a Radiazione Cerenkov

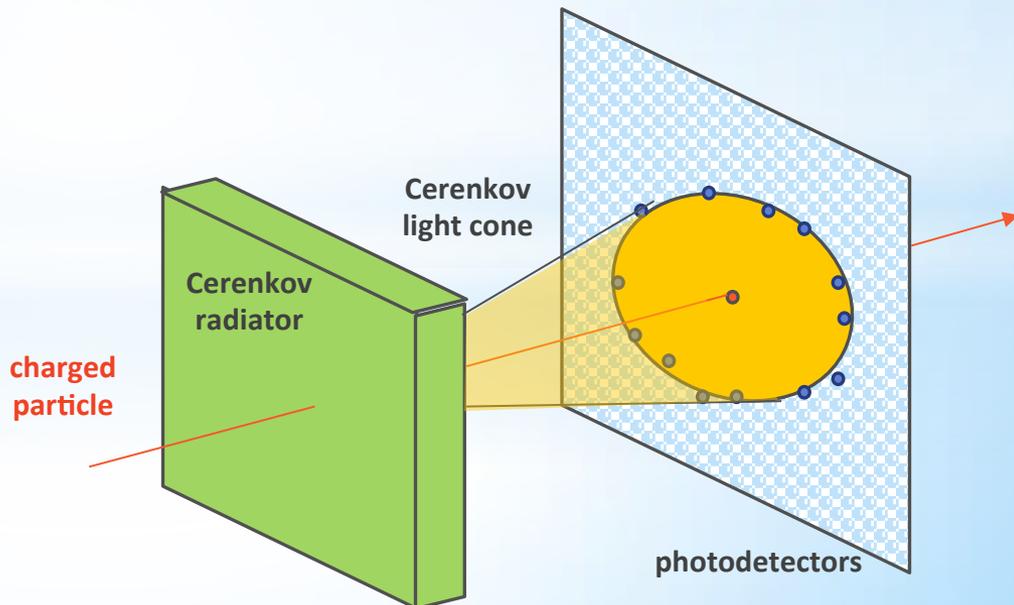
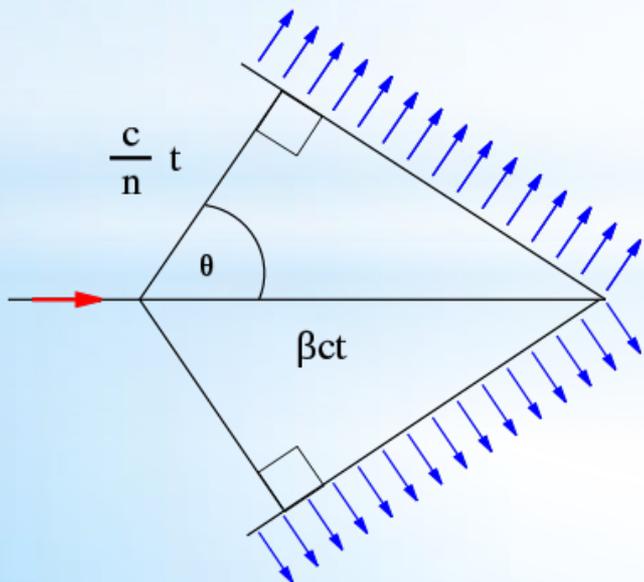
Effetto Cerenkov una particella carica che attraversa un mezzo trasparente ad una *velocità superiore alla velocità della luce* in quel mezzo emette un cono di *luce visibile*

RICH (Ring Imaging Cerenkov) è composto da un **radiatore** (n nota) e un piano di **fotomoltiplicatori**. Misurando l'angolo del cono di luce (θ) si ricava la *velocità della particella incidente*. Misurandone anche l'impulso si può **identificare** la particella dalla sua massa

$$\beta = v/c$$
$$\cos\theta = 1/\beta n$$
$$m = p/v \sqrt{1 - \beta^2}$$



Pavel Čerenkov
Nobel 1958



Esempi di Radiazione Cerenkov

Analogia con il **Cono di Mach** quando si supera la *barriera del suono* (1238 km/h)

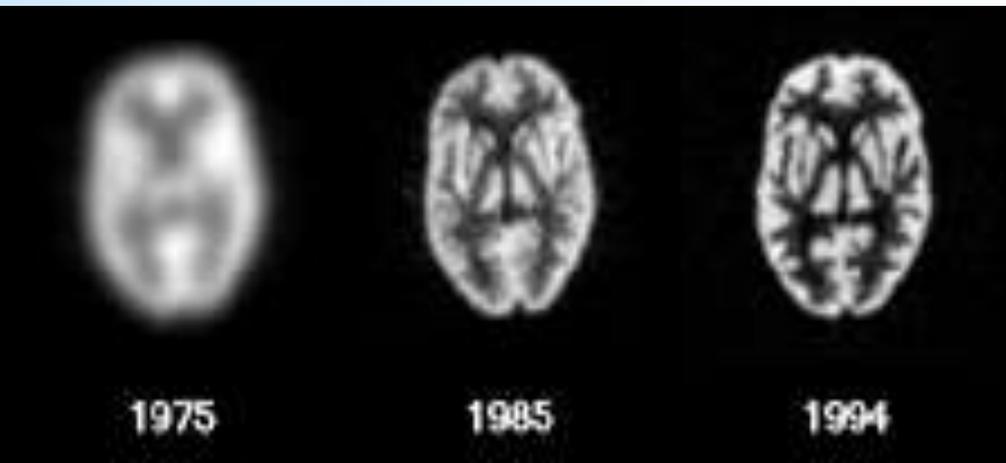
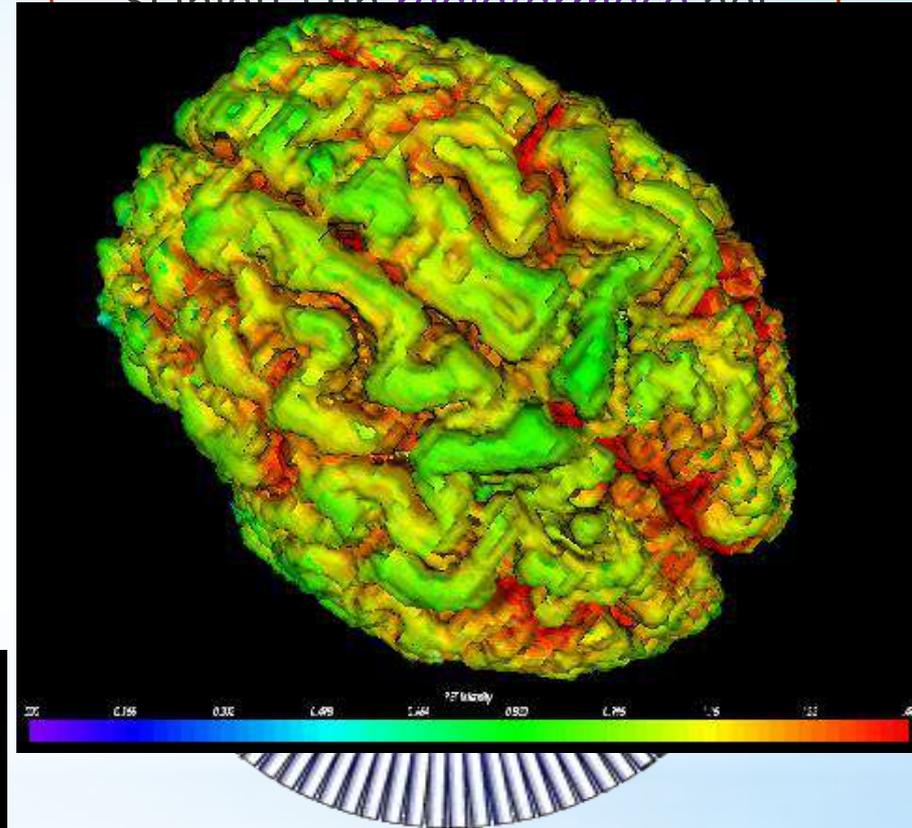


Luce Cerenkov emessa dal nocciolo di un reattore nucleare

Ricadute tecnologiche dei Rivelatori: la PET (Positron Emission Tomography)



Si inietta un *radiofarmaco* nel



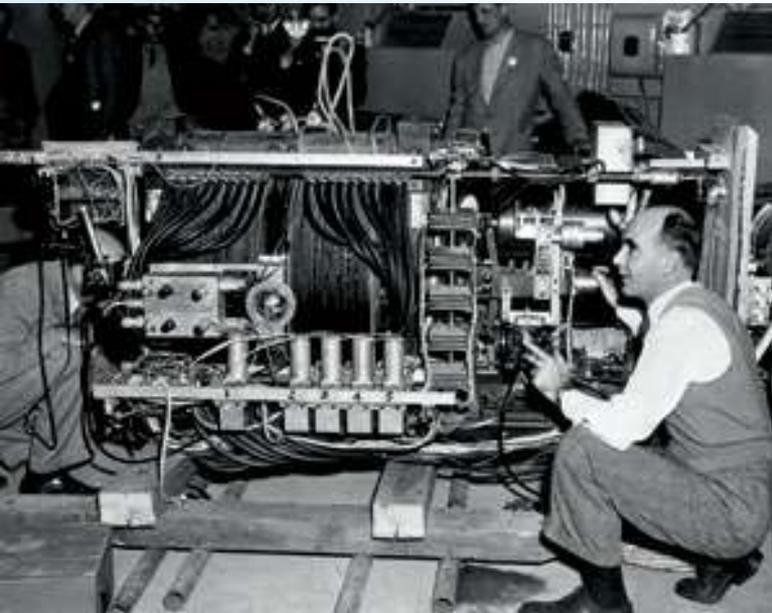
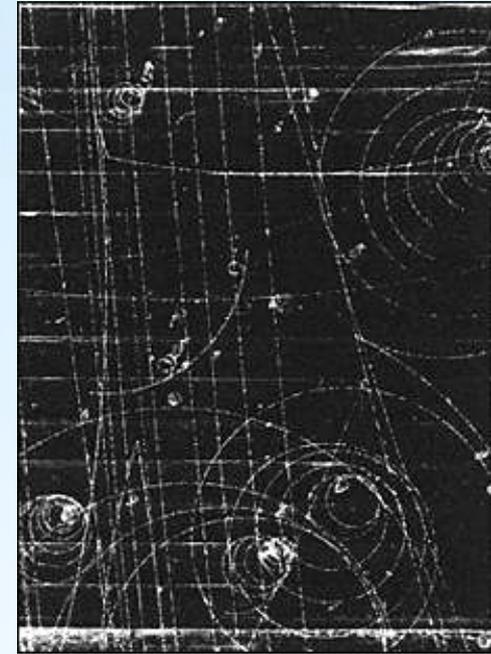
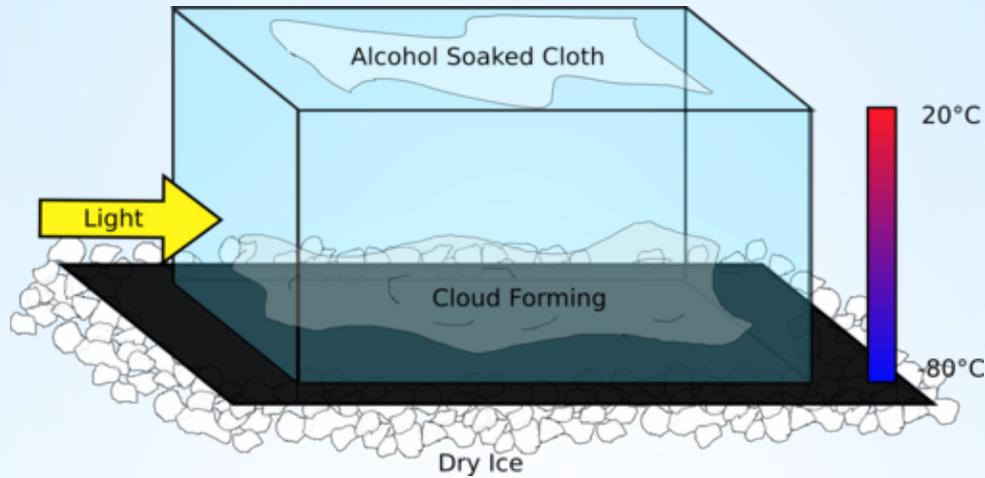
Lo sviluppo sui rivelatori ha
contribuito a migliorare la
risoluzione delle immagini

Spares
209162

Camera a Nebbia

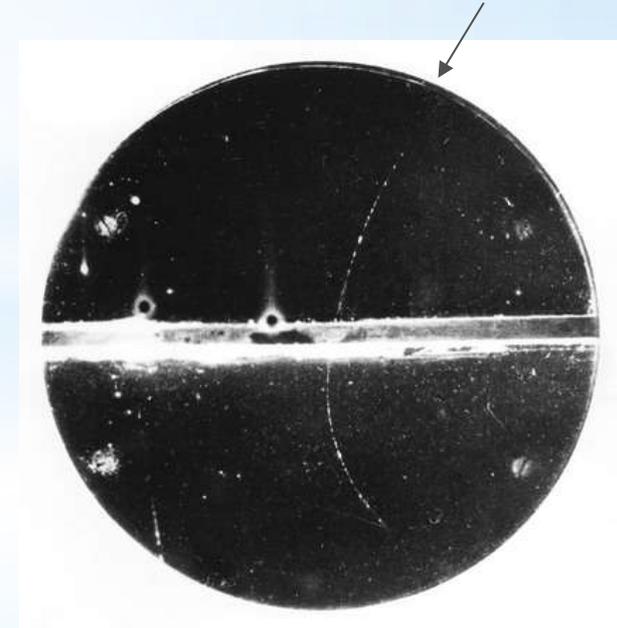
Inventata da Charles Wilson (Nobel '27)

Una particella ionizzante che attraversa un vapore supersaturo di alcool è visibile come una traccia di goccioline



Scoperta del positrone 1932

Carl Anderson (Nobel '36) trovò una traccia con la massa dell'elettrone ma che in un campo magnetico curvava in senso opposto!



Classificazione dei Rivelatori a Gas

Cambiando la **tensione applicata** si hanno 3 diversi modi di funzionamento che caratterizzano 3 tipi di Rivelatori a Gas:

- **Camera a Ionizzazione** (radioprotezione)
- **Contatore Proporzionale** (fisica sperimentale)
- **Contatore Geiger** (radioattività ambientale)

