Rivelatori di Particelle

Danilo Domenici

Cos'è un Rivelatore di Particelle

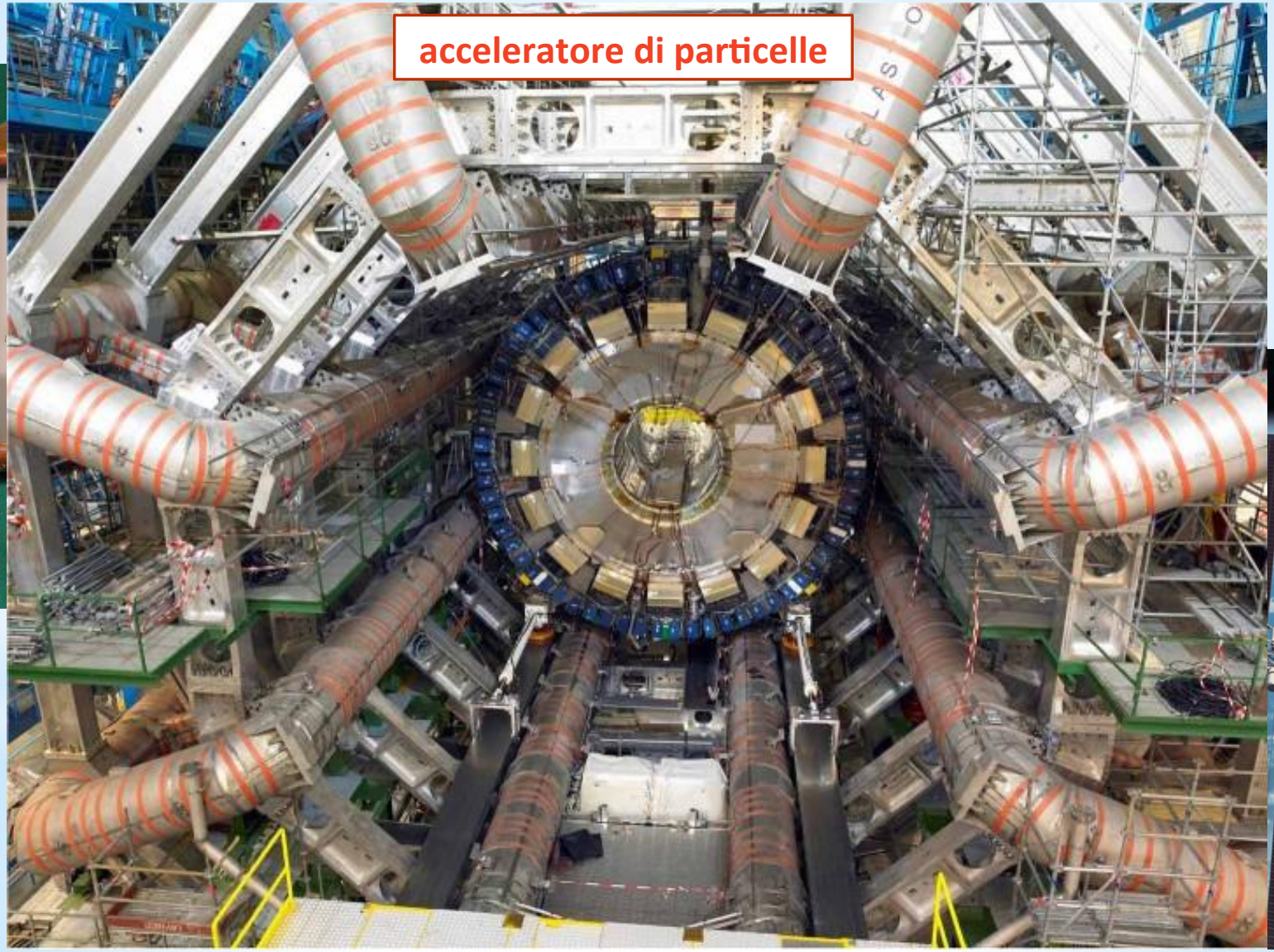
Nella *fisica sperimentale*, un **rivelatore di particelle** o **rivelatore di radiazione** è uno strumento usato per *rivelare, tracciare* e *identificare* particelle, come quelle prodotte per esempio da un **decadimento nucleare**, dalla **radiazione cosmica**, o dalle interazioni in un **acceleratore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

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

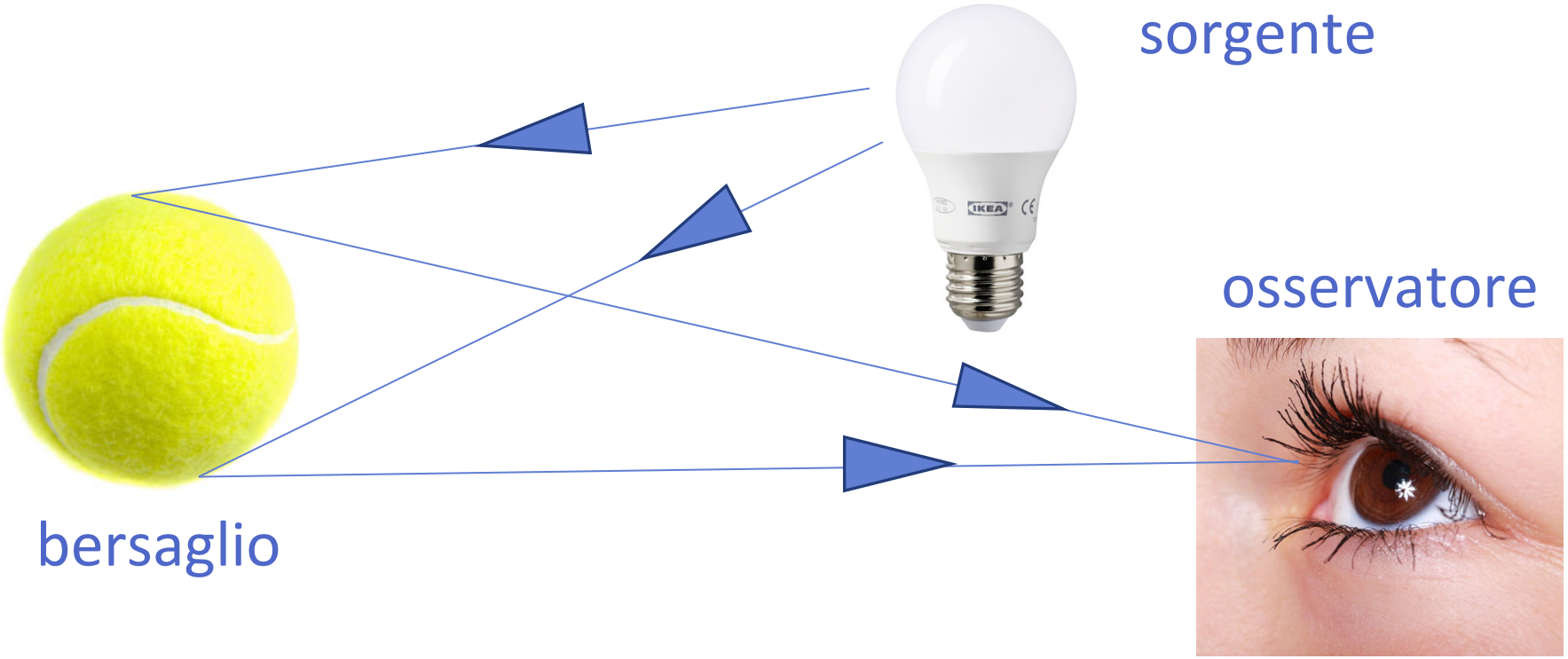
I **rivelatori di particelle** sono strumenti che producono un *segnale osservabile* quando il loro ***elemento attivo*** viene colpito dalla radiazione.

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



Un Rivelatore che abbiamo tutti: l'occhio

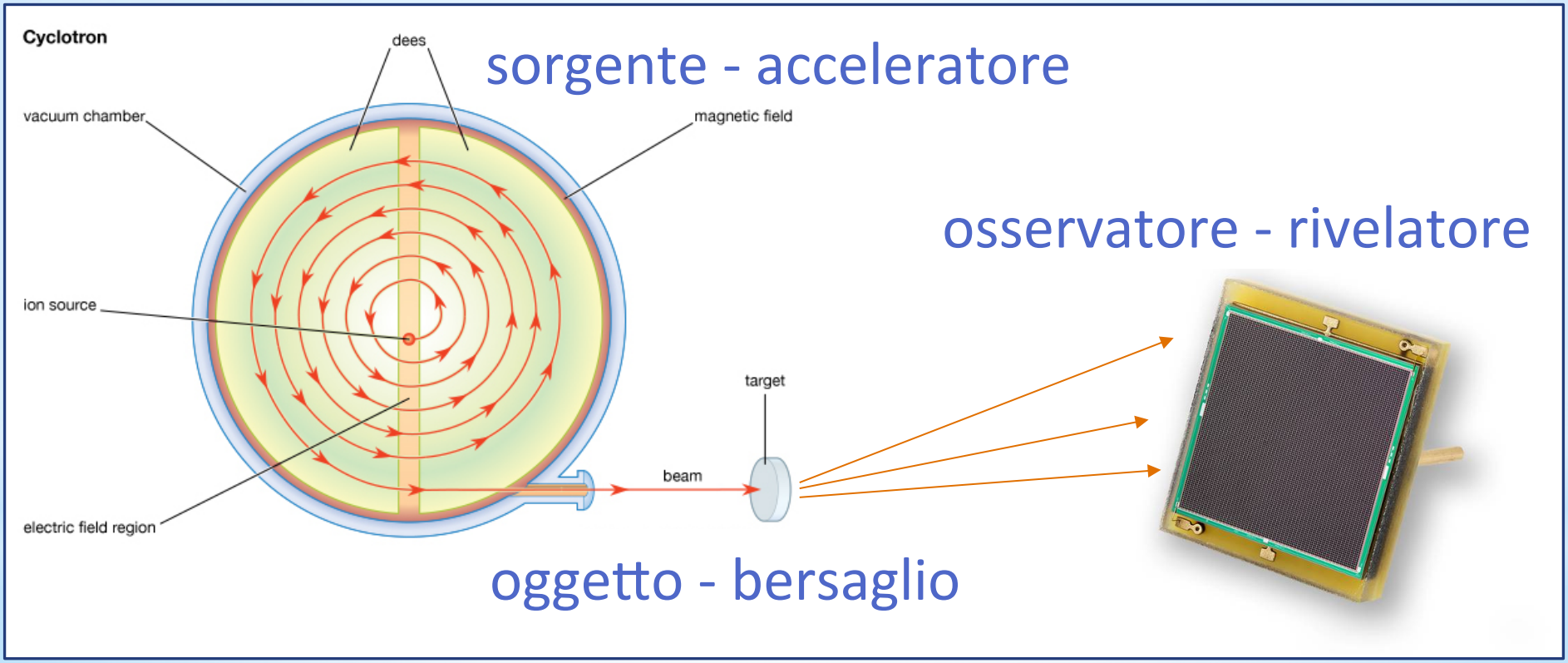


L'occhio umano è un rivelatore di particelle: i **fotoni**
I **fotoni** sono le particelle elementari di cui è costituita la luce

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

Particelle come sonde della Materia

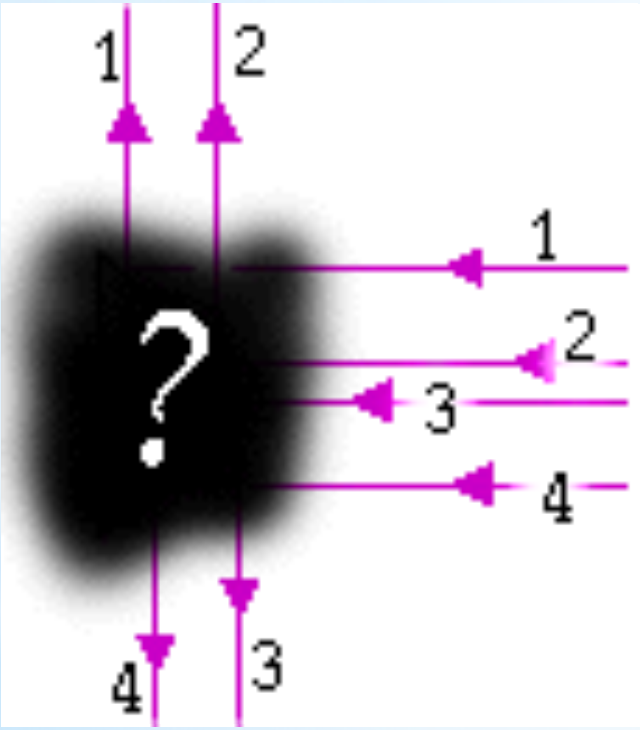
Nello stesso modo facendo rimbalzare particelle riusciamo a capire molte caratteristiche del bersaglio

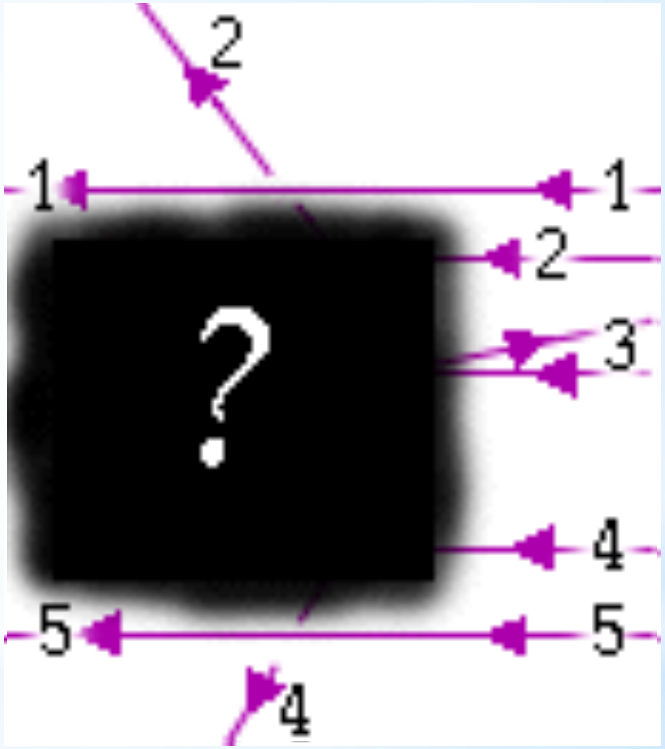


Noi «vediamo» la materia subatomica perché la colpiamo con particelle prodotte dagli acceleratori che rimbalzano sui rivelatori

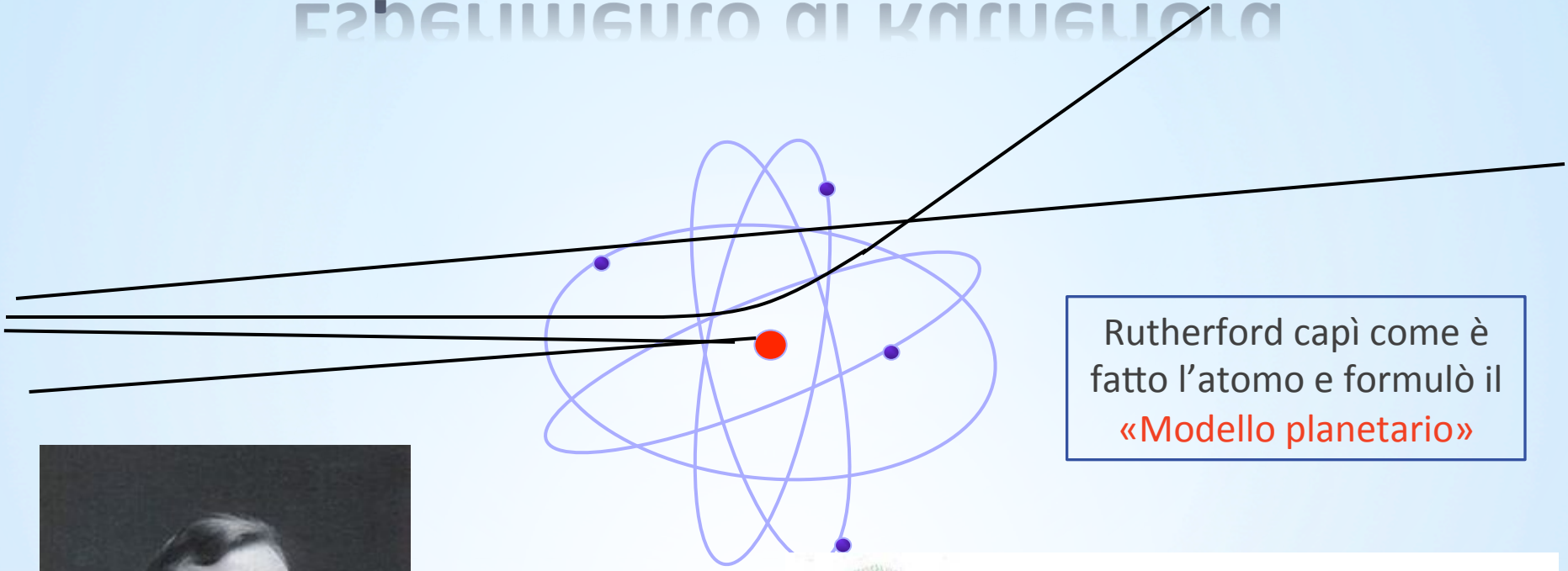
Particelle come sonde della Materia

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



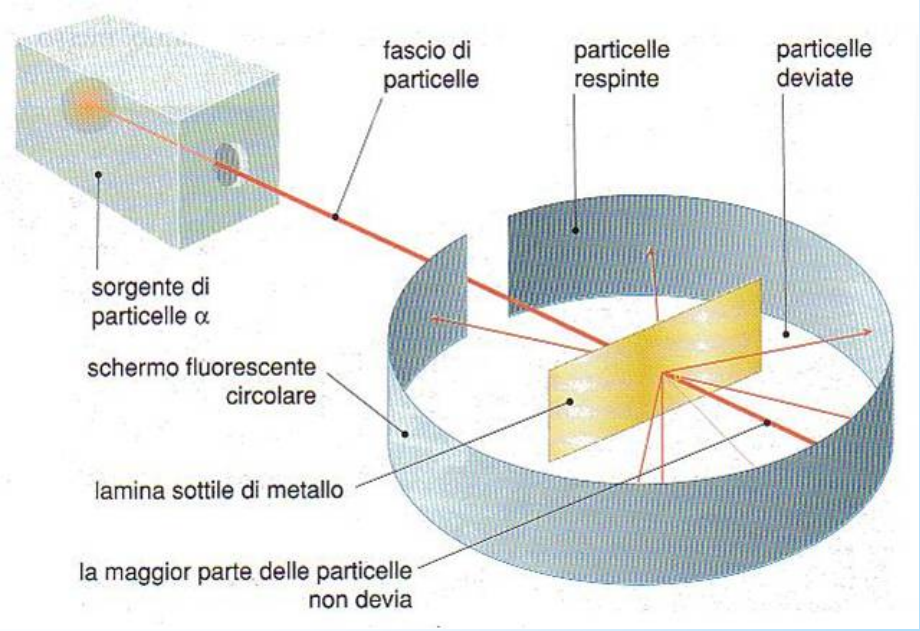


Esperimento di Rutherford



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

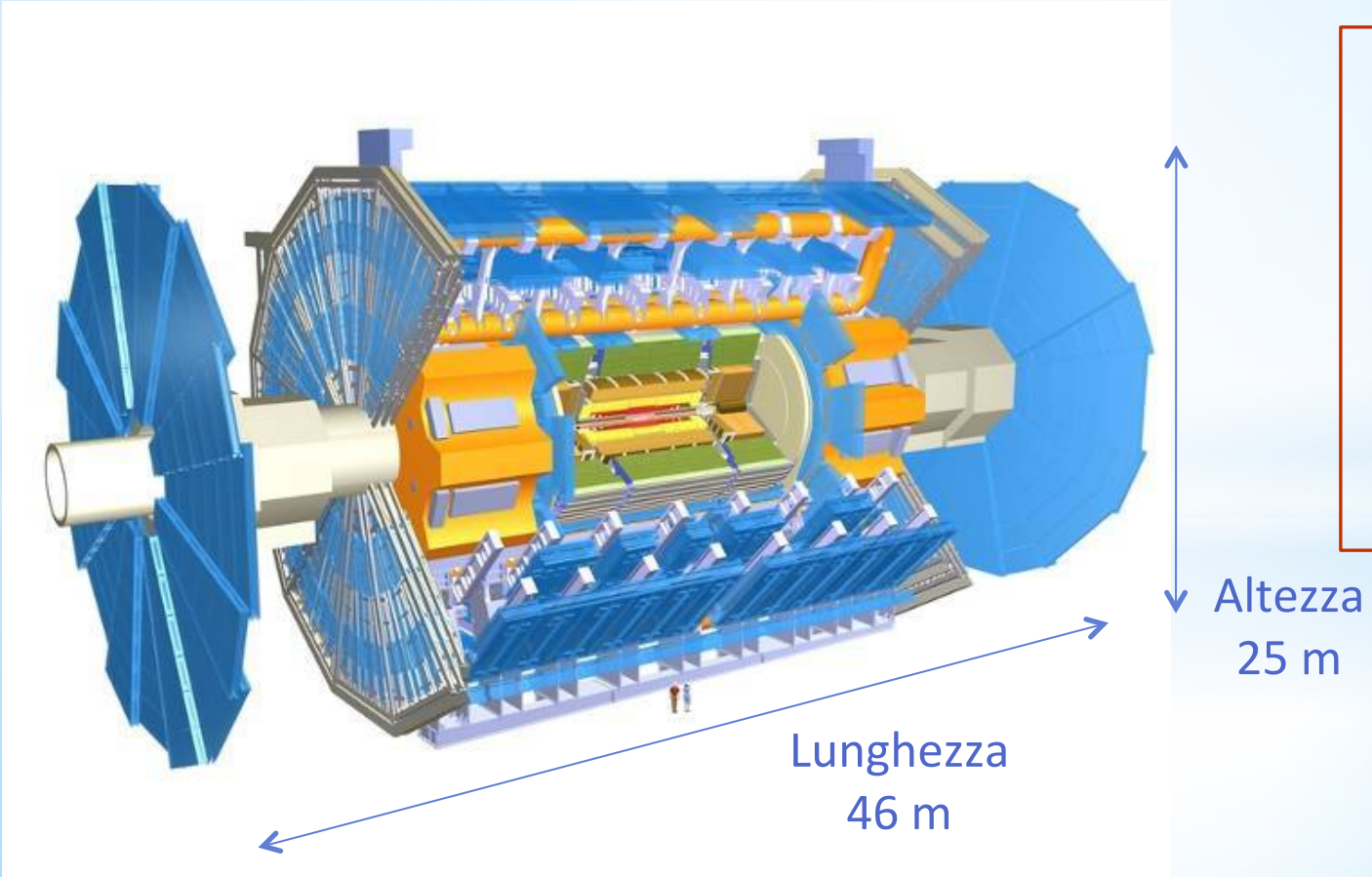
Rivelatore	Occhio umano	Schermo al fluoro
Sensibilità	Fotoni (~ 1 eV)	Alfa (~ 1 MeV)
Risposta	Impulso elettrico	Variazione cromatica
Risoluzione Spaziale	~ 100 μm	~ 1 mm
Efficienza	~ 100%	~ 100%
Tempo Morto	0.1 s – 1 s	∞

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.

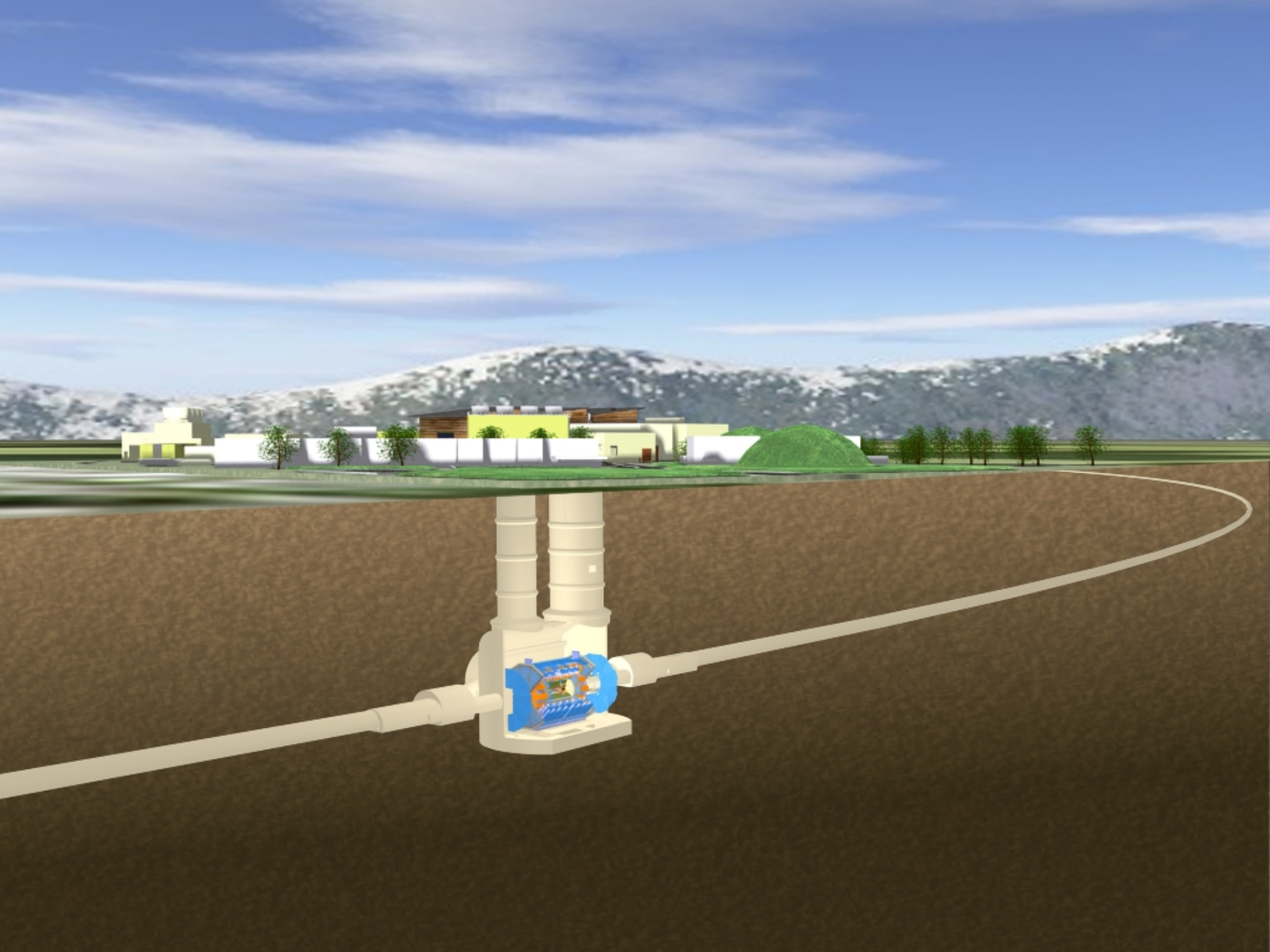
In seguito prenderò principalmente in considerazione i moderni apparati sperimentali agli acceleratori di particelle, che sono costituiti da un insieme di molti rivelatori diversi.

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 tparticelle molto vicine.
I rivelatori esterni devono coprire **superfici molto grandi**



Peso 7000 ton
Superficie rivelatori
6000 m^2
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

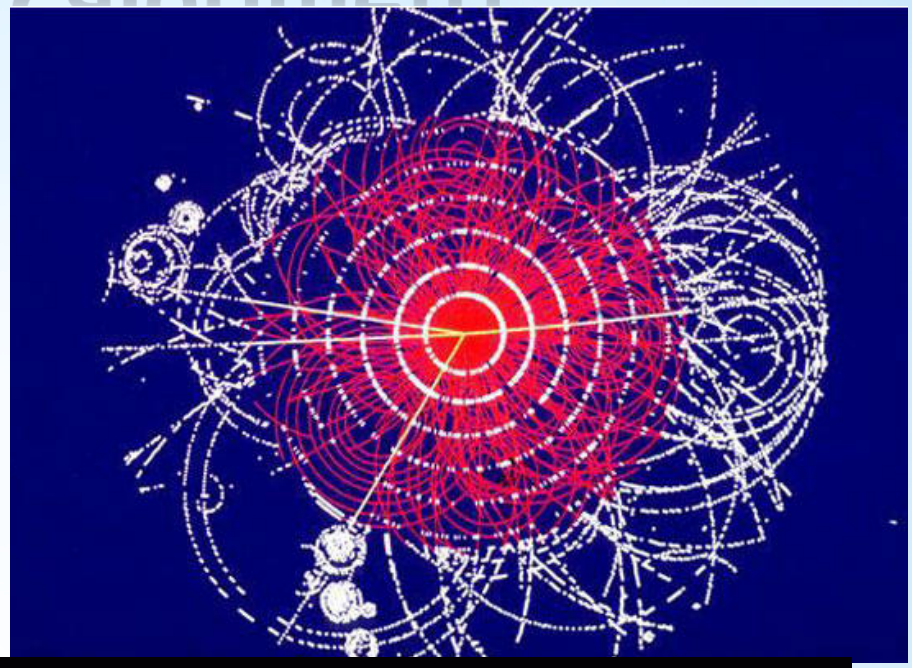
Tracciatori

Sfruttano gli **urti con gli elettroni atomici**

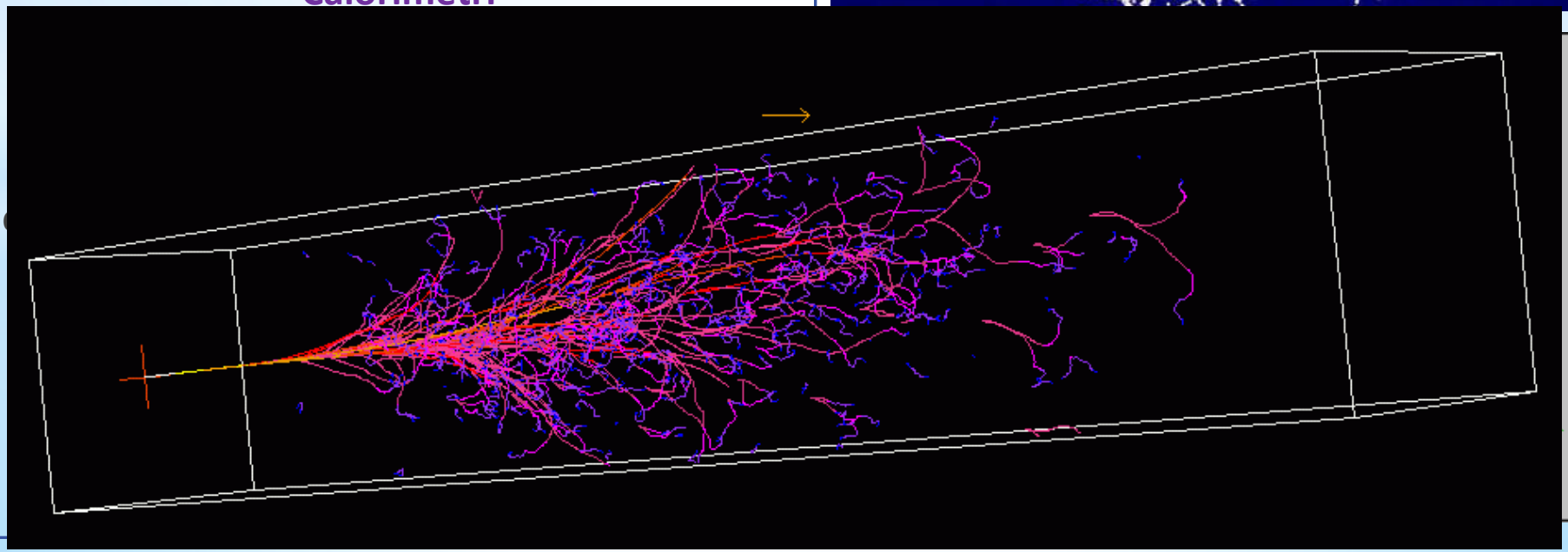
Campionano le tracce delle **particelle cariche: protoni, pioni, kaoni, elettroni, muoni**

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

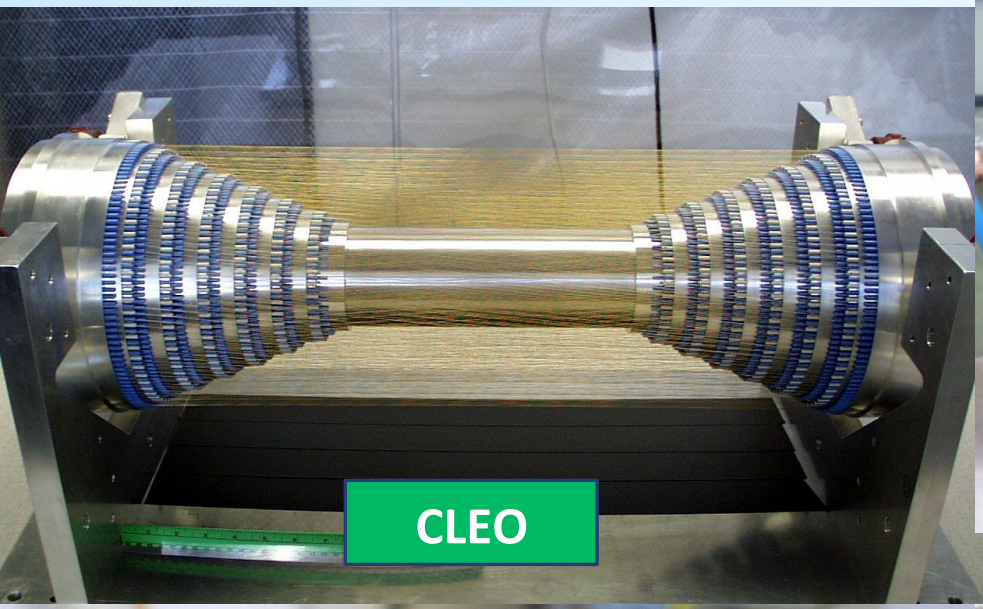
La particella esce dal rivelatore non perturbata

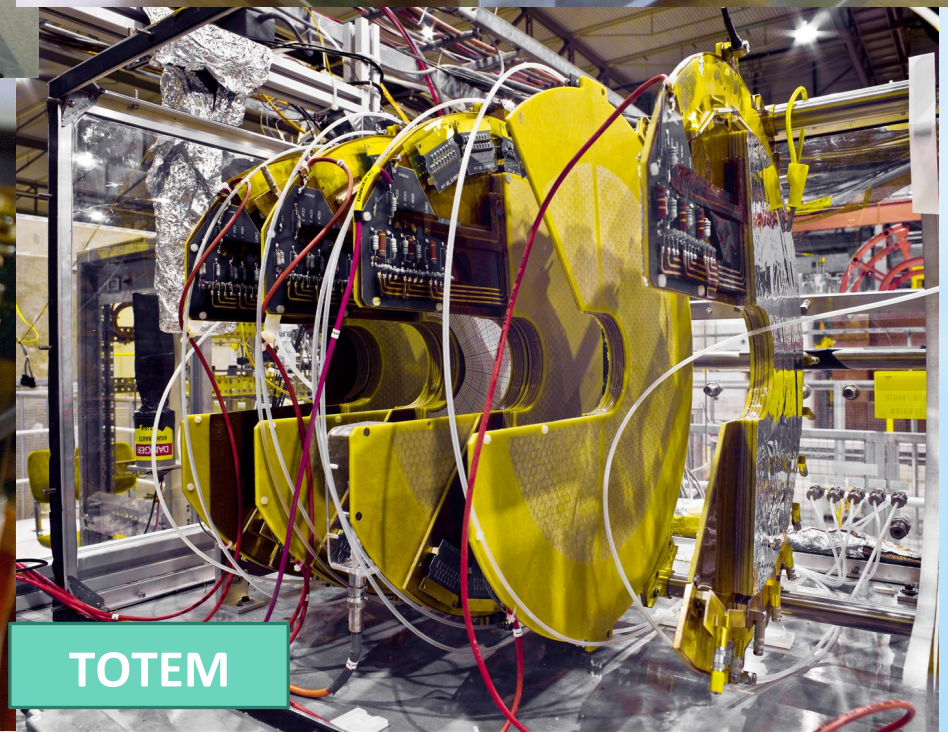


Calorimetri

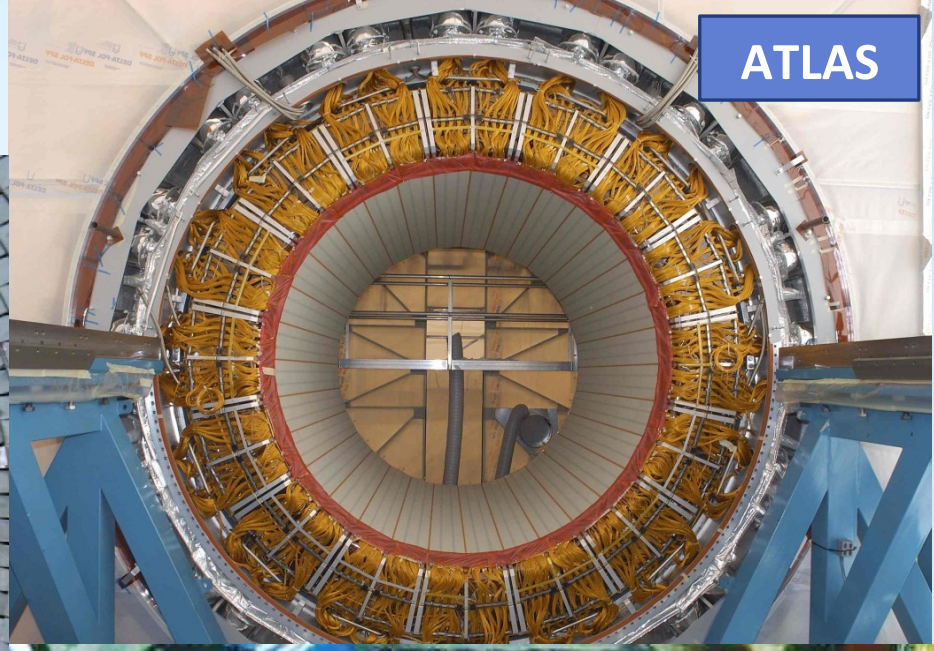


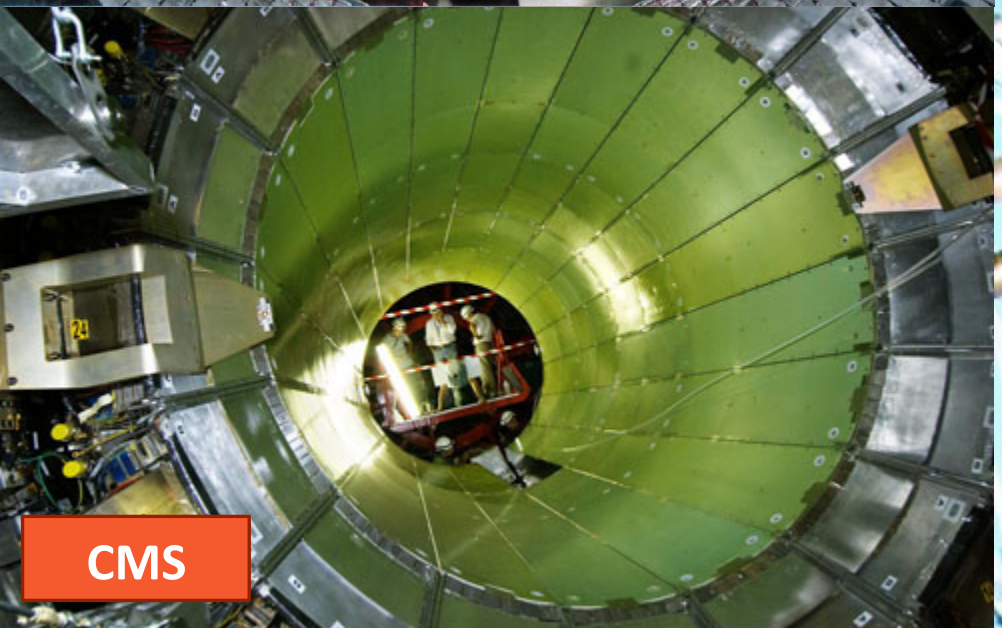
Tracciatori





Calorimetri





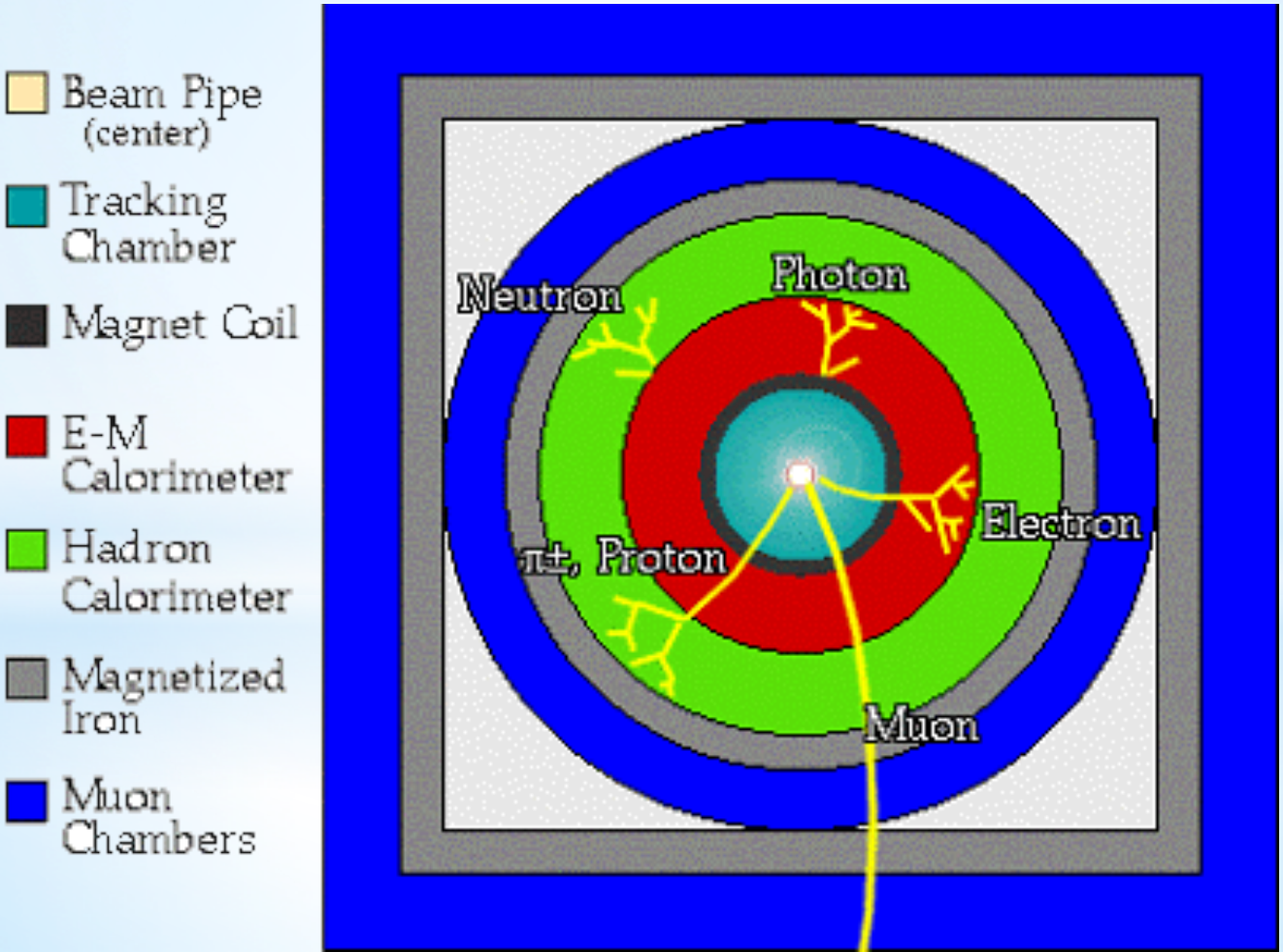
Tracciatore: particelle cariche

Magnete: piega le tracce delle particelle cariche

Calorimetro EM: elettroni, positroni e fotoni

Calorimetro adronico: adroni carichi e neutri

Rivelatore di Muoni: muoni



Analisi degli Eventi

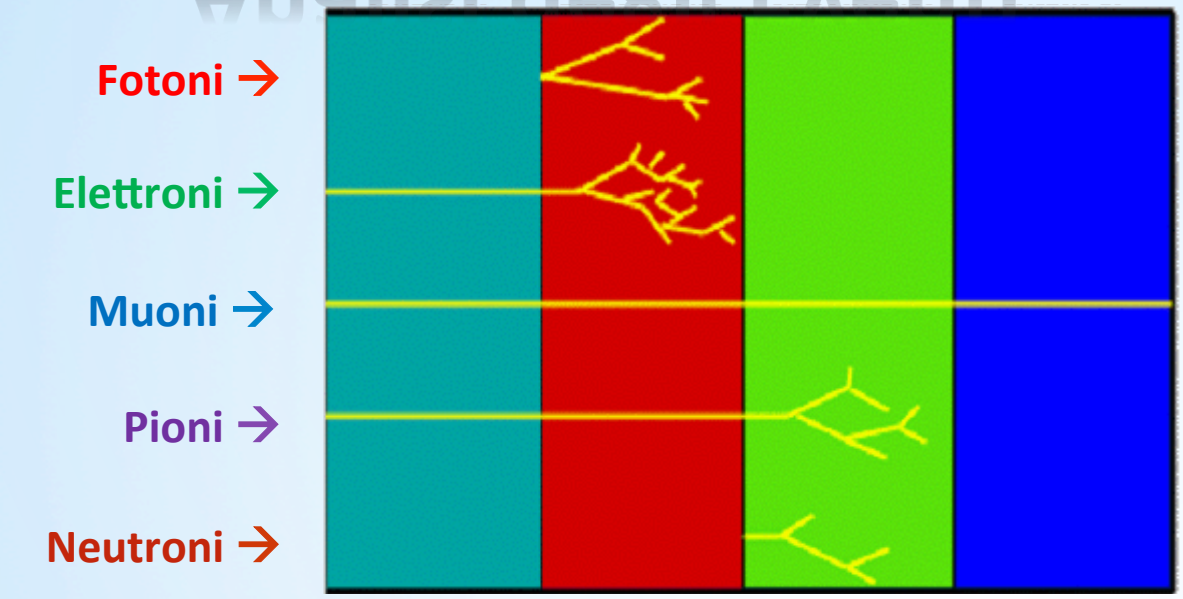
Fotoni →

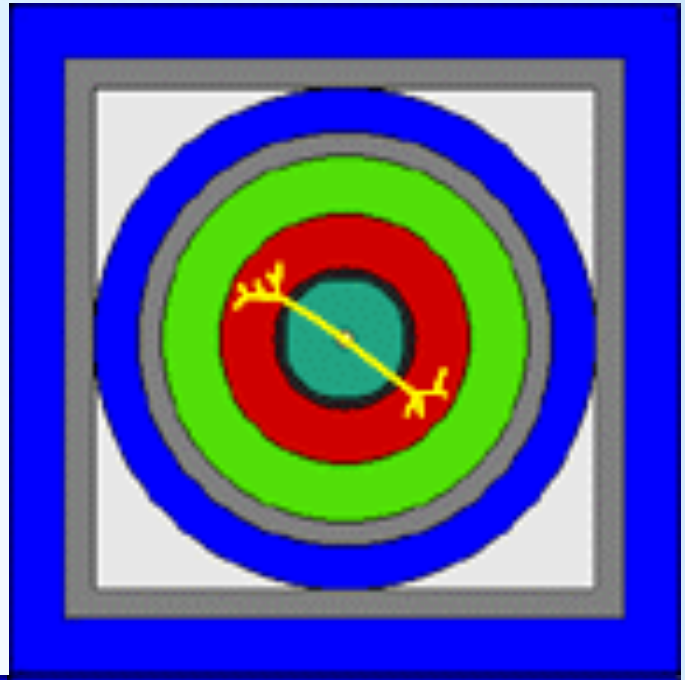
Elettroni →

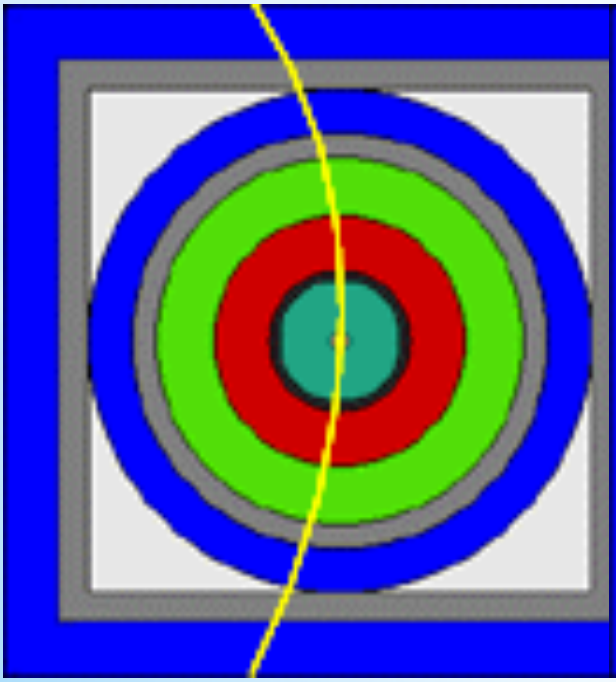
Muoni →

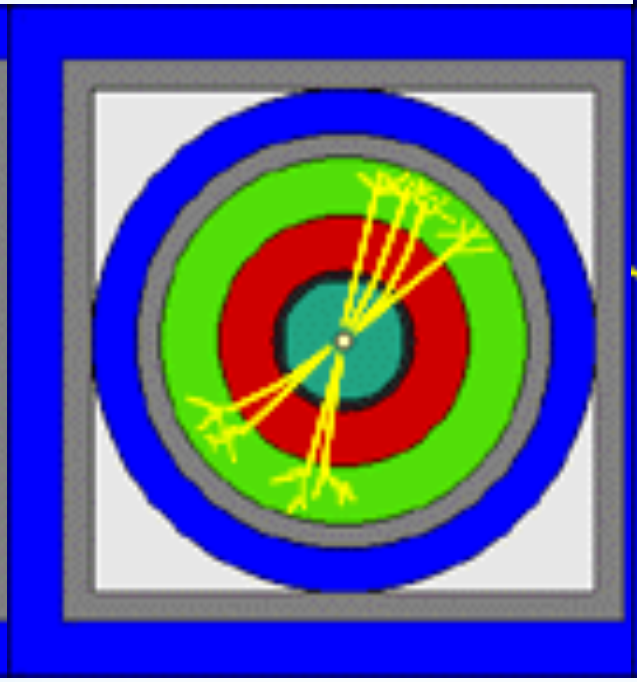
Pioni →

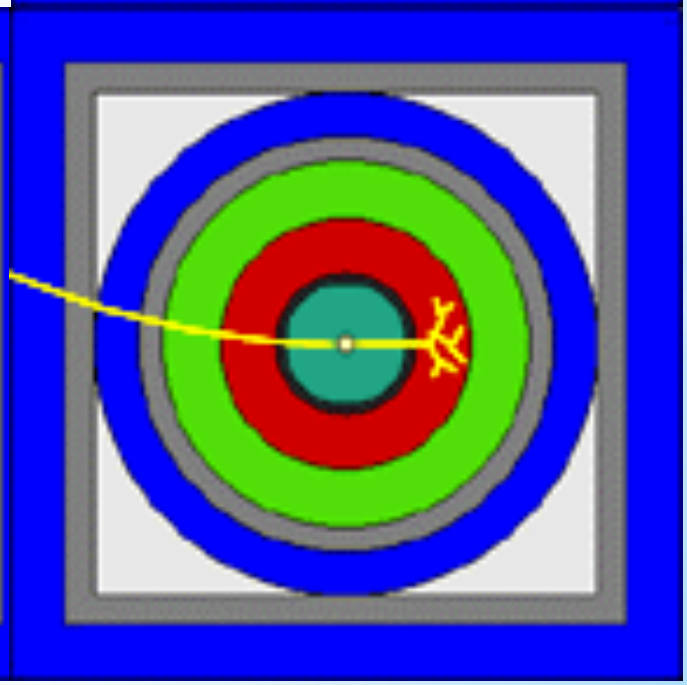
Neutroni →



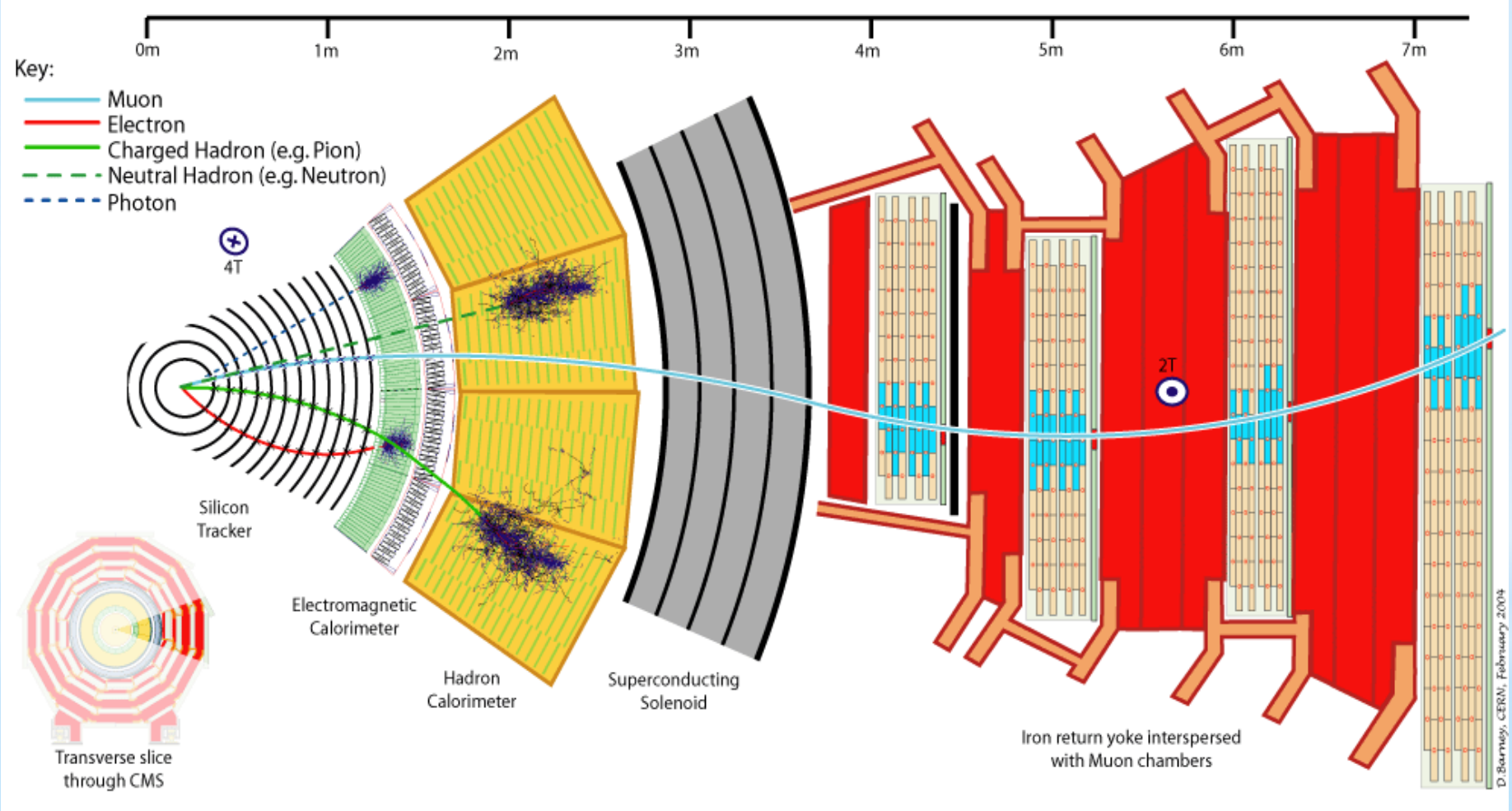




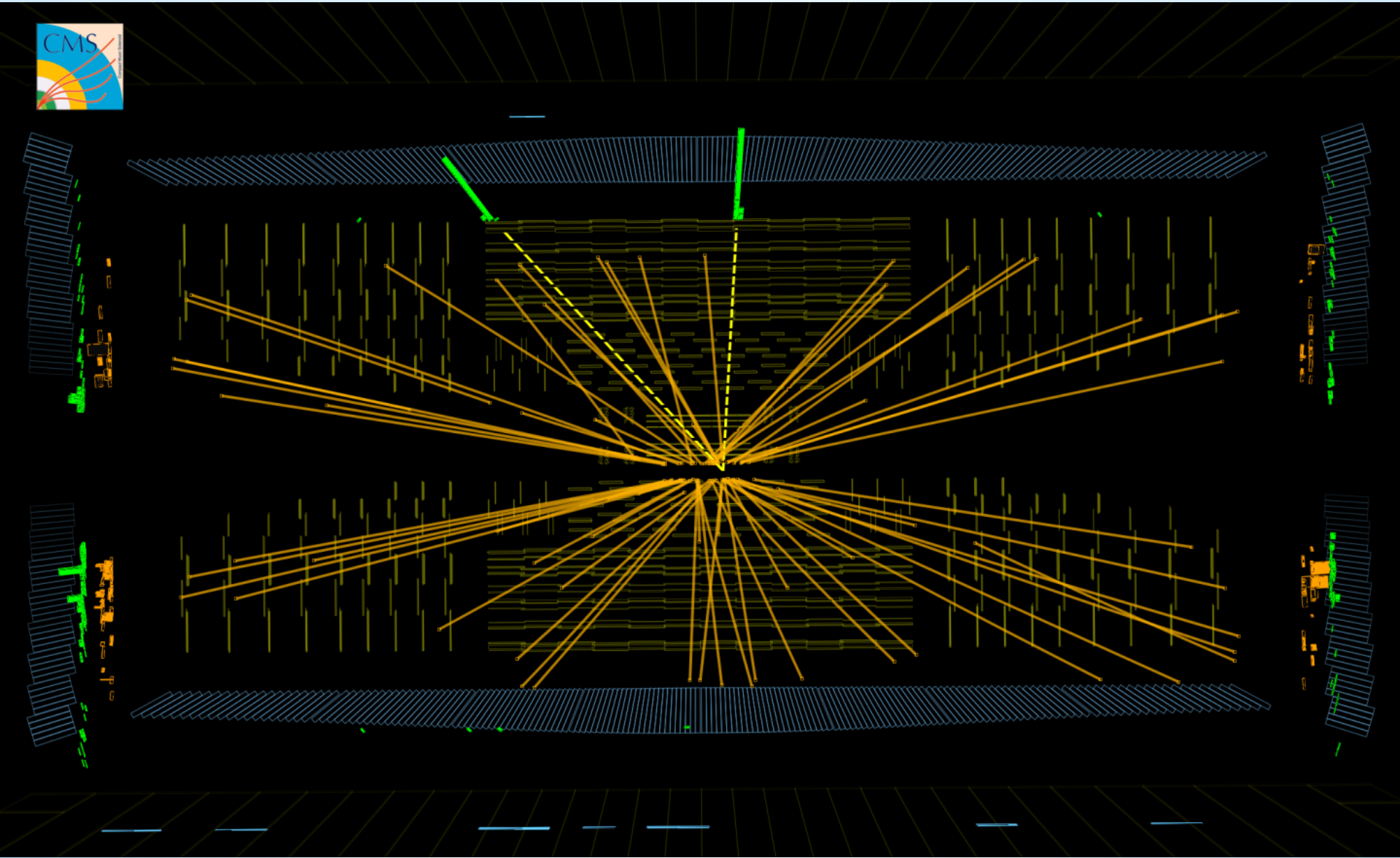




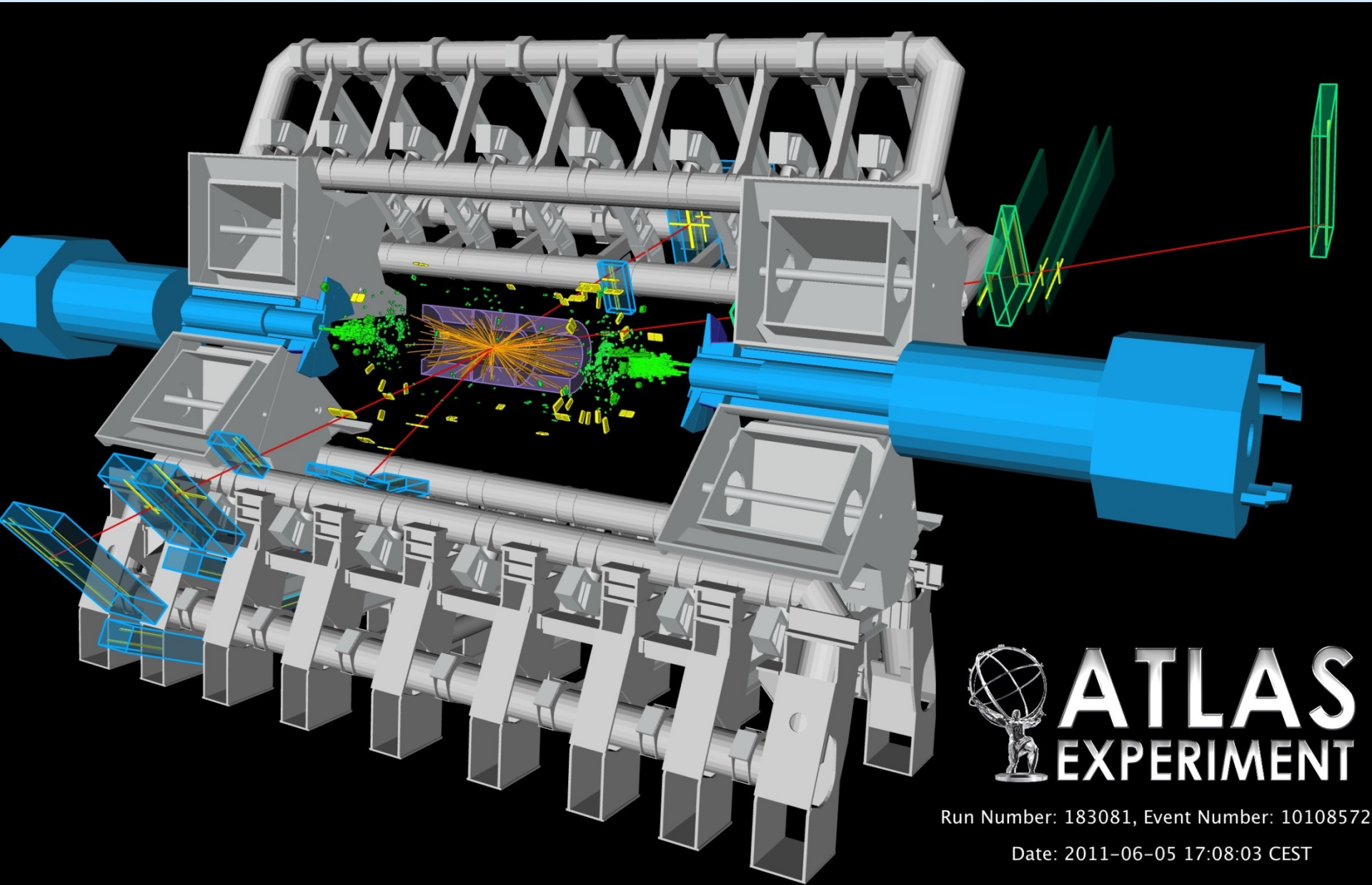
Schema del Rivelatore CMS a LHC

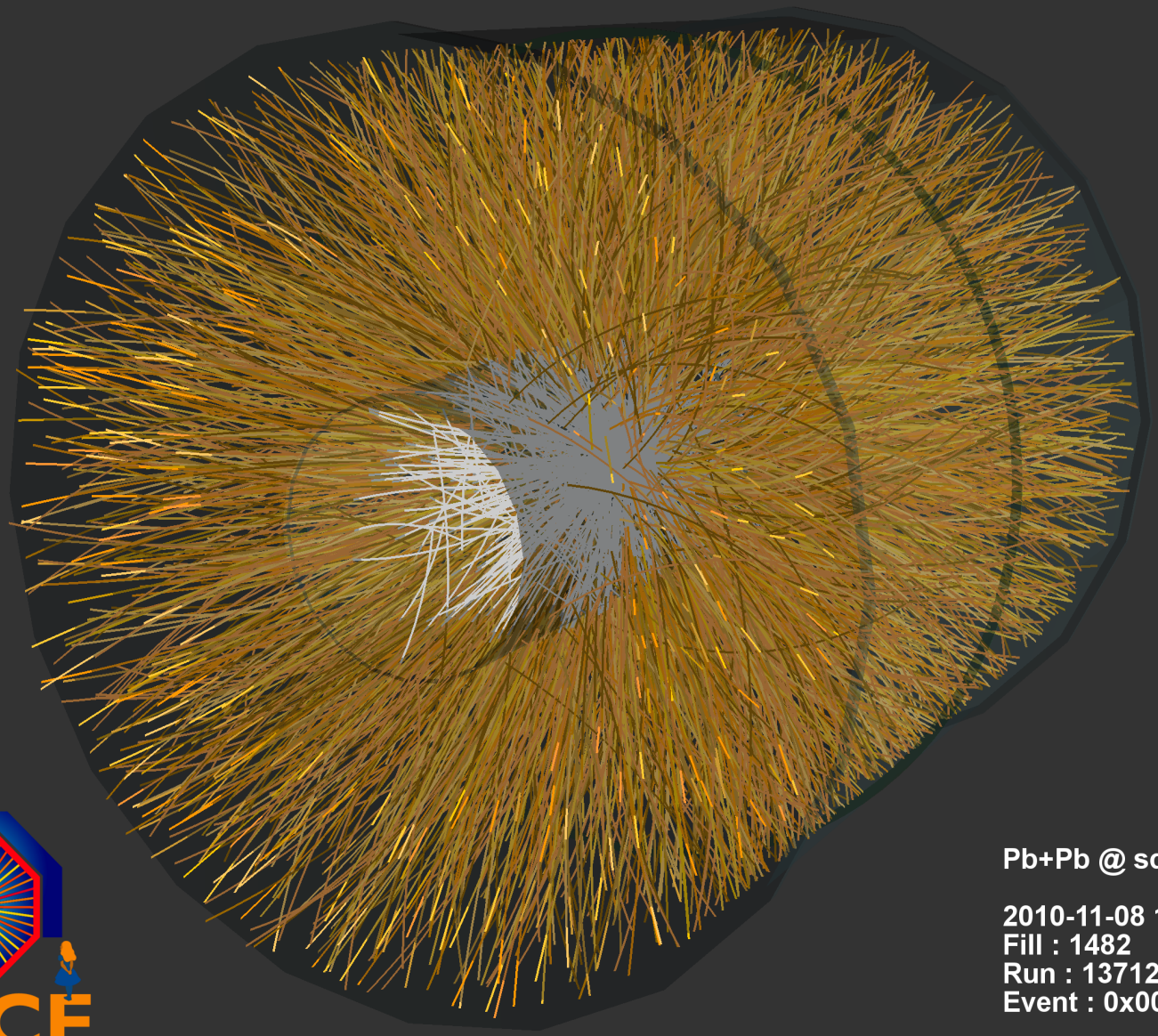


Bosone di Higgs (H → γγ) a CMS



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





Pb+Pb @ sqrt(s) = 2.76 ATeV

2010-11-08 11:30:46
Fill : 1482
Run : 137124
Event : 0x00000000D3BBE693

ALICE

Selezione e analisi dati

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

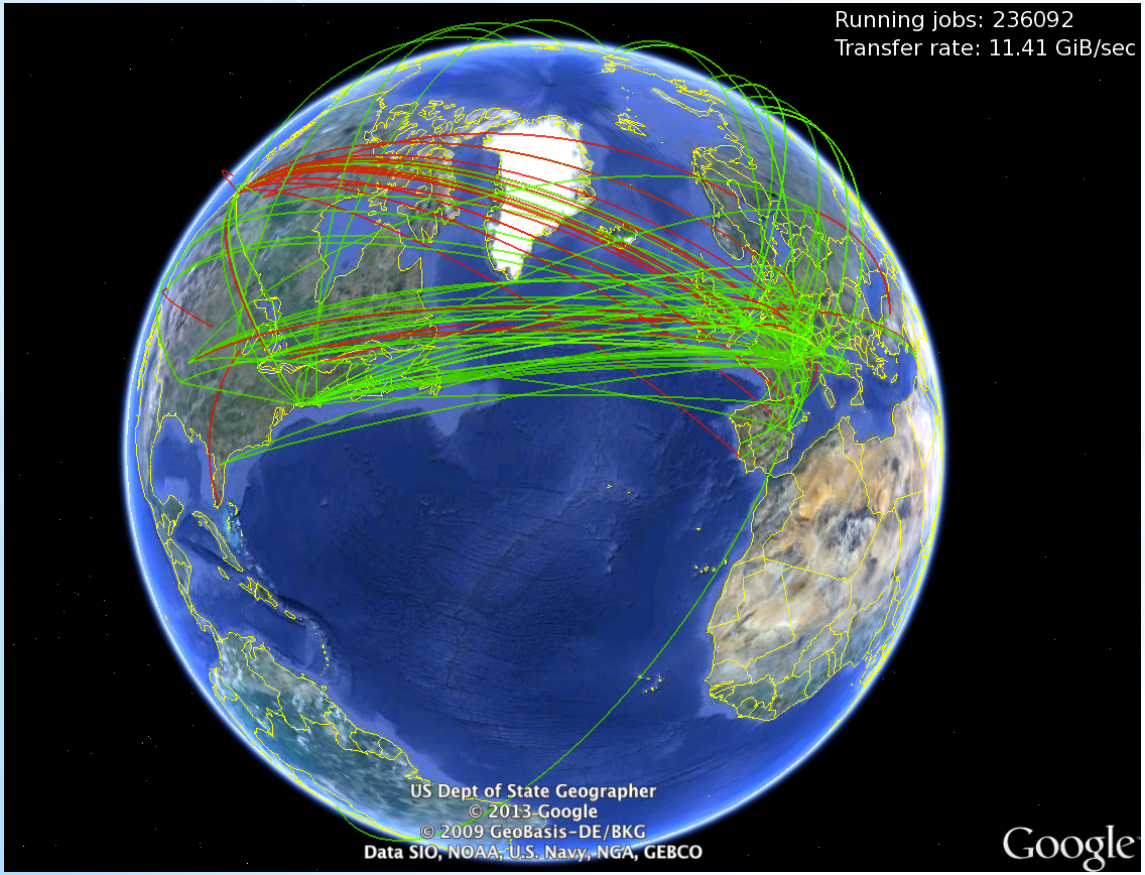
La prima selezione è fatta da un hardware sul rivelatore (L1 trigger):
si scelgono le migliori **100k** foto e si comprimono a **1 MB** ognuna = **100 GB/s**

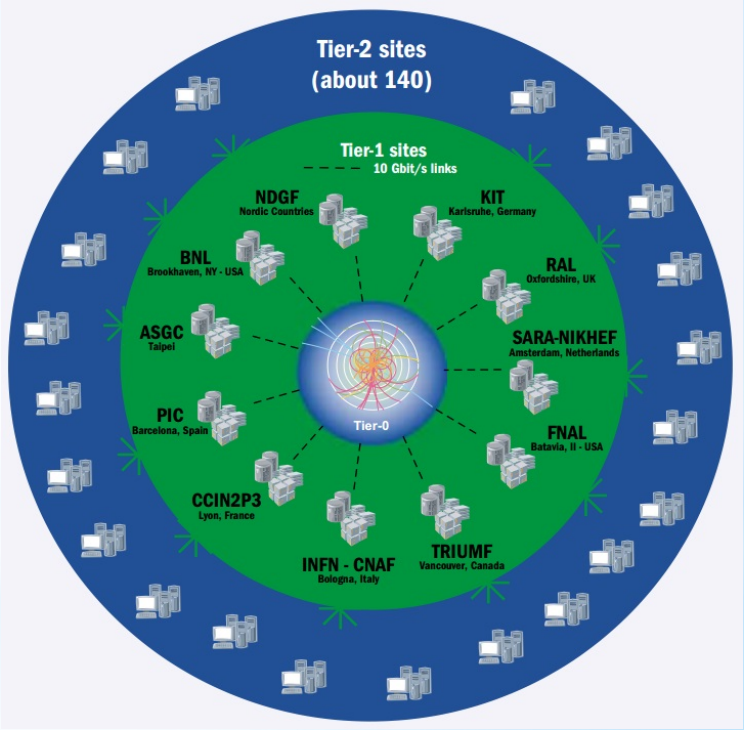
La seconda selezione è fatta da un software (L2 trigger) che gira su 50,000 CPU Intel:
si scelgono le migliori **300** foto e si salvano su disc = **10 PB/y** (3M DVD)

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)



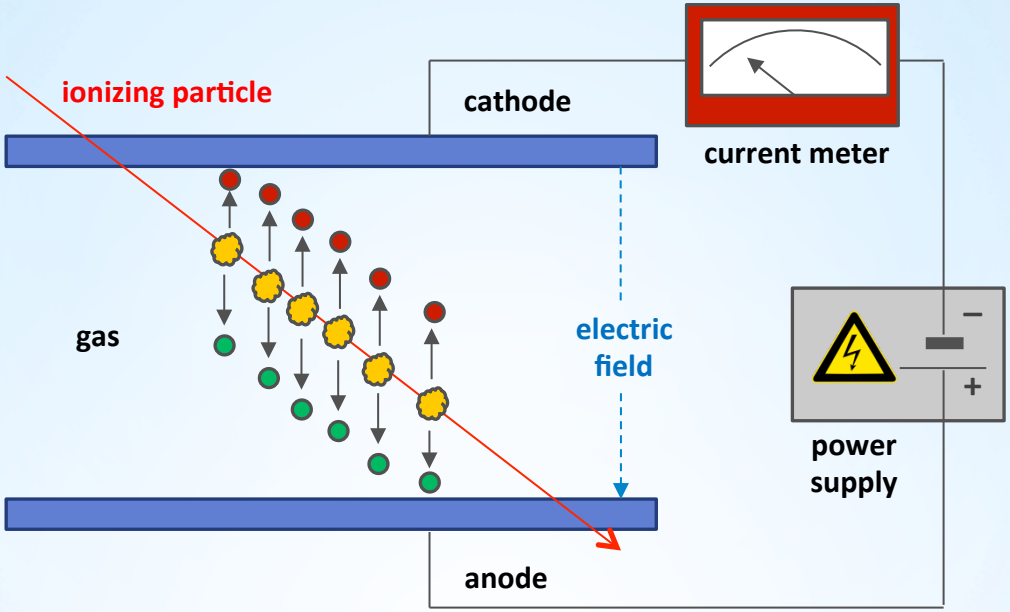


Rivelatori di Particelle

Parte 2

Danilo 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

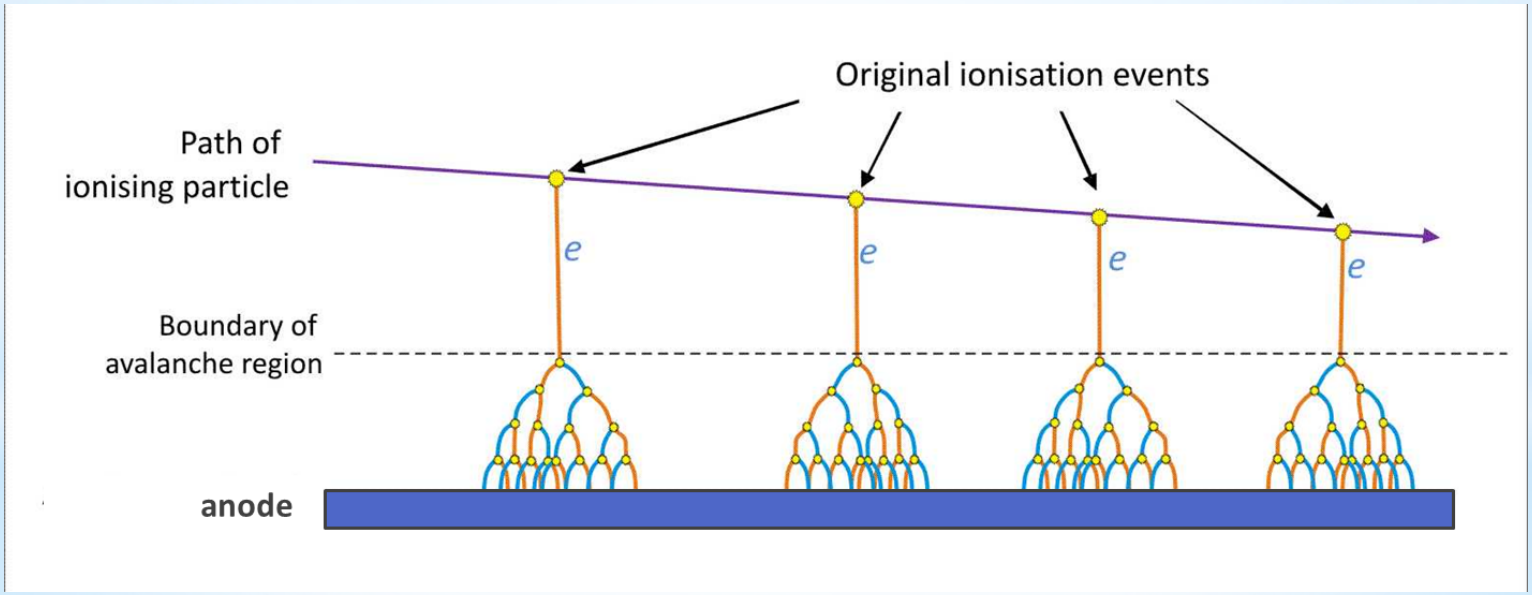
Una particella ionizzante che attraversa il rivelatore collide con le molecole del gas e produce coppie di elettroni e ioni positivi

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



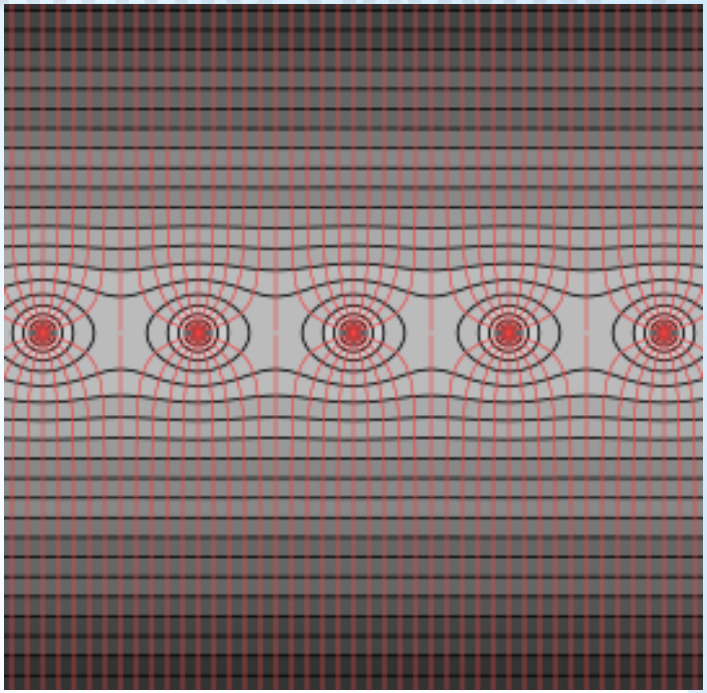
Nei Contatori Geiger invece il segnale è indipendente dall'energia rilasciata (impiegati in misure di radioattività ambientale)

Camere Proporzionali Multifilo (MWPC)

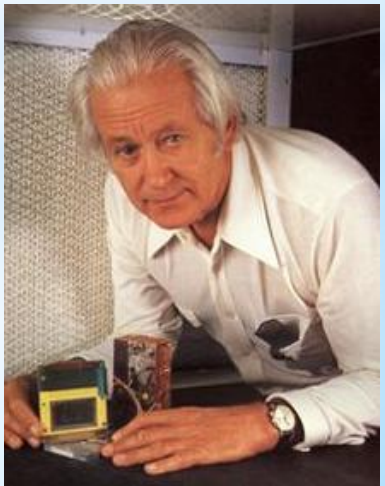
Il rivelatore è formato da molti fili paralleli posti a una distanza di ~ 2 mm

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



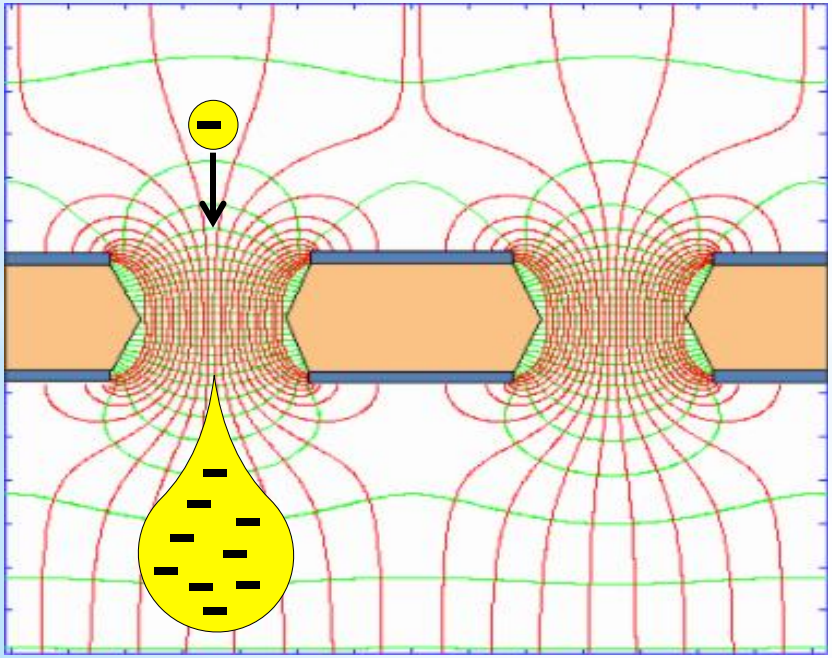
G. Charpak
Nobel 1992

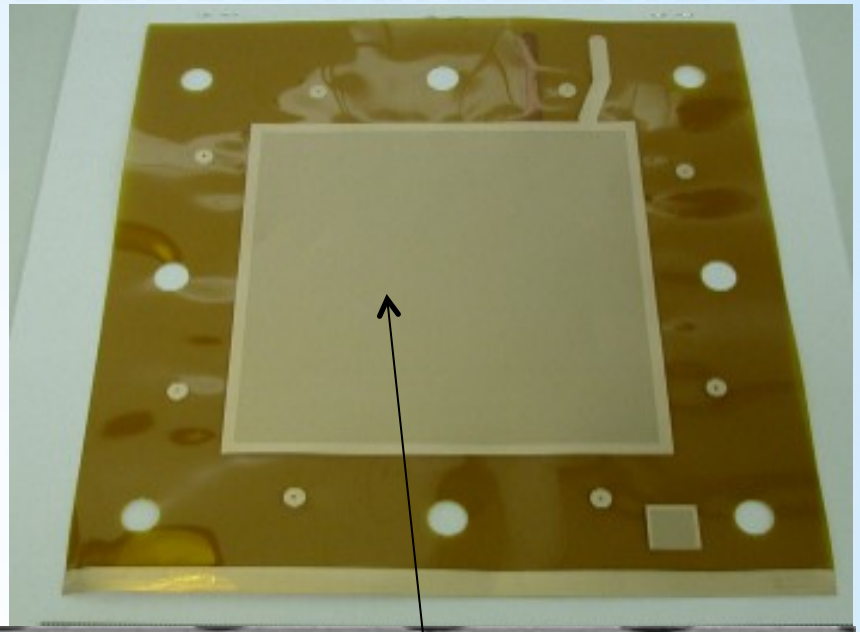


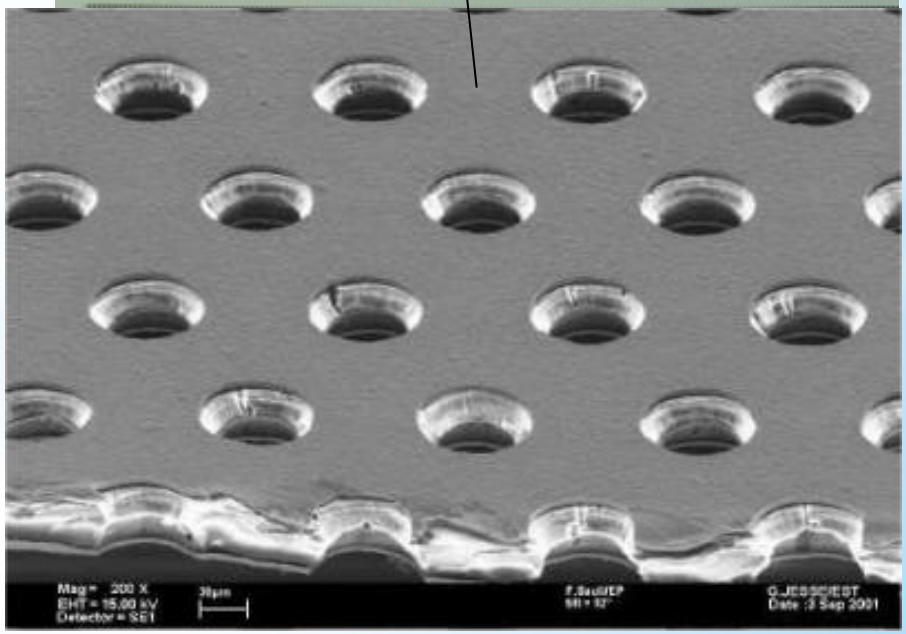
Rivelatori GEM (Gas Electron Multiplier)

Costituiti da un sottile foglio **kapton** ricoperto di **rame** su entrambi i lati e *microforato* (diametro 70 µm, distanza 140 µm).

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

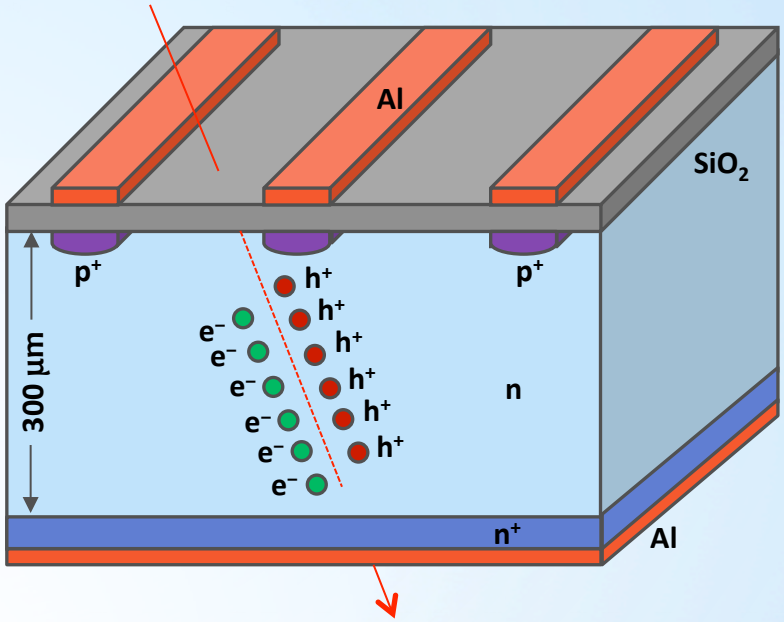
L' elemento attivo è un sottile strato di Semiconduttore drogato, principalmente **Silicio** (ma anche Ge, ZnCdTe, Diamante)

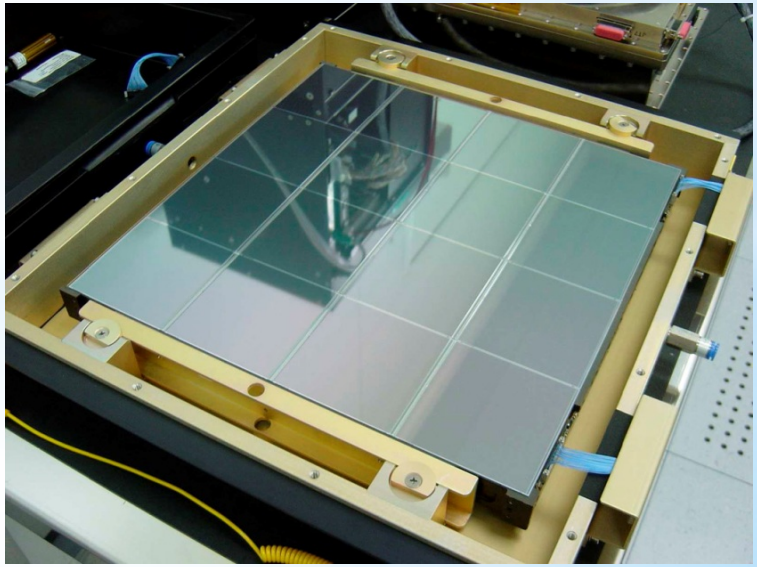
Una particella ionizzante che attraversa il rivelatore collide con il materiale semiconduttore e produce coppie di elettroni (e^-) e lacune positive (h^+)

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

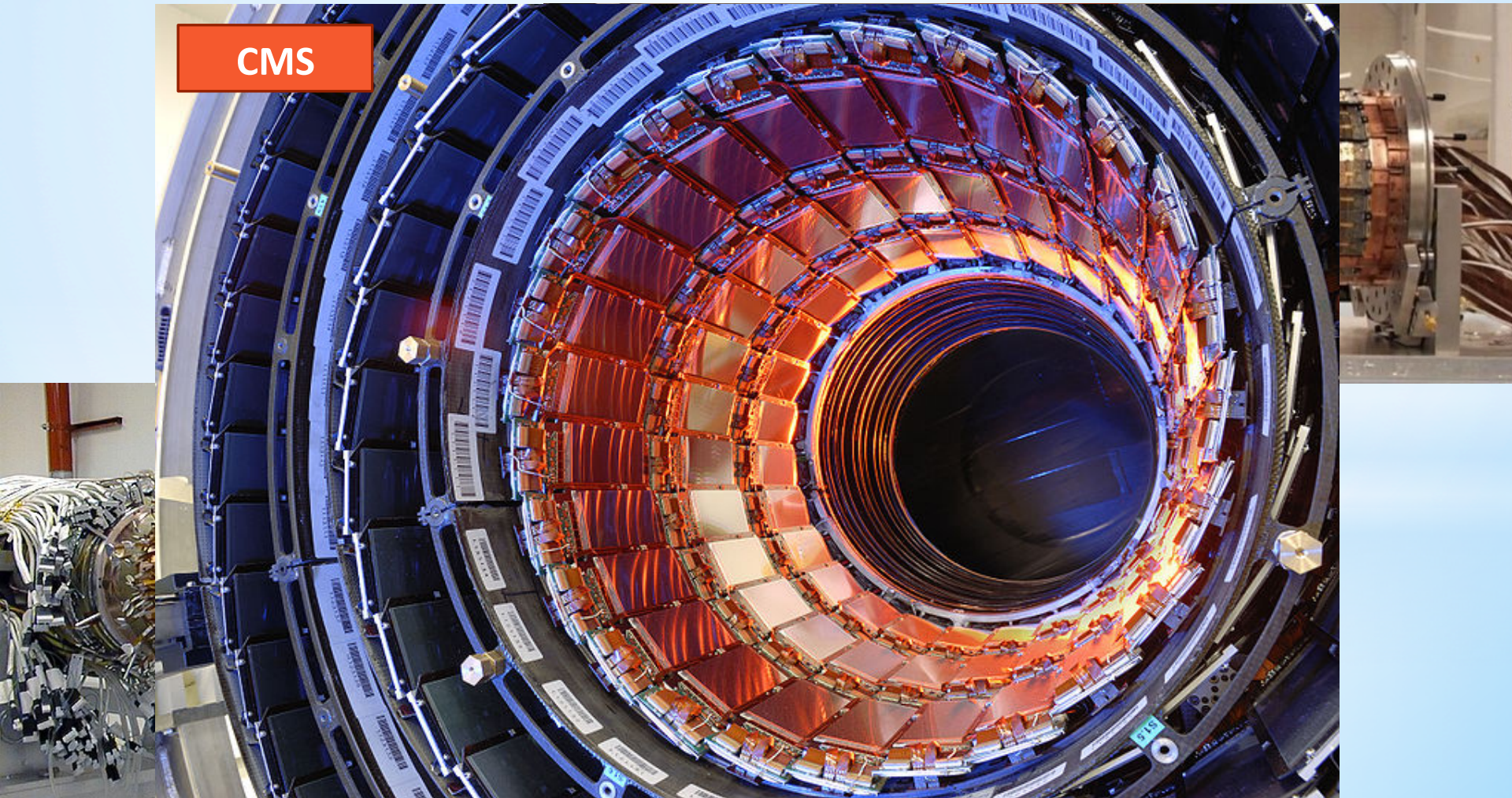
La costruzione sfrutta la tecnologia di realizzazione dei microchip elettronici





Rivelatori di Vertice al Silicio

I rivelatori al Silicio sono usati per coprire piccole superfici con una altissima risoluzione spaziale (fino a ~10 μm) ad esempio come *rivelatori di vertice* in zone molto vicine al punto di collisione dei fasci di particelle



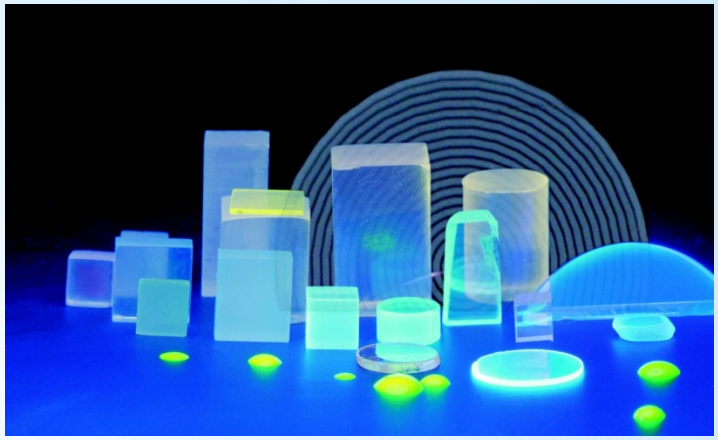
Rivelatori a Scintillazione

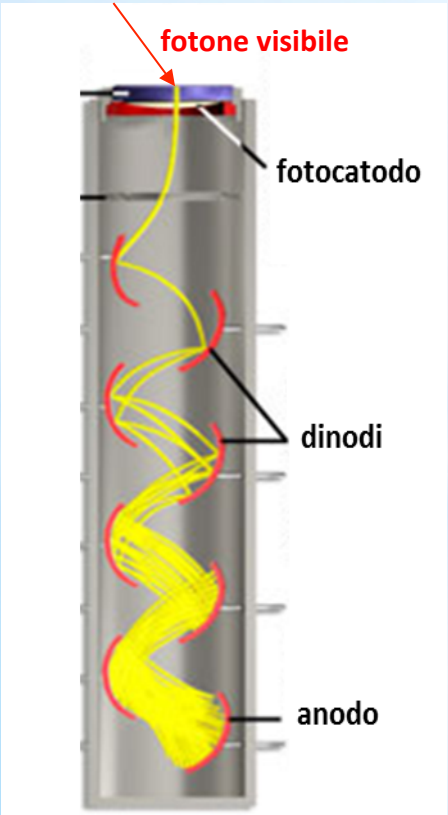
Alcuni materiali hanno la proprietà di **emettere luce visibile** se attraversati da particelle ionizzanti

NaI(Tl) - CsI(Tl) - BaF_2 - BGO

$PbWO_4$ - LYSO - YAP - Polistirene

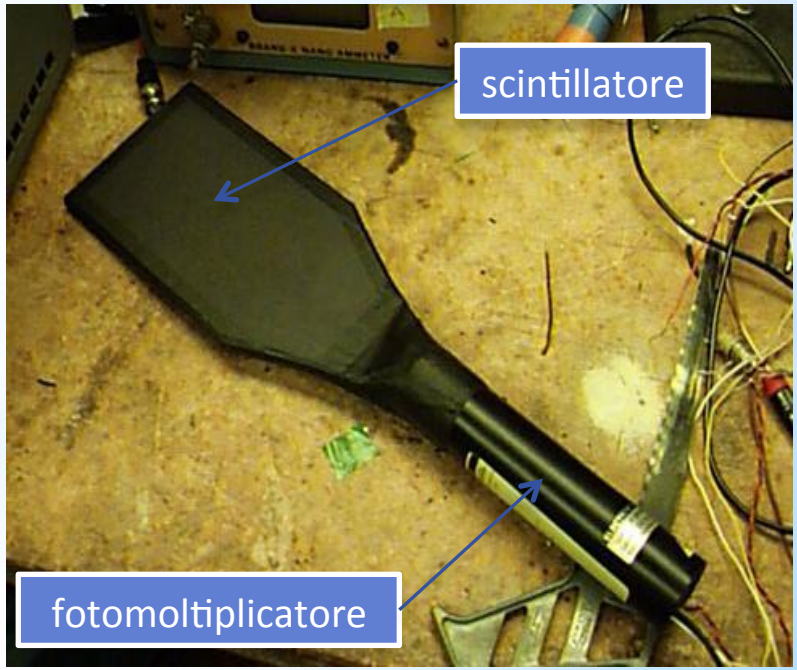
Gli scintillatori sono sempre accoppiati ai **Fotomoltiplicatori**

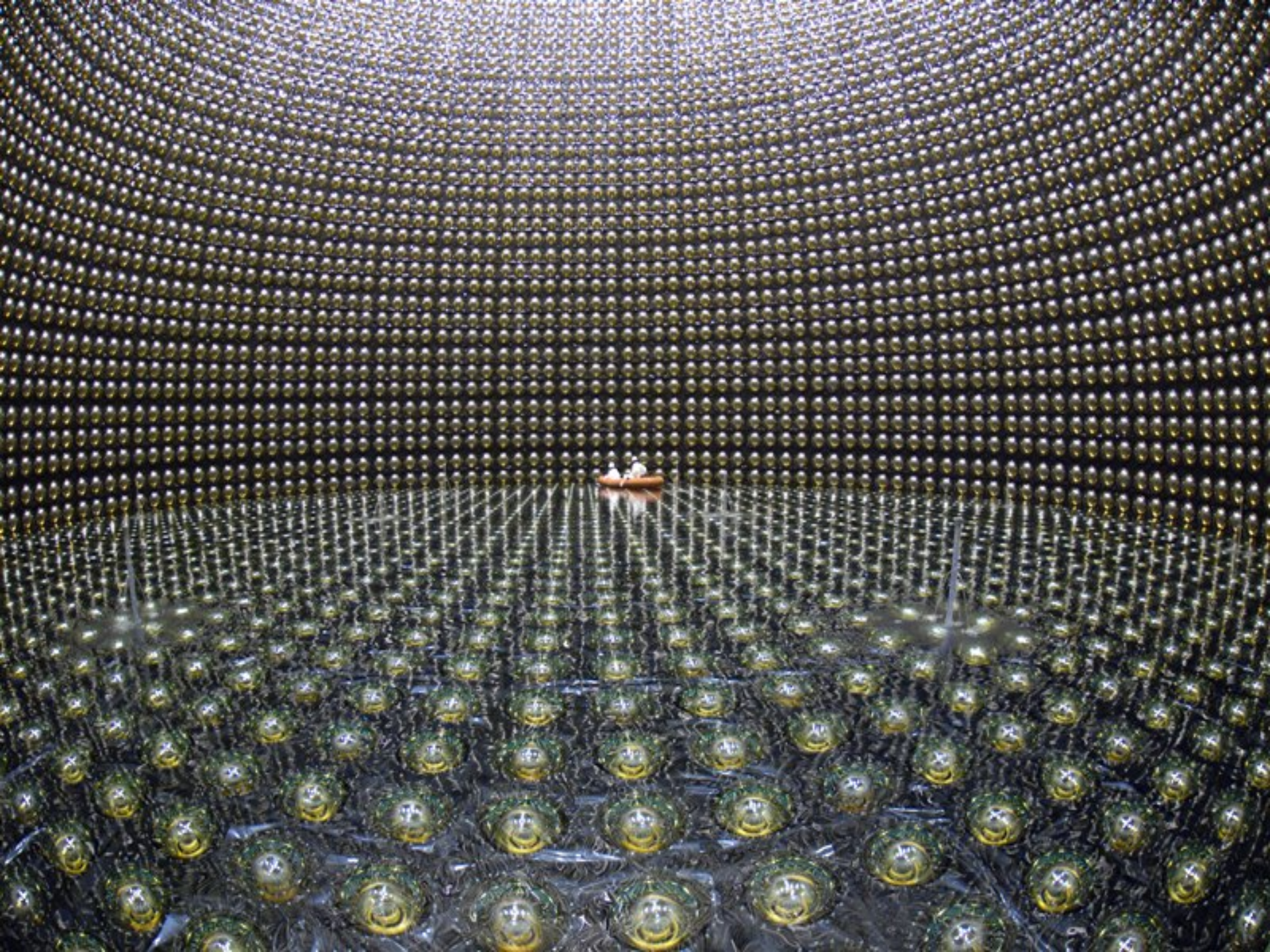




I fotomoltiplicatori sono rivelatori di *luce* basati sull'**Effetto Fotoelettrico** (Einstein Nobel 1921)

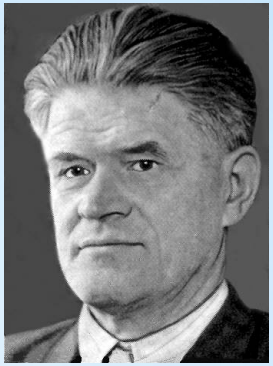
I fotoni colpiscono il *fotocatodo* che emette elettroni che moltiplicati dai *dinodi* e raccolti sull'*anodo* creando un *segnale di corrente*





Rivelatori a Radiazione Cerenkov

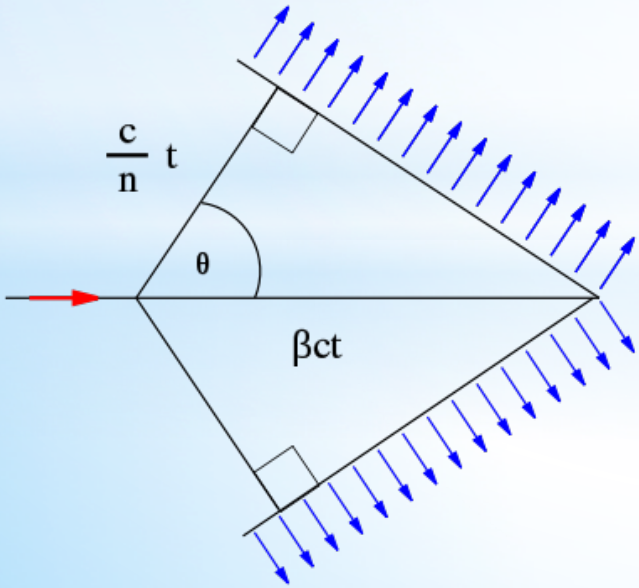
Effetto Cerenkov una particella carica che attraversa un mezzo trasparente ad una *velocità superiore alla velocità della luce* in quel mezzo emette un cono di *luce visibile*

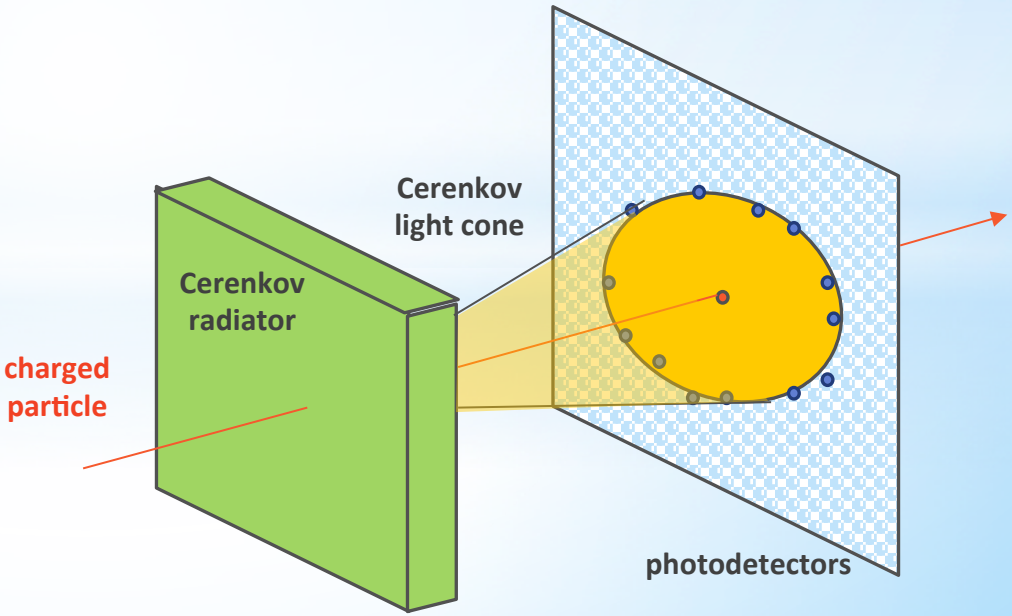


Pavel Čerenkov
Nobel 1958

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

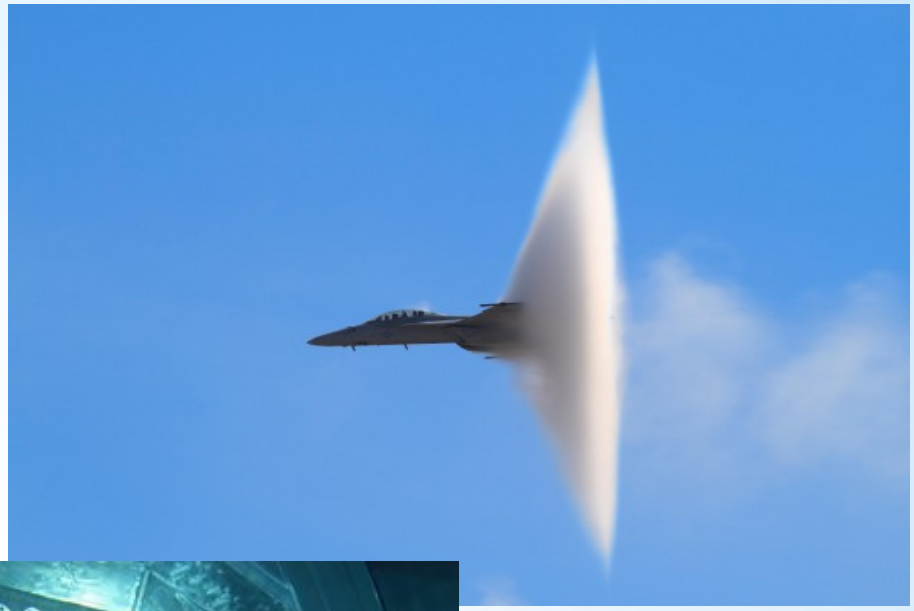
$\beta = v/c$
$\cos\theta = 1/\beta n$
$m = p/v\sqrt{1-\beta^2}$

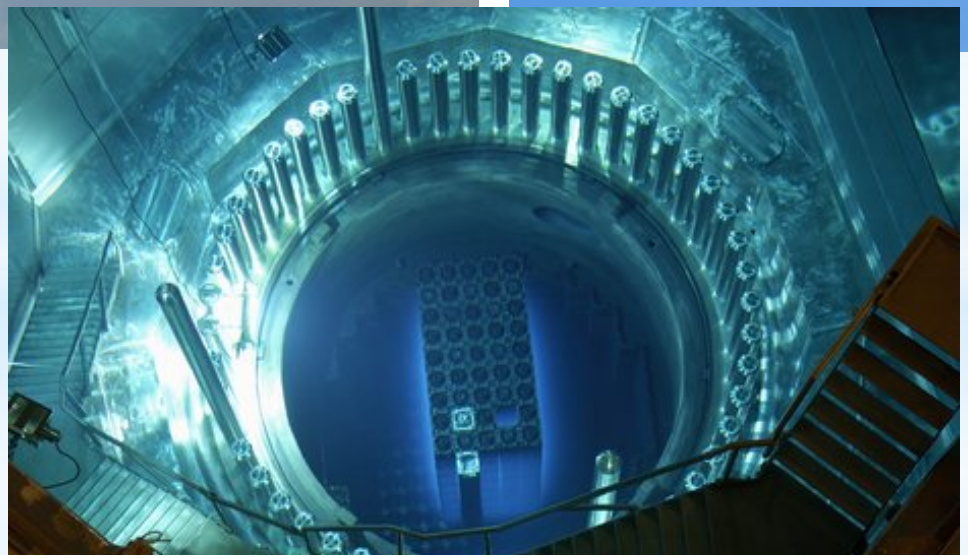




Esempi di Radiazione Cerenkov

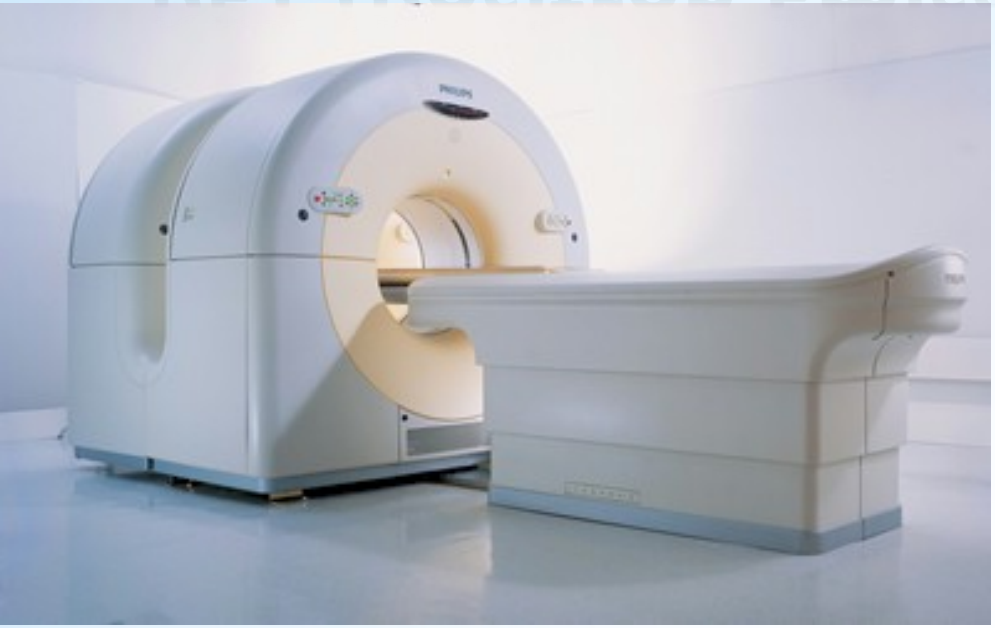
Analogia con il **Cono di Mach** quando si supera la *barriera del suono* (1238 km/h)



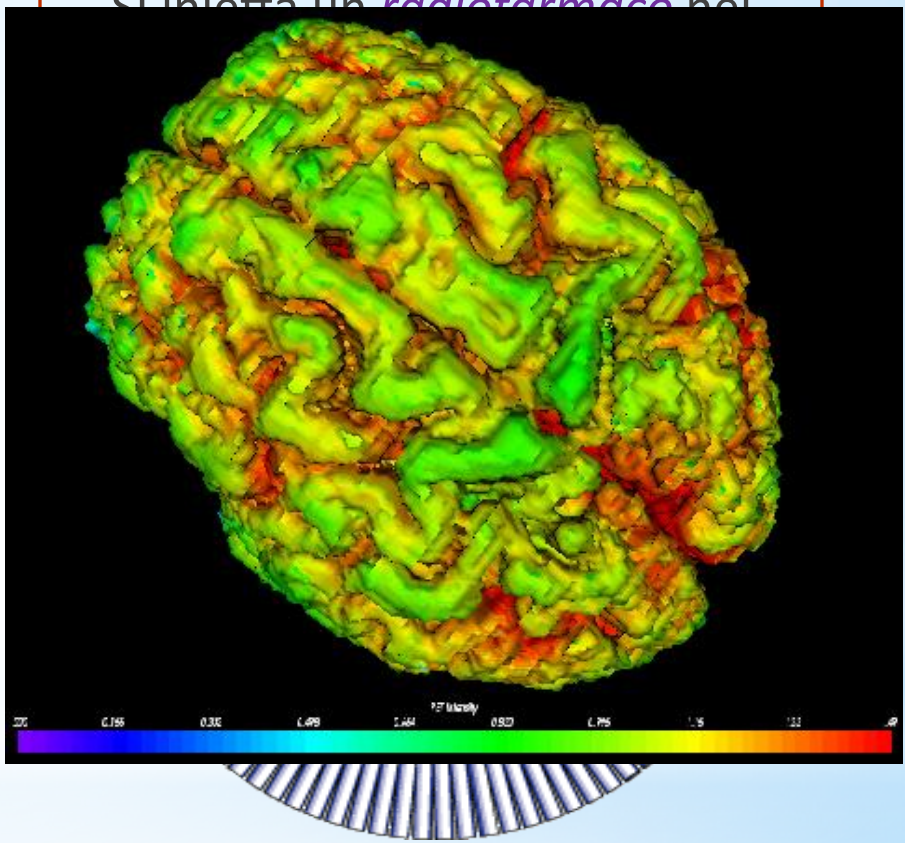


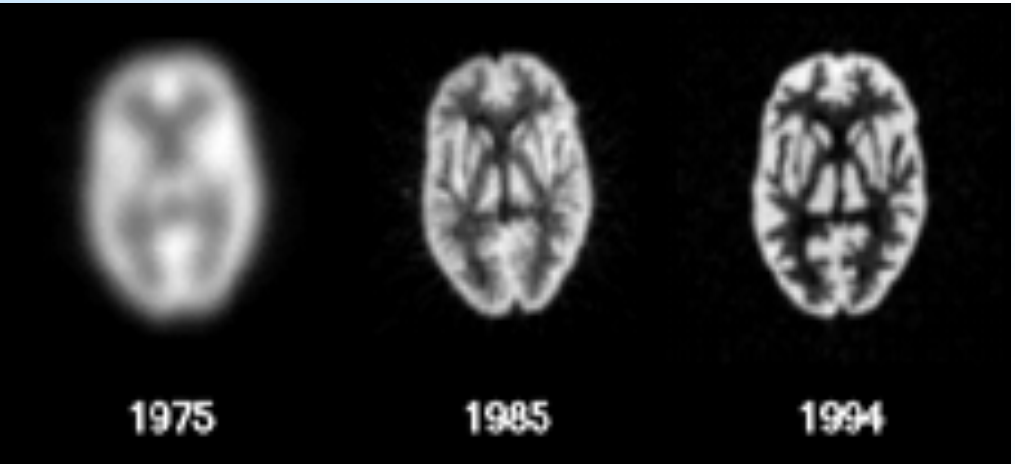
Luce Cerenkov emessa dal nocciolo di un reattore nucleare

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



SI iniettta un *radiofarmaco* nel





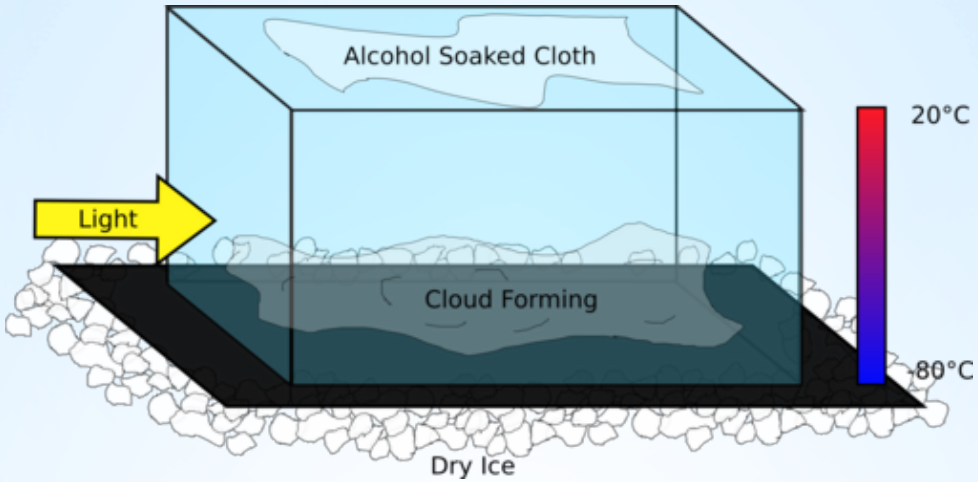
Lo sviluppo sui rivelatori ha contribuito a migliorare la risoluzione delle immagini

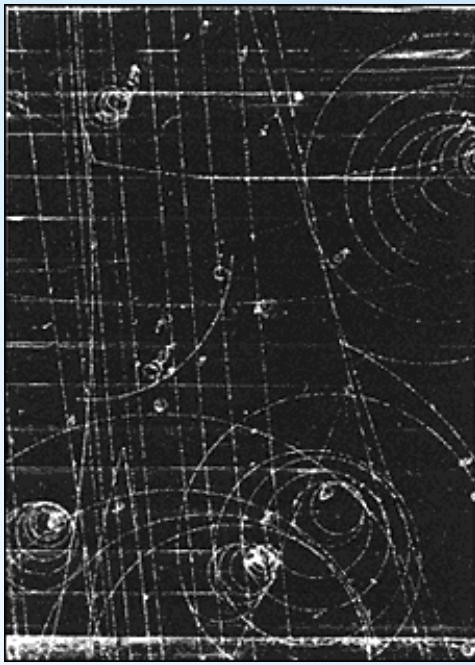
Spares

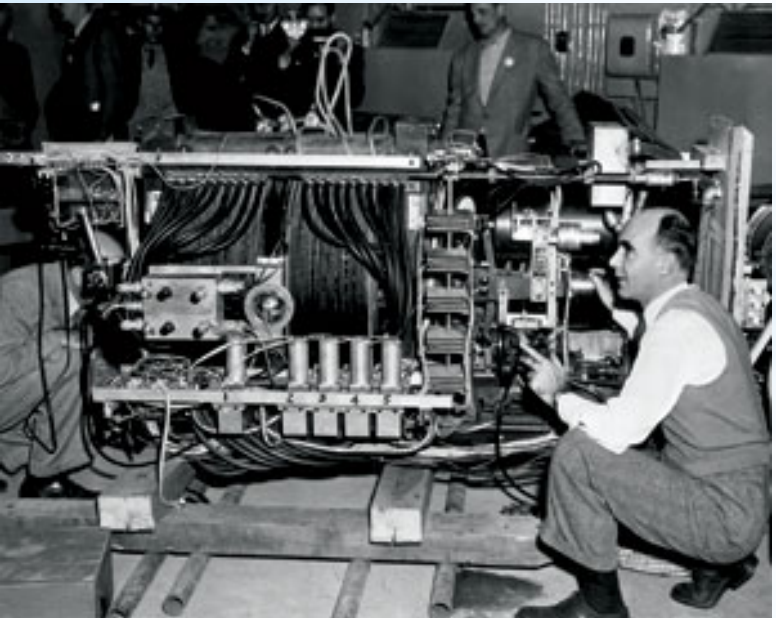
Camera a Nebbia

Inventata da Charles Wilson (Nobel '27)

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

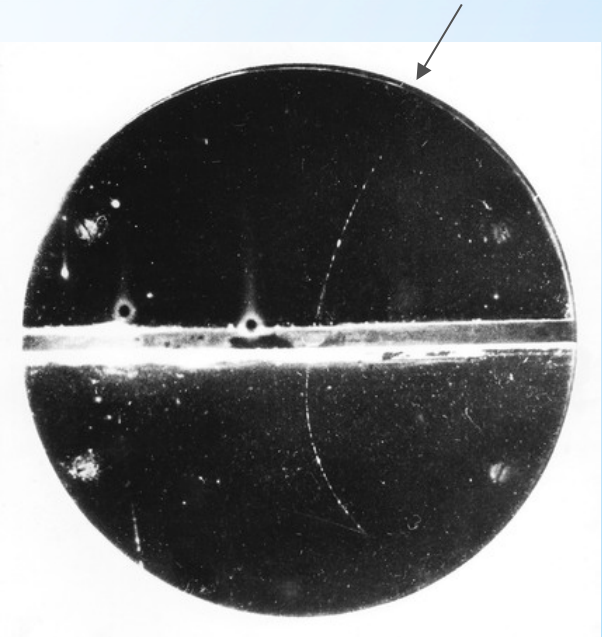




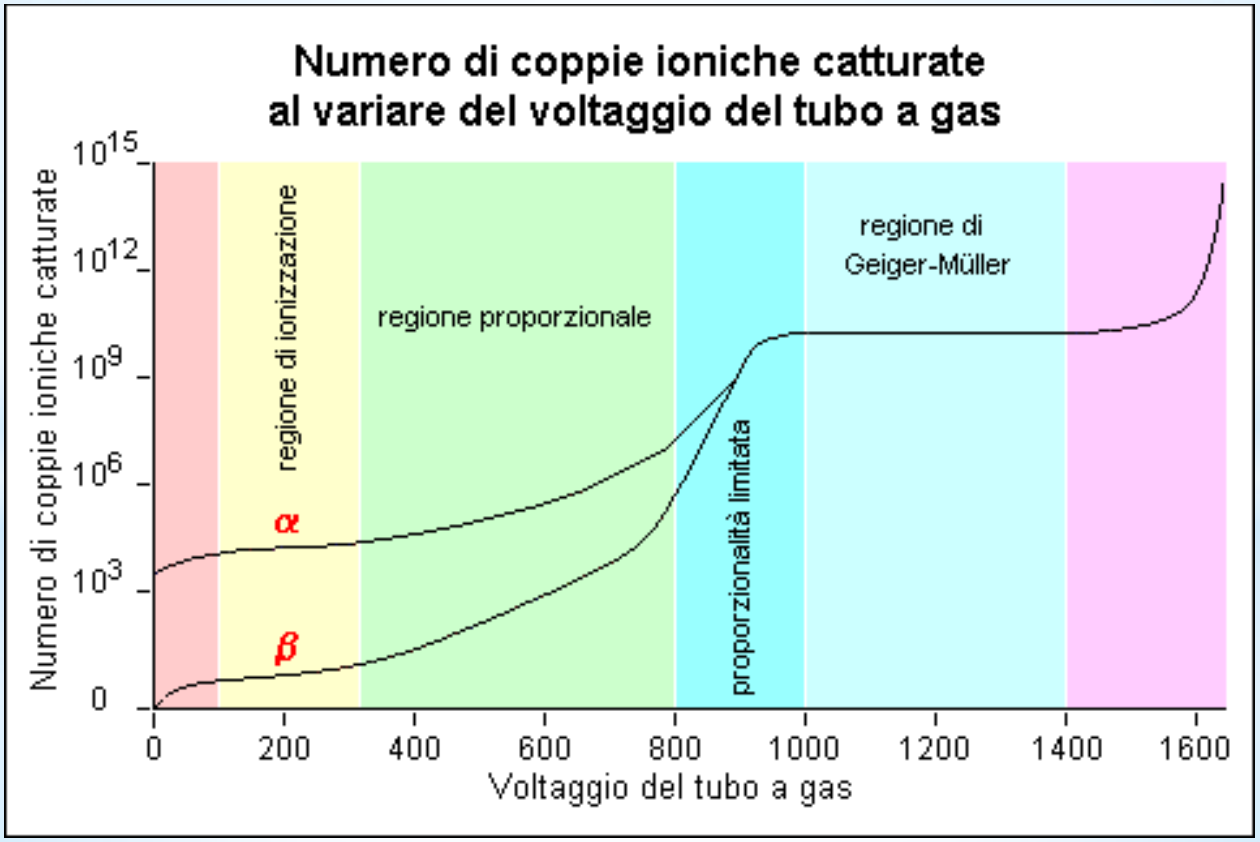


Scoperta del positrone 1932

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)