



Salvatore Loffredo

I rivelatori di particelle

*Roma,
22/03/2021*



Cosa vuol dire studiare «Fisica delle particelle elementari»?

Vuol dire cercare di rispondere a domande tipo:

Di cosa e fatta la materia che ci circonda?

Quale origine hanno le forze che tengono insieme i componenti della materia?

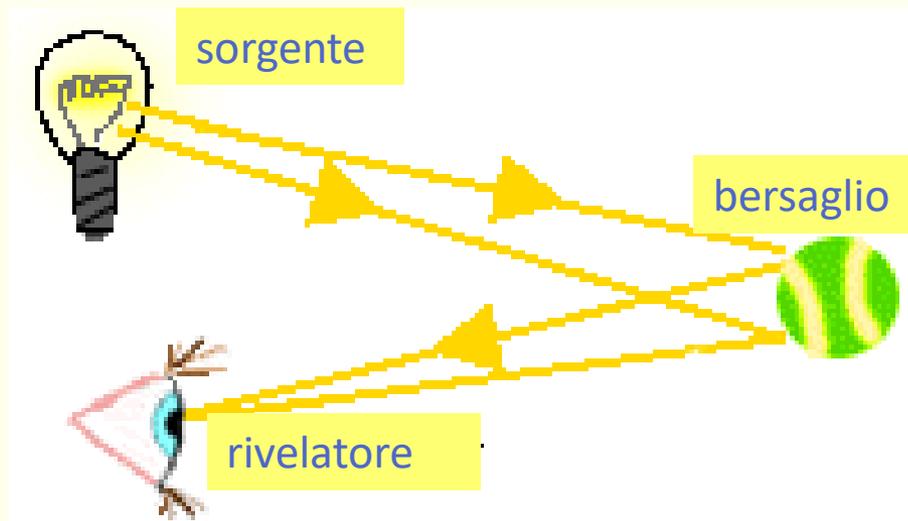


Possiamo “vedere” un atomo, un nucleo, una particella subatomica?

La dimensione tipica di una particella subatomica (per esempio il protone) è dell'ordine di 10^{-15} m (0.0000000000001 mm).

Questa misura la chiamiamo: 1 Fermi (fm)

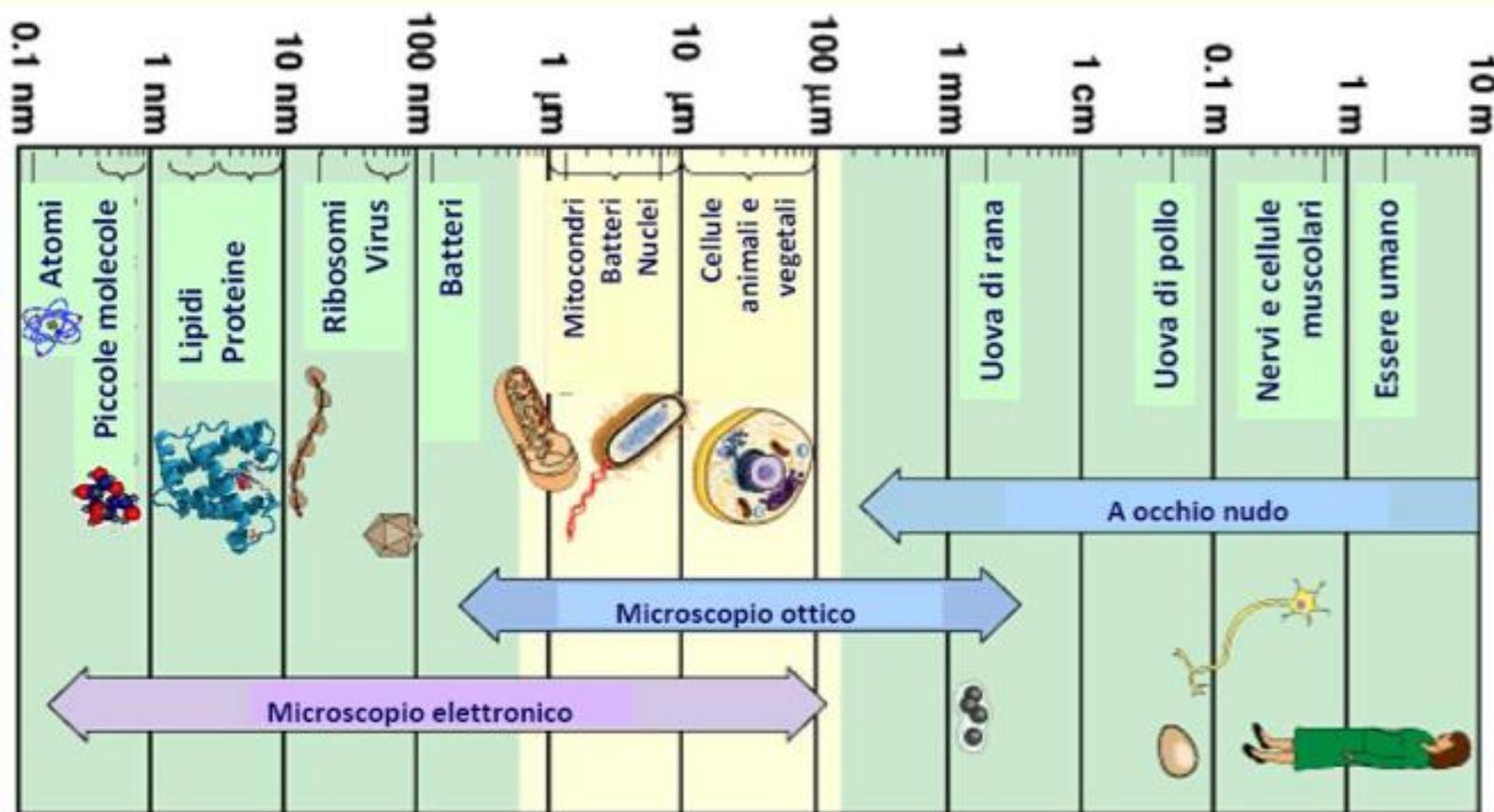
La luce visibile è fatta di onde con lunghezza d'onda compresa tra 0.4 e 0.8 mm: **non può essere usata per vedere qualcosa più piccolo di 1 mm**

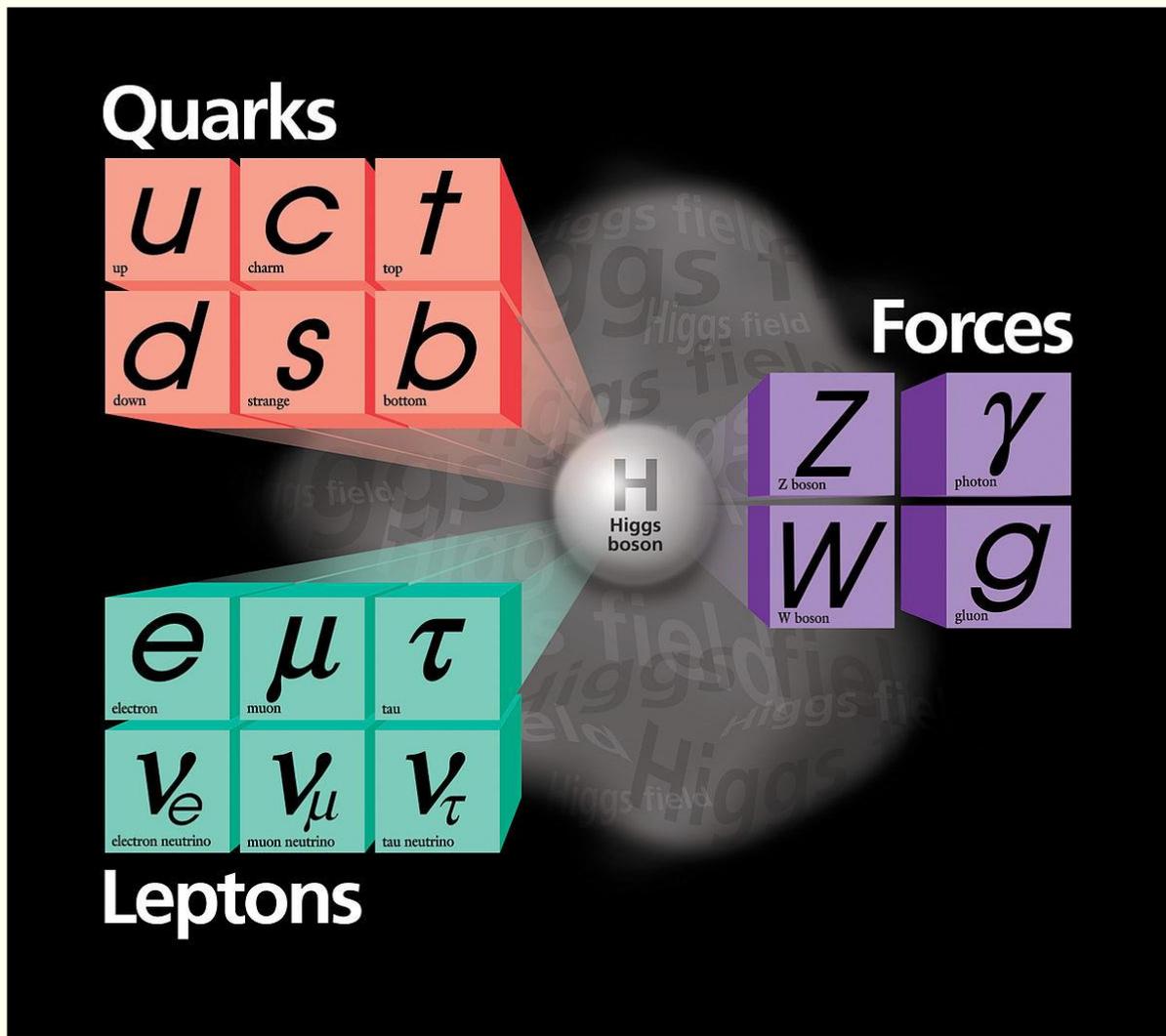


L'occhio umano e un rivelatore di particelle: i **fotoni**

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



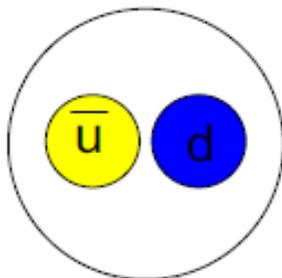




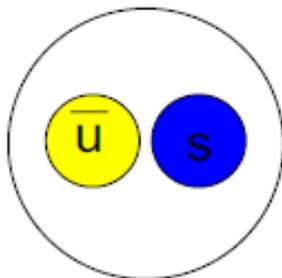
mesoni

barioni

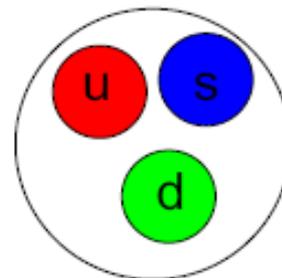
π^-



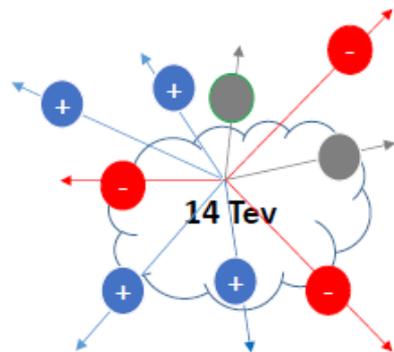
K^-



Λ



Per esempio in LHC



$$E=mc^2$$



Si producono particelle di tutti i tipi:
Fotoni, Neutroni (neutre) ●
Protoni, π^+ , K^+ , e^+ ...(positive) ●
Antiprotoni, π^- , K^- , e^- ,...(negative) ●

Per vederle metto un rivelatore nel punto di interazione





- **Rivelare** : rendere osservabili fenomeni non percepibili ai sensi
- **Rilevare** : venire a conoscere, apprendere

I **rivelatori** ci fanno vedere le particelle non altrimenti osservabili



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

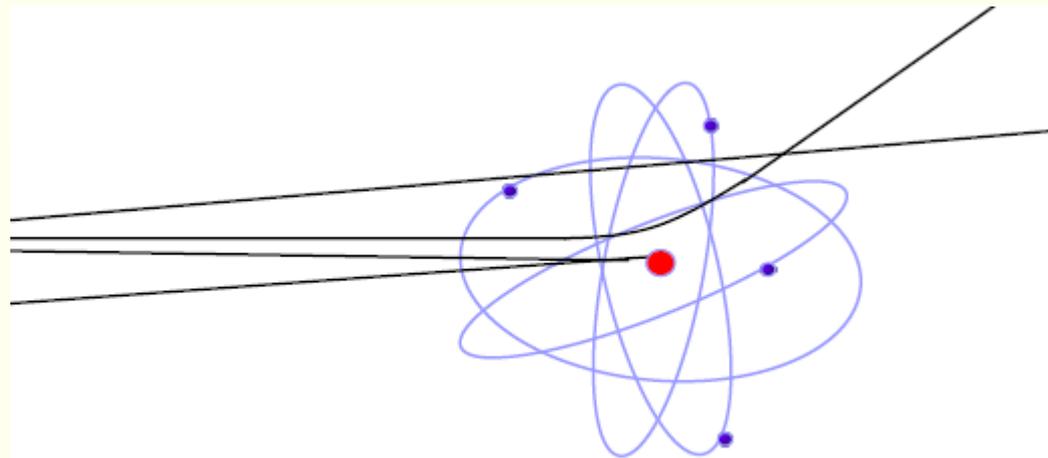
I **rivelatori di particelle** sono strumenti che producono un *segnale osservabile* quando il loro *elemento attivo* viene colpito dalla radiazione.

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

Nella *fisica sperimentale*, un **rivelatore di particelle** o **rivelatore di radiazione** è uno strumento usato per *rivelare, tracciare e identificare* particelle
(Wikipedia)



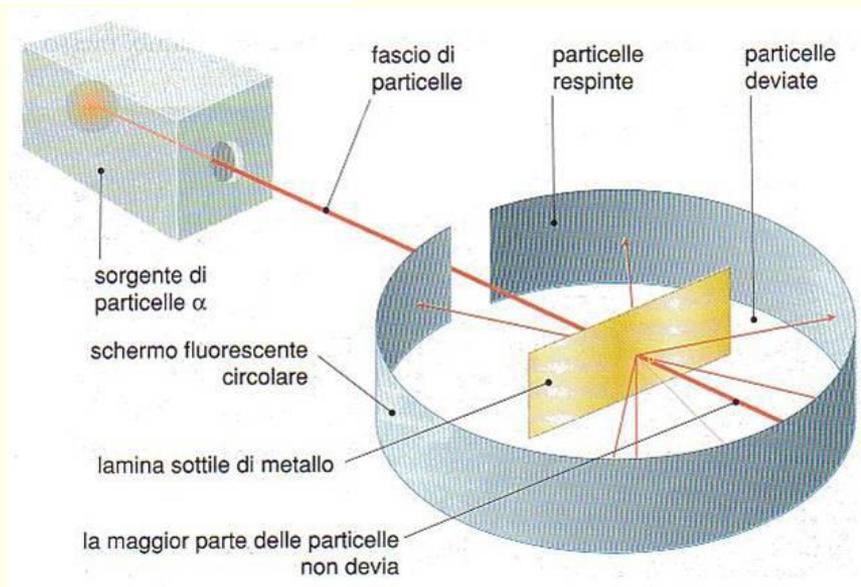
- **Sensibilità**: capacita di produrre un *segnale utile* per un certo tipo di *radiazione e di energia*.
- **Risposta**: tipo di segnale prodotto. Spesso è un *impulso di corrente* la cui ampiezza e *proporzionale all'energia* rilasciata dalla particella.
- **Risoluzione**: capacita di distinzione 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.



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



Ernest Rutherford
Nobel 1908





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.



Per ricostruire cosa è successo al momento dell'interazione tra i due protoni, dobbiamo ricostruire tutte le particelle che sono state prodotte nello stato finale.

Di queste vogliamo misurare tutto:

- massa, dunque identità (elettroni, fotoni, muoni, tipo di adrone...)
- impulso (ovvero velocità) ed energia
- traiettoria, dunque angoli e direzioni

Per far questo combiniamo le informazioni di molti rivelatori posti in successione.

Inoltre vogliamo dei rivelatori **VELOCI** perché vogliamo analizzare eventi molto rari (e quindi registrare molte interazioni)

E rivelatori **PRECISI**, per essere più efficienti.



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:

1. Perdita di energia da parte della particella (assorbimento)
2. Deflessione della particella incidente dalla traiettoria iniziale (scattering)



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**)

Per prima cosa, proveremo dunque a capire come si identificano i prodotti di decadimento.

Un rivelatore di particelle deve:

Distinguere le particelle note

Misurare le proprietà dei processi di Fisica

Identificare l'esistenza di nuove particelle



<http://pdg.lbl.gov> ~ 180 Selected Particles

H, $p, W^\pm, Z^0, g, e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau, \pi^\pm, \pi^0, \eta, f_0(660), g(770), \omega(782), \eta'(858), f_0(980), a_0(980), \phi(1020), h_1(1170), b_1(1235), a_1(1260), f_2(1270), f_2(1285), \eta(1295), \pi(1300), a_2(1320), f_0(1370), f_1(1420), \omega(1420), \eta(1440), a_0(1450), g(1450), f_0(1500), f_2'(1525), \omega(1650), \omega_3(1670), \pi_2(1670), \phi(1680), g_3(1690), g(1700), f_0(1710), \pi(1800), \phi_3(1850), f_2(2010), a_4(2040), f_4(2050), f_2(2300), f_2(2340), K^\pm, K^0, K_S^0, K_L^0, K^*(892), K_1(1270), K_1(1400), K^*(1410), K_0^*(1430), K_2^*(1430), K^*(1680), K_2(1770), K_S^*(1780), K_2(1820), K_4^*(2045), D^\pm, D^0, D^*(2007)^0, D^*(2010)^\pm, D_1(2420)^0, D_2^*(2460)^0, D_2^*(2460)^\pm, D_S^\pm, D_S^{*\pm}, D_{S1}(2536)^\pm, D_{S1}(2573)^\pm, B^\pm, B^0, B^*, B_S^0, B_c^\pm, \eta_c(1S), J/\psi(1S), \chi_{c0}(1P), \chi_{c1}(1P), \chi_{c2}(1P), \psi(2S), \psi(3770), \psi(4040), \psi(4160), \psi(4415), \Upsilon(1S), \chi_{b0}(1P), \chi_{b1}(1P), \chi_{b2}(1P), \Upsilon(2S), \chi_{b3}(2P), \chi_{b2}(2P), \Upsilon(3S), \Upsilon(4S), \Upsilon(10860), \Upsilon(11020), p, n, N(1440), N(1520), N(1535), N(1650), N(1675), N(1680), N(1700), N(1710), N(1720), N(2190), N(2220), N(2250), N(2600), \Delta(1232), \Delta(1600), \Delta(1620), \Delta(1700), \Delta(1905), \Delta(1910), \Delta(1920), \Delta(1930), \Delta(1950), \Delta(2420), \Lambda, \Lambda(1405), \Lambda(1520), \Lambda(1600), \Lambda(1670), \Lambda(1690), \Lambda(1800), \Lambda(1810), \Lambda(1820), \Lambda(1830), \Lambda(1890), \Lambda(2100), \Lambda(2110), \Lambda(2350), \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Sigma(1385), \Sigma(1660), \Sigma(1670), \Sigma(1750), \Sigma(1775), \Sigma(1915), \Sigma(1940), \Sigma(2030), \Sigma(2250), \Xi^0, \Xi^-, \Xi(1530), \Xi(1690), \Xi(1820), \Xi(1950), \Xi(2030), \Omega^-, \Omega(2250)^-, \Lambda_c^+, \Lambda_c^+, \Sigma_c(2455), \Sigma_c(2520), \Xi_c^+, \Xi_c^0, \Xi_c'^+, \Xi_c'^0, \Xi_c(2645), \Xi_c(2780), \Xi_c(2815), \Omega_c^0, \Lambda_b^0, \Xi_b^-, \Xi_b^-, t\bar{t}$



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



$$e^\pm \quad m_e = 0.511 \text{ MeV}$$

$$\mu^\pm \quad m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$$

$$\gamma \quad m_\gamma = 0, \quad Q = 0$$

forza elettromagnetica

$$\pi^\pm \quad m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$$

$$K^\pm \quad m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e \sim 3.5 m_\pi$$

$$p^\pm \quad m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$$

forza elettromagnetica
e interazione forte

$$K^0 \quad m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q = 0$$

$$n \quad m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q = 0$$

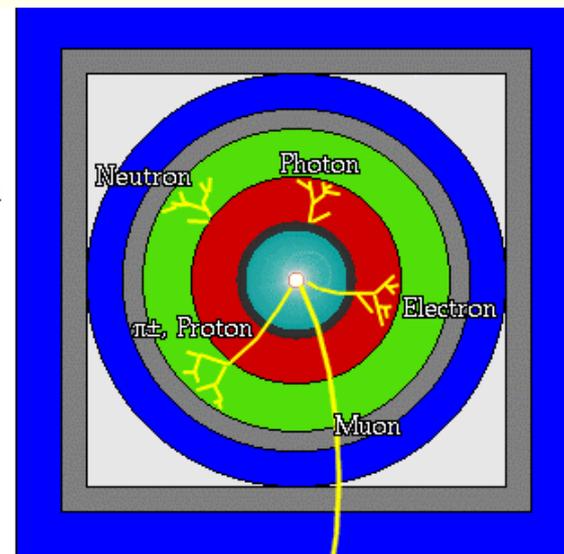
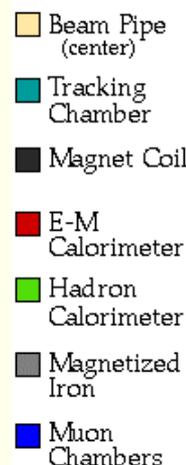
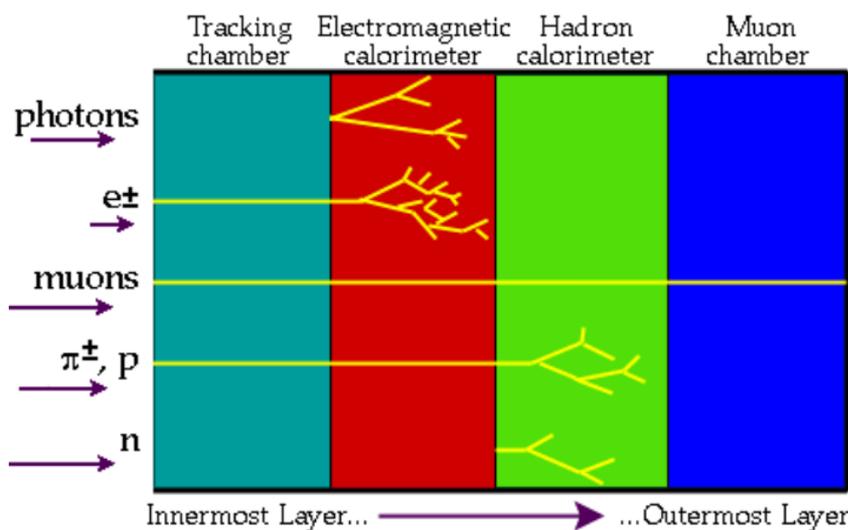
interazione forte

La differenza in

Massa, Carica ed Interazione

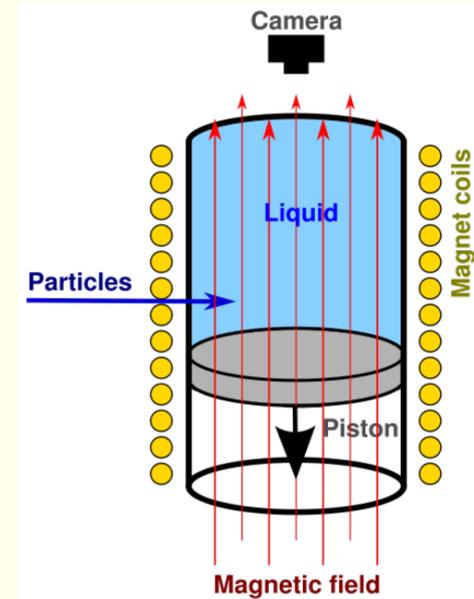
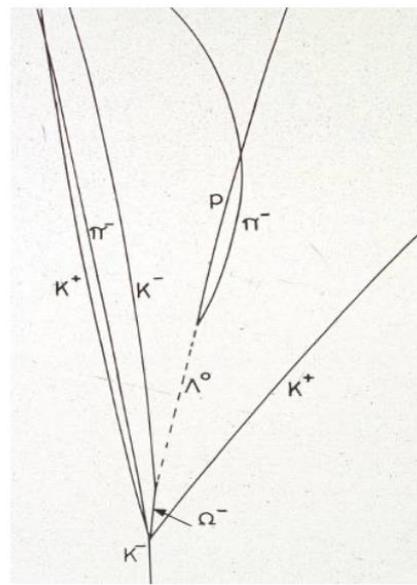
è la chiave per l'identificazione

- Le **particelle cariche** sono rivelate attraverso la loro interazione elettromagnetica con gli elettroni atomici dei mezzi attraversati
- I **fotoni** vengono rivelati indirettamente attraverso gli elettroni che essi producono per **effetto fotoelettrico**, **diffusione Compton** o **produzione di coppie**
- I **neutroni** subiscono interazioni forti con i nuclei dei materiali producendo **particelle secondarie cariche**
- Le particelle più difficili da rivelare sono i **neutrini** che possono avere solo interazioni deboli con i nuclei o gli elettroni.



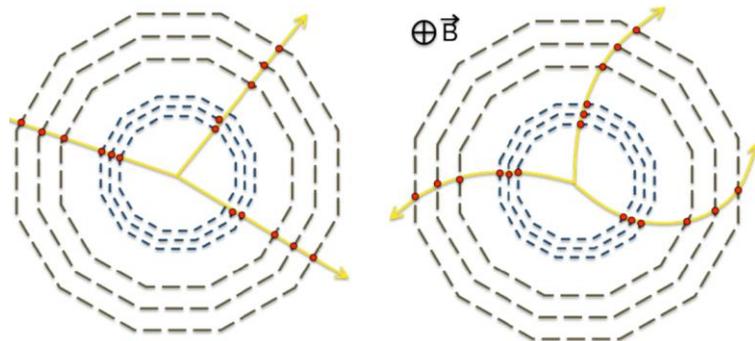
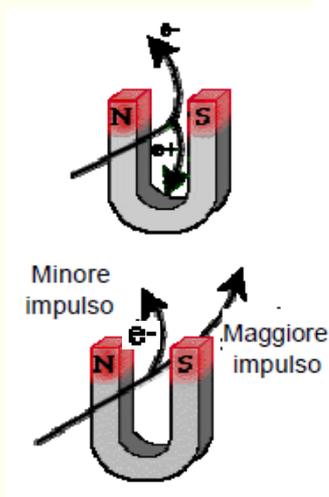
- E' costituita da un recipiente metallico contenente un **liquido surriscaldato e compresso**.

- Una particella carica ionizza il liquido e lungo il percorso si formano **bollicine** che possono essere fotografate ottenendo una *ricostruzione delle tracce*.

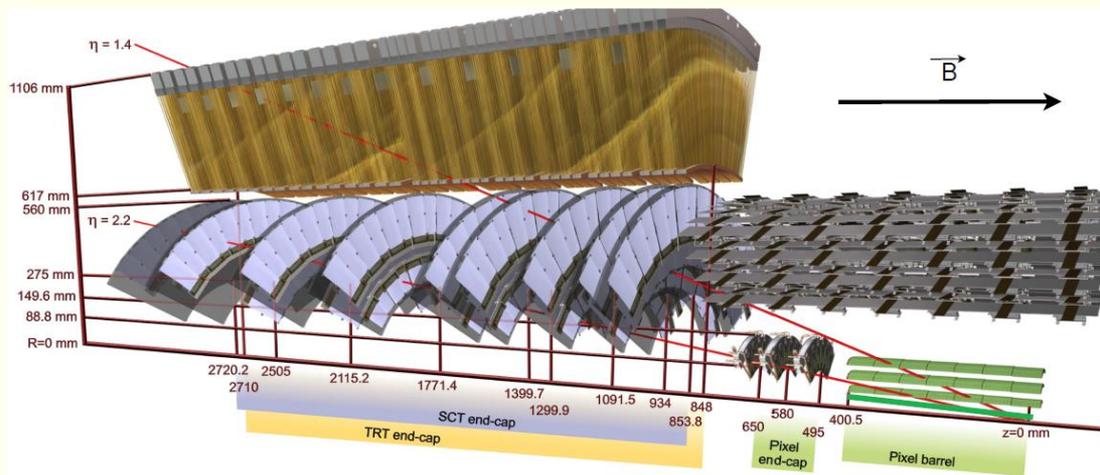
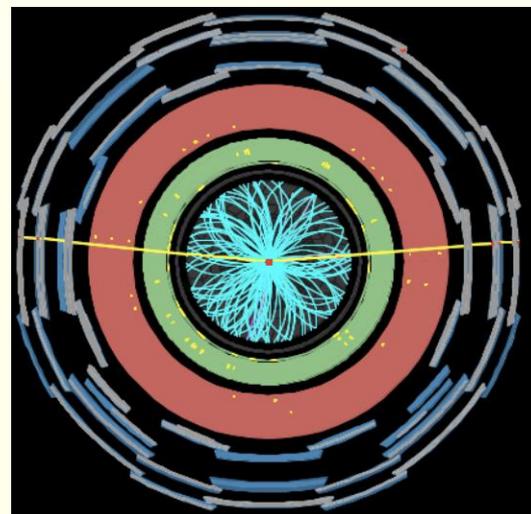


Milioni di collisioni fotografate e studiate una ad una..

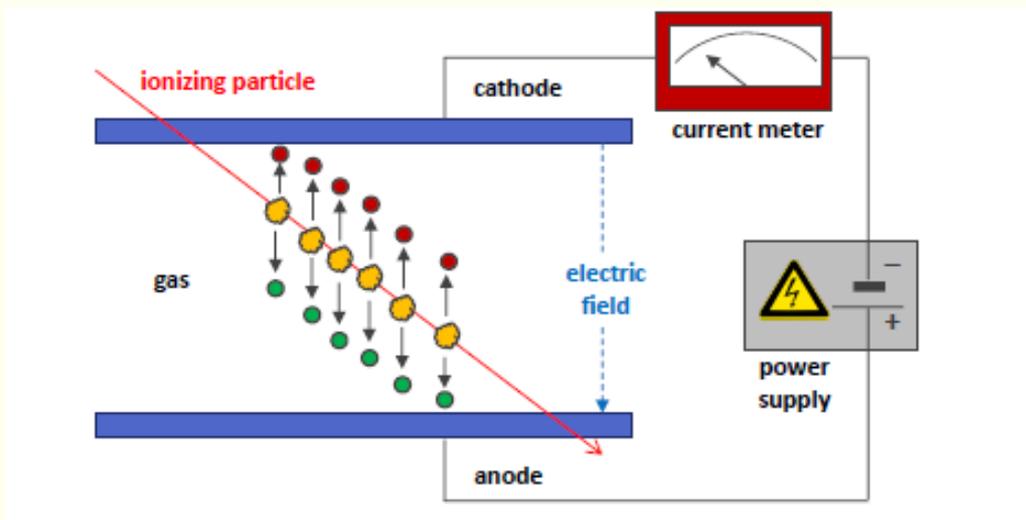
Le particelle cariche sono deviate se poste all'interno di un campo magnetico



Tracciatore dell'esperimento
ATLAS



Nei **moderni esperimenti** di fisica si usano **insiemi complessi di più rivelatori**. Combinando opportunamente i dati rivelati si è in grado di determinare traiettorie, velocità, masse, cariche elettriche.



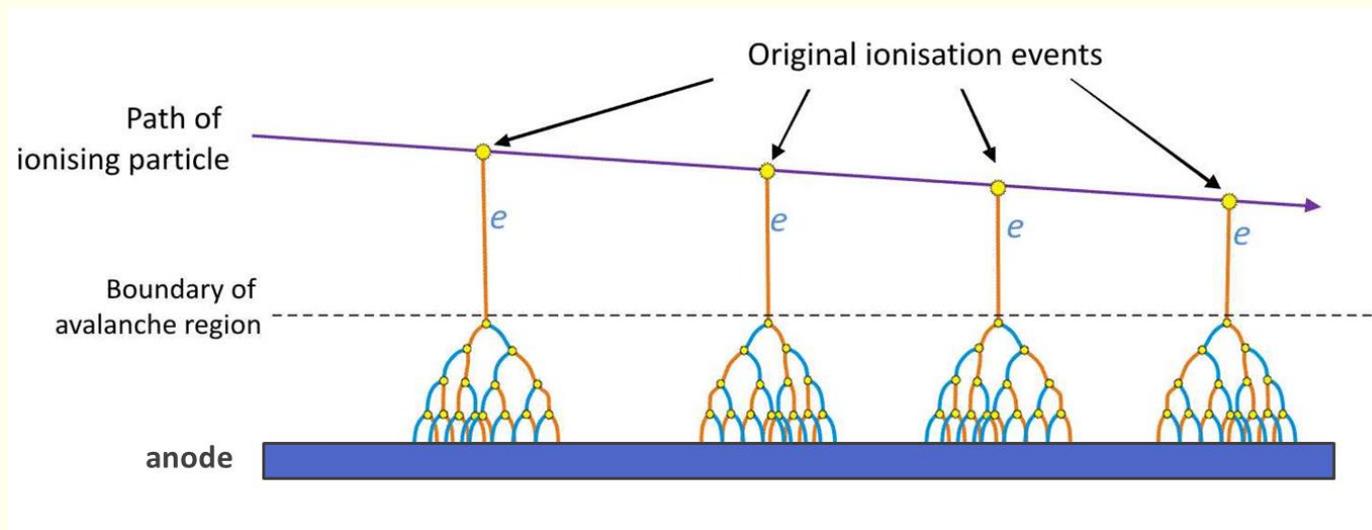
Il rivelatore più semplice è costituito da due elettrodi immersi in un gas tra i quali si produce un campo elettrico

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

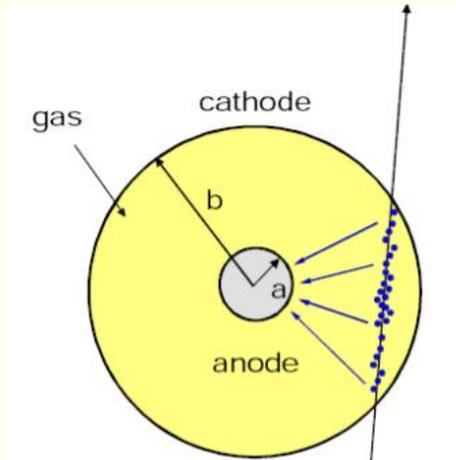
Il campo elettrico separa le cariche che muovendosi verso gli elettrodi producono un **segnale elettrico**

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

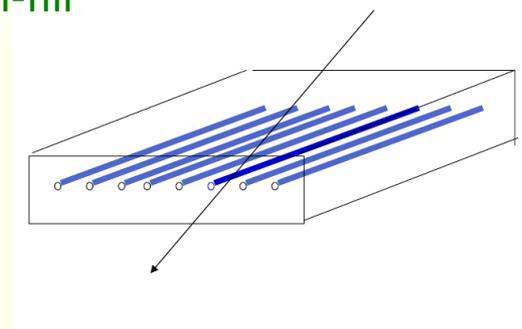
I rivelatori a gas più usati in fisica delle alte energie sono i **Rivelatori Proporzionali**, in cui la carica finale raccolta sull'anodo è proporzionale alla **ionizzazione primaria**, quindi anche all'energia rilasciata nel gas dalla particella ionizzante



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

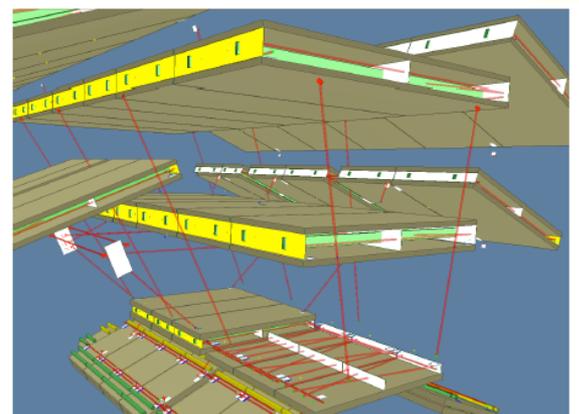
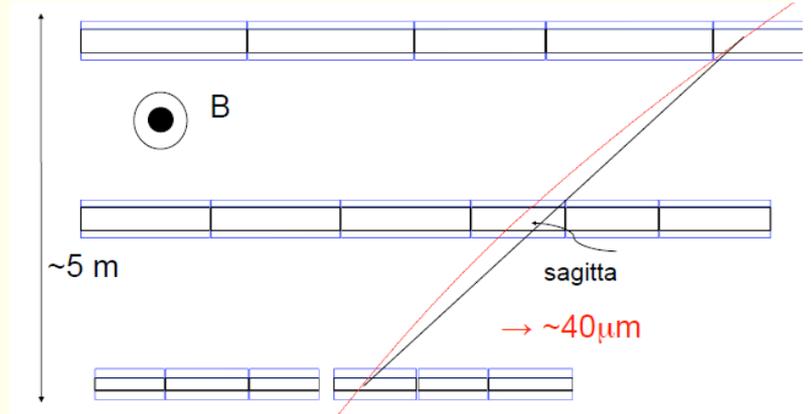
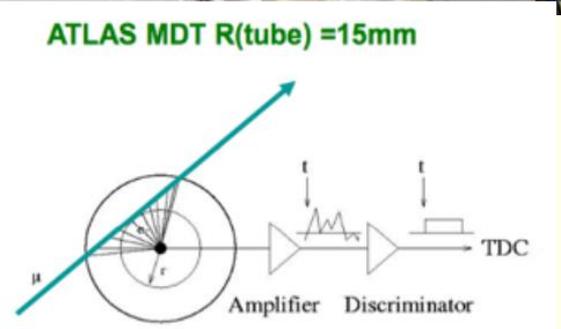
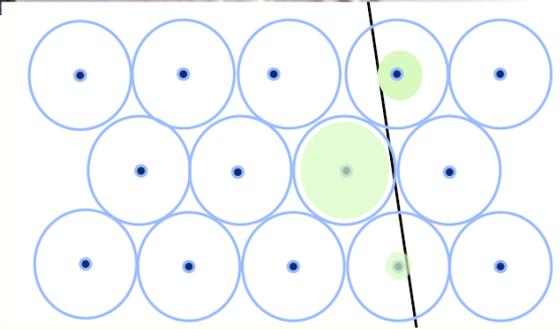


1968: Georges Charpak al CERN inventa la
Camera Proporzionale a Multi-fili

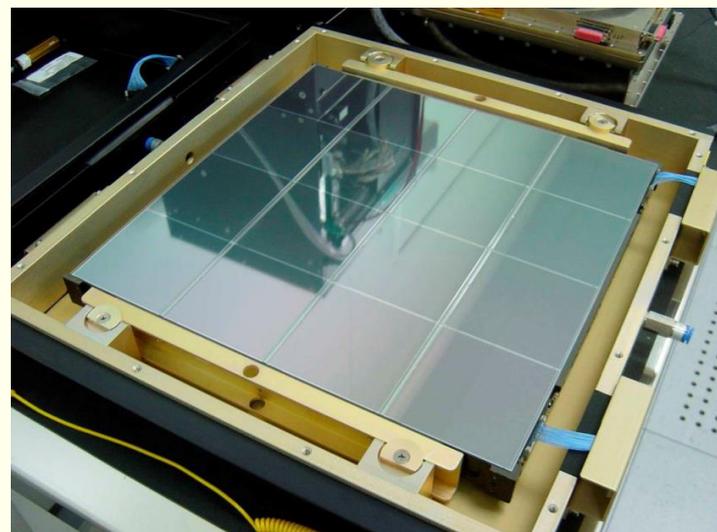
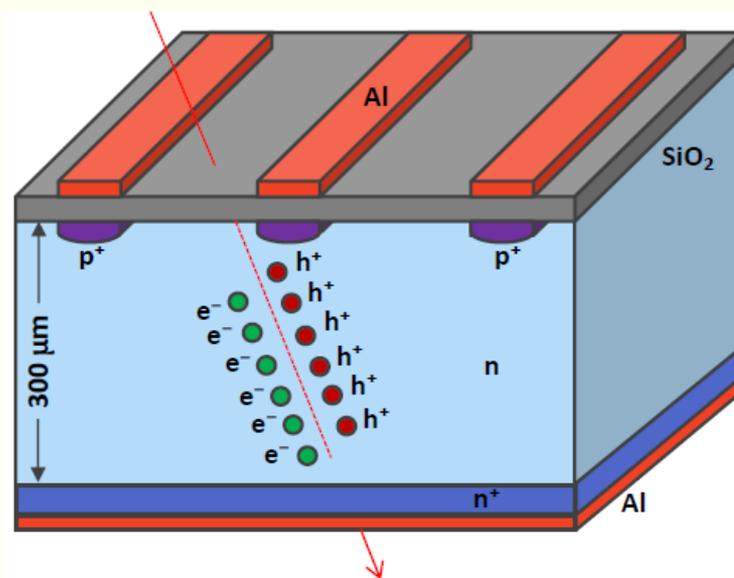


Il rivelatore è formato da **multi fili paralleli**
posti a una distanza di ~ 2 mm
Il segnale elettrico si forma sul filo più vicino
alla particella dando una *informazione sulla
sua posizione*
(tipica risoluzione spaziale ~ 0.1 mm)
I rivelatori a gas sono usati per coprire grandi
superfici

Premio Nobel nel 1992



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**



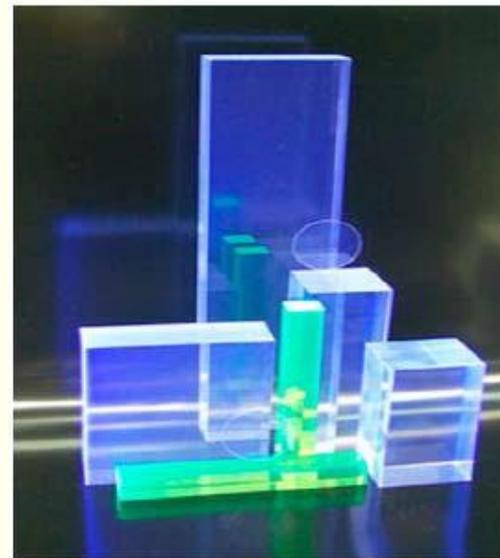


Questi rivelatori usano come **elemento attivo** dei materiali che hanno la proprietà di **emettere luce visibile** quando sono attraversati da **particelle cariche**

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

Esistono vari tipi di materiali scintillanti:

- **cristalli**
- **materiali plastici**



La scintillazione è utilizzata principalmente nei calorimetri

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

particella incidente →



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

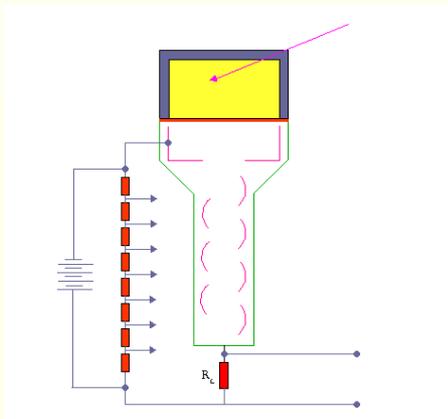
- Il segnale prodotto è *proporzionale all'energia* della particella:

$$S = kE$$

Esistono 2 *tipi* di calorimetri:

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

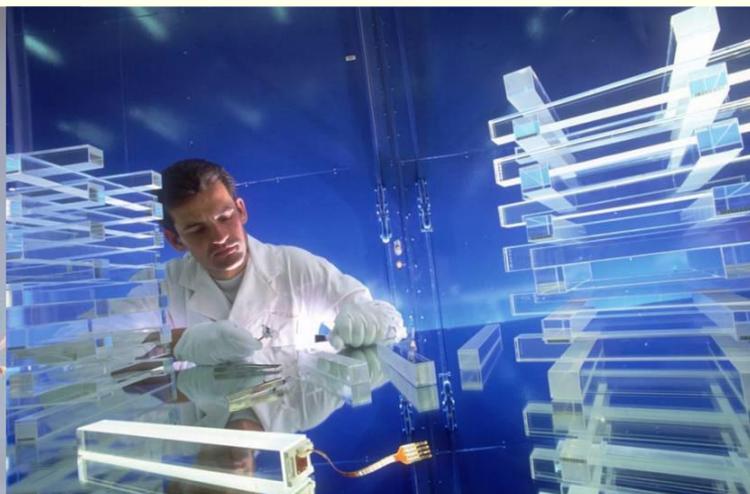
- **Calorimetri Adronici** (rivelazione di **adroni carichi e neutri**: **p, n, π , K**)



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

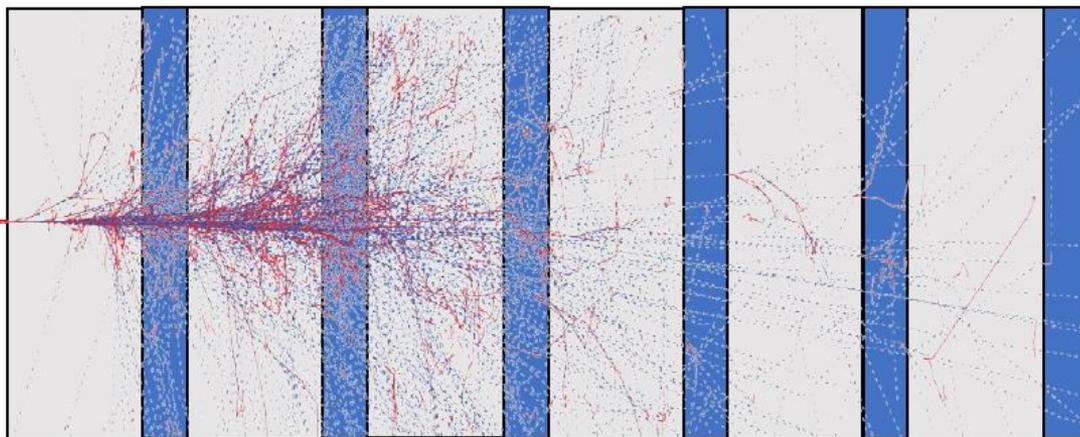
Cristallo di CMS (PbWO_4 = tungstato di piombo)
con rivelatore di luce
Circa 78000 cristalli scintillanti in CMS

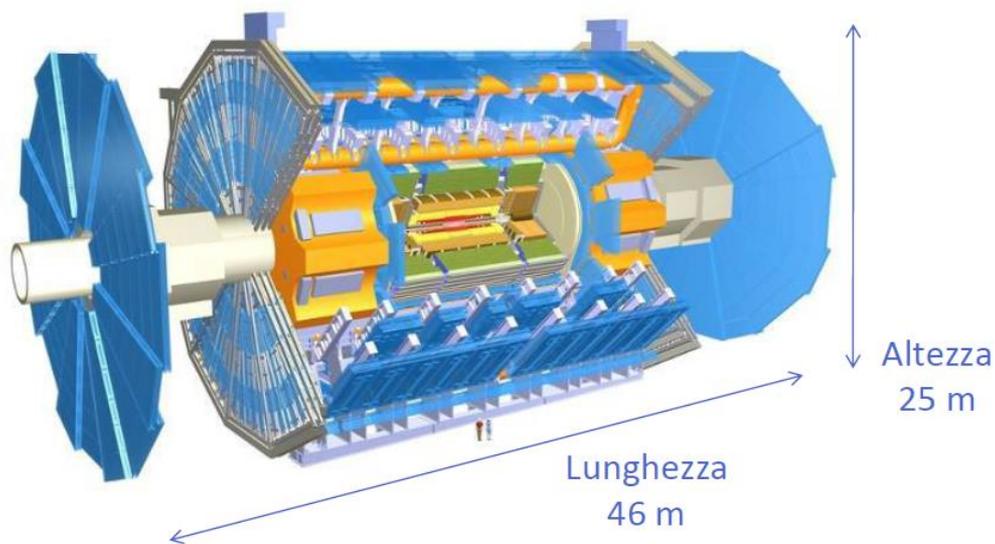
Circa 78000 cristalli scintillanti in CMS



- Sono **adroni** le particelle formate da **quark e gluoni**, come n, p, π , k...
- Gli adroni (n, p, π , k) interagiscono **con i nuclei** del materiale che attraversano, quindi **sciame** piu complessi di quelli elettromagnetici: piu larghi, con componente elettromagnetica,...
- **Calorimetro a campionamento**: strati di materiale denso (per esempio **ferro**) che sviluppa e **assorbe** dello scime (**assorbitore**) alternati a strati di **scintillatore** per rivelare i secondari e misurare energia primario

particella incidente





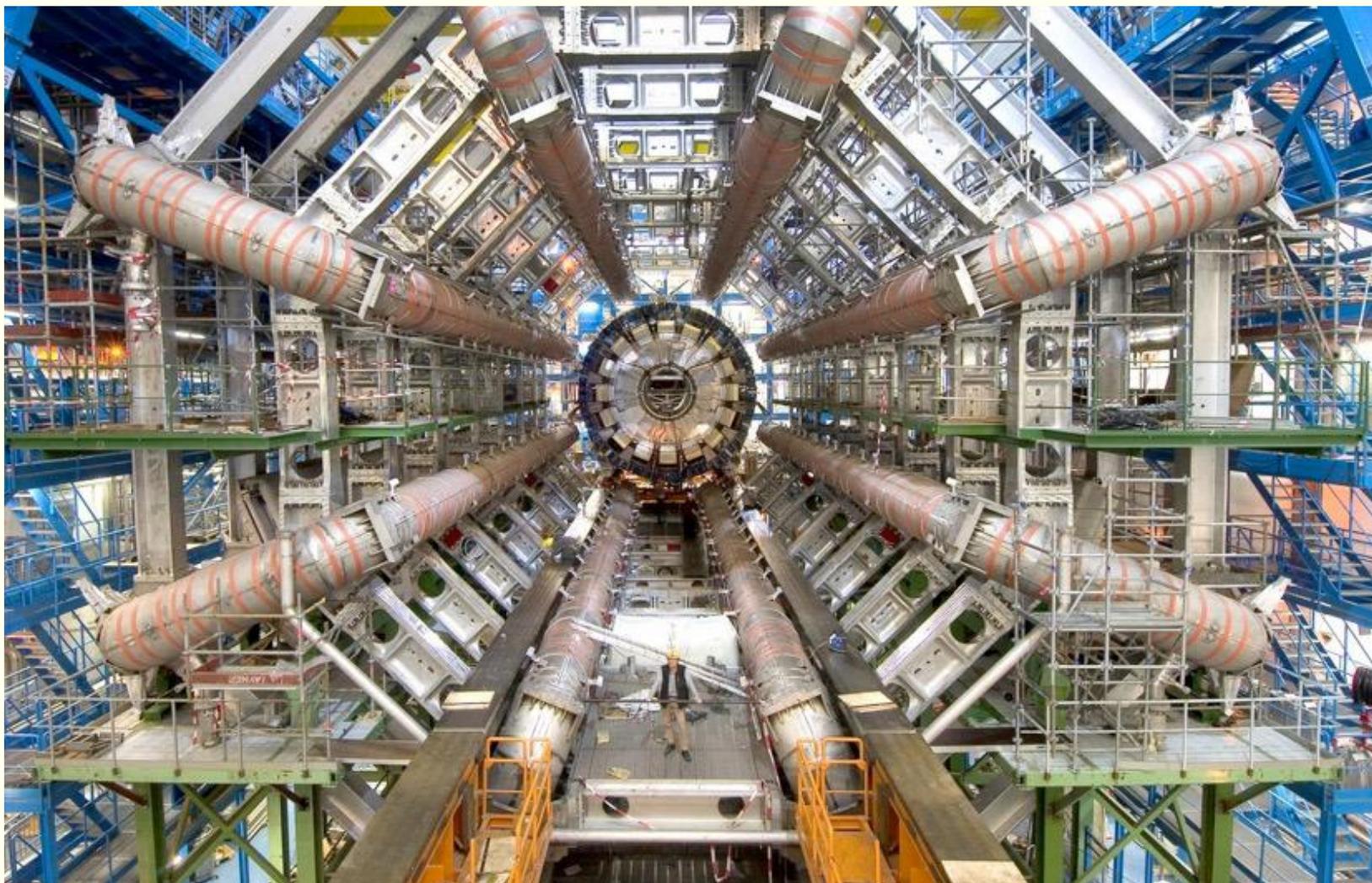
Peso 7000 ton
Superficie rivelatori
6000 m²
100G canali di
elettronica
Costo 400 M€
2100 scienziati
37 nazioni

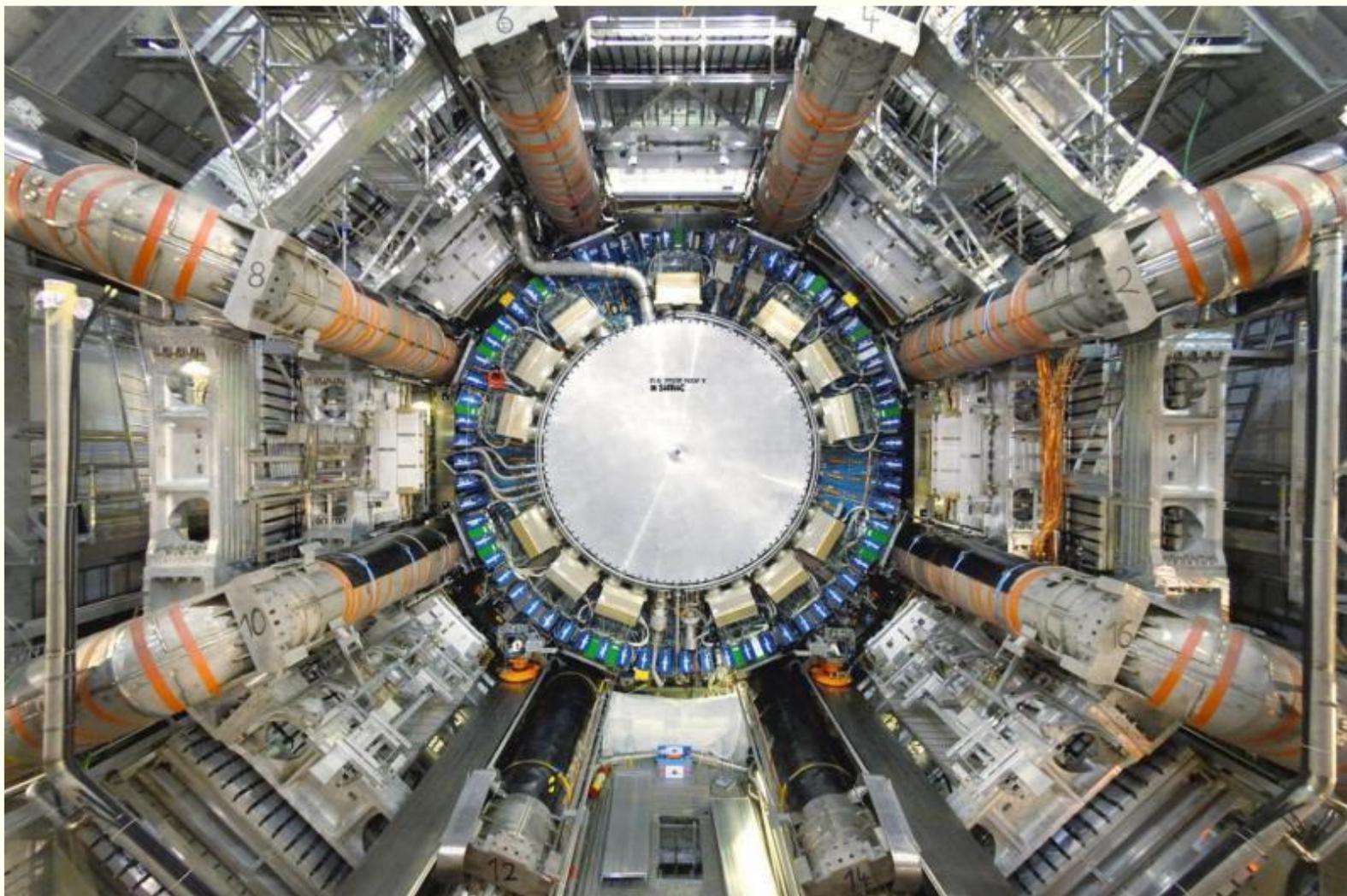
Struttura a «cipolla»: diversi tipi di rivelatori uno dentro l'altro a formare strati di rivelazione intorno al punto dove si *scontrano le particelle*.

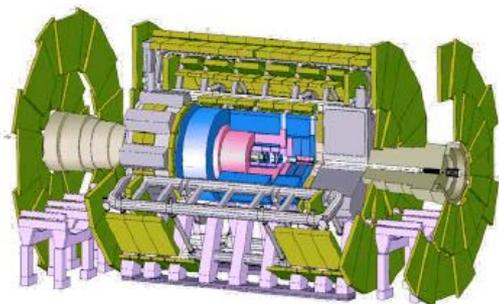
I rivelatori interni devono avere **un'alta risoluzione spaziale** per distinguere particelle molto vicine.

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

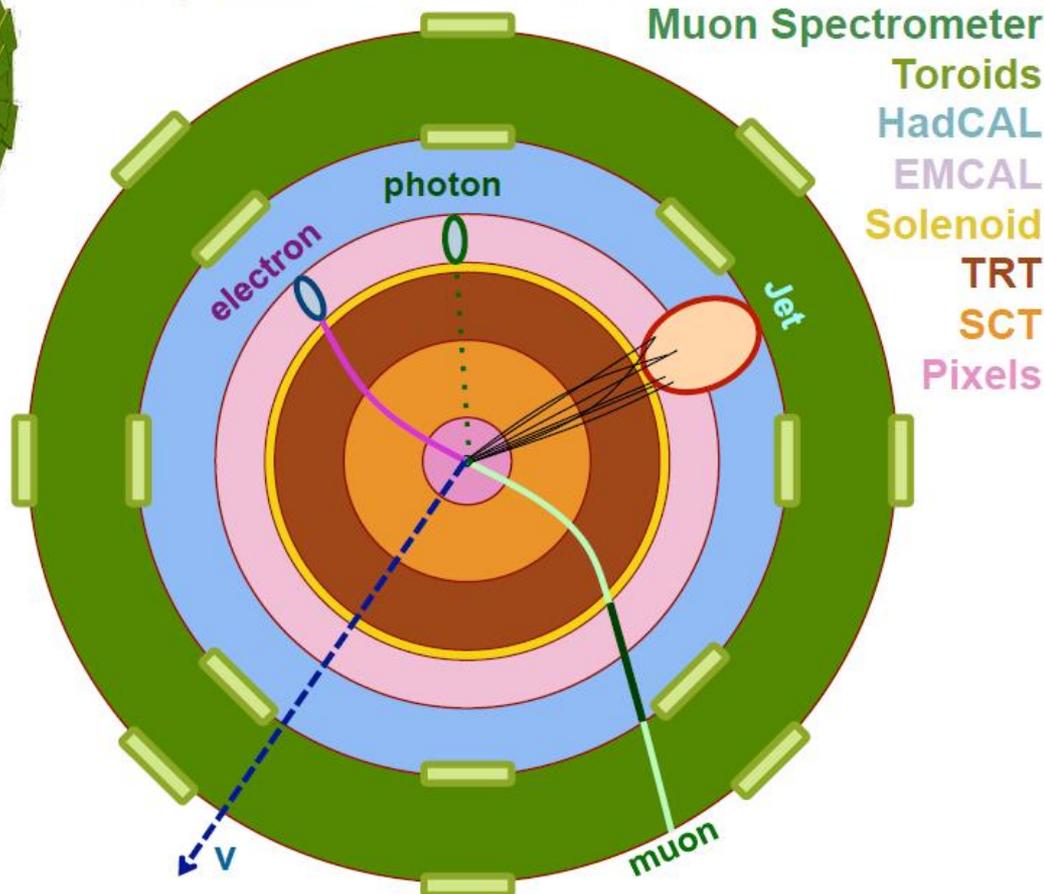








Simplified Detector Transverse View



	I	II	III	
Quarks	2.4 MeV u	1.3 GeV c	170 GeV t	0 γ
	4.8 MeV d	104 MeV s	4.2 GeV b	0 g
	<2 eV ν_e	<2 eV ν_μ	<2 eV ν_τ	91 GeV Z
Leptons	0.5 MeV e	16 MeV μ	1.8 GeV τ	80 GeV W
				126 GeV H
				Bosons

Buon divertimento!