

# ATLAS Masterclass

## I Rivelatori di Particelle

B.Liberti

Master Class 6 Marzo 2026

# I rivelatori di particelle \_ perché?

Servono a compiere il metodo sperimentale (G.Gailei) nello studio della fisica delle particelle elementari!

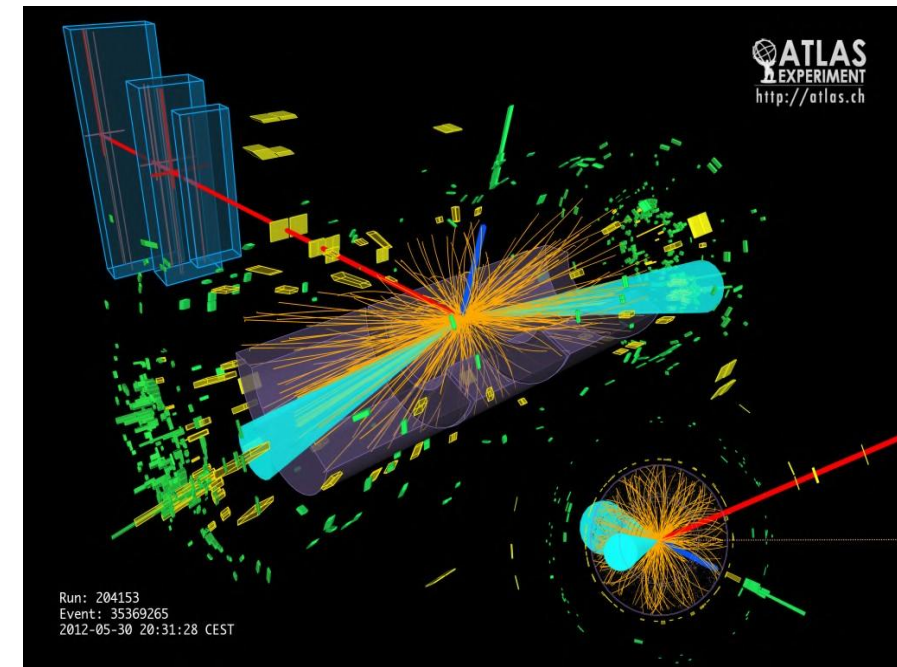
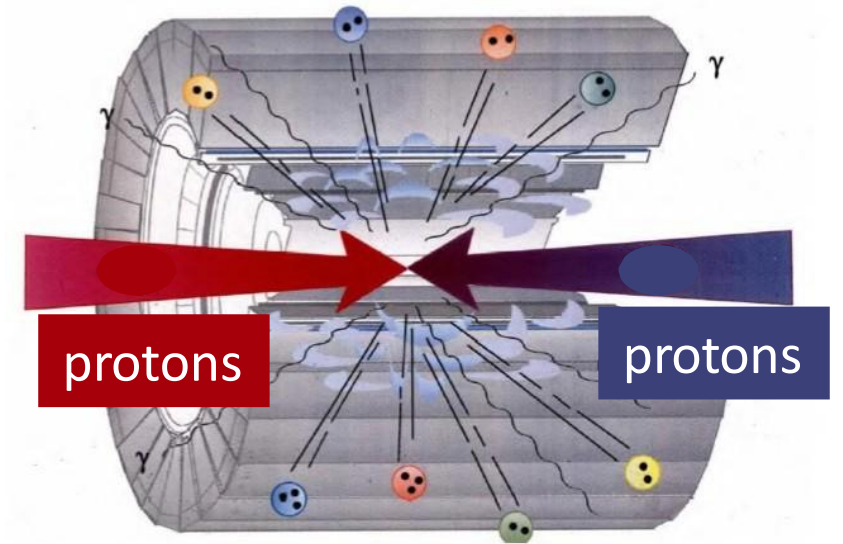
- Identificare il numero ed il tipo di particelle prodotte
- Misurare la traiettoria, la carica, l'energia e quantità di moto (massa e velocità)

...e nel caso di fisica delle alte energie sugli acceleratori

- A stabilire che cosa è accaduto nella collisione!

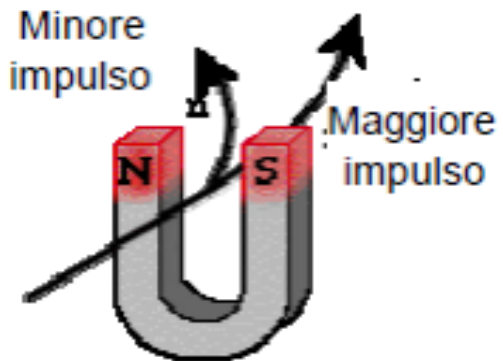
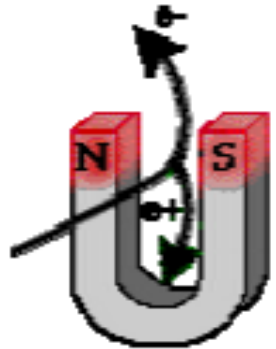
Il modello teorico ci detta quali particelle e in che quantità vengono prodotte, ci detta con quali energie e come decadono in particelle più leggere. Si va a verificare identificando e misurando con i rivelatori queste particelle.

C'è qualcosa che non torna? C'è una nuova particella?  
Potenziale di scoperta!

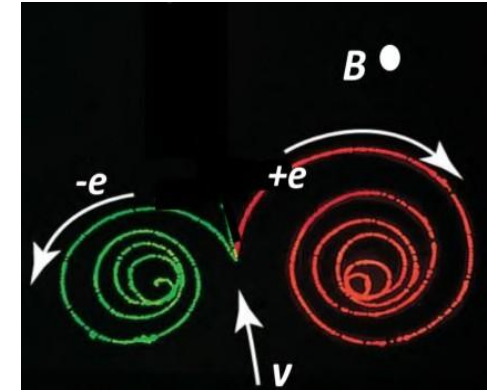
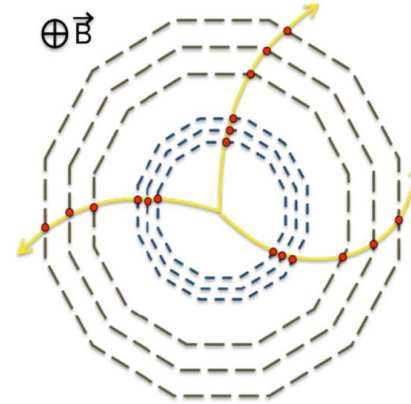
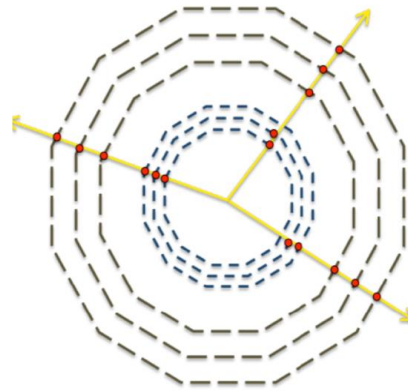


# Misura della carica e della quantità di moto

- Una particella carica in moto in un campo magnetico  $B$  segue una traiettoria curvilinea, a causa della **forza di Lorentz**



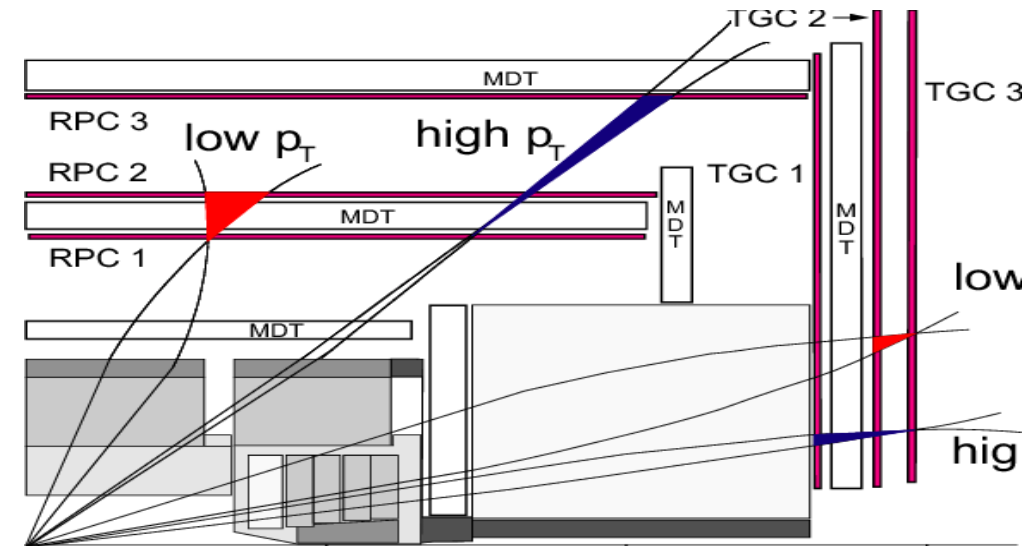
- Dal **verso di curvatura** si può determinare la **carica elettrica**



**Es: Evento in una camera a bolle**  
elettrone ( $e^-$ ) ed un positrone ( $e^+$ ) generate dalla collisione di un fotone con gli atomi di idrogeno

- La traiettoria segue un arco di circonferenza, dal raggio di curvatura posso ricavare:

$$p = mv = qBR$$



# Il rivelatore di particelle – lo Strumento \_ come?

- Il rivelatore di particelle è uno strumento elettro-meccanico che produce un segnale osservabile e registrabile.

Il segnale osservabile è causato dalla interazione tra la particella ed un elemento attivo (sensibile) che costituisce il rivelatore.

L'interazione radiazione materia è alla base del principio di rivelazione.

Ogni particella ha un modo caratteristico di interagire (interazione elettromagnetica, nucleare forte e debole) con la materia (nucleoni, nuclei, atomi ed elettroni che la compongono). In base a questo 'modo' viene identificata.

- Il rivelatore è caratterizzato dalla Sensibilità (ad una certa particella), dalla sua Risposta (intensità del segnale prodotto), dall'Efficienza (quante ne rivela su tutte), dalla Risoluzione (capacità di distinguere tra due misure vicine), dalla Velocità (in quanto tempo ottiene il segnale) e dal Tempo Morto (per quanto tempo è accecato)

# Un esempio di Rivelatore...a caso

La **particella carica** (che tipo di particella) passa nel **gas** (materiale sensibile), interagisce **ionizzando** (interazione elettromagnetica con gli elettroni dell'atomo)

L'alta tensione crea un campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni

La corrente generata viene misurata su un circuito

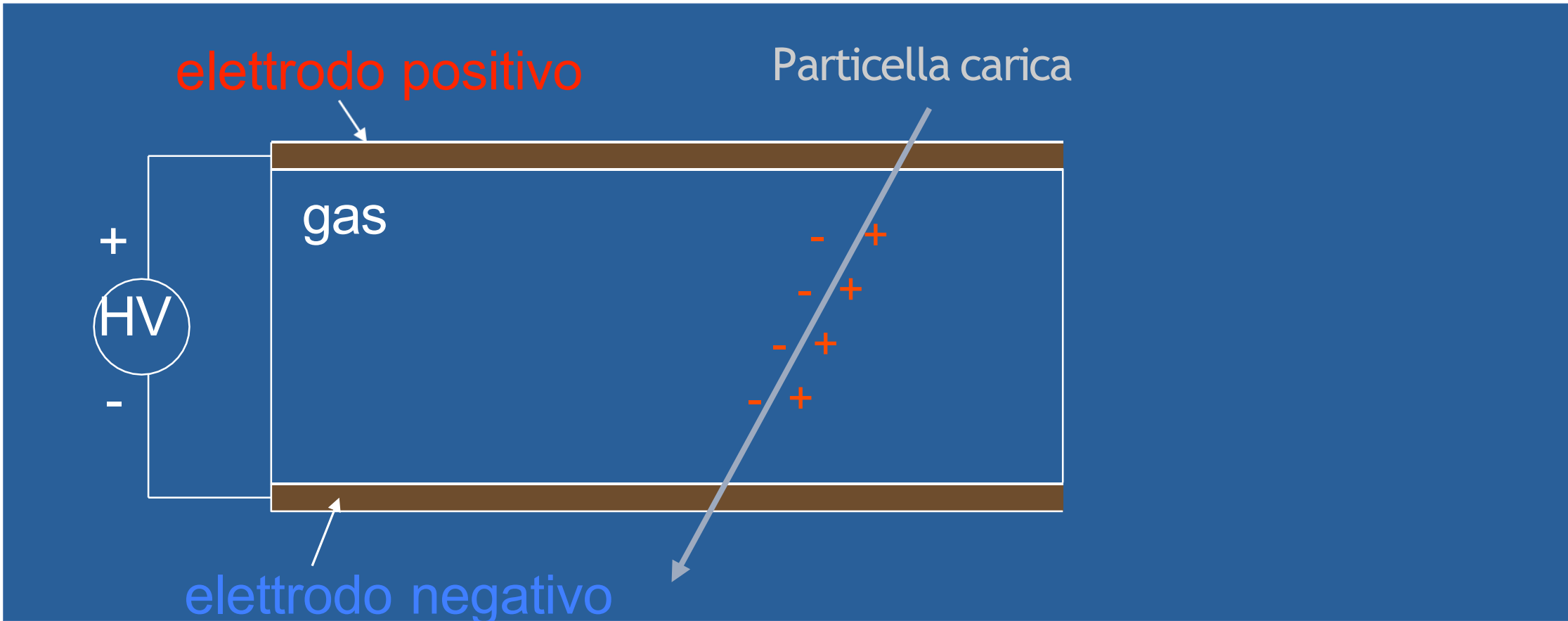


# Un esempio di Rivelatore...a caso

La **particella carica** (che tipo di particella) passa nel **gas** (materiale sensibile), interagisce **ionizzando** (interazione elettromagnetica con gli elettroni dell'atomo)

L'alta tensione crea un campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni

La corrente generata viene misurata su un circuito

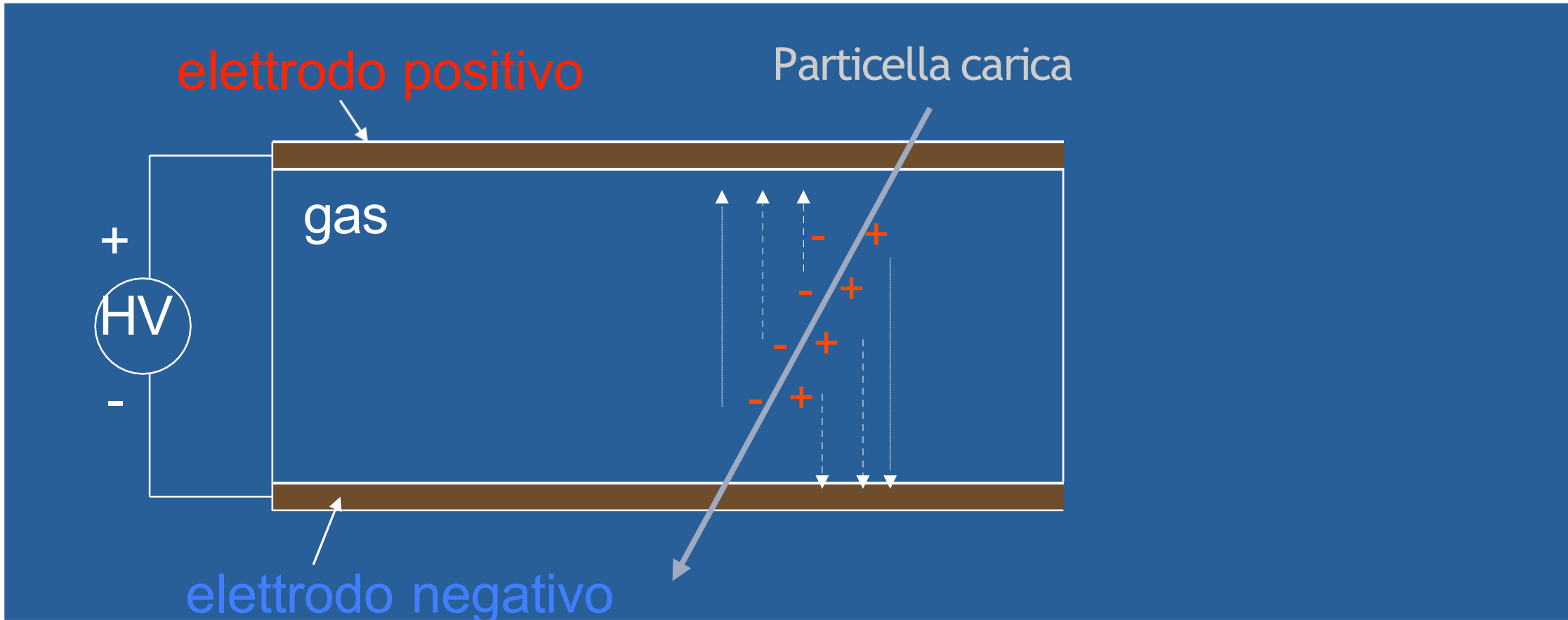


# Un esempio di Rivelatore...a caso

La particella carica (che tipo di particella) passa nel gas (materiale sensibile), interagisce ionizzando (interazione elettromagnetica con gli elettroni dell'atomo)

L'alta tensione crea un **campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni**

La corrente generata viene misurata su un circuito

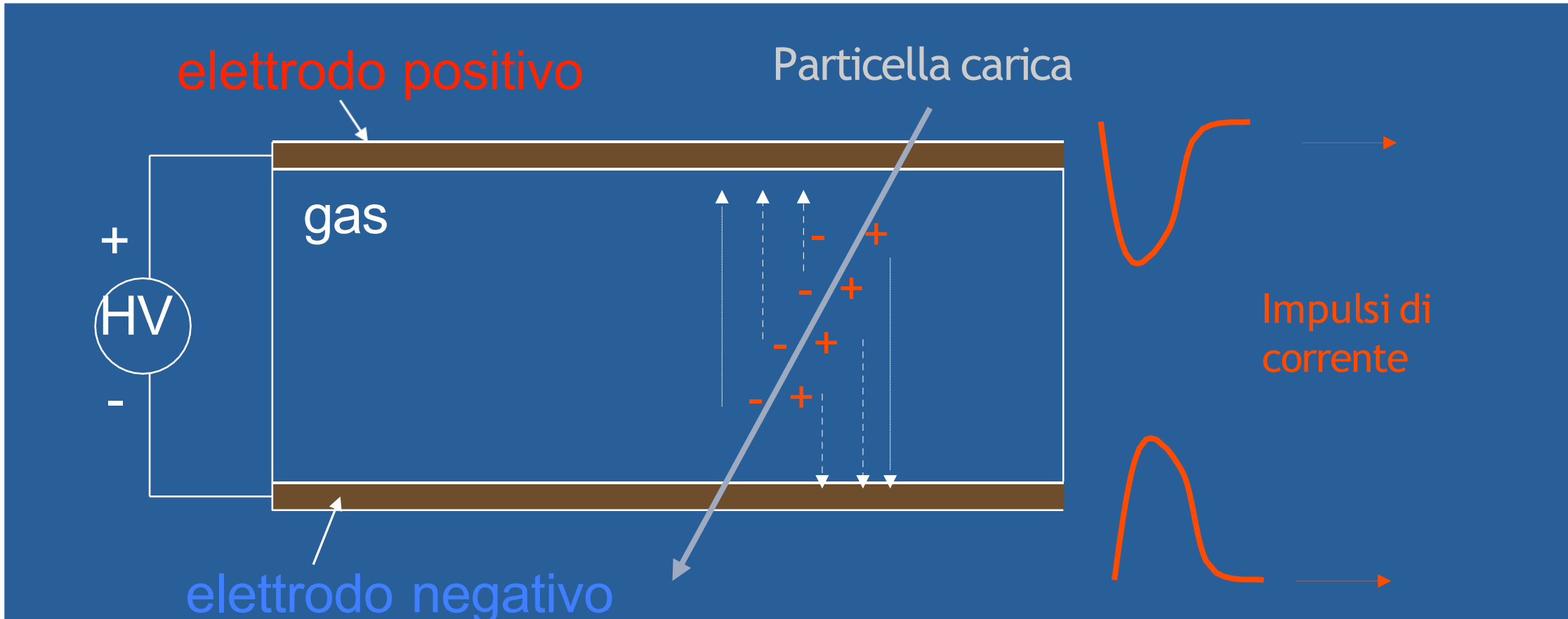


# Un esempio di Rivelatore...a caso

La particella carica (che tipo di particella) passa nel gas (materiale sensibile), interagisce ionizzando (interazione elettromagnetica con gli elettroni dell'atomo)

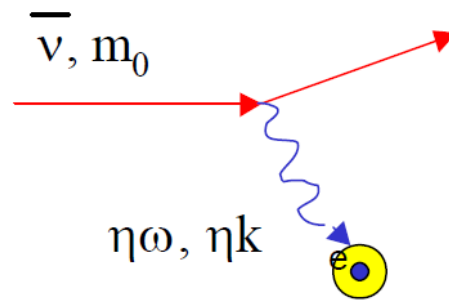
L'alta tensione crea un campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni

La **corrente generata viene misurata su un circuito**

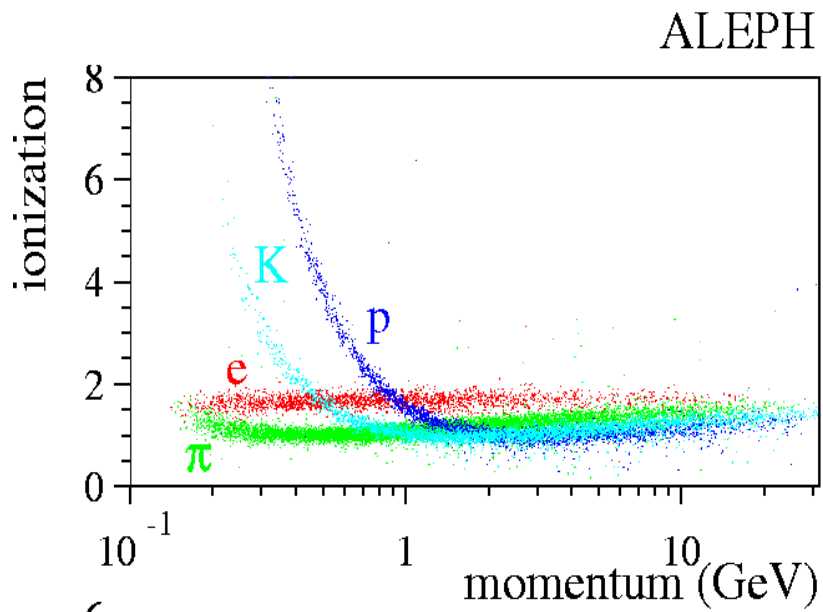
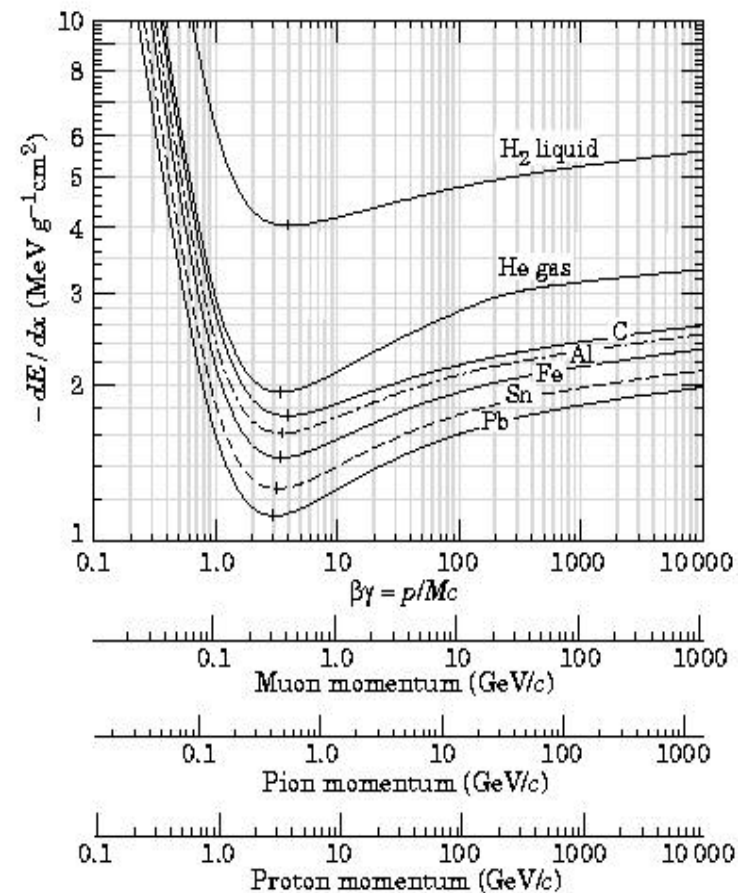


# Interazione Radiazione materia\_ Particelle Cariche

Le particelle cariche nella materia:  
 Interagiscono con elettroni degli atomi  
 perdendo energia e scatterando ->  
 Eccitazione (eventuale riemissione di  
 luce) e/o Ionizzazione atomi (coppia  
 elettrone-ione)



## Formula di Bethe-Bloch

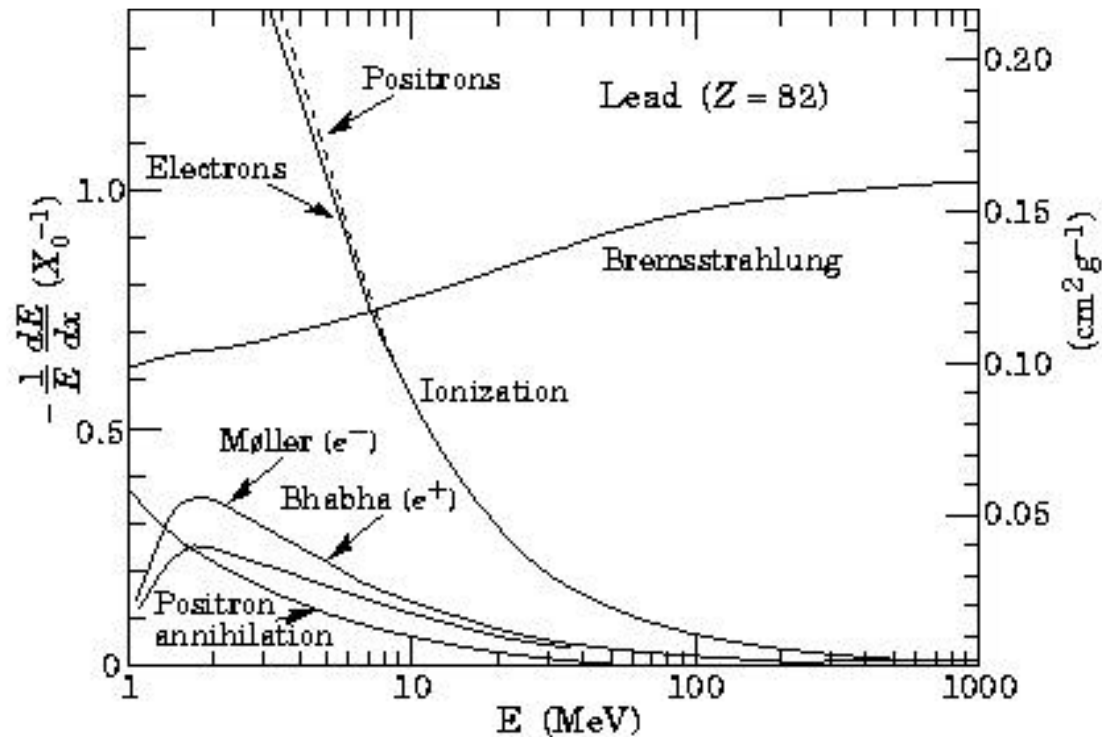
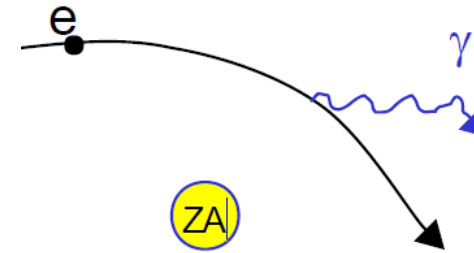


Esprime la perdita di energia per ionizzazione  
 di una particella carica "pesante" ( $m \gg m_e$ )

# Interazione Radiazione Materia\_ Elettroni

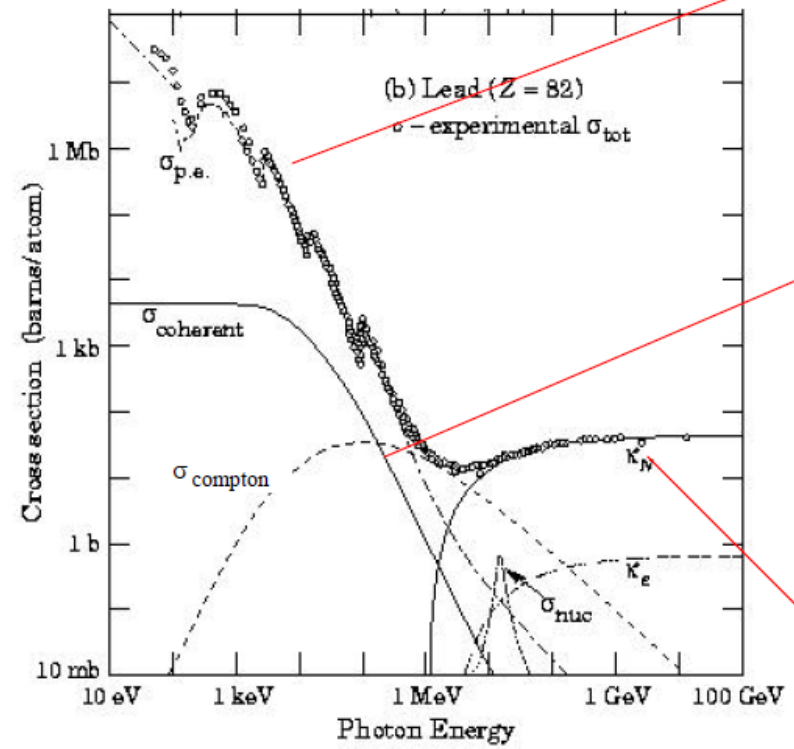
Per energie di elettroni/positroni  $> 10$  MeV  
entra in gioco

il fenomeno della Bremsstrahlung ->  
emissione di fotoni dovuta all'effetto  
accelerante del campo Coulombiano dei nuclei



# Interazione Radiazione Materia\_ Fotoni

Per poter essere rivelato un **fotone** deve **creare o cedere** energia ad una **particella carica**



**Effetto fotoelettrico**

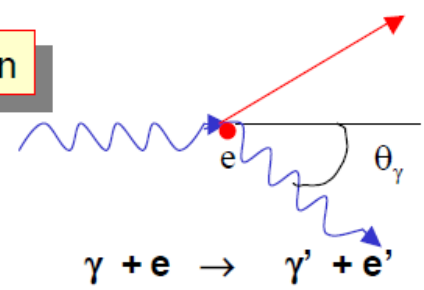


$$\gamma + \text{atomo} \rightarrow \text{ione}^+ + e^-$$

Vengono estratti principalmente elettroni delle shell K

$$\sigma_{\text{foto}} \propto Z^5$$

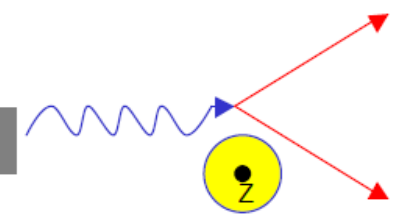
**Diffusione Compton**



$$\gamma + e \rightarrow \gamma' + e'$$

E' un fenomeno di diffusione da parte di un elettrone quasi libero

**Produzione di coppie**



$$\gamma + \text{campo Coul.} \rightarrow e^+ + e^-$$

Solo se  $E_\gamma > m_e c^2$

Paola Gianotti



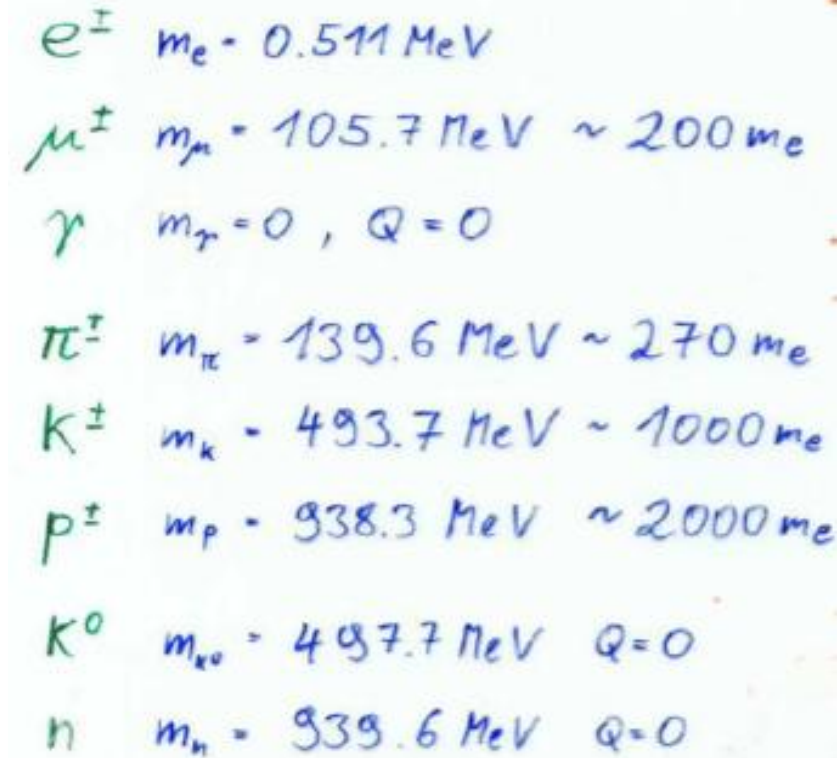
# Il rivelatore di particelle \_ quali?

Le particelle direttamente rivelabili sono

**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



$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e$
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q = 0$
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q = 0$

## **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

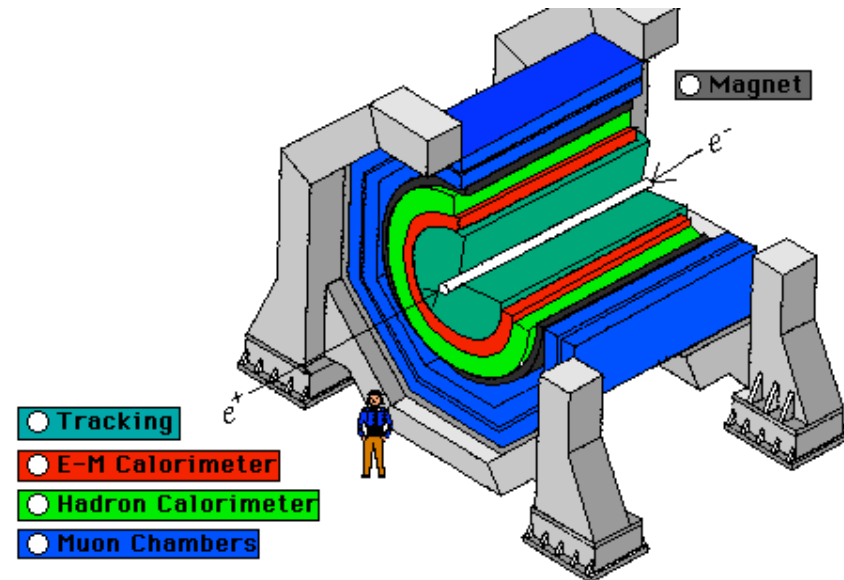
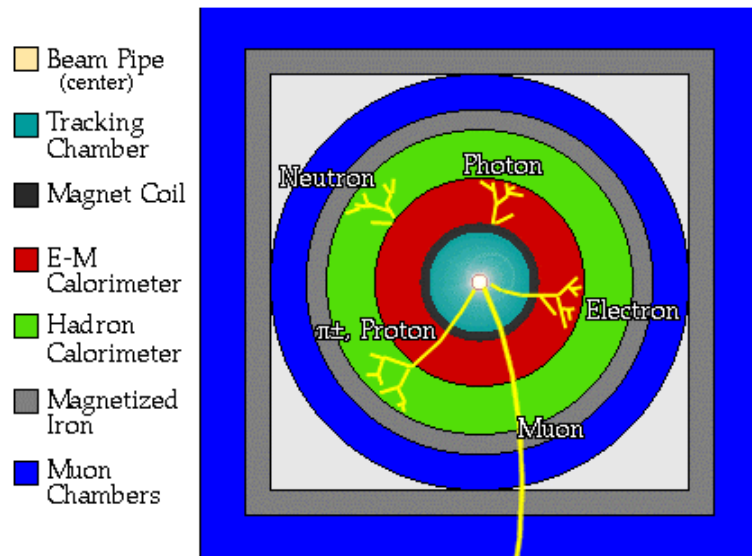
Protoni, Pioni ( $\pi^+ \pi^-$ ), Kaoni ( $K^+ K^- K^0$ ), Neutroni

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

Elettroni e fotoni

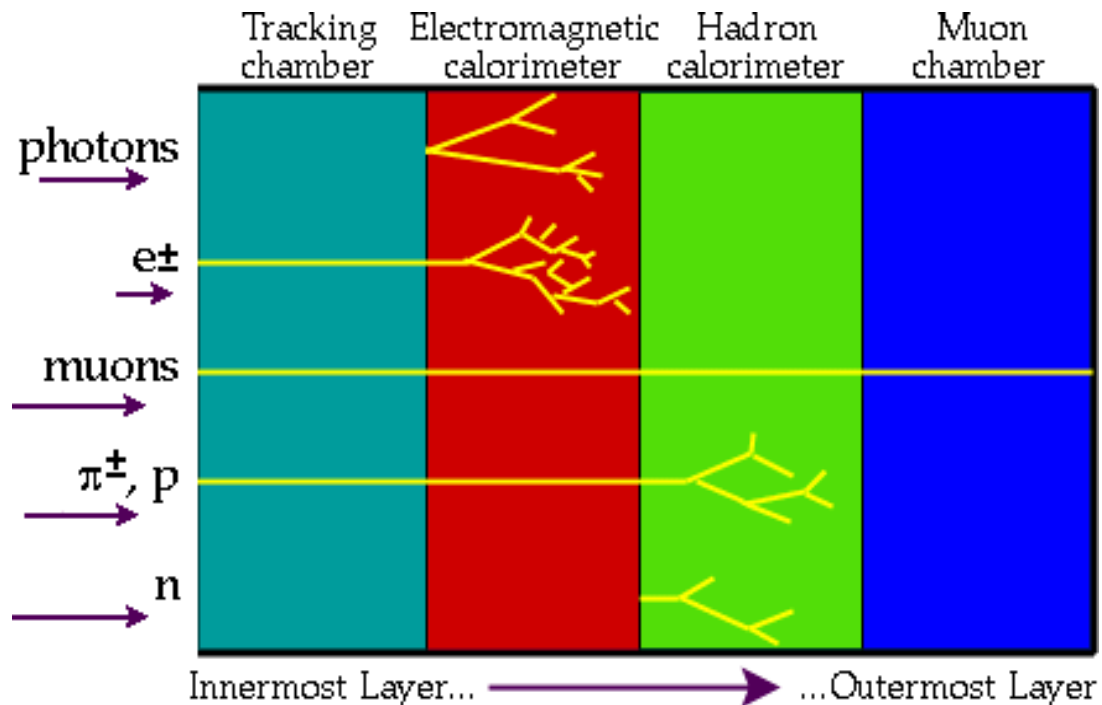
# Il rivelatore di particelle – l'Apparato

- La maggior parte delle particelle generate decade in particelle più stabili elettroni, fotoni, muoni, un qualche tipo di adrone, neutrini, o nelle loro antiparticelle.
- Per 'ricostruire gli eventi' devo ricomporre tutte le informazioni di tutti i prodotti.
- I moderni esperimenti di fisica sono insiemi complessi di più rivelatori in successione, ciascuno con caratteristiche specifiche ottimizzate per ogni particella e/o specifica misura.
- Combinando le misure di carica, energia ed impulso si identificano le particelle.
- 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.
- Inoltre si devono registrare molti eventi (tanti più eventi quanto più rare sono le particelle che si vogliono osservare). I rivelatori devono essere veloci e precisi (così gli eventi si ricostruiscono bene e l'informazione è completa)!



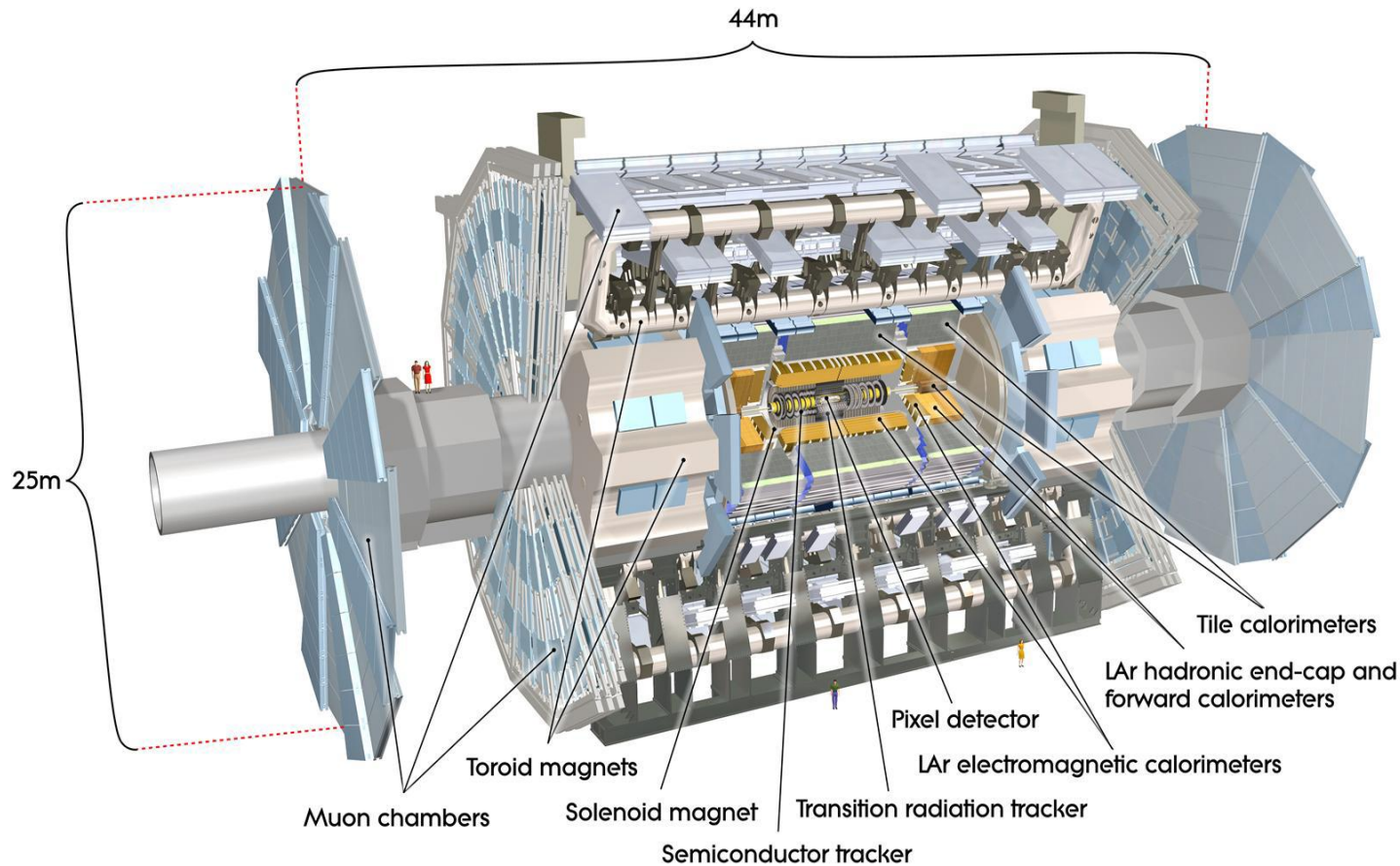
# Il rivelatore di particelle – Interazione Radiazione Materia

- 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 coi i nuclei dei materiali producendo particelle secondarie cariche



- I **neutrini** che hanno solo interazioni deboli con i nuclei o gli elettroni, con relativa emissione di leptoni, con flussi importanti e rivelatori massivi. Non sono 'direttamente' rivelabili, con il principio di conservazione, una energia 'mancante' è attribuibile ai neutrini
- I **quark** non esistono allo stato libero, a causa dell'interazione forte (confinamento adronico), convertono subito la loro energia in fiotti di particelle detti jet

# ATLAS a LHC



- Struttura a «cipolla»: diversi rivelatori a formare strati di rivelazione intorno al punto di interazione.
- 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 m<sup>2</sup>**

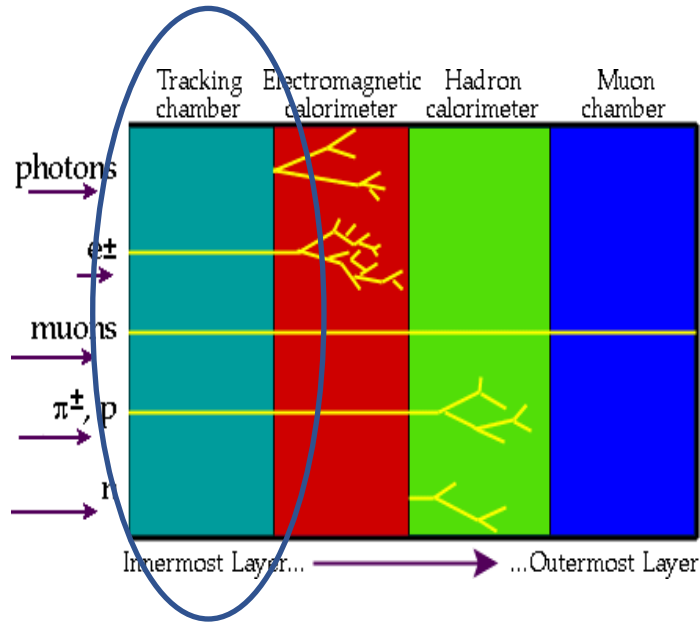
**100G canali di elettronica**

**Costo: 400 M€**

**2100 scienziati**

**37 nazioni**

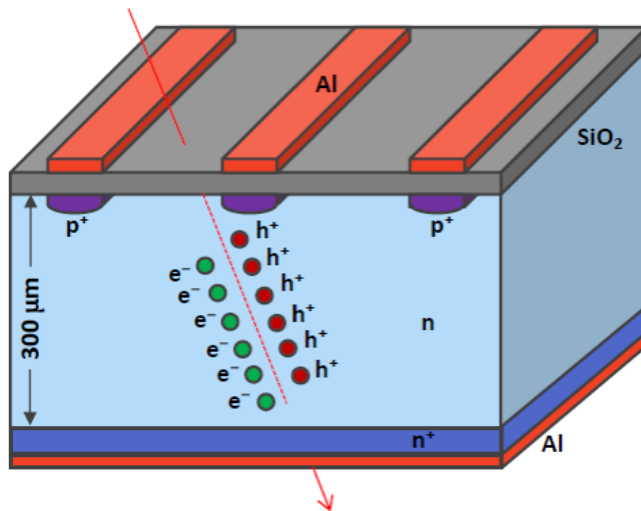
# Tracciatori \_ Impulso



- I tracciatori interni consistono in diversi sistemi concentrici di rivelatori immersi in un **campo magnetico**.
- **Misurano la direzione, il momento e la carica delle particelle elettricamente cariche**

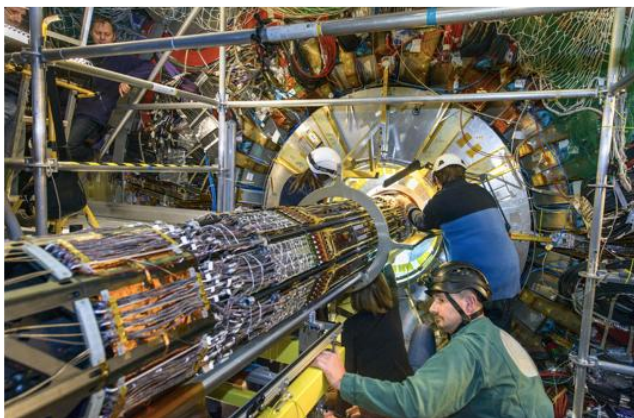
## Es: I rivelatori a semiconduttore

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



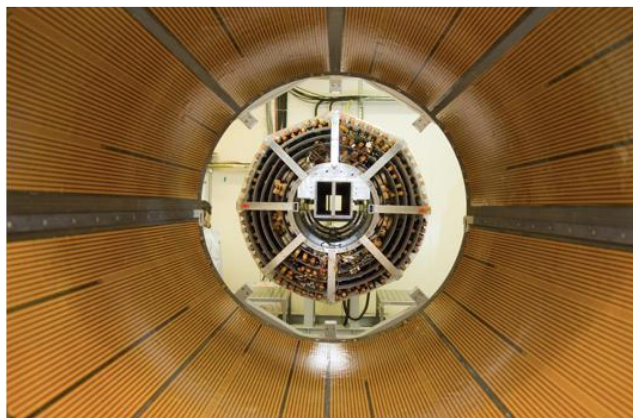
# I Tracciatori di ATLAS

Pixel detector



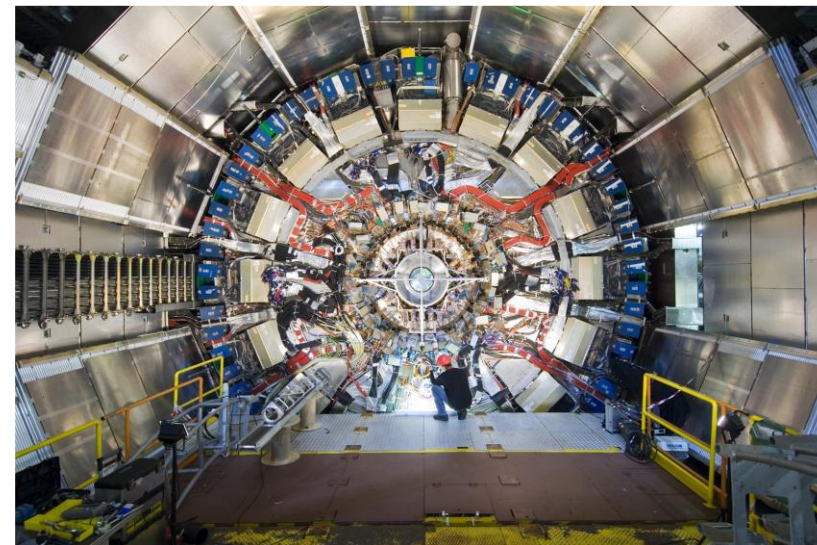
- 4 strati di pixel di Silicio, ognuno grande come un granello di sabbia
- Misura l'origine ed il momento della particella

Semiconductor tracker

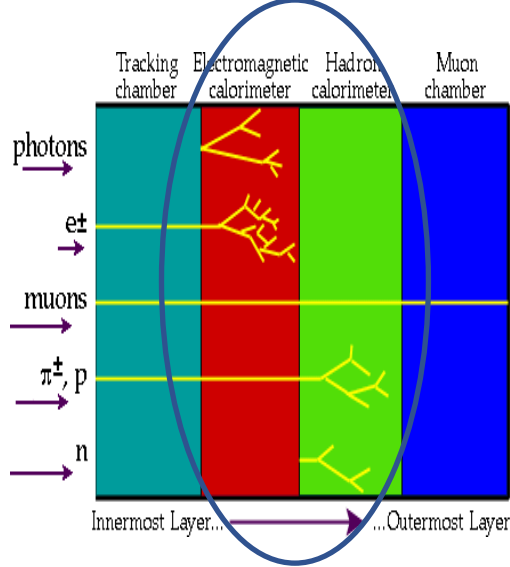


- 6 milioni di micro strisce di sensori di Silicio
- È usato per rivelare e ricostruire le tracce delle particelle cariche con una precisione di 25 (meno della metà dello spessore di un capello umano!)

Tracciatore interno



# I Calorimetri \_ Energia



- **I calorimetri misurano l'energia rilasciata dalle particelle.**
- Le particelle interagiscono "sciamaando", si moltiplicano e diversificano, aumentano in numero con energie sempre più basse, fino ad essere completamente assorbite. Sono rivelatori "distruttivi", tutta l'energia viene rilasciata e nessuna particella riesce a oltrepassarli...ad eccezione dei muoni!
- Si dividono in Calorimetri Elettromagnetico per gli sciami elettromagnetici (per particella iniziale elettrone, fotone o positrone) e in Calorimetri Adronici per sciami adronici (se la particella iniziale è un adrone)

- **Calorimetri Elettromagnetico per gli sciami elettromagnetici (particella iniziale elettrone, fotone o positrone)**

- L'elettrone interagisce principalmente tramite bremsstrahlung -> emissione di un fotone
- Il fotone tramite la produzione di coppie  $e^+/e^-$ .

- **Calorimetri Adronici per sciami adronici (se la particella iniziale è un adrone)**

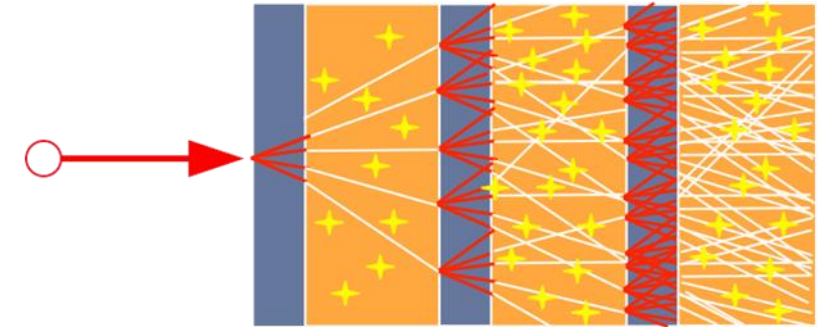
- Sono adroni le particelle formate da quark e gluoni, come n, p,  $\pi$ , k
- Gli adroni (n, p,  $\pi$ , k) interagiscono con i nuclei del materiale che attraversano, gli sciami sono più complessi di quelli elettromagnetici, più larghi e con componente elettromagnetica

# I Calorimetri

- I calorimetri hanno una struttura a strati alternati di assorbitori passivi e strati di rivelatore attivi.
- L'assorbitore frena le particelle e consente di contenere lo sciame in dimensioni ridotte
- L'energia depositata negli strati sensibili del rivelatore viene invece misurata
- Il segnale prodotto è *proporzionale all'energia* della particella:  $S = kE$

## Es: I rivelatori a scintillazione

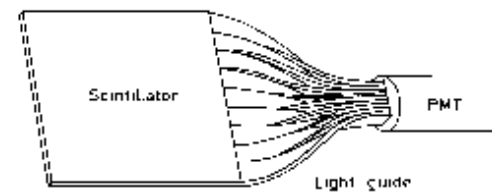
- Un rivelatore a scintillazione converte l'energia rilasciata da un particella ionizzante in luce visibile
- Si tratta di materiali (organici o inorganici) che se eccitati dal rilascio di energia di una particella ionizzante, si diseccitano attraverso emissione di luce nel visibile
- La luce viene trasportata ad un fotomoltiplicatore o fotodiode in grado di convertirla in un segnale elettrico.



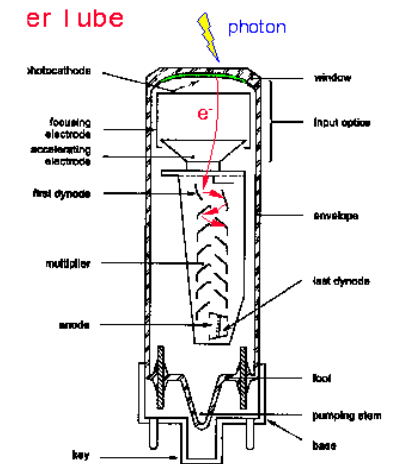
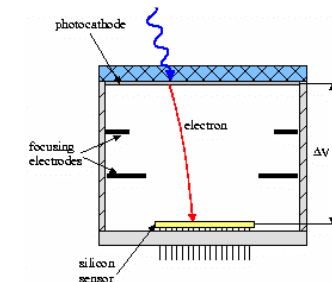
Particella carica  
o neutra

assorbitore

rivelatore

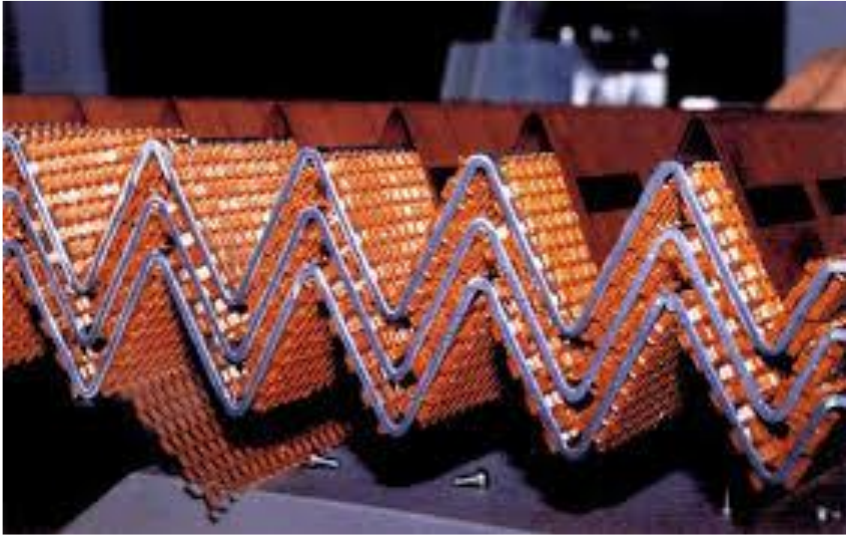


adiabatic



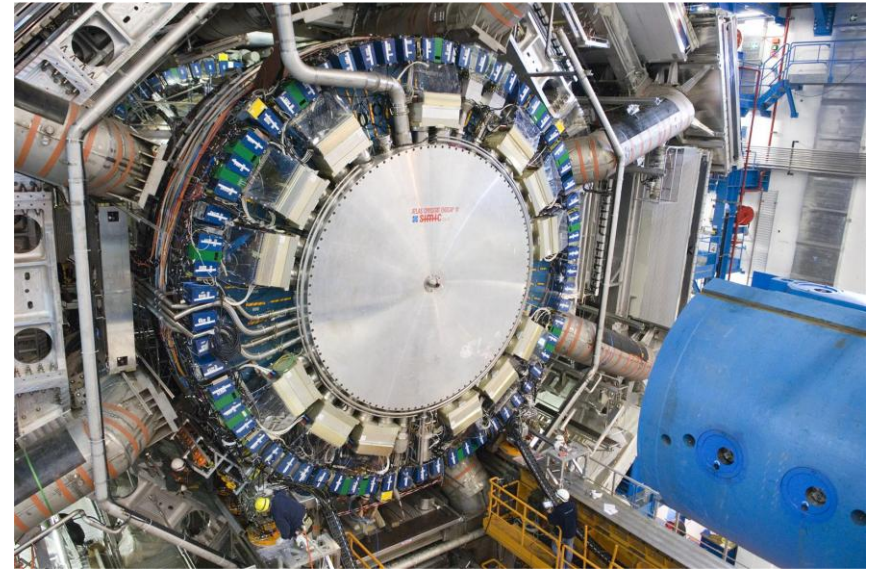
# I Calorimetri di ATLAS

## Il calorimetro elettromagnetico



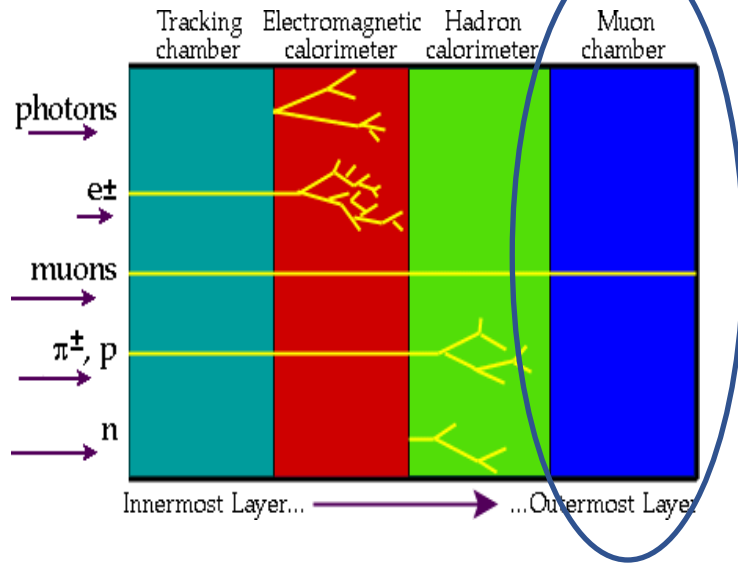
- Argon Liquido (rivelatore)  
+ Piombo(assorbitore)

## Il calorimetro adronico



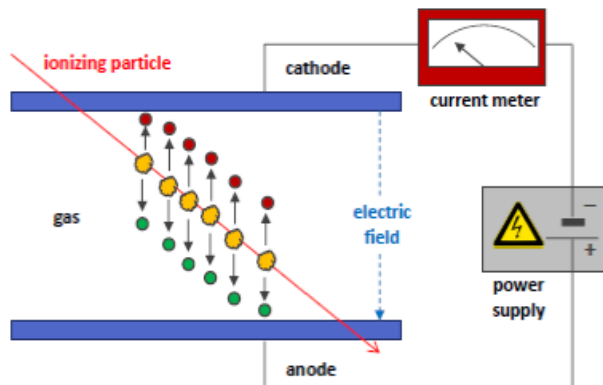
- Scintillatori plastici a mattonelle (rivelatore)  
+ Ferro (assorbitore)

# I Rivelatori per muoni \_ Trigger



- Rivelano i muoni, particelle molto penetranti, si distinguono con evidenza, sono utili perchè presenti negli eventi di interesse
- **I rivelatori sono genericamente immersi in un campo magnetico per tracciare la posizione e misurare il momento dei muoni**
- Sono detector molto estesi in superficie

## Es: I rivelatori a gas



- 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, ionizzandolo, e produce coppie di elettroni e ioni positivi
- Il campo elettrico separa le cariche che muovendosi verso gli elettrodi producono un segnale elettrico

# Lo Spettrometro di ATLAS

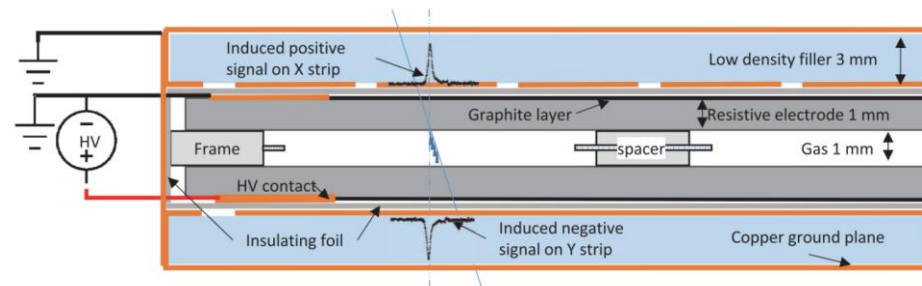
## Monitored Drift Tubes (MDT)



- Tubo riempito di Ar+ con al centro un filo per raccogliere il segnale
- Il campo elettrico radiale è più intenso sul filo
- **Migliore risoluzione spaziale**

## Resistive Plate Chambers (RPC)

Inventati qui a Tor Vergata da Rinaldo Santonico e Roberto Cardarelli



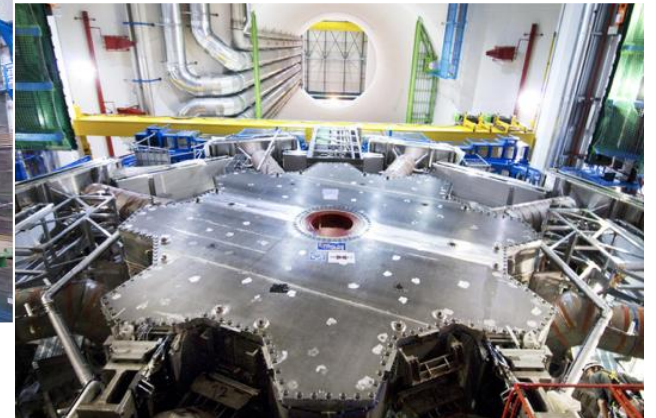
- Due elettrodi piani paralleli resistivi contengono di una miscela gassosa
- Il campo elettrico intenso è uniforme, perpendicolare agli elettrodi
- **Molto veloci e con una ottima risoluzione temporale, sono utilizzati come trigger**

# I Magneti di ATLAS

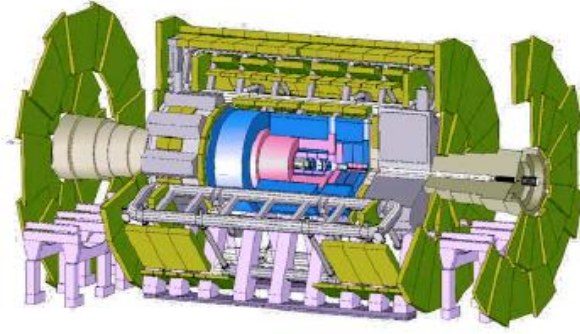
Magnete solenoidale centrale



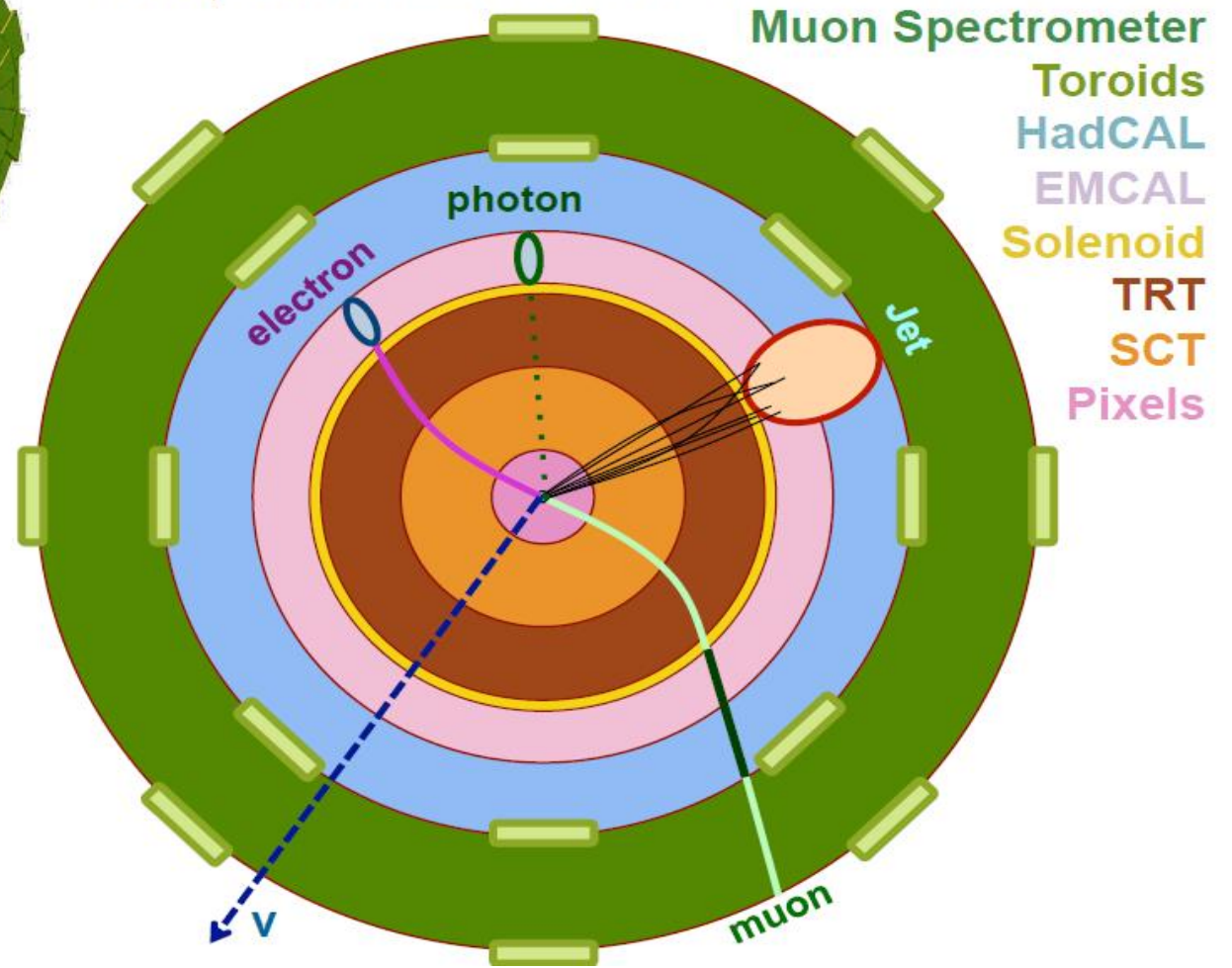
Magneti toroidali



# Rivelare le particelle in ATLAS \_ Buon Lavoro!



## Simplified Detector Transverse View



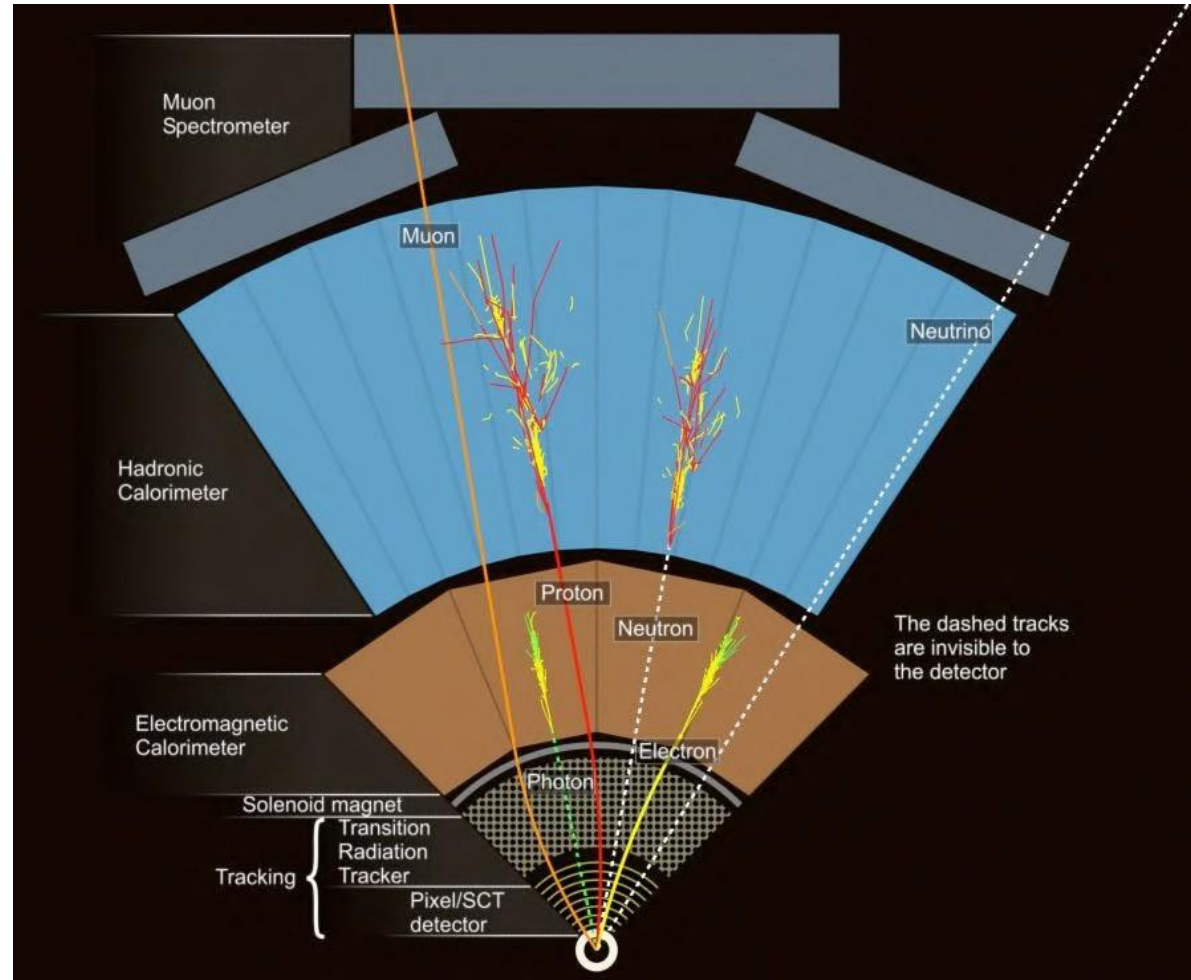
	I	II	III	
Quarks	2.4 MeV	1.3 GeV	170 GeV	$\Upsilon$
	u	c	t	0
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	g
Leptons	<2 eV	<2 eV	<2 eV	91 GeV
	d	s	b	Z
	<2 eV	<2 eV	<2 eV	80 GeV
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	W
	0.5 MeV	16 MeV	1.8 GeV	126 GeV
	e	$\mu$	$\tau$	H

Bosons

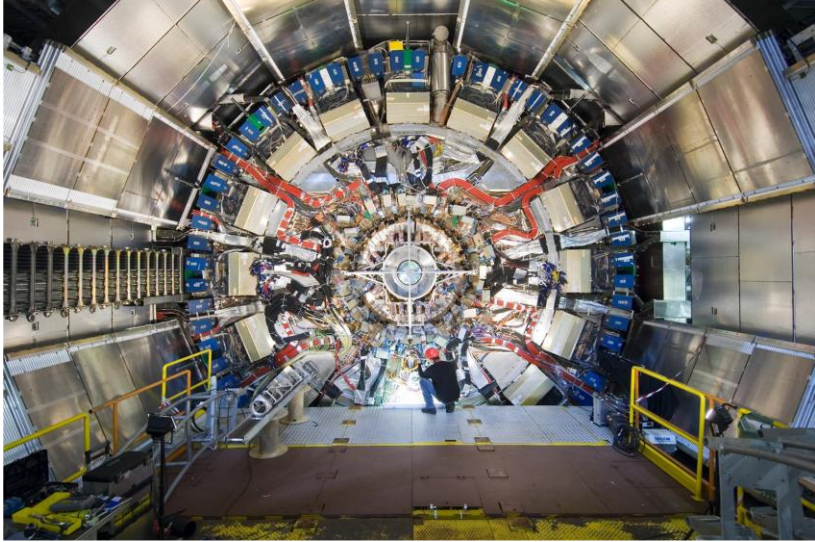
Si ringraziano per il materiale: Dott.ssa P. Gianotti, Dott.ssa G. Proto, Dott. S.Loffredo, Dott. M.Sessa

[https://agenda.infn.it/event/30411/contributions/163956/attachments/89151/119668/rivelatori\\_masterclass.pdf](https://agenda.infn.it/event/30411/contributions/163956/attachments/89151/119668/rivelatori_masterclass.pdf)

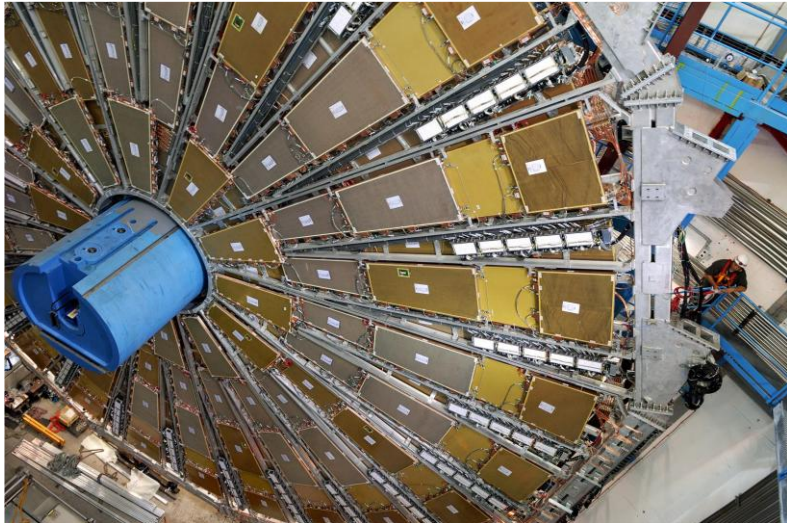
# Uno spicchio di ATLAS



# rivelatori di ATLAS a LHC



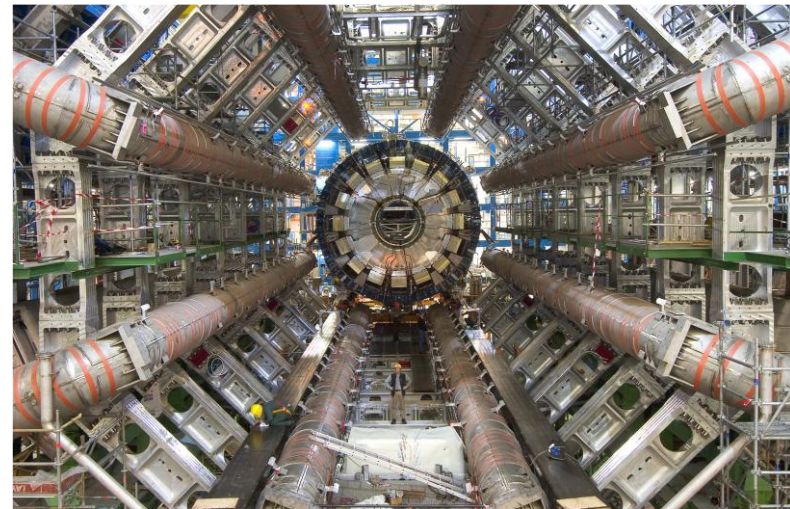
Spettrometro a muoni



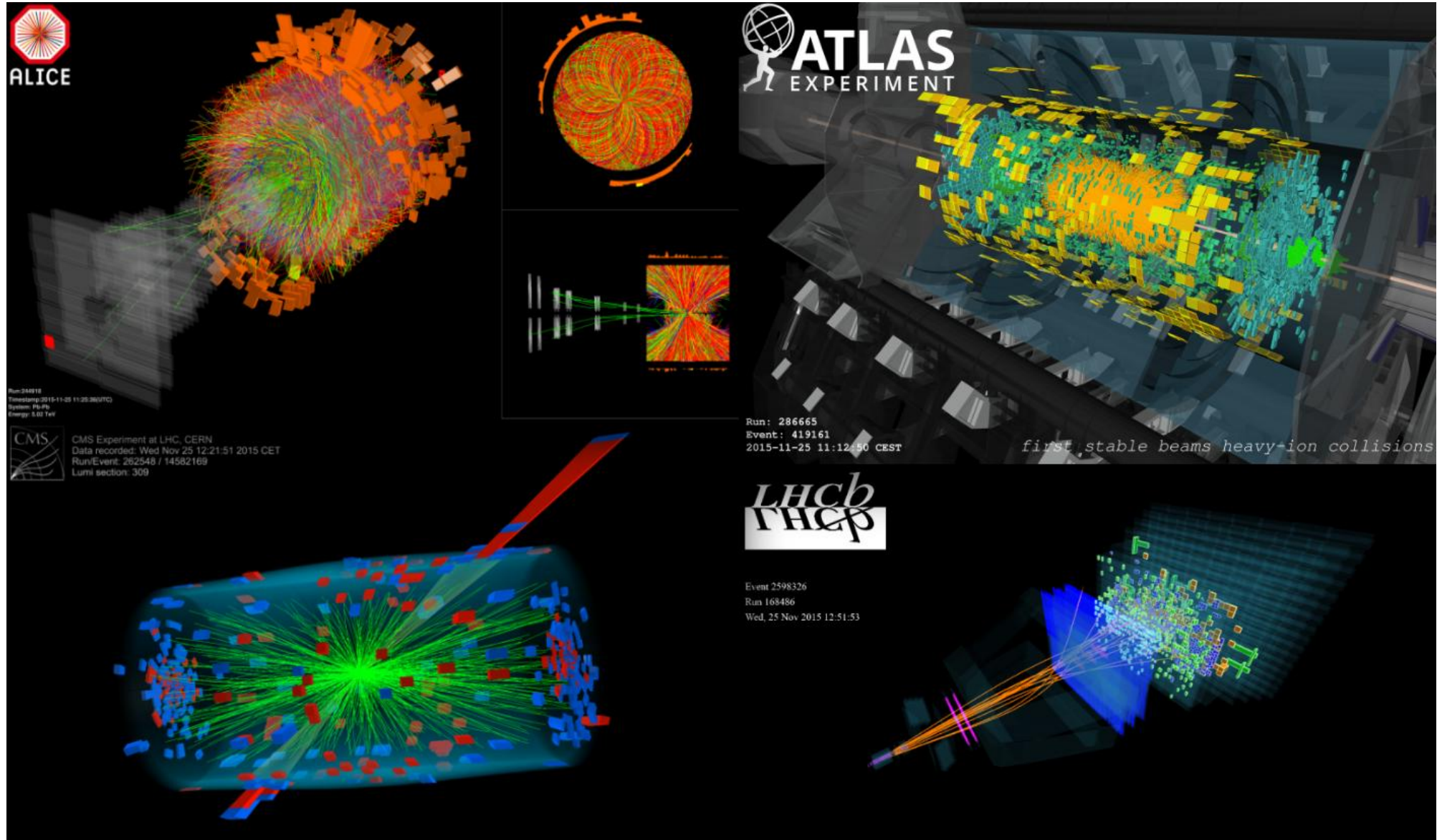
Calorimetri



Magneti



# Gli apparati sperimentali lungo LHC



# Gli apparati sperimentali lungo LHC

