



# ATLAS Masterclass for the International Day of Women and Girls in Science



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
SEZIONE DI ROMA TOR VERGATA

## I Rivelatori di Particelle

A. Satta

Master Class 9 Febbraio 2024

# I rivelatori di particelle : perché?

Ci servono ad osservare le particelle per studiarne il comportamento e capire le leggi fondamentali della natura.

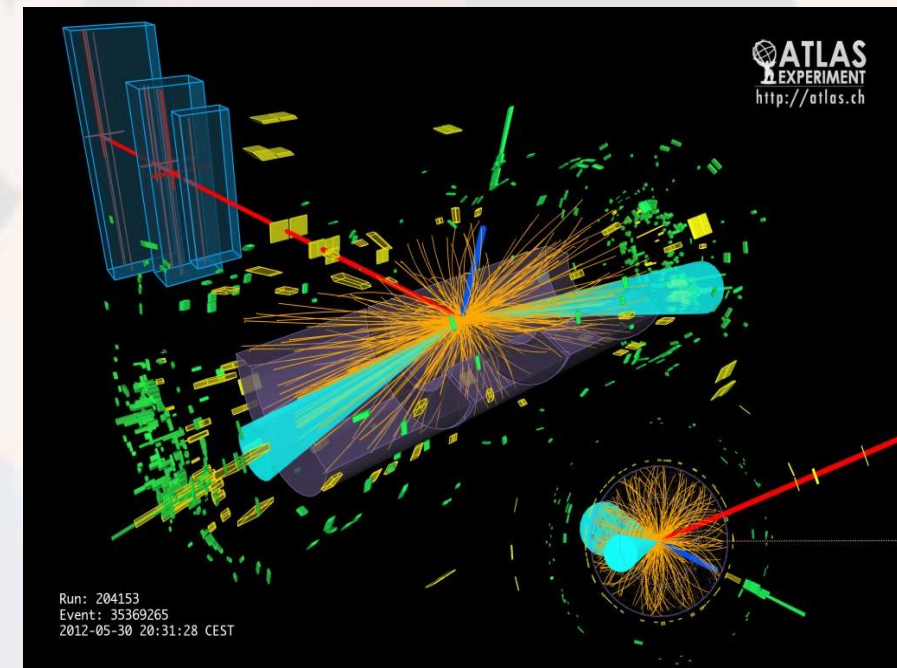
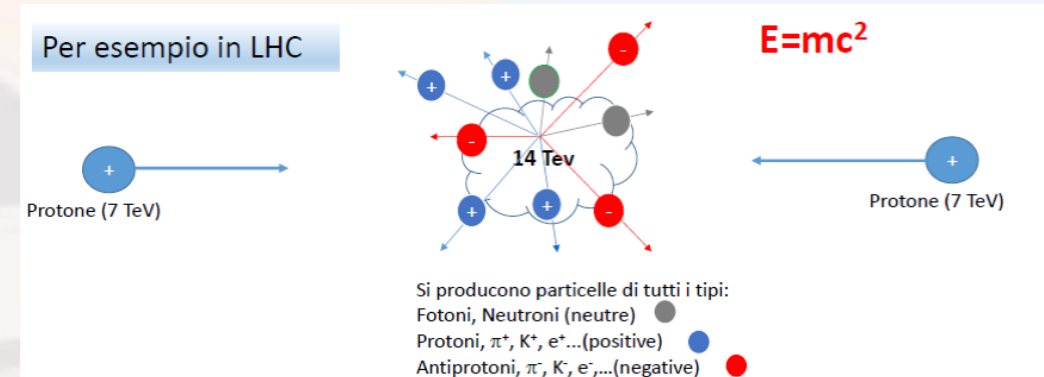
Possono essere prodotte in vari modi, nel caso della fisica ad alte energie agli acceleratori dobbiamo capire cosa è accaduto alla collisione e alle particelle che si sono generate

Quindi vogliamo

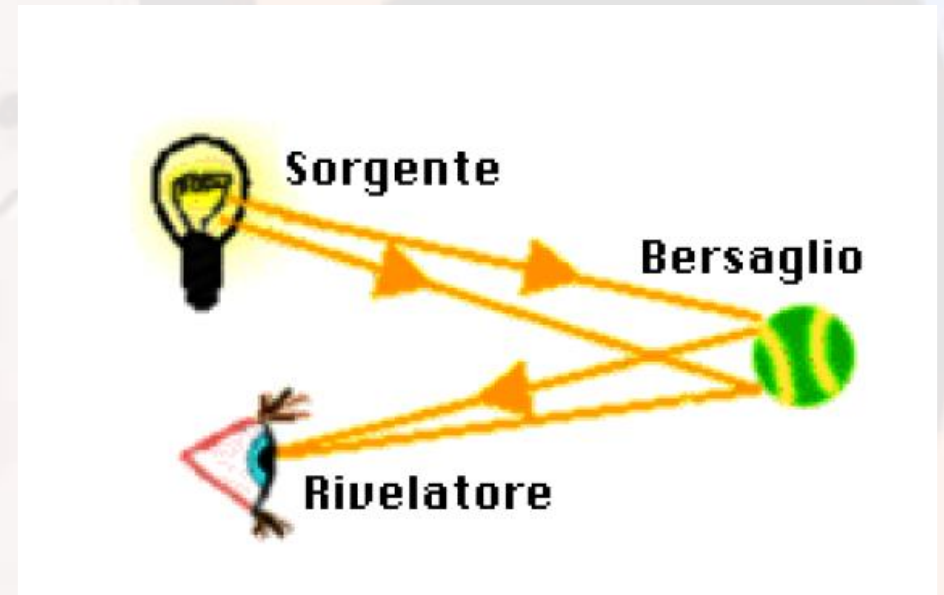
- Identificare il numero ed il tipo di particelle prodotte
- Misurare la traiettoria, la carica, l'energia e quantità di moto (massa e velocità)

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!



# Come riveliamo il mondo?



Per rivelare il mondo di solito sfruttiamo che il bersaglio (cio' che vogliamo osservare) interagisce con la luce che ci sbatte contro, e che rimbalza e raggiunge l'occhio (rivelatore) che poi trasferisce le informazioni al cervello (elaboratore)

Stessa «logica» anche per studiare (vedere o meglio rivelare) le particelle

# Ma non solo la luce

Altri modi per “vedere”!

–Sottrazione di “luce”.....

–Con il suono (pipistrelli, delfini, ecografia)....

Perché si usano i raggi X e gli ultrasuoni e non la luce ed il suono “normali” per “illuminare”?

Quindi abbiamo già esperienza che lo strumento che usiamo per «vedere» dipende dall’oggetto che vogliamo osservare

L’oggetto «particella» e’ così fuori dal comune che si usano rivelatori ad hoc, fuori dall’esperienza quotidiana



# Torniamo a noi: Rivelare le particelle

Yes we can!!

- Tutte le particelle, attraversando la materia interagiscono con essa : vale a dire perdono una parte della loro energia e la cedono al materiale.
- Le interazioni sono diverse a seconda del tipo di particella:
  - Particelle cariche: urti anelatici con gli elettroni degli atomi che incontrano;
  - Tutti gli adroni(carichi e neutri) per reazioni nucleari con i nuclei che incontrano;
  - Elettroni emettono luce “frenando”
  - Fotoni possono creare coppie  $e^+e^-$
  - Neutrini hanno solo l’interazione debole.... “sfuggono” ai nostri rivelatori lasciando “poche tracce”!
  - Muoni perdono poca energia, sono più penetranti
- Tecniche diverse a seconda del tipo di particella da rivelare.
- Ad esempio un rivelatore di fotoni deve essere necessariamente diverso da un rivelatore di muoni.

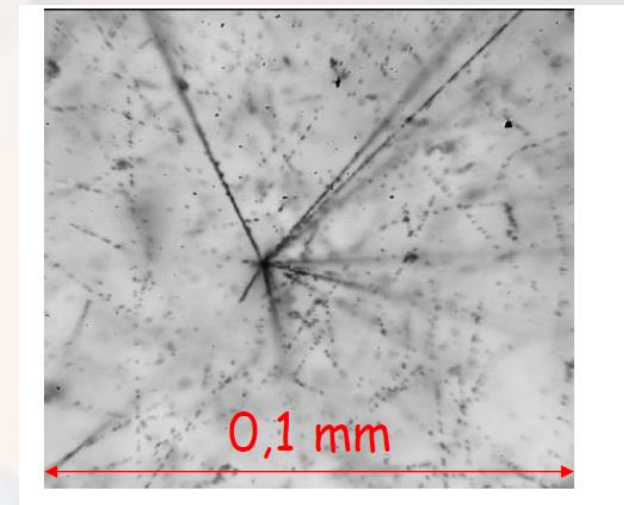
# Rivelare le particelle (II)

Alla base di tutti i rivelatori c'è il principio di convertire questa energia rilasciata in “segnali” concreti da “rivelare”.

Un esempio del passato

- Nei primi esperimenti con i raggi cosmici si inviavano lastre fotografiche sui palloni aerostatici.
- Le particelle cariche “impressionano” le lastre fotografiche lasciando una scia del loro passaggio

Parallelismo: rivelare una particella significa osservare non lei direttamente ma le tracce dell'interazione che ha avuto con la materia (cioè come l'ha alterata), un po' come la scia dell'aereo in cielo ci permette di sapere che è passato e dove anche senza riuscire a scorgerlo

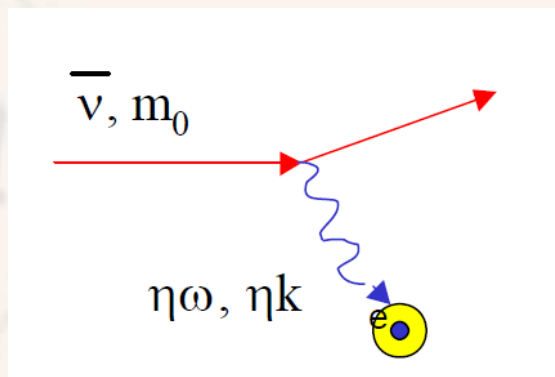


# Il rivelatore di particelle – lo Strumento

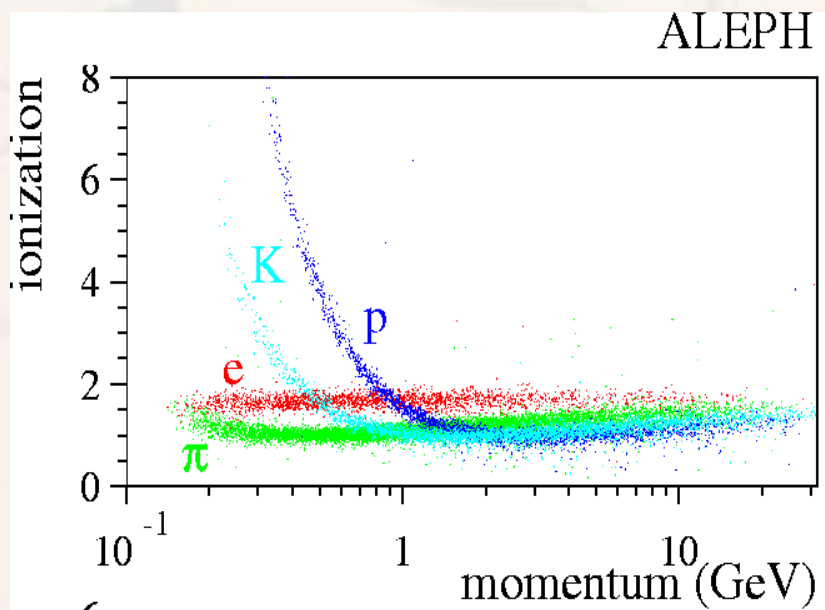
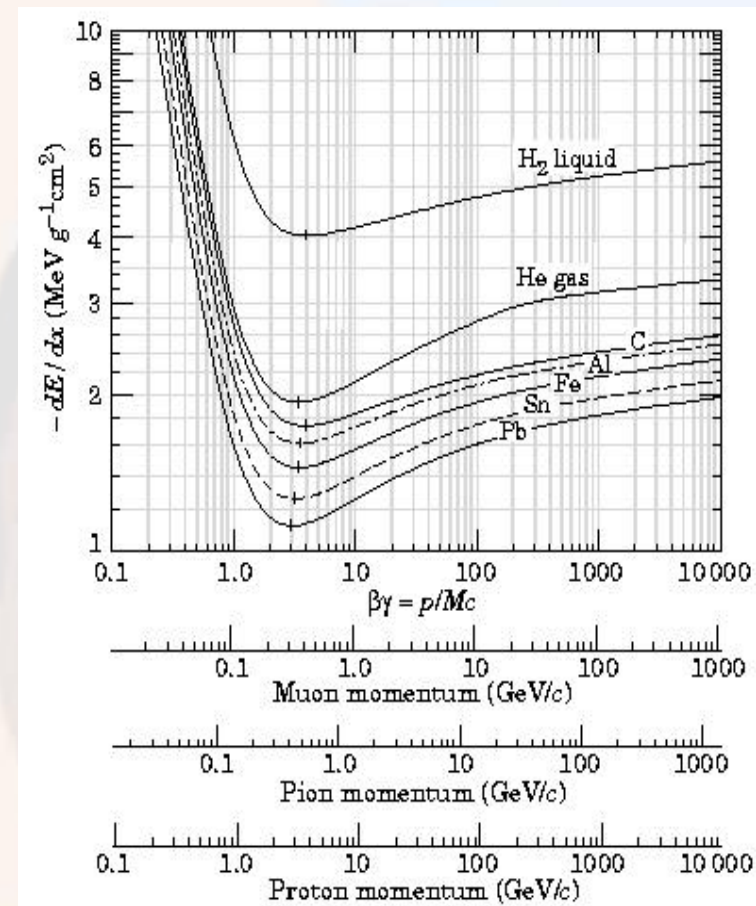
- Il rivelatore di particelle è uno strumento elettro-meccanico che produce un segnale osservabile e registrabile.
- Caratteristiche di un rivelatore:
  - **Sensibilità**: capacità di produrre un *segnale utile* per un certo tipo di *radiazione e di energia*.
  - **Risposta**: tipo di segnale prodotto.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

# Interazione Radiazione materia : Particelle Cariche

Le particelle cariche nella materia:  
Interagiscono con elettroni 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" ( $m \gg m_{\text{elettrone}}$ )



# Un esempio di Rivelatore...nato a Tor Vergata

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

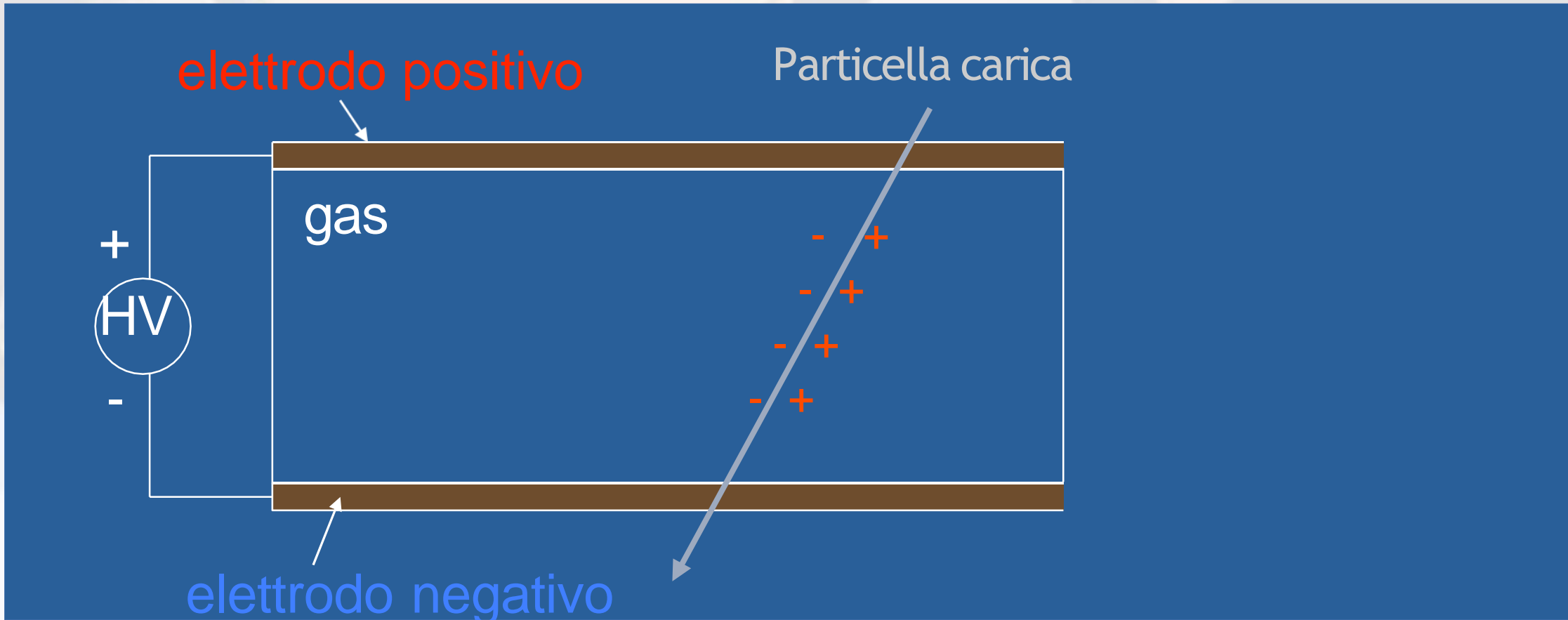


# Un esempio di Rivelatore...nato a Tor Vergata

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

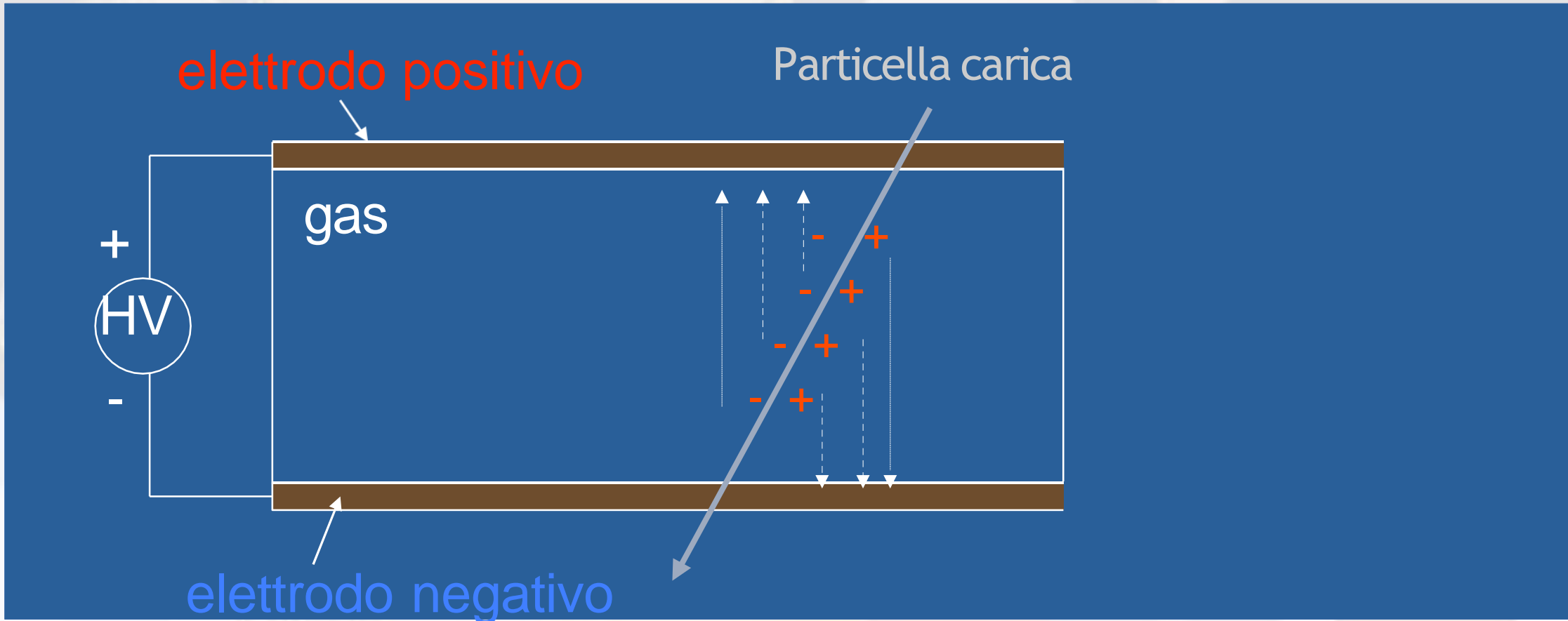


# Un esempio di Rivelatore...nato a Tor Vergata

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

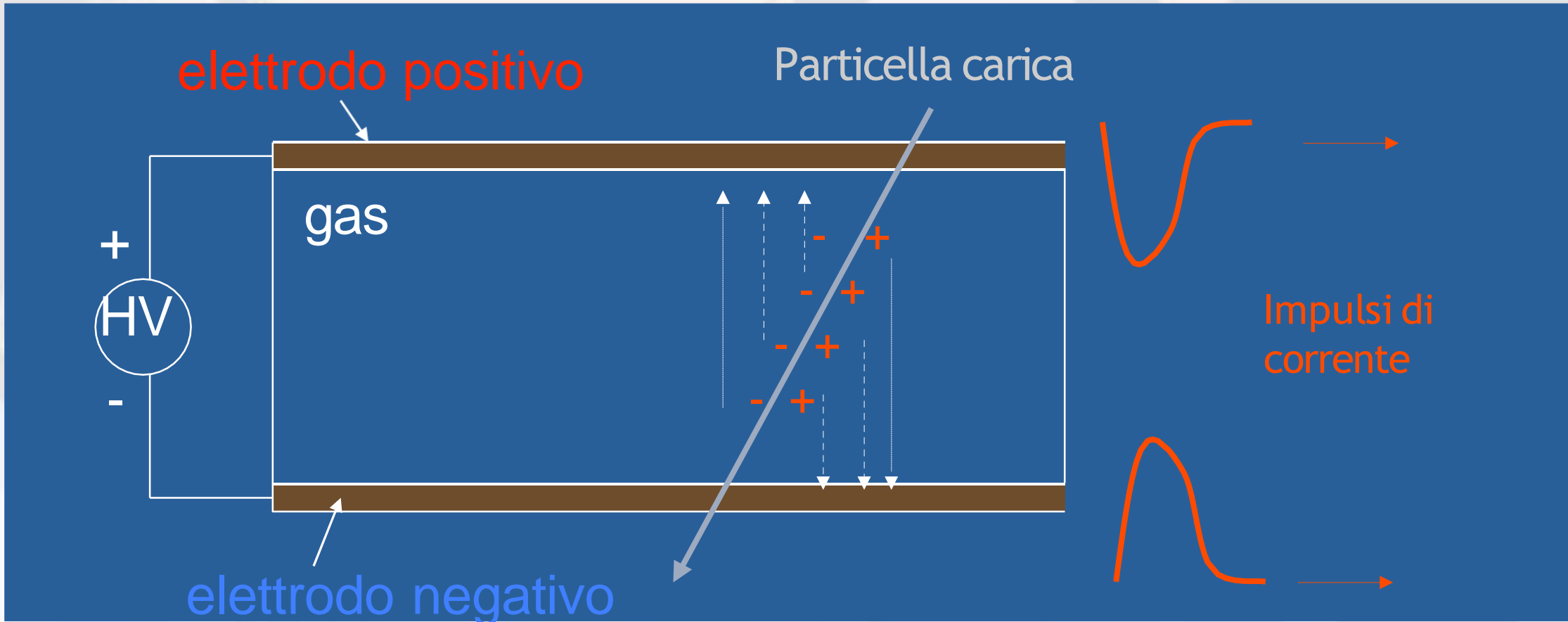


# Un esempio di Rivelatore...nato a Tor Vergata

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

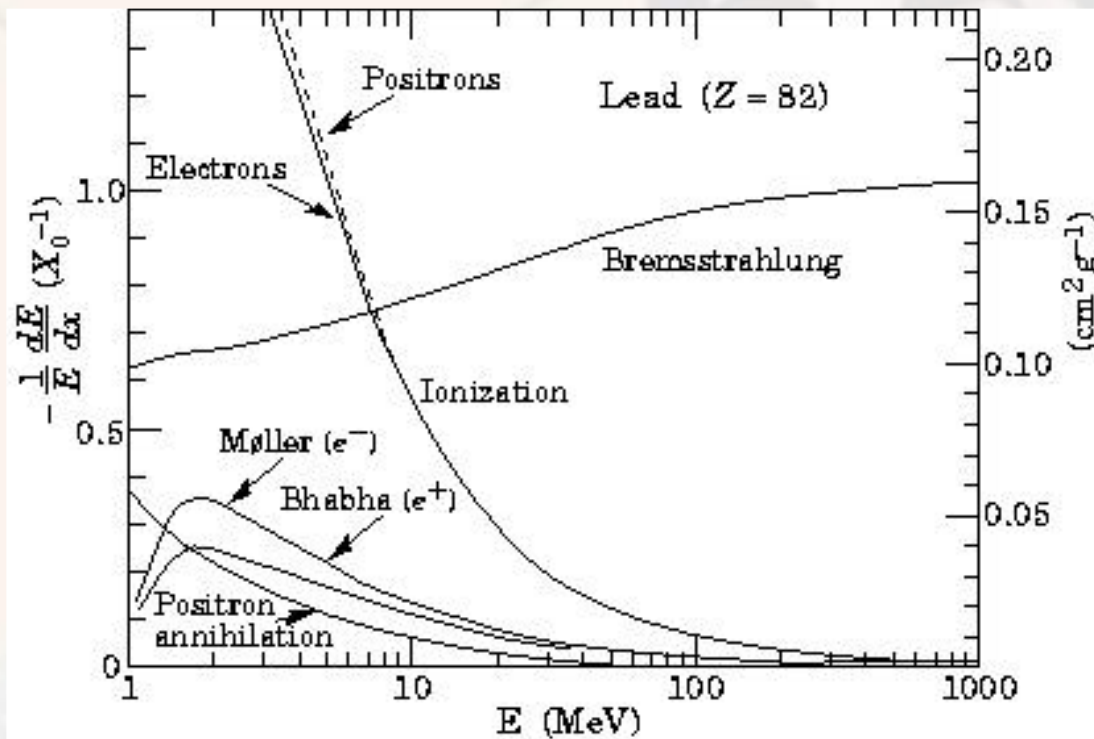
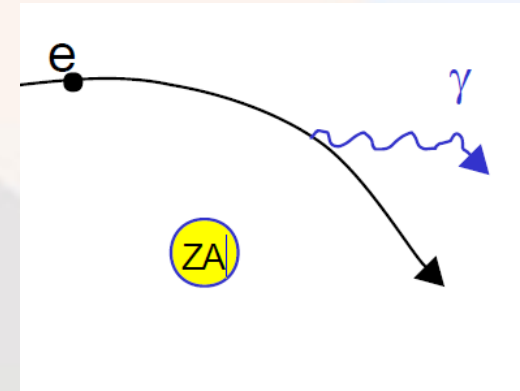
La corrente generata viene misurata su un circuito



# Interazione Radiazione Materia: Elettroni

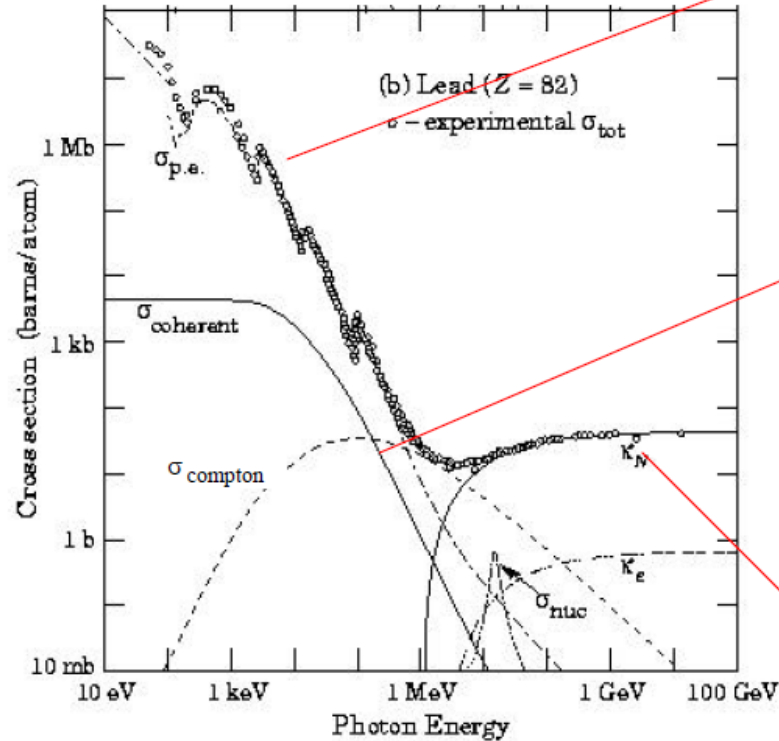
Per energie di elettroni/positroni  $> 10$  MeV  
entra in gioco

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**

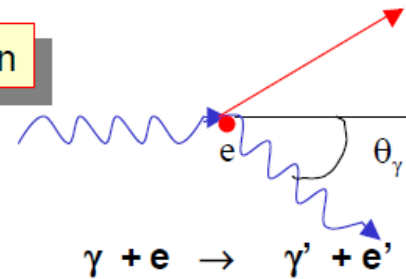


**Effetto fotoelettrico**



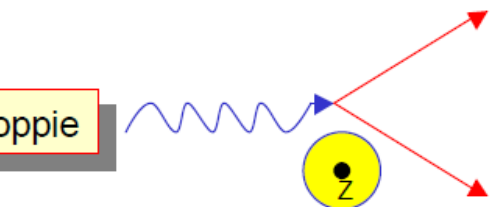
Vengono estratti principalmente elettroni delle shell K  $\sigma_{foto} \propto Z^5$

**Diffusione Compton**



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

**Produzione di coppie**



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

Paola Gianotti



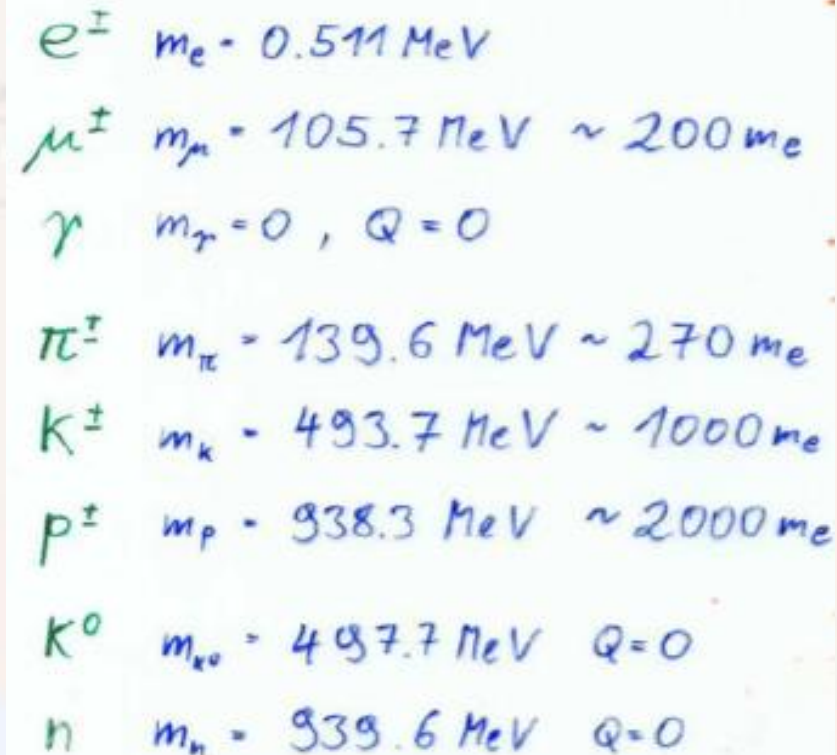
# Il rivelatore di particelle : quali?

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 (con qualche eccezione tipo le emulsioni nucleari che consente l'osservazione diretta)



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

## **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

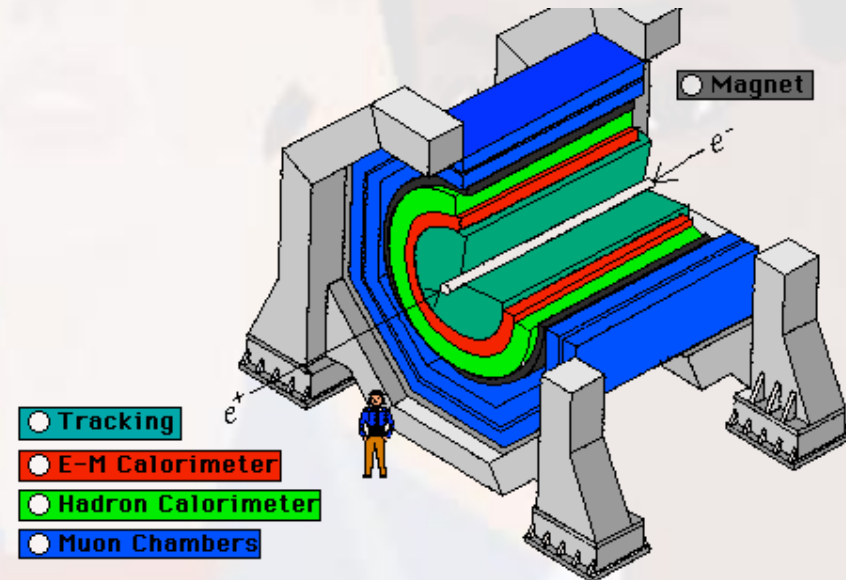
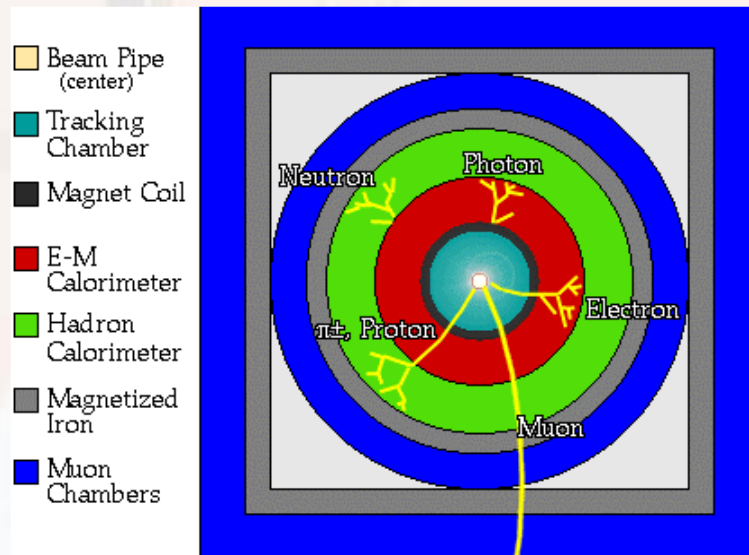
Protoni, Pioni ( $\pi^+ \pi^-$ ), Kaoni ( $K^+ K^- K^0$ ), Neutroni

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

Elettroni e fotoni

# Il rivelatore di particelle : l' Apparato

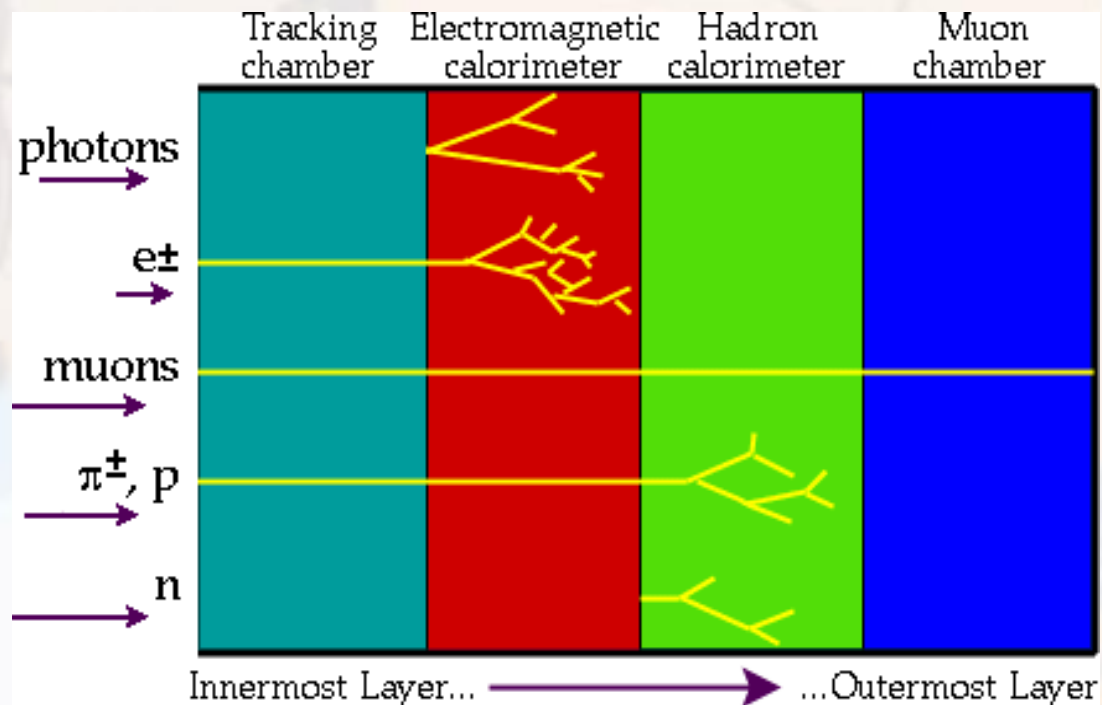
- La maggior parte delle particelle generate decade in particelle più stabili elettroni, fotoni, muoni, un qualche tipo di adrone, neutrini, o nelle loro antiparticelle.
- Per 'ricostruire gli eventi' devo ricomporre tutte le informazioni di tutti i prodotti.
- I moderni esperimenti di fisica sono insiemi 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)!





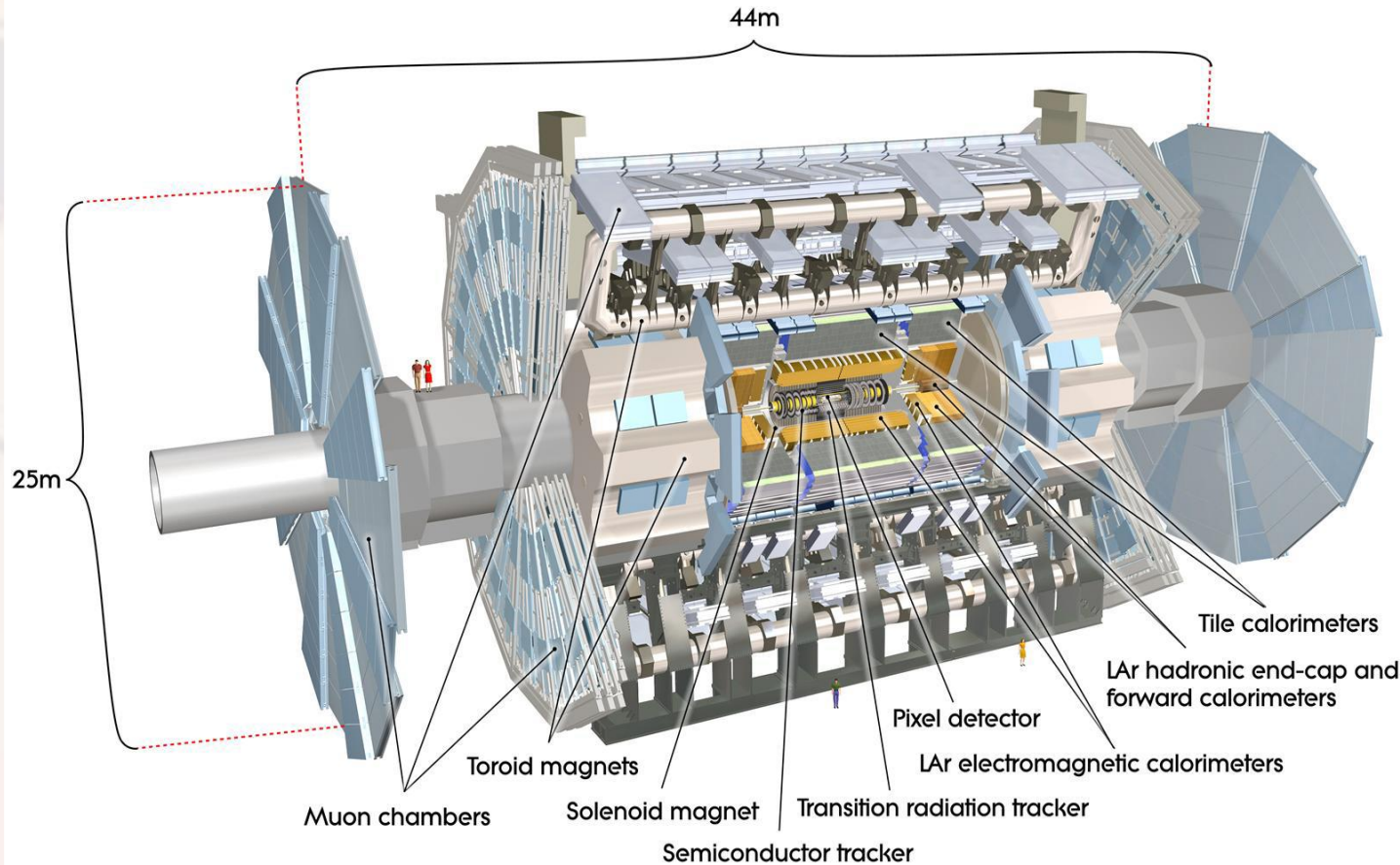
# Il rivelatore di particelle – Interazione Radiazione Materia

- 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€**

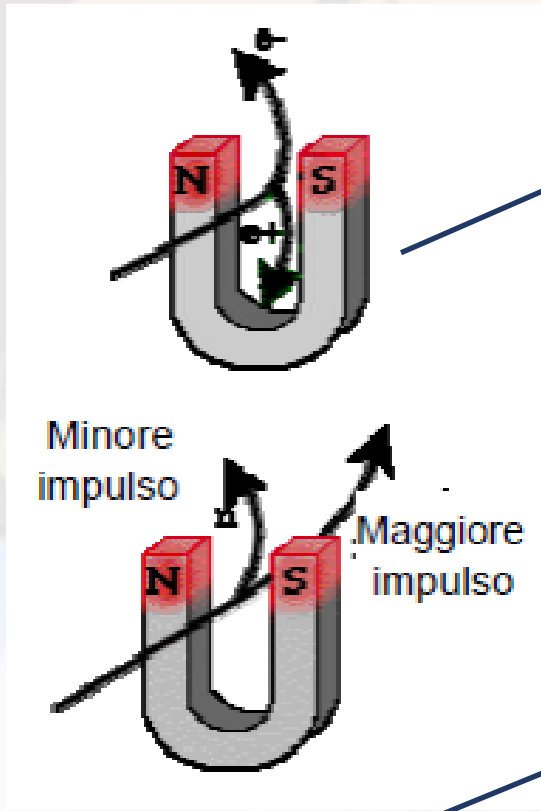
**2100 scienziati**

**37 nazioni**

# Misura della carica e della quantità di moto

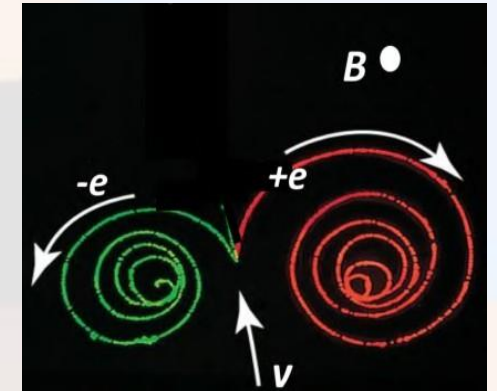
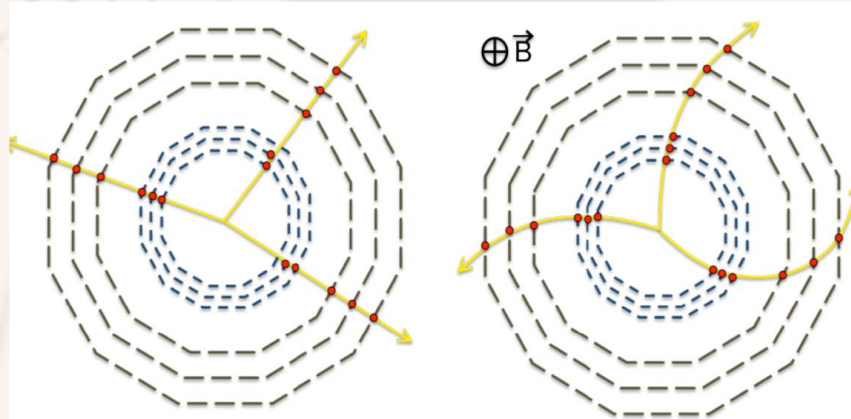
- Una particella carica in moto in un campo magnetico  $B$  segue una traiettoria curvilinea, a causa della **forza di Lorentz**

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

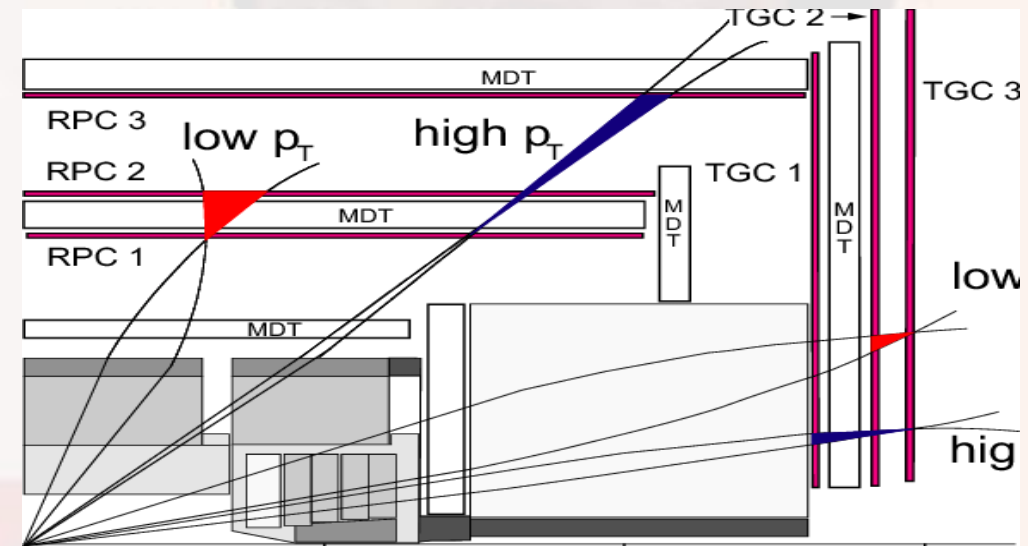


- La traiettoria segue un arco di circonferenza, dal raggio di curvatura posso ricavare:

$$p = mv = qBR$$



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

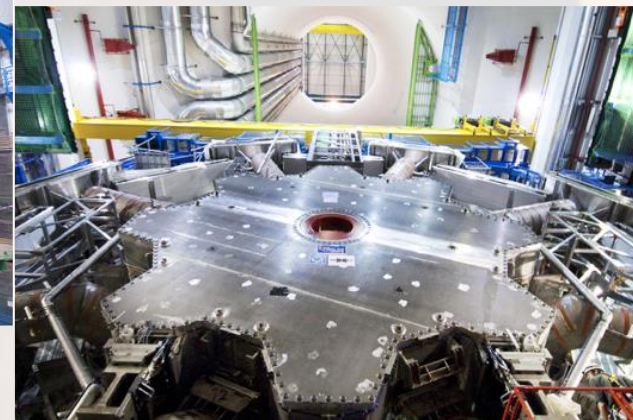


# I Magneti di ATLAS

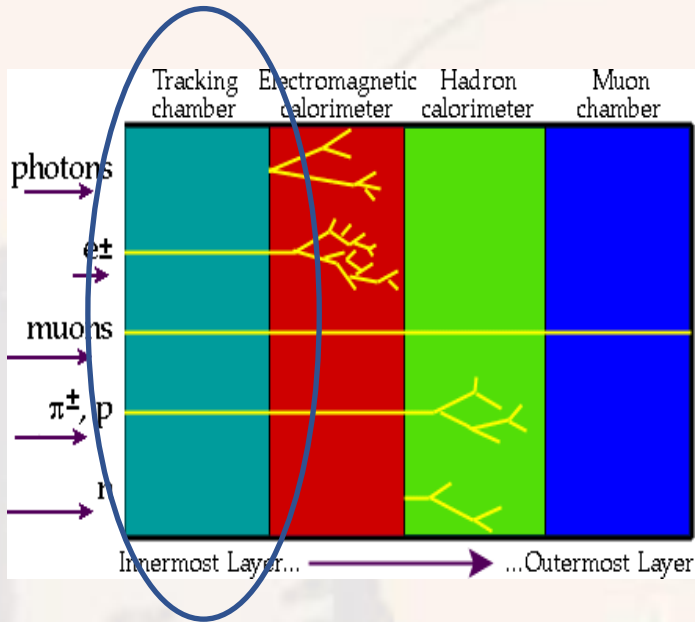
Magnete solenoidale centrale



Magneti toroidali



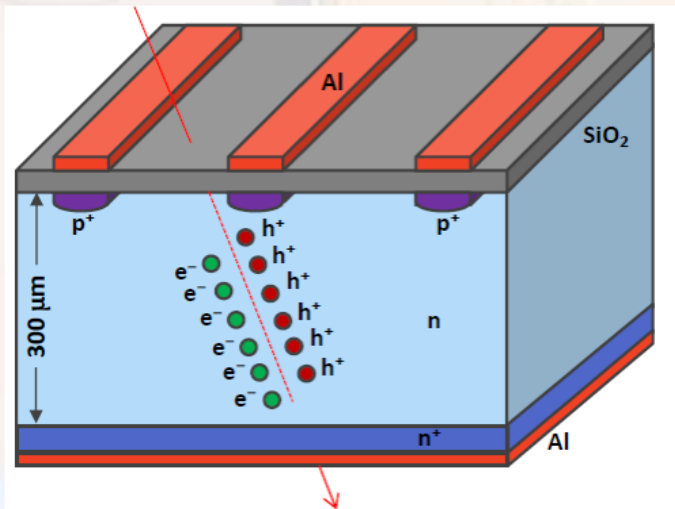
# Tracciatori \_ Impulso



- 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**

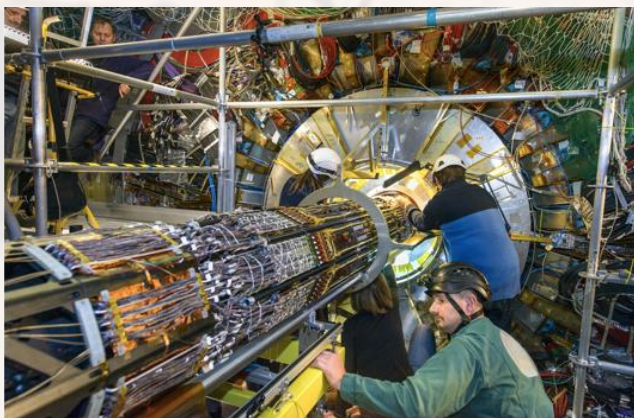
## Es: I rivelatori a semiconduttore

- 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



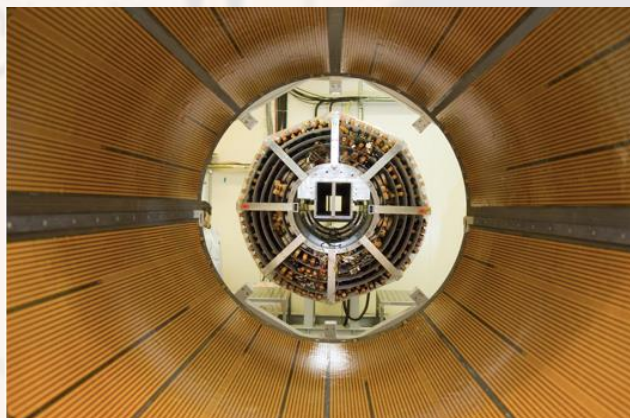
# I Tracciatori di ATLAS

Pixel detector



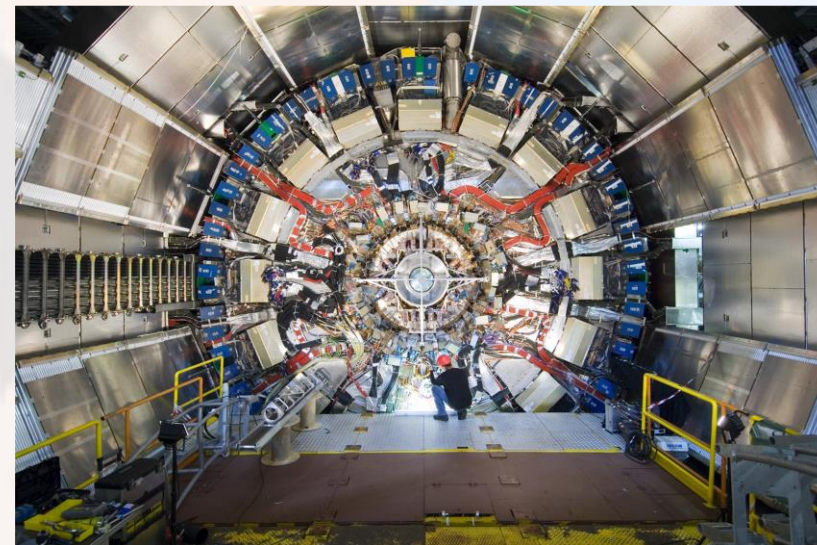
- 4 strati di pixel di Silicio, ognuno grande come un granello di sabbia
- Misura l'origine ed il momento della particella

Semiconductor tracker



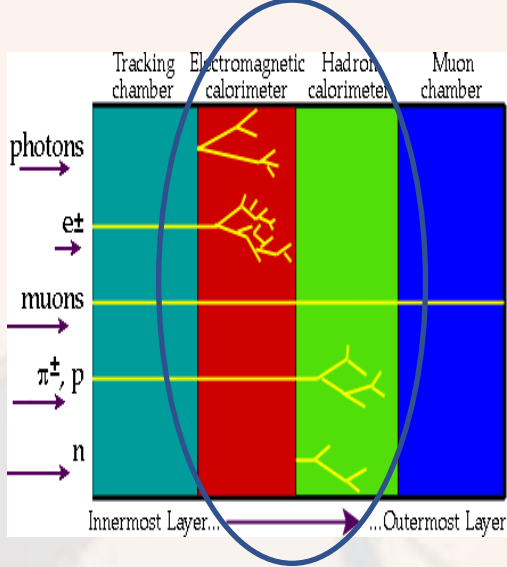
- 6 milioni di micro strisce di sensori di Silicio
- È usato per rivelare e ricostruire le tracce delle particelle cariche con una precisione di 25 (meno della metà dello spessore di un capello umano!)

Tracciatore interno



- 300k tubi a gas di 4mm di diametro
- È usato per rivelare e ricostruire le tracce delle particelle cariche fornendo circa 30 punti con una precisione di 130  $\mu\text{m}$

# 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)**

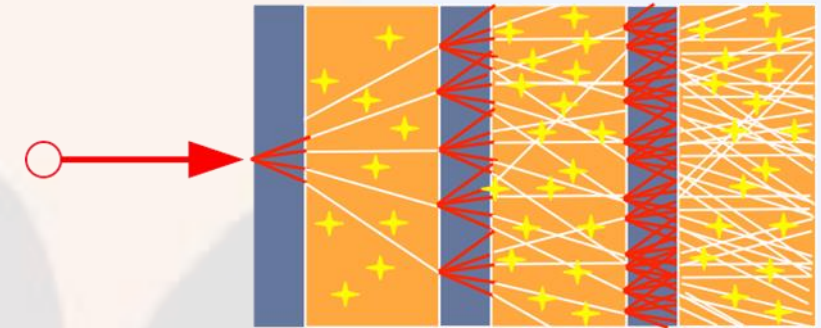
- Sono adroni le particelle formate da quark e gluoni, come  $n$ ,  $p$ ,  $\pi$ ,  $k$
- Gli adroni ( $n$ ,  $p$ ,  $\pi$ ,  $k$ ) interagiscono con i nuclei del materiale che attraversano, gli sciami sono più complessi di quelli elettromagnetici, più larghi e con componente elettromagnetica

# 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

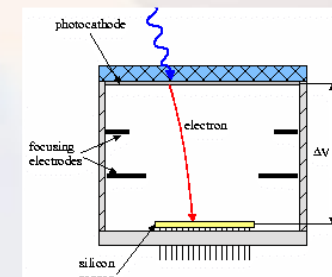
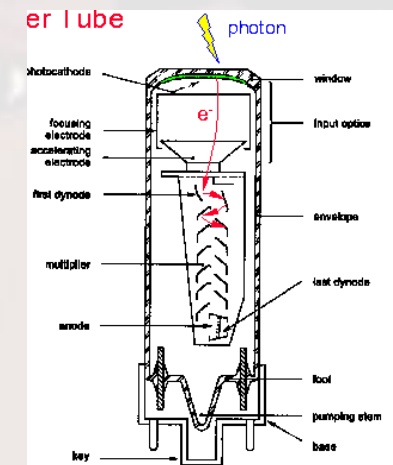
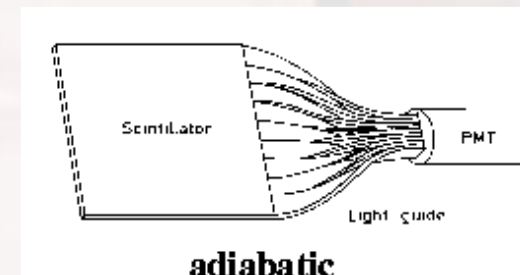
- Un rivelatore a scintillazione converte l'energia rilasciata da un particella ionizzante in luce visibile
- Si tratta di materiali (organici o inorganici) che se eccitati dal rilascio di energia di una particella ionizzante, si diseccitano attraverso emissione di luce nel visibile
- La luce viene trasportata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



Particella carica  
o neutra

assorbitore

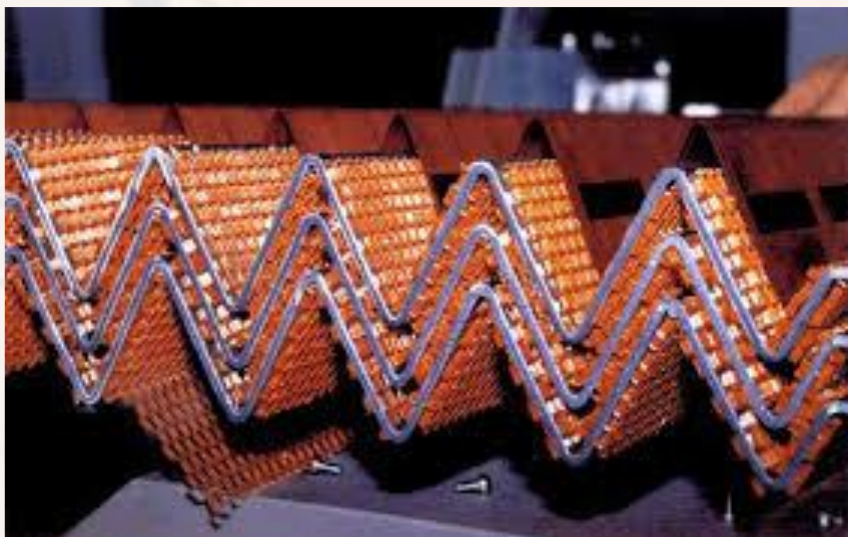
rivelatore





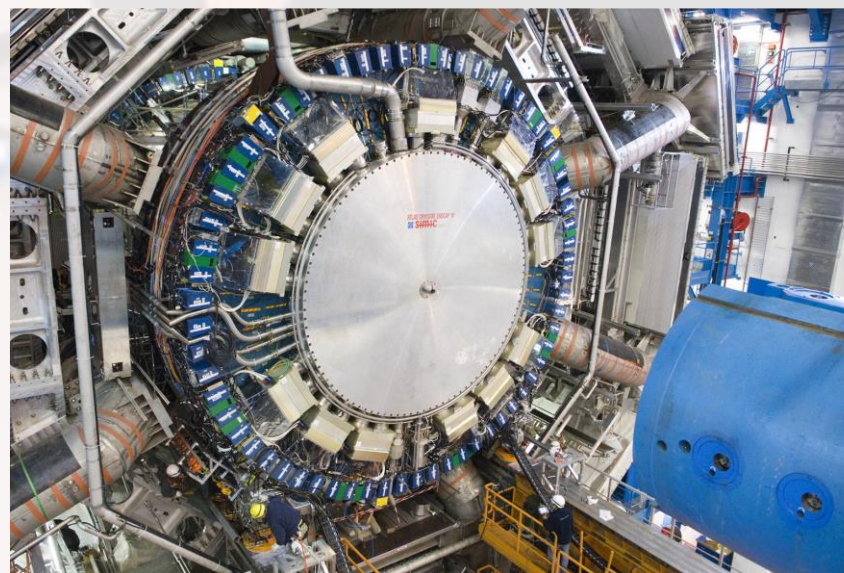
# I Calorimetri di ATLAS

Il calorimetro elettromagnetico



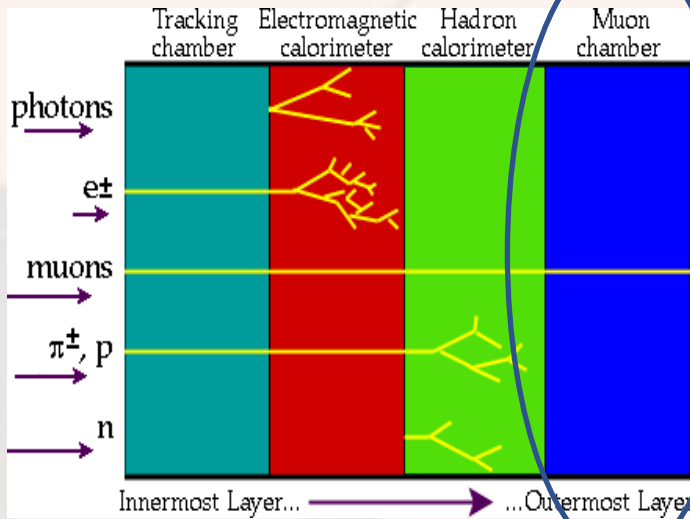
- Argon Liquido (rivelatore)
- + Piombo (assorbitore)

Il calorimetro adronico



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

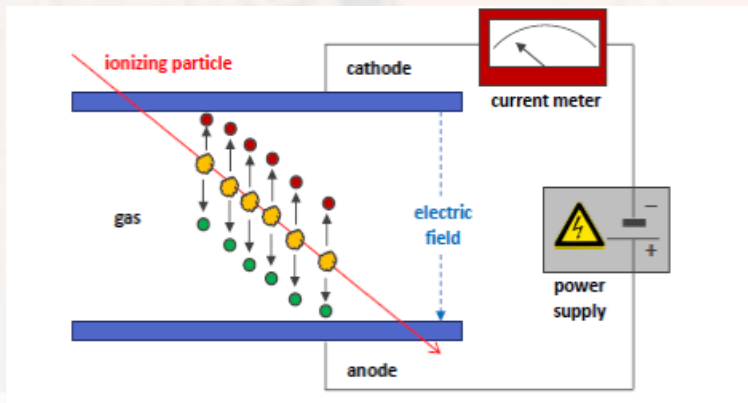
# I Rivelatori per muoni \_ Trigger



- 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

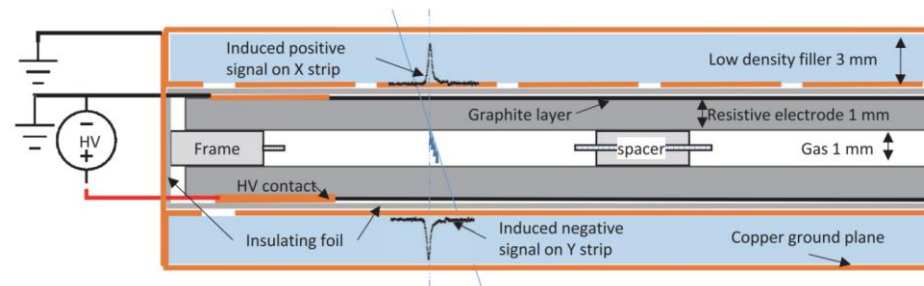
## Monitored Drift Tubes (MDT)



- 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**

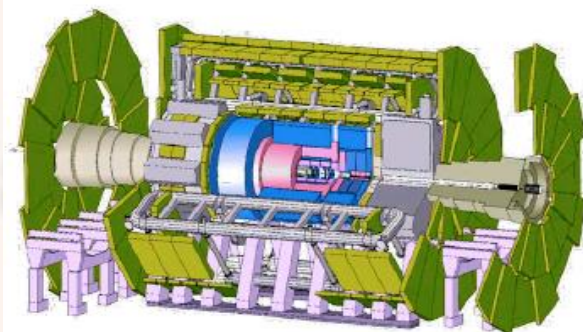
## Resistive Plate Chambers (RPC)

Inventati qui a Tor Vergata da Rinaldo Santonico e Roberto Cardarelli

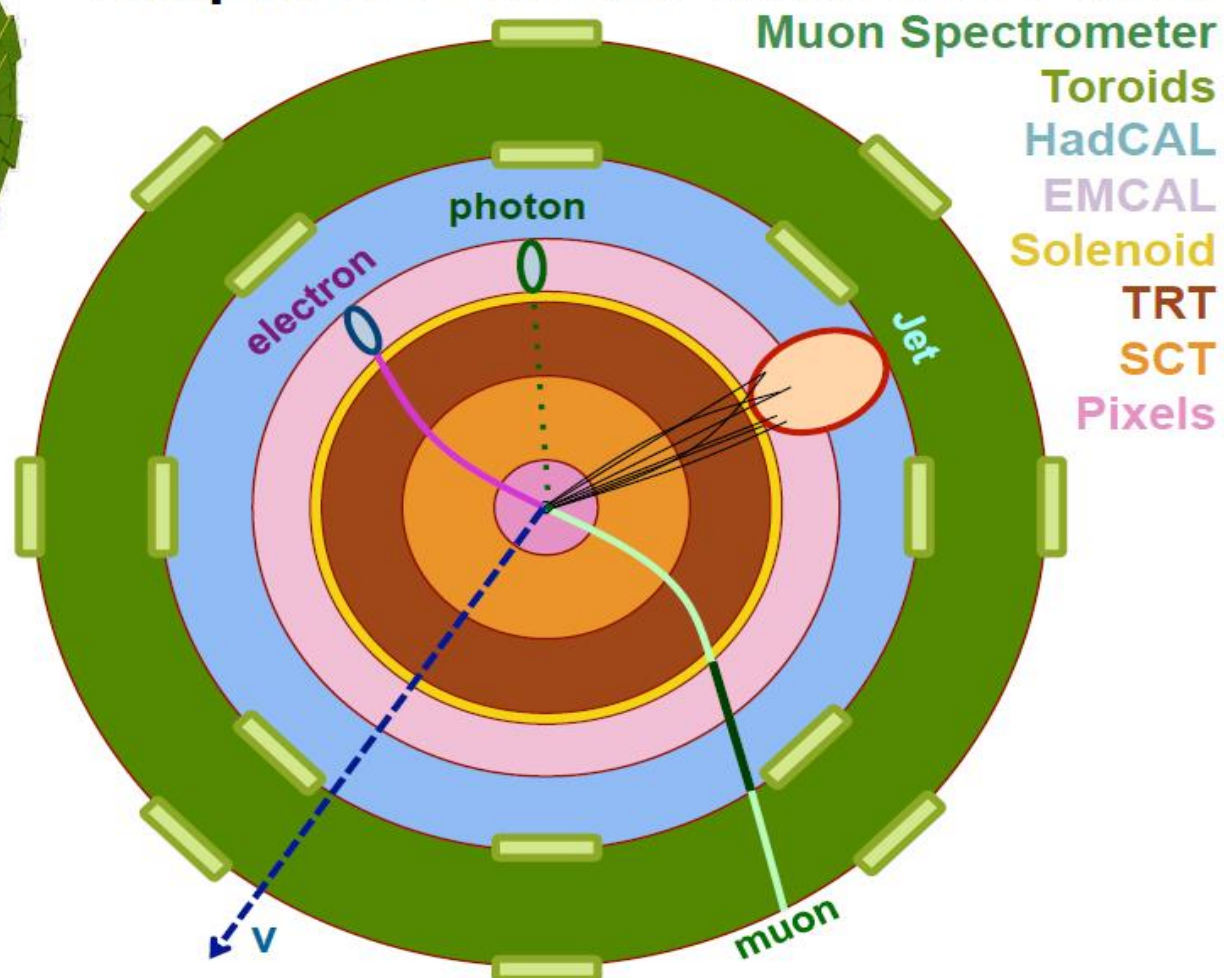


- Due elettrodi piani paralleli resistivi contengono di una miscela gassosa
- Il campo elettrico intenso è uniforme, perpendicolare agli elettrodi
- **Molto veloci e con una ottima risoluzione temporale, sono utilizzati come trigger**

# 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
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	80 GeV
	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, Dott.ssa B Liberti  
[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)

# In onore della giornata di oggi \_ Buon Divertimento!

Non è detto che si possa tutte vincere il premio Nobel ....

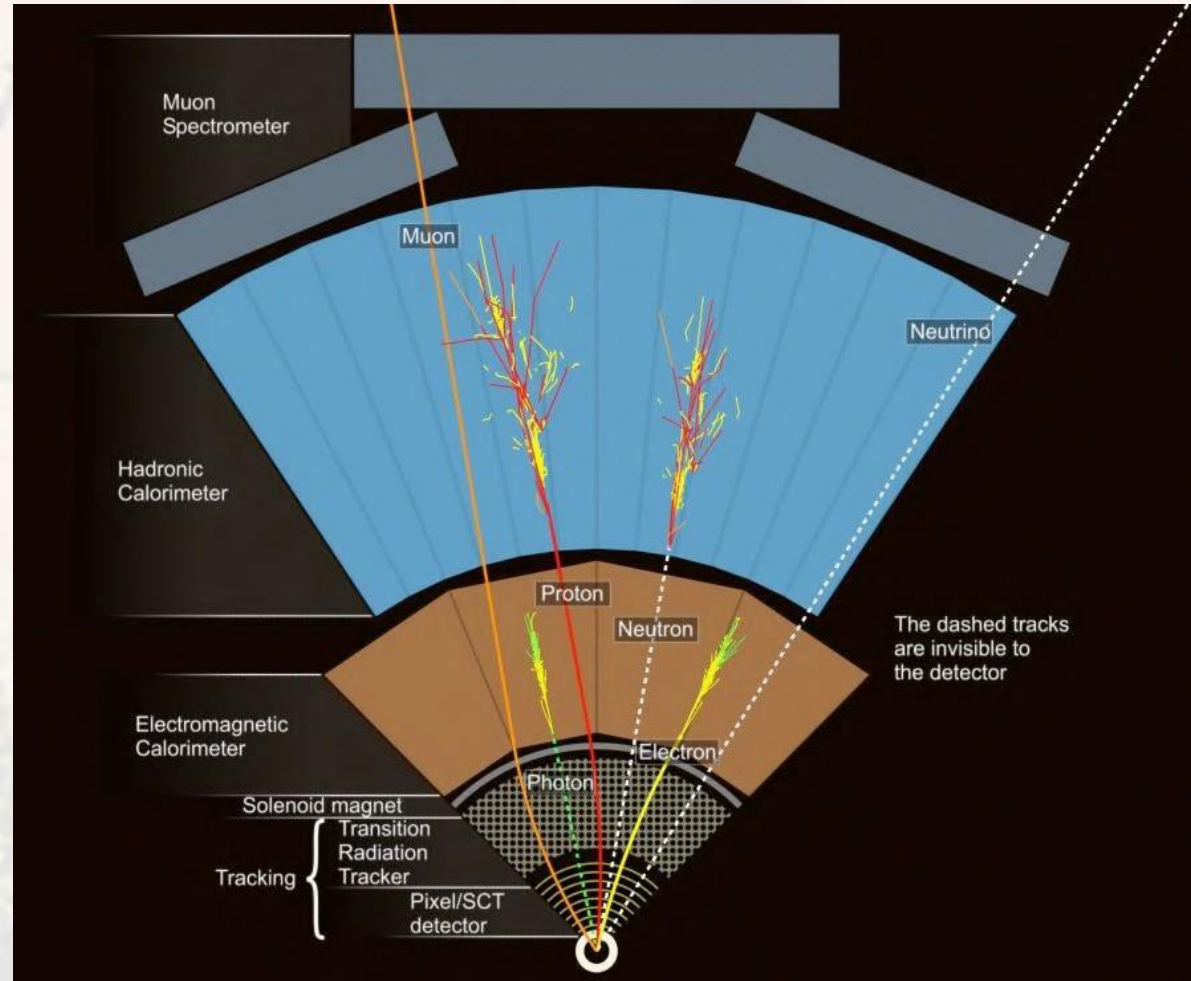
Premi Nobel 2020



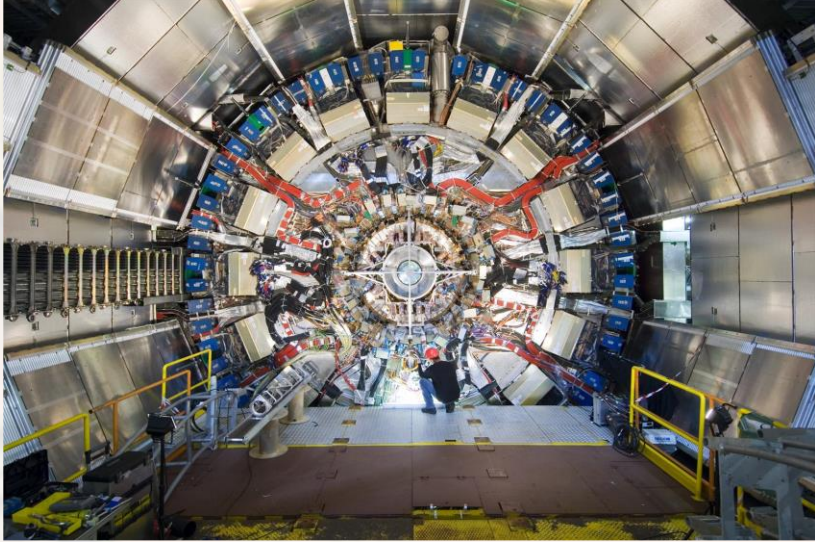
Ma intanto ci si può divertire moltissimo!!!!



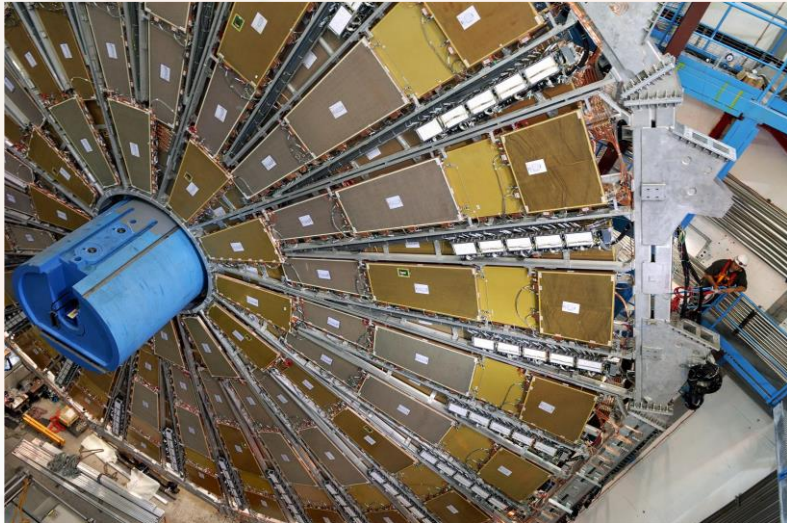
# Uno specchio di ATLAS



# rivelatori di ATLAS a LHC



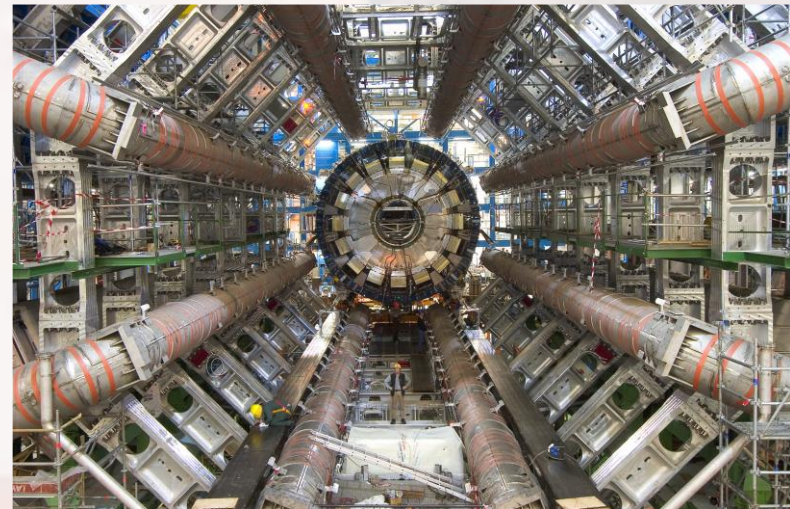
Spettrometro a muoni



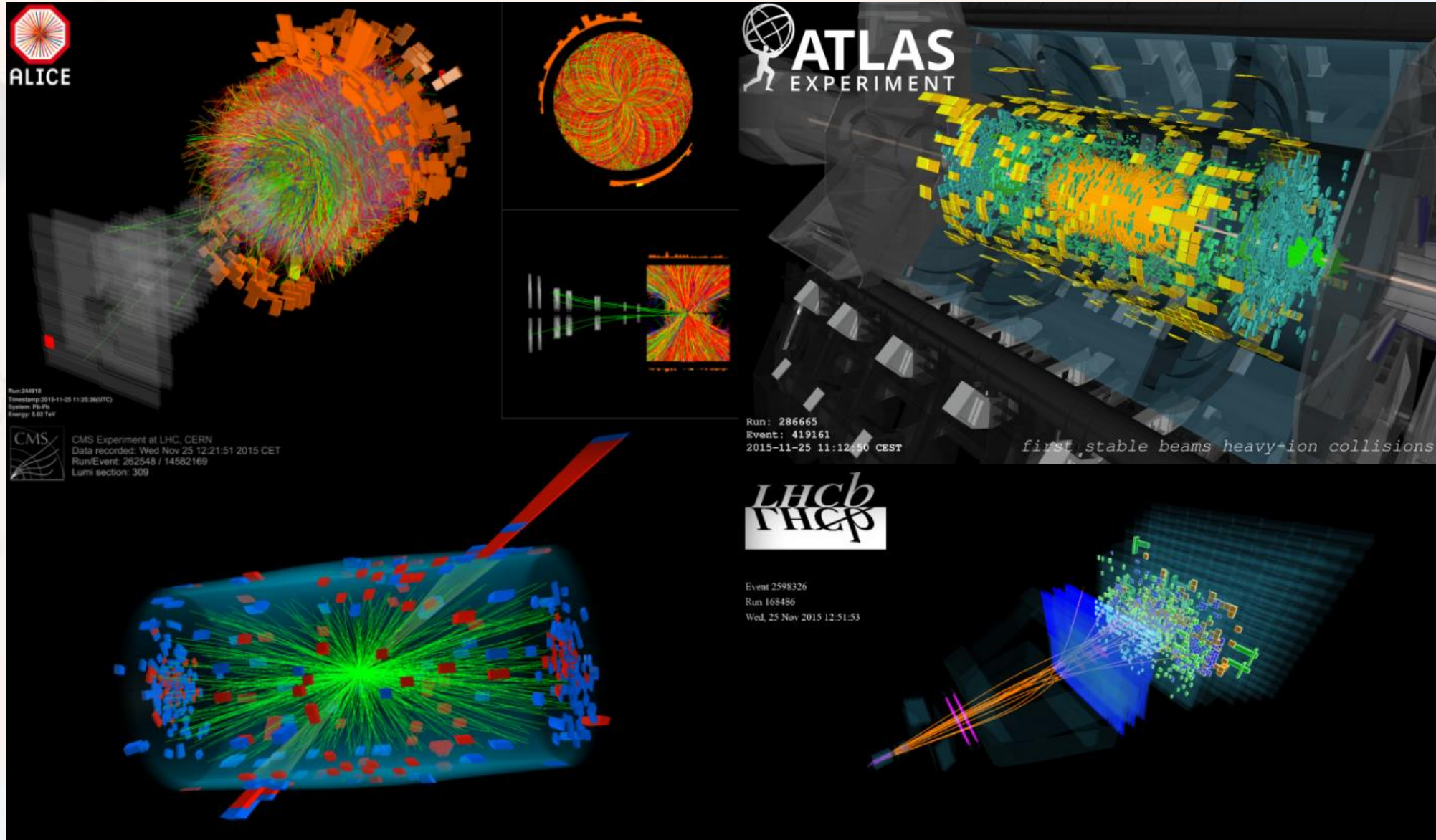
Calorimetri



Magneti

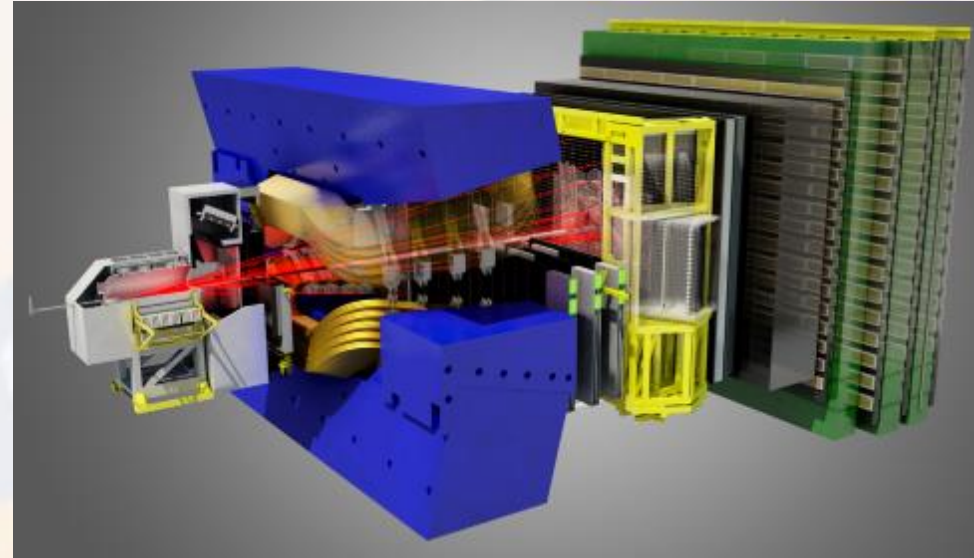
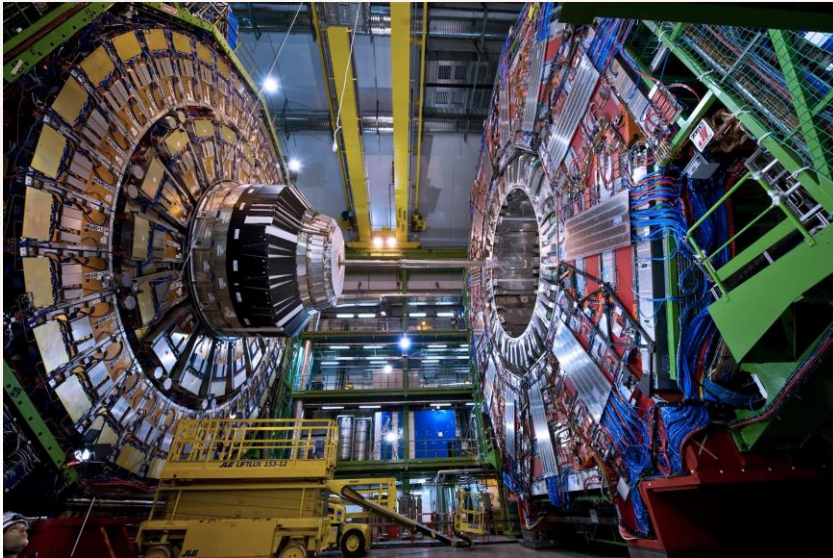
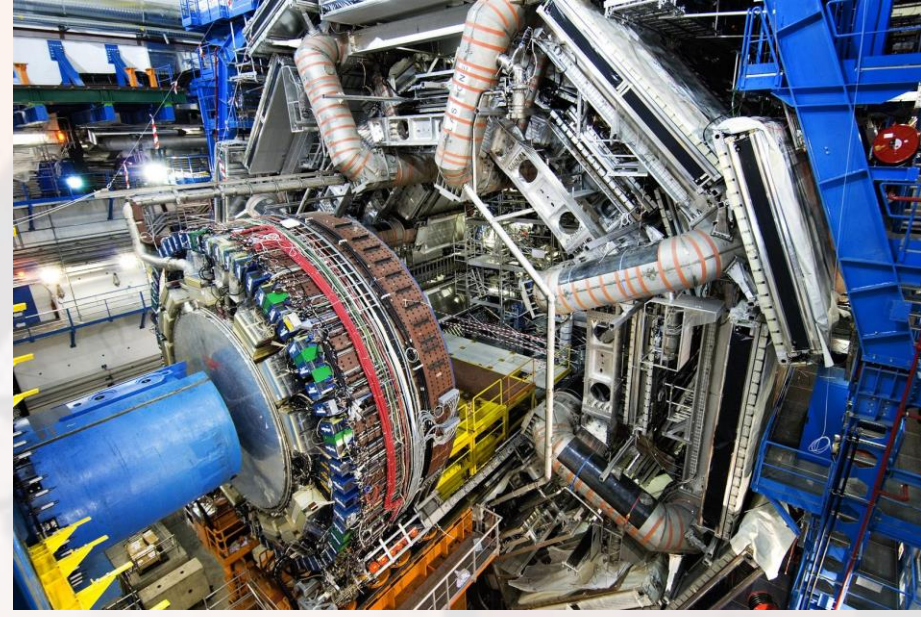
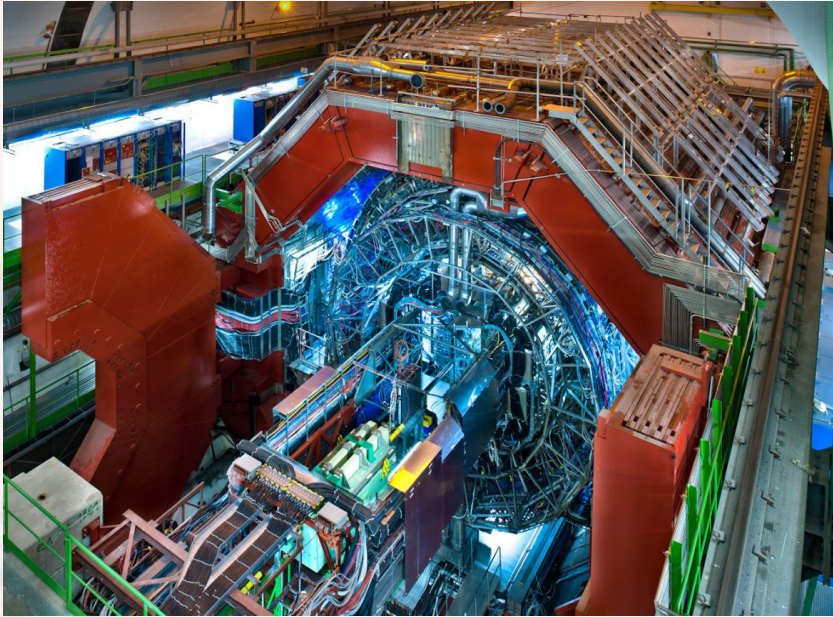


# Gli apparati sperimentali lungo LHC





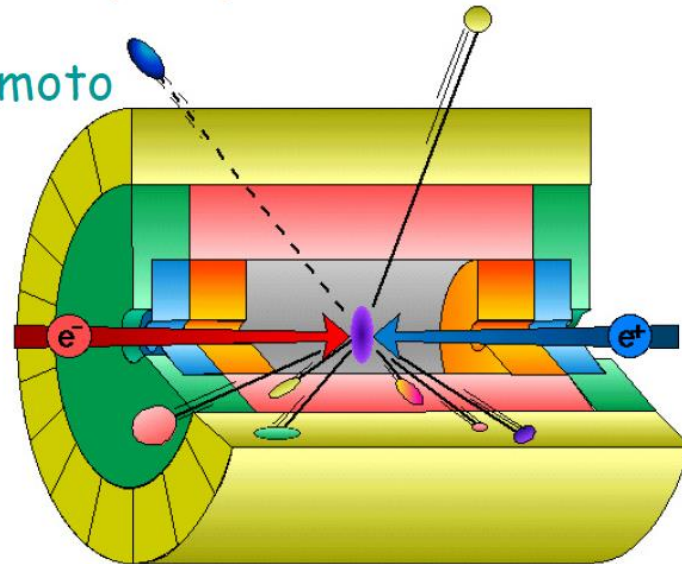
# Gli apparati sperimentali lungo LHC



# Rivelatori

Yes we can!!

- Una volta che abbiamo prodotto le particelle che dobbiamo misurare?
- Posizione e direzione del moto
- Carica elettrica
- Energia
- Impulso
- Massa
- Tempi di vita



- Le particelle *vengono rivelate e identificate* nei rivelatori di particelle, **grazie al loro diverso modo di interagire con la materia.**
- Un **rivelatore di particelle** è tipicamente costituito da diversi “sotto-rivelatori”, ciascuno *sensibile ad una particolare caratteristica* delle particelle che lo attraversano.
- È in grado di rivelare e distinguere tra loro particelle di tipo diverso e misurarne le proprietà.

