

Esperimento ATLAS

A Toroidal LArge Spectrometer

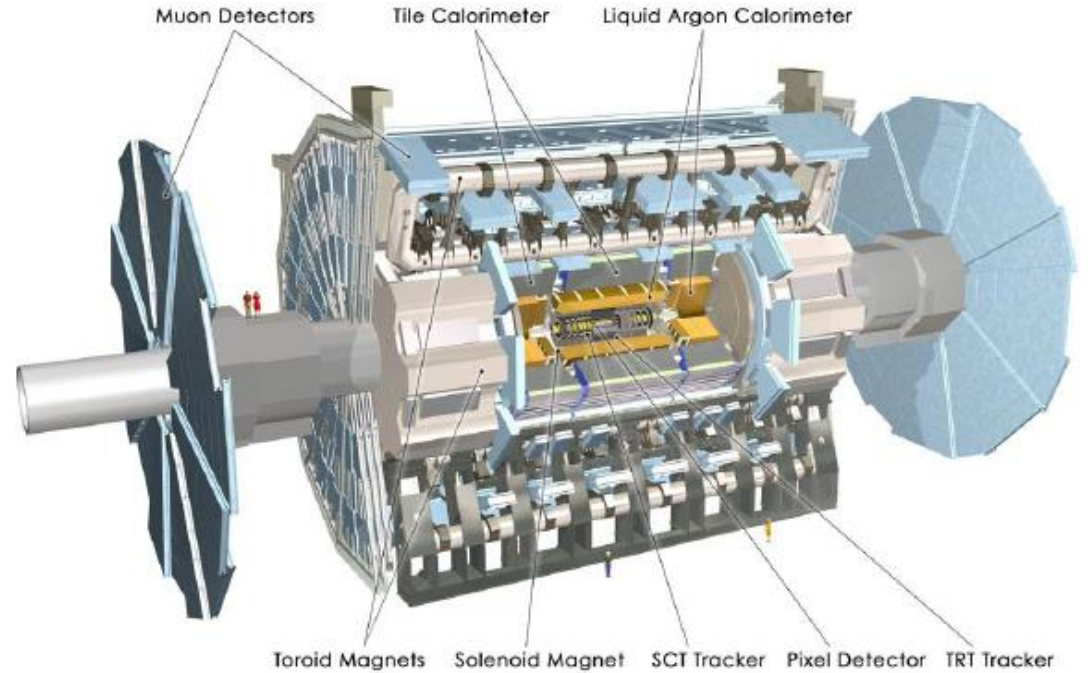
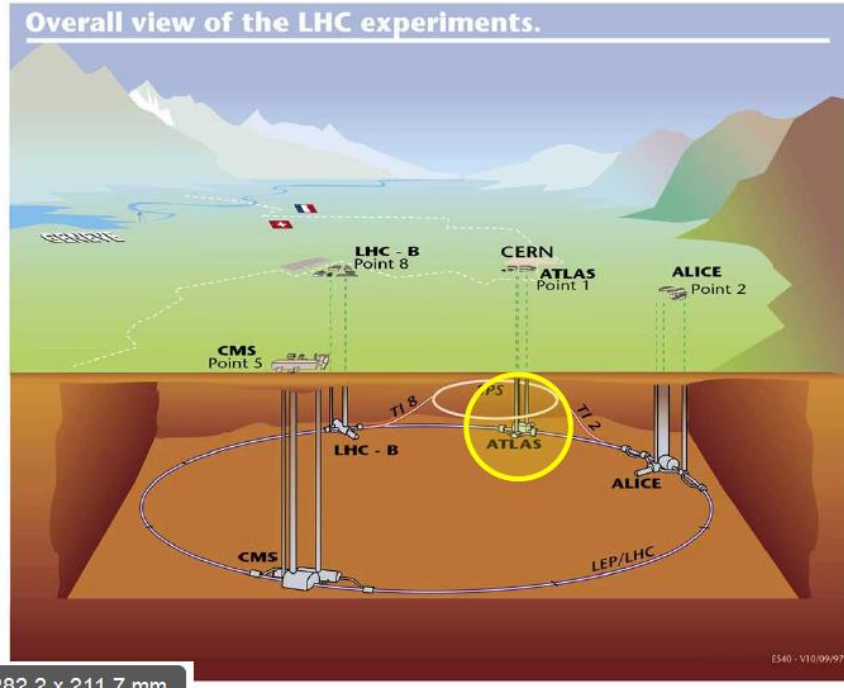
B.Liberti

E-mail: barbara.liberti@roma2.infn.it

ATLAS at LHC

LHC: World's largest and most powerful collider

- Currently collides protons at 7 TeV per beam
- 27 km in circumference
- Located 100 m underground
- 25 ns Bunch crossing
- Luminosità $1,5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



ATLAS Experiment

- Diameter 25 m -- Length : 46 m
- Overall weight 7 000 tonnes
- ~ 100 million electronic channels
- ~ 3 000 km of cables

Esperimento di Scoperta -> General Purpose Detector

• Obiettivo la scoperta del Bosone di Higgs

Known during design phase of ATLAS and CMS:

♦ Decay channels depend on mass:

♦ $M_H < 130 \text{ GeV}$

→ $b\bar{b}$ dominant

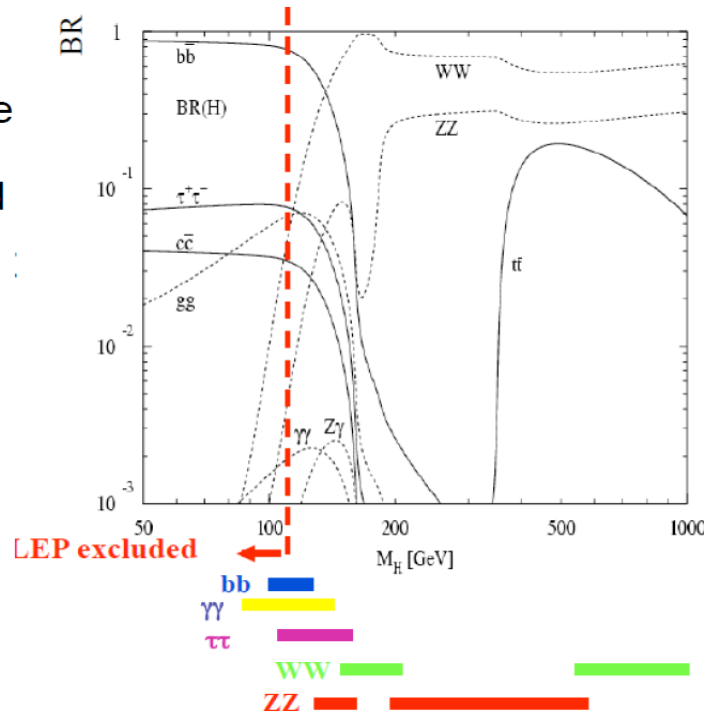
→ $\tau\tau$ subdominant

→ $\gamma\gamma$ Small but very clean

♦ $M_H > 130 \text{ GeV}$

→ WW dominant

→ ZZ large and clean



- Non conoscendo la massa della particella, non conosco i prodotti in cui decadrà né con quale frequenza decadrà in quei prodotti
- Devo poter identificare e ricostruire tutte le particelle prodotte nei possibili decadimenti
- Devo riconoscere, acquisire e ricostruire il maggior numero possibile di eventi generati dalle collisioni

Standard Model describes all observed phenomena in

Elementary particle physics

- ♦ 2×6 fundamental fermions - "particles of matter"
- ♦ 4 fundamental, spin 1 bosons - "particles of interaction"

Language (mathematical) of SM:
→ Local renormalizable Quantum Field Theory

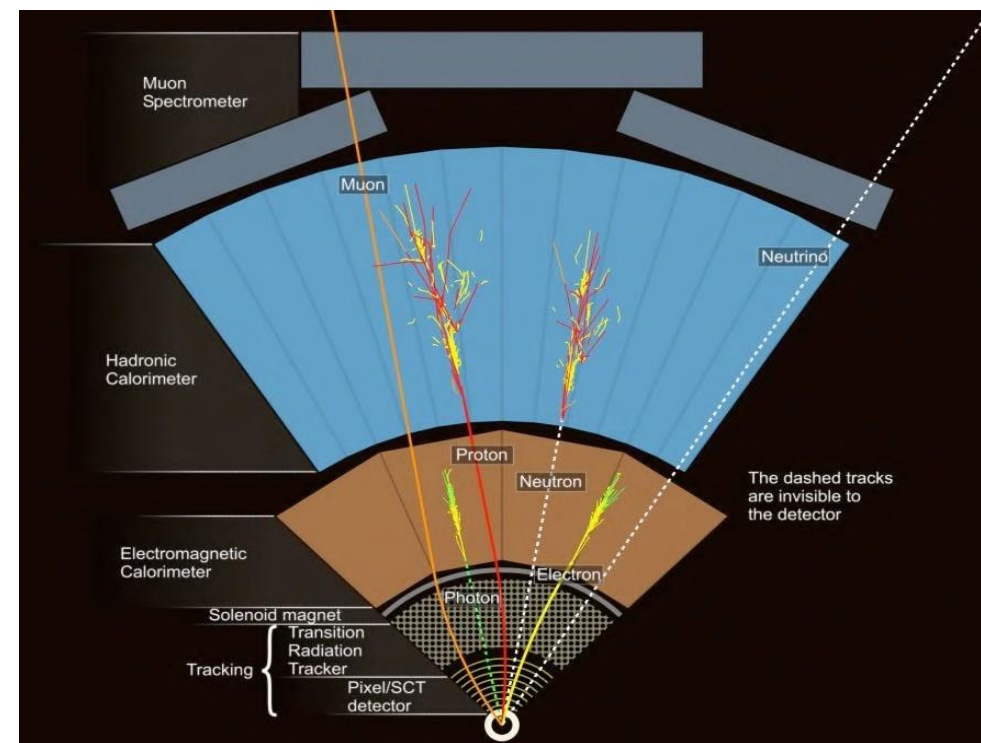
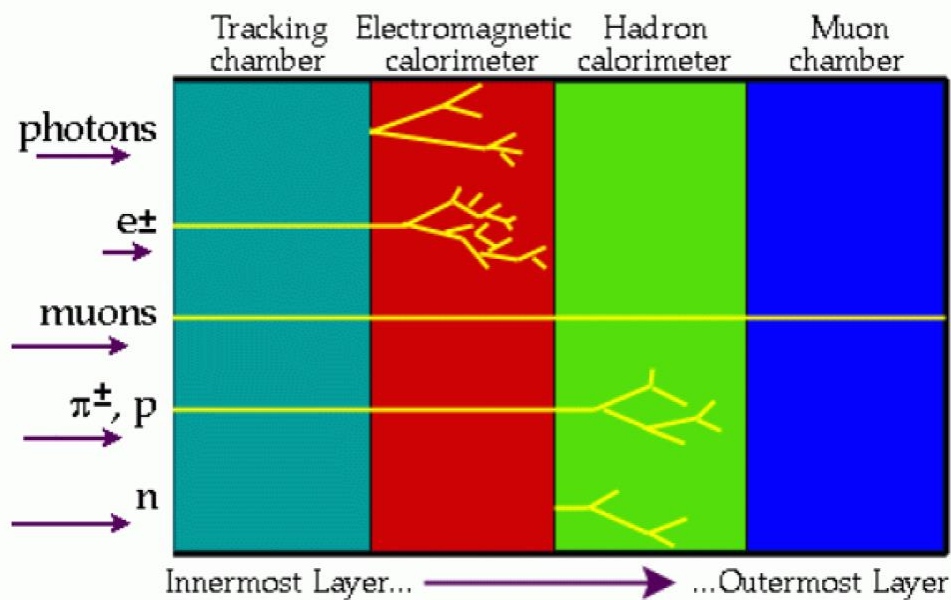
Higgs boson (was) the only missing piece of SM ...

Three Generations of Matter (Fermions)				
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm weak force

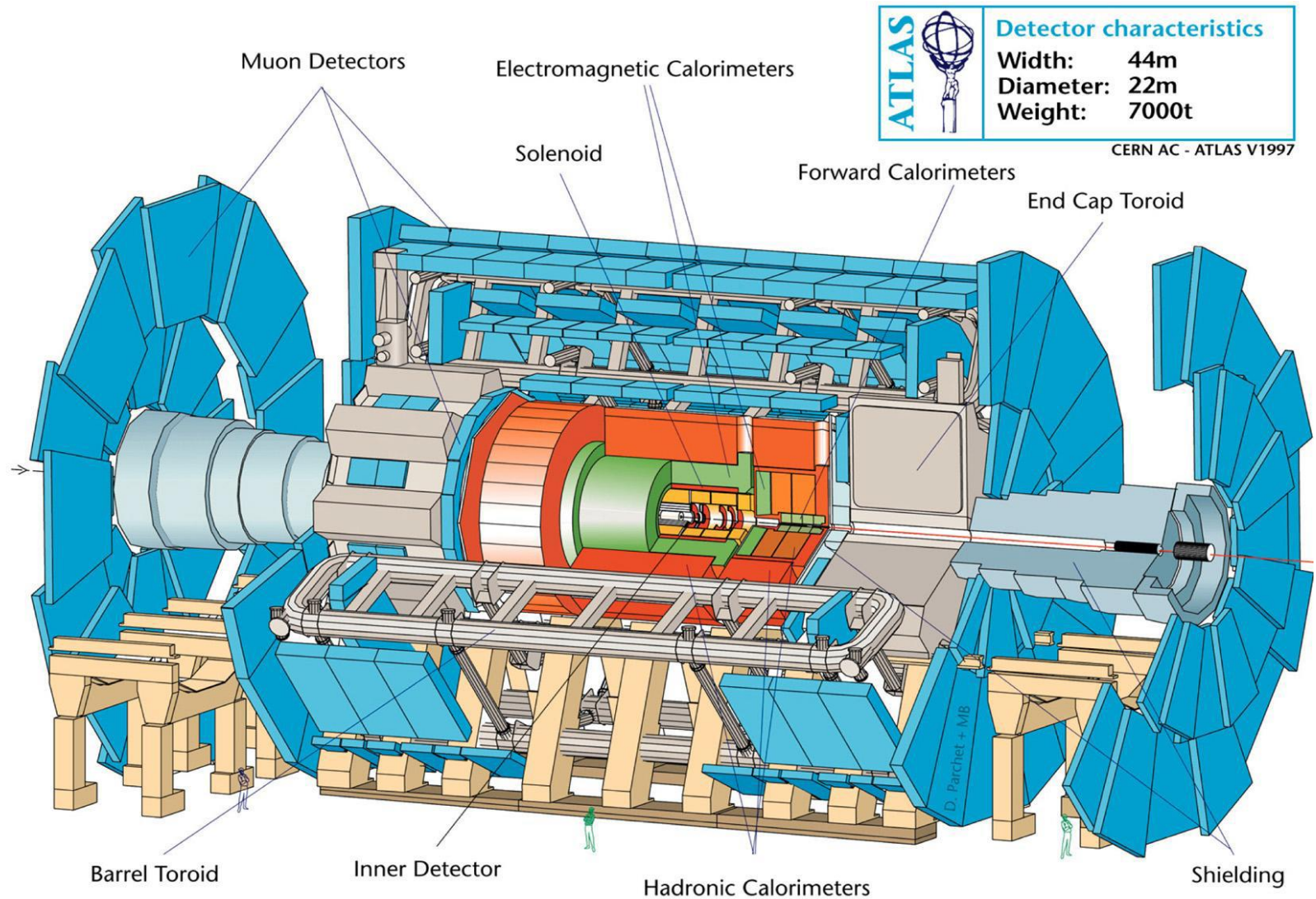
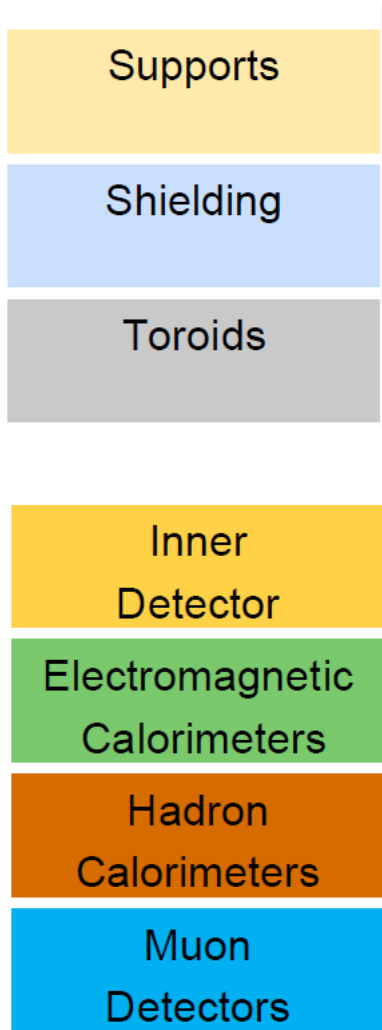
Bosons (Forces)

General Purpose Detector -> Specialized Sub-Detectors

- Misurare tutte le variabili identificative delle particelle
 - **Identificare il numero ed il tipo di particelle prodotte**
 - **Misurare la traiettoria, la carica, l'energia e quantità di moto**

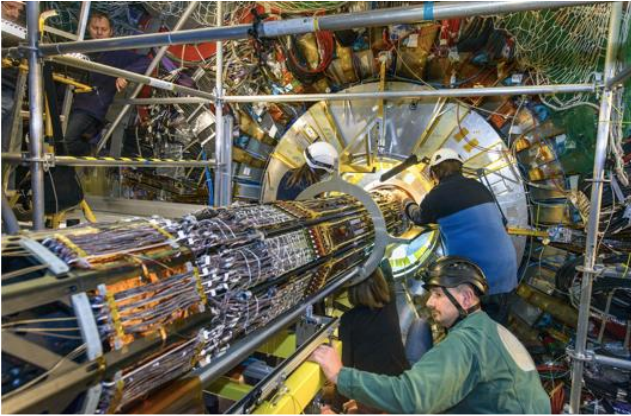


Il Rivelatore ATLAS

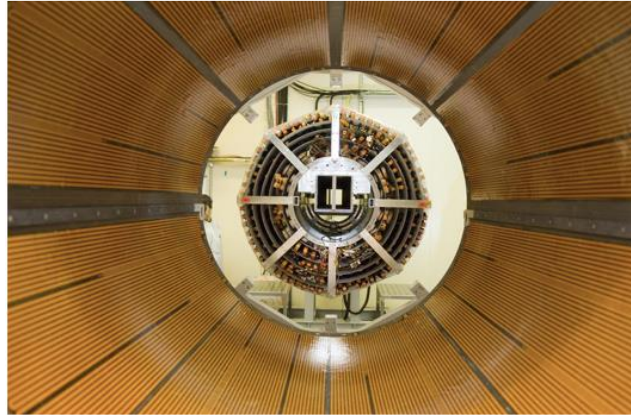


Atlas- Inner Tracker

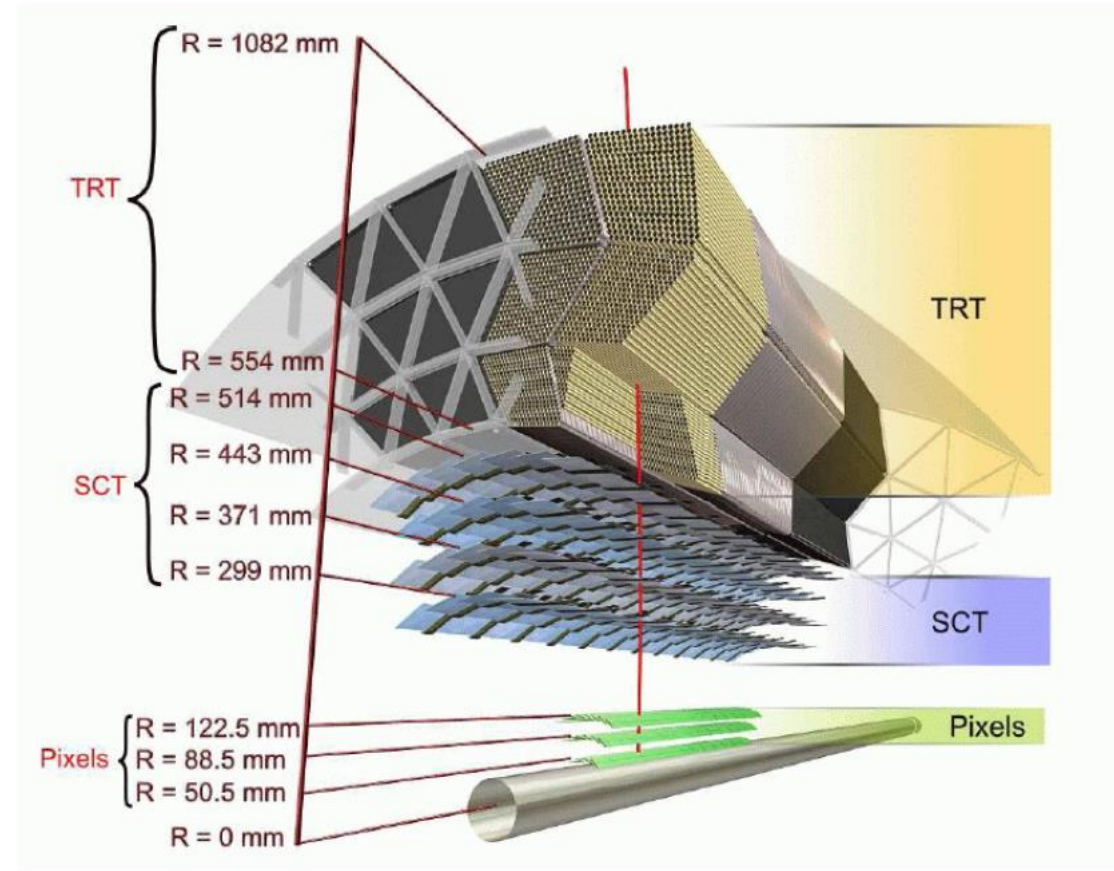
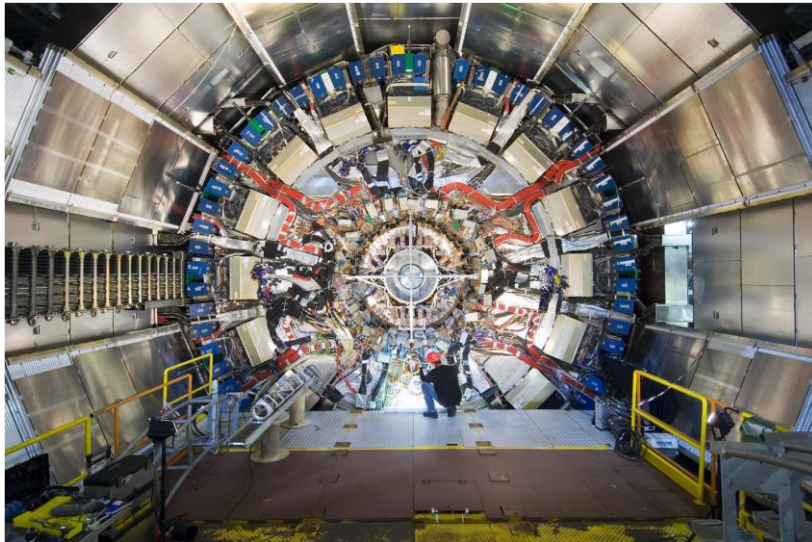
Pixel detector



Semiconductor tracker



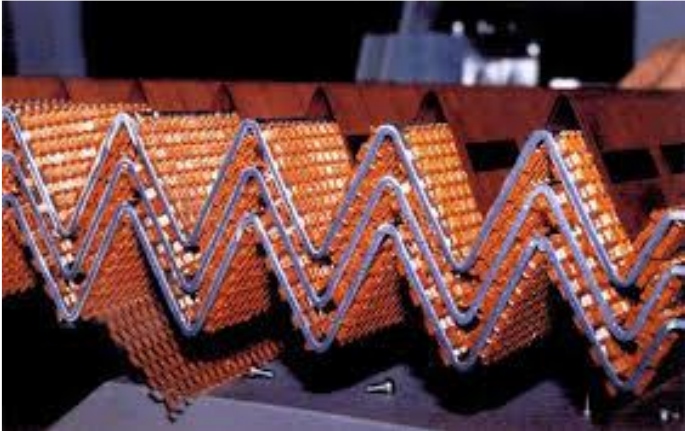
Tracciatore interno



**Semiconductor Detector Based
High Tracking Resolution 10-100 micron²**

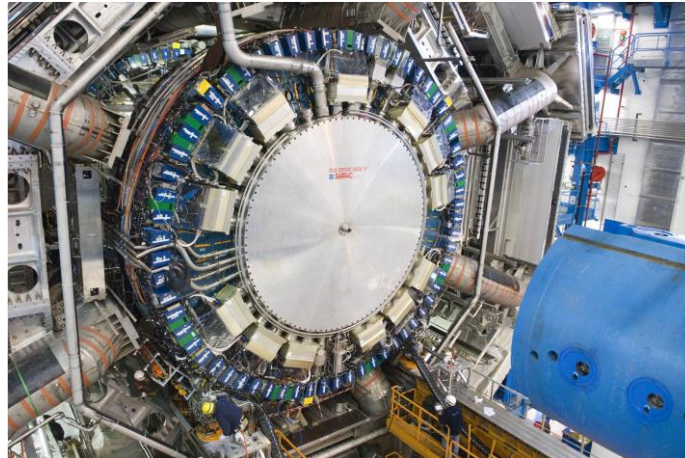
Atlas- Calorimeters

Il calorimetro elettromagnetico

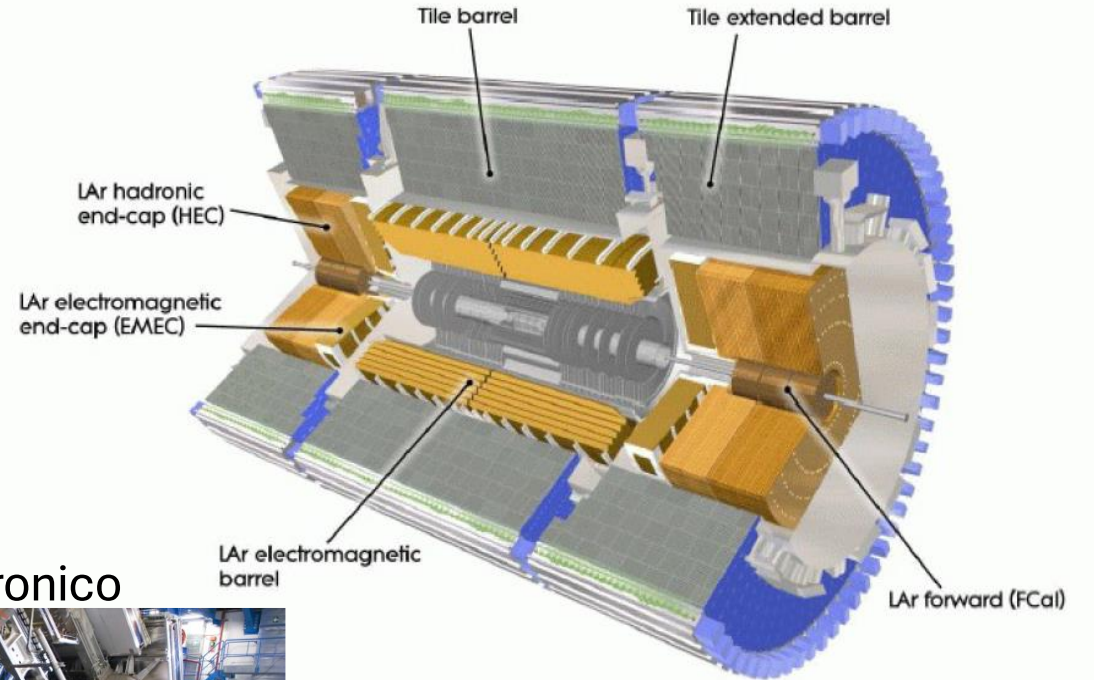


- Argon Liquido (rivelatore)
- + Piombo(assorbitore)

Il calorimetro adronico



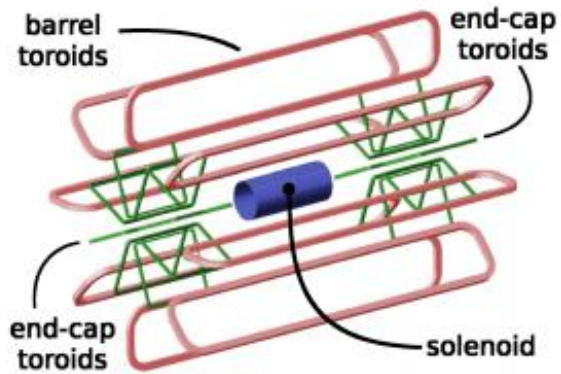
- Scintillatori plastici a mattonelle (rivelatore)
- + Ferro (assorbitore)



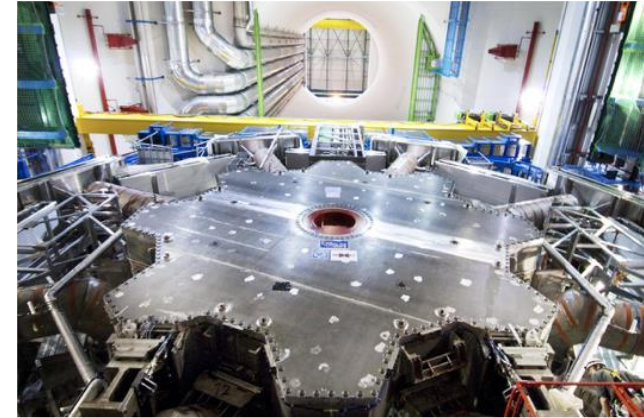
**Scintillation Detector Based
Energy Resolution $10\%/\sqrt{E}$**

Atlas - Toroid Magnet

Outside of the solenoid are large air-core toroids with bending field of 1T over a distance of $\sim 6\text{m}$, $BL_2=36\text{ Tm}_2$



Additional end-cap toroid in forward and backward direction

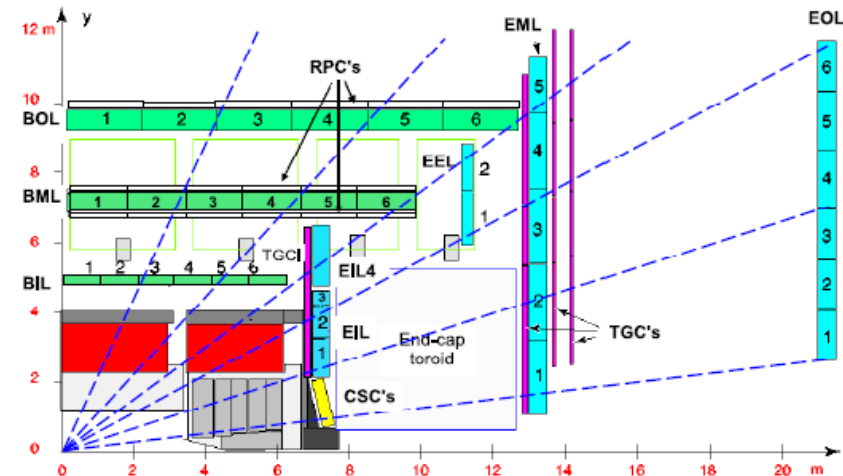
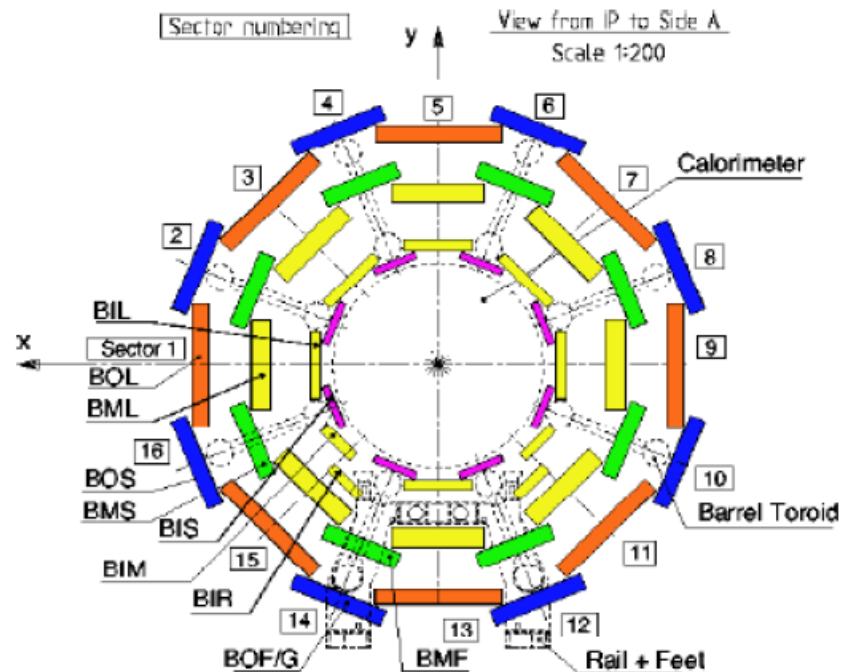
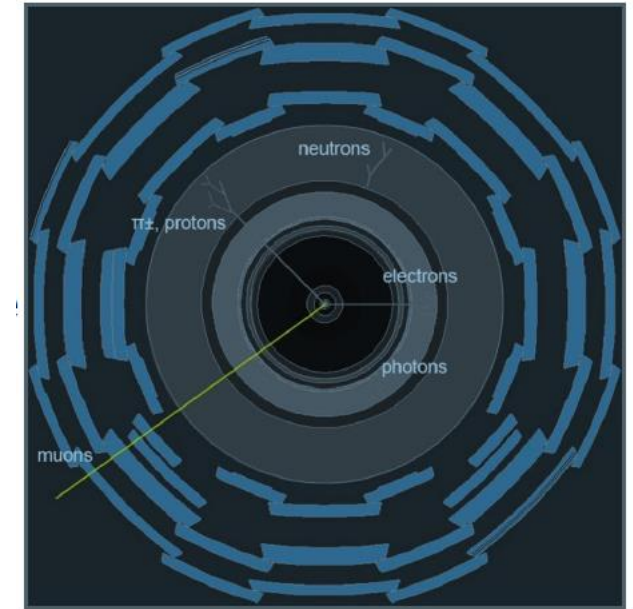


Central solenoid: $L=1\text{m}$ in 2T bending field, $BL_2=2\text{ Tm}_2$



Atlas- Muon Spectrometer

- Only Muons pass through the entire detector, they can be detected separately from other particles
- **Useful for fast analysis of events**
- If muons with high transverse momentum (p_T) are detected there is higher chance of interesting process



Gaseous Detector Based
Time Resolution 1 ns / Space Resolution 80 micron
Momentum Resolution order 1-10% at highest momenta

I rivelatori per Muoni di ATLAS

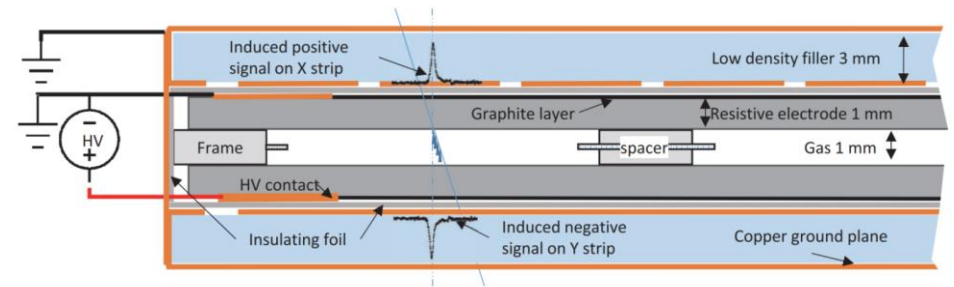
Monitored Drift Tubes (MDT)



- 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**

Atlas- Trigger Selection

ATLAS collides protons at a rate of $\sim 1\text{GHz}$

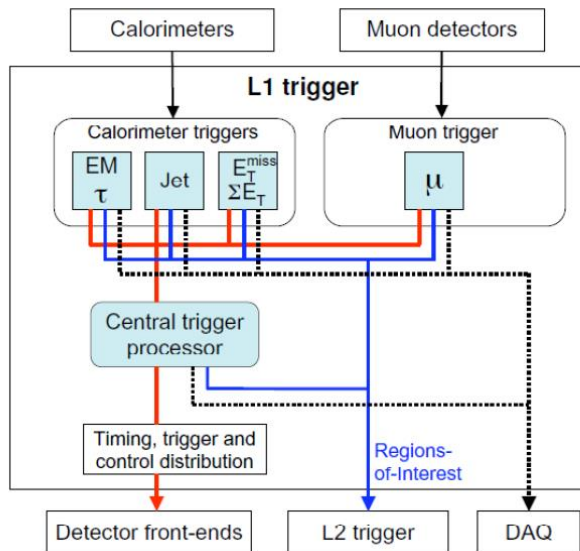
- Raw data size for each event is $\sim 1.6\text{MB}$

Would require data flow capacity of 1.6PB/s to record everything

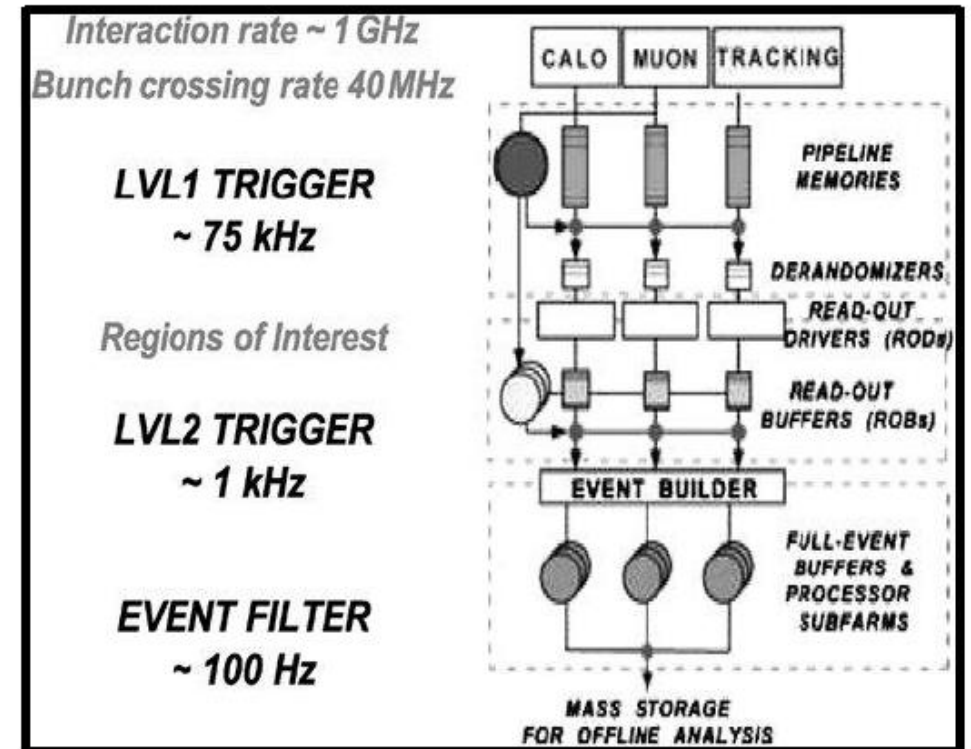
- Actual capacity is several 100MB/s

Require events to be filtered to $\sim 100\text{Hz}$

- Done using 3 trigger levels



First of these is the Hardware LVL1 trigger
Needs to reduce events from $\sim 1\text{GHz}$ to $\sim 75\text{kHz}$,
Requires very low latency ($\sim 2\mu\text{s}$)



Upgrade Muon Detector: RPC BI

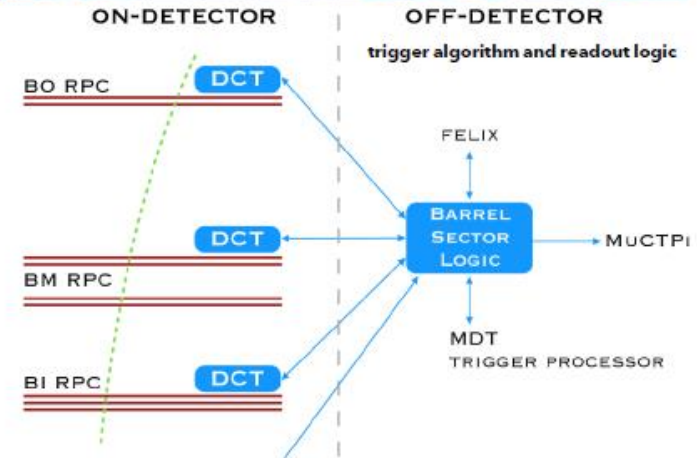
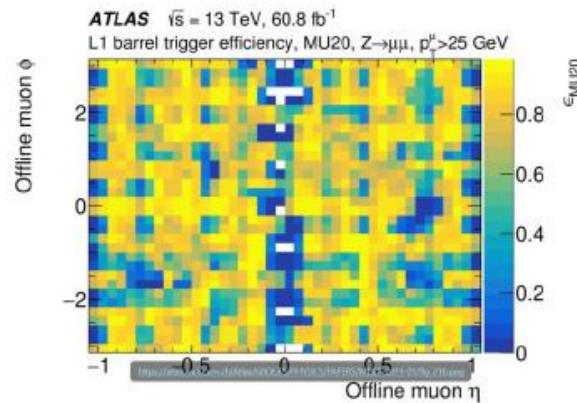
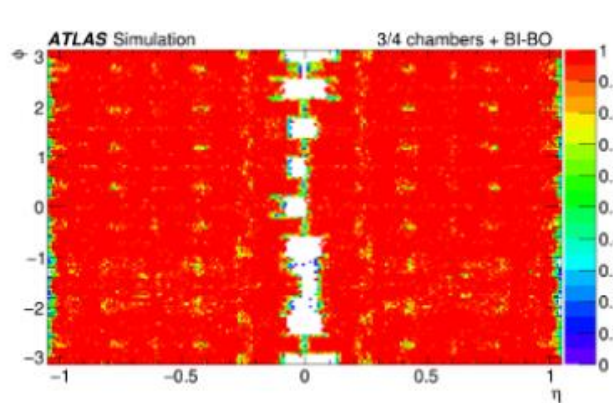
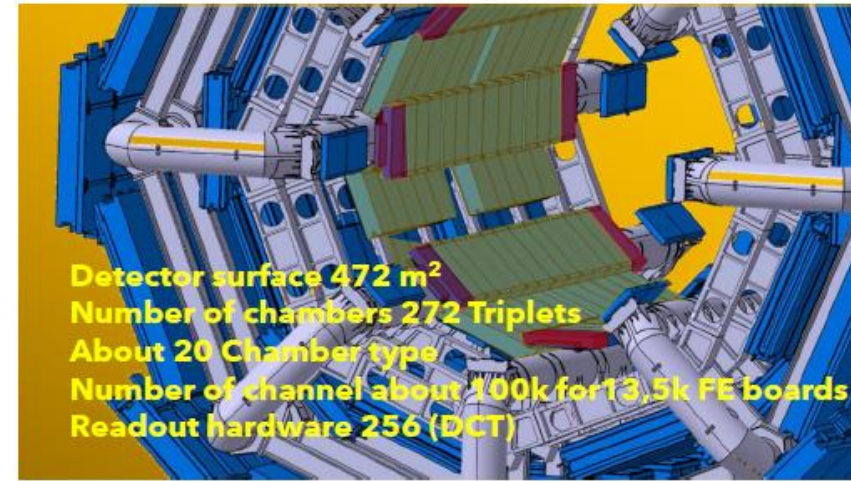
Attività presso Dip. Fisica e INFN Tor Vergata

INTRODUCTION

In view of the HL-LHC luminosity increase ($7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ @ 14 TeV p-p, $\langle \mu \rangle = 200$) the Atlas Muon-Trigger needs major upgrades. The RPC system will be upgraded adding 272 new generation RPC detectors in the Barrel Inner and replacing the old on detector trigger PADs with new DCTs.

Improvement:

- **Trigger Redundancy (6 \rightarrow 9 layers)**
- **Acceptance (78% \rightarrow 92%, 96% with BI-BO coincidence)**
- Spectrometer lever arm (2.3 m \rightarrow 4.5 m)
- Improved tracking and trigger capability
- Improved time resolution for TOF measurements



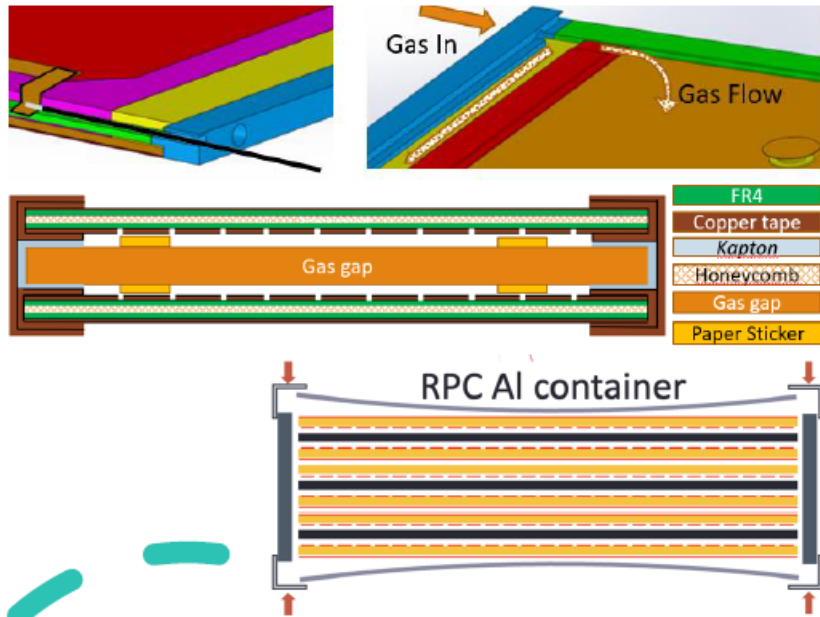
Upgrade Muon Detector: RPC BI

Attività presso Dip. Fisica e INFN Tor Vergata

DESIGN OF THE NEW BI-RPC

Detector requirements

- rate capability: $\rightarrow 7 \text{ kHz/cm}^2$
- longevity: $>10 \text{ years @ HL-LHC}$
- spatial resolution: $<1 \text{ cm}$
- reduced envelope to be installed in the BI



NEW GAS VOLUME DESIGN

- Gas-gap thickness 1 mm for 0.35 ns time resolution (WP = 5800 V)
- Bakelite electrode thickness 1.4 mm
- New HV connection on gas volume side Gas distributors on the short sides with 2 inlet and 2 outlet
- New inlet pipe connection

NEW READOUT PANELS DESIGN

- Eta-Eta readout with ϕ coordinate reconstruction by leading time difference between two panels (1 cm)
- Sandwich of aramid paper honeycomb between copper glaze halogen free FR4 photoengraved plates for a total thickness of 3.8 mm

NEW FE ELECTONICS

- 100 ps resolution TDC embedded,
- minimum threshold 0.3 mV (min. detectable signal $1 \div 2 \text{ fC}$)
 \rightarrow rate capability about 10 kHz/cm^2

NEW CHAMBER STRUCTURE

- Three independent detectors with eta-eta read-out instead of two independent detector with eta-phi read-out

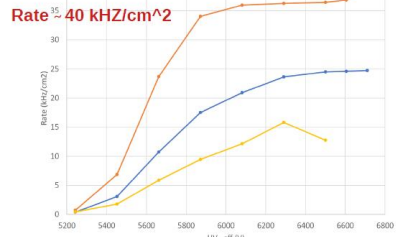
Atlas - Resistive Plate Chamber – R&D for Future

Attività presso Dip. Fisica e INFN Tor Vergata

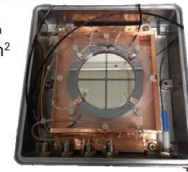
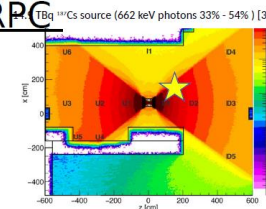
L' R&D : improved time resolution, rate capability, space resolution -> change in layout, in materials, in read-out strategy, in Front-End amplification capability, new gases mixtures

Rate capability performance of RPC with SI-GaAs electrodes

- Hz/cm² in uniform high energy photons field
- Equivalent discrimination threshold about 5 fC
- No photon converter on the electrode surface
->RPC photon efficiency ~ -> maximum photons counting rate ~ /cm²

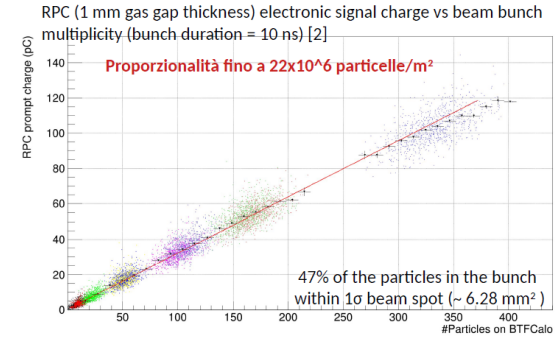


- Gas gap thickness 1 mm
- Semi Insulating GaAs electrodes
Thickness 0.6 mm
Resistivity $1.4 \times 10^8 \Omega \text{cm}$
- Active area 6.25 cm²
- Four readout pads

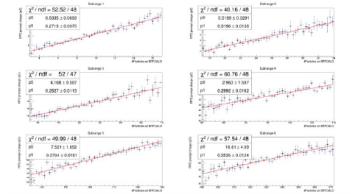
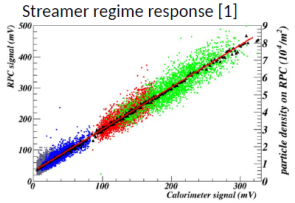


3/16/21 D. Pfeiffer et al, The radiation field in the Gamma Irradiation Facility GIF++ at CERN
A. Rocchi, R. Cardarelli, B. Liberti et al. *JINST* 15 (2020) 12, C12004. [10.1088/1748-0221/15/12/C12004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/12/C12004)

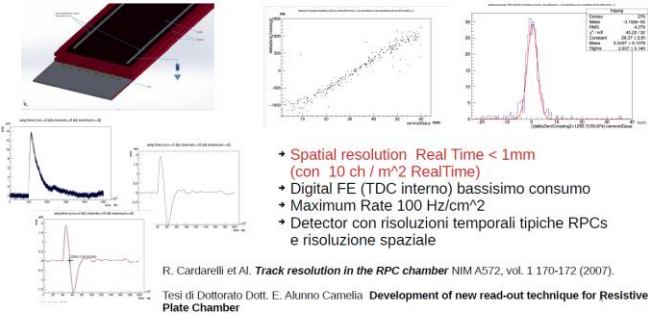
Analog calorimetry with RPC operated in saturated avalanche regime



R. Bartoli et al. *Intrinsic linearity of bakelite Resistive Plate Chambers operated in streamer mode*. NIM Section A, 2019.
A. Röechi, R. Cardarelli, B. Liberti et al. *JINST* 15 (2020) 12, C12004. [10.1088/1748-0221/15/12/C12004](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/12/C12004)



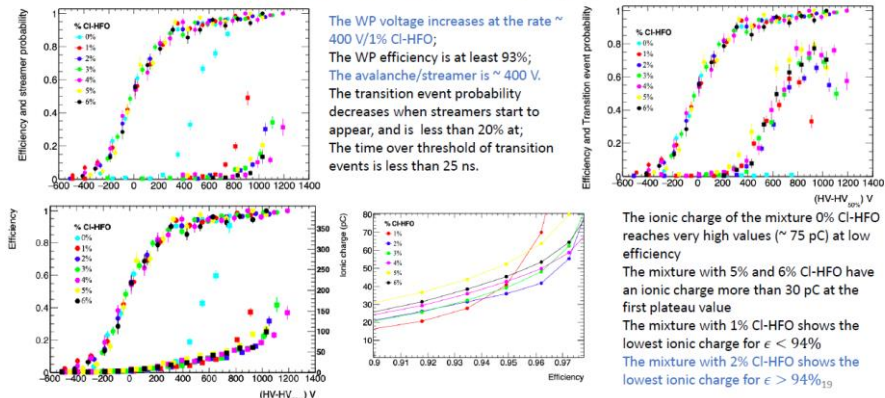
RPC - Spatial Resolution with Induced ionic signal



R. Cardarelli et al. *Track resolution in the RPC chamber* NIM A572, vol. 1 170-172 (2007).
Tesi di Dottorato Dott. E. Alunno Camella. Development of new read-out technique for Resistive Plate Chamber

- Gas mixtures tested: HFO/CO2/i-C4H10/HFO-Cl

HFO/i-C₄H₁₀ at a fixed ratio of (15/7) % + variable ratio of CO₂/ Cl-HFO in the range (78/72) %/(0-6) %

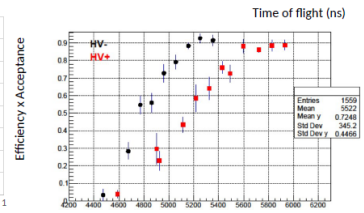
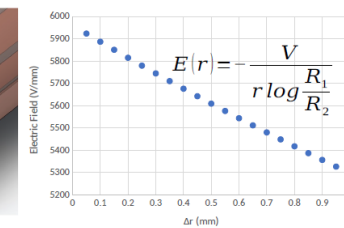
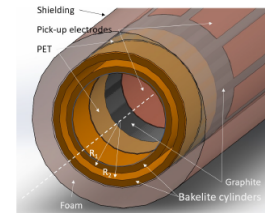
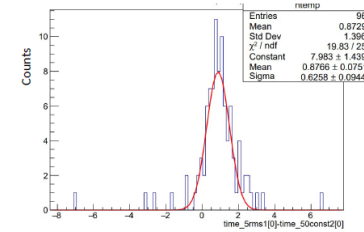


The ionic charge of the mixture 0% Cl-HFO reaches very high values (~ 75 pC) at low efficiency
The mixture with 5% and 6% Cl-HFO have an ionic charge more than 30 pC at the first plateau value
The mixture with 1% Cl-HFO shows the lowest ionic charge for $\epsilon < 94\%$
The mixture with 2% Cl-HFO shows the lowest ionic charge for $\epsilon > 94\%$

Resistive Cylindrical Chambers

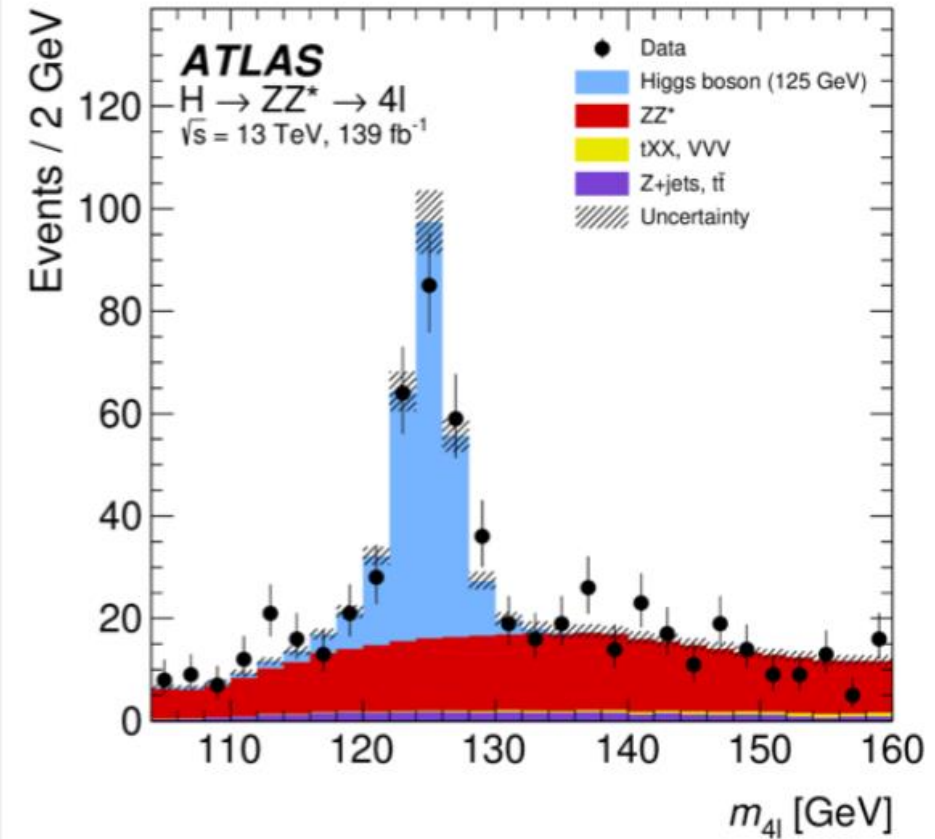
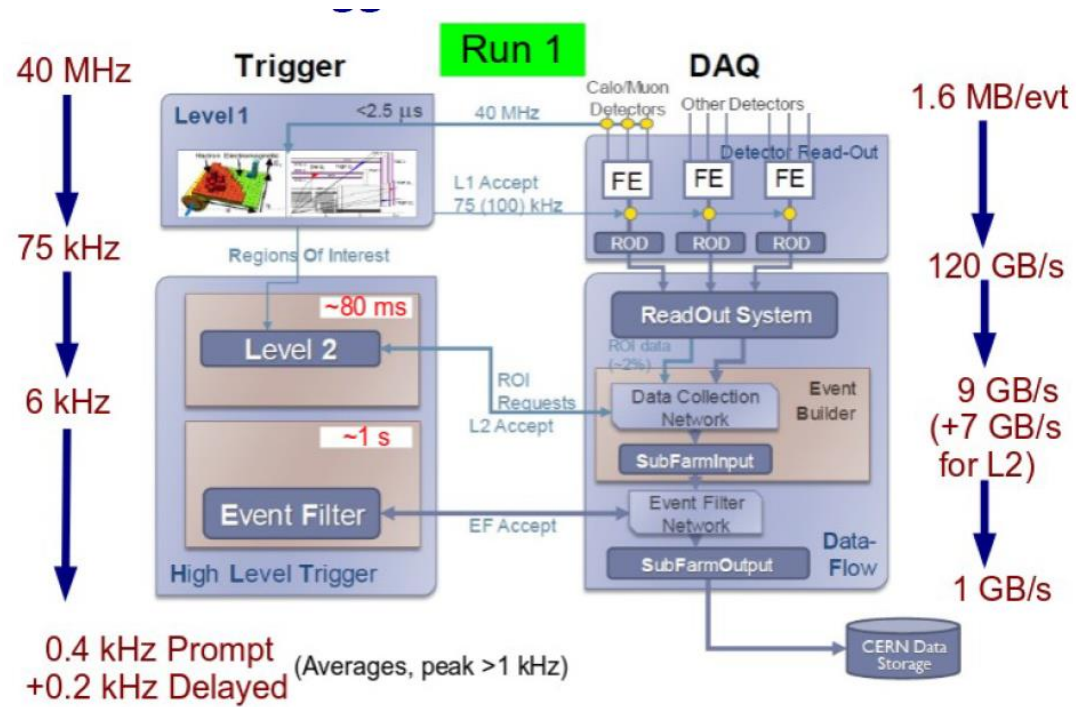
A cylindrical geometry consisting of two concentric pipes spaced by a gas gap allows to determine a very different evolution of the gas discharge development depending on the ratio of the facing surfaces radii

- The cylindrical geometry is resistant to the gas over-pressures. It can be argued that a gap working at a higher pressure is equivalent to a thicker gap, solving the lack of efficiency observed in the uniform field single thin gaps.
- In over pressure mode, new eco gases would be suitable for saturated working mode

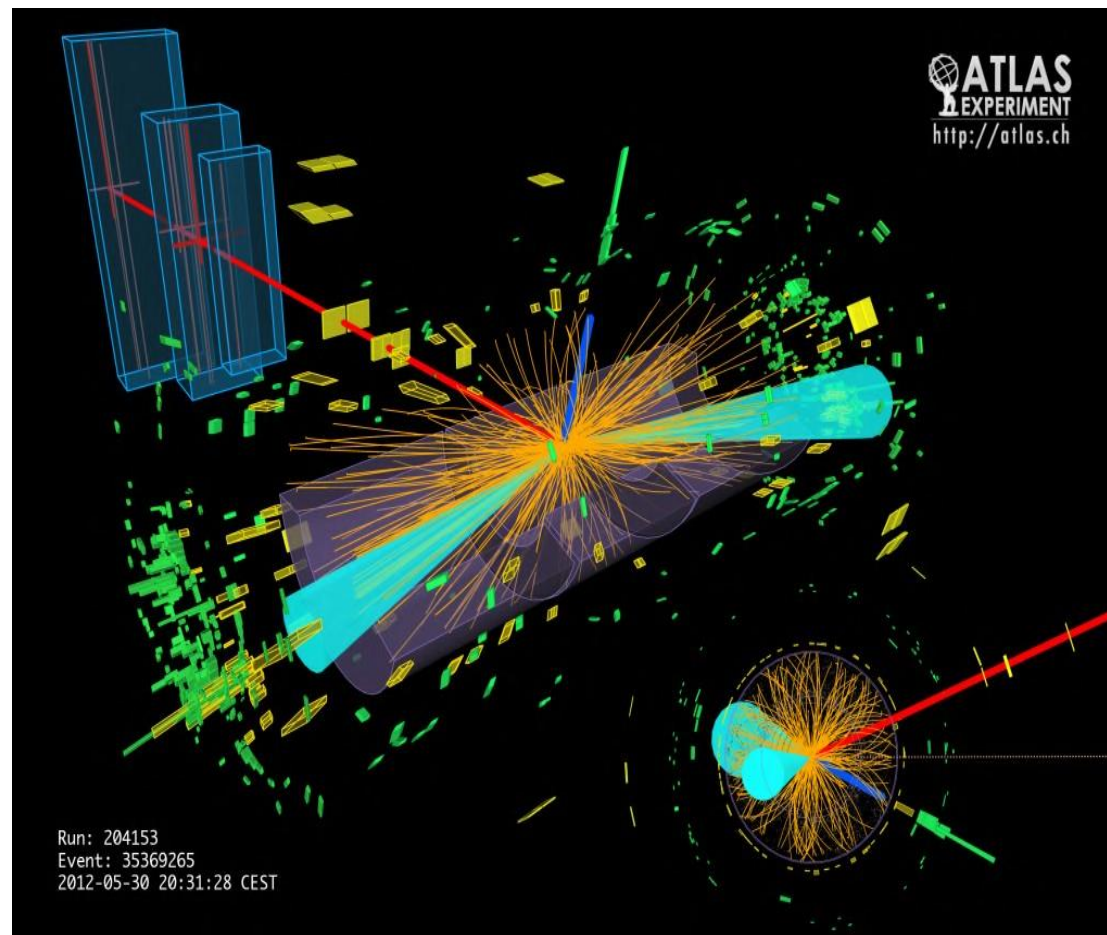


R. Cardarelli "Future RPC developments", RPC2020 Roma 10-14 /02/2020 proceeding su JINST HV_eff (V)

Atlas- Data Collection & Data Analysis



Atlas- have a good trip!



Maggiori informazioni sui rivelatori

I rivelatori di particelle _ perché?

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

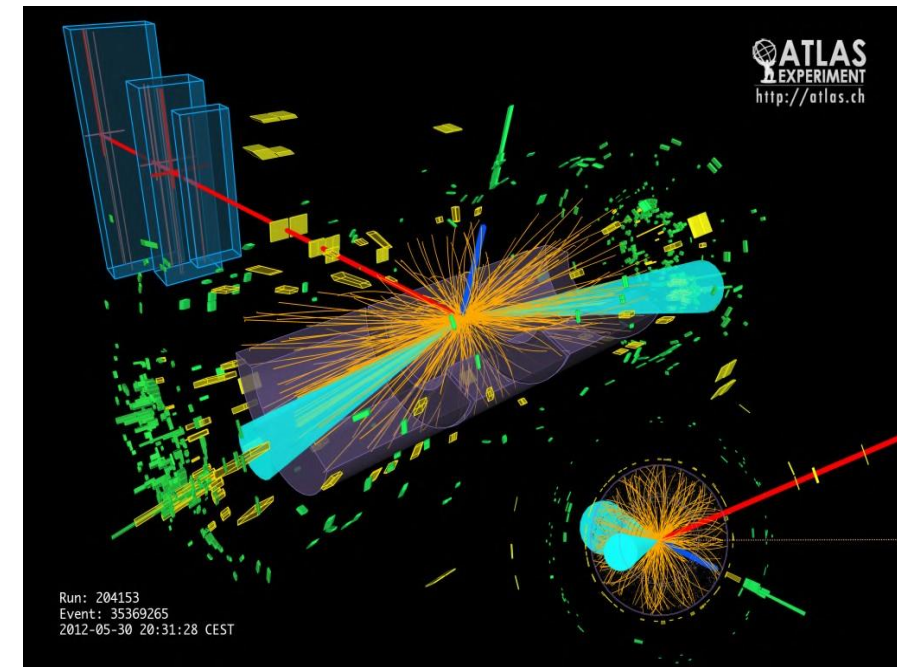
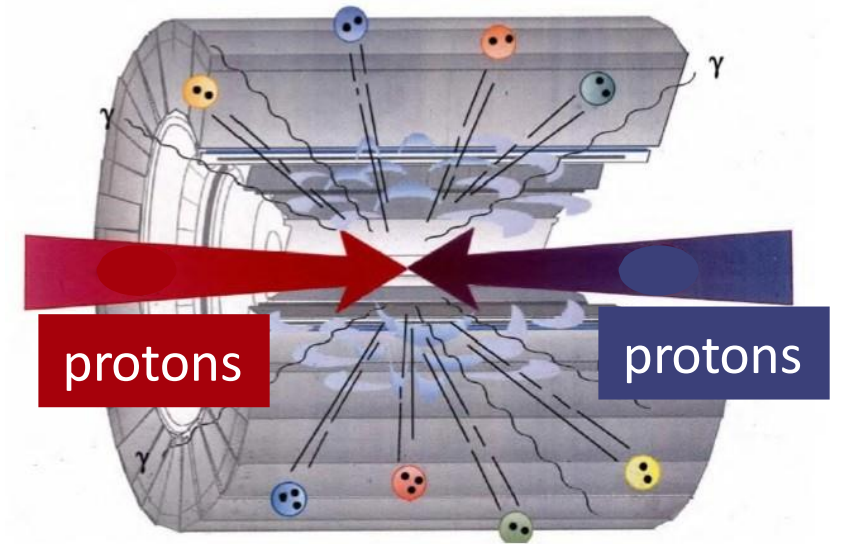
- **Identificare il numero ed il tipo di particelle prodotte**
- **Misurare la traiettoria, la carica, l'energia e quantità di moto (massa e velocità)**

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

- **A stabilire che cosa è accaduto nella collisione!**

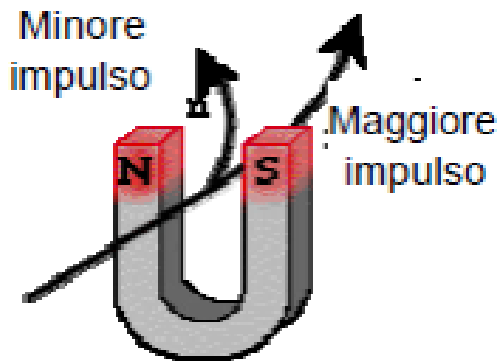
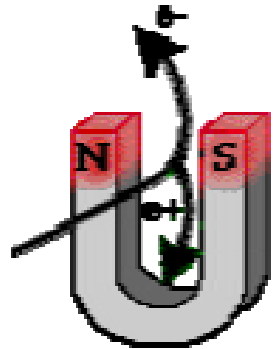
Il modello teorico ci detta quali particelle e in che quantità vengono prodotte, ci detta con quali energie e come decadono in particelle più leggere. Si va a verificare identificando e misurando con i rivelatori queste particelle.

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



Misura della carica e della quantità di moto

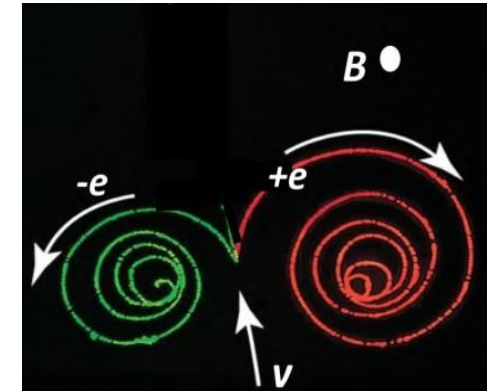
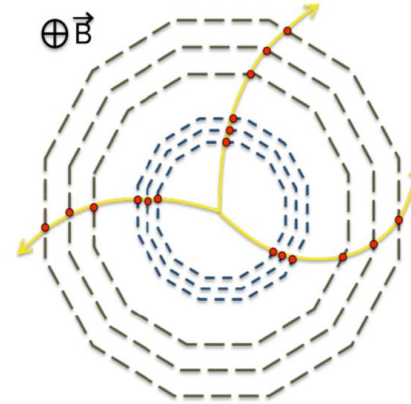
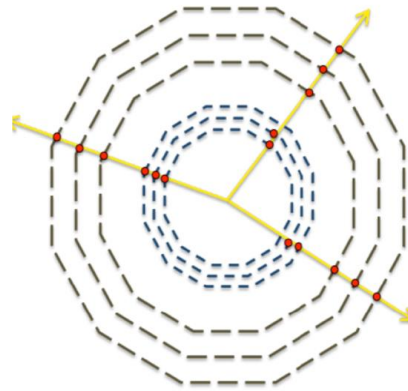
- Una particella carica in moto in un campo magnetico B segue una traiettoria curvilinea, a causa della **forza di Lorentz**



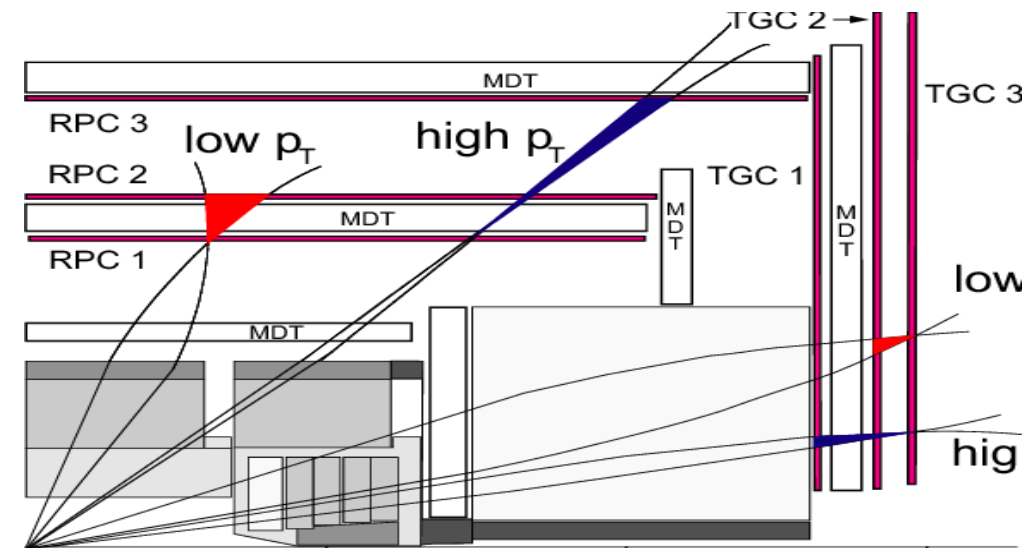
- La traiettoria segue un arco di circonferenza, dal raggio di curvatura posso ricavare:

$$p = mv = qBR$$

- 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



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

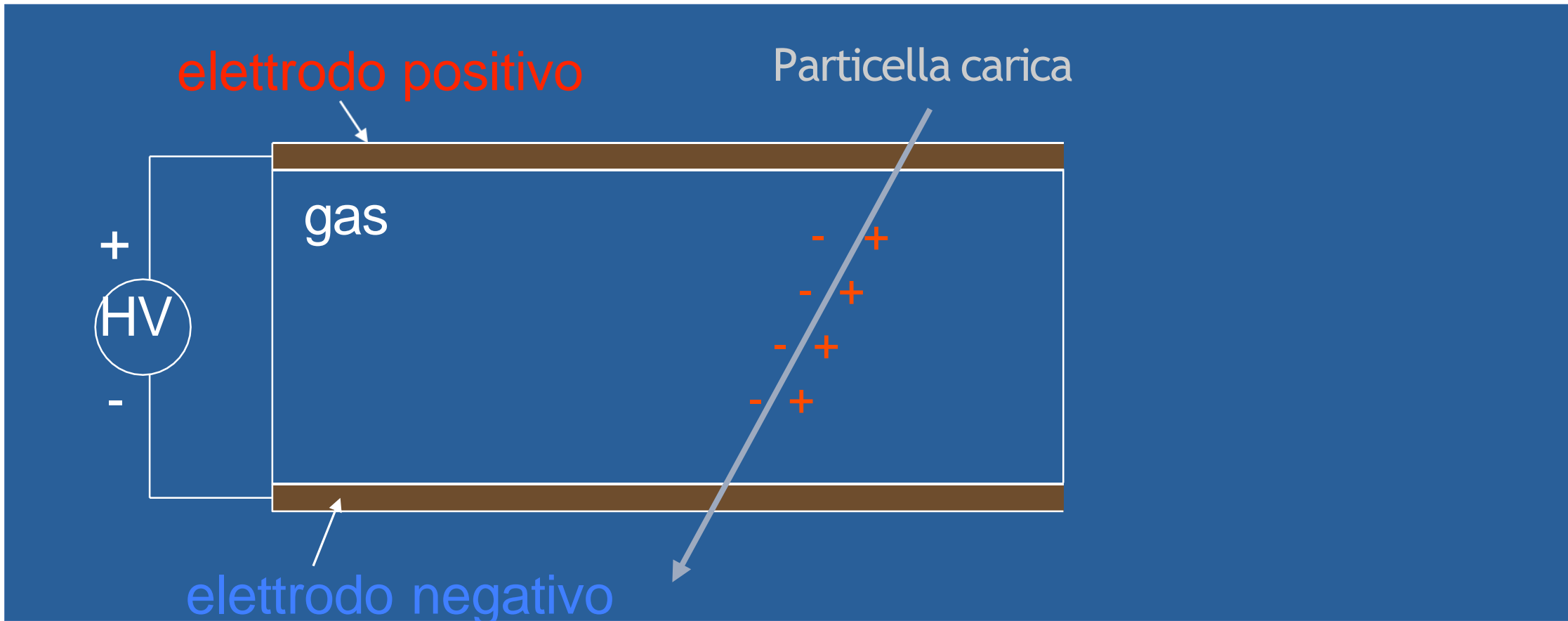


Un esempio di Rivelatore...a caso

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

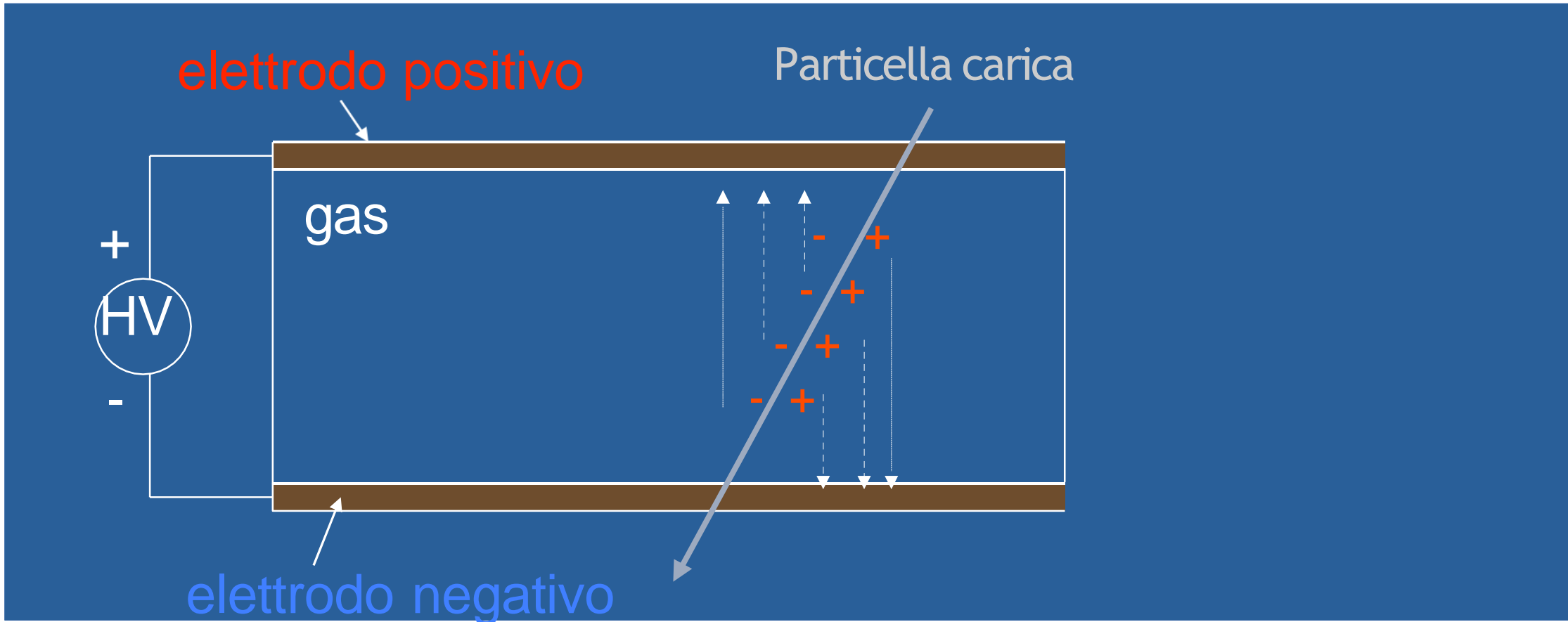


Un esempio di Rivelatore...a caso

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

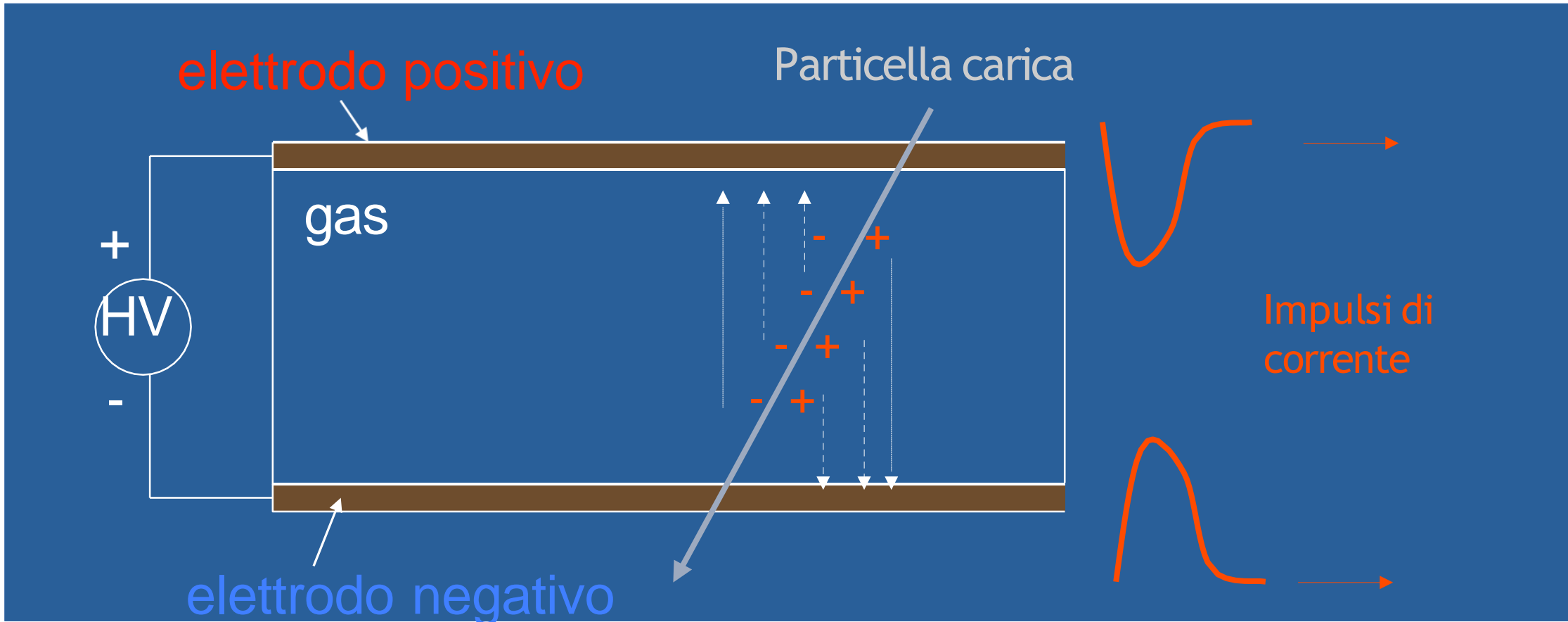


Un esempio di Rivelatore...a caso

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

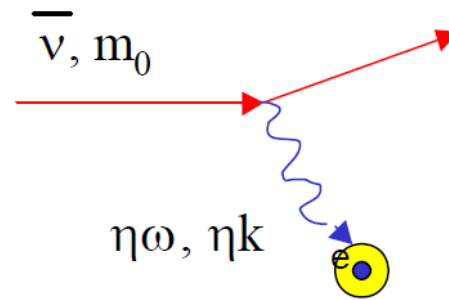
L'alta tensione crea un campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni

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

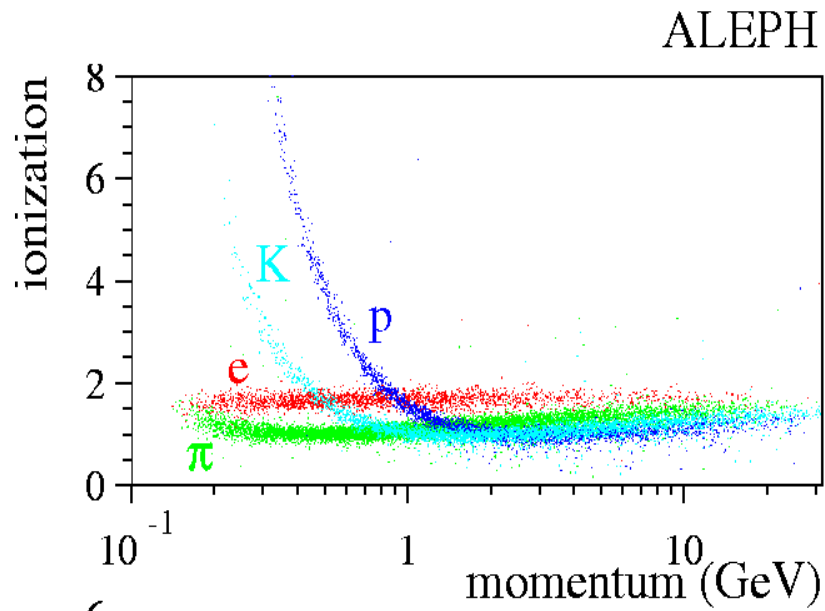
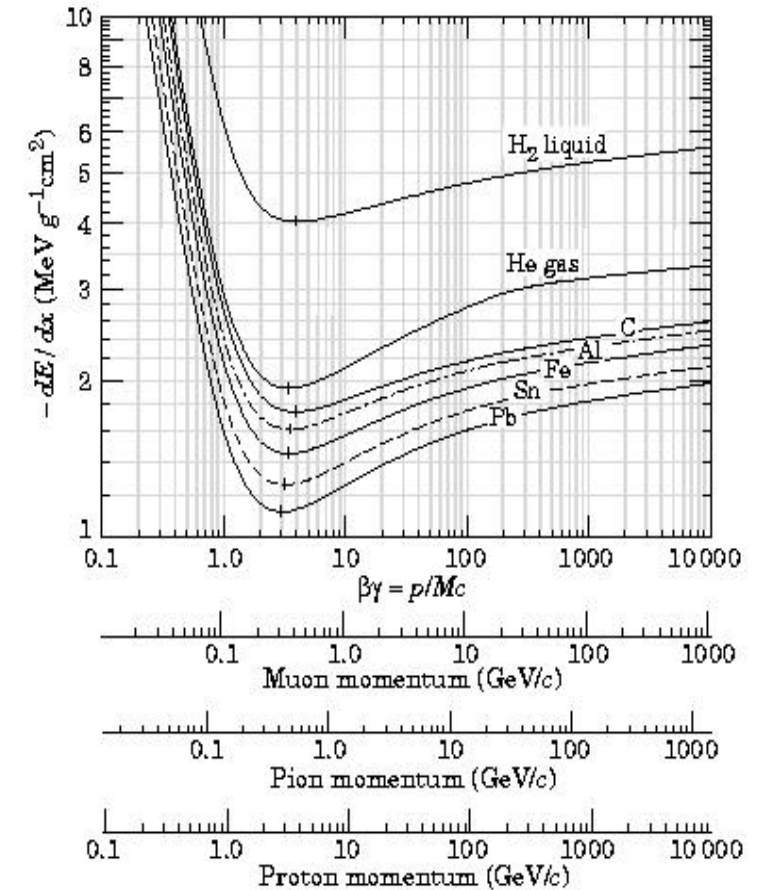


Interazione Radiazione materia_ Particelle Cariche

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



Formula di Bethe-Bloch

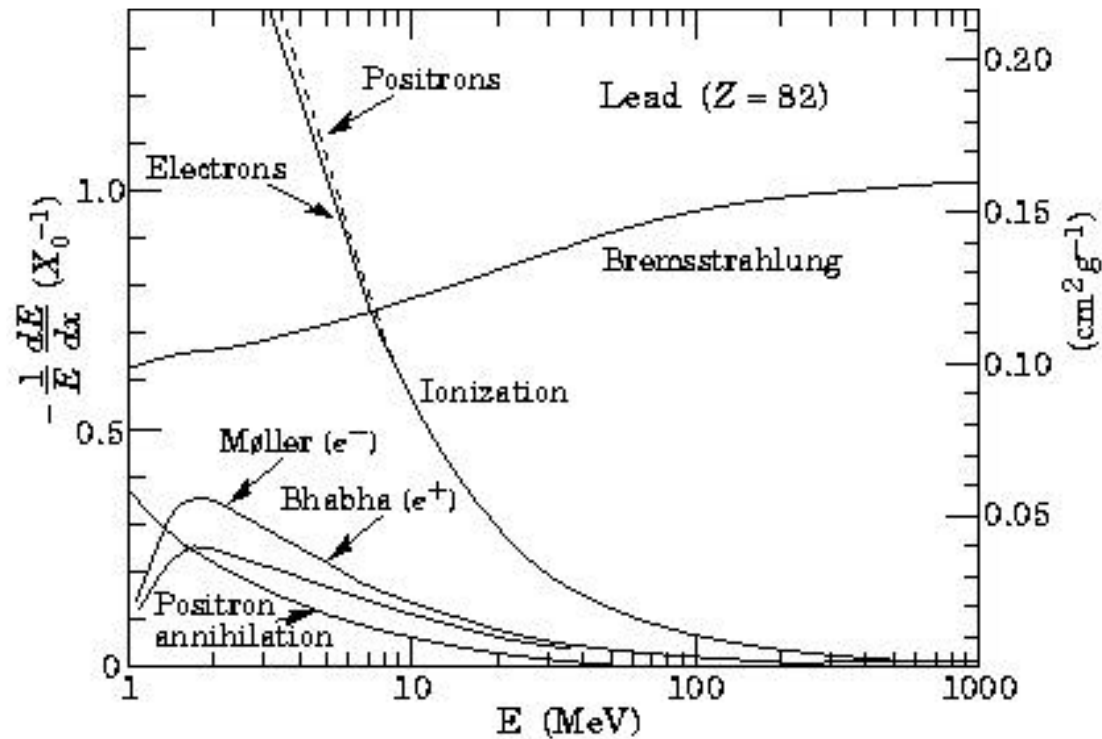
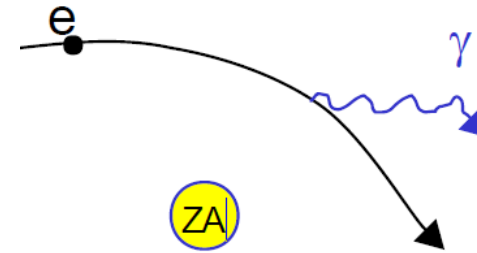


Esprime la perdita di energia per ionizzazione di una particella carica "pesante" ($m \gg m_e$)

Interazione Radiazione Materia_ Elettroni

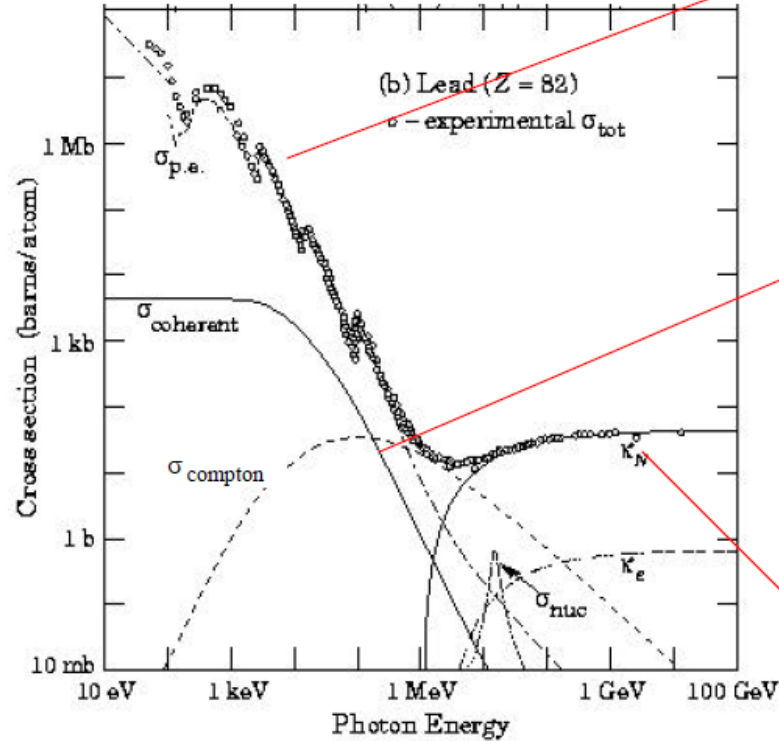
Per energie di elettroni/positroni > 10 MeV
entra in gioco

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**



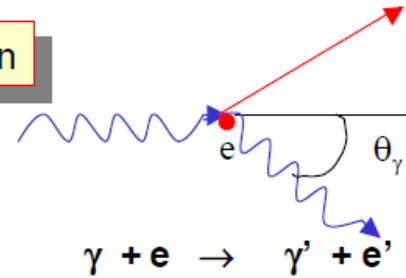
Effetto fotoelettrico



Vengono estratti principalmente elettroni delle shell K

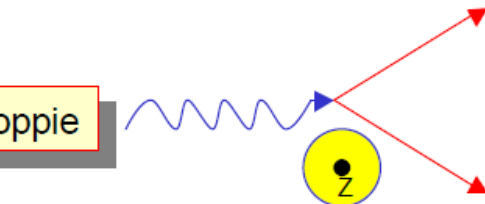
$$\sigma_{\text{foto}} \propto Z^5$$

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



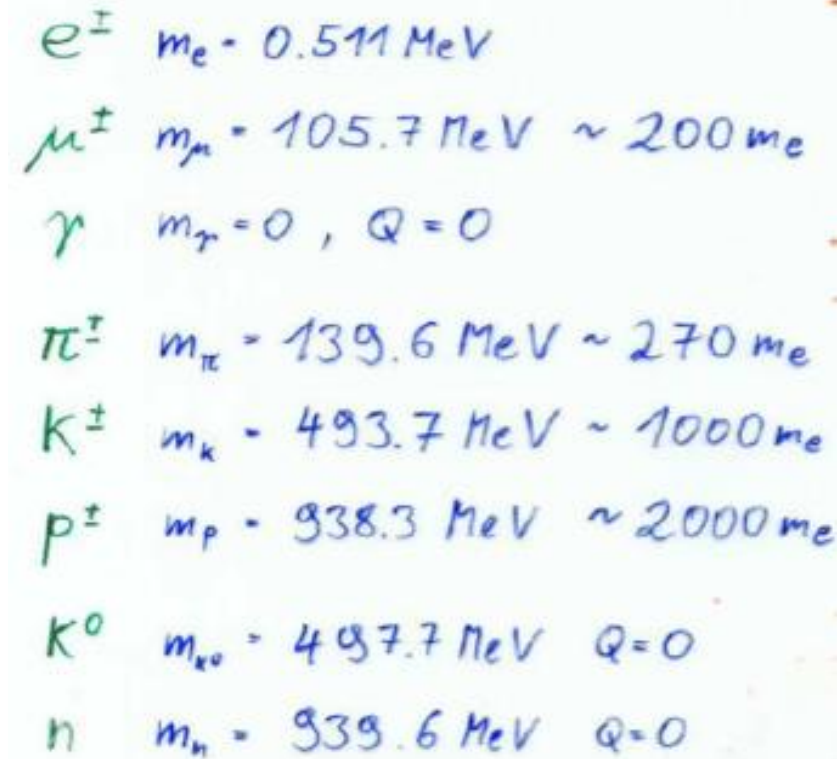
Il rivelatore di particelle _ quali?

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



e^\pm	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$
π^\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

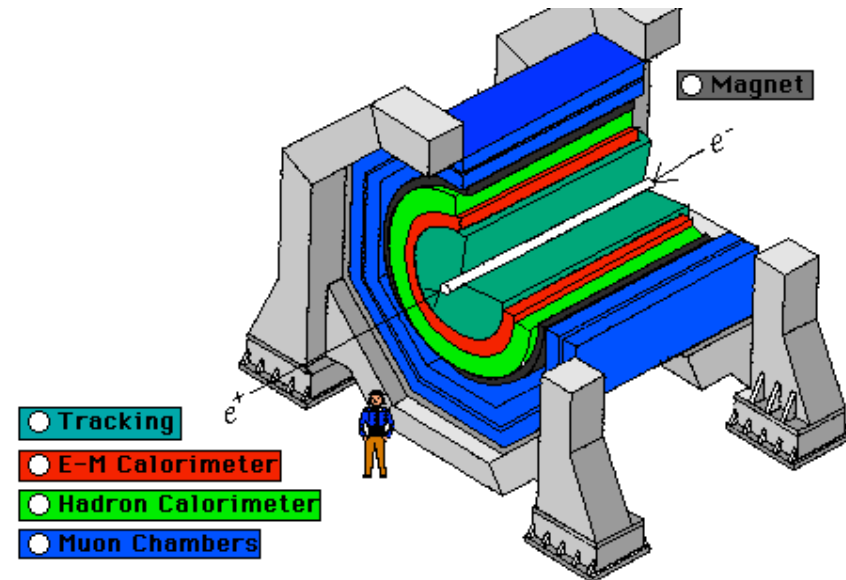
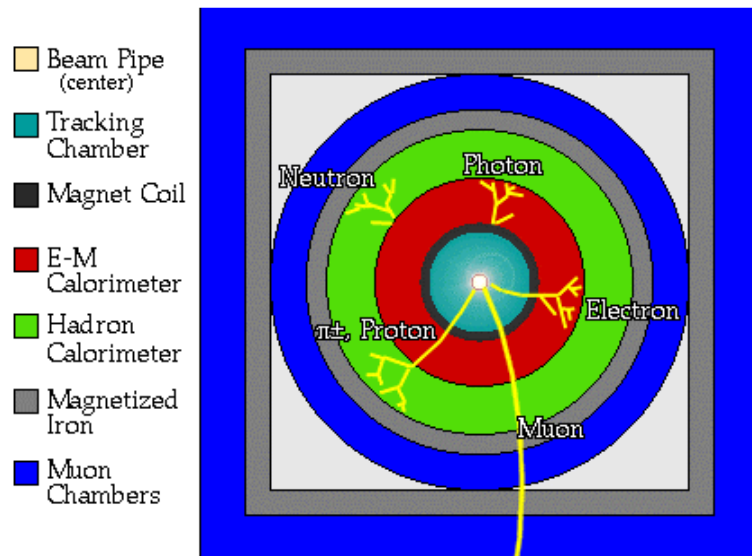
Protoni, Pioni ($\pi^+ \pi^-$), Kaoni ($K^+ K^- K^0$), Neutroni

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

Elettroni e fotoni

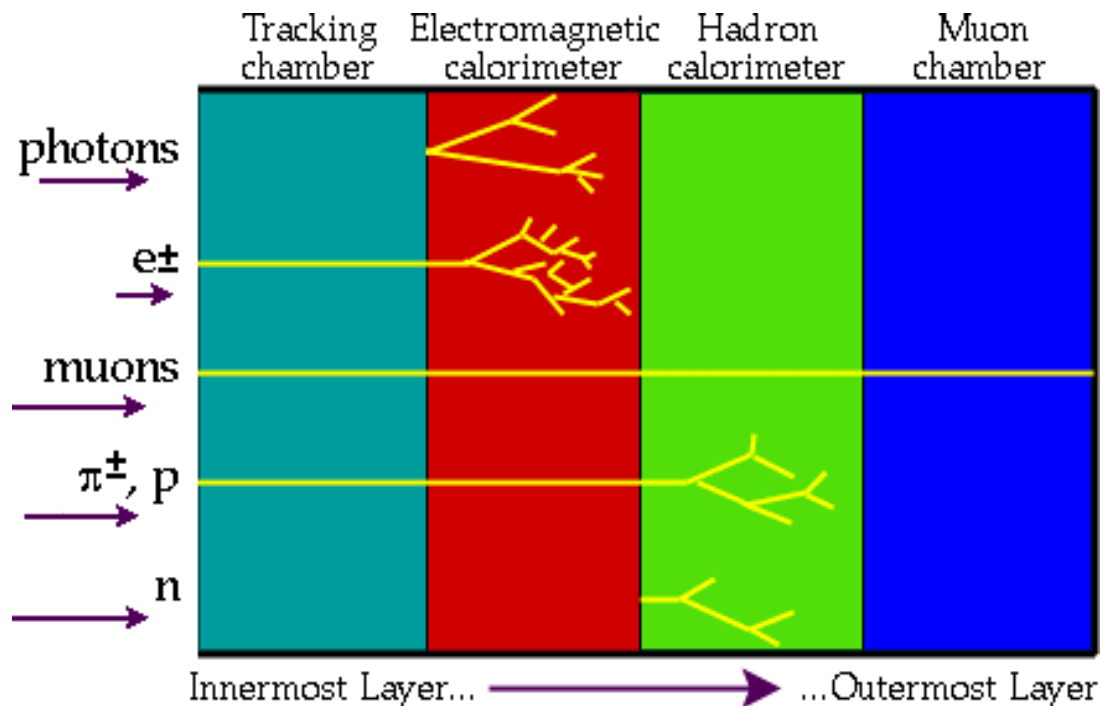
Il rivelatore di particelle – l'Apparato

- 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)!



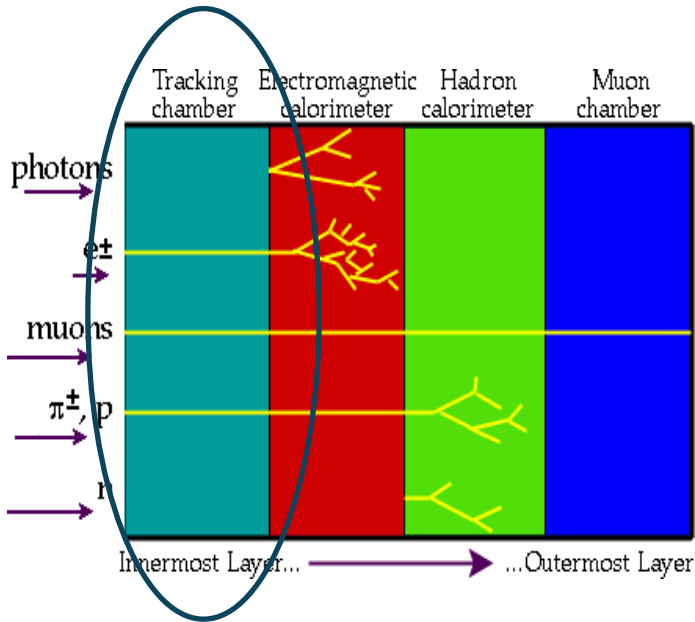
Il rivelatore di particelle – Interazione Radiazione Materia

- 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

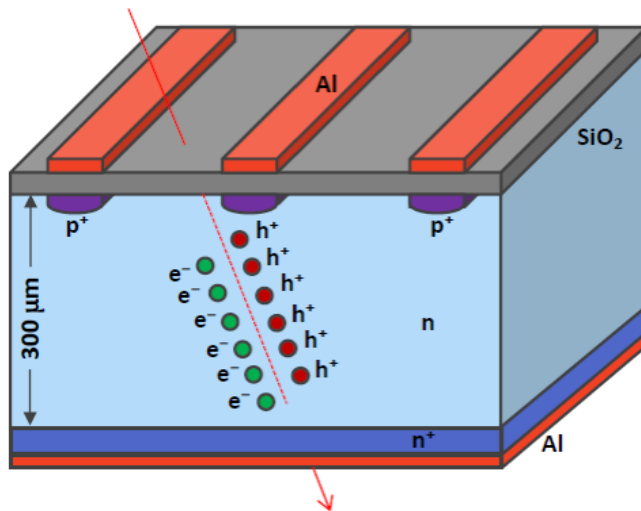
Tracciatori _ Impulso



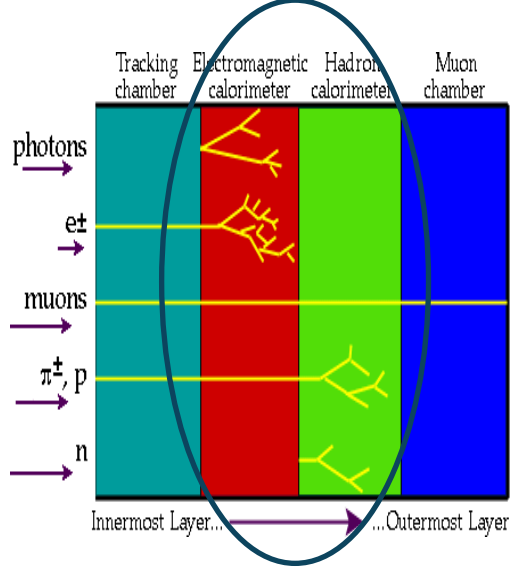
- I tracciatori interni consistono in diversi sistemi concentrici di rivelatori immersi in un **campo magnetico**.
- **Misurano la direzione, il momento e la carica delle particelle elettricamente cariche**

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 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 “distruuttivi”, tutta l'energia viene rilasciata e nessuna particella riesce a oltrepassarli...ad eccezione dei muoni!
- Si dividono in Calorimetri Elettromagnetico per gli sciame elettromagnetici (per particella iniziale elettrone, fotone o positrone) e in Calorimetri Adronici per sciame adronici (se la particella iniziale è un adrone)

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

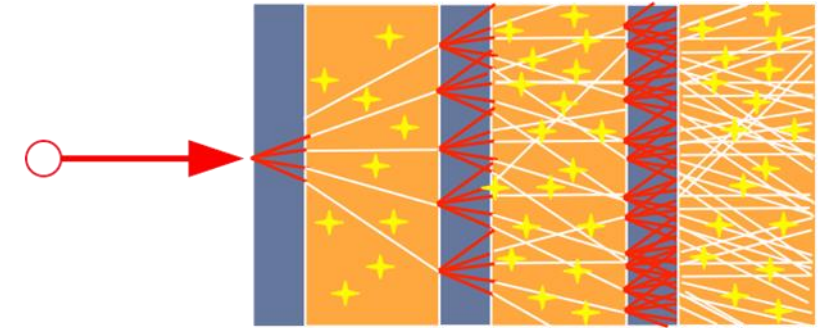
- L'elettrone interagisce principalmente tramite bremsstrahlung -> emissione di un fotone
- Il fotone tramite la produzione di coppie e^+/e^- .

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

- 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, gli sciame 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: $S = kE$



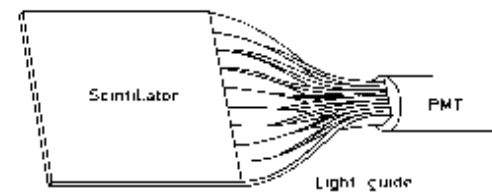
**Particella carica
o neutra**

assorbitore

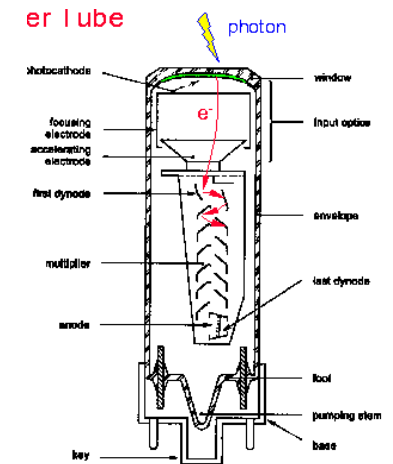
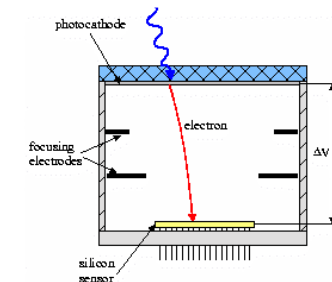
rivelatore

Es: I rivelatori a scintillazione

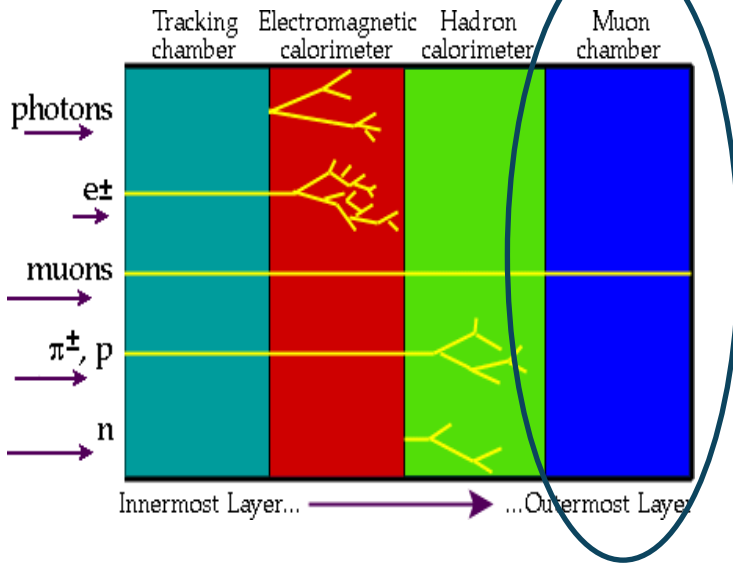
- Un rivelatore a scintillazione converte l'energia rilasciata da un particella ionizzante in luce visibile
- Si tratta di materiali (organici o inorganici) che se eccitati dal rilascio di energia di una particella ionizzante, si diseccitano attraverso emissione di luce nel visibile
- La luce viene trasportata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



adiabatic

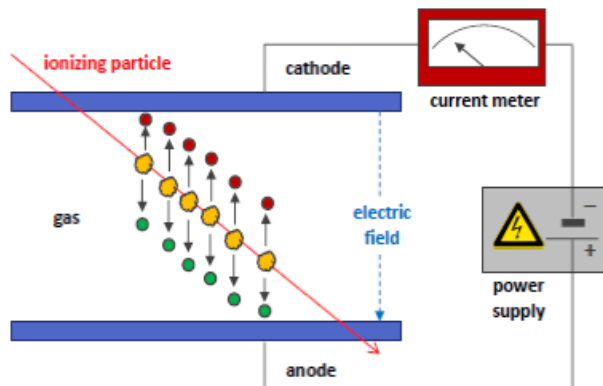


I Rivelatori per muoni _ Trigger



- 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