

INTERNATIONAL



MASTERCLASSES 2022

hands on particle physics

Tecniche Sperimentali in Fisica delle Particelle Elementari

V.Sola

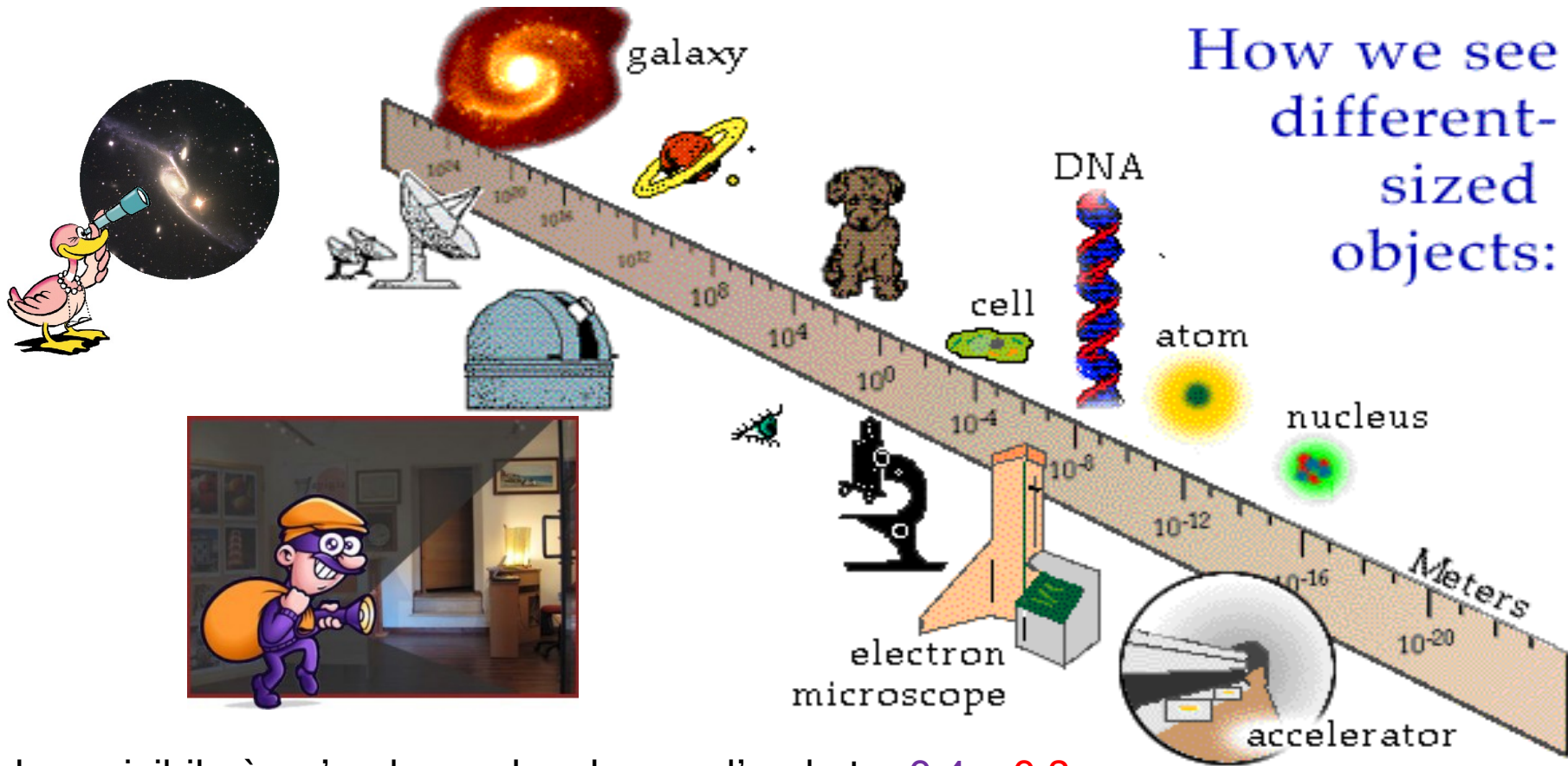
Università degli Studi di Torino e INFN



International Particle
Physics Outreach Group

Come osserviamo gli oggetti?

Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare



How we see
different-
sized
objects:

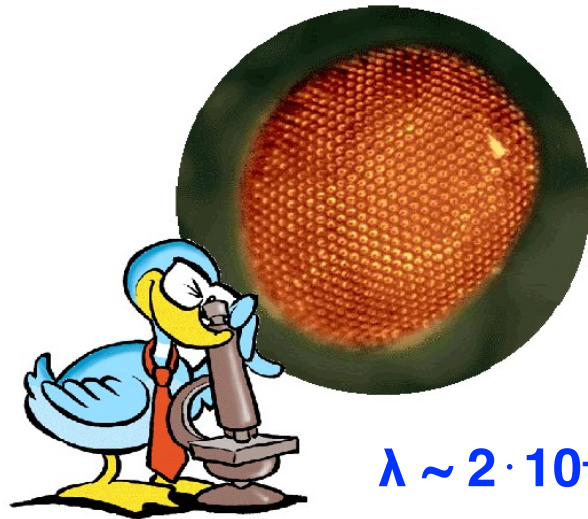
La luce visibile è un'onda con lunghezza d'onda tra $0.4 - 0.8 \mu\text{m}$
quindi può essere usata per osservare oggetti non inferiori al μm

Per osservare oggetti grandi lontani, gli astronomi usano i telescopi

Ma come guardiamo gli oggetti microscopici?

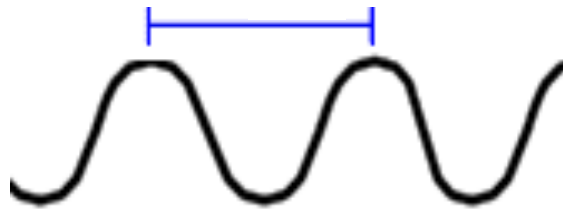
Osservazione degli oggetti microscopici

I **microscopi ottici** ci consentono di ingrandire gli oggetti: possiamo ad esempio osservare particolari di minuscoli insetti



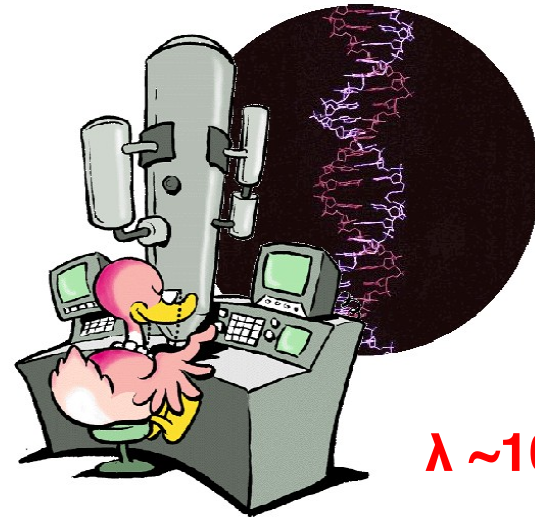
$$\lambda \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

λ = potere risolutivo

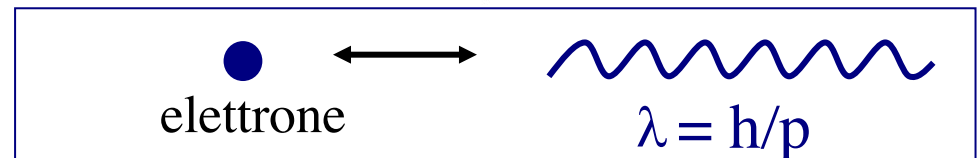


I **microscopi ad elettroni** ci consentono di osservare oggetti ancora più piccoli, fino al livello della struttura atomica

Usano piccoli fasci di **elettroni** come sonda

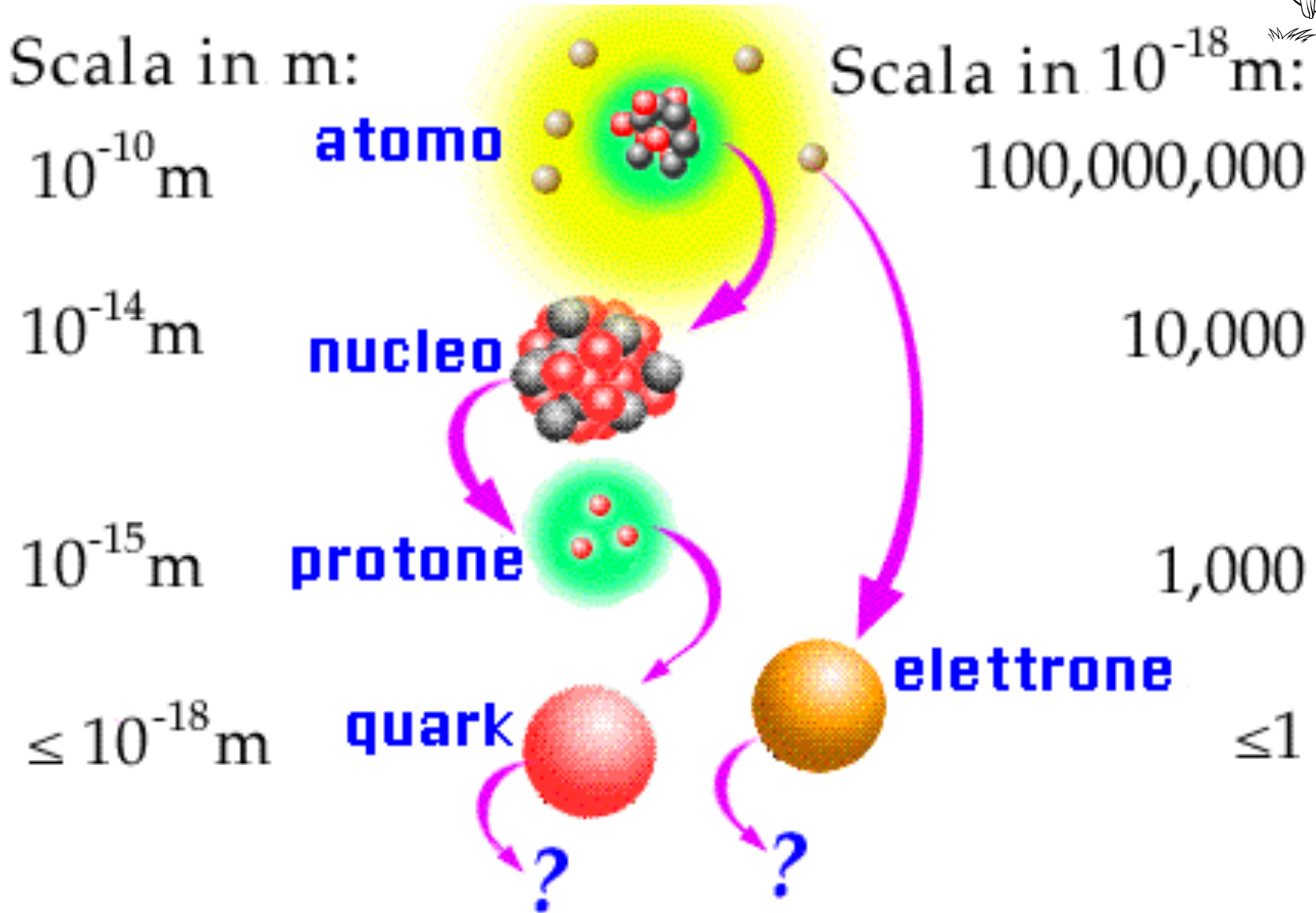


$$\lambda \sim 10^{-12} \text{ m}$$

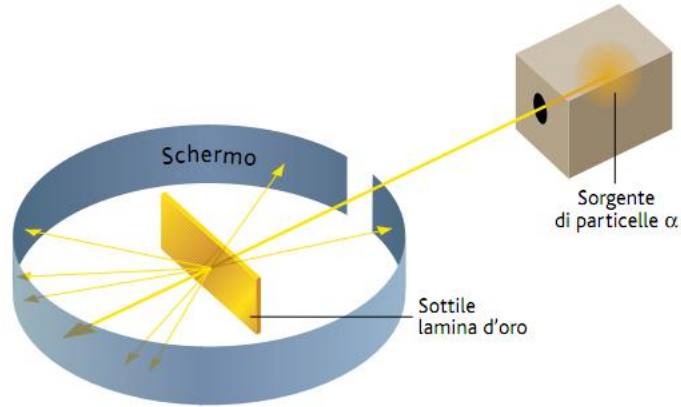
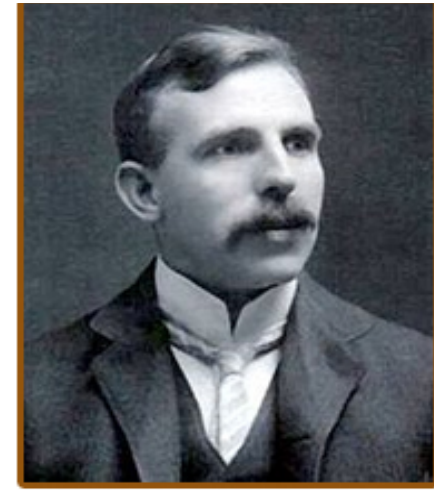


Tanto più la lunghezza d'onda è piccola (ovvero tanto più l'energia è grande) tanto più piccole sono le dimensioni che possiamo esplorare

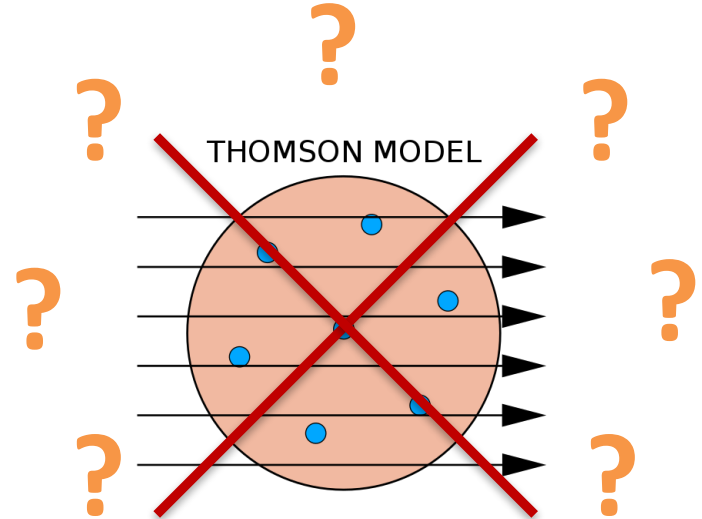
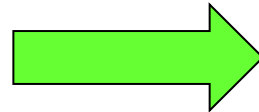
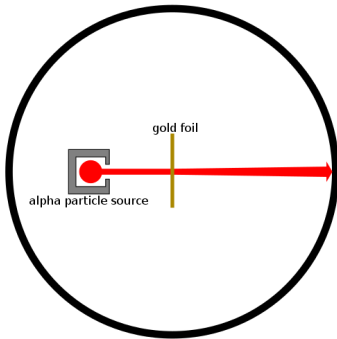
Verso L'infinitamente piccolo



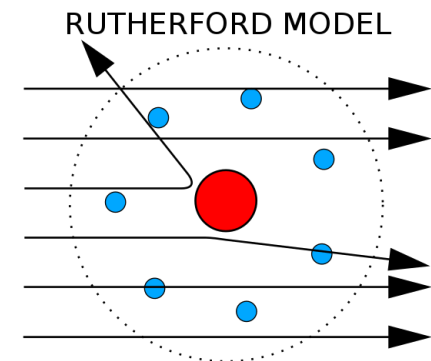
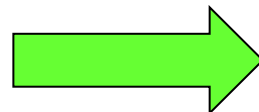
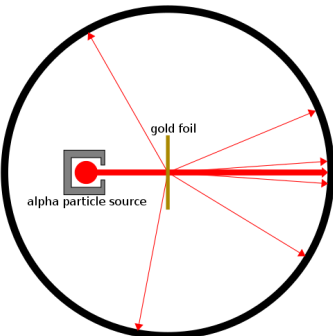
Esperimento di Rutherford (1911)



Risultato atteso:



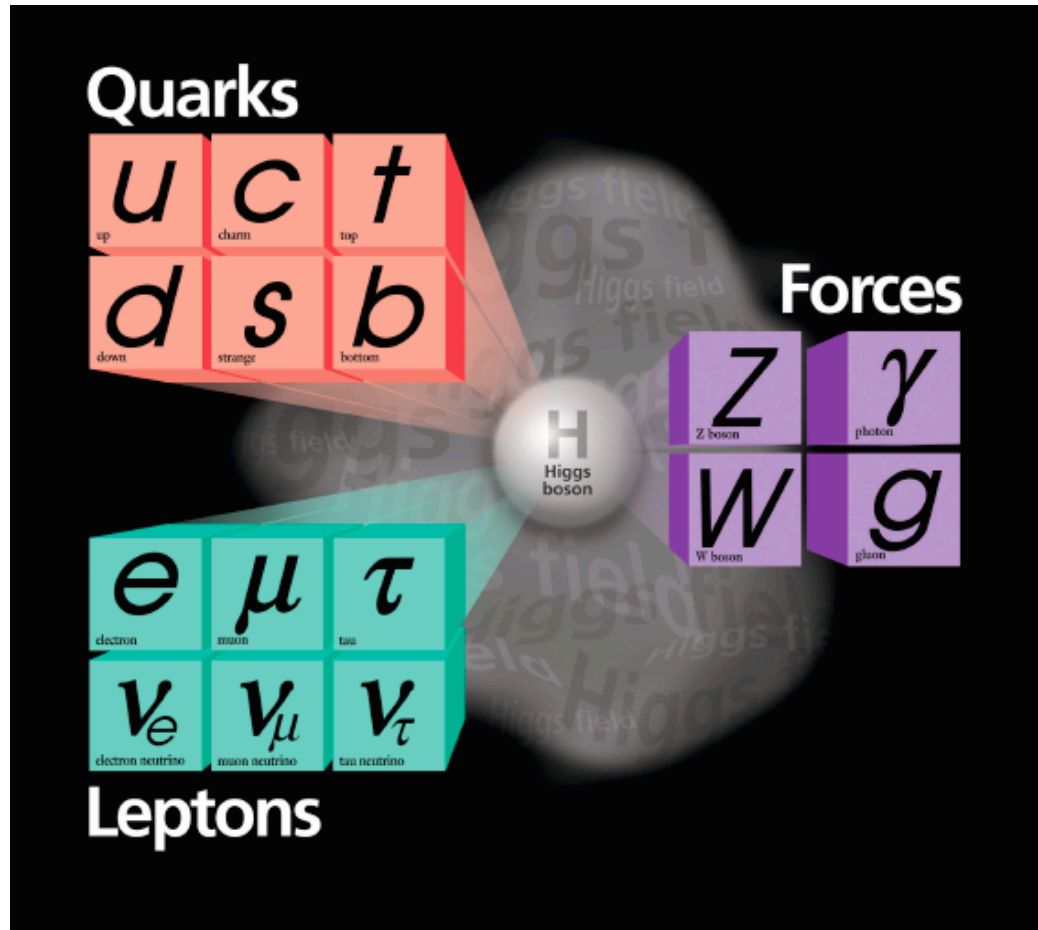
Risultato osservato:



Le particelle che vogliamo 'osservare'

I costituenti fondamentali del Modello Standard delle particelle

Costituenti
della materia:
quark & leptoni



Quattro forze
fondamentali

⇒ Occorrono microscopi sempre più potenti per poter esplorare distanze sempre più piccole ($\sim 10^{-18}$ m)

IL MICROSCOPIO CON PIÙ ALTA RISOLUZIONE



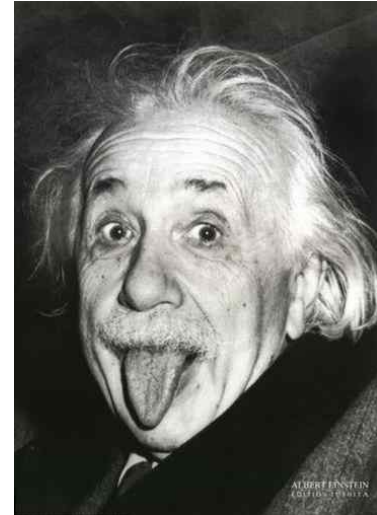
The Large Hadron Collider is the world's largest and most powerful particle accelerator (Image: CERN)

Per esplorare il microcosmo utilizziamo gli

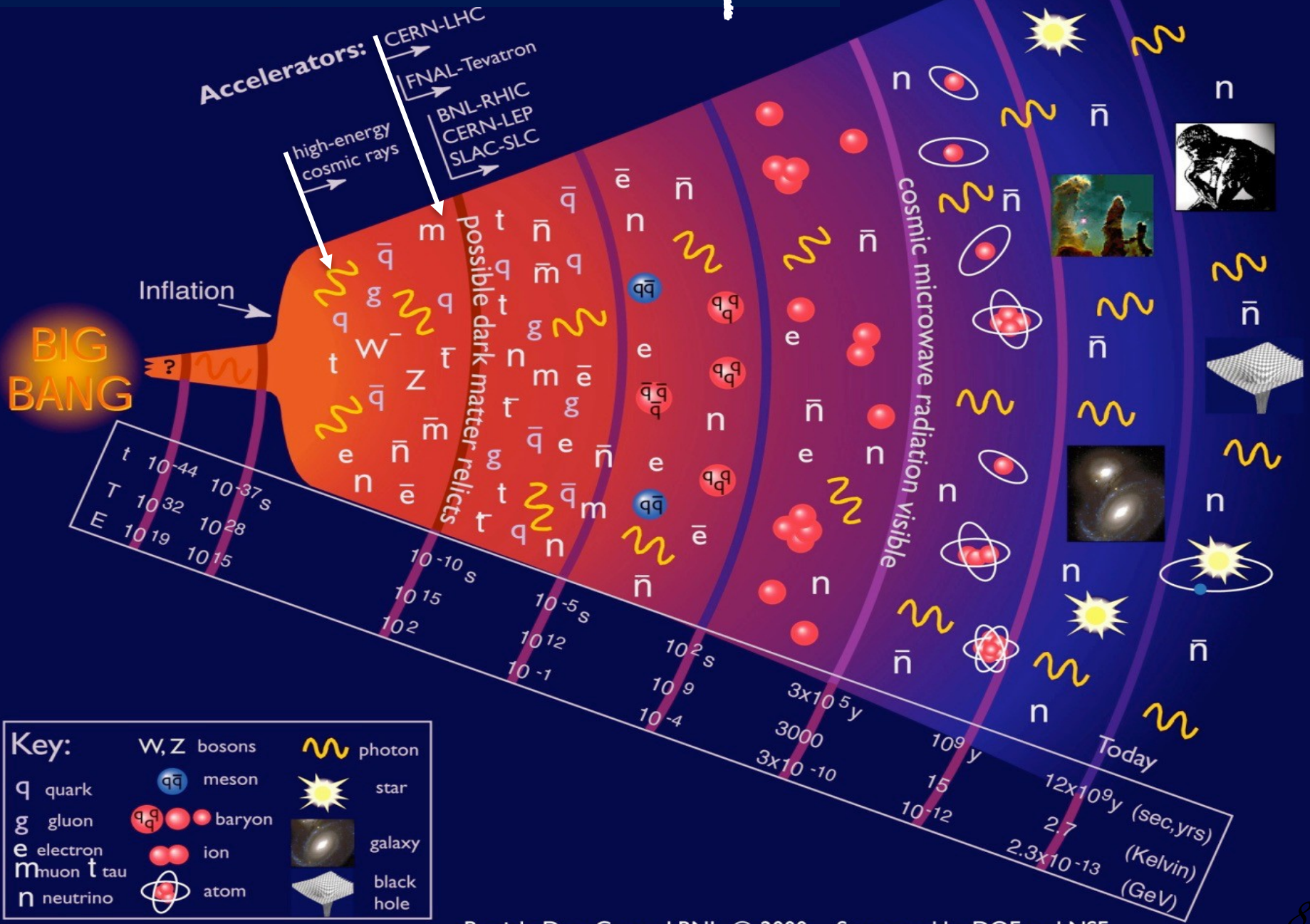
ACCELERATORI DI PARTICELLE

Perché gli acceleratori di particelle?

1. Per disporre di una radiazione di lunghezza d'onda sufficiente all'esplorazione della materia su distanze sempre minori
 $\lambda = hc/E$ se $E \sim 10\text{TeV} \rightarrow \lambda \sim 10^{-19} \text{ m}$
2. Per disporre dell'energia necessaria a **produrre** particelle pesanti instabili, non presenti nella materia ordinaria
→ **equivalenza fra massa e energia**
3. Per fare un viaggio **indietro nel tempo**

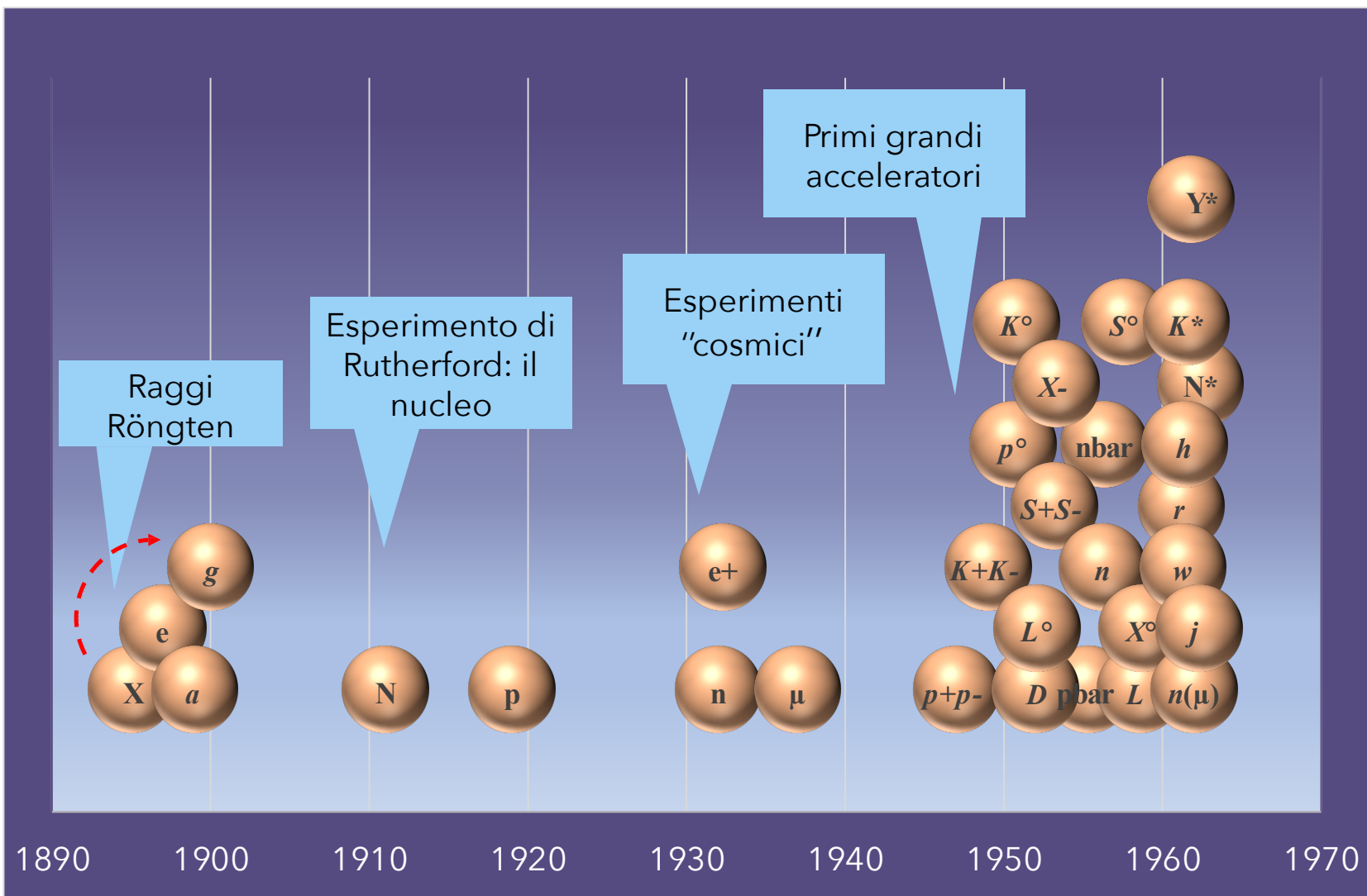


La macchina del tempo





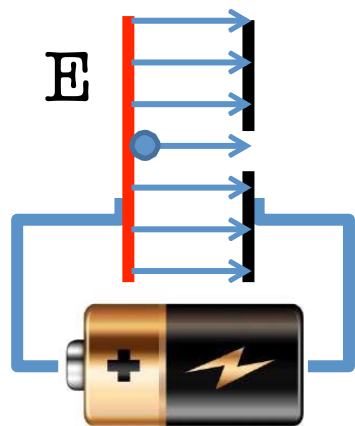
La scoperta di nuove particelle



... e molte altre scoperte negli anni successivi

Accelerare le particelle Campo elettrico

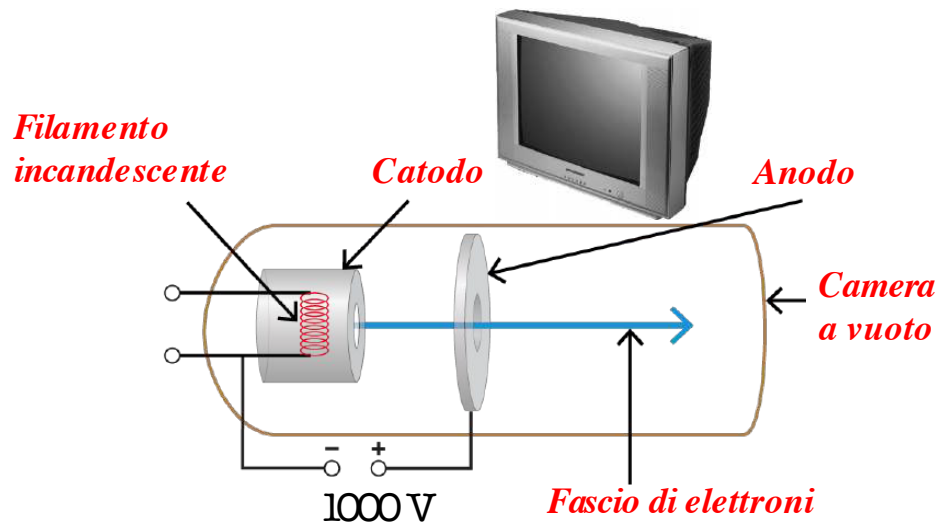
Le particelle vengono accelerate attraverso l'utilizzo di campi elettrici



1 V

$10^9 - 10^{10}$ V

Guadagno
di energia
 $\propto ddp$ [V]



10^5 V



220 V

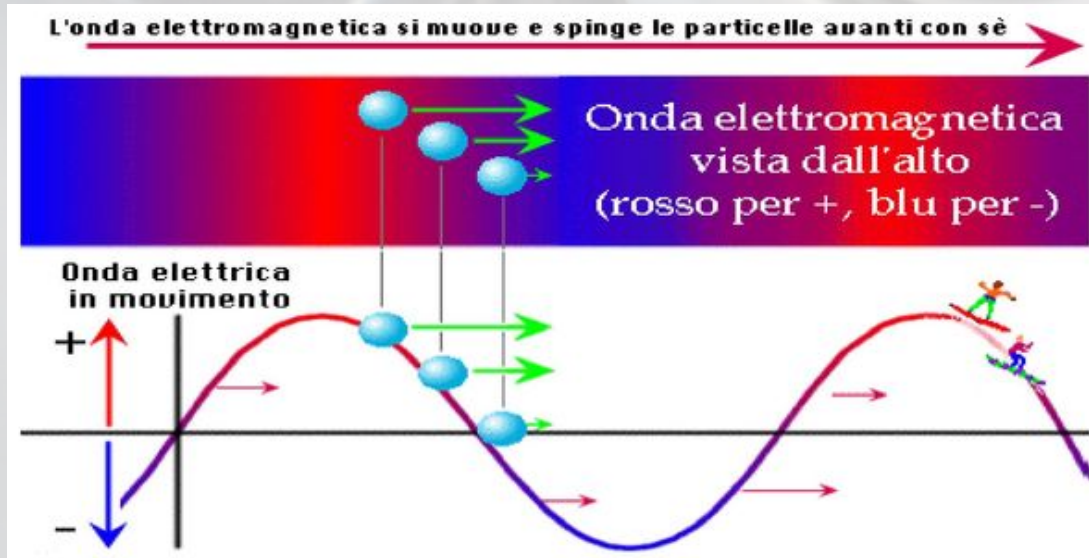
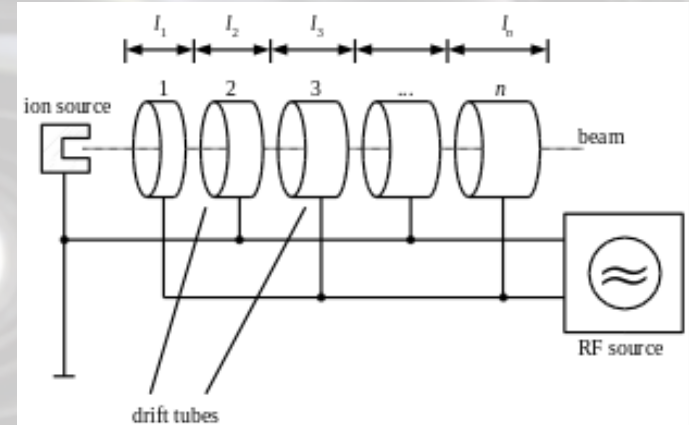


Le cavità a radiofrequenza

Al posto di un campo elettrico statico si applica un campo oscillante (Wideroe, 1927) con frequenza opportuna tale che la fase cambi di π durante il tempo di volo fra due gap successivi

La struttura accelerante consiste in una cavità risonante in cui viene accumulata l'energia di campi elettrici RF

La struttura deve essere tale che il campo elettrico oscillante sia sincronizzato con il fascio di particelle



La forza di Lorentza

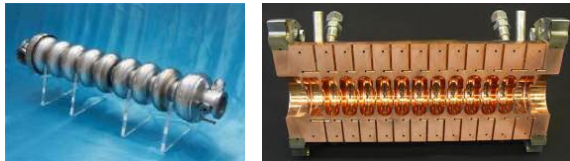
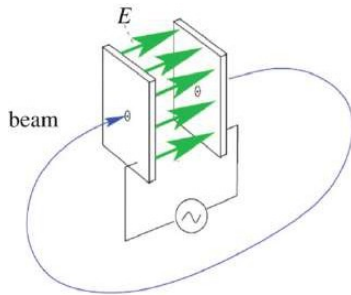
Accelerazione e focalizzazione

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



ACCELERAZIONE

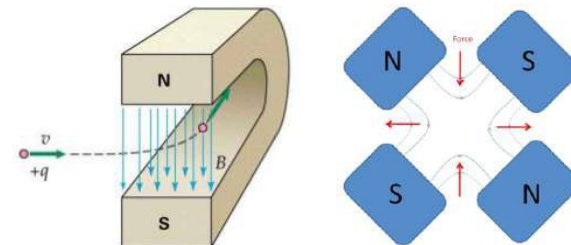
Per accelerare è necessaria una forza nella direzione del moto



Dinamica longitudinale

CURVATURA & FOCALIZZAZIONE

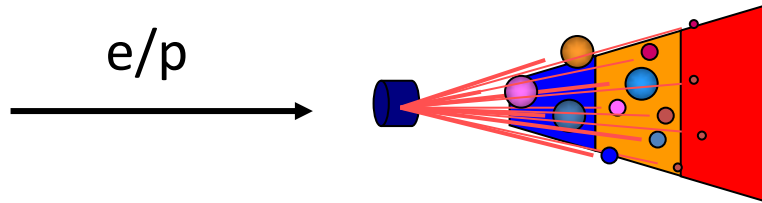
Il secondo termine è sempre perpendicolare al moto, non c'è incremento di energia



Dinamica trasversa

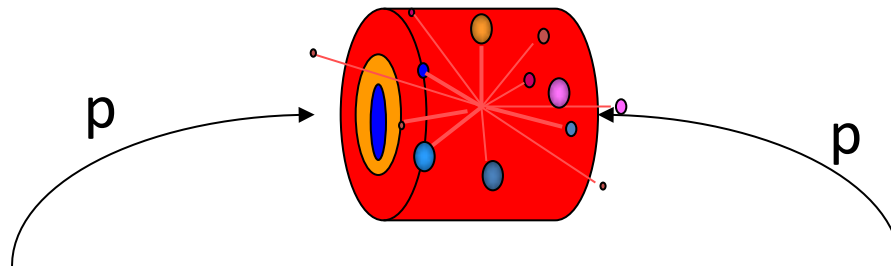
Targhetta fissa o collisore?

Se acceleriamo particelle e le facciamo scontrare contro un bersaglio fisso



Molta dell'energia disponibile 'portata' dalla particella viene persa nel rinculo del bersaglio

Se invece acceleriamo due particelle e le facciamo scontrare, tutta l'energia di entrambe è a disposizione per essere trasformata in massa



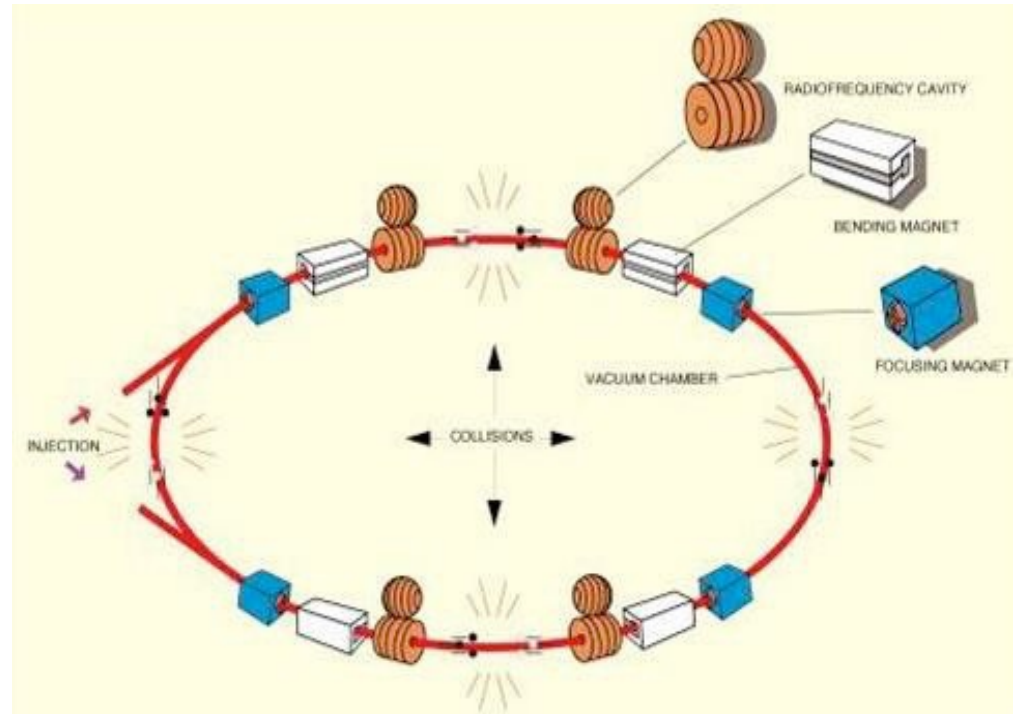
Collisori

Due fasci di particelle viaggiano in direzioni opposte all'interno di tubi a vuoto

Le particelle viaggiano raggruppate in pacchetti (bunches) ciascuno composto da circa 10^{11} particelle

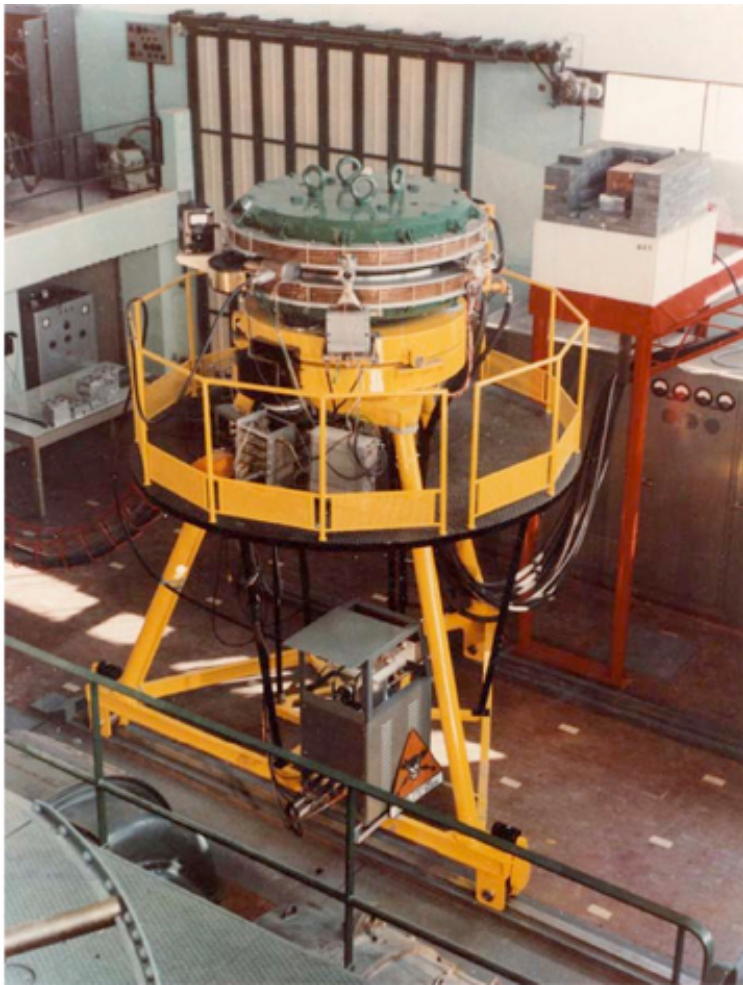
Accelerazione, curvatura e foccheggiamento sono effettuati per mezzo di elementi magnetici diversi lungo l'anello

I pacchetti vengono fatti incrociare tra di loro in uno a più punti e le particelle collidono



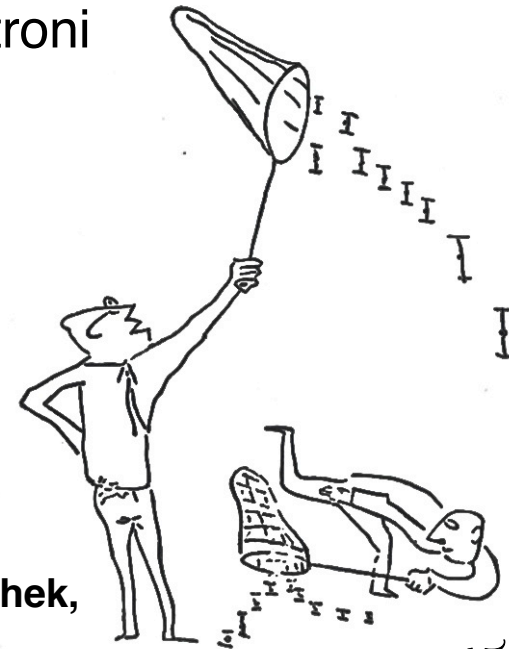
Italia - Una grande protagonista

1960 Laboratori di Frascati: progettato e realizzato prototipo di una macchina di concezione assolutamente nuova (Bruno Touschek)



AdA (Anello di Accumulazione)

per la prima volta circolarono per poi collidere frontalmente un fascio di elettroni e uno delle loro antiparticelle, i positroni



"Catching data"
disegno di Bruno Touschek,
probabilmente 1974

IL Large Hadron Collider

È il più grande acceleratore di particelle al mondo
Accelera 2 fasci di protoni ognuno ad un'energia di
 $7 \text{ TeV} = 7 \text{ Tera eV} = 7\,000\,000\,000\,000 \text{ eV}$



↓
VELOCITÀ !

I protoni raggiungono
quasi la velocità della luce:
circa $c - 10 \text{ km/h}$
 $c = 299782 \text{ km/s}$
 $= 1\,080\,000\,000 \text{ km/h}$

... i parametri più importanti per
il funzionamento di LHC ...

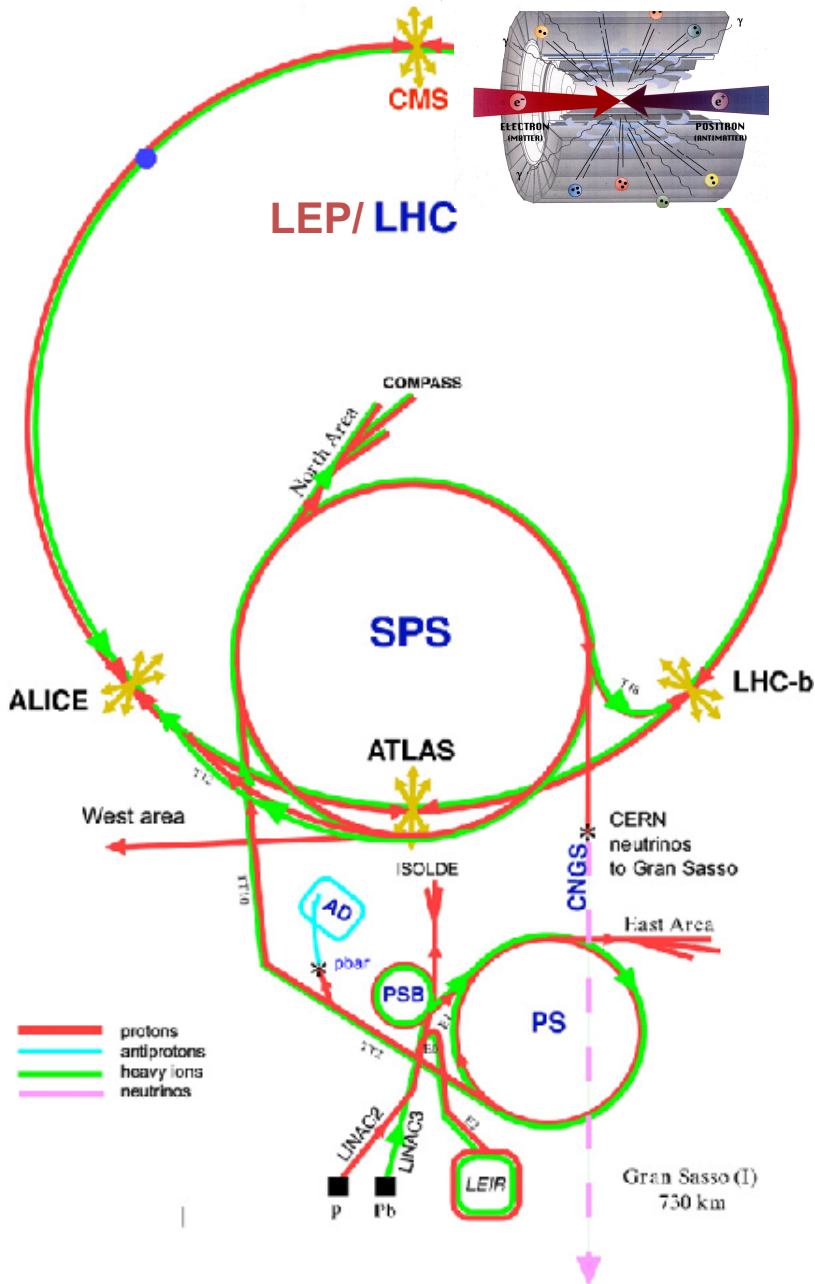
↓
DENSITÀ DI ENERGIA !

I protoni hanno altissima
densità di energia:
 $4.6 \cdot 10^{53} \text{ TeV/m}^3$
 $7.4 \cdot 10^{46} \text{ J/m}^3$

Perché le facciamo collidere a energia sempre più alta?

- diminuisce la lunghezza che possiamo studiare
- aumenta la nuova materia che possiamo creare

La catena di accelerazione @ CERN



24-Nov-1959: **PS** (Proton Synchrotron)
Funziona tutt'oggi! Accelera e^- , e^+ , p , \bar{p}

27-Gen-1965: **ISR** (Intersecting Storage Ring)
Prima collisione al mondo protone-protone

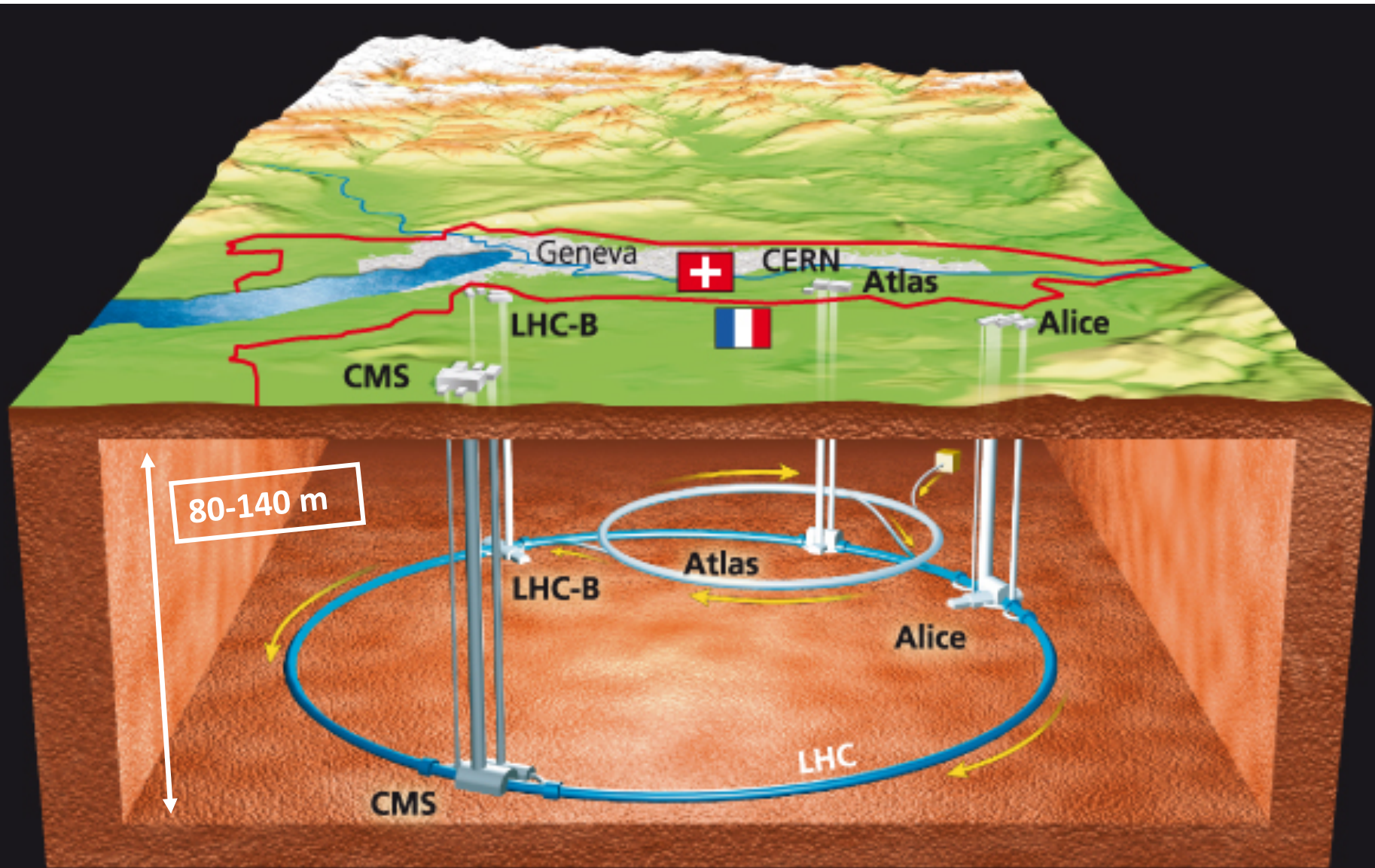
1979: **SPS** (Super Proton Synchrotron) (~7 km)

1983: SPS → **SppS**:
Prima collisione al mondo protoni-antiprotoni
Premio Nobel a Rubbia per la scoperta W e Z

1989: **LEP** (Large Electron Collider) (~27 km)
Accelera elettroni-positroni
Dal 1989 al 1995 : $E(e) = 50 \text{ GeV}$
Dal 1995 al 2000 nuove frontiere di energia!
Stop nel 2000 → trionfo del Modello Standard

2008 : **LHC** (Large Hadron Collider)

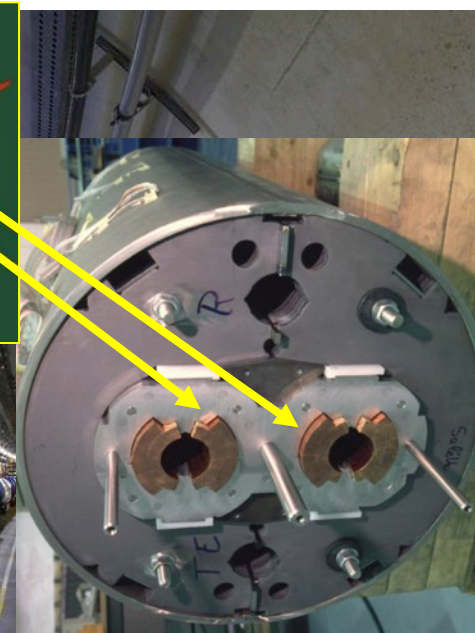
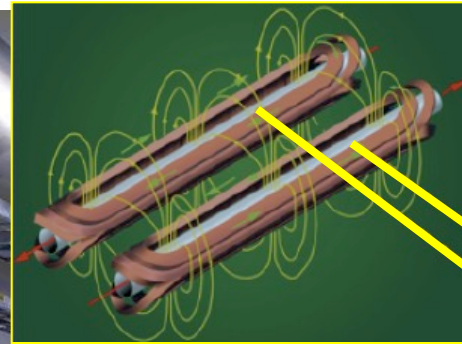
LHC visto dal sottosuolo



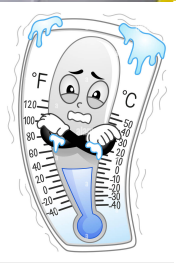
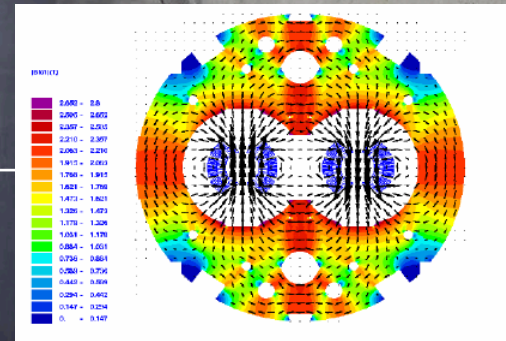
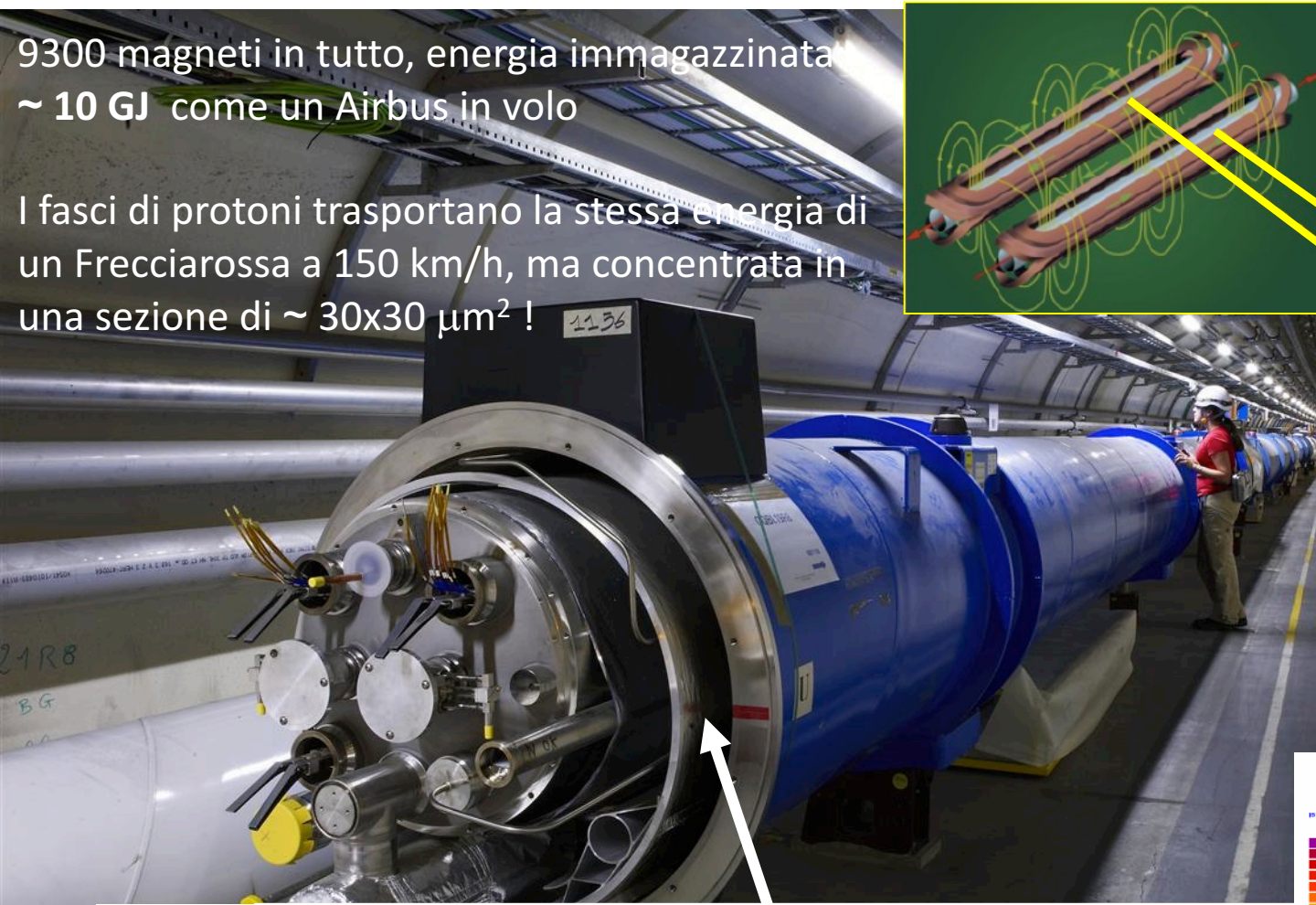
Alta complessità, alta tecnologia

9300 magneti in tutto, energia immagazzinata
 ~ 10 GJ come un Airbus in volo

I fasci di protoni trasportano la stessa energia di
 un Frecciarossa a 150 km/h, ma concentrata in
 una sezione di $\sim 30 \times 30 \mu\text{m}^2$!



11800 Ampère
 $F_x \sim 400$ tonne/m



1232 dipoli principali da 8.4 T ($\sim 200,000 B_{\text{TERRA}}$)

Lavorano a temperatura di 1.9 K (-271.1 °C)

+ 3700 magneti correttori multipoli

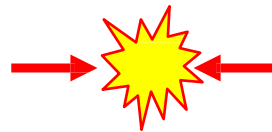
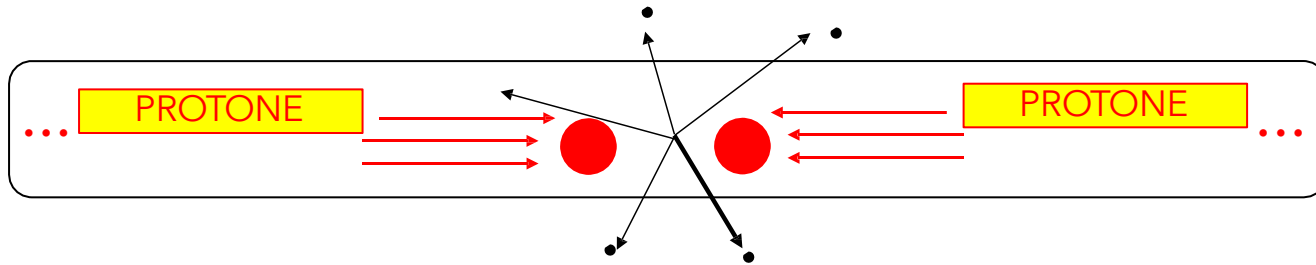
Accelerare e collidere le particelle

Scelta di particelle stabili



Accelerare e collidere le particelle

Accelerazione e scontro



Accelerare e collidere le particelle

Tanti cocci



Accelerare e collidere le particelle

Fisici al lavoro!

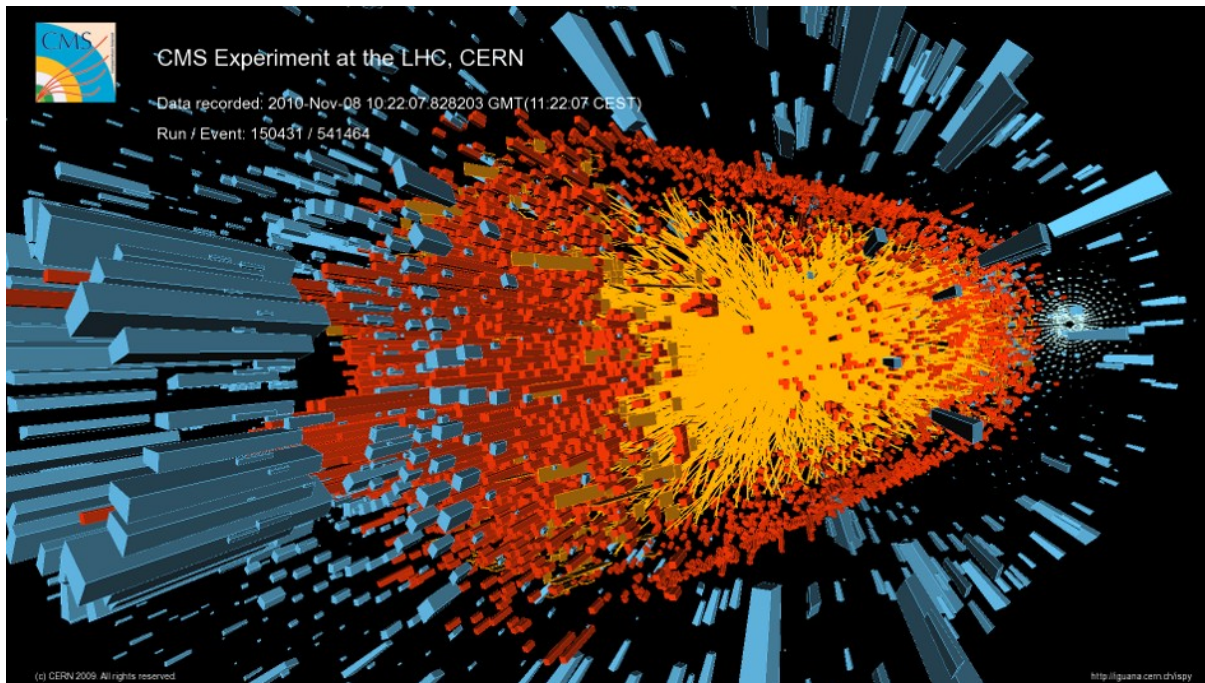


Collisione di particelle @ LHC

Considerando che in LHC:

- ▷ Ci sono 2 Fasci di protoni da 7 TeV
- ▷ Ogni fascio è composto da 2832 pacchetti di protoni
- ▷ Ogni «pacchetto» contiene 10^{11} protoni

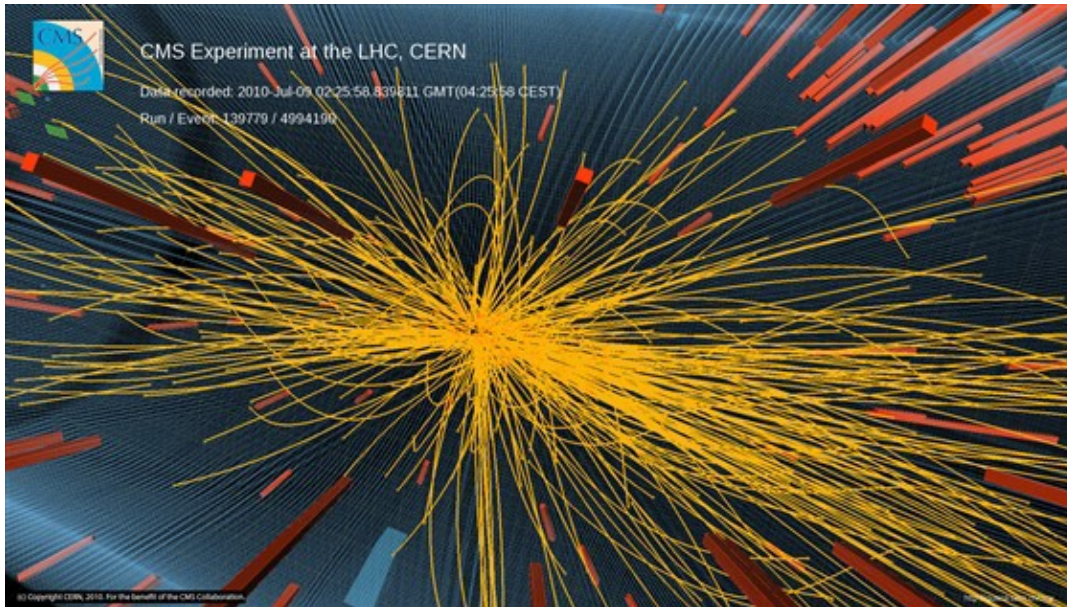
⇒ **Si hanno 40,000,000 interazioni al secondo**



Collisione di particelle @ LHC

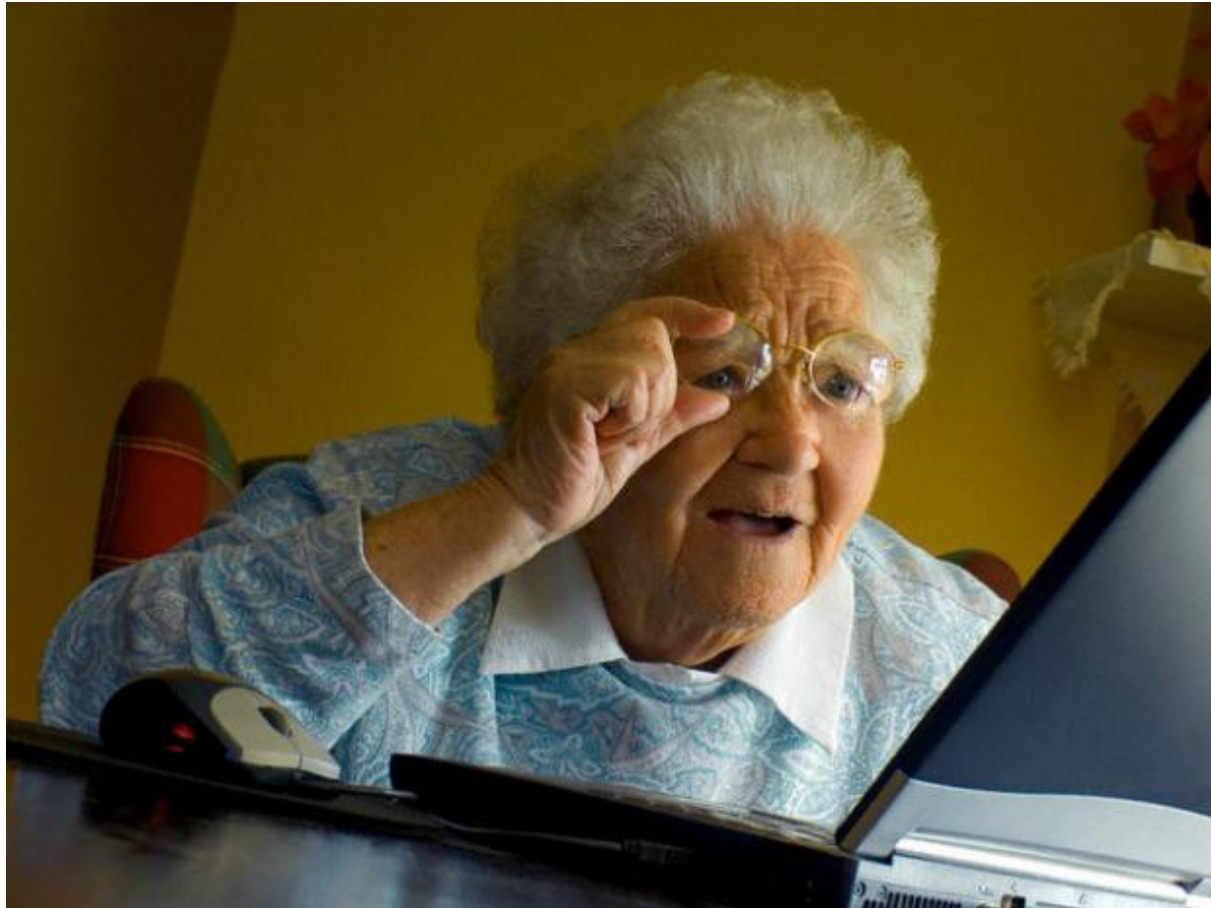
Protoni di LHC: $7,4 \cdot 10^{46} \text{ J/m}^3 = 4,6 \cdot 10^{53} \text{ TeV/m}^3$

Prima e dopo l'urto cambia l'identità delle particelle:
quelle prodotte possono essere molto diverse
da quelle che si scontrano!



Scontro di due protoni
di 7 TeV con produzione
di oltre 100 particelle
cariche

Come si fa a capire
cosa sta succedendo?



Particelle che possiamo rivelare

- ▷ Particelle stabili



- ▷ Particelle quasi stabili, con vita media $> 10^{-10}$ s



$$\tau = 886.8 \text{ s}$$



$$\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$



$$\tau^{\pm} = 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

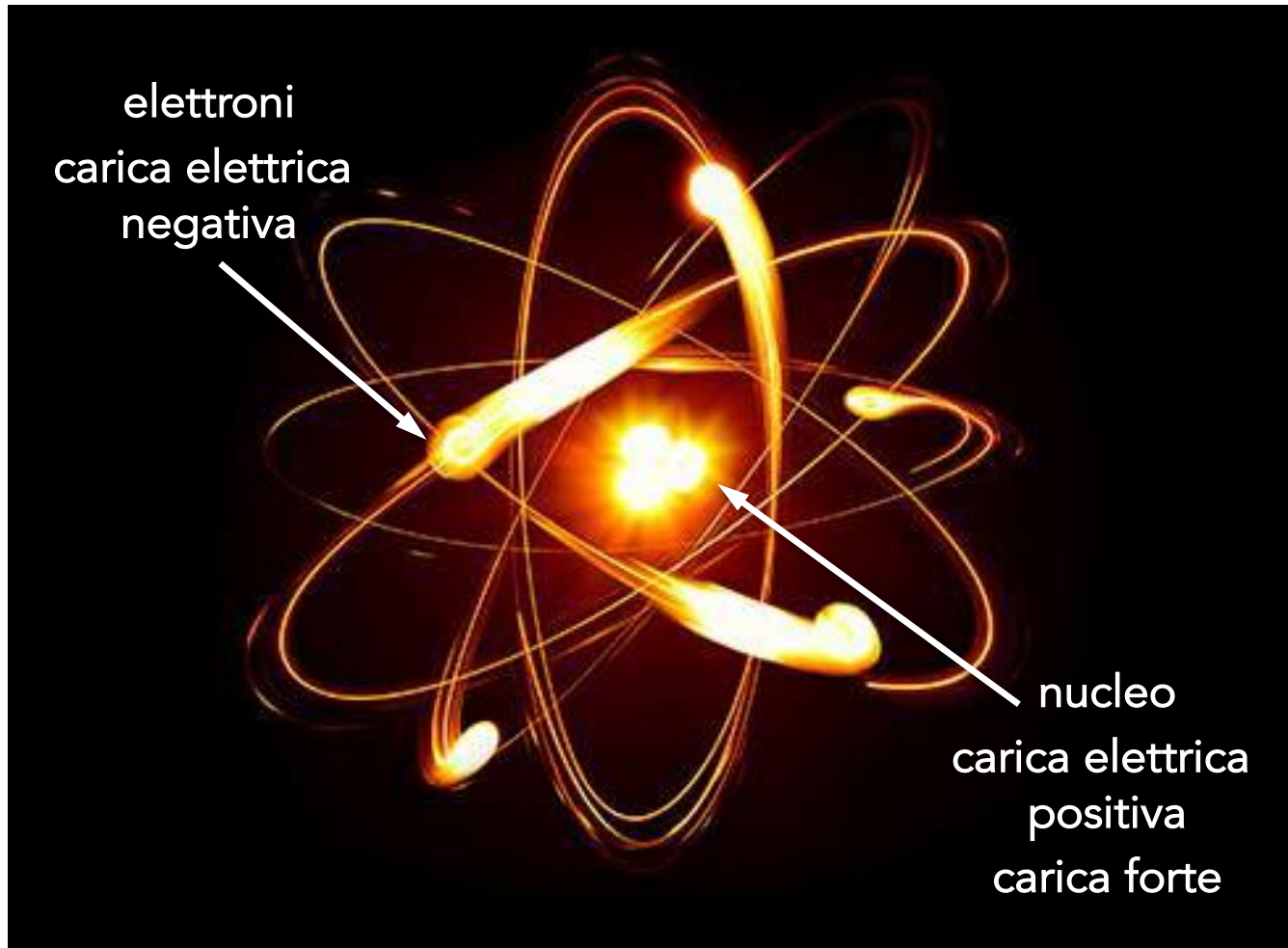


$$\tau = 5 \cdot 10^{-8} - 9 \cdot 10^{-11} \text{ s}$$

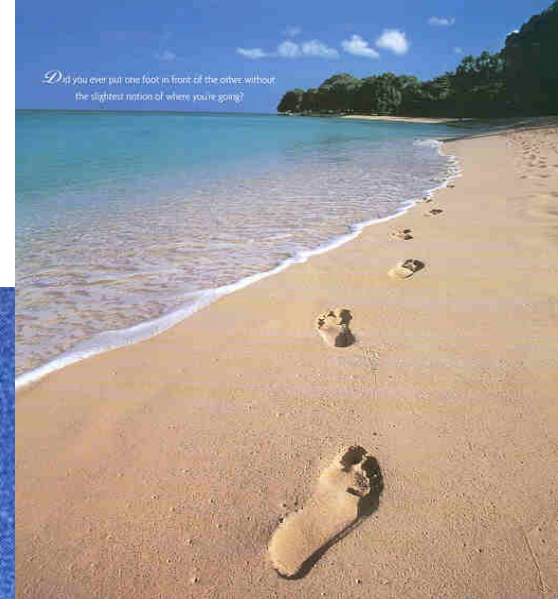
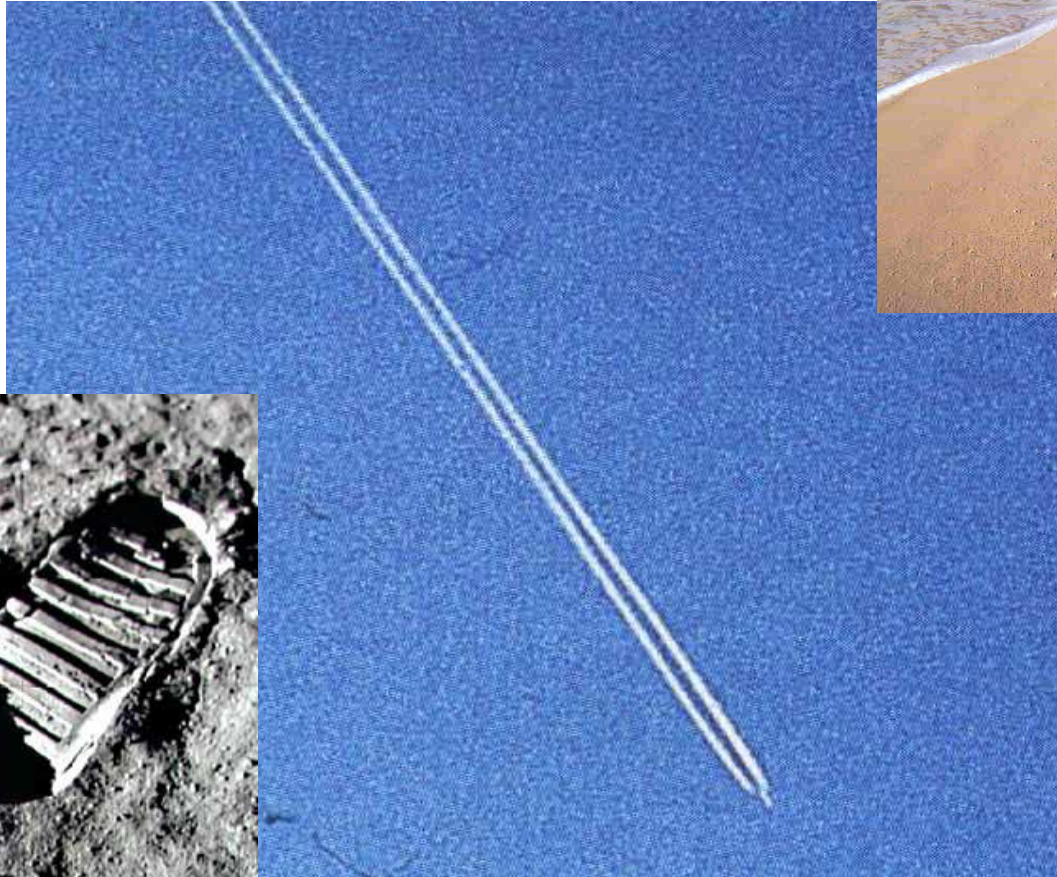
- ▷ Tutte le particelle con vita media $< 10^{-10}$ s decadono prima di poter essere osservate e si identificano attraverso i loro prodotti di decadimento

Interazione radiazione - materia

Tipi diversi di particelle possono interagire con gli elettroni o con il nucleo

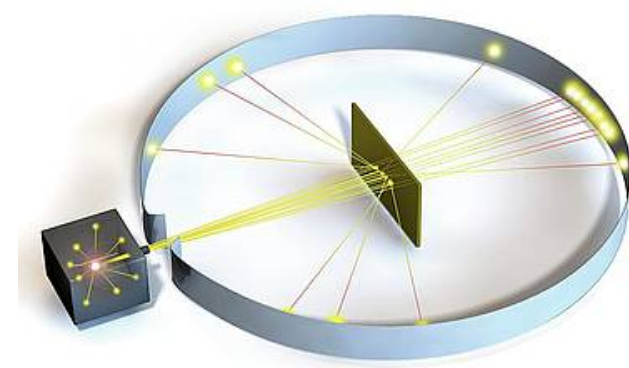


ALLA RICERCA DI TRACCE



La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia

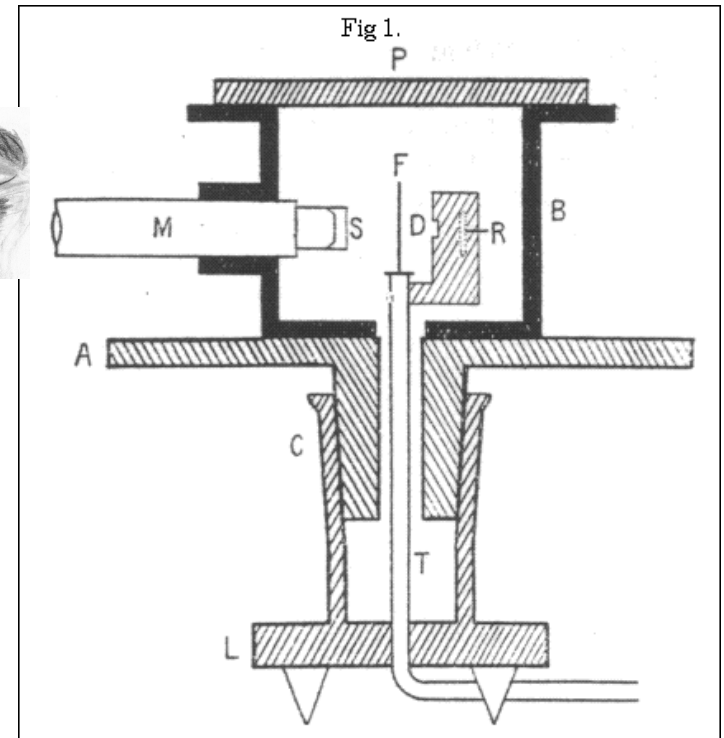
L'occhio umano



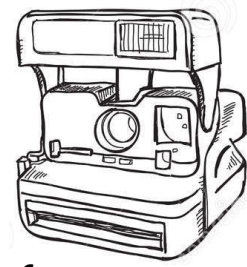
L'esperimento di Rutherford per studiare la struttura dell'atomo fu condotto con l'aiuto di **H. Geiger** e E. Mardsen utilizzando come rivelatore l'occhio umano



... stando seduti al buio finché i loro occhi diventassero sensibili a sufficienza, in seguito avrebbero contato i lampi di luce emessi dallo schermo di solfuro di zinco



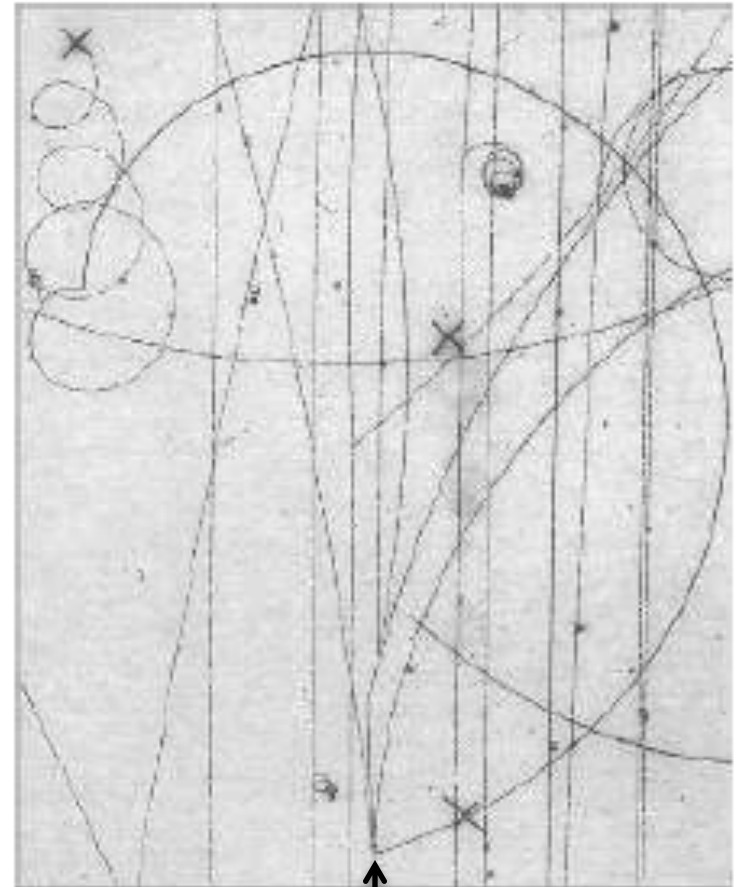
La camera a bolle (1950-80)



CERN – BEBC (1970)

Immersa in un campo magnetico

Al passaggio delle particelle si faceva una foto per capire quanto era accaduto



urto

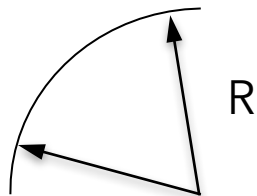
Misura della carica e della quantità di moto

Dalla curvatura di una particella carica in un campo magnetico → Forza di Lorentz

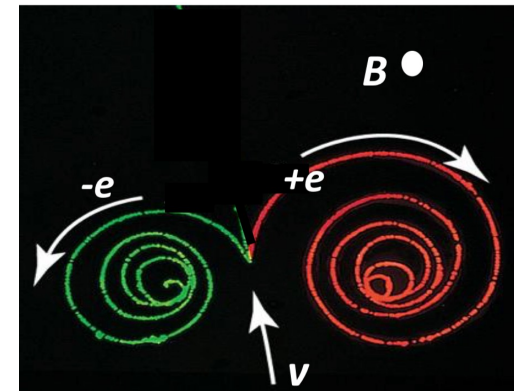
⇒ La traiettoria segue un arco di circonferenza dal raggio di curvatura si può ricavare

$$p = mv = qBR$$

dal verso di curvatura è anche possibile capire la carica

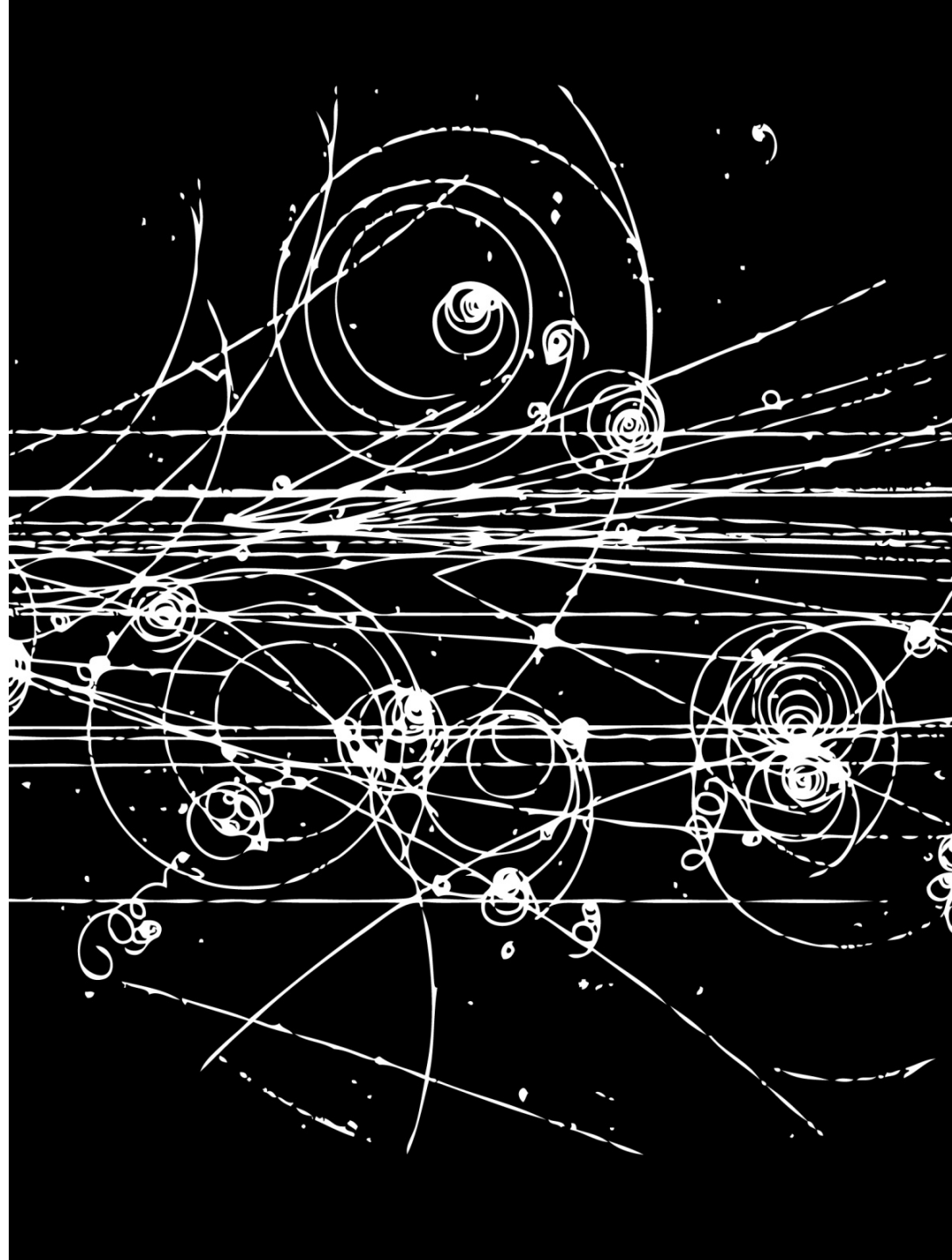


EVENTO IN UNA CAMERA A BOLLE

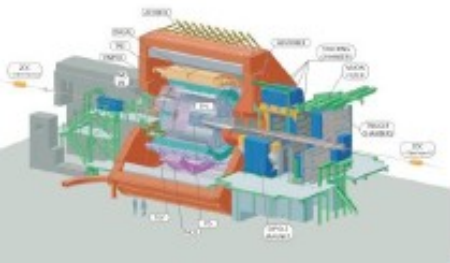


Le tracce di un elettrone (e^-) ed un positrone (e^+) generate dalla collisione di un fotone con gli atomi di idrogeno

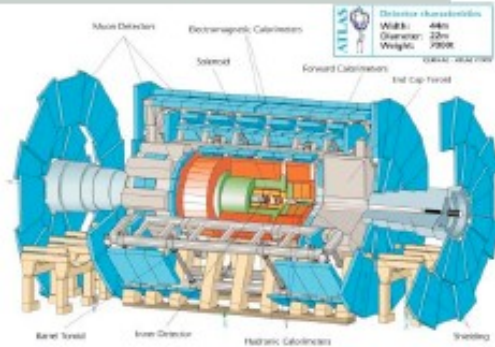
Esempio di fotogramma



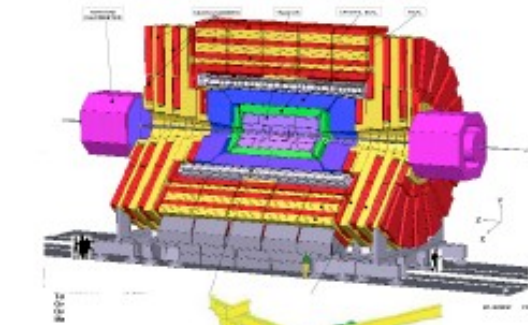
I rivelatori @ LHC



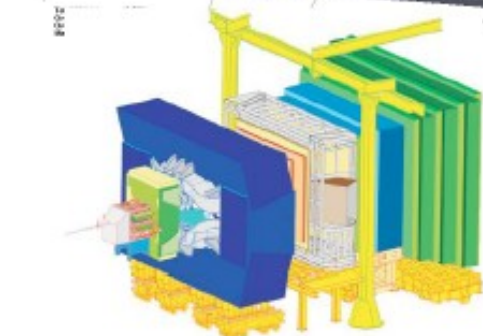
ALICE



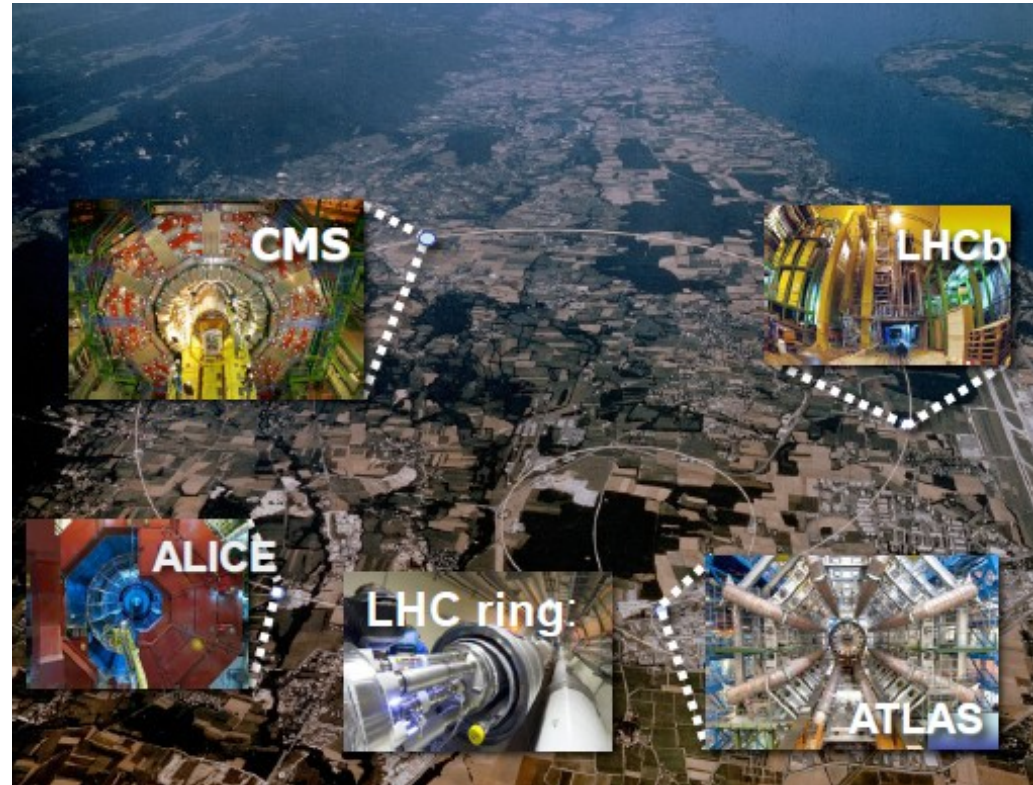
ATLAS



CMS



LHCb

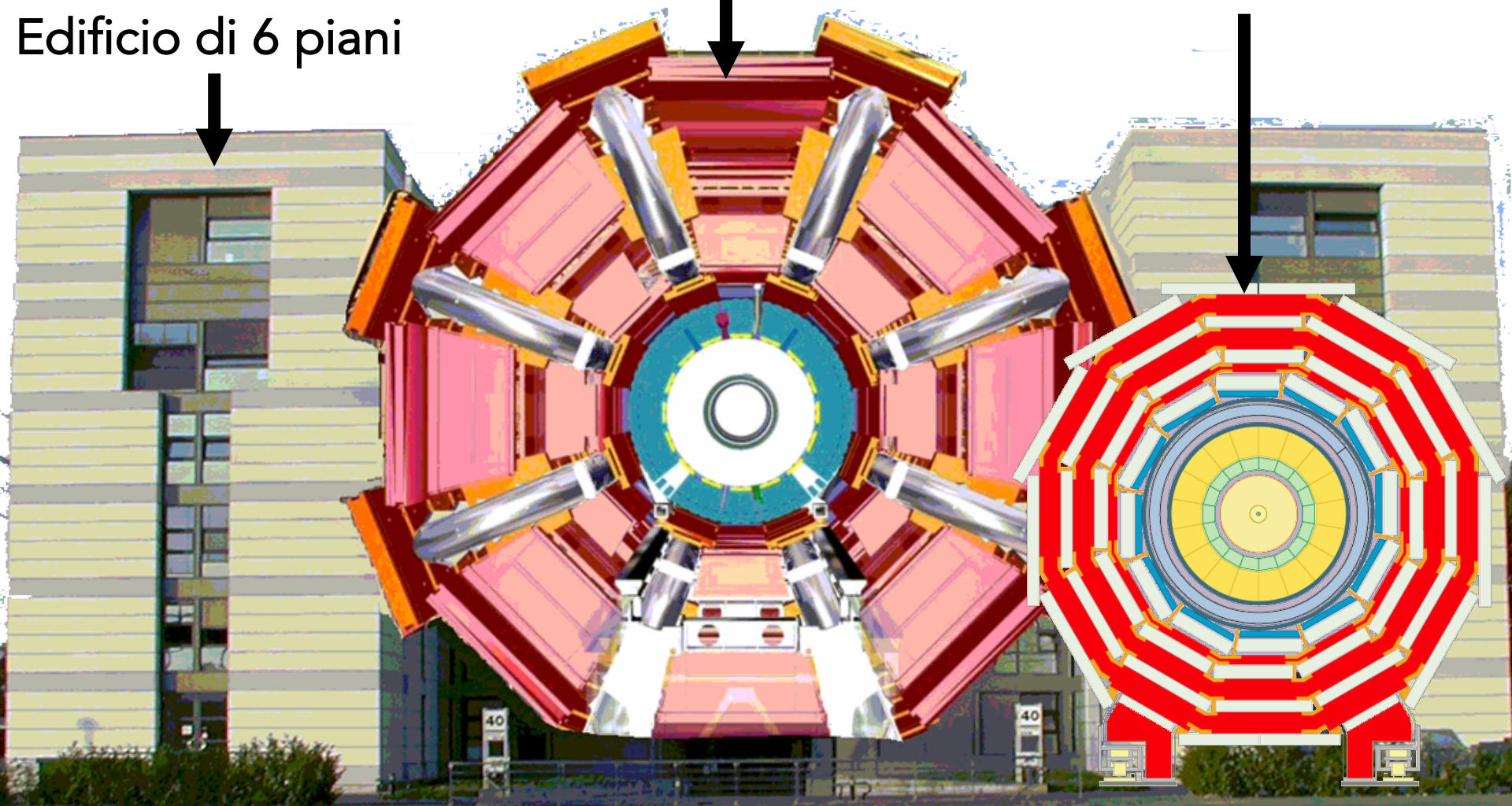


ATLAS 2 volte piu' grande – CMS 2 volte piu' pesante

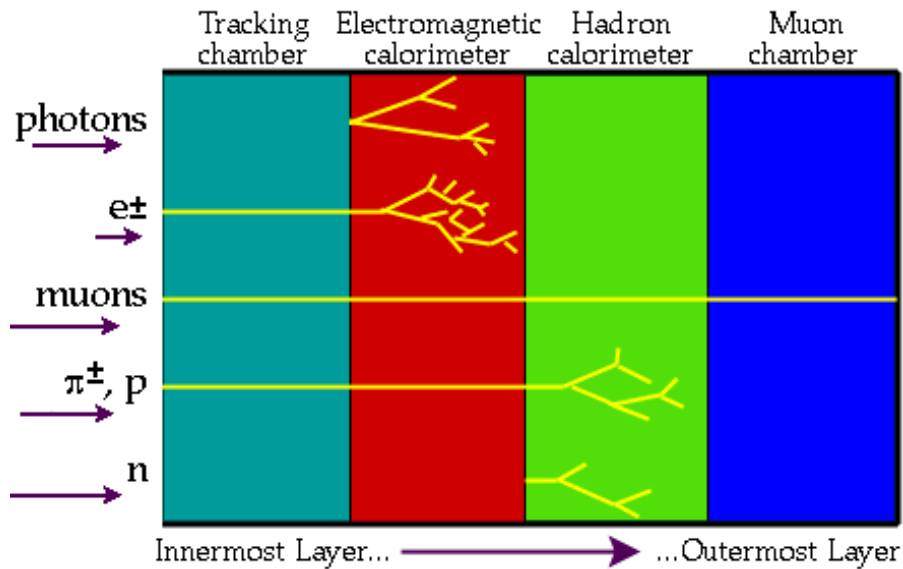
ATLAS (2 Tesla)

CMS (4 Tesla)

Edificio di 6 piani

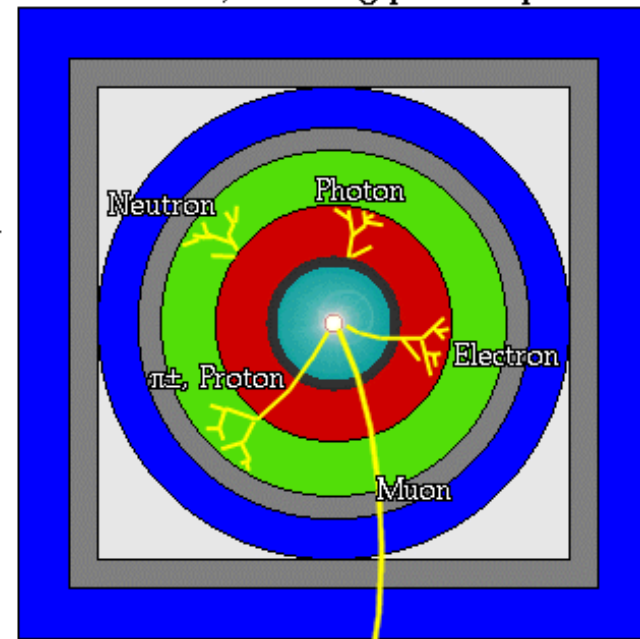


Apparati di rivelatori



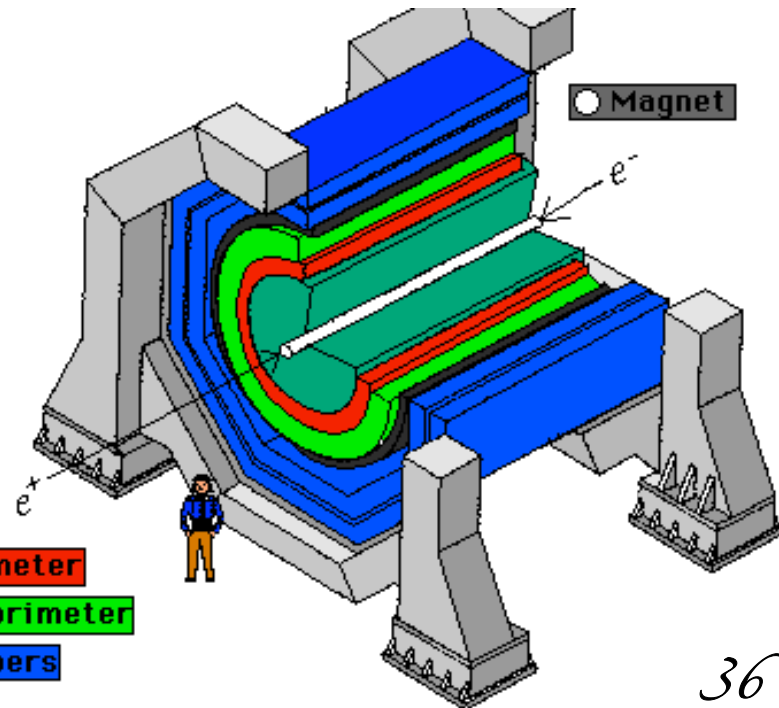
A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers

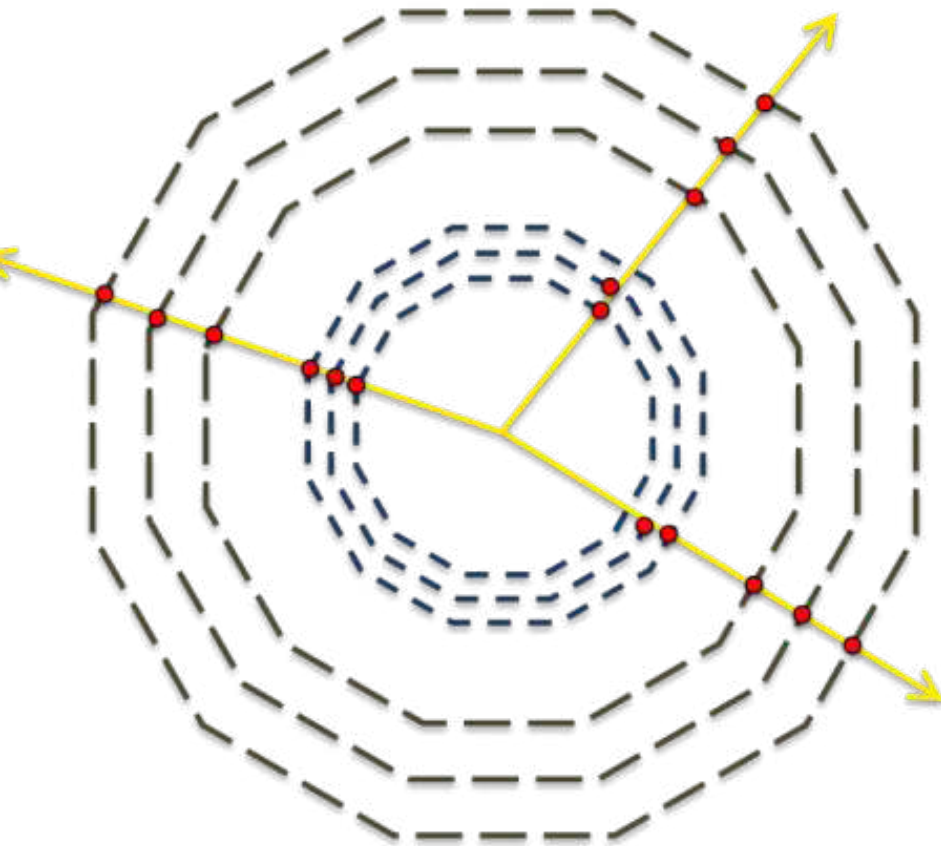


Struttura a "cipolla"

- Tracking
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Muon Chambers



Tracciatori

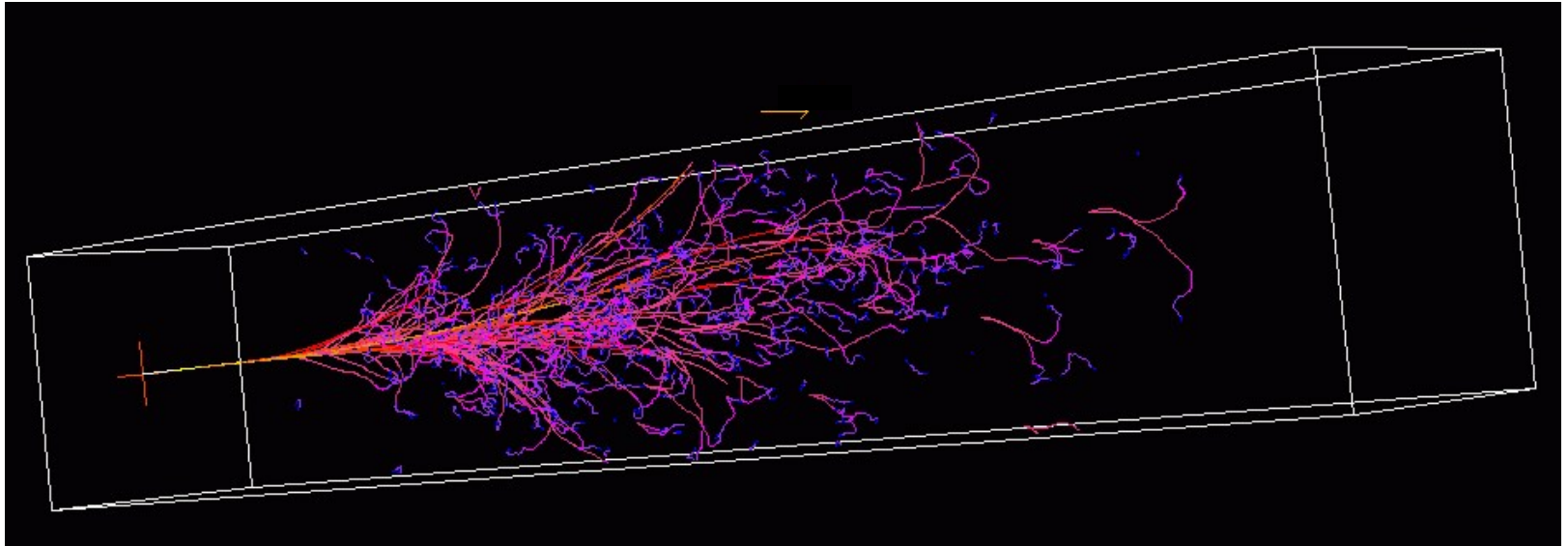


Sensibilità
tutte le particelle cariche

$F = p \times B$
immersi in campo magnetico
misurano la quantità di moto

Materiali leggeri
la particella deve perdere
poca energia

Calorimetri



Sensibilità

Ecal: elettroni e fotoni

Hcal: protoni, neutroni, pioni, kaoni

Energia

misurano l'energia
(senza campo magnetico)

Materiali pesanti

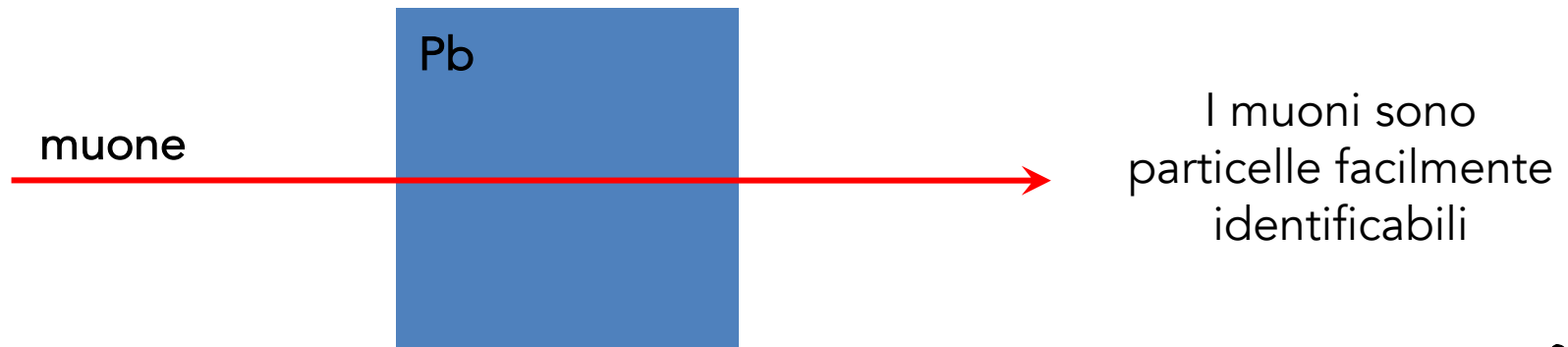
la particella deve perdere
tutta la sua energia

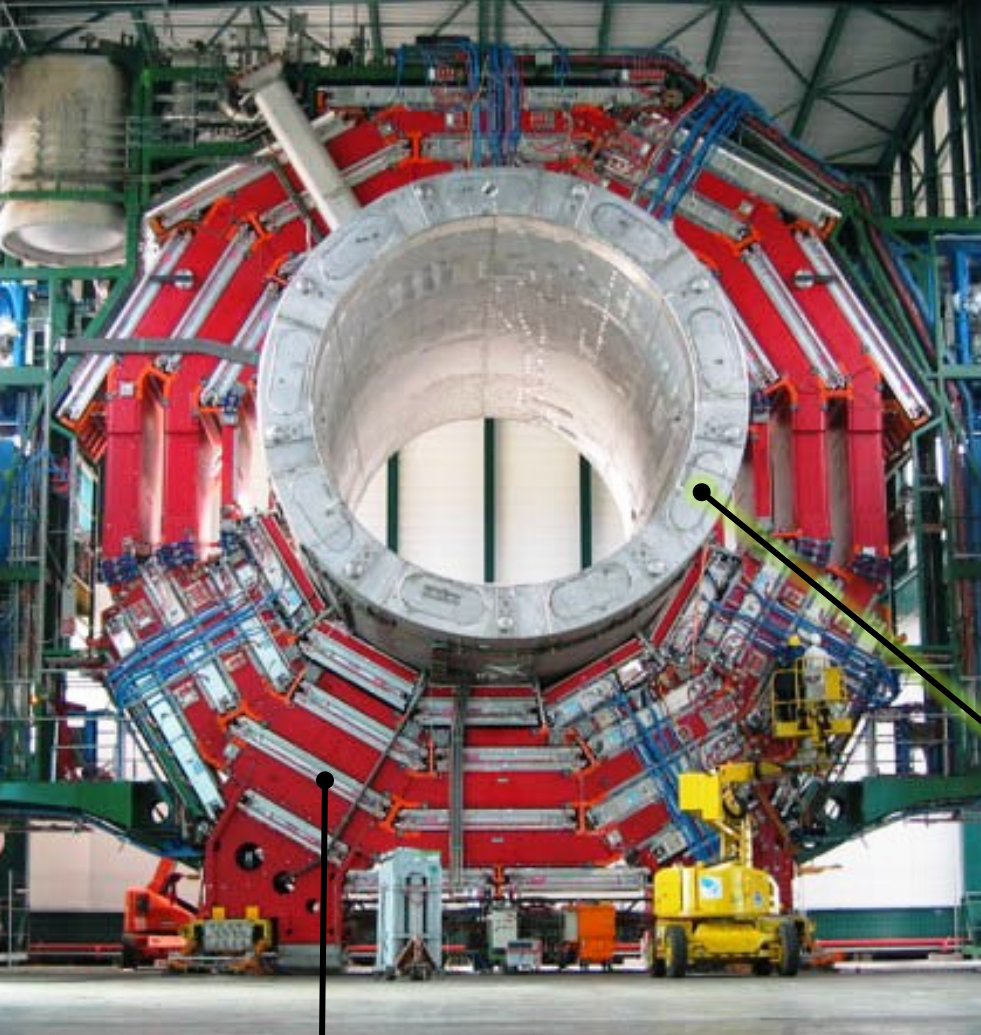
Rivelatori per muoni

I muoni sono particelle cariche (~ elettroni pesanti) altamente penetranti → attraversano tutto il rivelatore, compresi i calorimetri, perdendo pochissima della loro energia iniziale

Per osservarli si può usare qualsiasi rivelatore per il tracciamento di particelle cariche, ma deve coprire aree grandi

⇒ Si usano strati di rivelatori a gas (ad es. le camere a deriva), alternati con strati di ferro, necessario a chiudere le linee del campo magnetico generato dal solenoide





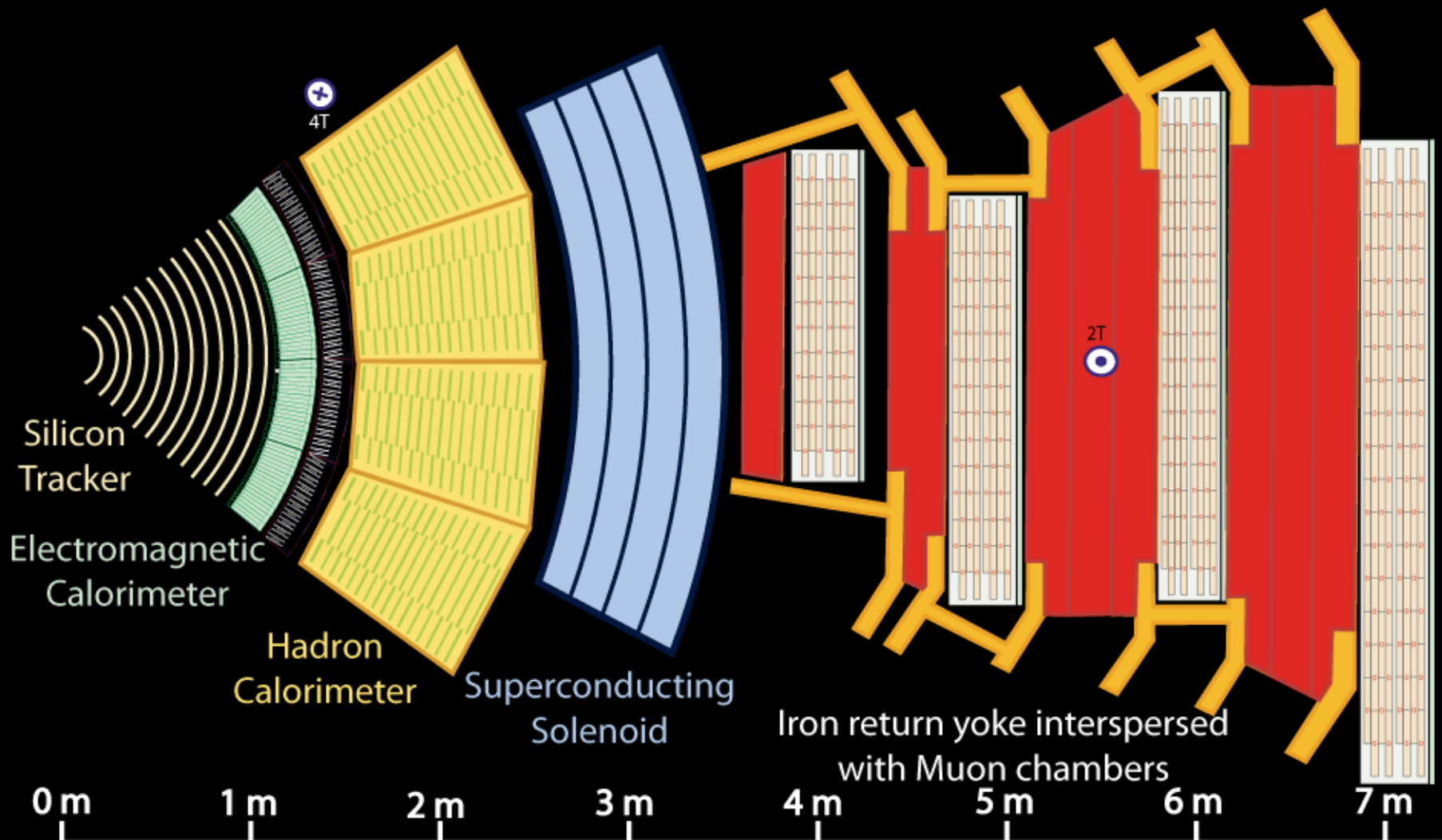
Campo magnetico

- ▶ Curvare a sufficienza le tracce:
Campo molto intenso in un volume enorme
- ▶ CMS ha il solenoide superconduttore più grande al mondo

L = 13m, \varnothing = 6m
Max Field: 4 T
Weight: 220 ton
Steel Yoke: 12500 ton !!!
Temperatura: 4.5 K
Max current: 19500 A !!!
Stored energy: 2.7 GJ !!!

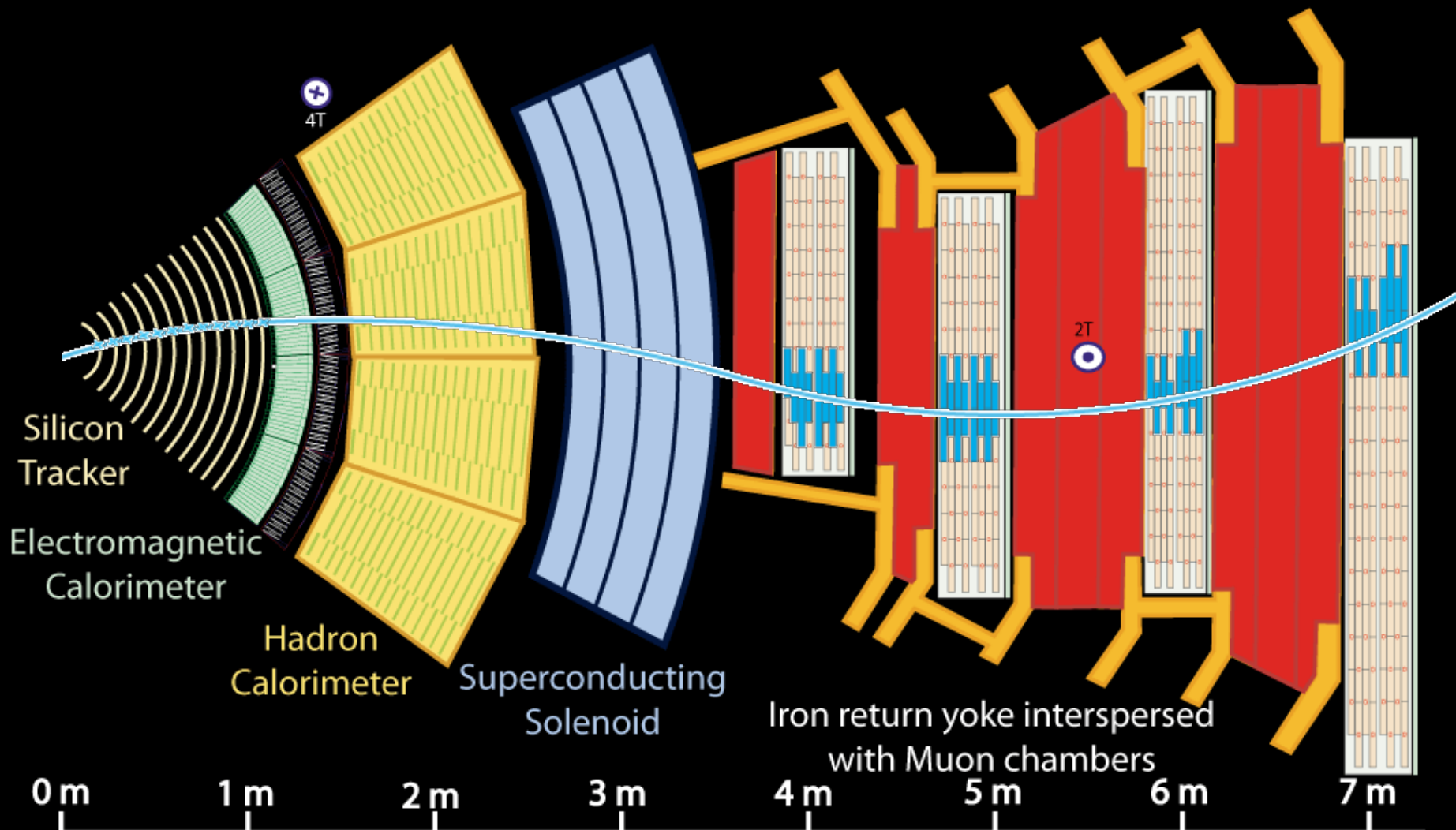
Sistema di tracciamento per muoni all'interno del **giogo in acciaio**

- che ferma tutte le particelle tranne i muoni permettendone l'identificazione
- campo magnetico B nel giogo: misura indipendente del momento
- Superficie molto estesa \Rightarrow si usano rivelatori a gas



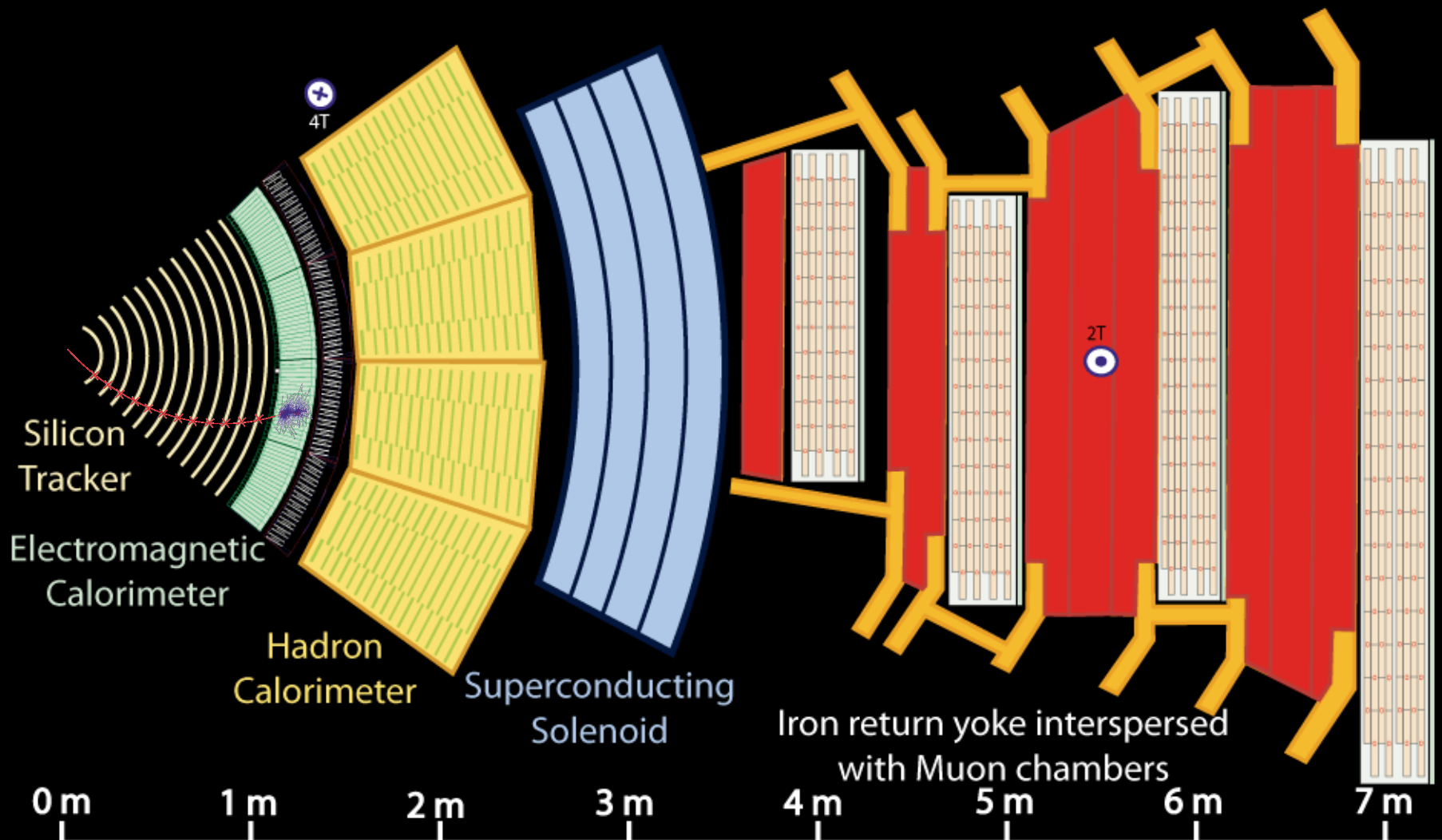
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



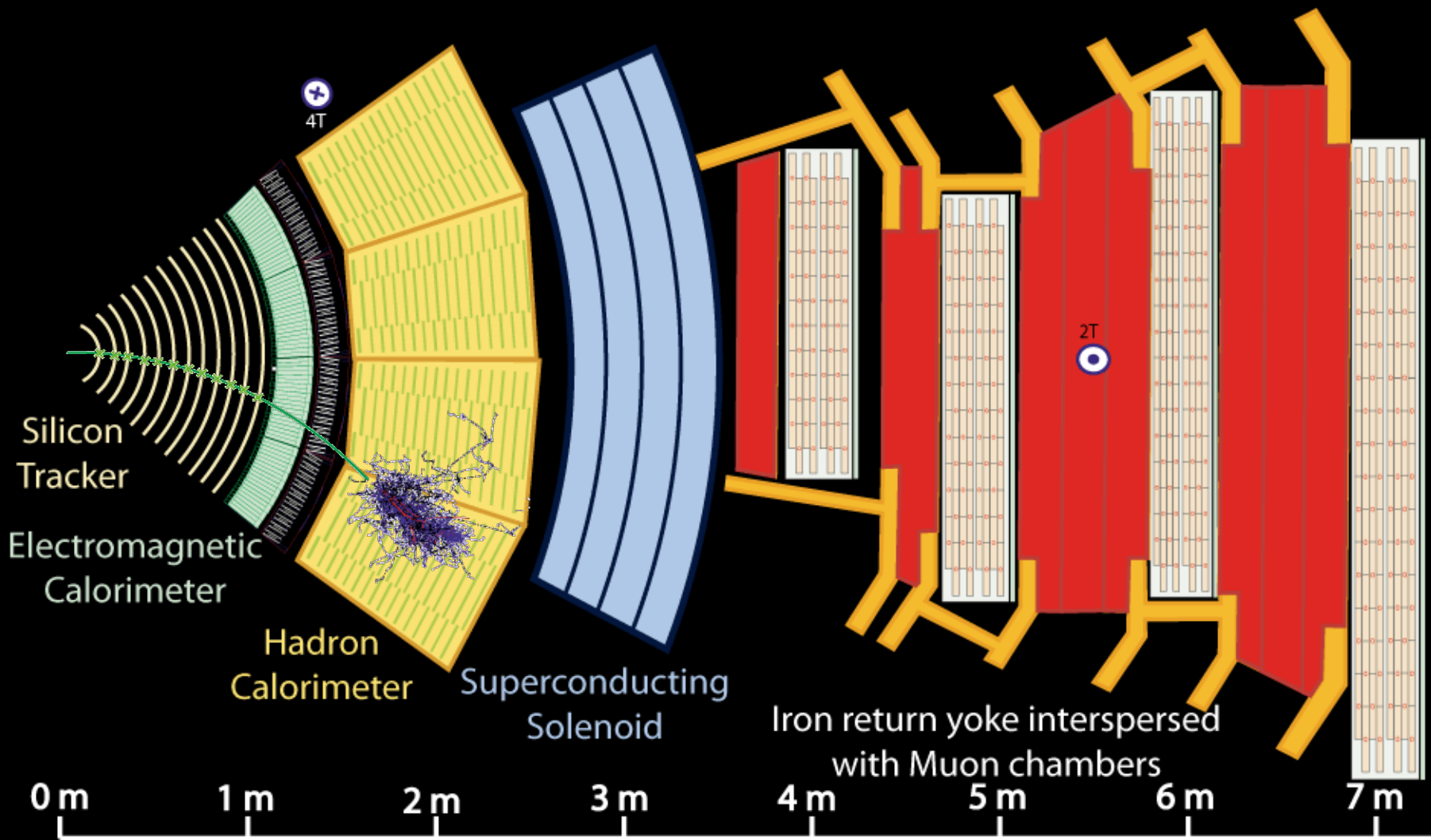
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



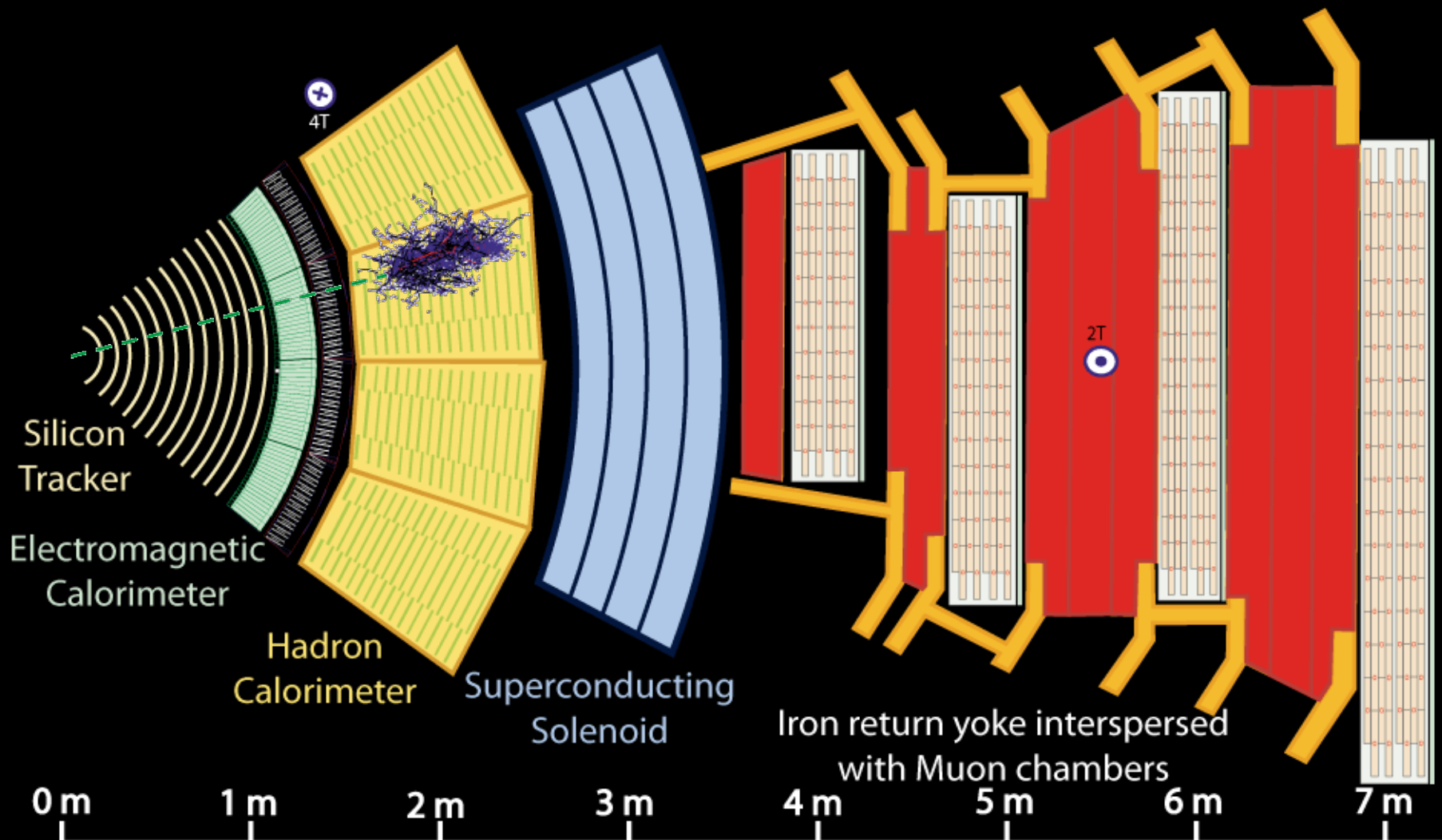
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



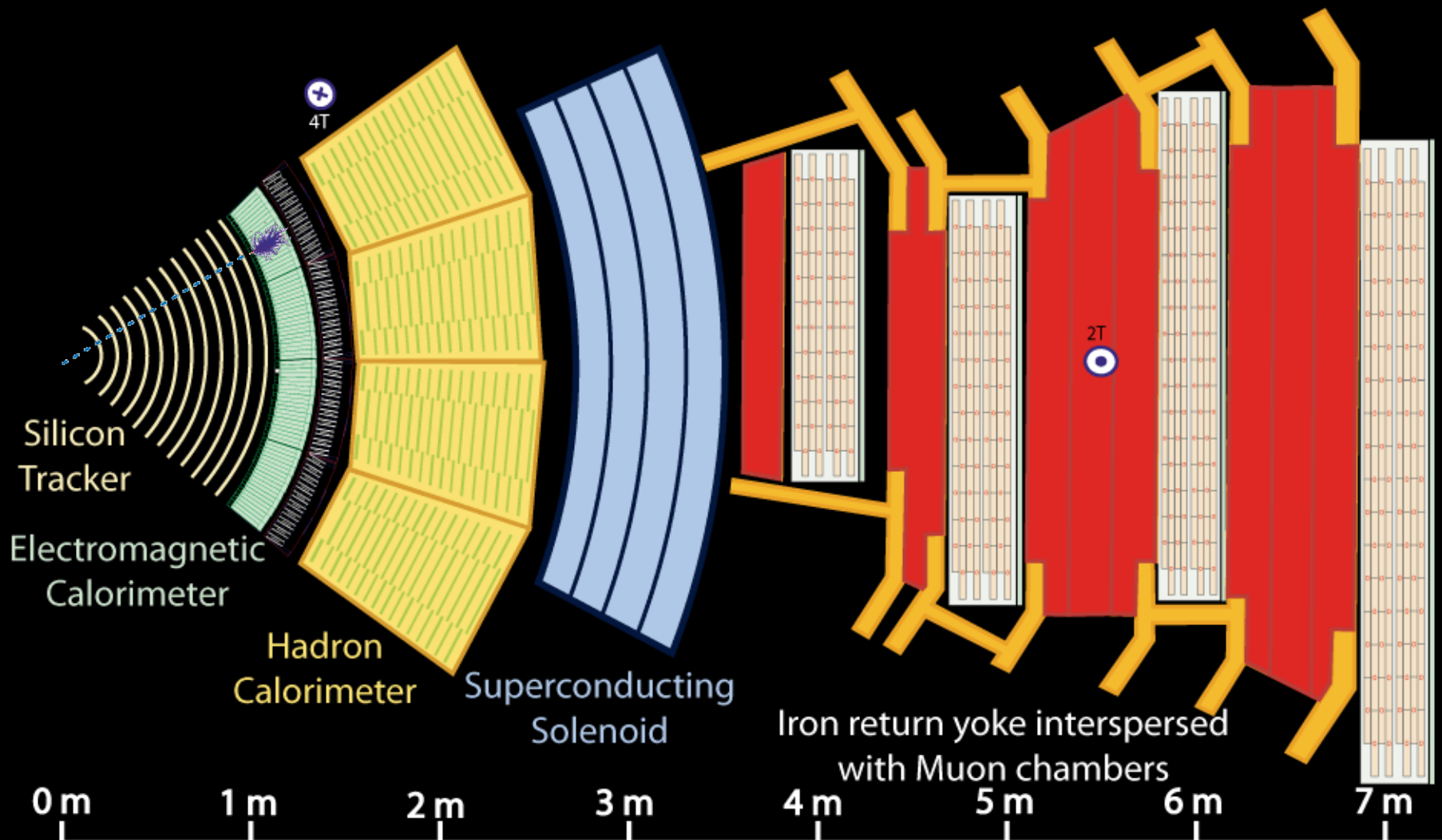
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

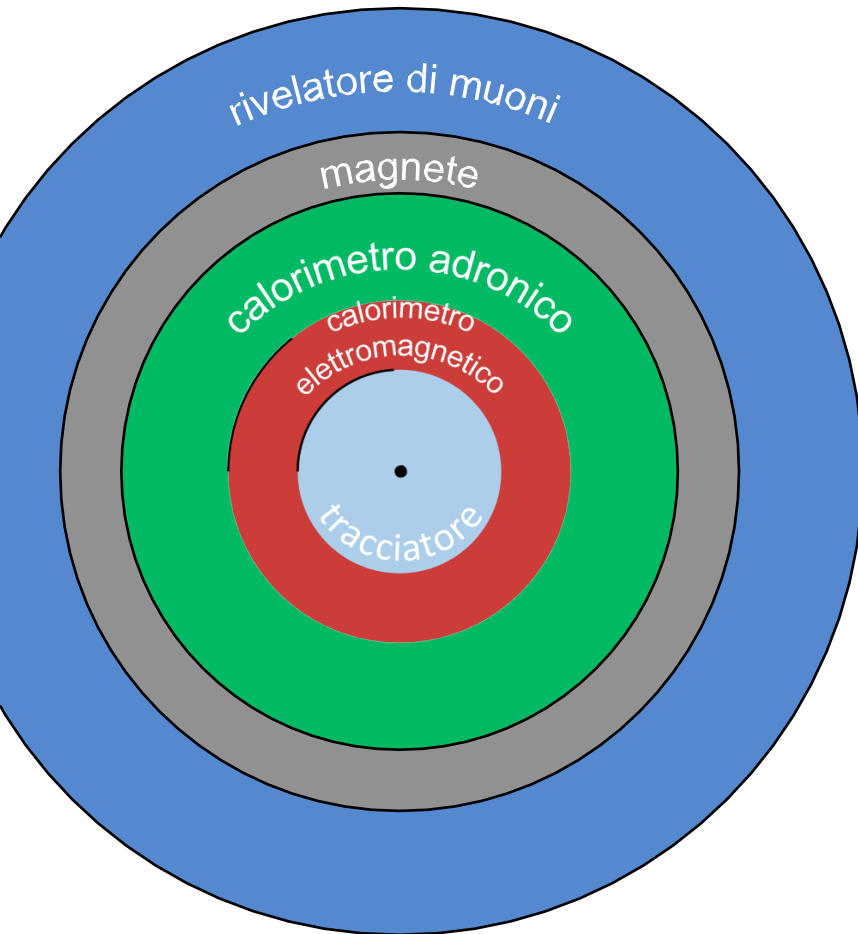
- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

Riassumendo



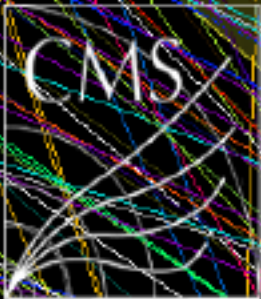
Rivelatore di Vertice e tracciatore Interno
rivela le particelle cariche
e ne misura la quantità di moto

Calorimetro Elettromagnetico
rivela elettroni e fotoni
e ne misura l'energia

Calorimetro Adronico
rivela protoni, neutroni, pioni, kaoni
e ne misura l'energia

Magnete
curva le particelle cariche
e ne permette la misura della quantità di moto

Rivelatore di Muoni
rivela i muoni



File: /store/RunI/Reco/CMSSW_5_6_18-20120528T16:20:00/195099/35488125
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CEST
Run/Event: 195099 / 35488125
Lumi section: 65
Orbit/Crossing: 16992111 / 2295

*Raw $\Sigma E_T \sim 2 \text{ TeV}$
14 jets with $ET > 40$
Estimated PU ~ 50*

Buona caccia alle particelle!