

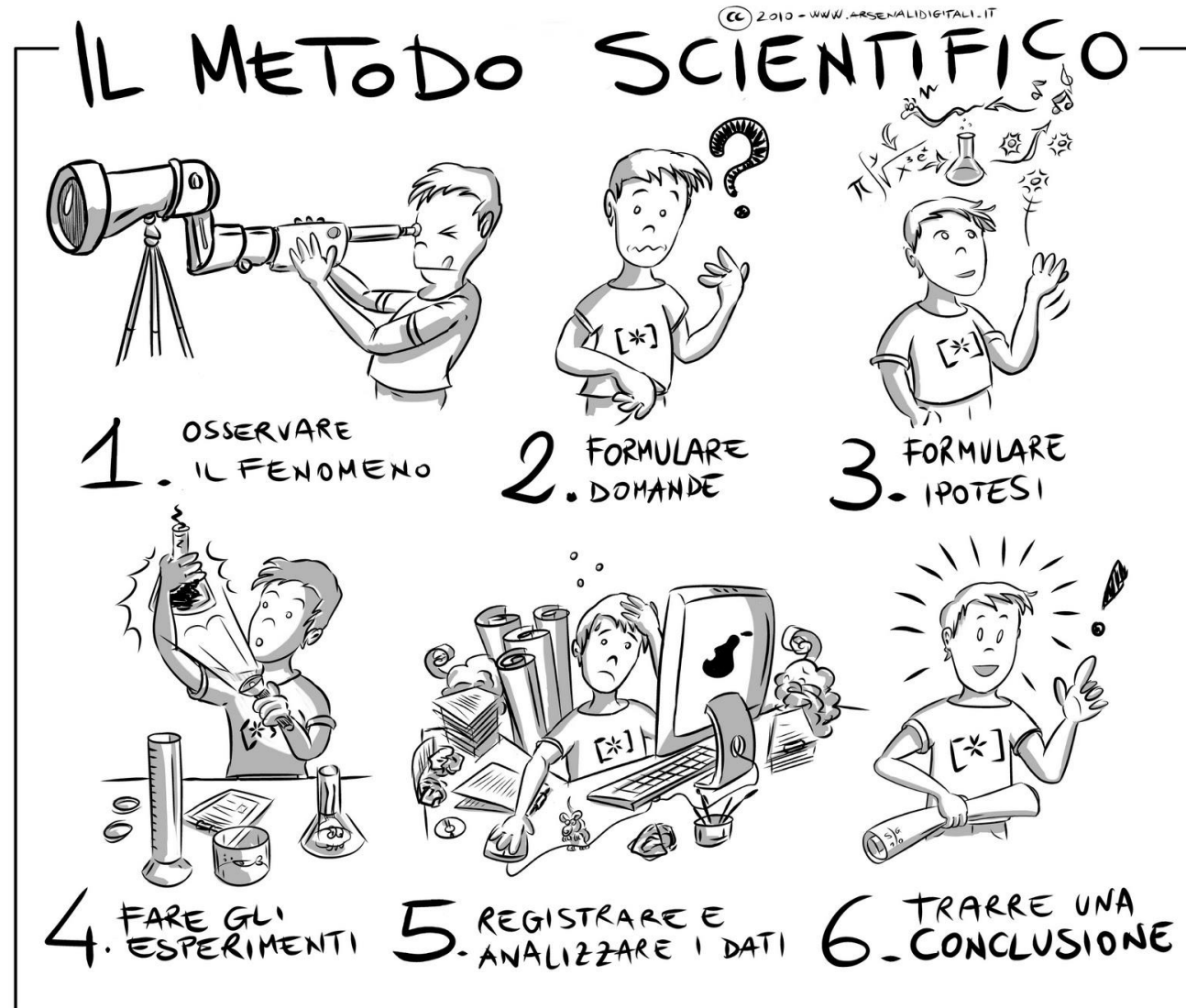


I rivelatori di Particelle in ATLAS

RM3 ATLAS Masterclass **10** Febbraio
2023

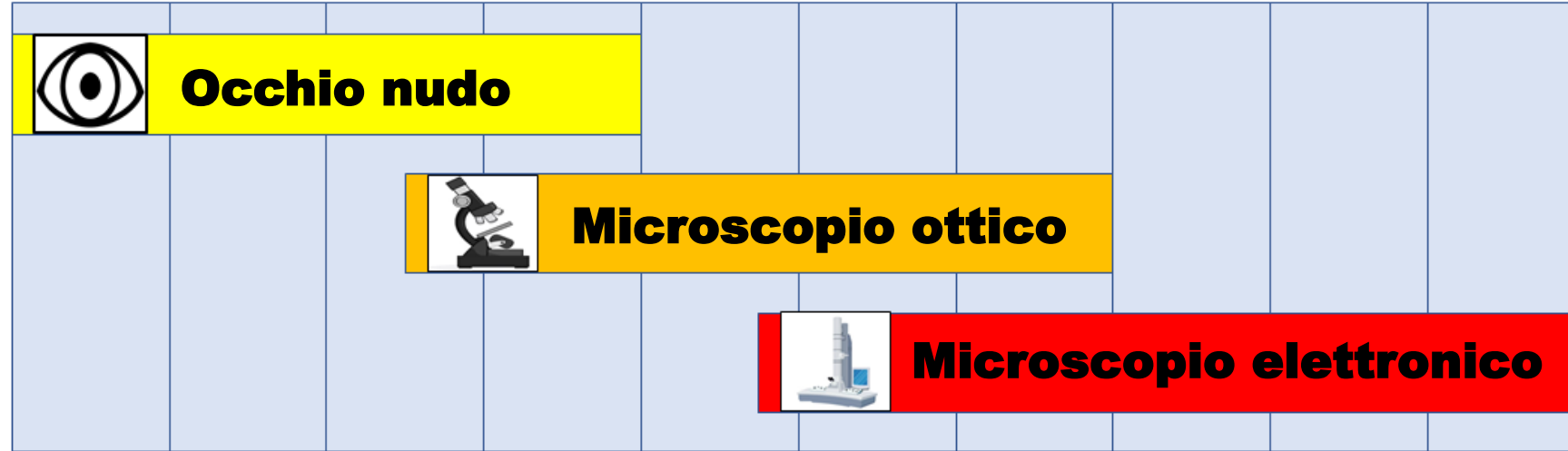


Metodo scientifico

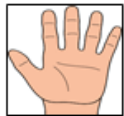


Osservazione su diverse scale

1m 10^{-1} m 10^{-2} m 10^{-3} m 10^{-4} m 10^{-5} m 10^{-6} m 10^{-7} m 10^{-8} m 10^{-9} m 10^{-10} m



Person



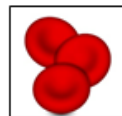
Hand



Finger



Hair



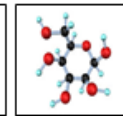
Blood Cell



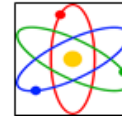
Bacteria



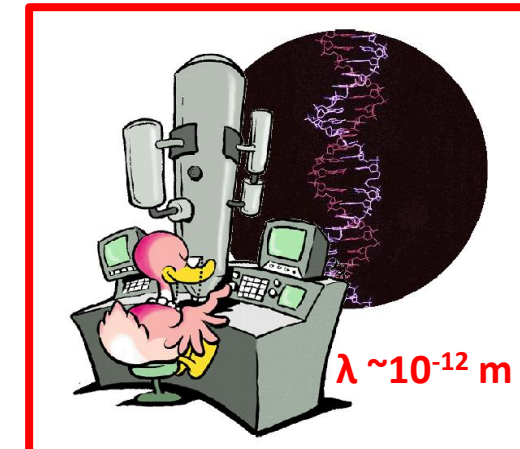
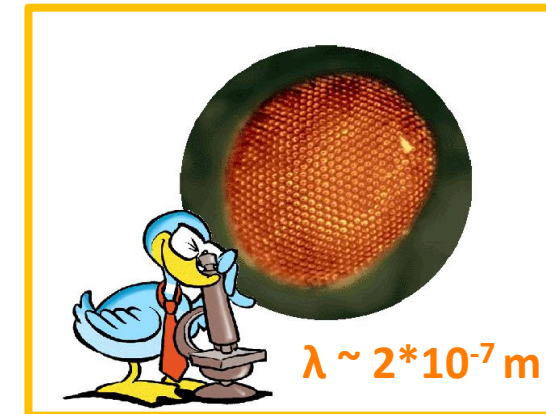
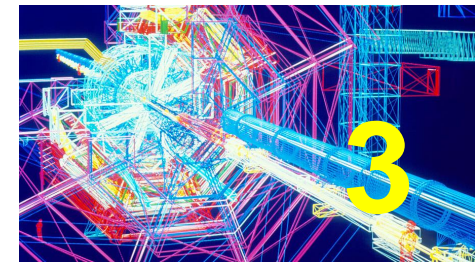
DNA



Glucose



Atom



Per le leggi della meccanica quantistica:

- un'onda con lunghezza d'onda λ puo' essere vista come una particella con quantità di moto p .
- della radiazione sonda deve essere minore delle dimensioni che si vogliono osservare.

DUALISMO ONDA-PARTICELLA



Quantità di moto \mathbf{p} : prodotto tra la massa m e la velocità \mathbf{v} della particella

Lunghezza d'onda λ : è la distanza tra due massimi (o minimi) di una funzione periodica, definita come rapporto tra velocità di propagazione e frequenza dell'onda.

La relazione che lega queste due grandezza e su cui si basa il dualismo onda-particella secondo cui un'onda con lunghezza d'onda λ può essere vista come una particella con quantità di moto p è la lunghezza d'onda di De Broglie:

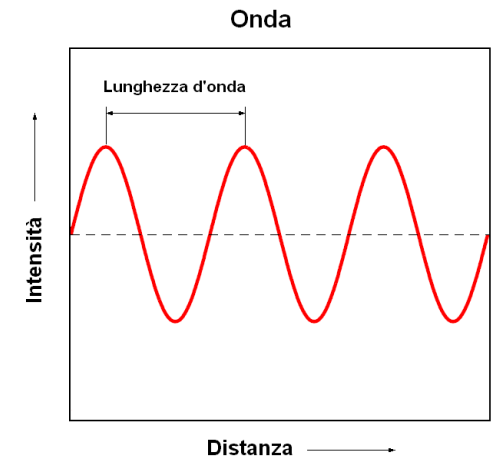
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Dove la lunghezza d'onda λ è inversamente proporzionale alla sua quantità di moto tramite la costante di Planck h .

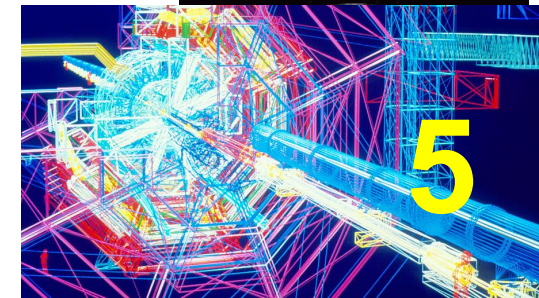
Inoltre, in meccanica quantistica

$$p = \sqrt{\left(\frac{E}{c}\right)^2 - (mc)^2} \approx \left(\frac{E}{c}\right)$$

Quando $m \ll E/c^2$



DUALISMO ONDA-PARTICELLA (UNITA' DI MISURA)



Per le leggi della meccanica quantistica, ogni particella può essere vista come un'onda con lunghezza d'onda λ inversamente proporzionale alla sua quantità di moto.



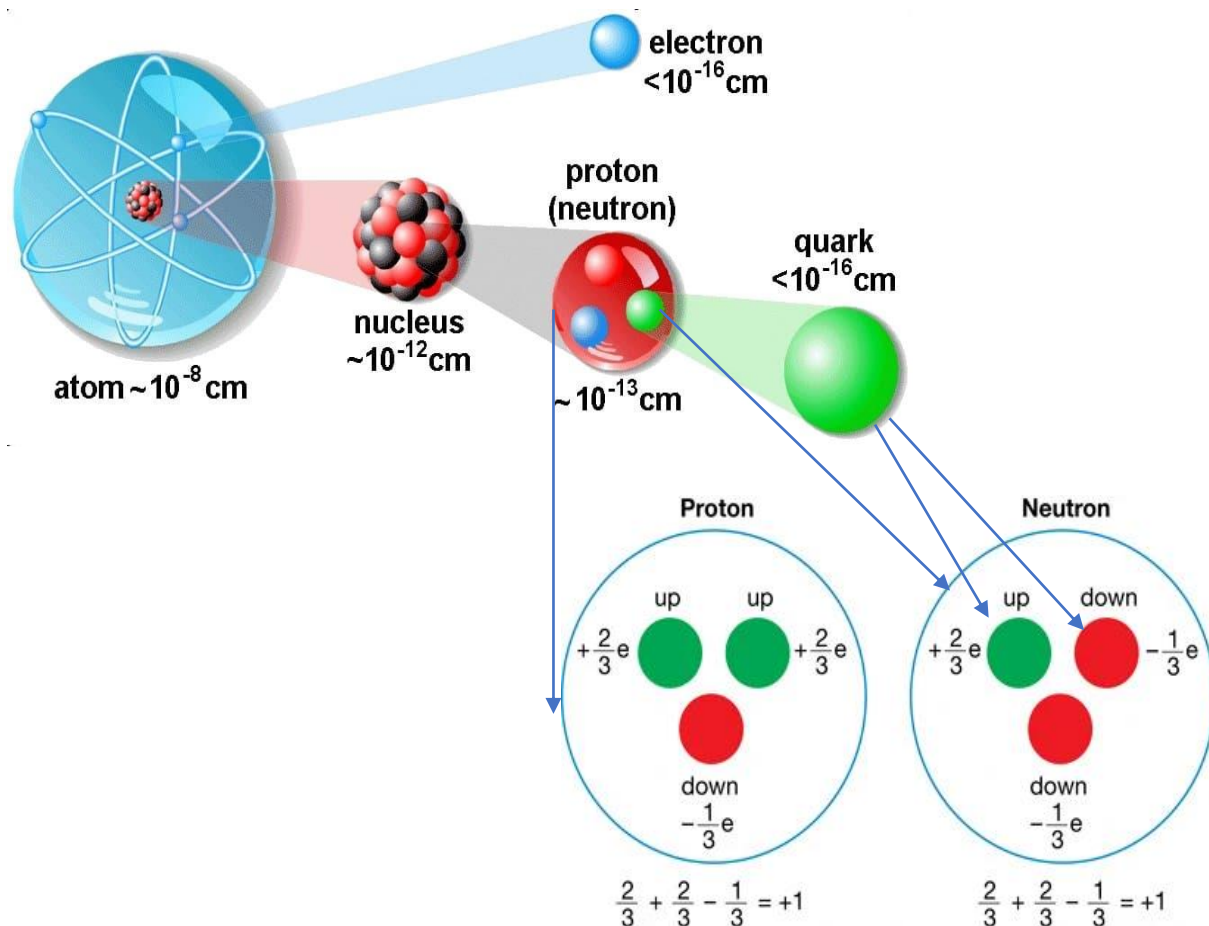
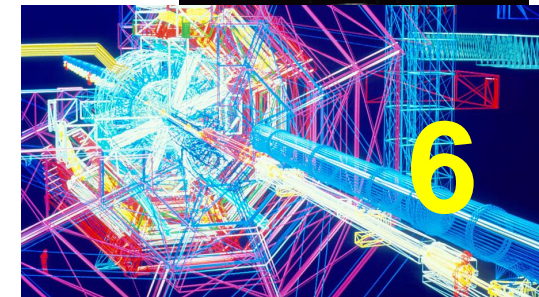
PICCOLE DIMENSIONI \leftrightarrow GRANDI ENERGIE

Nell'ambito della Fisica delle Particelle, l'**energia** si misura in **elettronvolt (eV)** e non in joule (J).

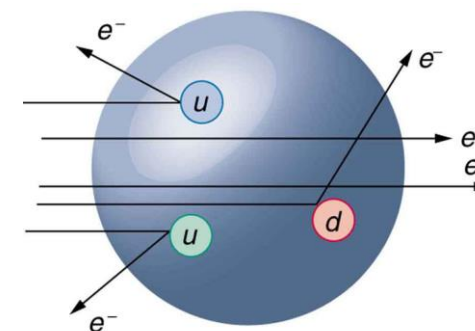
1 eV e' l'aumento di energia di un elettrone quando è accelerato da una differenza di potenziale di un volt ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$).

- 1 keV** è mille elettronvolt (10^3 eV)
- 1 MeV** è un milione di elettronvolt (10^6 eV)
- 1 GeV** un miliardo di elettronvolt (10^9 eV)
- 1 TeV** mille miliardi di elettronvolt (10^{12} eV)

SCALA SUBATOMICA e Subnucleare



Studi condotti a SLAC negli anni 60 su urti tra protoni in bersagli fissi e elettroni sonda con energia fino a 20 GeV



Proton



Struttura subnucleare

Quark up, quark down in stati legati ed elettroni costituiscono la materia ordinaria.

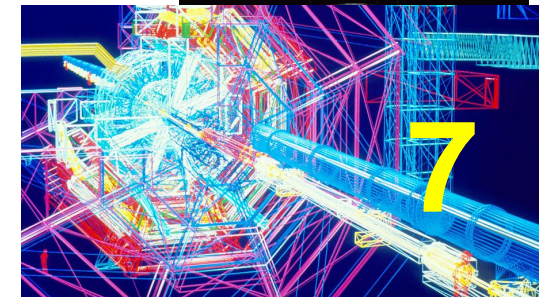
Particelle di alta energia per esplorare il microcosmo



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

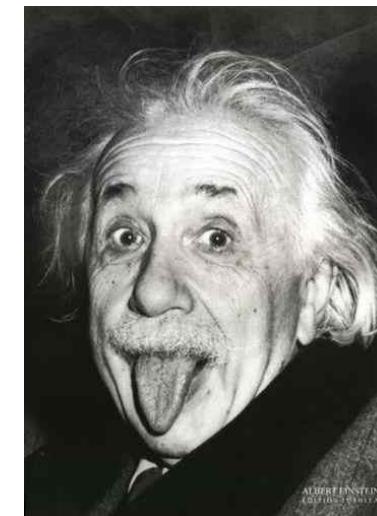
Per esplorare il microcosmo
utilizziamo gli

ACCELERATORI DI PARTICELLE

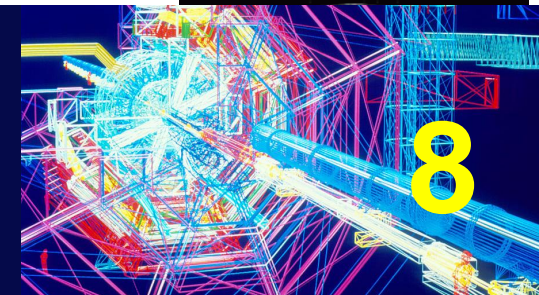
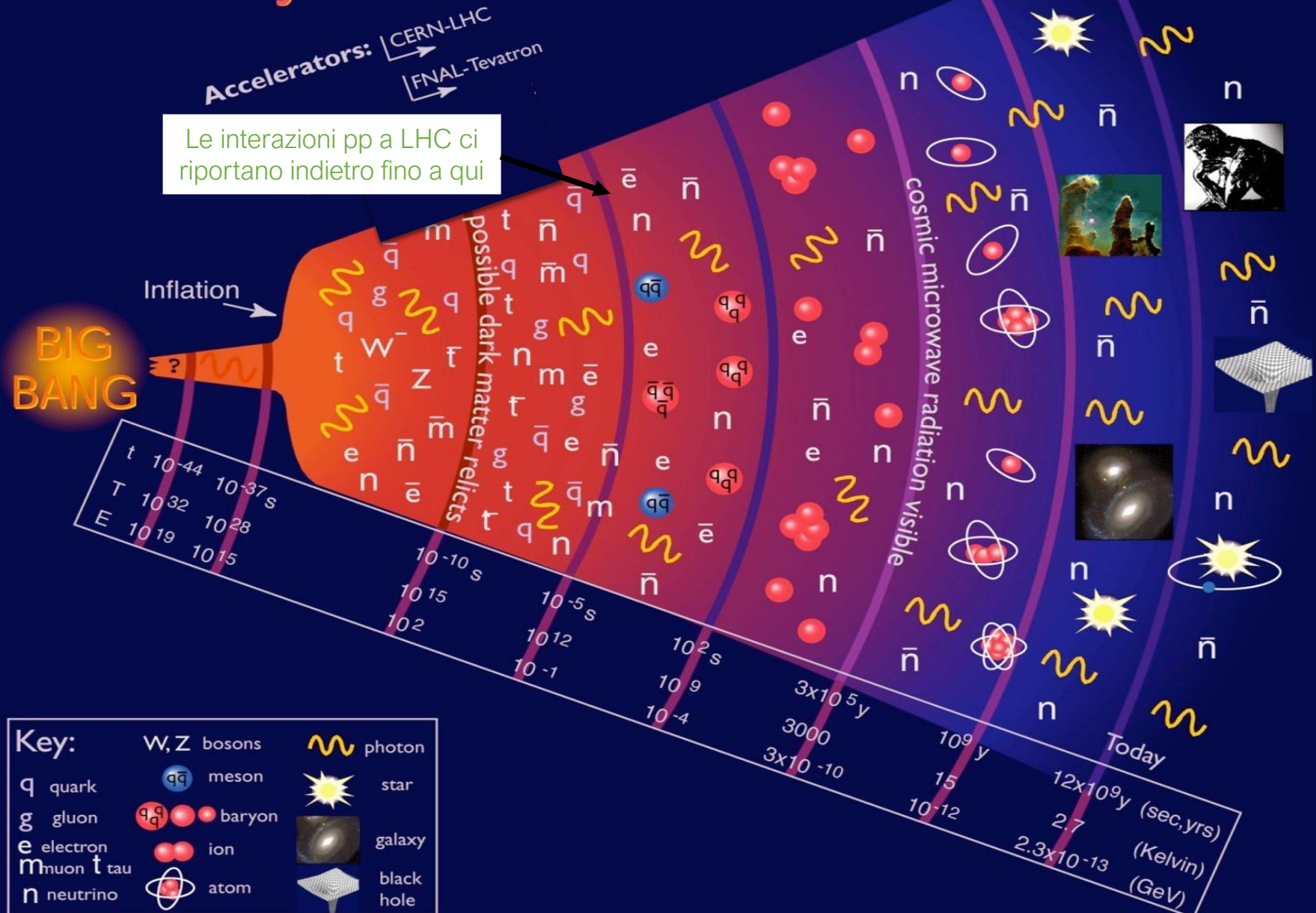


Perche' gli acceleratori di particelle ???

1. Per disporre di una radiazione di lunghezza d'onda sufficiente all'esplorazione della materia su scale sempre minori: $\lambda = hc/E$ dove $E \sim 10 \text{ TeV}$, $\lambda \sim 10^{-19} \text{ m}$;
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...

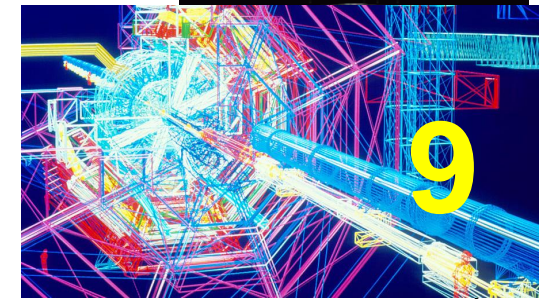


History of the Universe

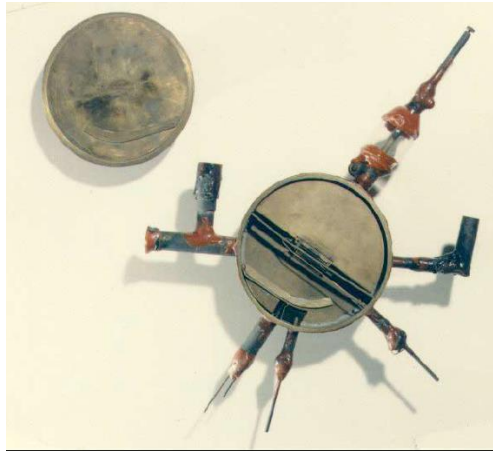


8

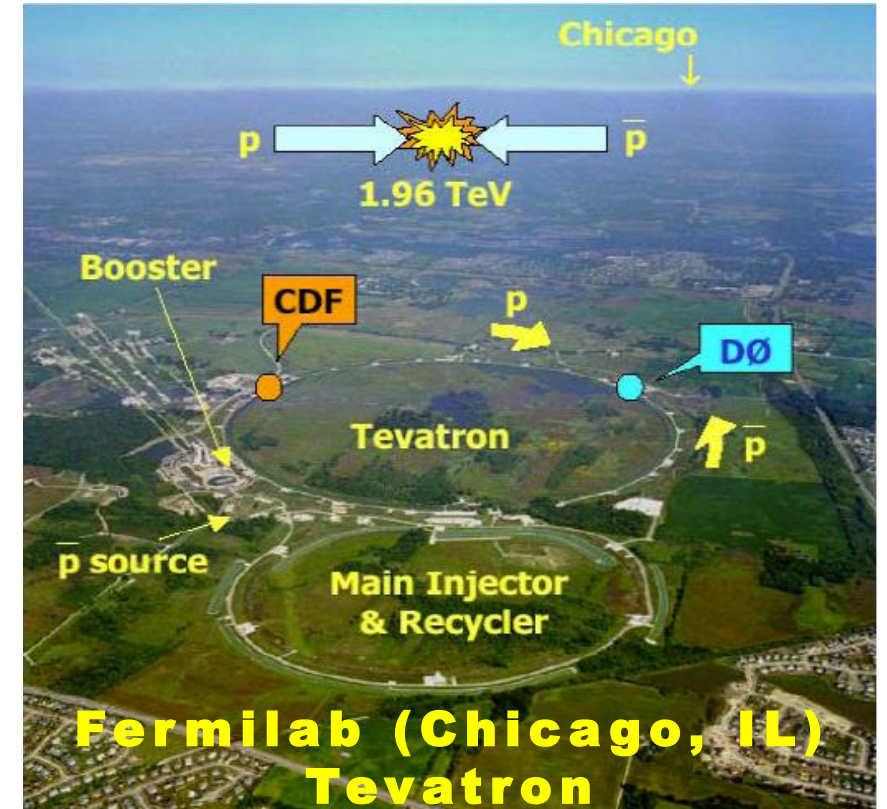
Nel corso della loro storia, gli acceleratori hanno fornito alle particelle energie sempre più alte (**MeV**→**TeV**). La dimensione dell'acceleratore determina la massima energia raggiungibile.



raggio ~ 1 km, protoni ~1TeV

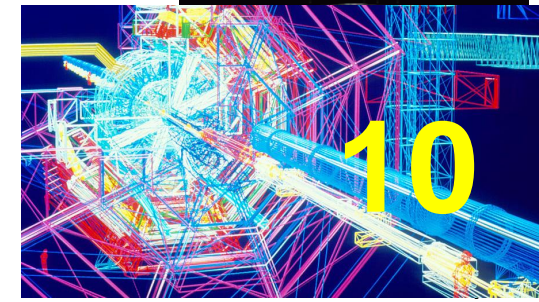
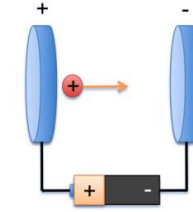


Ernest Lawrence
primo ciclotrone
1930

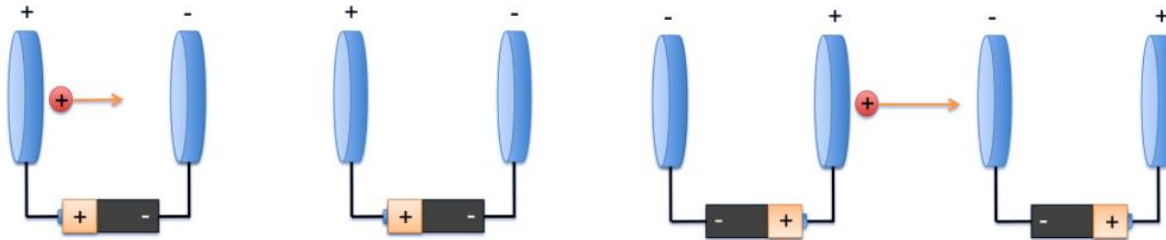


Accelerare e “guidare” le particelle

- Le particelle cariche vengono accelerate in un campo elettrico (un solo elettrodo necessiterebbe di una ddp elevatissima)



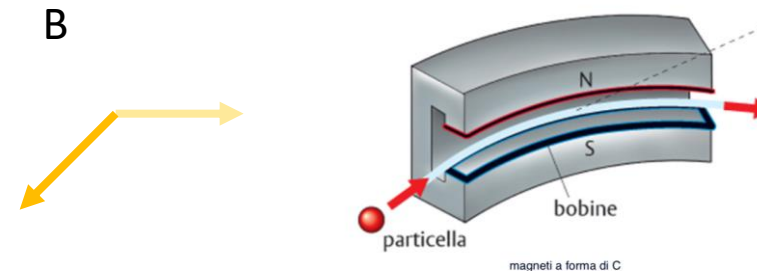
- Serie di elettrodi cilindrici bucati (all'interno dei quali c'è il vuoto, e che i protoni possono attraversare) tra i quali viene alternata la direzione del campo elettrico.



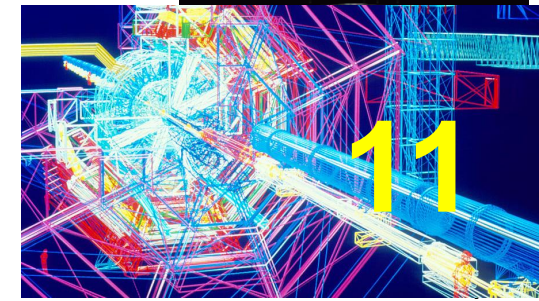
- Nella realtà qualcosa di simile all'inversione della polarità viene per esempio assicurata da un **generatore di radiofrequenza**, e la successione di elettrodi in molti casi è rimpiazzata da **cavità risonanti** come questa:



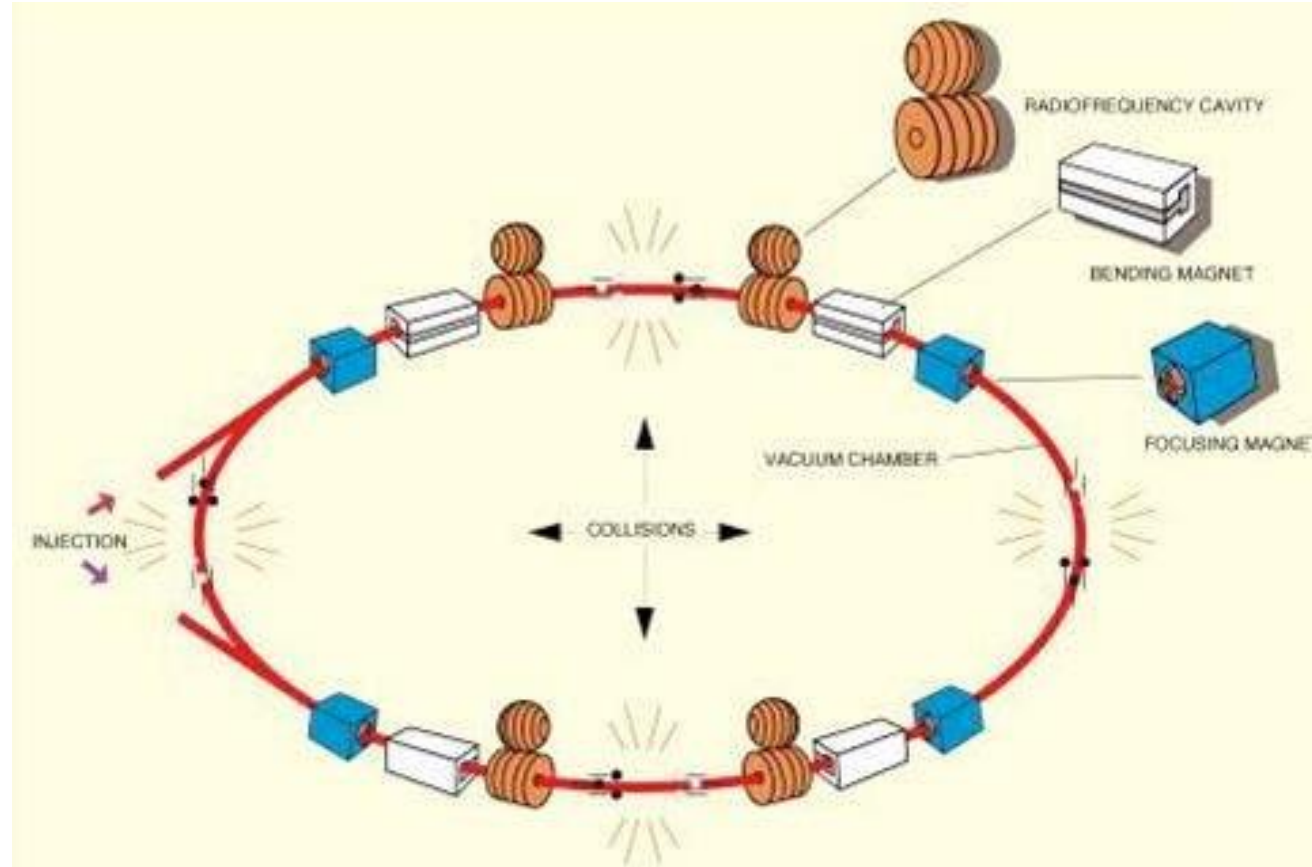
- Con **CAMPI MAGNETICI**, grazie alla forza di Lorentz le particelle cariche possono curvare!



I Collider



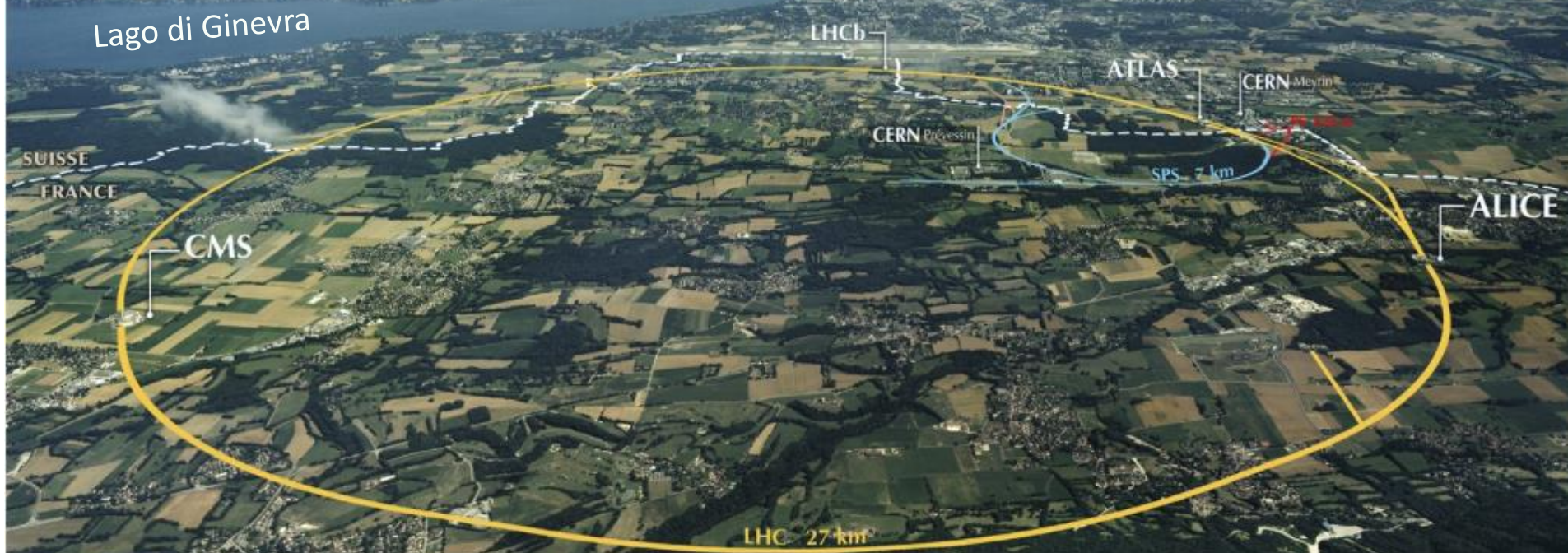
- due fasci di particelle viaggiano in direzioni opposte (in tubi a vuoto)
- le particelle viaggiano raggruppate in pacchetti (bunches) ciascuno composto da circa 10^{11} particelle
- accelerazione, curvatura e foccheggiamento sono effettuati per mezzo di elementi diversi lungo l'anello
- **i pacchetti vengono fatti incrociare tra di loro in uno a più punti e le particelle collidono**





II CERN

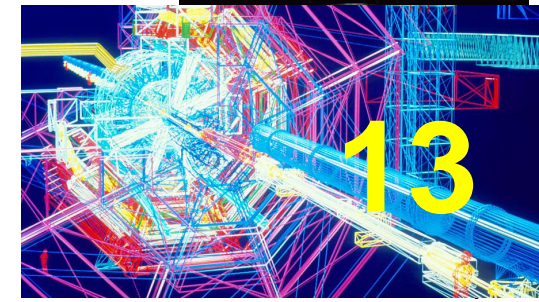
Il grande laboratorio europeo per la fisica delle particelle si trova a Ginevra, al confine franco-svizzero. Fu fondato nel 1951.



Dispone di un eccezionale complesso di macchine acceleratrici che ha il suo culmine nel Large Hadron Collider (LHC)



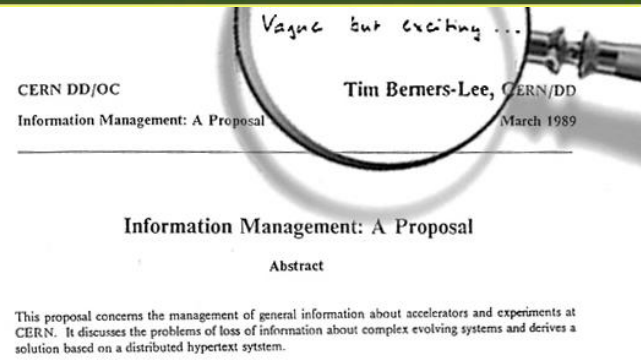
Oltre ad aver prodotto con continuità importanti risultati scientifici premiati più volte col Nobel, il CERN ha anche avuto importanti ricadute tecnologiche:



qui è stato inventato il **World Wide Web**,



Tim Berners-Lee invented the World Web Web in 1989



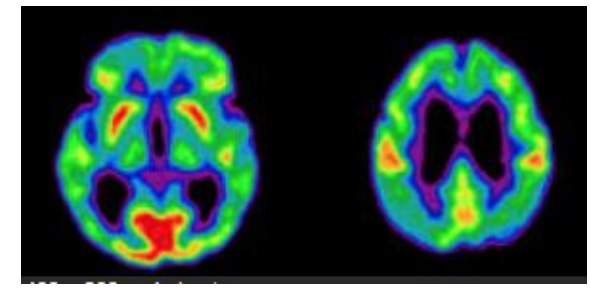
il **Touch Screen**



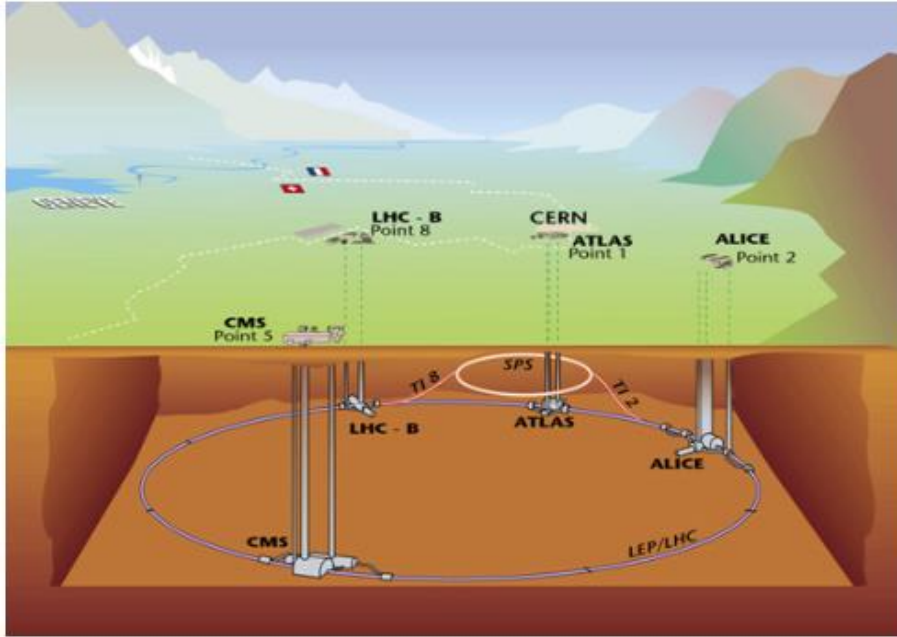
The Touch Terminal as developed for the Antiproton Accumulator (AA).



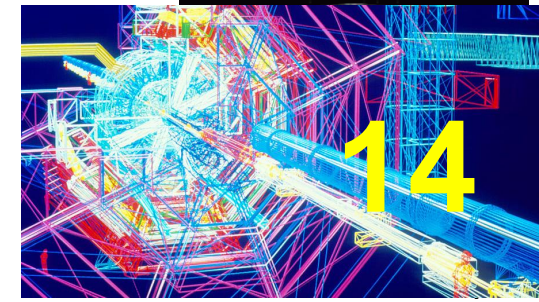
e la **PET**



il Large Hadron Collider (protone-protone)



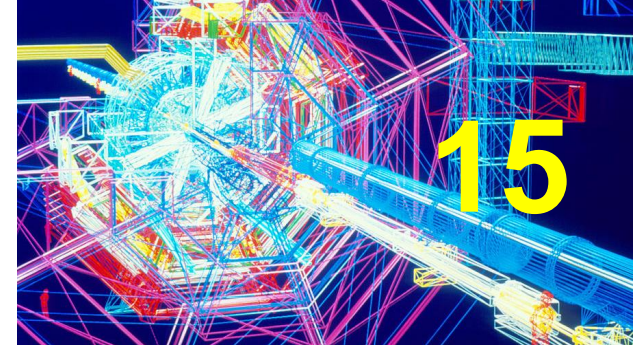
il Large Hadron Collider è costruito a 100 metri di profondità.



- 27 km di circonferenza
- Energia di collisione dei fasci di protoni 13-14 TeV
- “pacchetti” di protoni con 100 miliardi di protoni
- **I protoni viaggiano quasi alla velocità della luce ($v=0.99999991c$)
→ fanno 10 000 giri al secondo!**
- **In 10 ore percorrono 10 miliardi di km (Terra-Nettuno-Terra)**
- **e collidono ogni 25 ns !**

Lo strumento
scientifico più
grande del mondo!

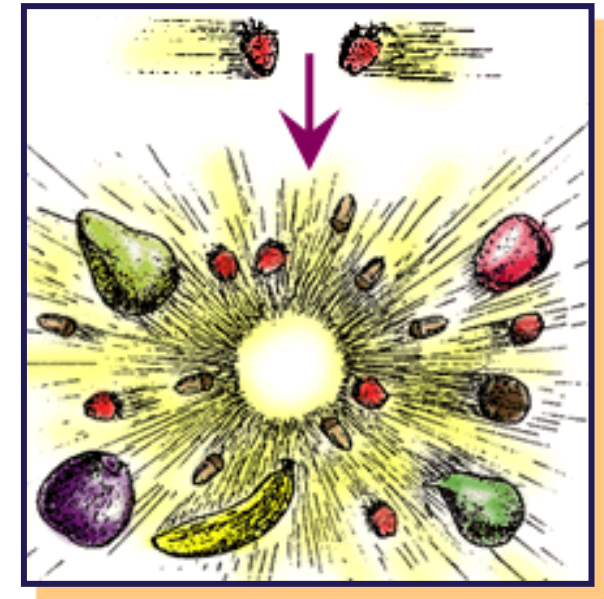
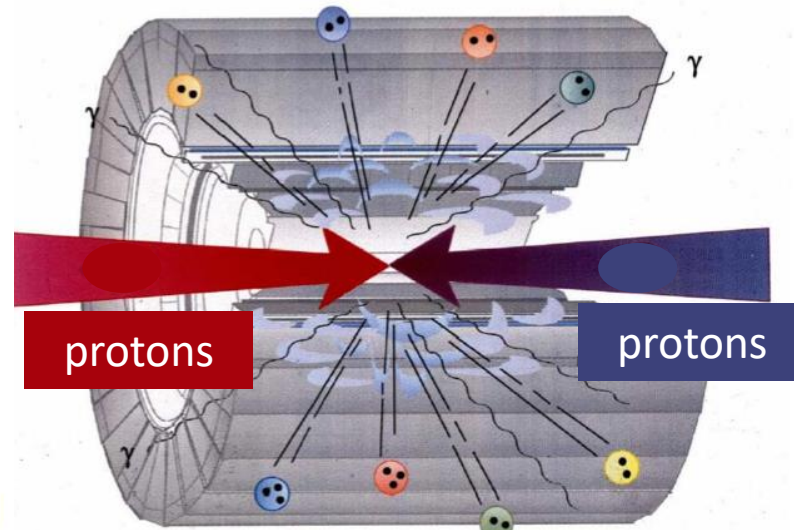
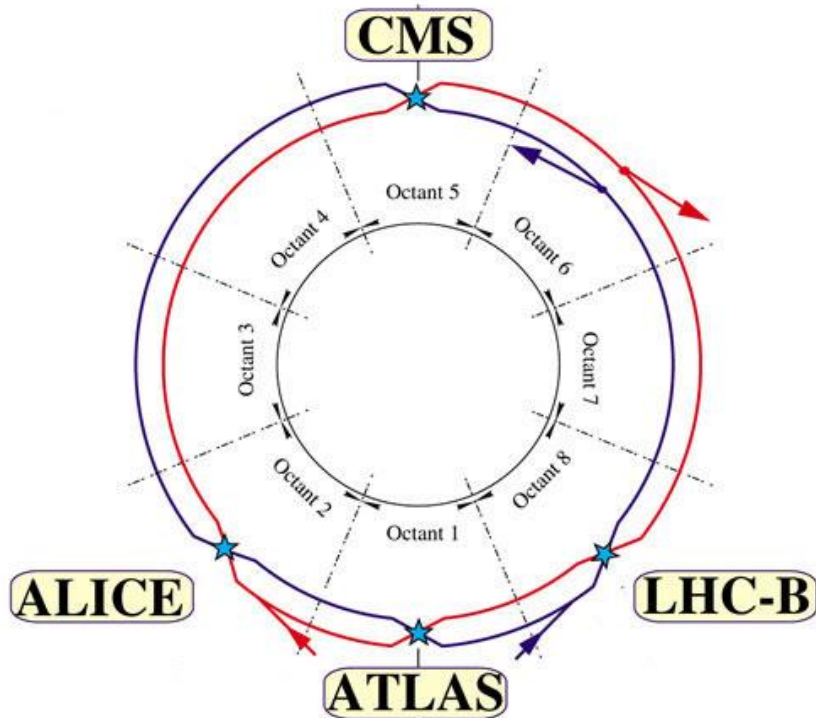
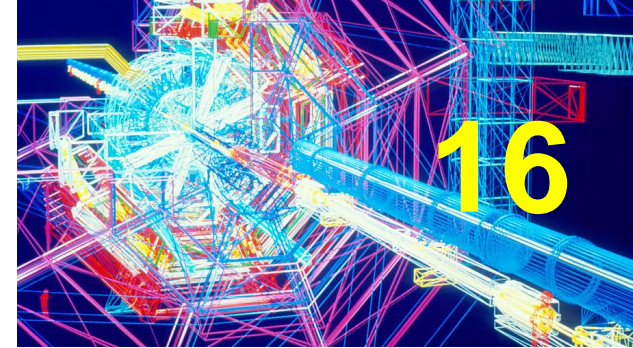
**LHC è il più potente strumento mai
costruito per studiare l'infinitamente piccolo**



- **1232 dipoli magnetici superconduttori che producono un campo da 8.36 Tesla (campo magnetico terrestre ~ 0.00000040 Tesla)**
- **700.000 litri di Elio liquido alla temperatura di 1.9K (-271°C)**
- **30.000 tonnellate di materiale a 1.9K (-271°C)**
- **...e' più freddo dello spazio profondo !**
- **27 km di vuoto spinto (10^{-10} torr, confrontabile con il vuoto cosmico)**
- **E' necessaria una potenza di 120 MWatt per il funzionamento di LHC ...circa il consumo di energia di tutto il Cantone di Ginevra !**

I rivelatori di particelle

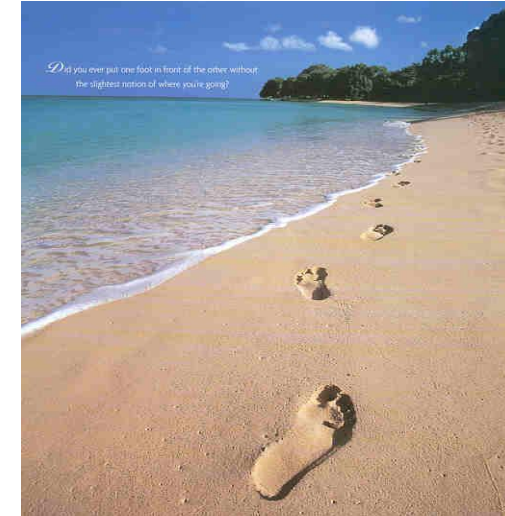
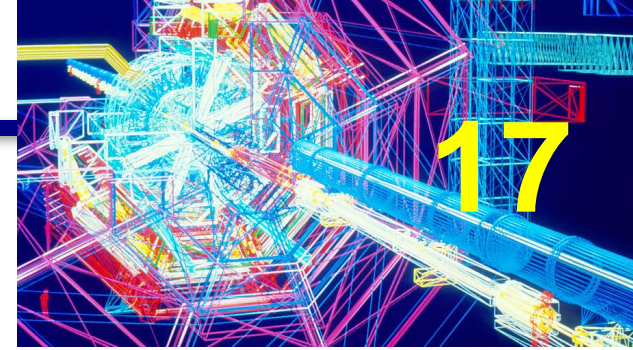
I fasci di protoni collidono in 4 punti di LHC, producendo nuove particelle nello stato finale



I 4 punti di interazione sono racchiusi da vari rivelatori di particelle che permettono di:

- misurare le caratteristiche (energia, carica..) delle particelle dello stato finale;
- Ricostruire a ritroso l'evento ed identificare le particelle prodotte nell'interazione.

Alla ricerca di tracce

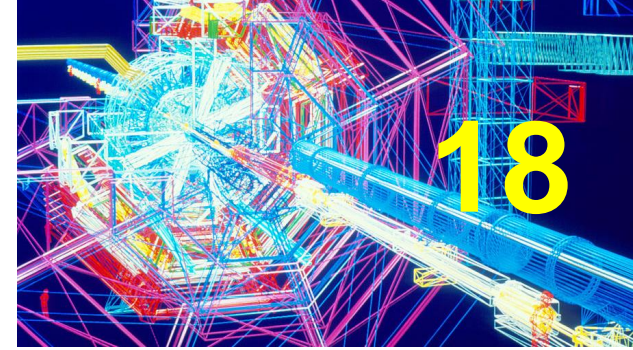


La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.

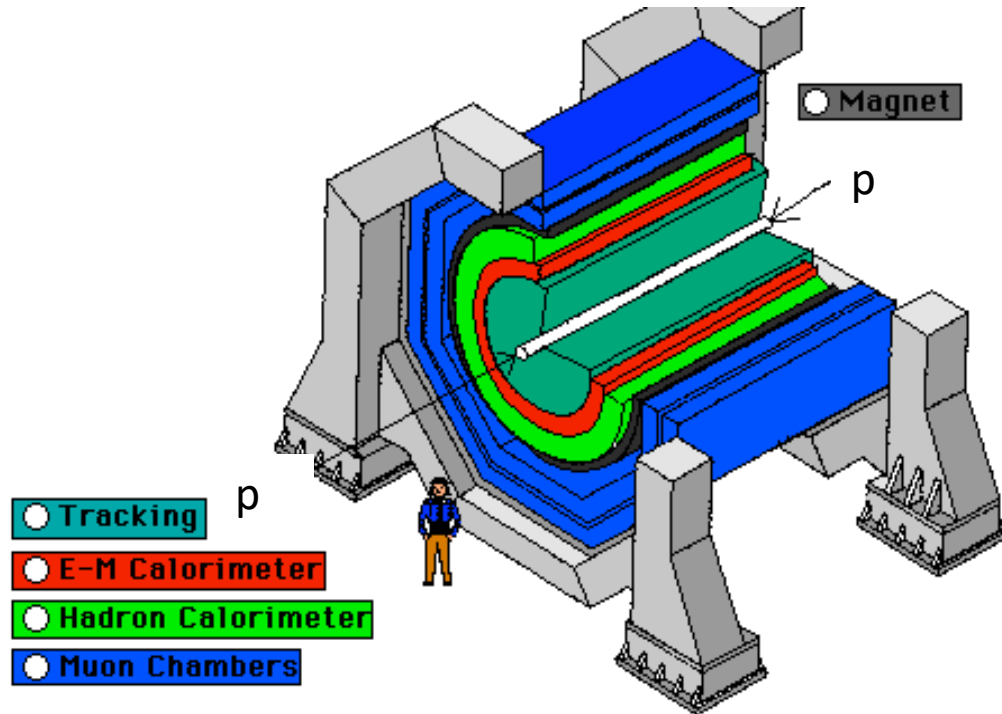
Principio di funzionamento: parte o tutta l'energia della particella viene trasferita al mezzo attivo dello strumento (INTERAZIONE RADIAZIONE-MATERIA) e convertita in una forma accessibile alla percezione umana.

Gli apparati degli esperimenti al CERN sono costituiti da piu' rivelatori sensibili a diverse particelle.

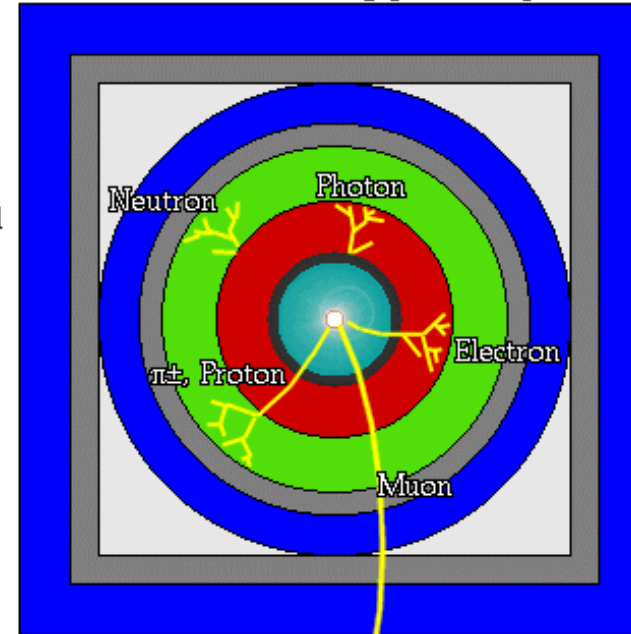
La maggior parte hanno una simmetria cilindrica rispetto ai tubi dell'acceleratore/fascio.



A detector cross-section, showing particle paths



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

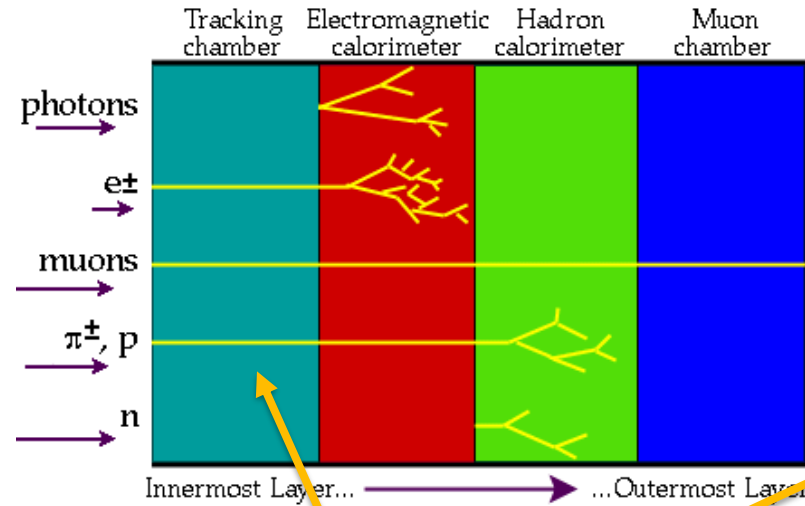


Questi rivelatori producono o segnali ottici od elettrici quando le particelle interagiscono con i mezzi attivi. Combinando i vari segnali e le informazioni sull'energia ceduta e curvatura della traiettoria, si possono identificare le particelle.

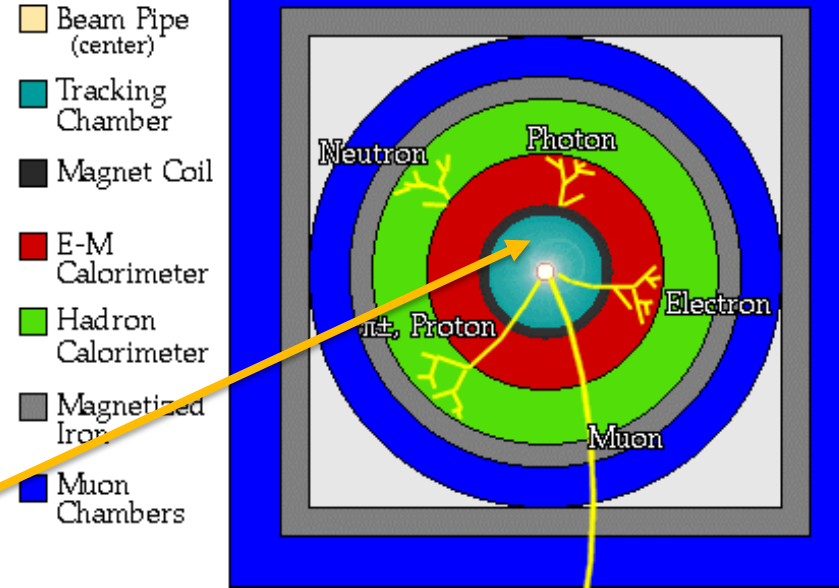


Apparati di rivelatori

Vediamo nel dettaglio...

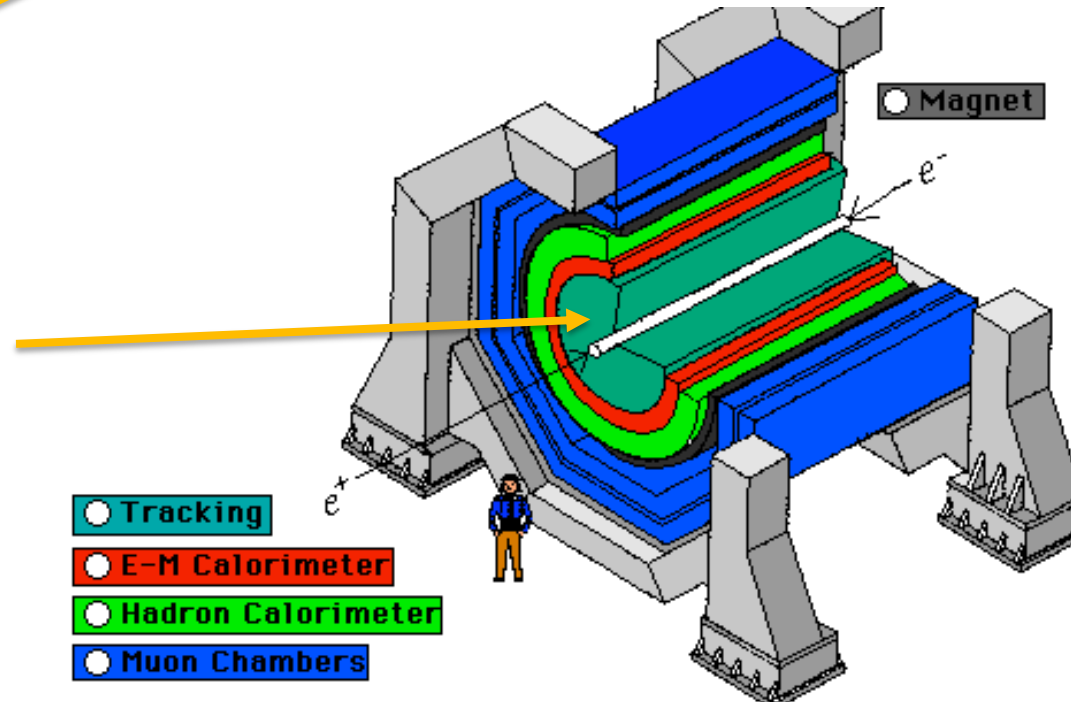


A detector cross-section, showing particle paths

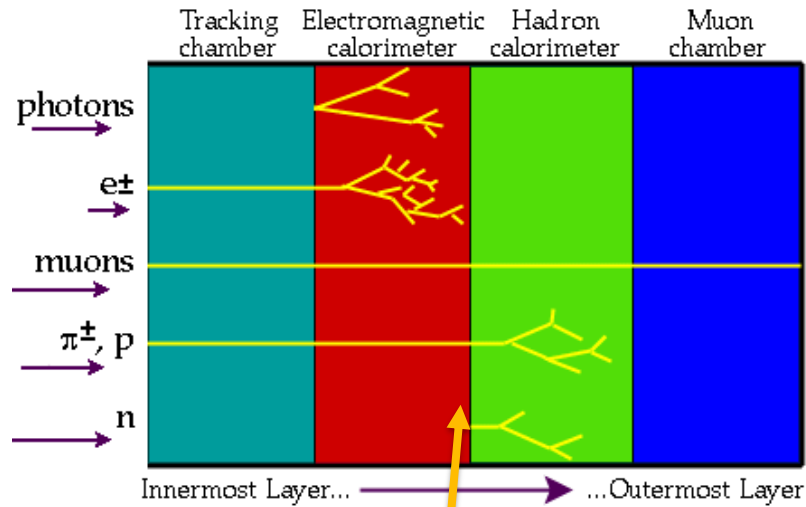


Rivelatori Traccianti

Permettono di ricostruire le tracce lasciate dalle particelle cariche ed il vertice di interazione

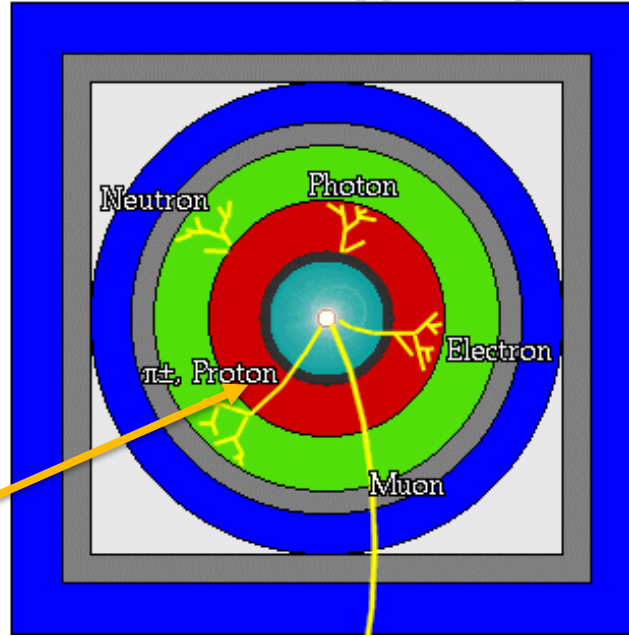


Apparati di rivelatori



A detector cross-section, showing particle paths

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

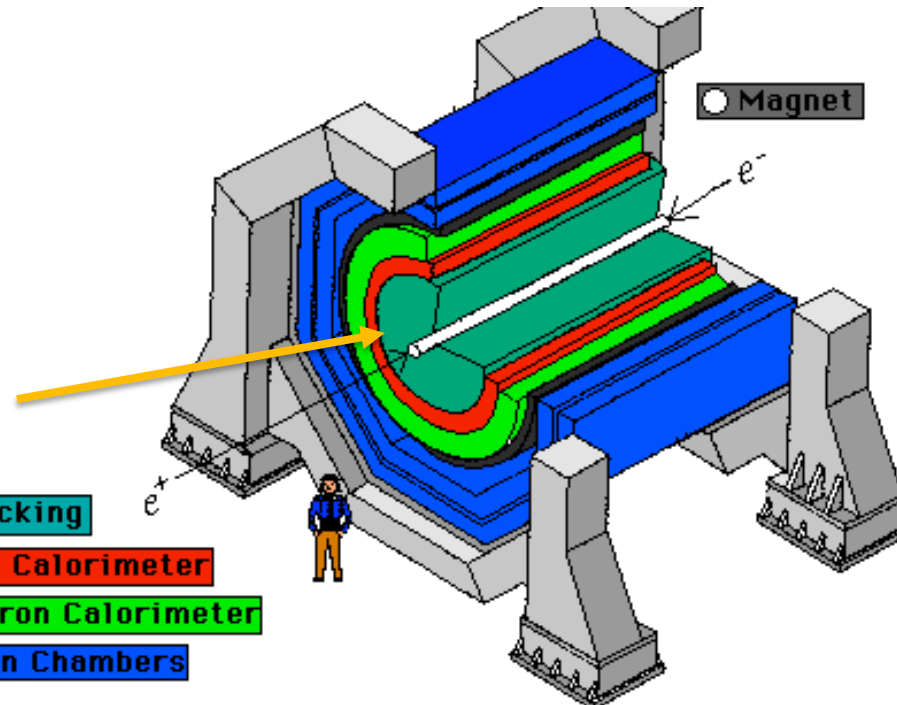


Calorimetri

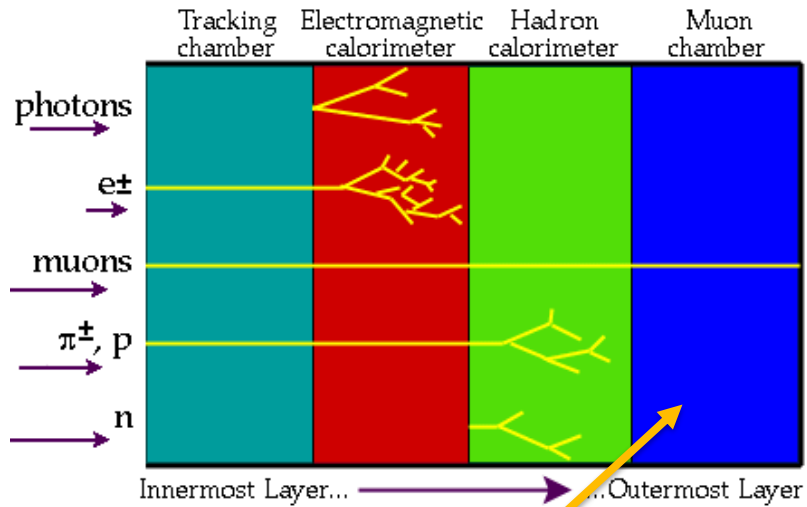
Misurano l'energia rilasciata dalle particelle. Le particelle diventano "sciame"

Calorimetri elettromagnetici → rivelano fotoni, elettroni e positroni

Calorimetri adronici → rivelano gli adroni

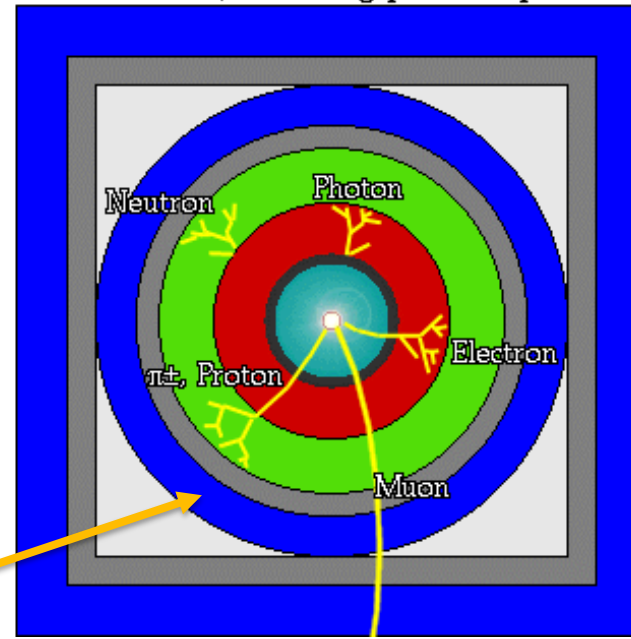


Apparati di rivelatori



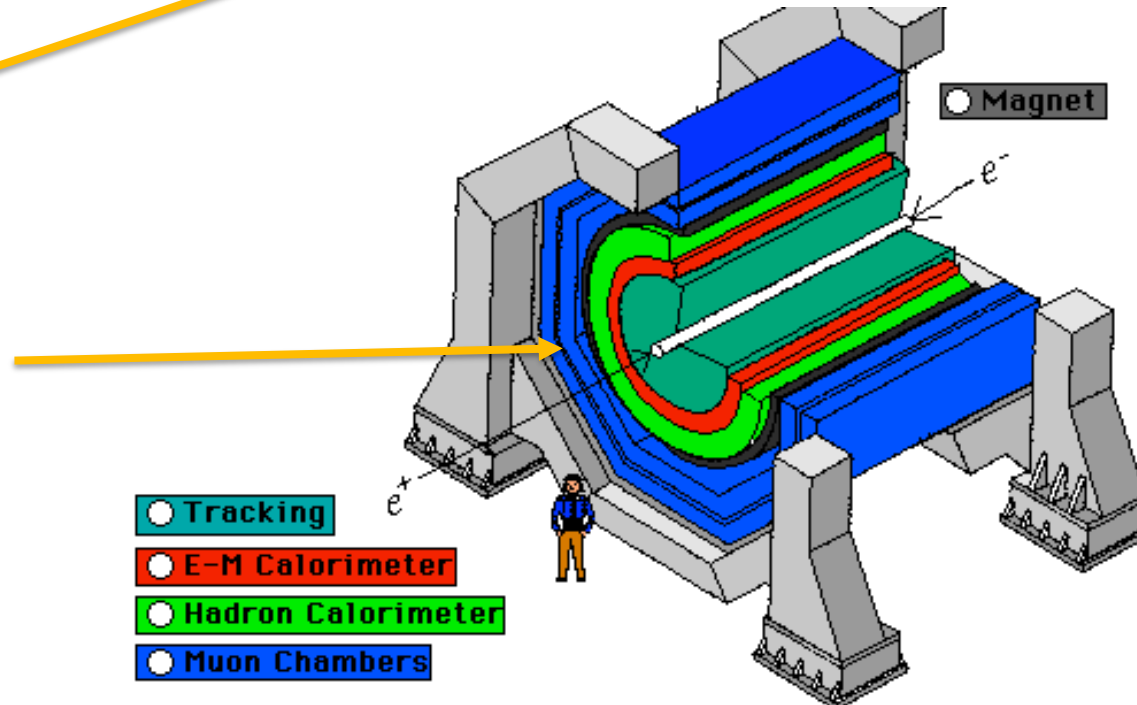
A detector cross-section, showing particle paths

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



Rivelatori per muoni:

Rivelano i muoni, particelle molto penetranti

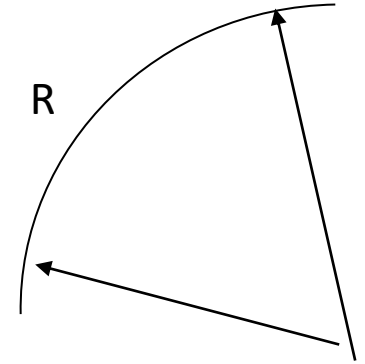
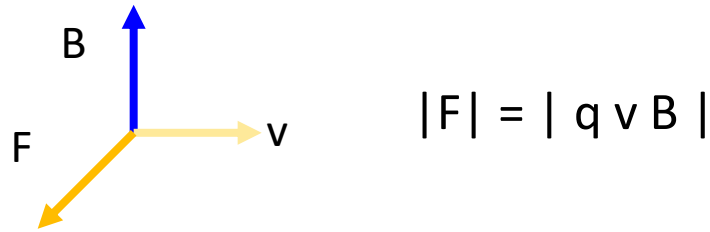


Misura della quantità di moto



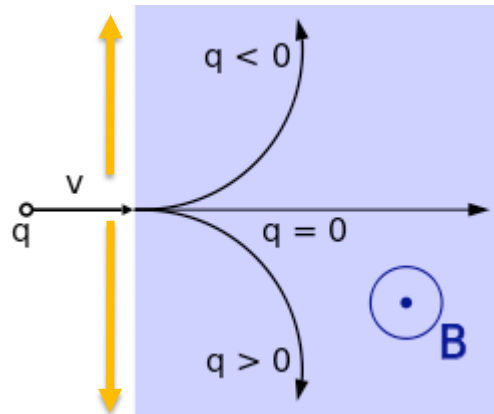
Per curvare le traiettorie delle particelle cariche, sono applicati campi magnetici di intensità B ed ortogonali alla traiettoria della particella. Si misura il raggio di curvatura R .

Forza di Lorentz



→ Si può ricavare il modulo della **quantità di moto** $P = mv = qBR$
→ dal verso di curvatura è anche possibile capire la carica (sfruttando le proprietà vettoriali di $\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$)

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



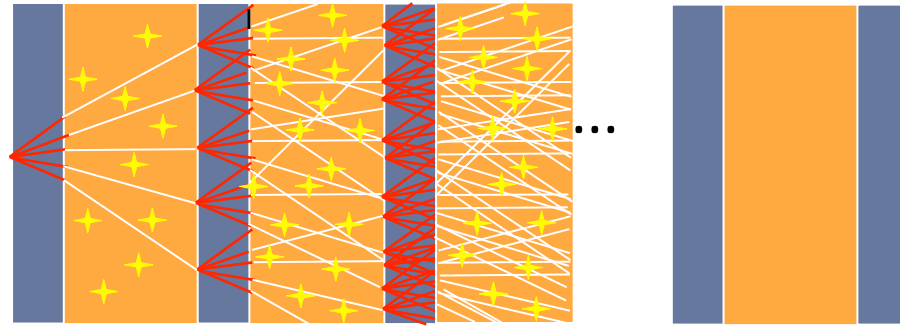
→ Si può conoscere il segno della carica

Misura dell'Energia



I calorimetri di ATLAS hanno una struttura a strati alternati di assorbitori passivi e strati di rivelatore. Le interazioni che avvengono a loro interno formano i fenomeni di **sciame elettromagnetico** (se la particella iniziale è un **elettrone, fotone o positrone**) o **sciame adronici** (se la particella iniziale è un **adrone**).

Particella carica
o neutra



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

assorbitore

fa degradare l'energia delle particelle cariche per ionizzazione e irraggiamento di un fattore noto.

rivelatore

misura l'energia depositata dalle particelle (segnali proporzionali all'energia depositata dalle particelle)

Quando lo sciame è completamente contenuto nel calorimetro, possiamo misurare l'energia e la carica elettrica della particella in ingresso grazie alle leggi di conservazioni tra stato iniziale e finale.

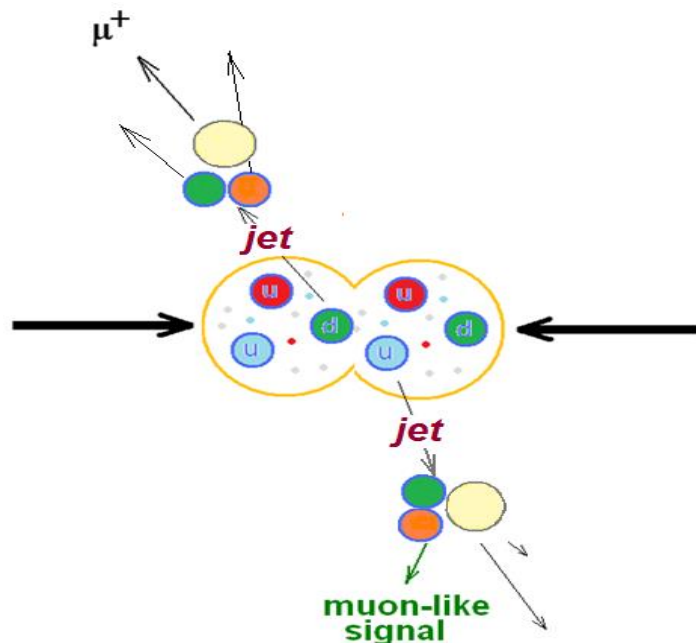
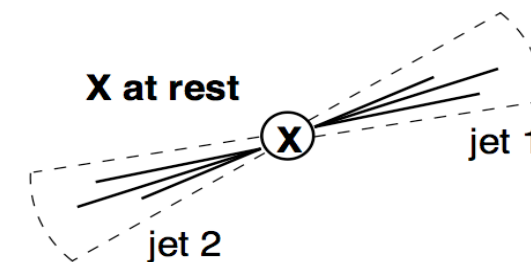
...e come appaiono i quarks

non esistono allo stato libero, a causa della forza forte, eccitano particelle (coppie materia-antimateria) di ogni tipo che cercano di frenarli e gli impediscono di muoversi liberamente.

convertono subito la loro energia in fiotti di particelle detti **jet**

I **jet** possono contenere particelle di ogni tipo, concentrate in una stretta regione angolare

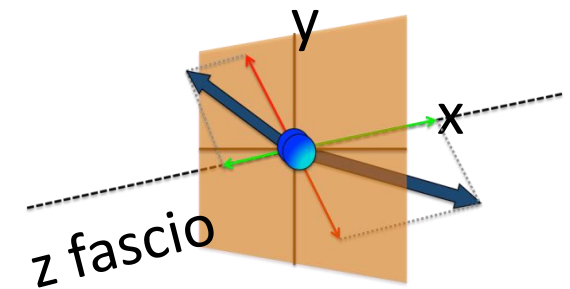
Confinamento adronico



Come si identifica un neutrino?

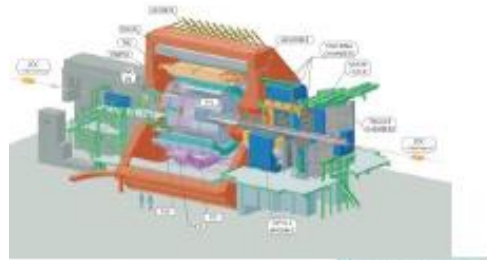


- I neutrini, così come i muoni sono le uniche particelle che emergono dal sistema dei rivelatori
- Al contrario dei muoni i neutrini interagiscono molto poco con i materiali dei rivelatori e non sono direttamente rivelabili
- Ad LHC vengono identificati come **quantità di moto mancante**
 - Ci si aspetta di avere nello stato finale la stessa quantità di moto che c'era nello stato iniziale (principio di conservazione)
 - se manca qualcosa probabilmente l'ha portato via un neutrino!!!!
 - Ai colliders adronici il bilanciamento della quantità di moto si calcola nel piano trasverso rispetto al fascio.

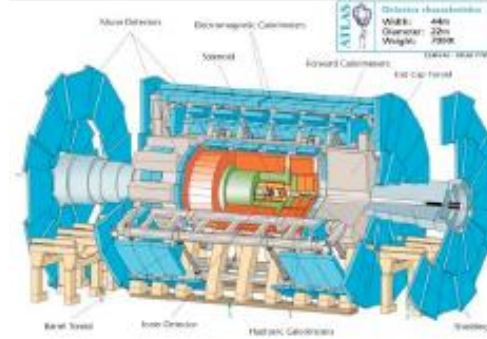


$$E_T^{mancante} = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

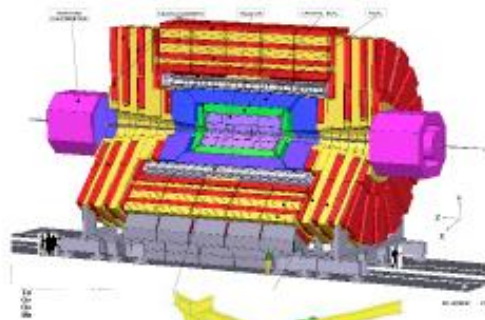
Gli Apparatzi lungo LHC



Alice



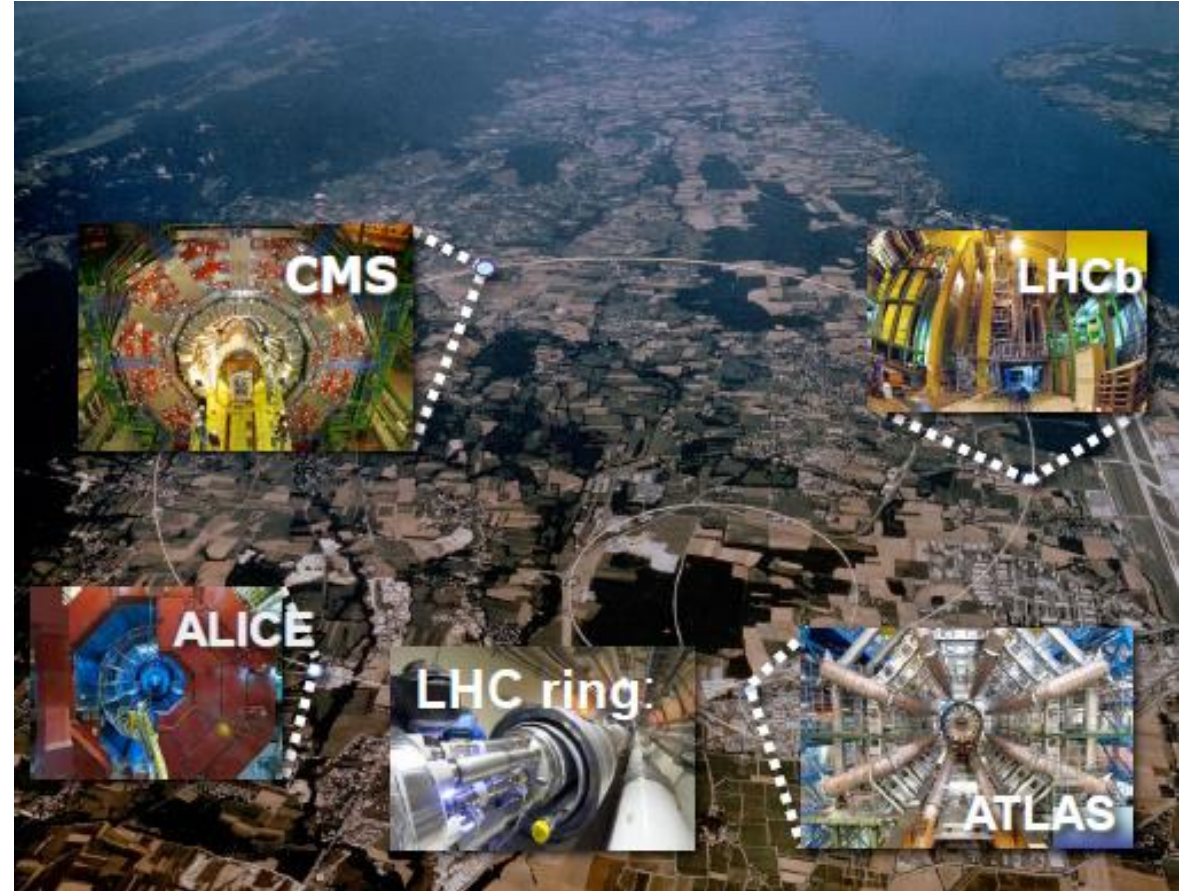
ATLAS



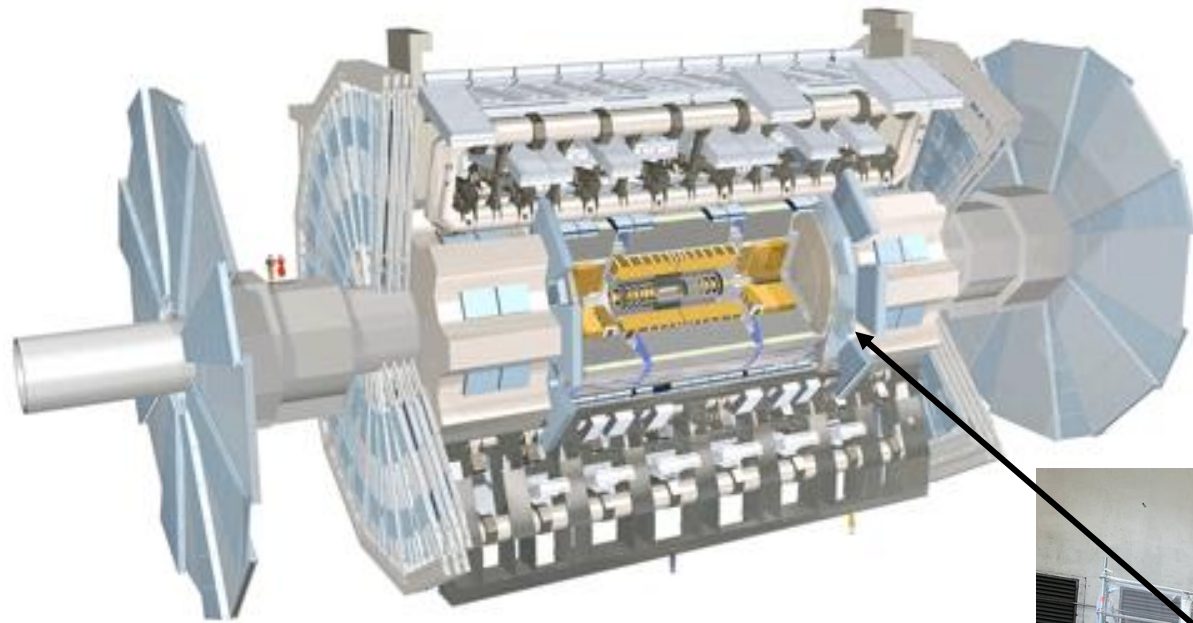
CMS



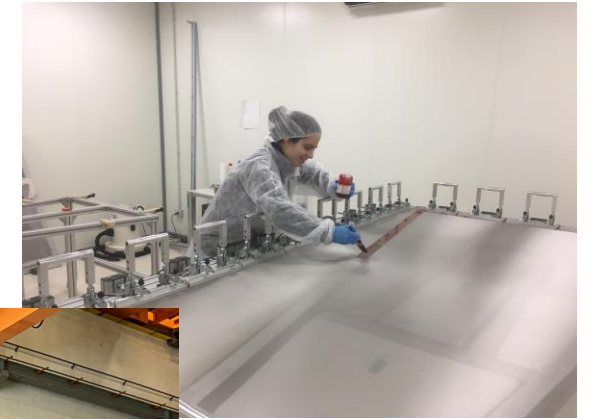
LHCb



L'esperienza ATLAS a LHC



lunghezza ~40 m
raggio ~ 10 m
peso ~ 7000 tons
canali di elettronica ~ 10^8
.... e ~ 3000 km di cavi



Alcuni dei magneti di ATLAS



RM3 ha partecipato alla costruzione di alcuni rivelatori per muoni

Future Circular Collider



- 1) cercare segnali di nuova Fisica ad LHC, usando canali fino ad oggi inesplorati: hh
- 2) Iniziare a pensare alle macchine del futuro

Future Circular Collider

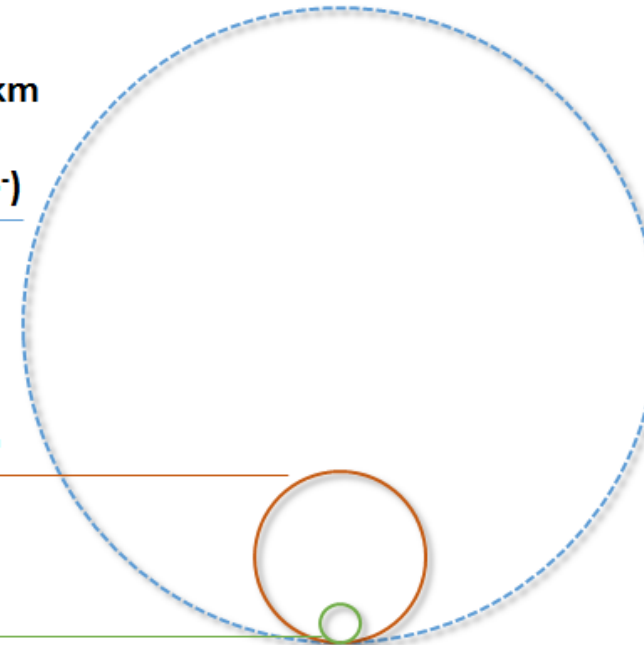
Circumference: 80-100 km
Energy: 100 TeV (pp)
>350 GeV (e^+e^-)

Large Hadron Collider

Circumference: 27 km
Energy: 14 TeV (pp)
209 GeV (e^+e^-)

Tevatron (closed)

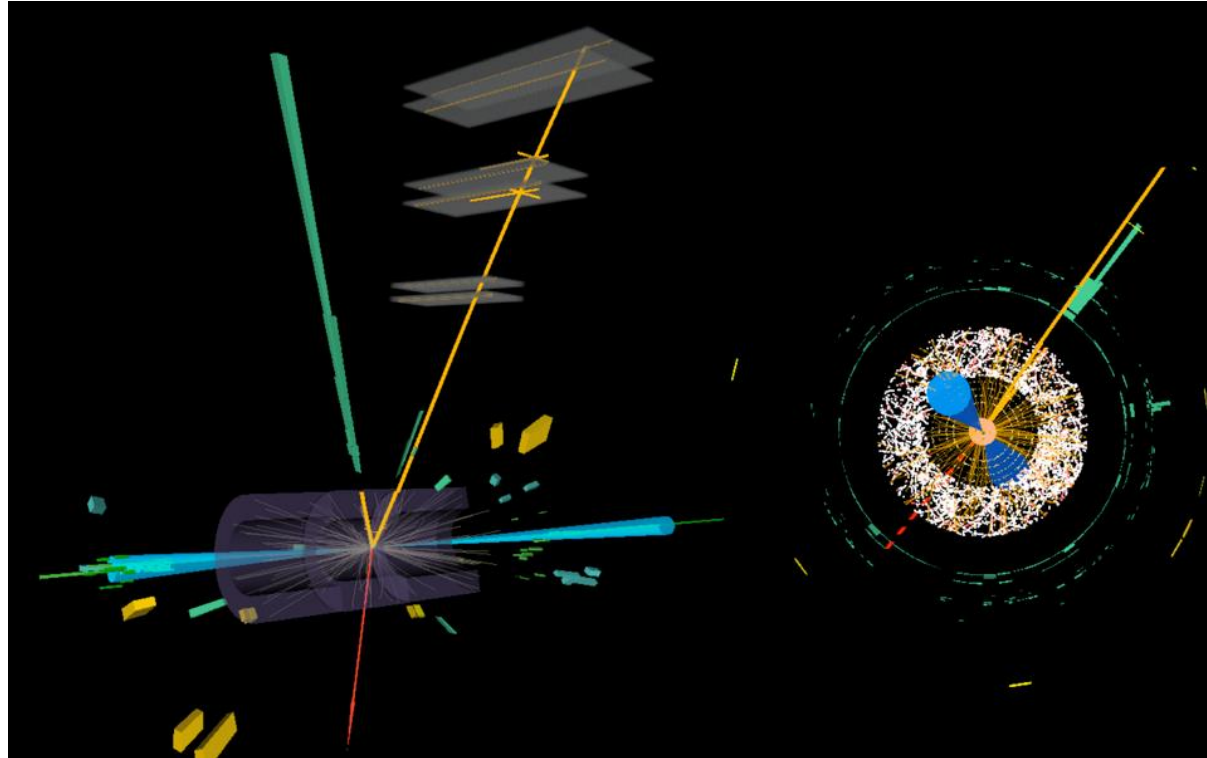
Circumference: 6.2 km
Energy: 2 TeV



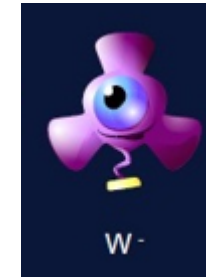
Rivelazione del Bosone di Higgs in WW



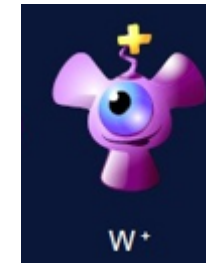
Analisi effettuata con contributo determinante di Roma Tre, che si è occupata anche della coordinazione dell'analisi.



Decade



W⁻



W⁺

Queste particelle decadono a loro volta in elettroni, muoni e neutrini



$$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow e^+ve^-v$$

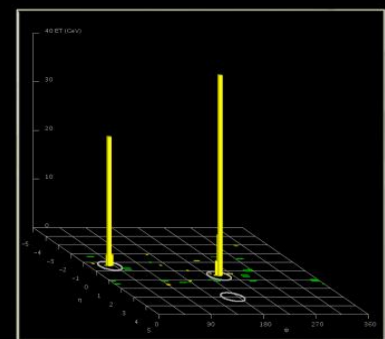
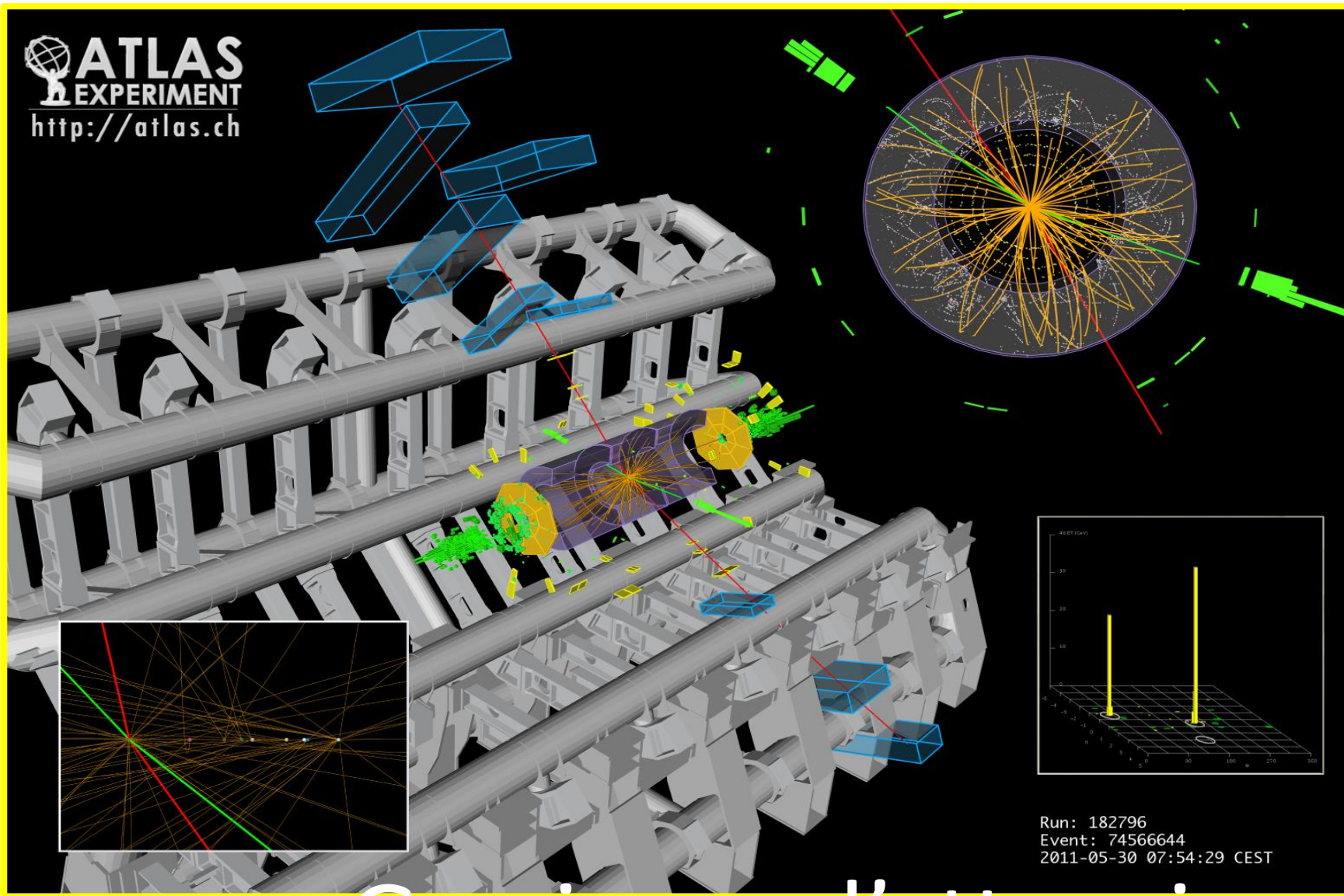
$$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow \mu^+v\mu^-v$$

$$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow e^+v\mu^-v$$

$$H \rightarrow W^+W^- \rightarrow \mu^+ve^-v$$

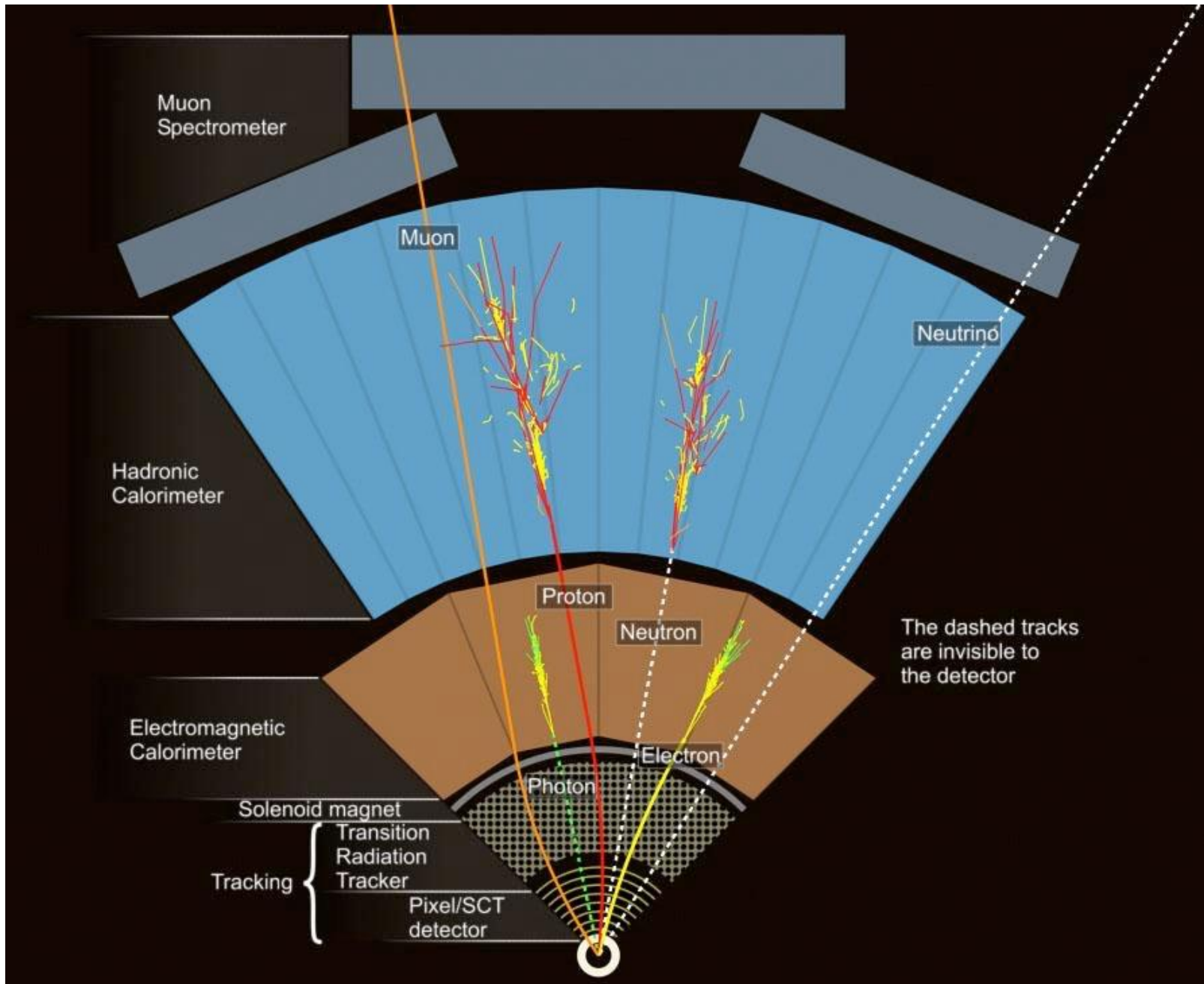
Si cercano eventi in cui **elettroni, muoni e neutrini soddisfano** delle richieste basate sulla teoria e leggi di conservazioni

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>



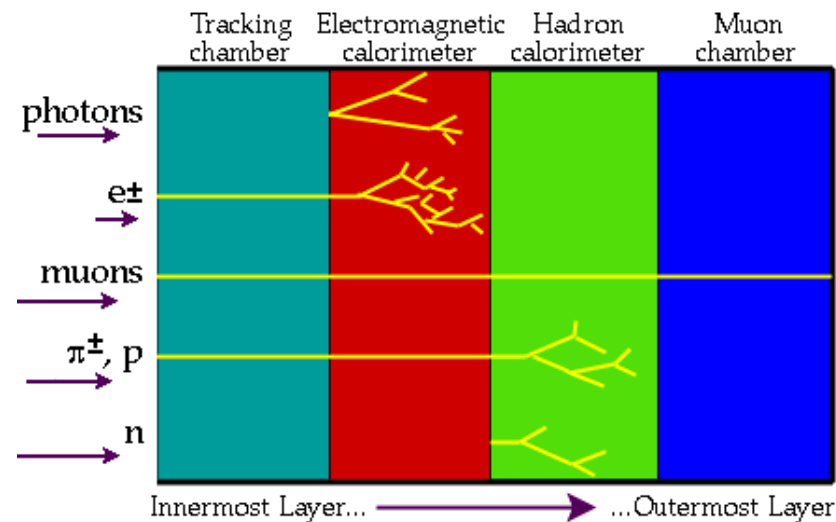
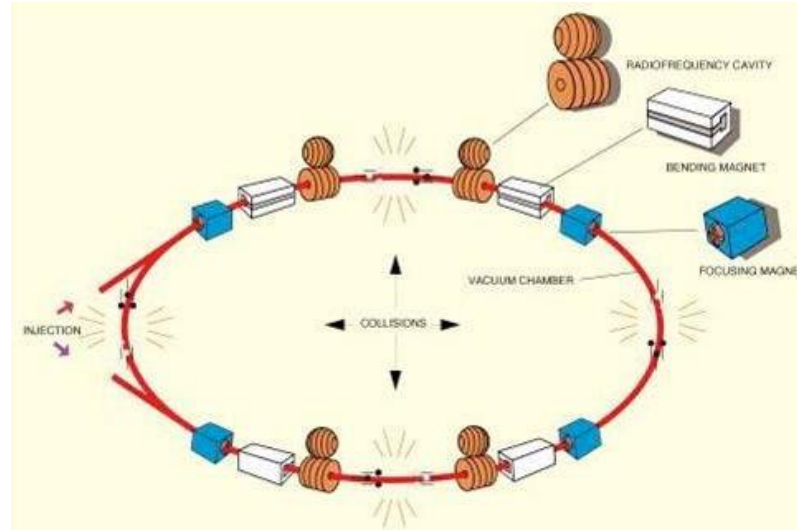
Run: 182796
Event: 74566644
2011-05-30 07:54:29 CEST

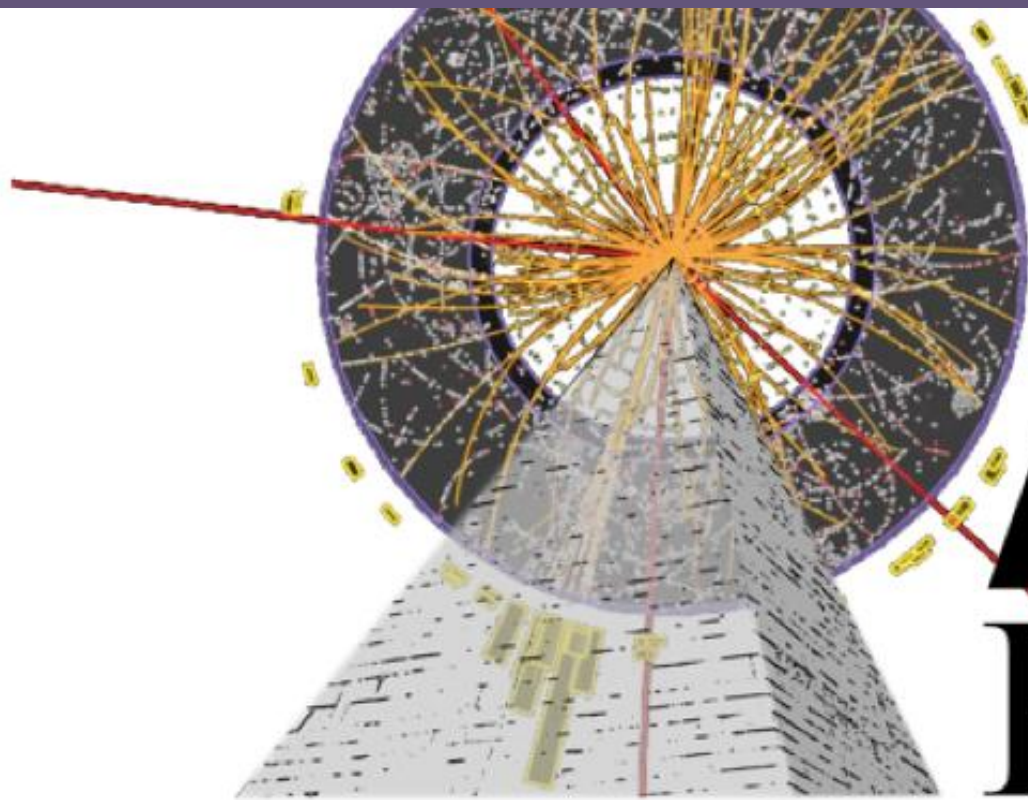
Uno spicchio di ATLAS



Riepilogando...

- Gli acceleratori sono lo strumento per studiare la fisica delle particelle elementari
- I rivelatori sfruttano gli effetti del passaggio delle particelle attraverso la materia per
 - **misurare l'energia delle particelle**
 - **Identificare le particelle**





ATLAS

ROMA TRE

Grazie dell'attenzione