

A complex visualization of particle tracks, likely from a detector like ATLAS or CMS. The tracks are represented as a dense, chaotic web of thin lines in various colors (blue, cyan, green, red) radiating from a central point. The background is black with a faint grid pattern.

Gli strumenti della fisica delle particelle

**Roberta Araldi
INFN Torino**

Masterclass, 23 Marzo 2012

Sommario

- Come si studia l'infinitamente piccolo:
 - gli acceleratori
 - i rivelatori
- Dove si studiano le particelle: il CERN
- L'acceleratore LHC e gli esperimenti



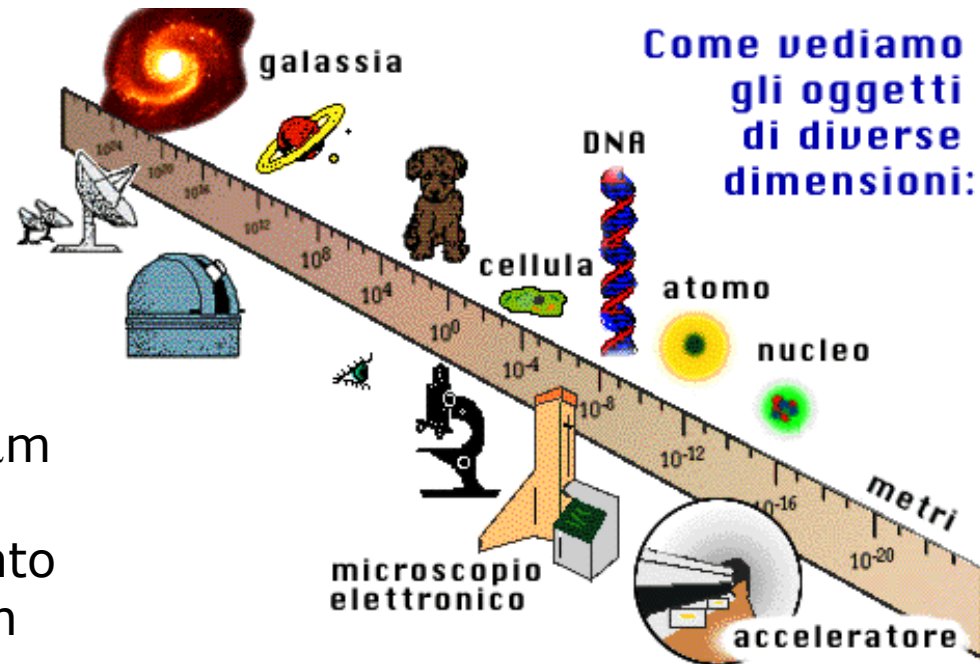
Gli strumenti di osservazione

Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare

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

Per osservare con un ingrandimento maggiore, bisogna usare onde con lunghezze d'onda inferiori.

La meccanica quantistica ci dice che una particella si comporta come un'onda e viceversa → si possono usare particelle come "sonde"



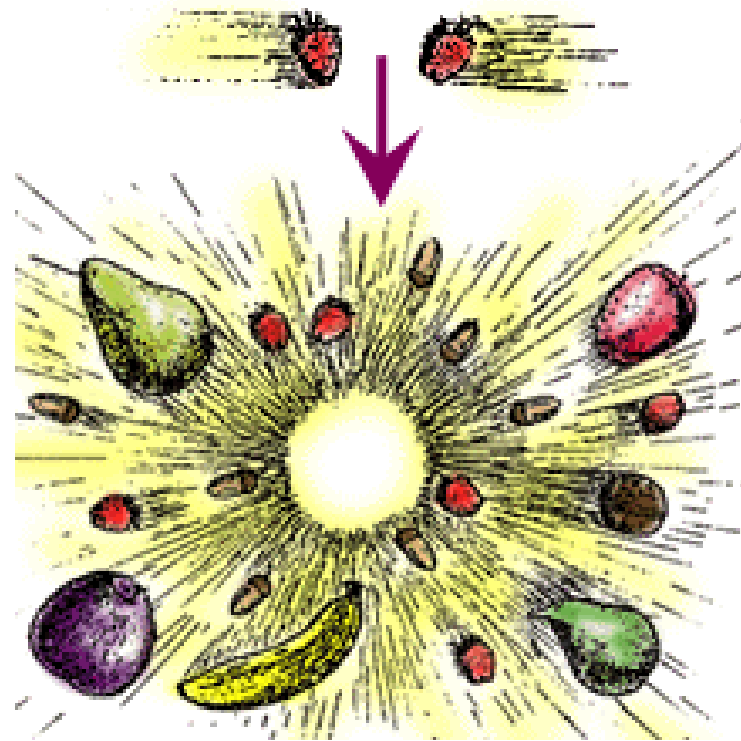
Quanto più la lunghezza d'onda è piccola, ossia quanto più l'energia è grande, tanto più piccole sono le dimensioni che possiamo esplorare/vedere

Gli acceleratori

Per studiare i costituenti più piccoli della materia si utilizzano gli **acceleratori**:

- in cui le particelle vengono accelerate ad energie molto elevate
- le si fanno urtare tra loro o contro bersagli esterni
- l'energia liberata può produrre nuove particelle, grazie alla relazione

$$E=mc^2$$



Gli acceleratori possono essere di 2 tipi:

- **Circolari**: dove le particelle girano più volte in un anello, prima di essere fatte collidere
- **Lineari**: dove le particelle percorrono una sola volta l'acceleratore da un'estremità all'altra

Le unita' di misura

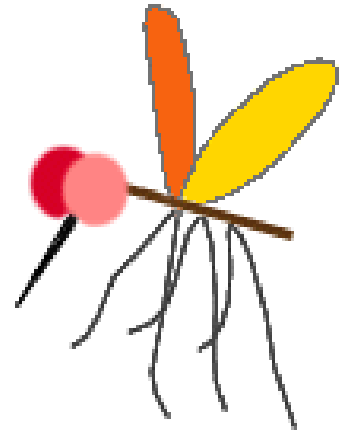
➔ **Energia:** si misura in **elettronvolt (eV)**.

E' l'aumento di energia di un elettrone che accresce il suo potenziale di 1 volt ($1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ joule)

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)



➔ **1 TeV e' tanto o poco?**

Dipende dalla scala a cui ci si trova:

→ una zanzara in volo ha un'energia cinetica pari a 2.4 TeV

→ un protone al Large Hadron Collider ha un'energia di 7 TeV

Ma:

- la massa di una zanzara è $\sim 1-5$ mg, cioè $1,5 \times 10^{21}$ (1500000000000000000000000) volte quella di un protone
- La zanzara vola ad una velocità di 2 Km/h
- Il protone viaggia ad una velocità vicina a quella della luce: 0.9999999991xc

Storia degli acceleratori (1)

➔ Dagli anni '30 in avanti, sono state sviluppate diverse tecniche per accelerare particelle, arrivando ad energie sempre piu' elevate.

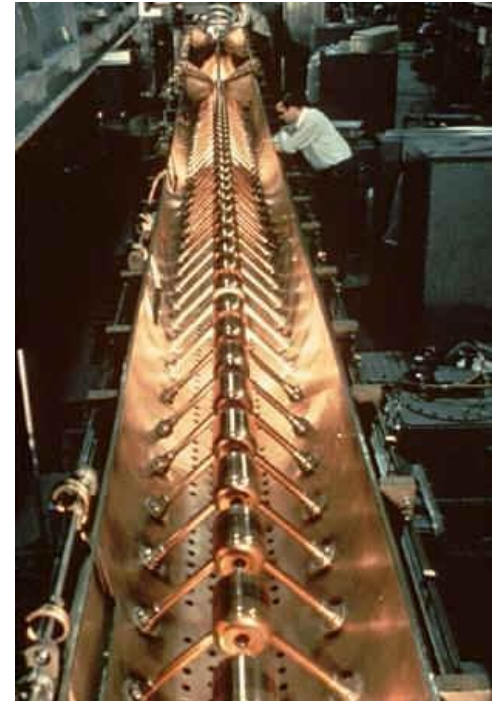


➔ I primi acceleratori sfruttavano campi statici, con differenze di potenziale pari a quelle tra la terra e una nuvola prima di un fulmine (10-20 MV) (Van der Graaf, Cockcroft-Walton)

➔ Per aumentare l'energia raggiungibile, si costruirono i primi **acceleratori lineari** (Wideroe)

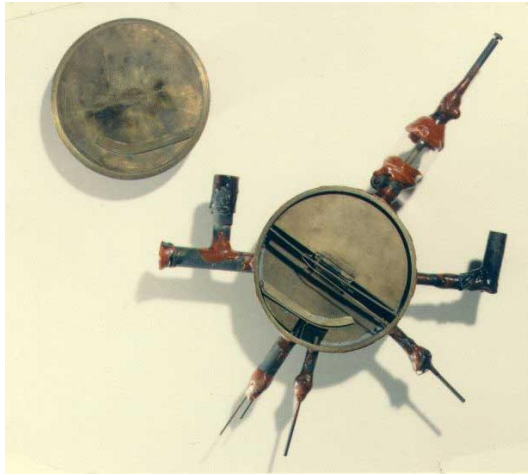
➔ invece di un'unica differenza di potenziale si accelerano le particelle attraverso diversi stadi

➔ per raggiungere energie elevate bisogna, pero', costruire macchine lunghissime...

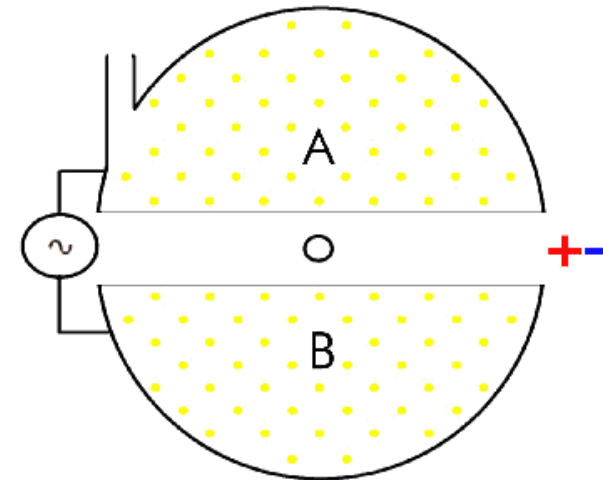


Storia degli acceleratori (2)

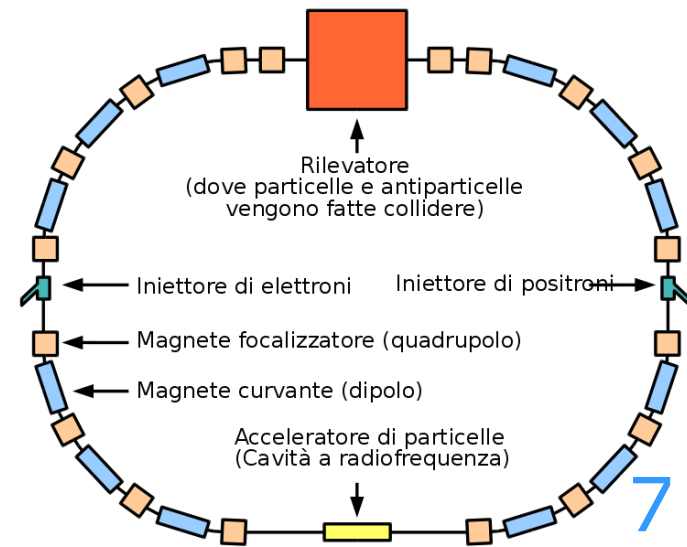
Il primo acceleratore circolare (**ciclotrone**) venne costruito da Lawrence (~ 10cm di diametro, accelerava protoni a 80000 eV).
La dimensione dell'acceleratore determina la massima energia raggiungibile.



Il piu' grande ciclotrone del mondo (costruito negli anni 70 a TRIUMF, Canada) ha un diametro di 18m e accelera p fino a 520 MeV

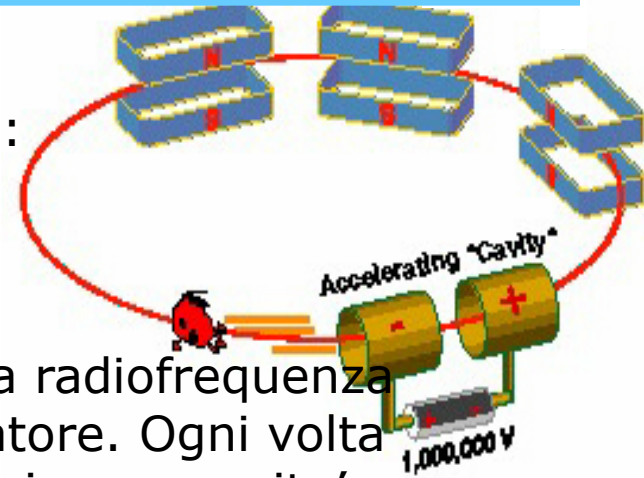


Il passo successivo e' il **sincrotrone**, dove i campi elettrici e magnetici sono variabili, in modo da far seguire alle particelle traiettorie circolari. Di nuovo sono il raggio della macchina e i campi magnetici a determinare l'energia raggiungibile



I componenti degli acceleratori

➔ I principali componenti di un acceleratore sono:



➔ **Cavita' a radiofrequenza:**

servono ad accelerare le particelle. Le cavita' a radiofrequenza sono poste a intervalli regolari lungo l'acceleratore. Ogni volta che una particella attraversa il campo elettrico in una cavita', parte dell'energia dalle onde radio e' passata alle particelle.

➔ **Vacuum chamber:**

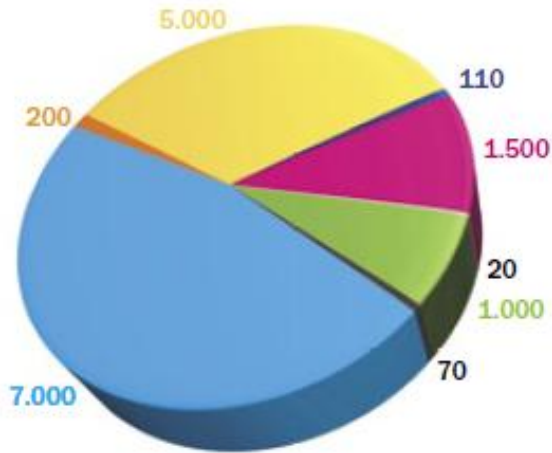
e' un tubo all'interno del quale si muovono le particelle del fascio. Il vuoto e' necessario per minimizzare le interazioni tra il fascio ed eventuali molecole di gas.

➔ **Magneti:**

si utilizzano diversi tipi di magneti, con funzioni differenti. Magneti dipolari sono utilizzati per far muovere le particelle lungo una traiettoria circolare. Magneti quadripolari sono utilizzati per focalizzare il fascio (come una lente focalizzante).

Utilizzo degli acceleratori

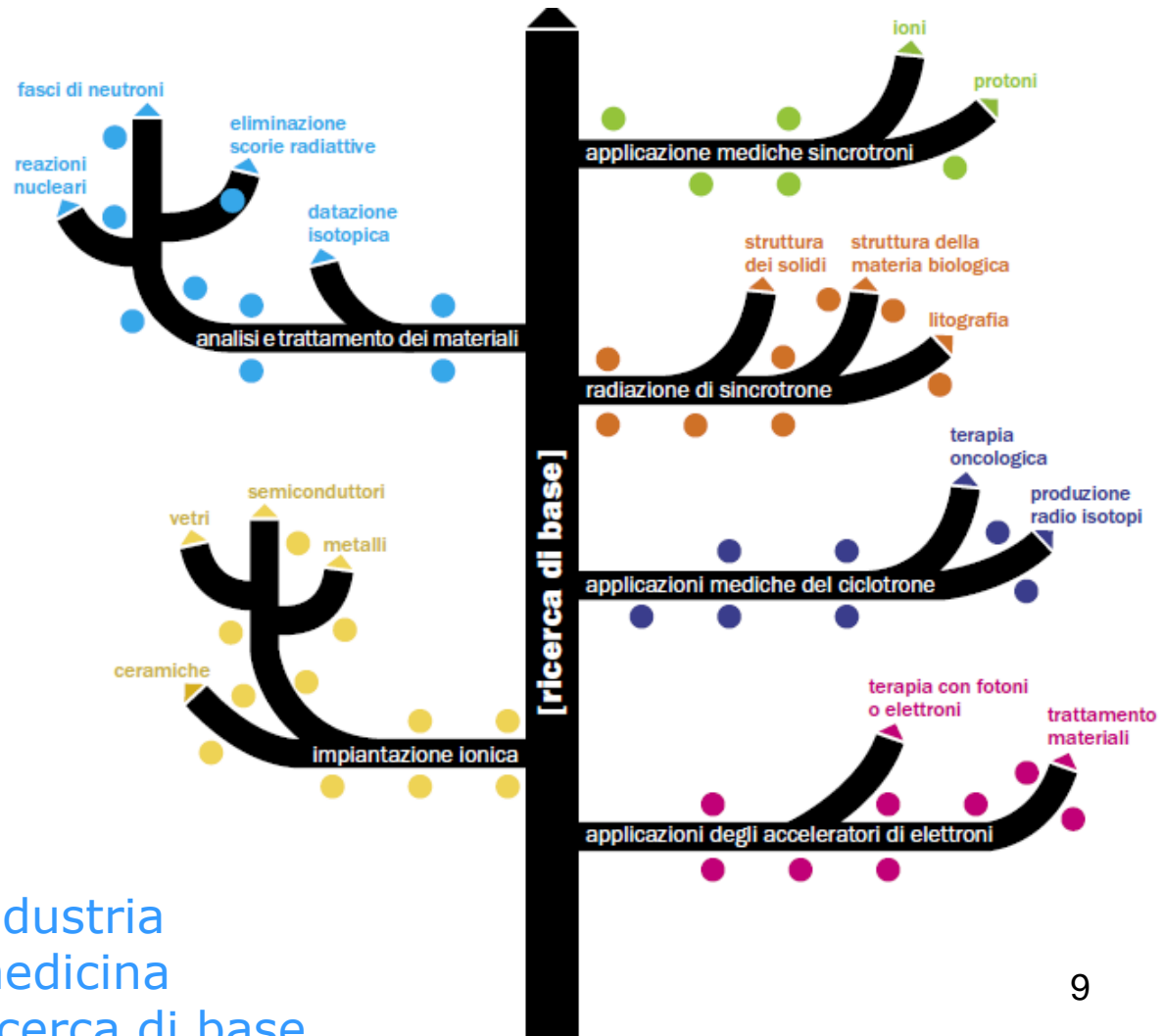
➔ Principali settori applicativi dei 15000 acceleratori nel mondo



Acceleratori nel mondo

- impiantazione ionica e modificazione di superfici
- radioterapia
- industria
- ricerca non nucleare
- produzione di isotopi medicali
- ricerca di fisica nucleare e delle particelle
- sorgenti di radiazione di sincrotrone
- adroterapia

~ 60% ➔ industria
 ~ 35% ➔ medicina
 ~ 5% ➔ ricerca di base



I centri di ricerca: il CERN

- ➔ Gli esperimenti di fisica delle alte energie si fanno in centri di ricerca. Uno dei principali e' il CERN di Ginevra

Centro Europeo di Ricerca Nucleare

- È il più grande laboratorio al mondo per la ricerca nel campo della fisica delle particelle.
- fornisce i mezzi agli scienziati per le loro ricerche:

gli ACCELERATORI e i RIVELATORI

- Al CERN si fa ricerca di base ("pura"), con lo scopo di imparare di più riguardo al nostro Universo.
- Le eventuali applicazioni possibili e i benefici per la società arrivano a posteriori!



Il CERN: un po' di storia

1954: viene fondato il CERN



1957: il sincrociclotrone (SC) e' il primo acceleratore (600MeV)



1976: il Super Proton Synchrotron (SPS) entra in funzione



2009: LHC e' entrato in funzione



LHC

➔ LHC e' l'acronimo di

LARGE HADRON COLLIDER

➔ **Perche' LARGE?**

Perche' e' un acceleratore circolare con una circonferenza di **27 KM**.
La dimensione di un acceleratore e' proporzionale alla massima energia raggiungibile.

➔ **Perche' HADRON?**

Perche' accelera adroni, cioe' protoni o ioni (particelle cariche e stabili)

➔ **Perche' COLLIDER?**

Perche' le particelle sono fatte circolare in direzioni opposte e poi fatte scontrare.

In questo modo si ottiene piu' energia disponibile (per creare, per esempio, nuove particelle) ($E_{Tot} = E_{beam1} + E_{beam2}$) rispetto agli esperimenti a bersaglio fisso ($E_{Tot} \sim \sqrt{E_{beam}}$)

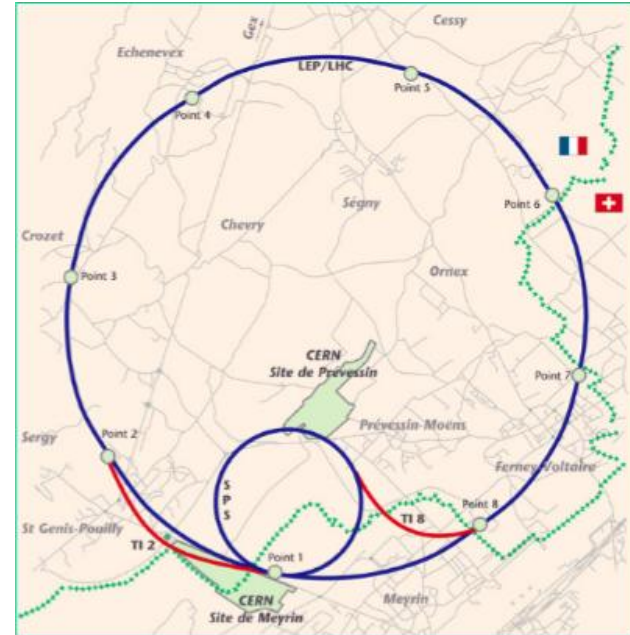
Il tunnel di LHC

➔ LHC sfrutta il tunnel sotterraneo costruito per il LEP, un precedente acceleratore del CERN, smontato nel 2000. Il tunnel si trova al confine tra Francia e Svizzera

Il tunnel sotterraneo ha alcuni vantaggi:

- piu' semplice da costruire
- minor impatto ambientale
- la crosta terrestre e' una buona schermatura per le radiazioni

Il tunnel e' ad una profondita' di circa 100m sotto il suolo (175m sotto il Jura e 50m nella zona piu' vicina al lago di Ginevra)



L'acceleratore: i magneti

➔ LHC e' particolarmente innovativo nelle tecnologie utilizzate per realizzare i componenti dell'acceleratore:

9600 Magneti:

- 1232 dipoli lunghi 15m, utilizzati per far curvare il fascio

- 392 quadrupoli focalizzanti, lunghi 5-7m

- "insertion quadrupoles" per comprimere il fascio vicino ai punti di interazione, cosi' da aumentare la probabilita' di collisione



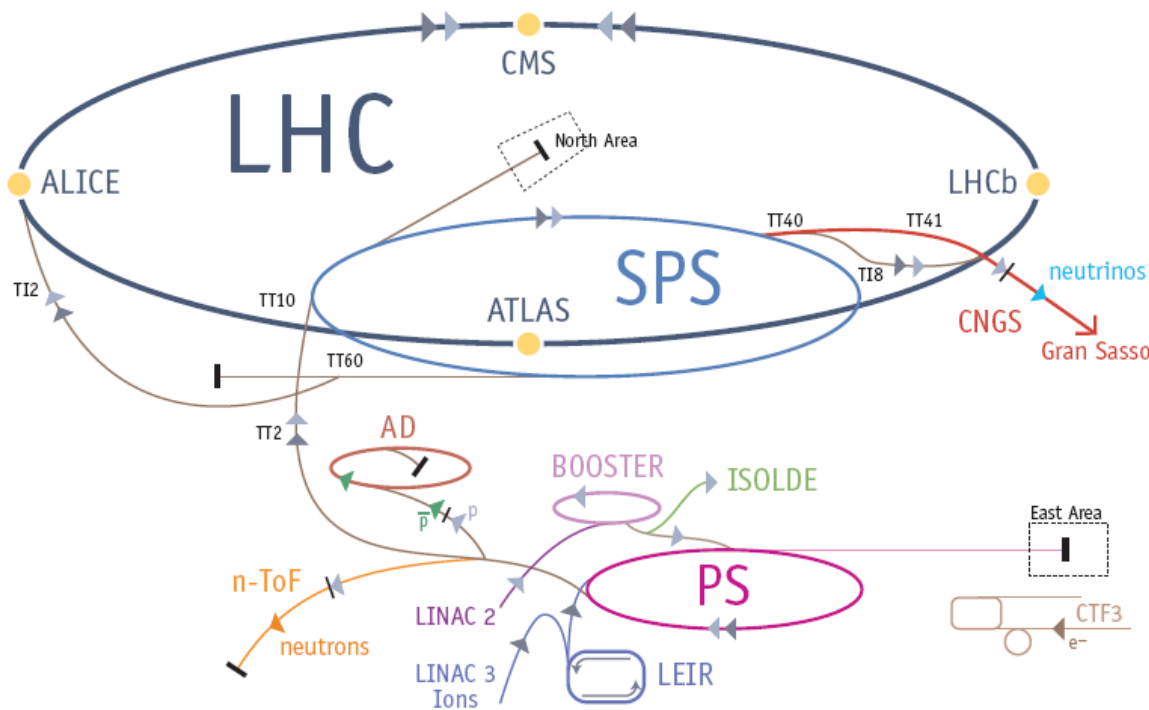
Per dare un'idea della precisione richiesta per far scontrare i fasci di particelle... e' come voler far scontrare 2 aghi lanciati a 10 Km di distanza...

L'acceleratore: i dipoli

- ➔ I dipoli sono stati realizzati con tecnologie estremamente all'avanguardia
→ sviluppi necessari per curvare particelle da 7 TeV nell'anello di LHC
- ➔ Sono magneti superconduttori che possono realizzare un campo di 8.3 T lungo la loro lunghezza → il campo magnetico terrestre è $\sim 10^{-5}$ T
- ➔ La corrente nei dipoli sarà ~ 11850 A → la corrente in una casa è ~ 100 A
- ➔ Sono realizzati con cavi di NbTi che diventano superconduttori (conducono elettricità senza resistenza) a 10K.
→ si sono realizzati 7600 Km di cavi, fatti da 270000 Km di fili intrecciati ~ 6 volte la circonferenza della terra.
Ogni filo è fatto da ~ 8000 filamenti con diametro di $7 \mu\text{m}$ (1 capello è $\sim 50 \mu\text{m}$)
- ➔ LHC lavorerà a 1.9 K (-271.3 C). Questa temperatura è raggiunta iniettando He superfluido nei magneti.
→ LHC è il più grande sistema criogenico... e uno dei posti più freddi sulla terra



Come si accelerano le particelle?



1) i protoni sono ottenuti "strappando" elettroni a atomi di idrogeno. Si usano ~ 2 nanogrammi al giorno (un miliardo di anni per consumare 1 grammo di H_2)

2) sono iniettati nel PS Booster a 50 MeV dal Linac2 e accelerati a 1.4 GeV

3) passano al PS e sono accelerati fino a 25 GeV

4) passano all'SPS dove raggiungono 450 GeV

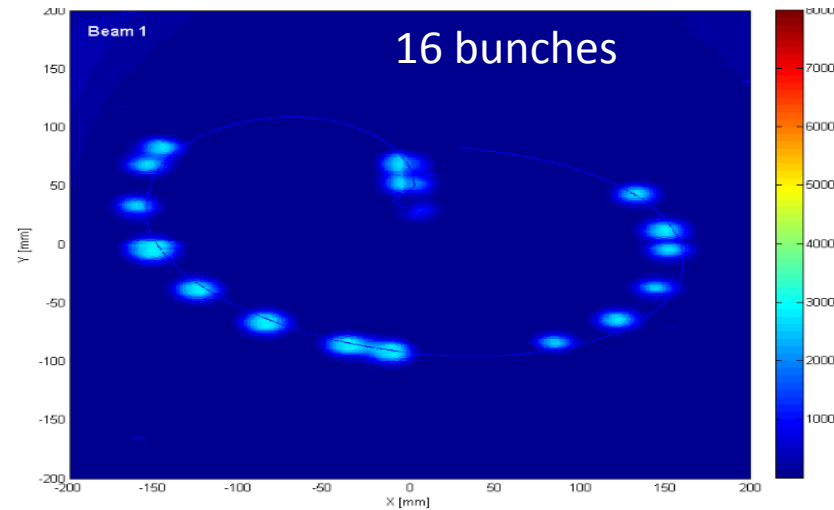
5) passano all'LHC dove possono essere accelerati fino a 7 TeV (filling time ~ 4 minuti, fase di accelerazione ~ 20 minuti)

I fasci di particelle

➔ Come viaggiano le particelle?

Le particelle viaggiano raggruppate in "bunches".

Ogni bunch avra' 10^{11} protoni e ogni fascio potra' contenere 2808 bunches. Vicino ai punti di interazione la dimensione dei bunches e' $\sim 16 \mu\text{m}$ (1 capello e' $\sim 50 \mu\text{m}$)



➔ Quante collisioni al secondo ci saranno?

La probabilita' di collisione tra 2 particelle e' molto piccola. I bunches si scontrano ~ 40 milioni di volte al secondo e ogni volta ci sono 20 collisioni (per un totale di **800 milioni di collisioni/s**).

➔ Quanto dura un fascio nell'acceleratore?

Il fascio circola per 10 ore. Un protone fa **11000 giri di LHC al secondo**. In 10 ore percorre 10 miliardi di Km (Terra-Nettuno-Terra)

Un po' di numeri...

→ L'energia del fascio sarà sensibile alla...luna!

La crosta terrestre è sensibile all'attrazione lunare che può causare una "marea" terrestre di 25 cm
→ questo movimento causa una variazione di 1mm (di cui bisogna tener conto) nella circonferenza di LHC

→ Quanto costa LHC?

Circa 3 miliardi di euro

→ Quanta energia elettrica consuma?

120 MW (pari al consumo delle case nel cantone di Ginevra)

Quantity	number
Circumference	26 659 m
Dipole operating temperature	1.9 K (-271.3°C)
Number of magnets	9593
Number of main dipoles	1232
Number of main quadrupoles	392
Number of RF cavities	8 per beam
Nominal energy, protons	7 TeV
Nominal energy, ions	2.76 TeV/u (*)
Peak magnetic dipole field	8.33 T
Min. distance between bunches	~7 m
Design luminosity	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
No. of bunches per proton beam	2808
No. of protons per bunch (at start)	1.1×10^{11}
Number of turns per second	11 245
Number of collisions per second	600 million

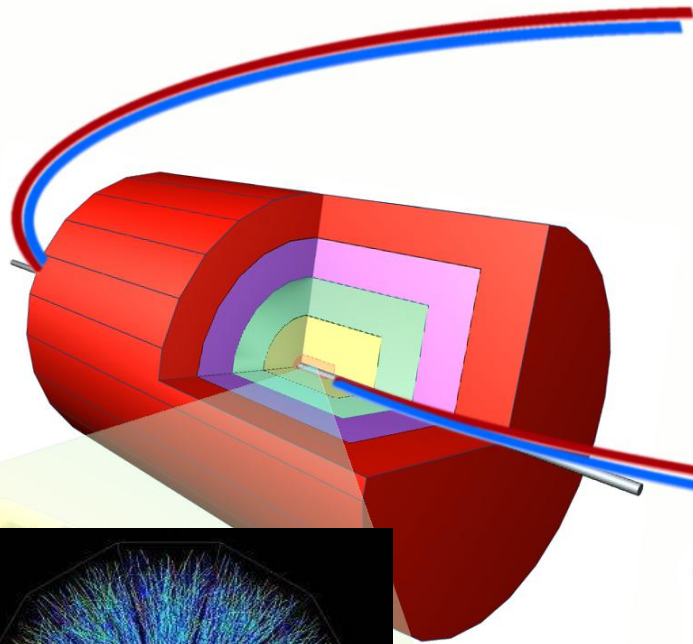
(*) Energy per nucleon

I goals di LHC

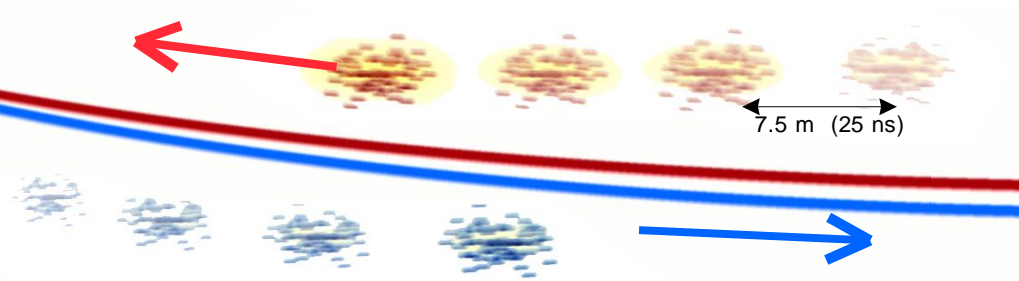
- ➔ Il modello standard non risponde a tutte le domande
 - ➔ Non spiega l'origine della massa
→ ricerca del bosone di Higgs
 - ➔ Non ha una descrizione unificata di tutte le forze
→ ricerca di particelle supersimmetriche
 - ➔ La materia visibile e' solo il 4% dell'Universo.
→ ricerca di particelle o fenomeni connessi con la dark matter e la dark energy
- ➔ Le collisioni di ioni pesanti permetteranno di riprodurre uno stato della materia analogo a quello esistente nell'universo primordiale, pochi istanti dopo il Big Bang (**Quark Gluon Plasma**).

Come si rivelano le particelle?

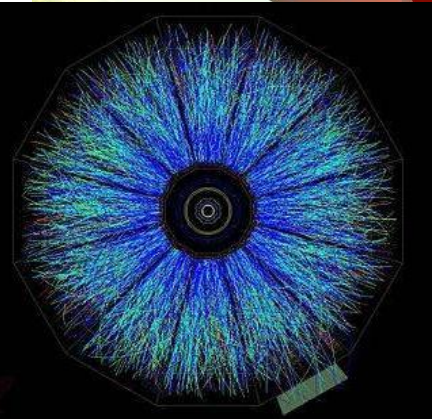
➔ Le particelle si studiano con i **rivelatori**



- I rivelatori sono strumenti che rilasciano un segnale al passaggio di una particella al loro interno



- I rivelatori servono a:
 - Identificare il tipo di particelle prodotte
 - Misurarne le caratteristiche
- Per stabilire:
 - Che cosa è accaduto nella collisione e se si è prodotto qualche fenomeno interessante



Le impronte delle particelle

→ Particelle di famiglie diverse interagiscono in modo differente con la materia che attraversano, lasciando, cioè, "impronte" diverse



→ Il lavoro che il fisico delle particelle deve fare per identificare le particelle passate nei rivelatori e' simile a quello di chi studia le tracce lasciate da animali.

→ A partire dalle impronte, dalla loro dimensione, dalla distanza tra le orme si ottengono informazioni sugli animali...

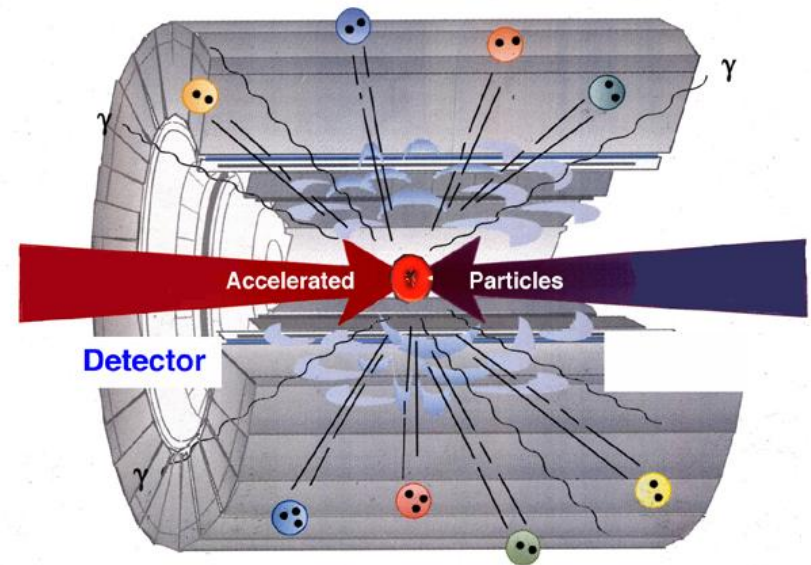
Quali particelle si rivelano?

→ Solitamente le particelle che cerchiamo sono instabili, cioè hanno vita breve e decadono in particelle più leggere e stabili (cioè che vivono a sufficienza per essere rivelate)

→ le particelle che vengono rivelate sono i prodotti di decadimento (adroni, fotoni, elettroni, muoni, neutrini...)

→ dalla misura delle loro proprietà si risale alle proprietà delle particelle che le hanno generate

→ solo combinando i segnali lasciati in diversi rivelatori possiamo identificare le particelle e studiare le loro caratteristiche

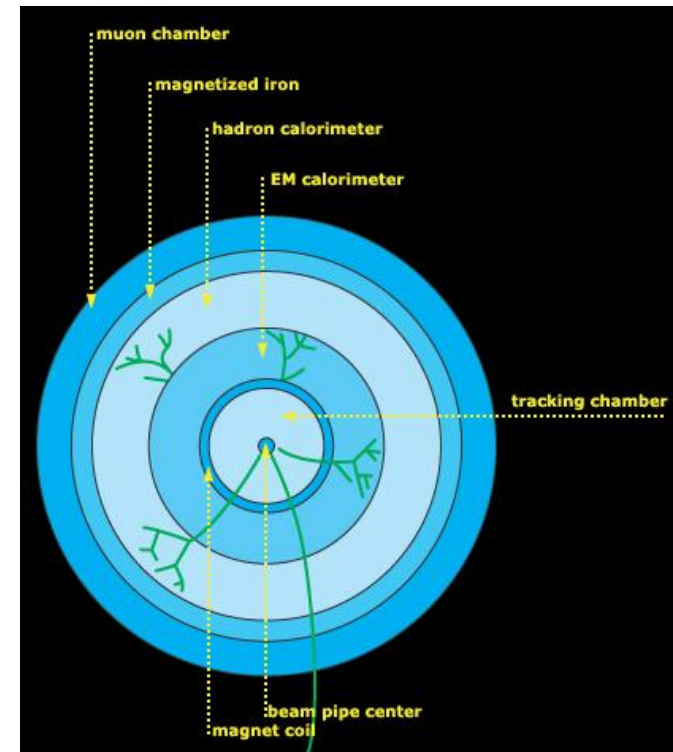


Tipi di rivelatori

➔ Ai collider i rivelatori hanno forma cilindrica (la forma ideale sarebbe sferica), intorno al punto in cui i fasci di particelle collidono

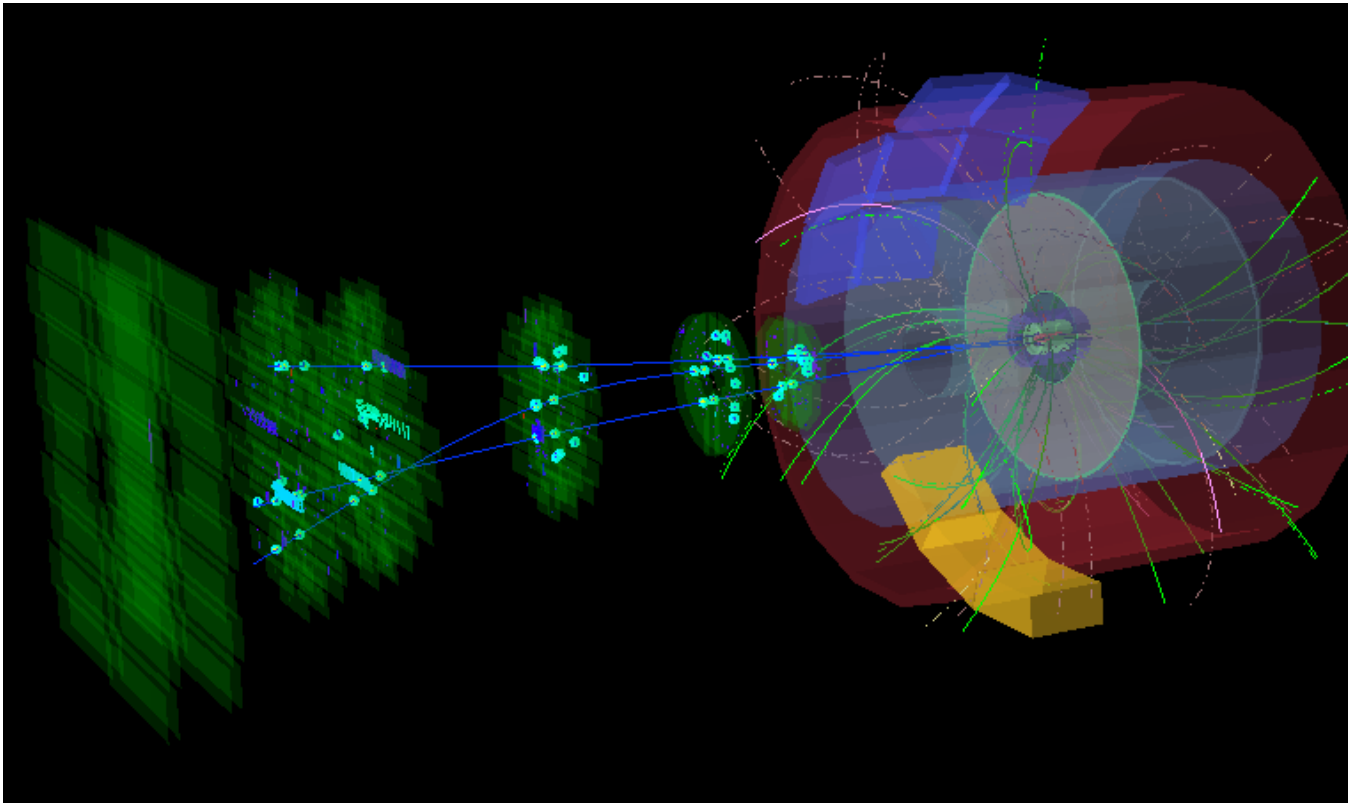
➔ Si possono identificare 3 categorie di rivelatori

- Rivelatori per il tracciamento
→ per studiare le tracce delle particelle
- Calorimetri
→ per misurare la loro energia
- Rivelatori per l'identificazione delle particelle
→ per riconoscere le particelle



Rivelatori di tracciamento

- Particelle dotate di carica elettrica ionizzano la materia attraversata: Elettroni, estratti dalle orbite degli atomi del materiale, sono raccolti e trasformati in un segnale elettrico che poi viene registrato

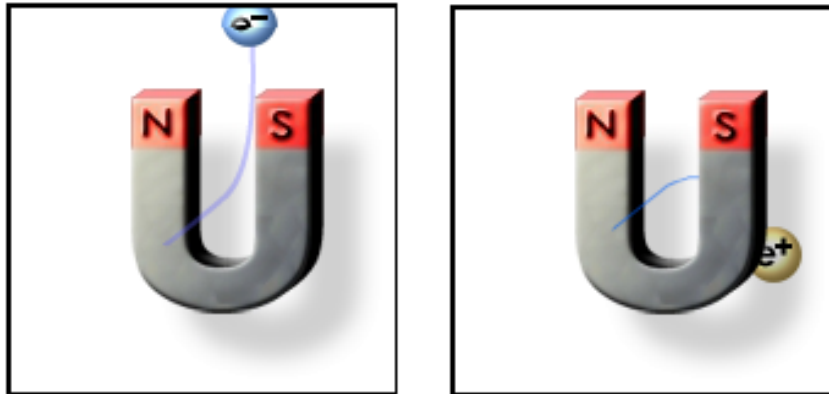


- Unendo «idealmente» i segnali elettrici rilasciati in «zone» del rivelatore si possono di ricostruire le tracce

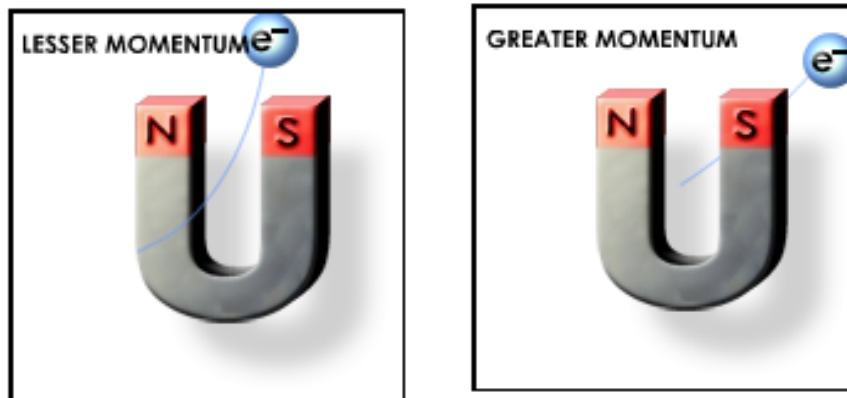
Campi magnetici

➔ Per misurare la carica e il momento di particelle cariche, si utilizzano spesso rivelatori per il tracciamento posti in un campo magnetico

➔ la curvatura dipende dal segno della carica elettrica



➔ il raggio di curvatura dipende dalla velocità della particella

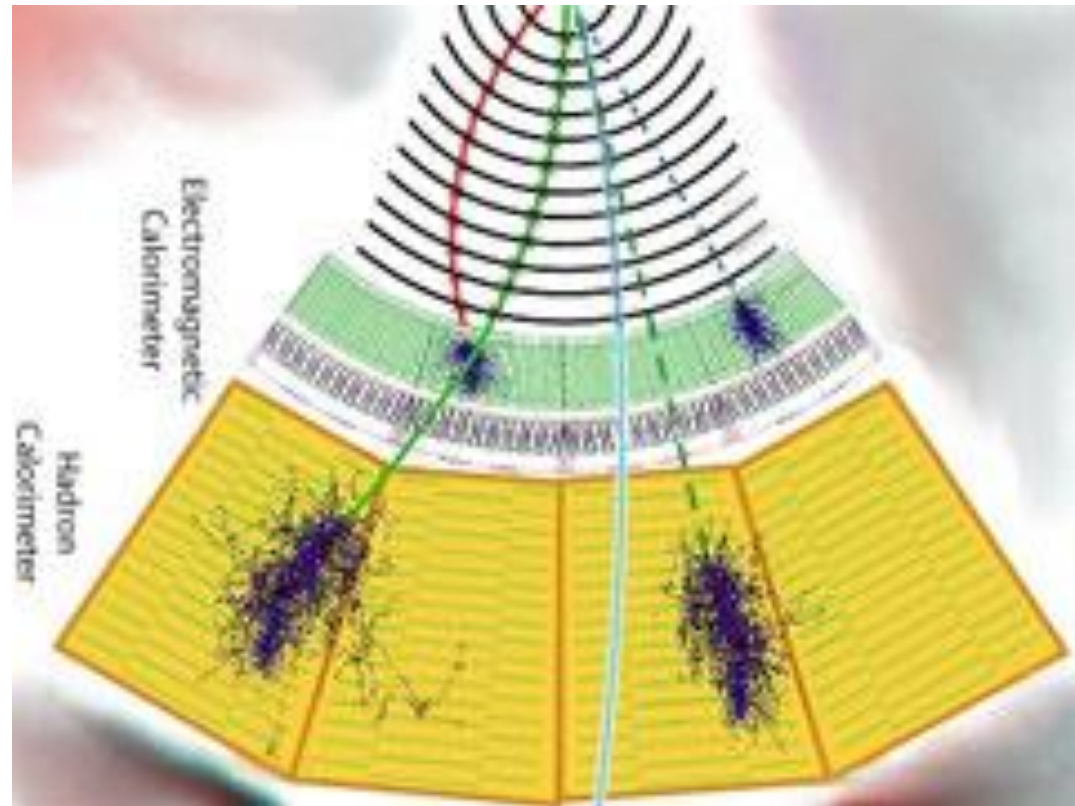


I calorimetri

→ I calorimetri misurano l'energia persa da una particella nell'attraversarli

Sono disegnati, per fermare, cioè assorbire, la maggior parte delle particelle provenienti da una collisione

I calorimetri sono fatti da strati di materiali passivi, che fungono da assorbitore, e da materiali attivi, che trasformano in un segnale l'energia rilasciata



→ I calorimetri possono fermare tutte le particelle, tranne i muoni e i neutrini

Rivelatori per l'identificazione di particelle

➔ Esistono diverse tecniche per l'identificazione delle particelle.
Per esempio:

➔ **Misure di tempo di volo**

La velocità si misura valutando il tempo di volo tra due punti

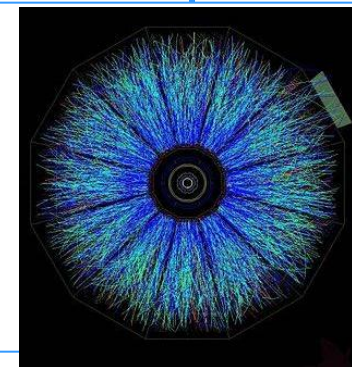
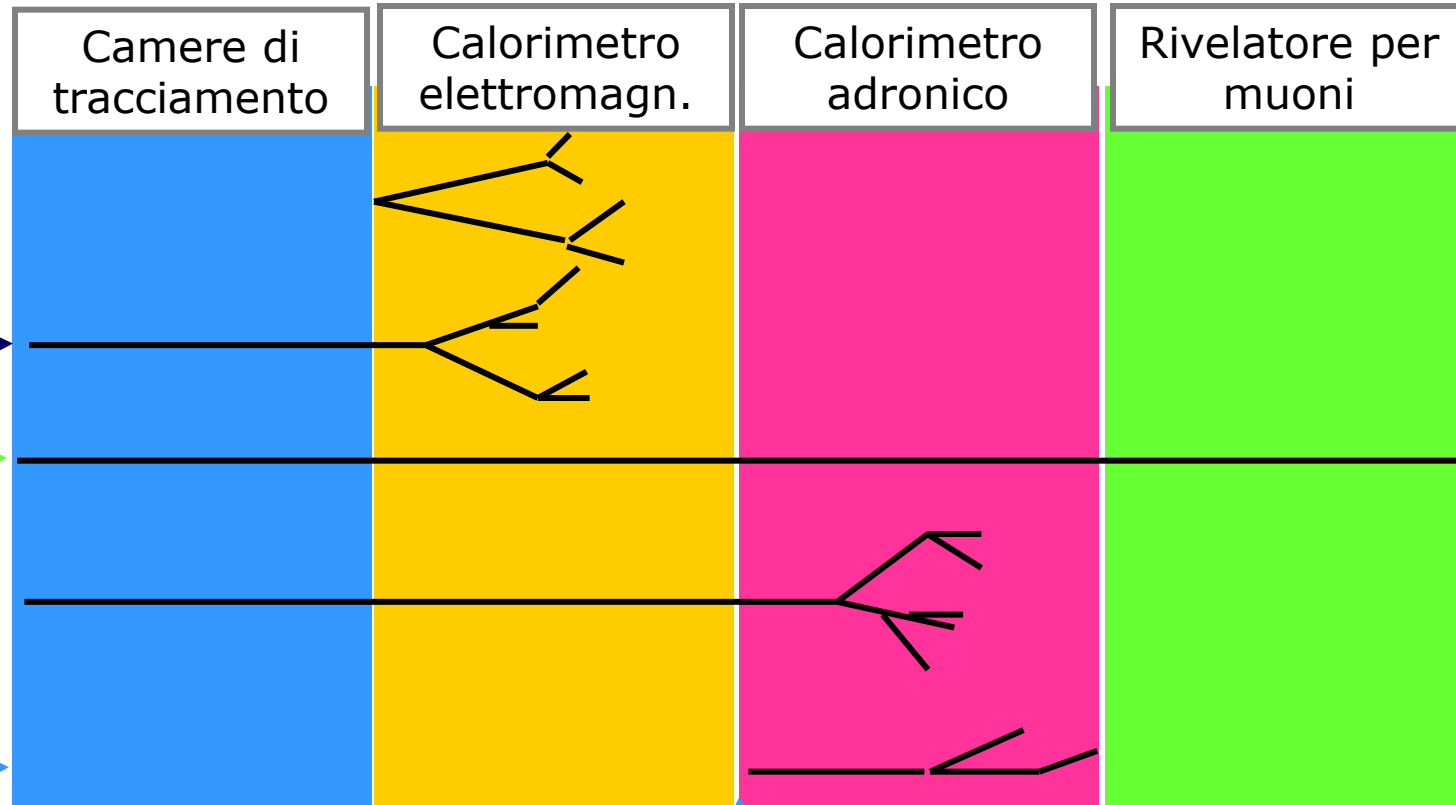
➔ **Misure di energy loss:**

Una particella carica perde energia per ionizzazione in base alla sua velocità

➔ **Rivelatori Cherenkov**

La radiazione Cherenkov è la luce emessa quando una particella carica viaggia più veloce della luce in un mezzo. La luce è emessa ad un angolo definito, che dipende dalla velocità della particella stessa. Combinando l'informazione sulla velocità, con quella sul momento si può risalire alla massa

I rivelatori



Rivelatori traccianti:

Per ricostruire tracce lasciate da particelle cariche

Calorimetri:

Misurano l'energia rilasciata dalle particelle

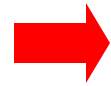
Cal. elettromagnetici → rivelano sciami prodotti da fotoni, elettroni

Cal. adronici → rivelano sciami adronici

Rivelatori per muoni:

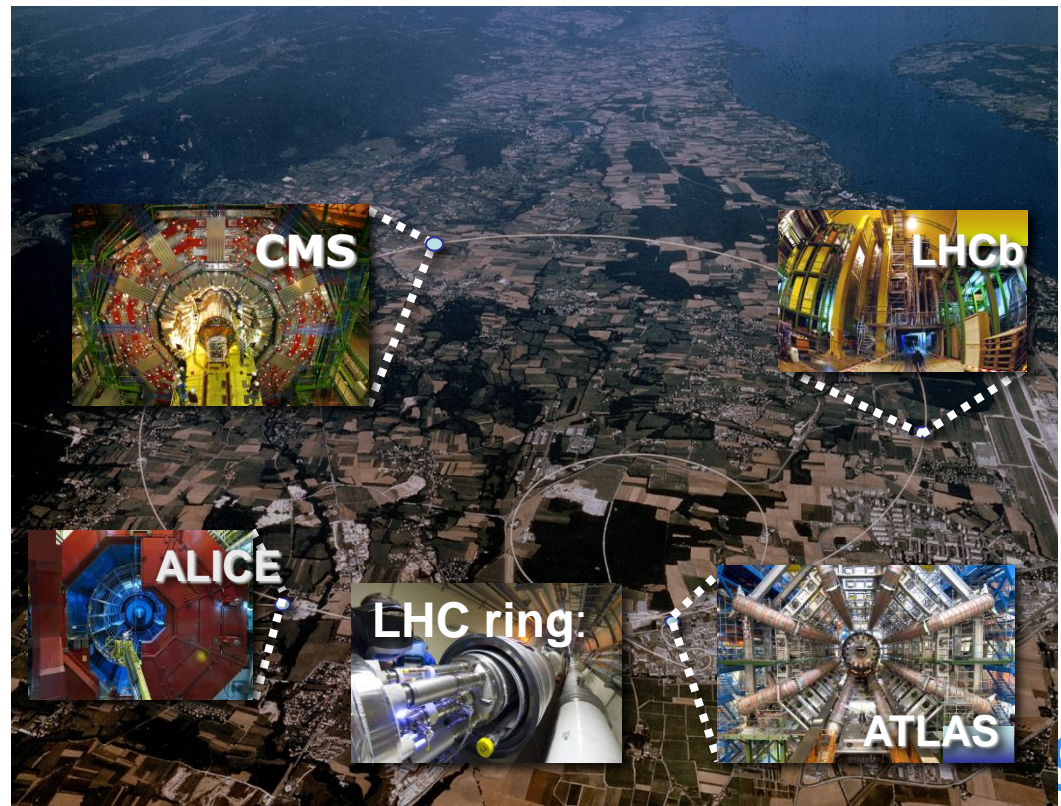
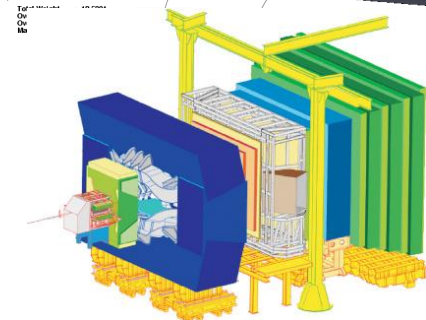
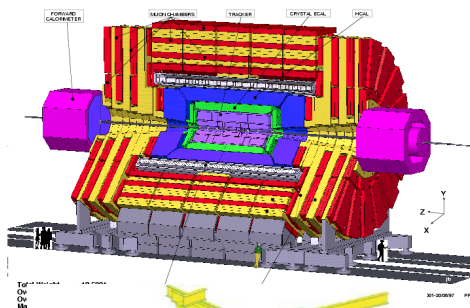
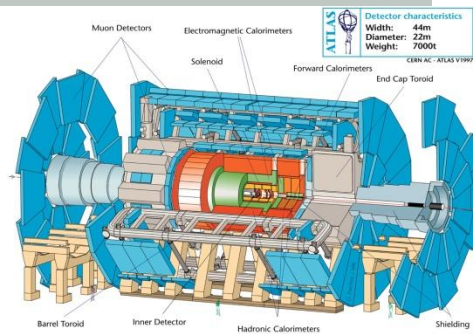
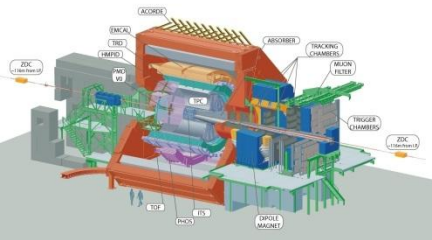
Rivelano i muoni, particelle molto penetranti

Gli esperimenti a LHC



Ci sono 6 esperimenti a LHC:

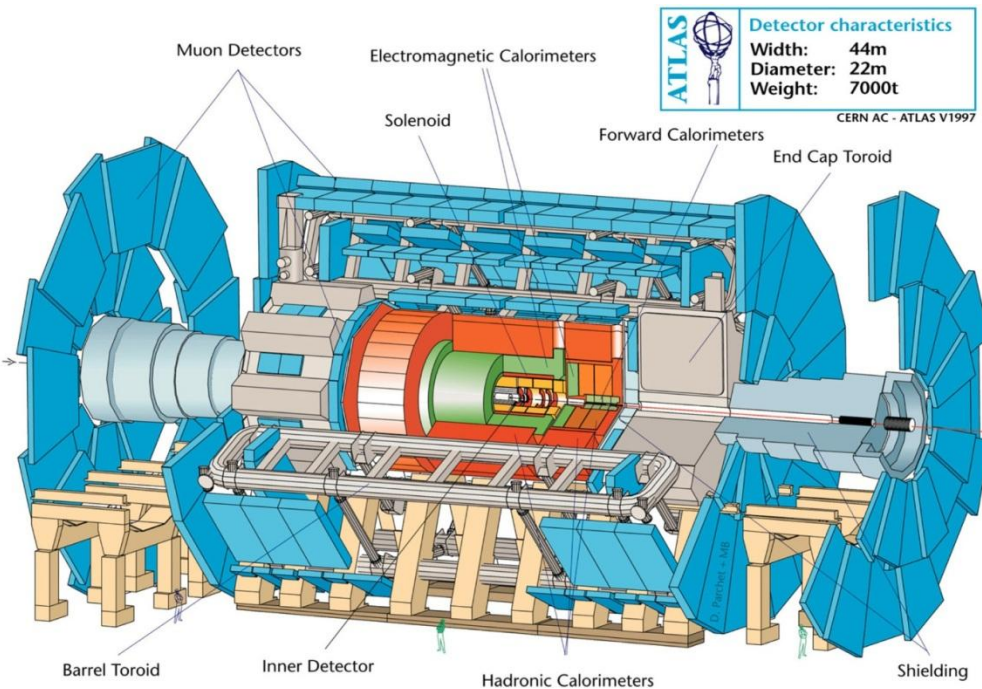
- ALICE: A Large Hadron Collider
- ATLAS: A Toroidal LHC ApparatuS
- CMS: Compact Muon Solenoid
- LHCb
- LHCf
- TOTEM



ATLAS

➔ E' un esperimento "multi-purpose" ideato per studiare dal bosone di Higgs alle particelle supersimmetriche

➔ Dimensioni di ATLAS: meta' di Notre Dame a Parigi

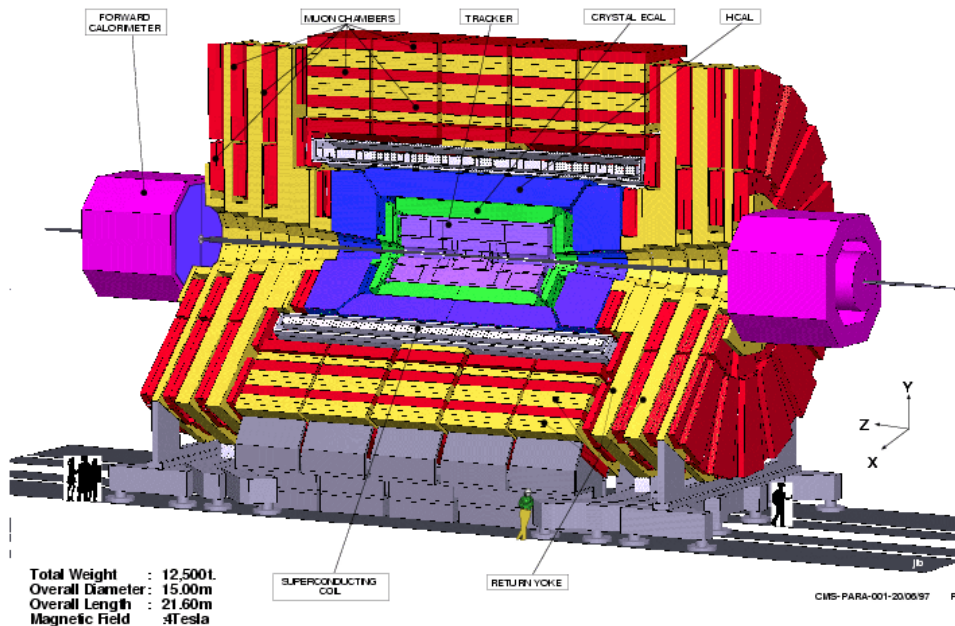


Size	46 m long, 25 m high and 25 m wide
Weight	7000 tonnes
Design	barrel plus end caps
Material cost	540 MCHF
Location	Meyrin, Switzerland.

CMS

➔ E' un esperimento "multi-purpose" con goals simili a quelli di ATLAS, ma con soluzioni tecniche diverse

➔ Peso di CMS (12500 tonnellate):



2500 X



La collaborazione:

2000 partecipanti (partecipazione Torinese)

180 istituti

38 nazioni

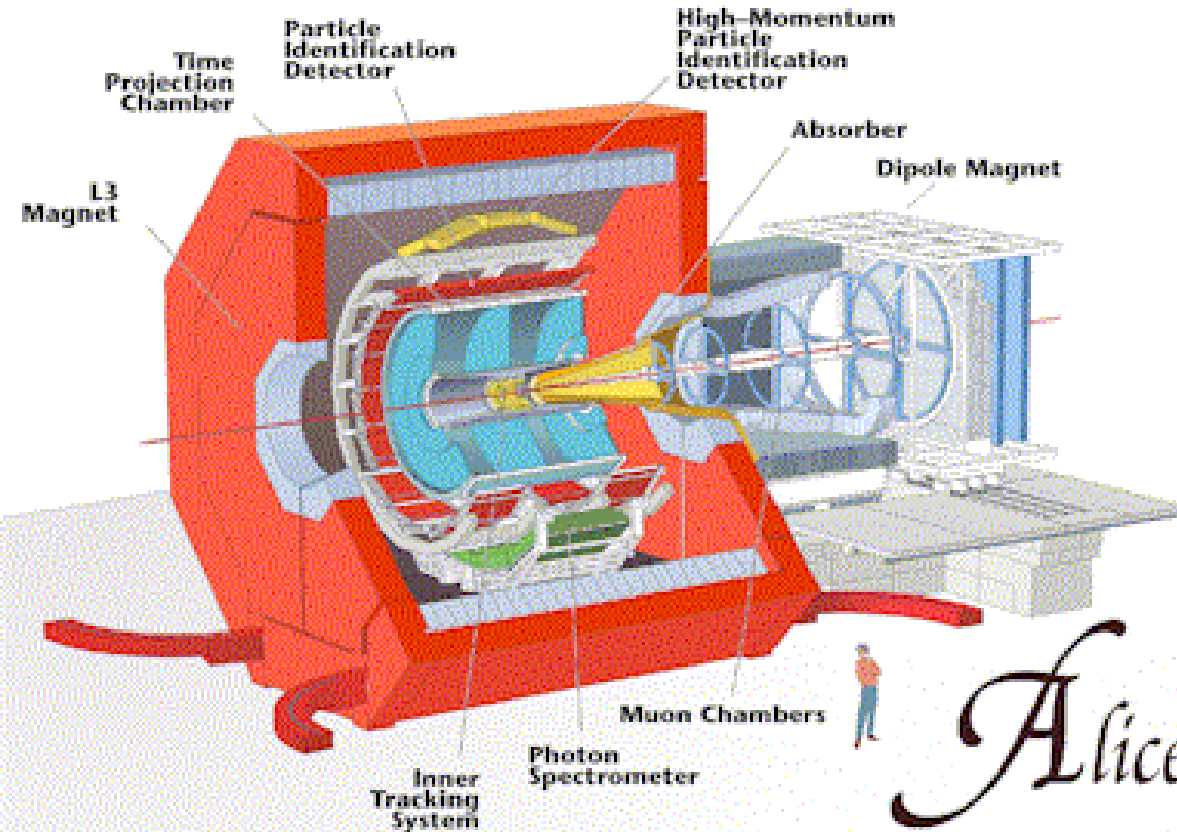
Size	21 m long, 15 high m and 15 m wide.
Weight	12 500 tonnes
Design	barrel plus end caps
Material cost	500 MCHF
Location	Cessy, France.

ALICE

~ 1500 fisici (130 italiani, 30 torinesi)
110 Istituti di ricerca
31 nazioni

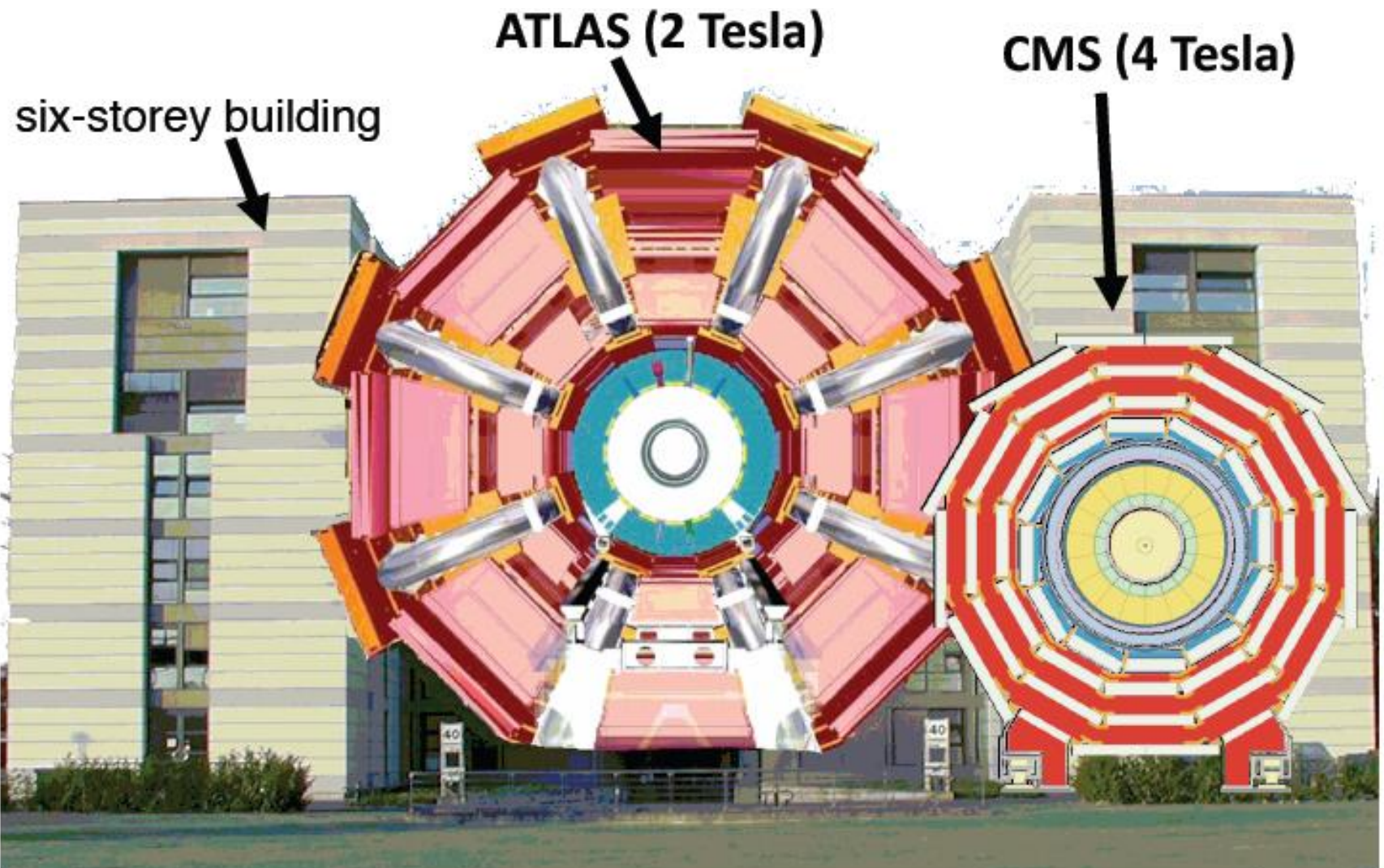


Quantita' di ferro nel magnete
di ALICE:
pari alla Tour Eiffel



Alice

ATLAS e CMS



Le risorse di calcolo

➔ La mole di dati prodotti dagli esperimenti a LHC sarà enorme: ~ 1.3 GB/s
➔ ~ 6 volte il contenuto dell'Enciclopedia Britannica

1.3 GB/s per un totale di ~ 1 PB di dati in un anno
➔ se i dati venissero memorizzati su CD, ci vorrebbe una pila di CD alta 20Km ogni anno!

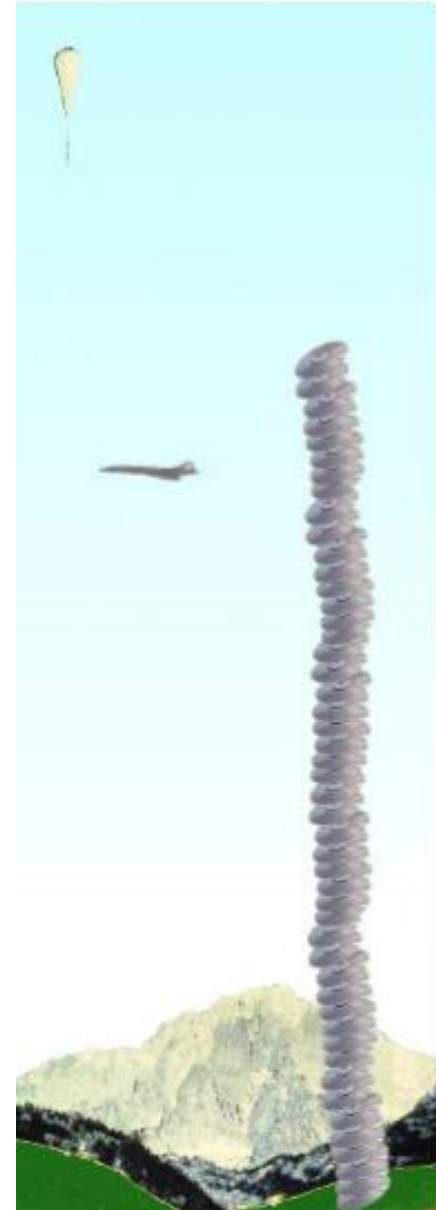
➔ L'analisi dei dati degli esperimenti al LHC è richiede soluzioni informatiche innovative!

Per l'analisi dei dati occorreranno migliaia di computer, distribuiti in tutto il mondo.

I fisici hanno una solida tradizione nella distribuzione dell'informazione via rete: nel 1990 il WEB è nato al CERN per soddisfare all'esigenza di accedere a dati disponibili su computer di tipo diverso, localizzati ovunque nel mondo

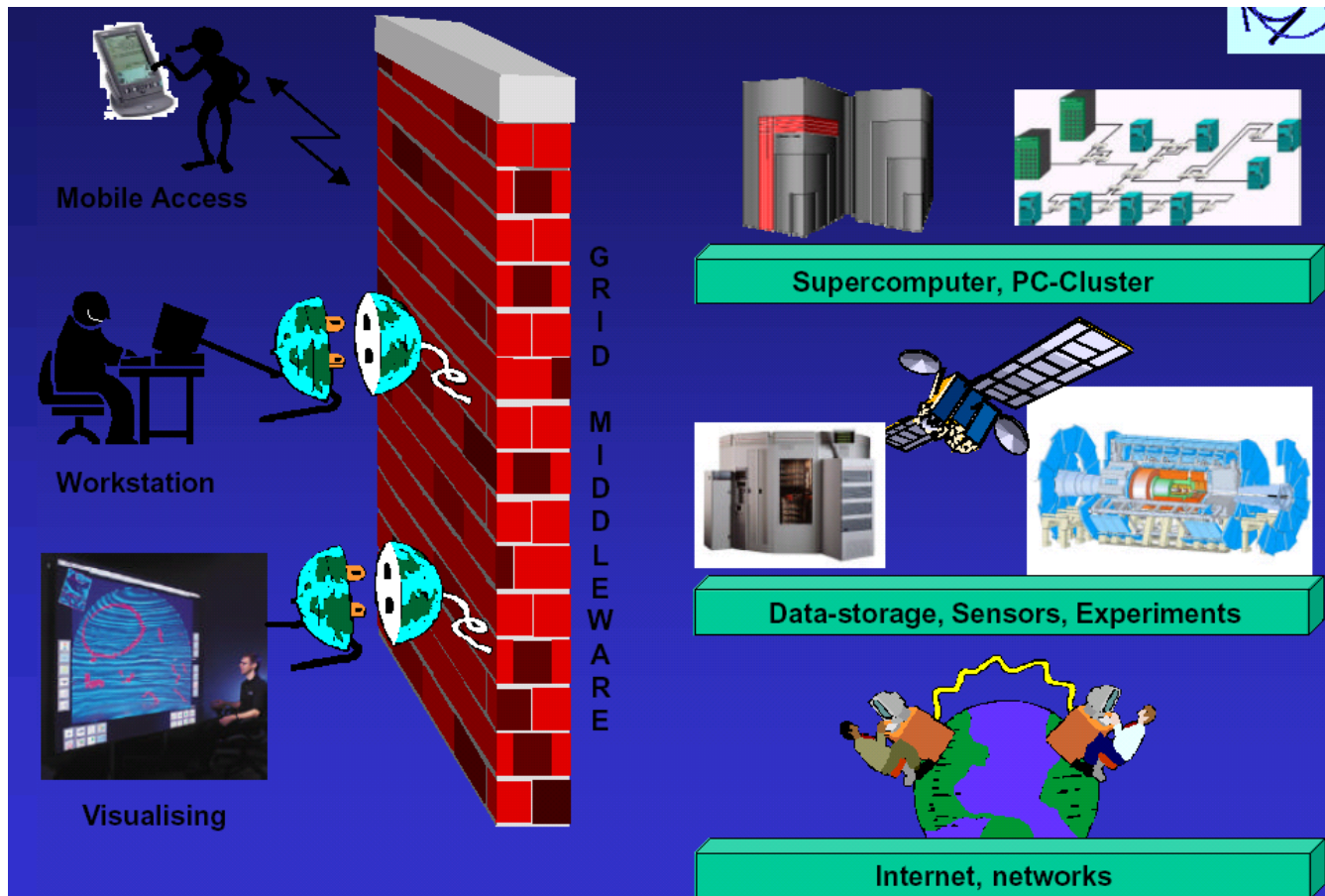


Il WEB per questo non basta. La soluzione è la GRID



La GRID

La GRID puo' essere vista in analogia con la rete elettrica: l'utente non sa come e dove l'energia e' prodotta o distribuita. Semplicemente la usa!



Conclusioni



- LHC e i suoi esperimenti rappresentano una grande sfida tecnologica che permetterà di fare nuove scoperte
- LHC sta funzionando alle più alte energie mai raggiunte!
- Molti fisici torinesi coinvolti in questo progetto!



Backup

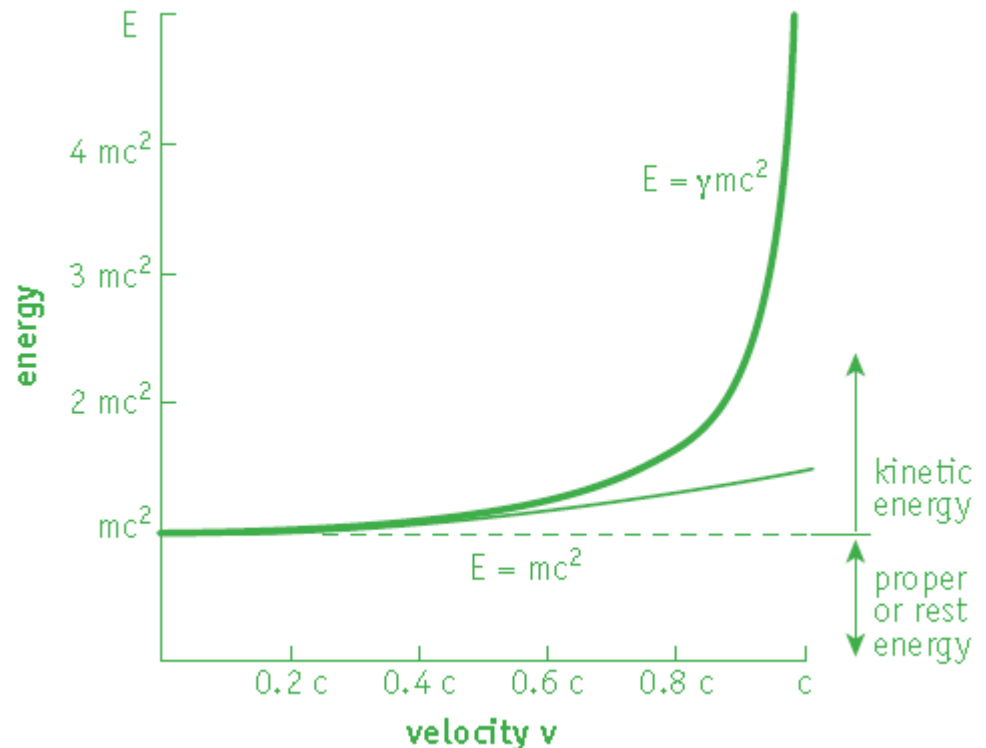
Energia e velocita'

➔ Nessuna particella si puo' muovere piu' veloce della luce nel vuoto
→ pero' non c'e' limite all'energia che una particella puo' acquisire

➔ Negli acceleratori le particelle viaggiano a velocita' prossime a quelle della luce (a 7TeV un protone ha $0.9999999991 \times c$)

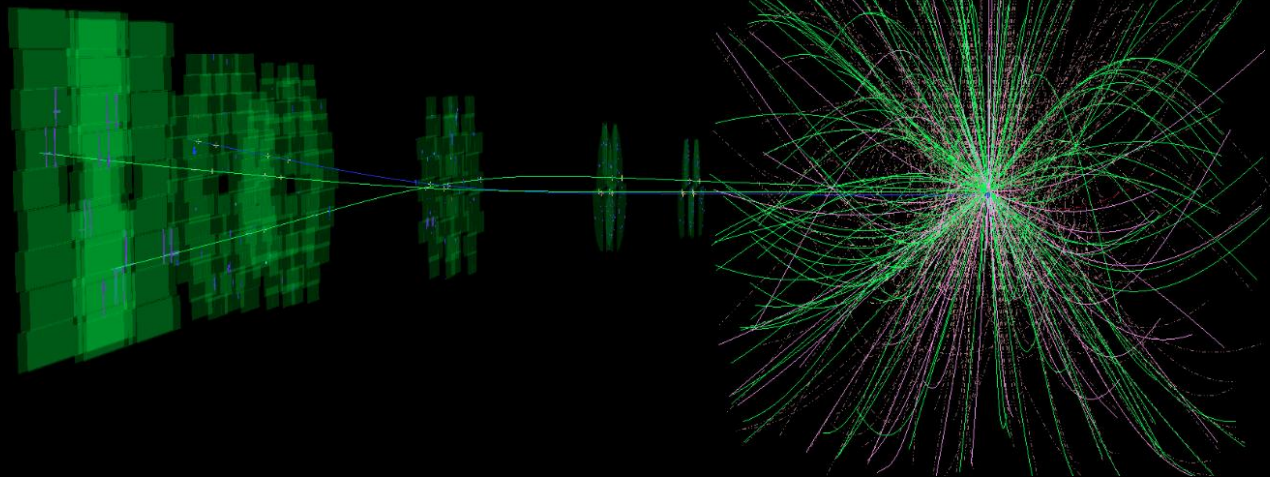
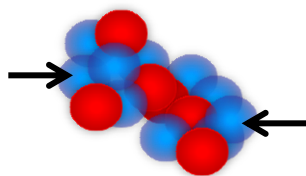
Energy of Proton	Fraction of Speed of Light
1eV	0.00005
1MeV (10^6 eV)	0.046
1 GeV (10^9 eV)	0.875
1 TeV (10^{12} eV)	0.999999956
7 TeV	0.999999991

➔ I fisici delle particelle parlano quindi di energia e non di velocita'

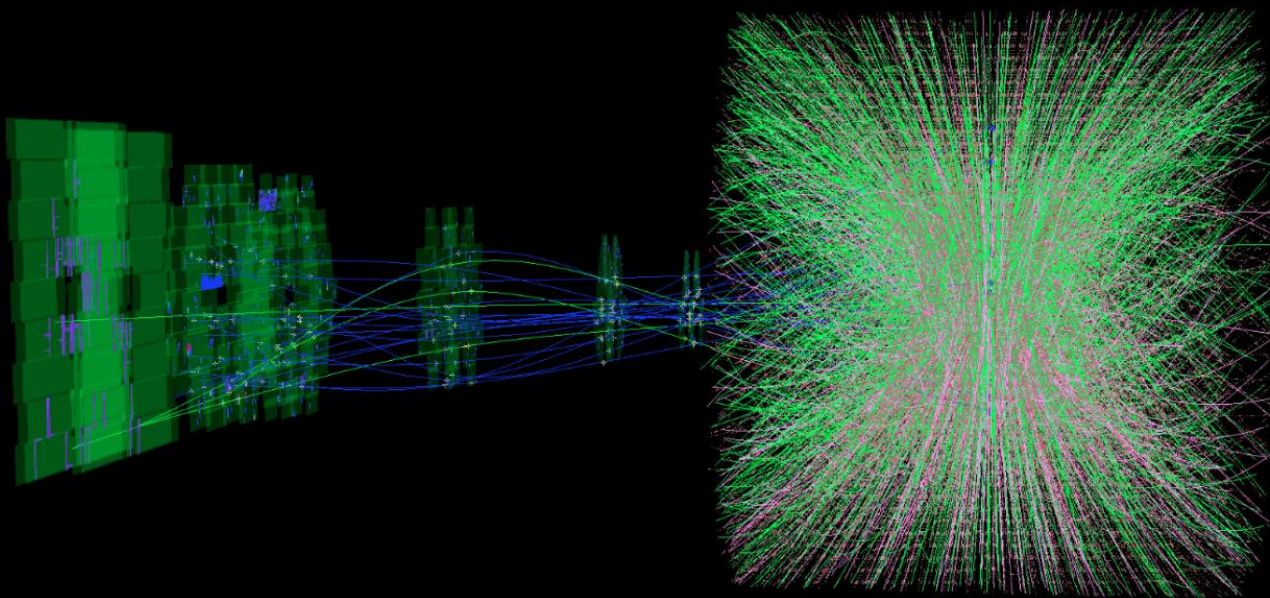
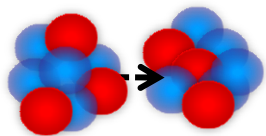


Eventi Pb-Pb at ALICE

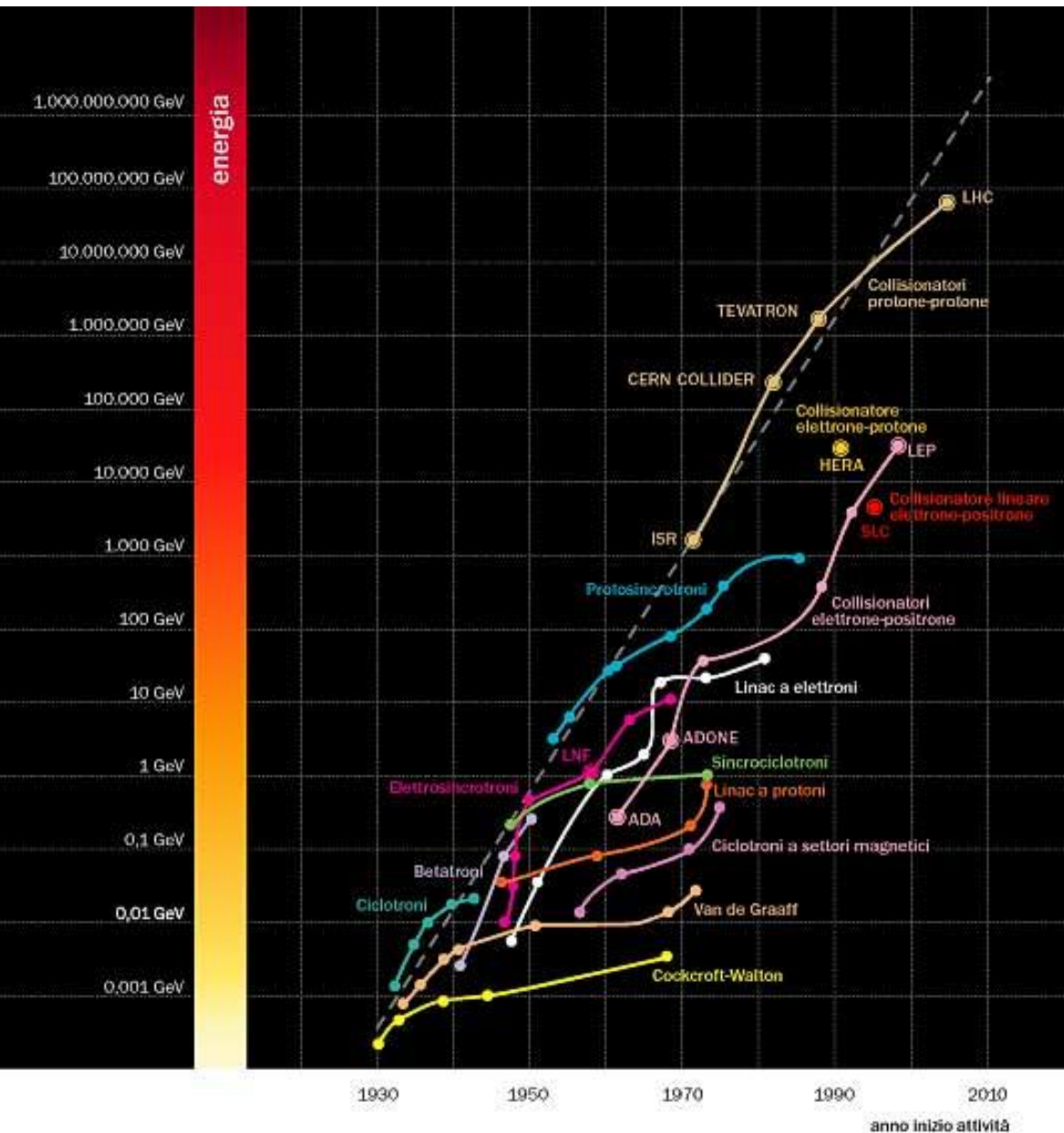
Collisioni "periferiche"



Collisioni "centrali"



Storia degli acceleratori (3)



➔ Diverse tecniche sono state sviluppate per accelerare particelle, raggiungendo energie sempre più elevate

➔ In meno di 100 anni l'energia raggiungibile è aumentata di un fattore $\sim 10^{11}$