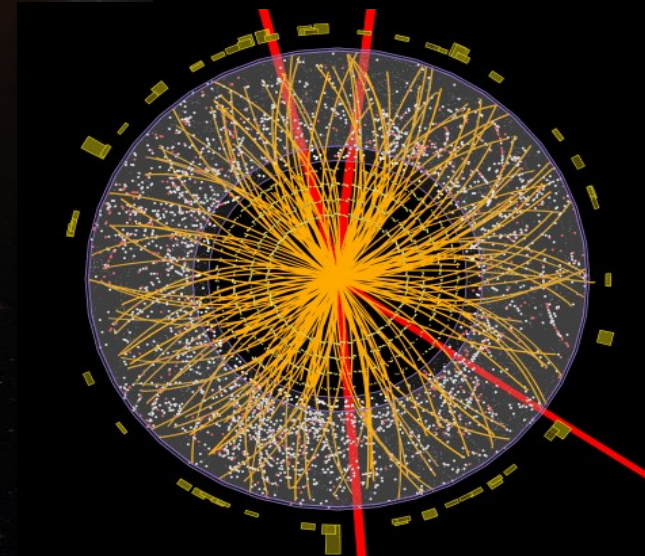


# Esplorando l'infinitamente piccolo

## la fisica del Modello Standard e l'esperimento ATLAS al CERN

Università di Udine  
INFN Trieste – Gruppo  
collegato di Udine



21 Febbraio 2024

XX Masterclass di Fisica delle alte energie

Nell'Universo ci sono, attualmente,  
circa 200 000 000 000  
(duecento miliardi) di galassie

Per un totale di  
1 000 000 000 000 000 000 000 000 (10<sup>24</sup>)  
di stelle

...tutte fatte degli stessi  
identici elementi di materia...

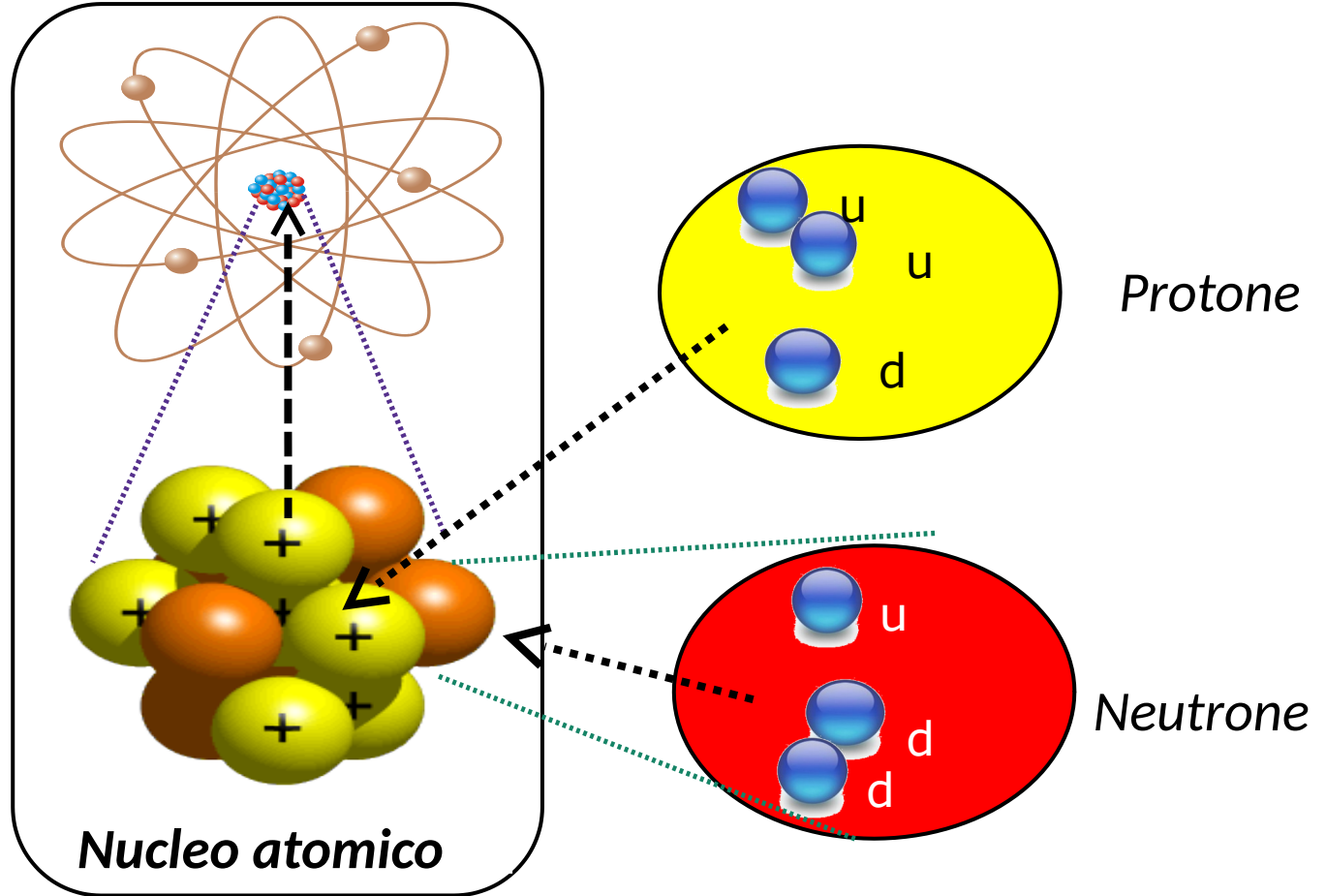
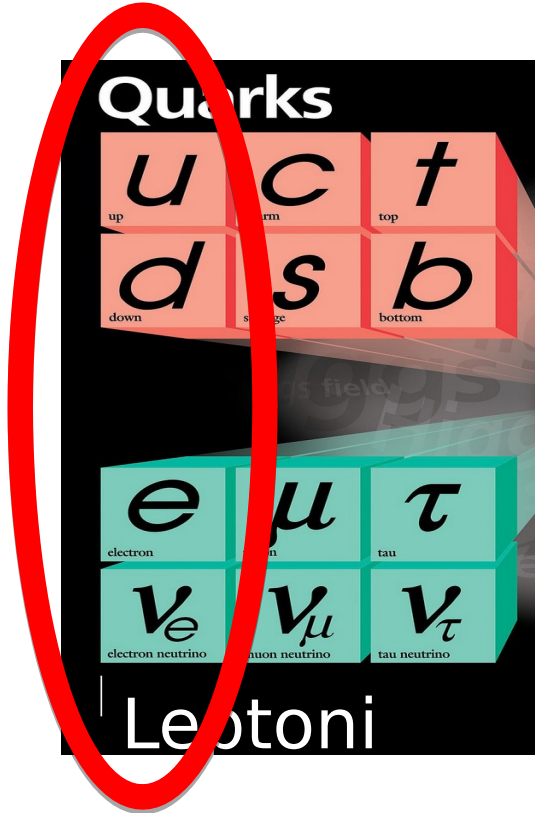
# Fisica delle particelle

Quali sono i mattoni fondamentali della  
materia? Quali le forze che li tengono  
insieme?



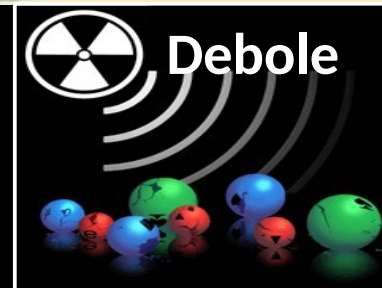
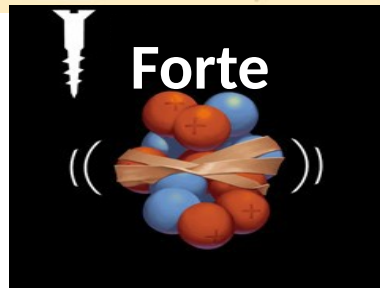
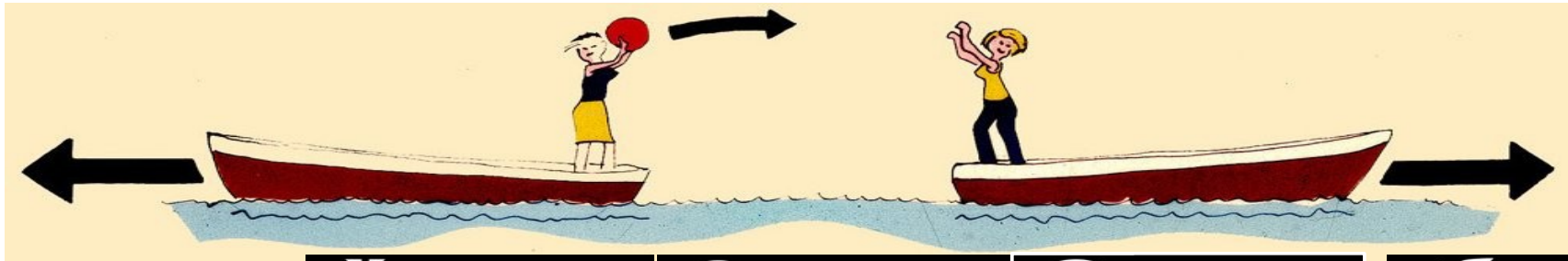
# Di cosa è fatta la materia?

## Il Modello Standard



# Le forze: interazioni fondamentali

Le interazioni tra le particelle elementari avvengono mediante scambio di particelle mediatrici della forza.

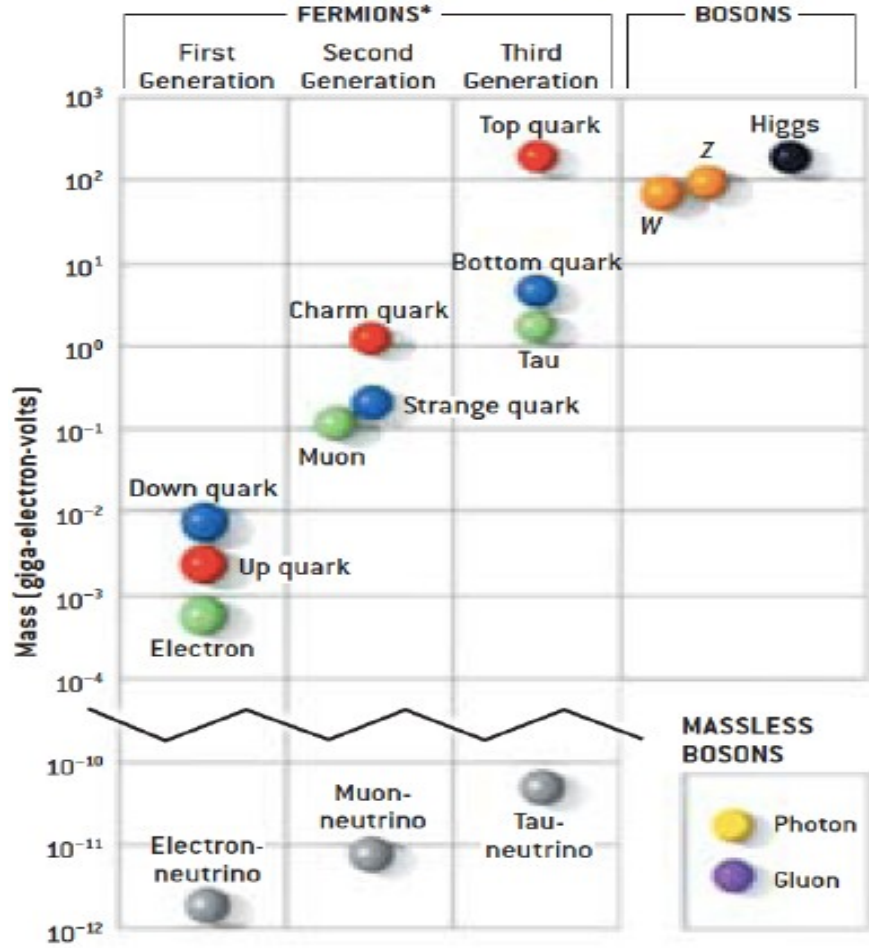


Intensità relativa	→	1	~ 0.01	~ 0.000001	~ $10^{-38}$
Mediatori della forza	→	gluone	fotone	bosoni W e Z	gravitone (?)



- Perché 12 particelle fondamentali?
- Qual' è l' origine della massa?
- Di cosa è fatto l' Universo? Cosa è la materia oscura?
- Perché la gravità è così diversa dalle altre interazioni?

# La massa delle particelle ricopre 11 ordini di grandezza - Perché ?



**Gli esperimenti hanno misurato le masse delle particelle elementari**

**Non c'e' nessuna regolarita'**

**I neutrini sono molto leggeri**

**L'elettrone è 350.000 volte più leggero del quark più pesante**

**Il fotone è privo di massa ( $m = 0$ ), ma bosoni W e Z pesano circa come un atomo di argento!**

# Un problema “pesante”..

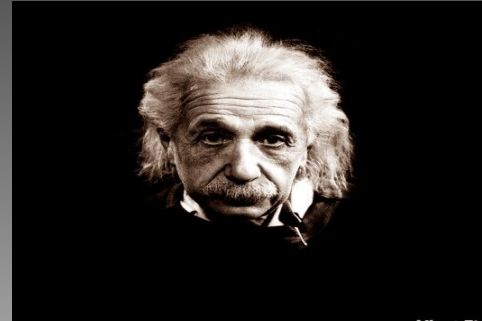
- Il Modello Standard non ha un ingrediente che descrive le masse osservate
  - Peggio... nella teoria originale tutte le particelle non hanno massa !
- Un mondo con quark ed elettroni di massa nulla sarebbe molto diverso da quello attuale
- Senza massa,  $m=0$ , tutte le particelle si muovono costantemente alla velocità della luce



# Che cosa è la massa?

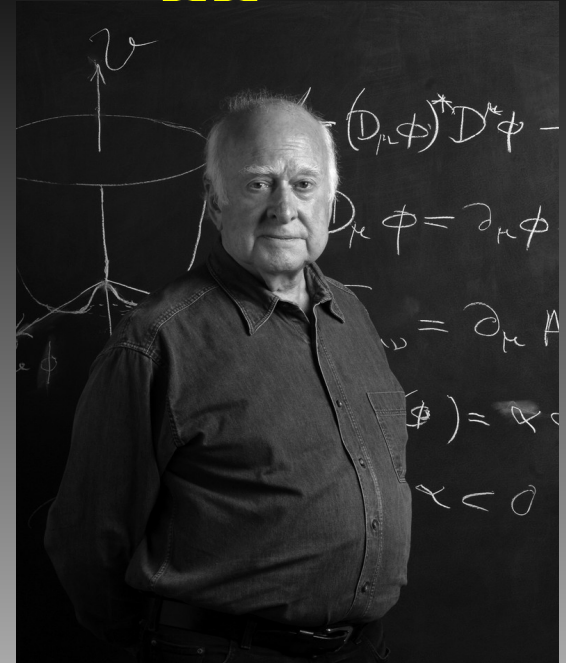
Il concetto di “massa” è evoluto nel tempo di pari passo con l'approfondimento della conoscenza della Natura.

- Meccanica classica (I. Newton, 1687):  
**massa = quantità di materia**
- Meccanica relativistica (A. Einstein, 1905)  
**massa = energia**
- Oggi la massa è una proprietà intrinseca delle particelle:  
**massa = energia di una particella a riposo**



# La massa e Il bosone di Higgs

- Higgs: fisico scozzese che più di 40 anni fa propose un meccanismo per spiegare il mistero dell'origine della massa delle particelle
- Higgs ha ipotizzato che il vuoto contenga un onnipresente campo che può frenare alcune particelle elementari come la gelatina balistica frena un proiettile



Rallentare una particella = farle acquisire una massa

- Più o meno grande
- Se la particella è insensibile a questo campo di forza, resta di massa nulla

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



4 Luglio 2012



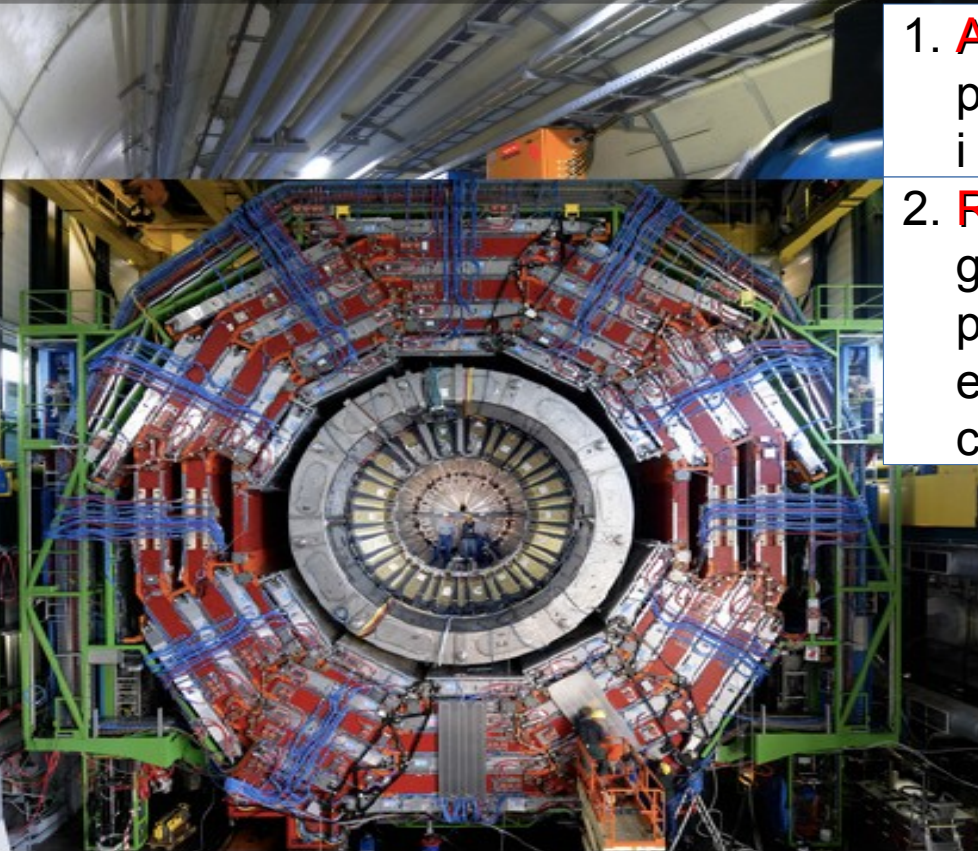
**Per studiare l'infinitamente piccolo:**

# Per studiare l'infinitamente piccolo:

1. **Acceleratore:** una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare



# Per studiare l'infinitamente piccolo:



1. **Acceleratore:** una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare
2. **Rivelatori:** strumenti giganteschi che registrano le particelle prodotte quando emergono dal punto della collisione

# Per studiare l'infinitamente piccolo:



1. **Acceleratore:** una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare

2. **Rivelatori:** strumenti giganteschi che registrano le particelle prodotte quando emergono dal punto della collisione

3. **Supercomputing:** per raccogliere, conservare, distribuire ed analizzare l'enorme quantità di dati prodotti dai rivelatori



# Per studiare l'infinitamente piccolo:



1. **Acceleratore**: una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare
2. **Rivelatori**: strumenti giganteschi che registrano le particelle prodotte quando emergono dal punto della collisione
3. **Supercomputing**: per raccogliere, conservare, distribuire ed analizzare l'enorme quantità di dati prodotti dai rivelatori
4. **Scienza collaborativa su scala mondiale**: migliaia di scienziati ed ingegneri per disegnare, costruire e gestire queste macchine molto complesse

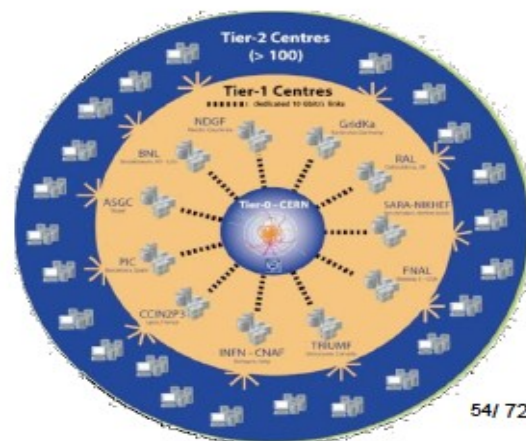


# World Wide Computing GRID

La Grid e' una infrastruttura che permette l'accesso trasparente alla potenza di calcolo ed allo storage dei dati distribuiti in tutto il mondo

**Grid collega 100,000 computers in 34 paesi con linee di trasmissione dati ultraveloci**

In un anno milioni di Gigabytes di dati viaggiano attorno al mondo



# II CERN

- 13500 scienziati
- 10000 visitatori/3500 staff
- budget (2016) 1127 M CHF  
(come l'ospedale di Ginevra)



- **Osservatori, associati**

Giappone, la Federazione Russa, gli Stati Uniti d'America, Turchia, la Commissione Europea, il JINR e l'Unesco



- **23 Stati Membri:**

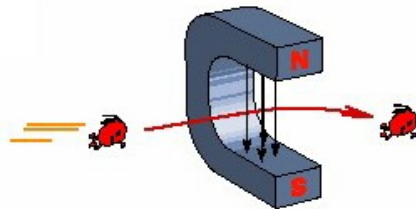
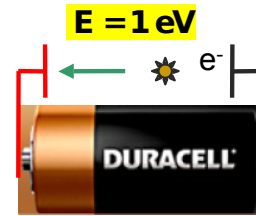
Austria, Belgio, Bulgaria, Repubblica Ceca, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Italia, Israele, Olanda, Norvegia, Polonia, Portogallo, Romania, Repubblica Slovacca, Spagna, Svezia, Svizzera e Regno Unito (presto Cipro, Serbia e Slovenia)

# Gli acceleratori

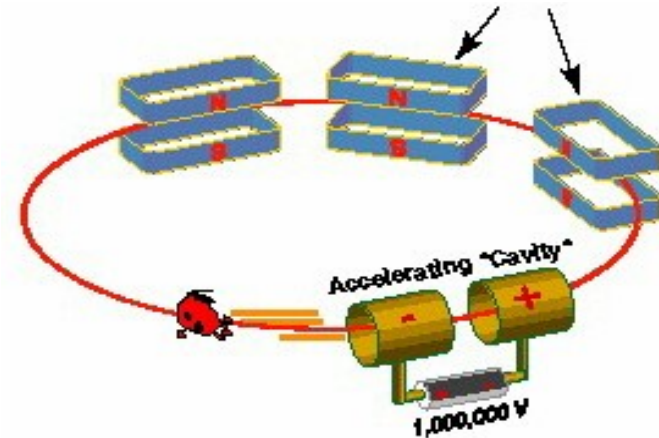


Campo elettrico:  
accelera.

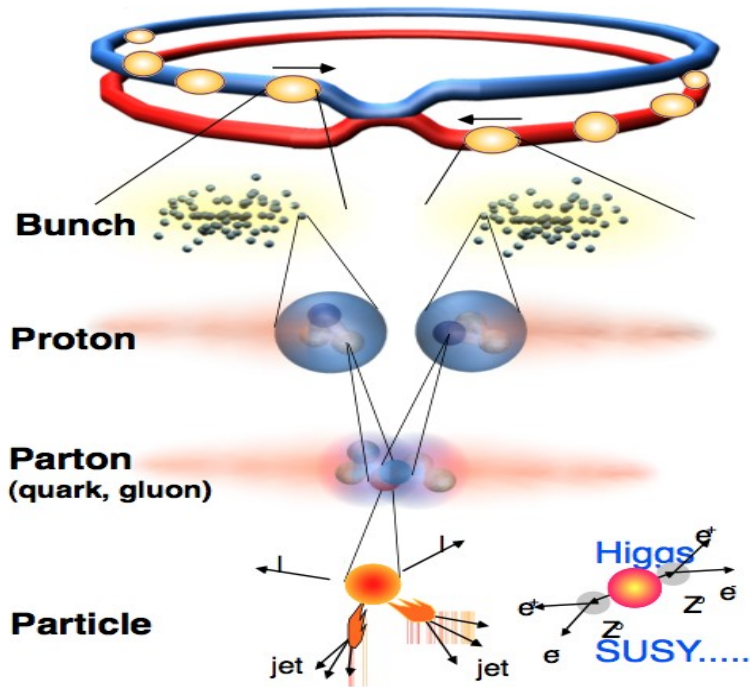
Unità di misure energia: eV



Campo magnetico:  
curva



# Perchè gli acceleratori?



- ✓ Ci permettono di ripetere gli esperimenti a parità di condizioni iniziali
- ✓ Possiamo scegliere l'energia di lavoro per esplorare la natura a diverse dimensioni
- ✓ Si possono produrre nuove particelle avendo un'energia disponibile  $E=mc^2$

# Il CERN visto dall'aereo



# Il Large Hadron Collider

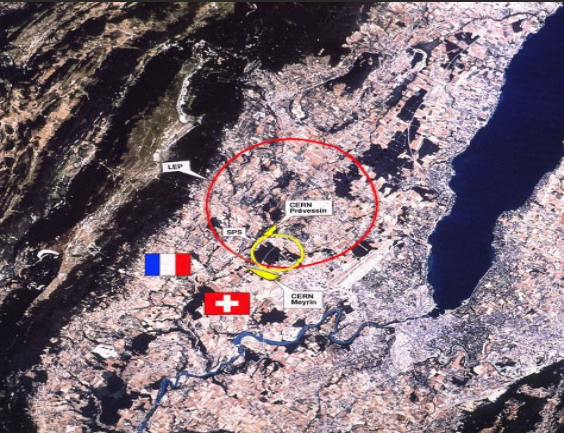
- 27 km di circonferenza
- 100 m sotto la superficie
- 1600 magneti superconduttori a  $-271.3$  °C
- 120 tonnellate di elio liquido
- Accelera fasci di protoni fino al 99.9999991% la velocità della luce
- Consuma ~ 750 GWh all'anno

CMS  
experiment

Large  
Hadron  
Collider

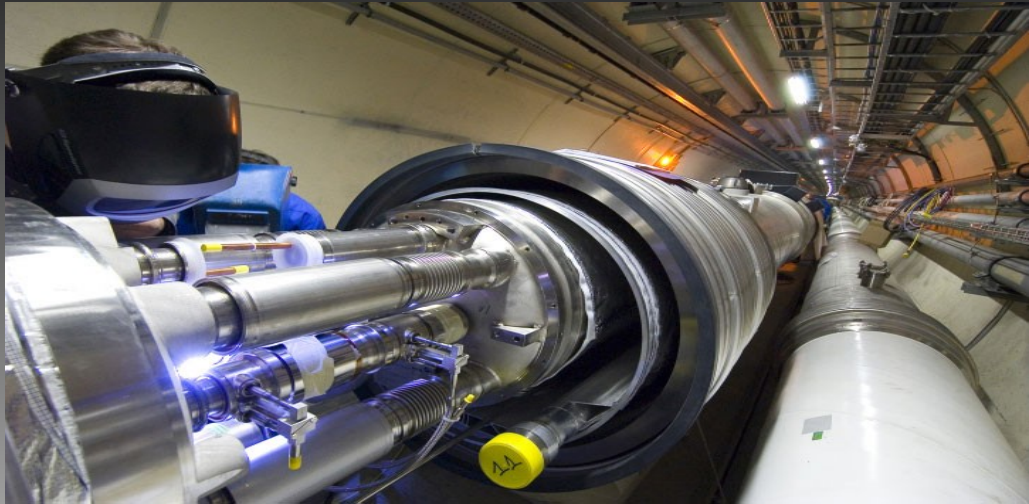


# LHC: il più veloce circuito del pianeta



- Milioni di miliardi di protoni percorrono l'anello di 27 km di circonferenza in direzioni opposte, viaggiando al 99.9999991 % della velocità della luce (distanza Terra-Sole: 5 min/luce, sole Nettuno  $4.5 \cdot 10^9$  km)
- I pacchetti di protoni compiono 10000 giri al secondo e si scontrano ogni 25 ns
  - 40 M di volte al secondo!

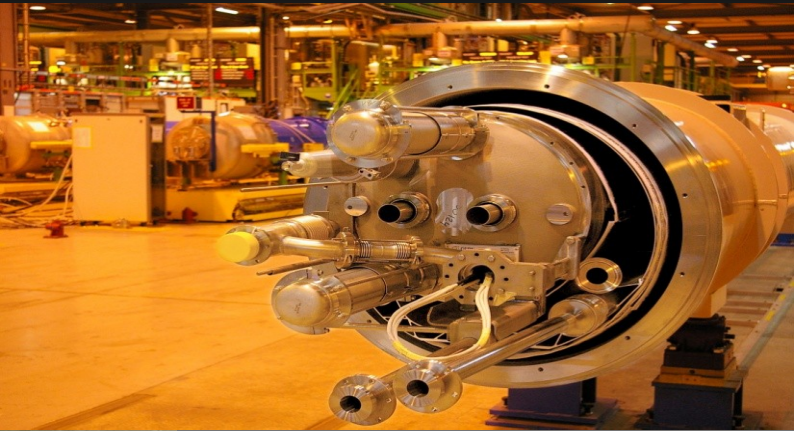
# LHC: lo spazio più vuoto del sistema solare



Accelerare i protoni quasi alla velocità della luce richiede un vuoto spinto quanto quello dello spazio interplanetario. Sulla Luna, l'atmosfera è 10 volte più densa di quella all'interno del tubo di trasporto dei protoni in LHC.

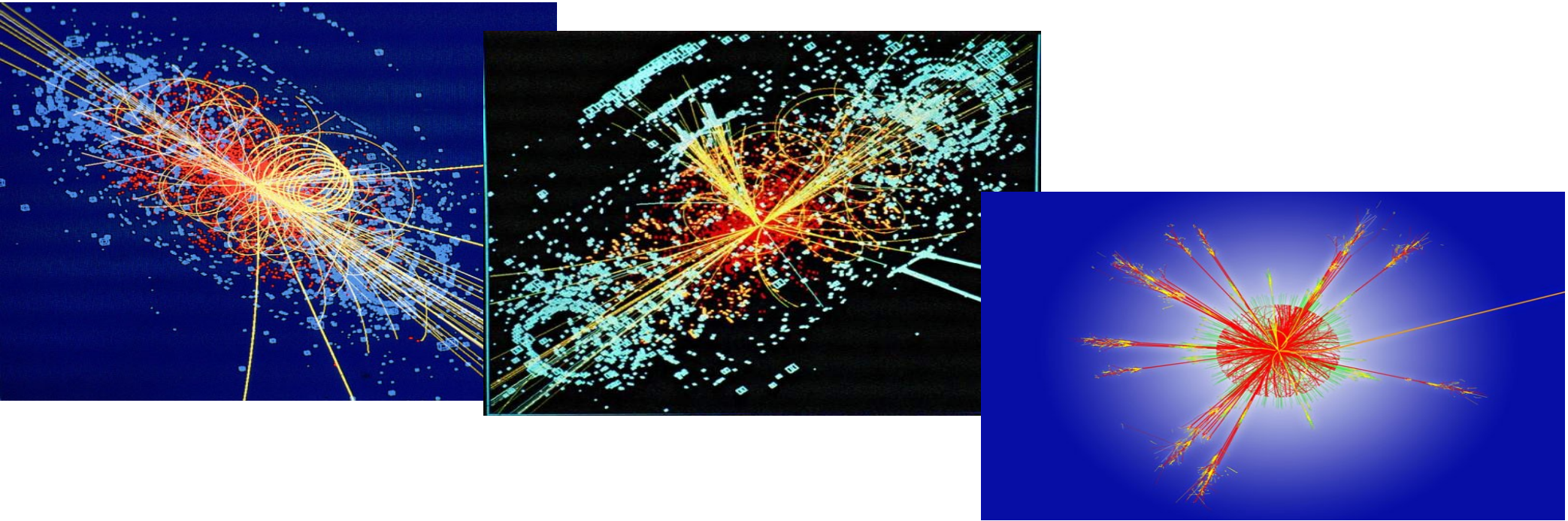


# LHC: il posto più freddo nello spazio



- I magneti di LHC operano ad una temperatura di  $1.9^{\circ}\text{K}$  ( $-271.35^{\circ}\text{C}$ ), inferiore a quella dello spazio interplanetario che è  $2.7^{\circ}\text{K}$  ( $-270.425^{\circ}\text{C}$ )
- Per la criogenia di LHC servono 40 000 giunzioni a tenuta stagna per le condutture di raffreddamento, 12 milioni di litri di Azoto liquido vengono vaporizzati nella fase iniziale di raffreddamento ed in totale sono necessari 700 000 litri di Elio liquido

# LHC: il posto più caldo della galassia



Quando due fasci di protoni collidono, generano temperature 100 000 volte superiori a quelle dell'interno del Sole, ma in uno spazio infinitesimo.

# Il Large Hadron Collider



Energia di 1 protone

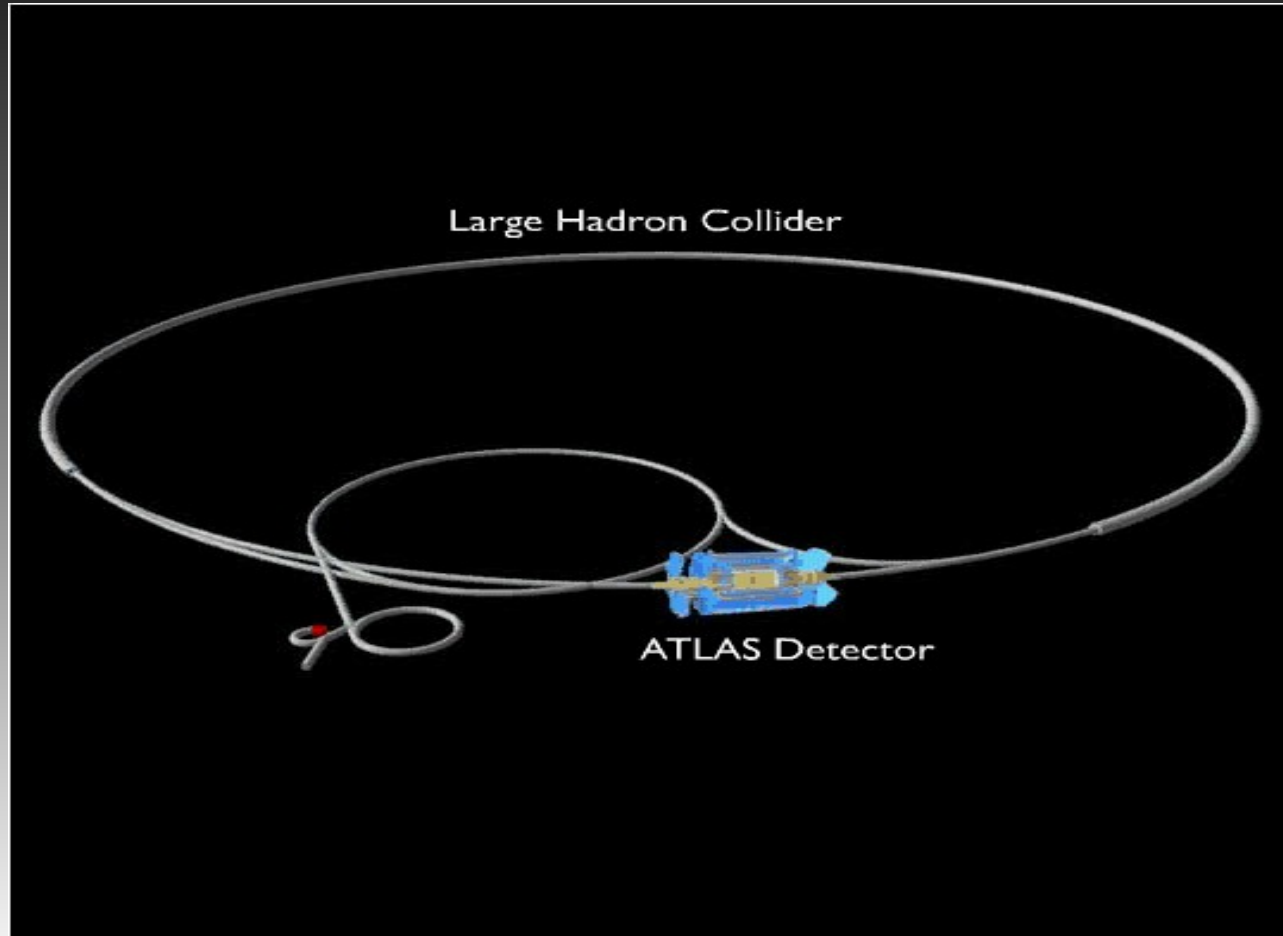


Energia del fascio di LHC

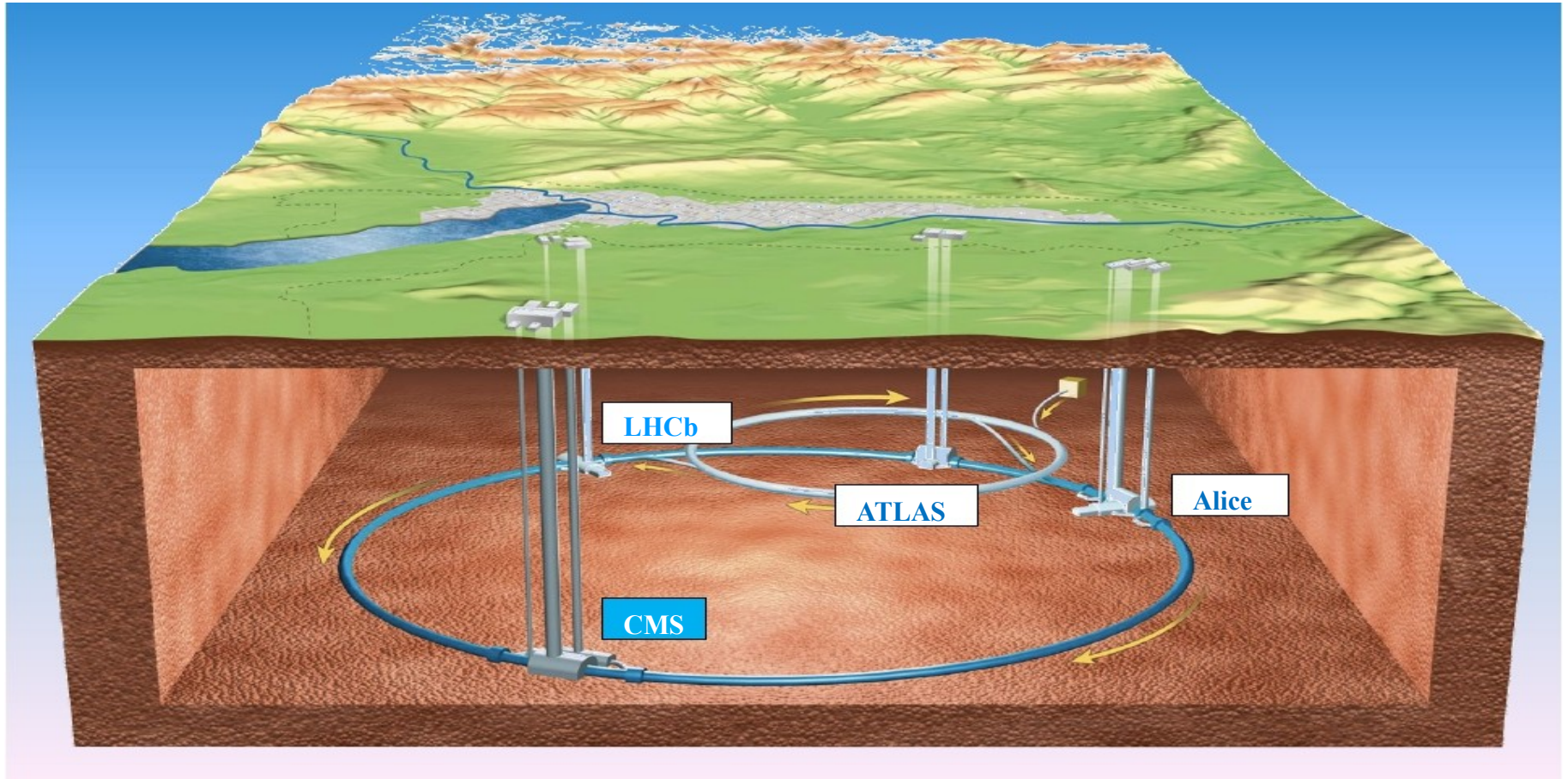


**40 milioni di collisioni pp/sec !!**

# Il viaggio dei protoni in LHC



# Gli esperimenti al CERN



# I rivelatori di particelle

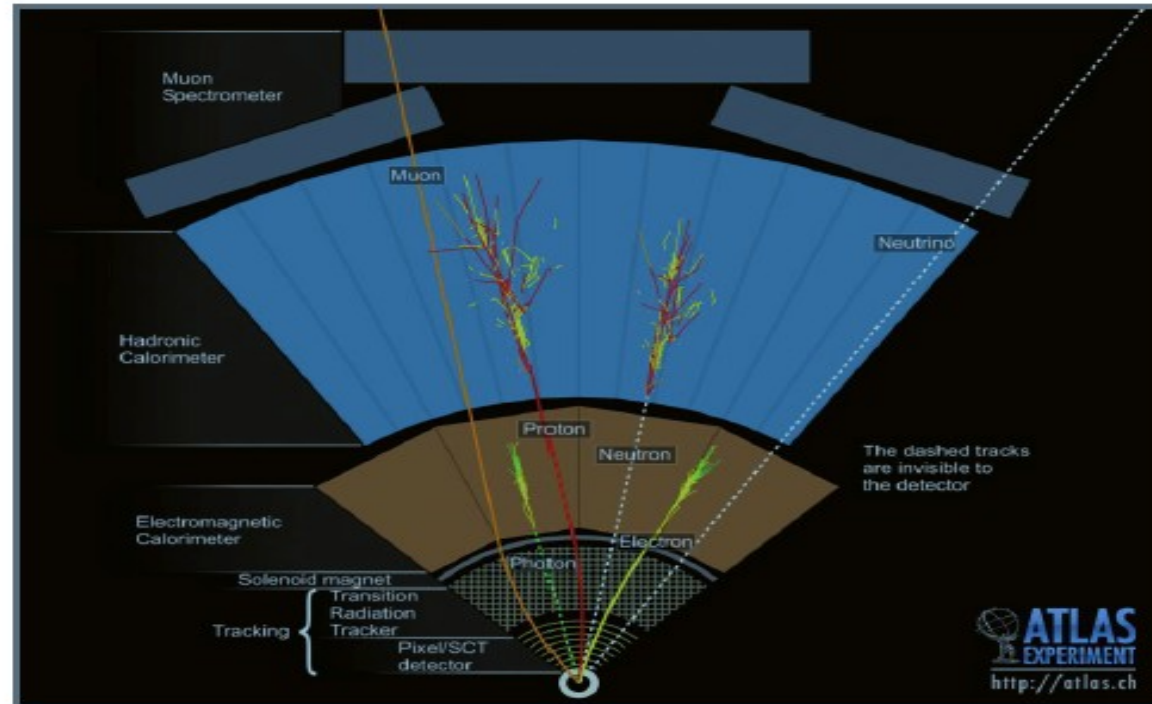
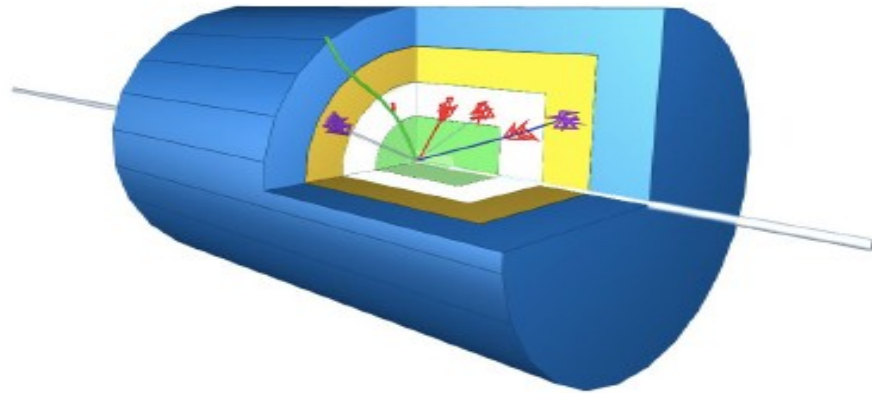
Apparecchi fotografici velocissimi.....



.....e molto piu' sofisticati di questo qui

# I rivelatori di particelle

**Strati concentrici di “macchine fotografiche” .....  
Misurano la direzione e l’energia delle particelle prodotte  
nella collisione**



# L'esperimento ATLAS

**Muon spectrometer:** air-core toroids with gas-based muon chambers. Trigger and meas. with momentum resolution  $<10\%$  for  $p_T \approx 1$  TeV.

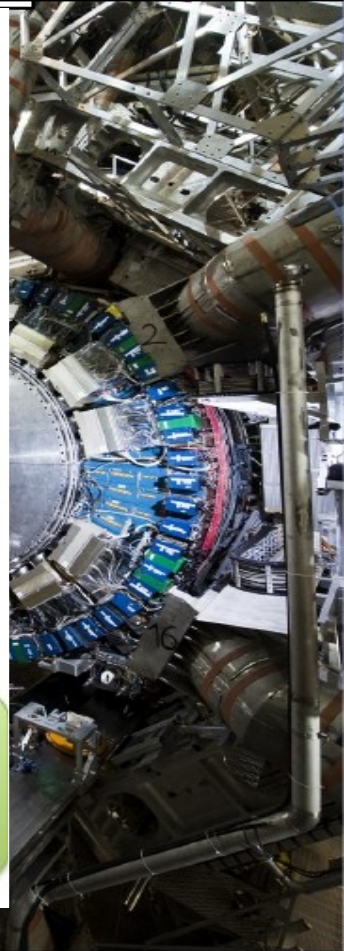
L 46 m  $\varnothing$  22 m  
7000 tons

**Inner tracker:** ( $|\eta| < 2.5$ ,  $B=2T$ )  
Si pixel, Si strips, Trans. Rad. Det.  
Precise tracking and vertexing,  
 $e/\pi$  separation, momentum  
resolution:  $\sigma/p_T \approx 0.05\% p_T \oplus 1\%$

**EM Calorimeter:** Pb-Lar Accordion  $e/\gamma$   
trigger. Id. and meas.  
Energy resolution:  $\sigma/E < 10\%/ \sqrt{E} \oplus 0.7\%$

**Trigger system:** 3-levels  
reducing the IA rate from  
20 MHz to 200 Hz

**HAD Calorimeter:** ( $|\eta| < 5.0$ )  
Fe/Scintillator Tiles (cen)  
Cu/W Lar (fwd). Trigger and meas. of  
jets and  $E_{\text{miss}}$   
Energy resolution:  $\sigma/E \approx 50\%/ \sqrt{E} \oplus 10\%$





# La gravità si nasconde?

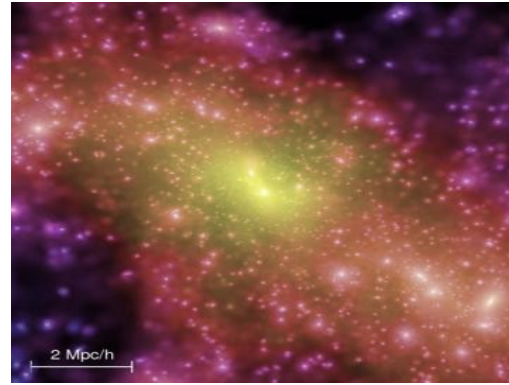


(Dalí, The Disintegration of the Persistence of Memory, 1954)

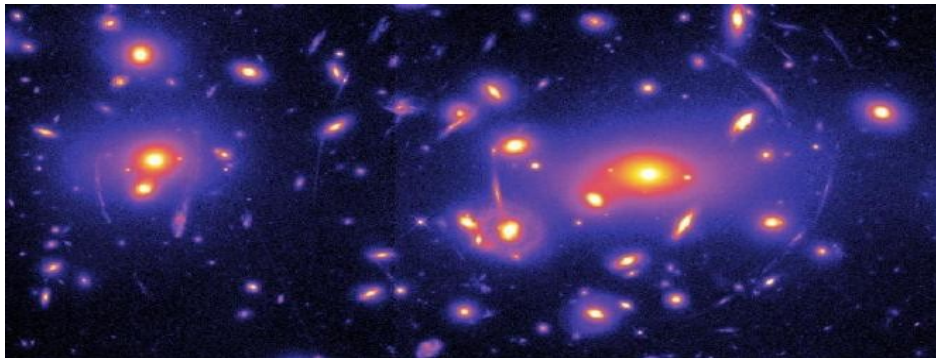
Ci sono ulteriori dimensioni nello spazio  
che non riusciamo a vedere?

# Galassie e Cluster di Galassie

Non c'è sufficiente massa visibile per tenere insieme le galassie a spirale rotanti.



Separazione di materia oscura e di materia ordinaria nella collisione di due cluster di galassie



# La materia oscura

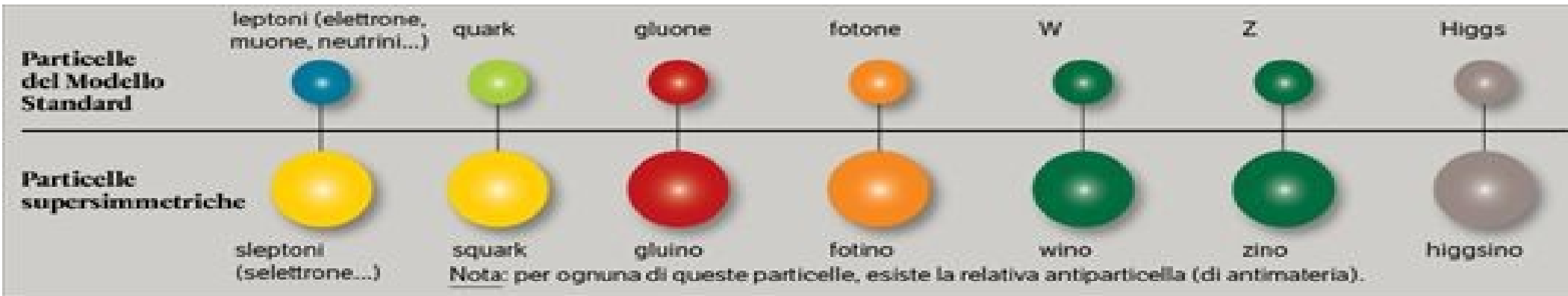
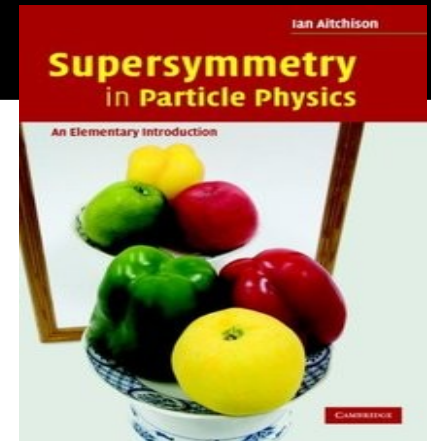
Se guardiamo al nostro universo, vediamo molto più della materia (o antimateria) ordinaria.



Questa quantità “extra” la chiamiamo “materia oscura” perchè non riusciamo a vederla. Ma che cos'è?

# Supersimmetria

una nuova simmetria in natura: ogni particella ha un partner più pesante



- è una buona candidata a spiegare la materia oscura
- risolve alcuni problemi del Modello Standard

**Il gruppo ATLAS Udine**

**<http://atlasud.uniud.it/>**



# Attività di divulgazione

Seminari



Me... Scuole Superiori



Visite al CERN





INTERNATIONAL

**MASTERCLASSES**

hands on particle physics