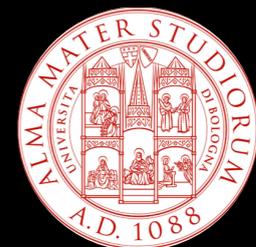


INFINITAMENTE GRANDE, INFINITAMENTE PICCOLO

L'ESPERIMENTO ATLAS, PRESSO IL CERN DI GINEVRA

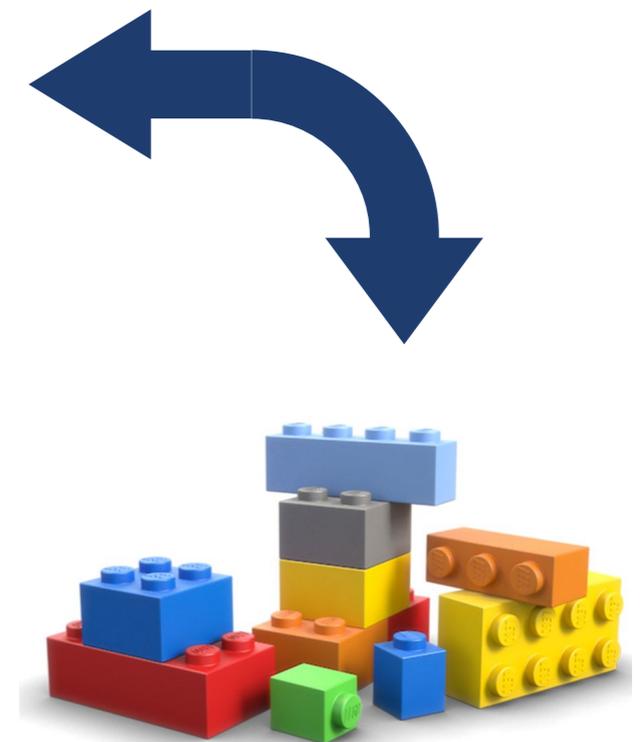
Laura Fabbri - Università di Bologna e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



LA FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

- Come è fatta la materia ?
- Quanto sono piccoli gli oggetti più piccoli che conosciamo ?
- Come è possibile "vedere" oggetti così piccoli e studiarne le proprietà ?

Di cosa è fatto il mondo?



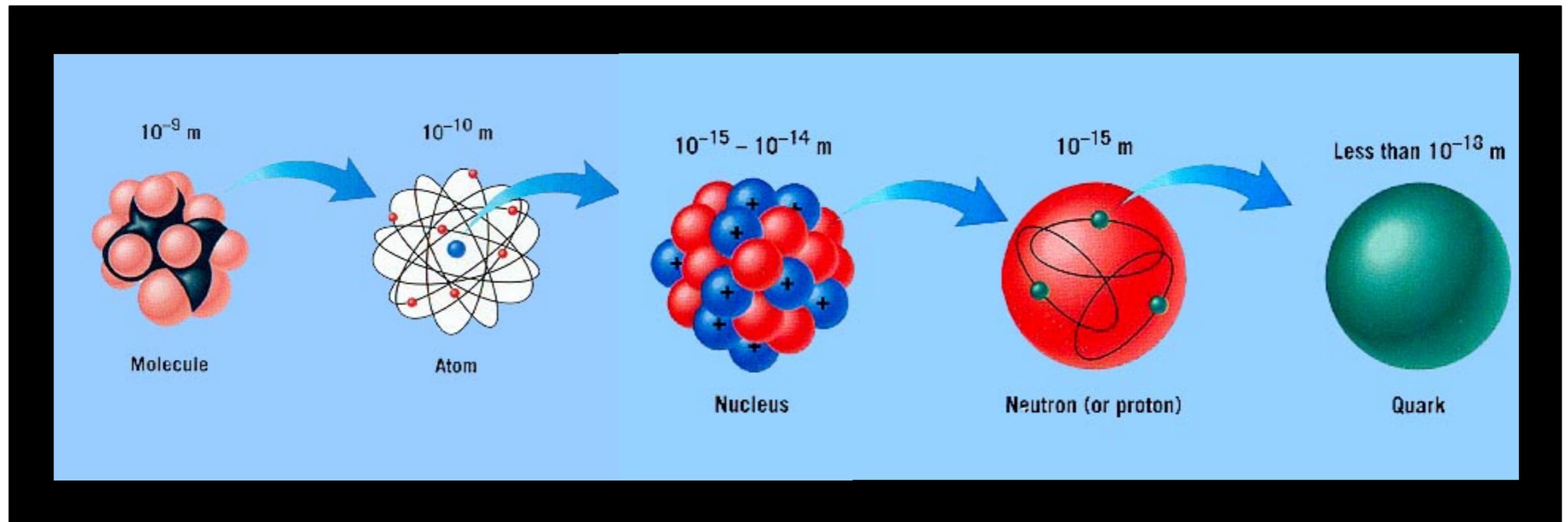
Se le cose fossero tutte come quest'auto, sarebbe facile rispondere!

Realtà e percezione



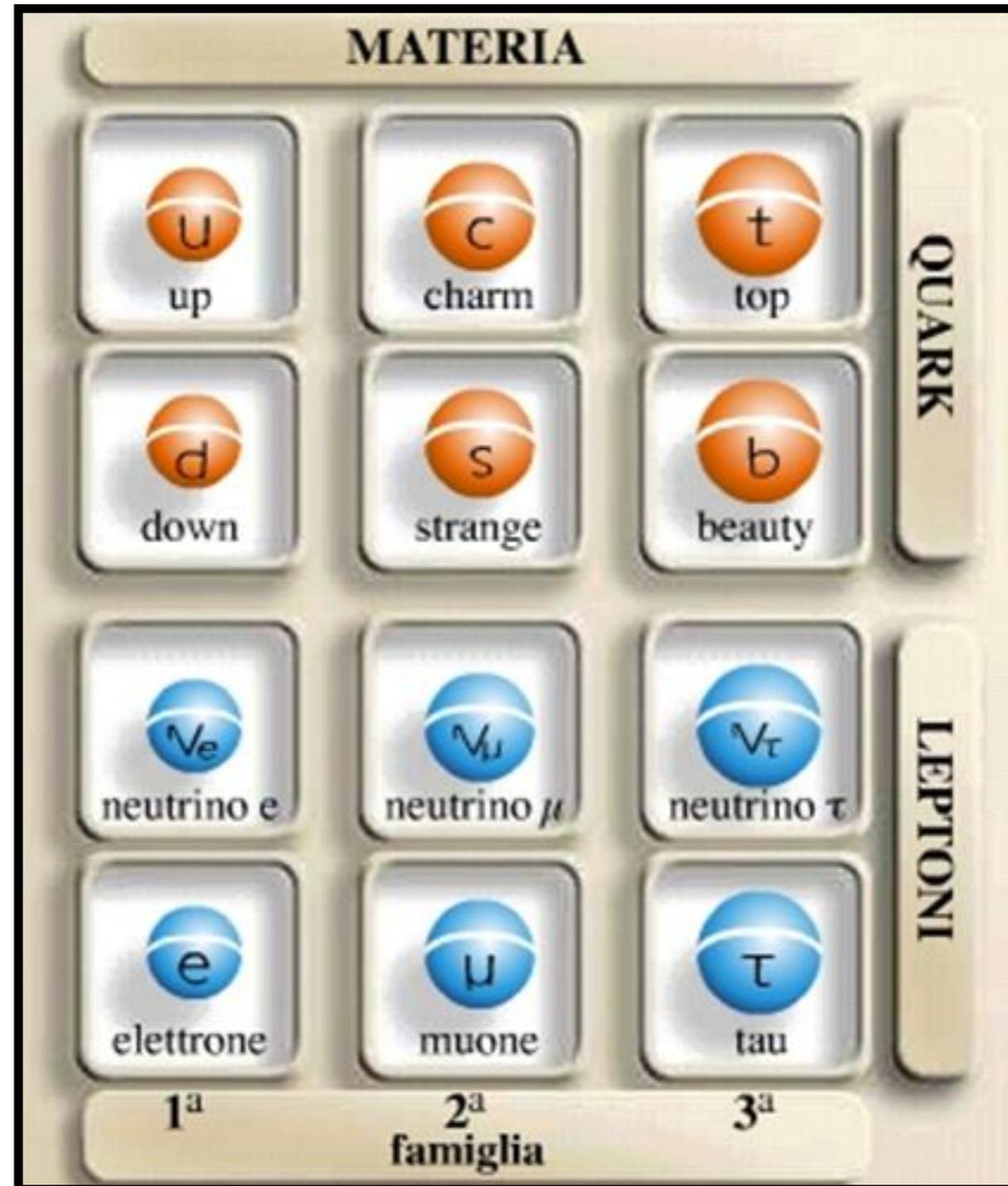
Ma il mondo è più complesso!
Per fortuna ci sono state grandi menti che hanno affrontato il problema...

Cosa sappiamo dopo 25 secoli?



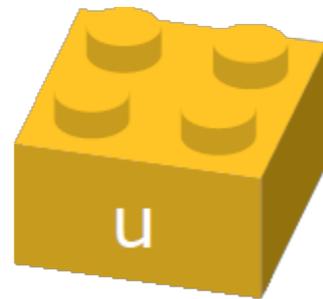
Il nucleo è piccolissimo rispetto all'atomo, e dunque... la materia è praticamente fatta di vuoto!

I MATTONI FONDAMENTALI

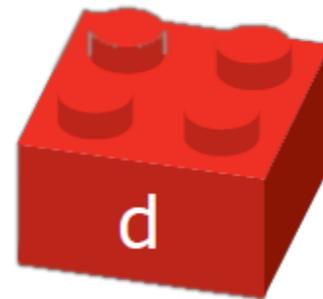


Le regole del gioco

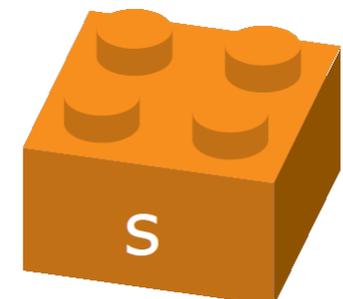
Materia



Quark UP:
carica $+2/3$



Quark DOWN:
carica $-1/3$

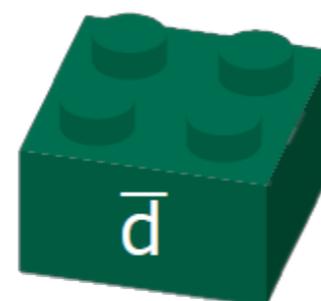


Quark STRANGE:
carica $-1/3$

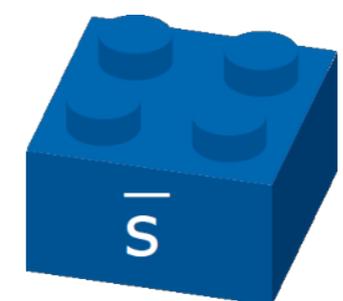
Antimateria



Anti-Quark
UP:
carica $-2/3$



Anti-Quark
DOWN:
carica $+1/3$



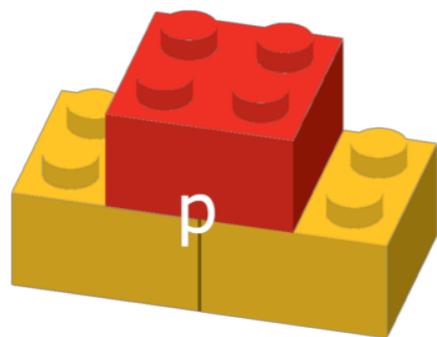
Anti-Quark
STRANGE:
carica $+1/3$

Le regole del gioco

Barioni

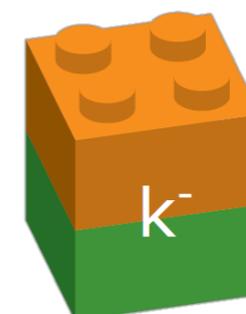
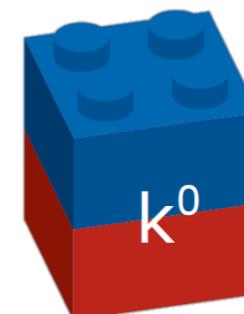
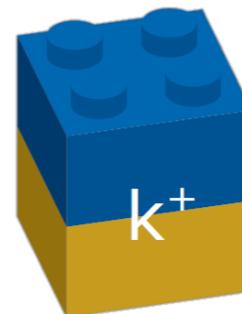


Neutroni

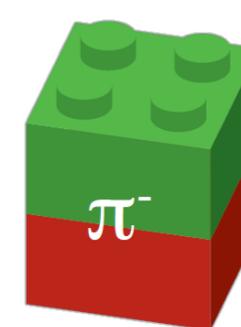
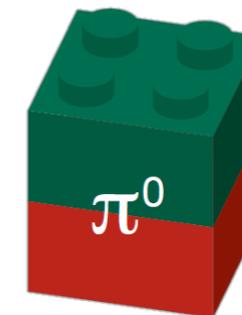
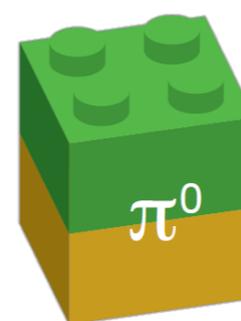
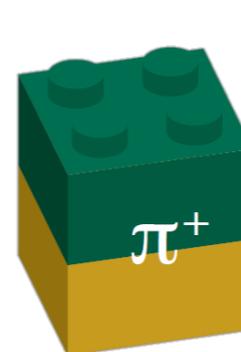


Protoni

Mesoni

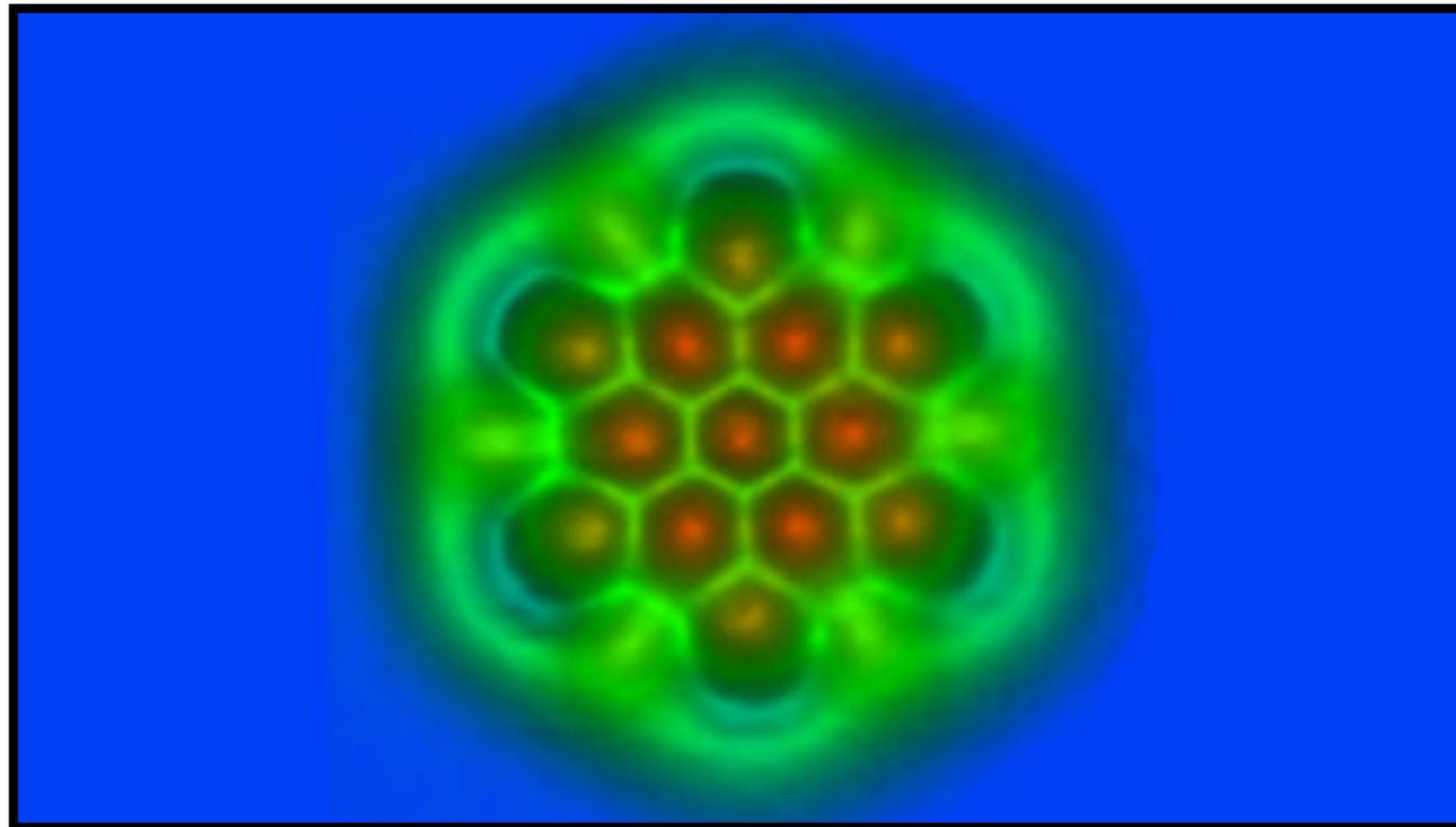


Kaoni



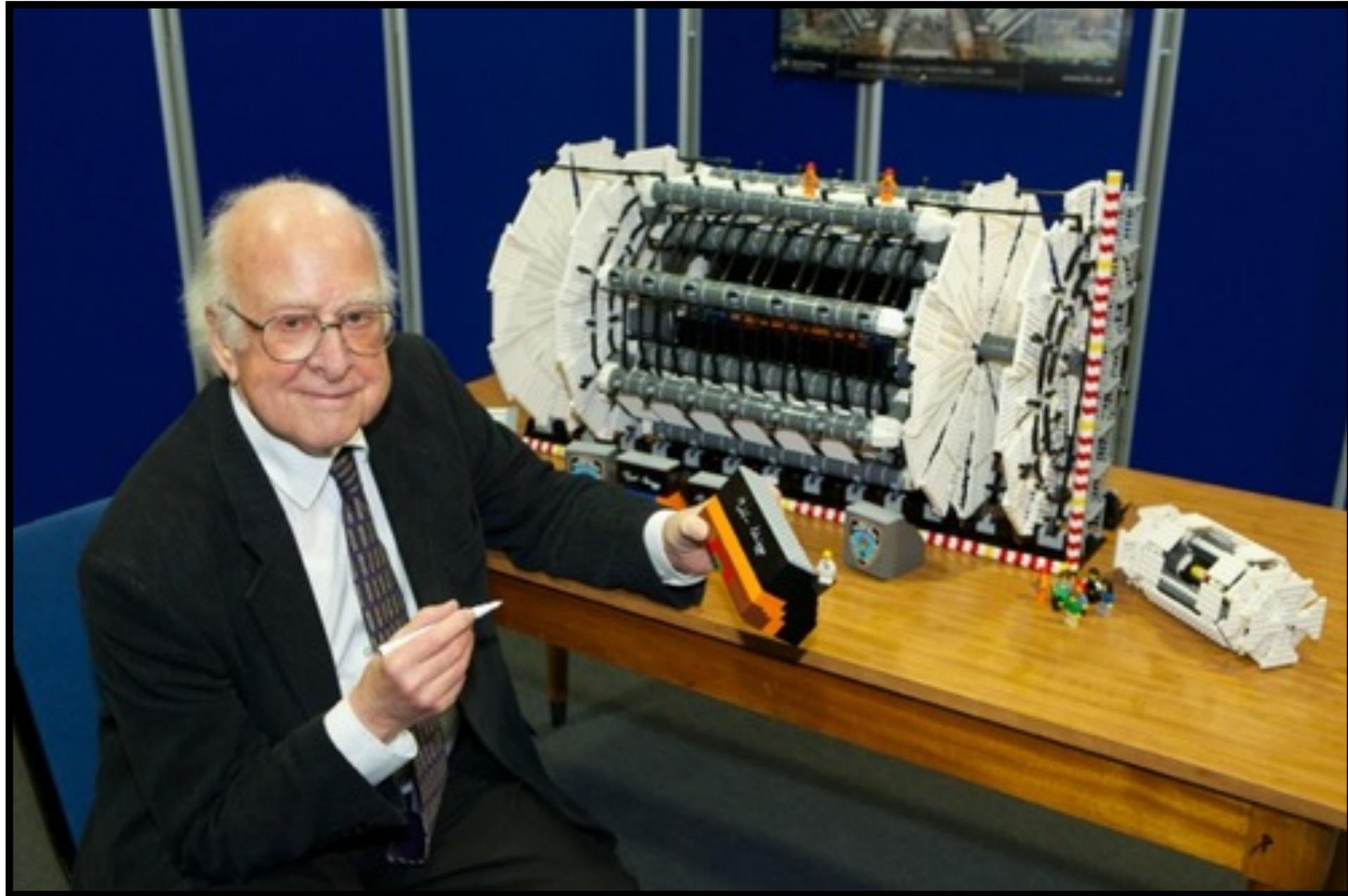
Pioni

Vedere gli atomi



Molecola di *nanografene* vista con un particolare microscopio (microscopio a forza atomica): si vedono gli atomi di carbonio!

Non dimentichiamo il Bosone di Higgs!



Chi l'ha previsto (nel 1964) e chi l'ha trovato (nel 2012)

Il Bosone di Higgs

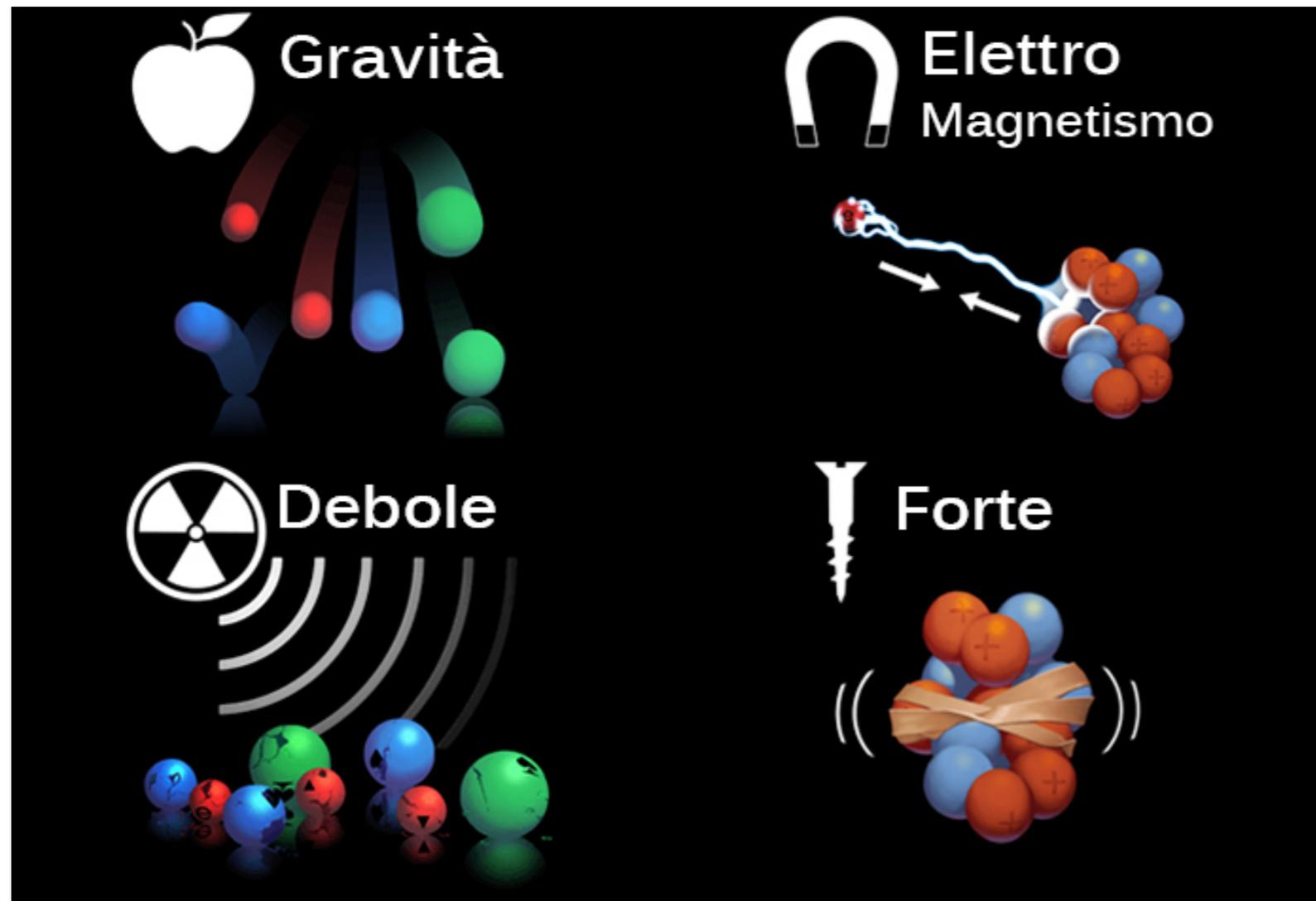
Particella massiva



Come funziona il mondo

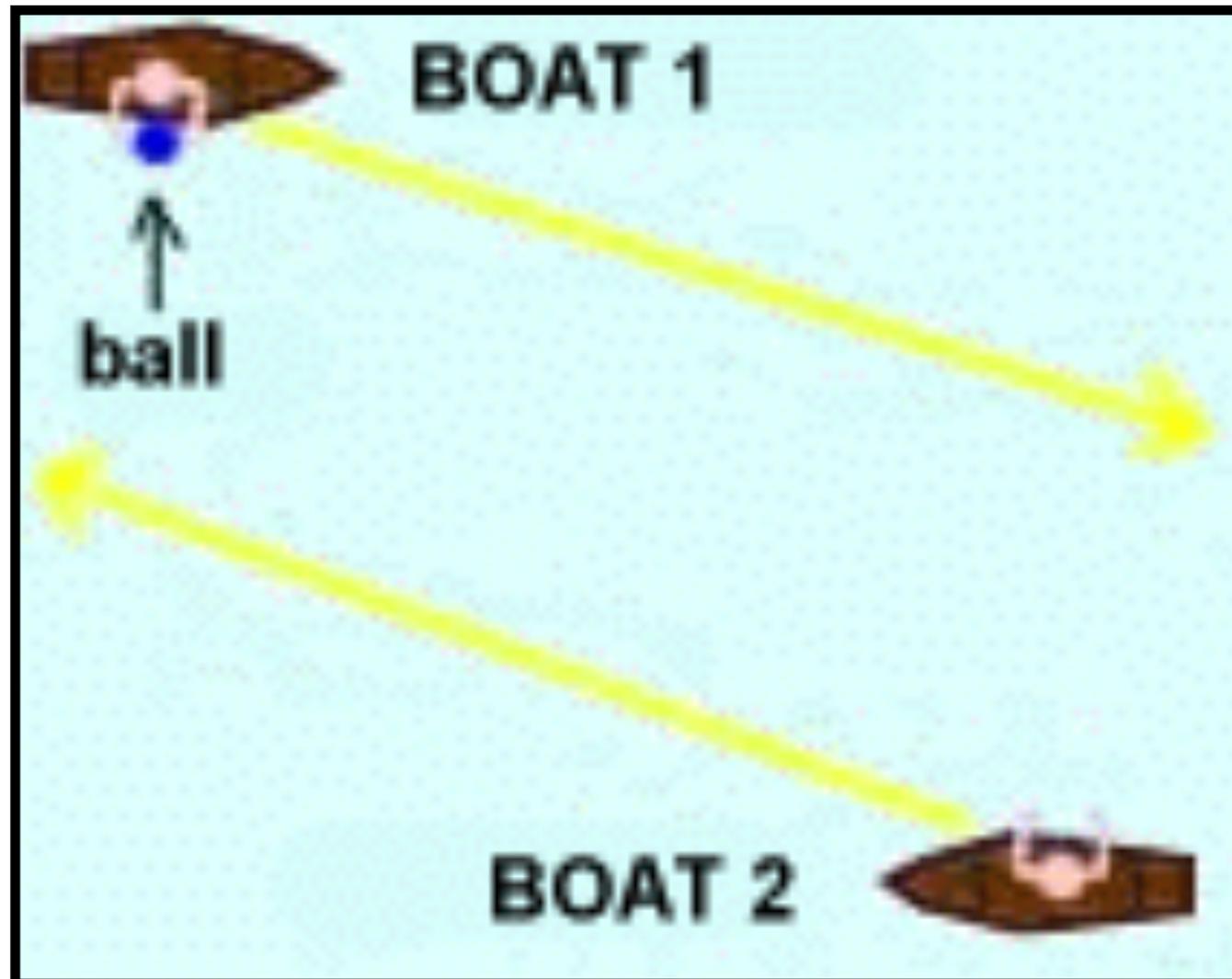
- Ora che abbiamo capito quali sono i mattoni fondamentali, cerchiamo di capire come si accorgono l'uno della presenza dell'altro, ovvero come **interagiscono**.
- Le interazioni avvengono mediante le **forze**: in Natura esistono 4 tipi di forze fondamentali (tutte le altre sono una loro manifestazione).
- Conosciamo le **leggi** di queste interazioni fondamentali?

Le 4 forze della Natura

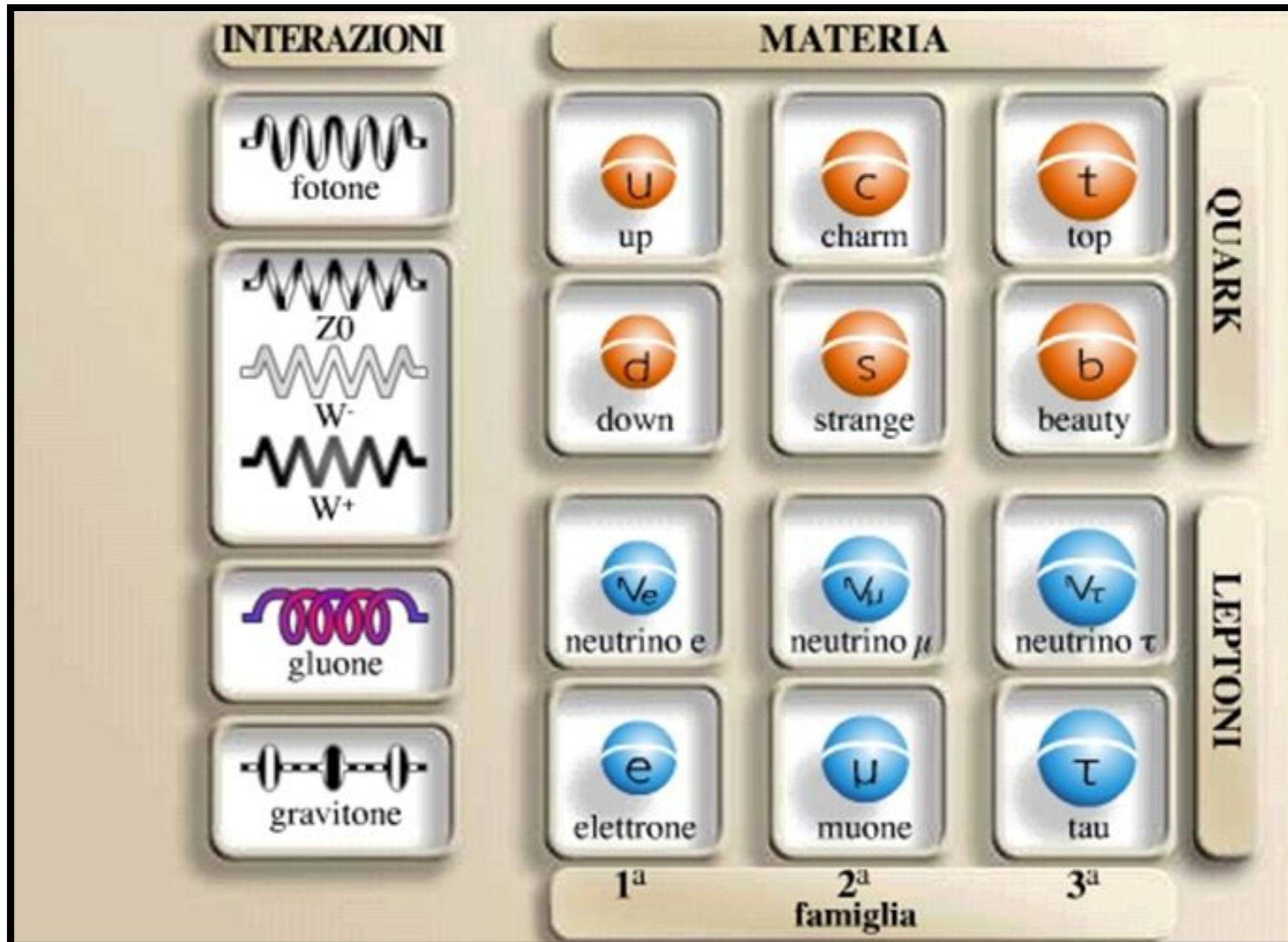


Interazione	Mediatore	Magnitudine relativa	Raggio d'azione (m)
Forte	gluone	10^{38}	$1,4 \cdot 10^{-15}$
Elettromagnetica	fotone	10^{36}	infinito
Debole	bosone W e Z	10^{25}	10^{-18}
Gravitazionale	gravitone	1	infinito

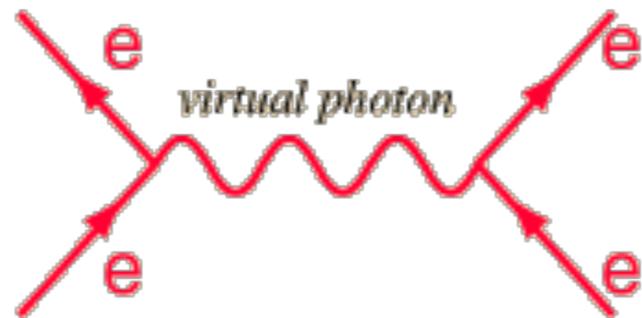
I mediatori delle forze



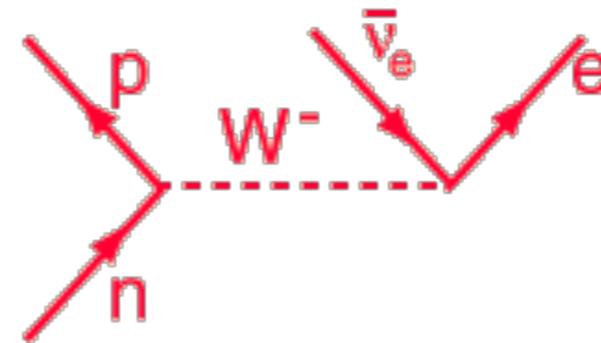
MATTONI E FORZE



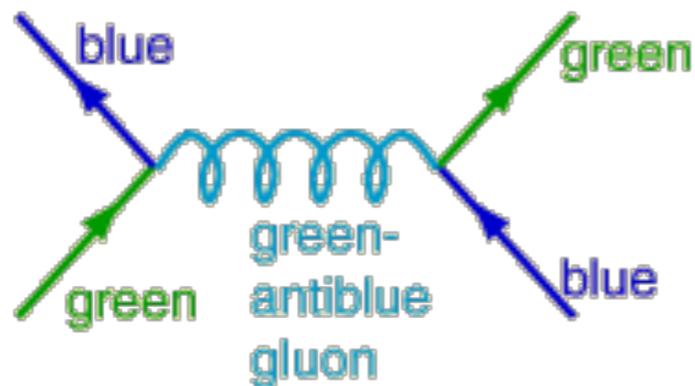
I diagrammi di Feynman



Electromagnetic



Weak

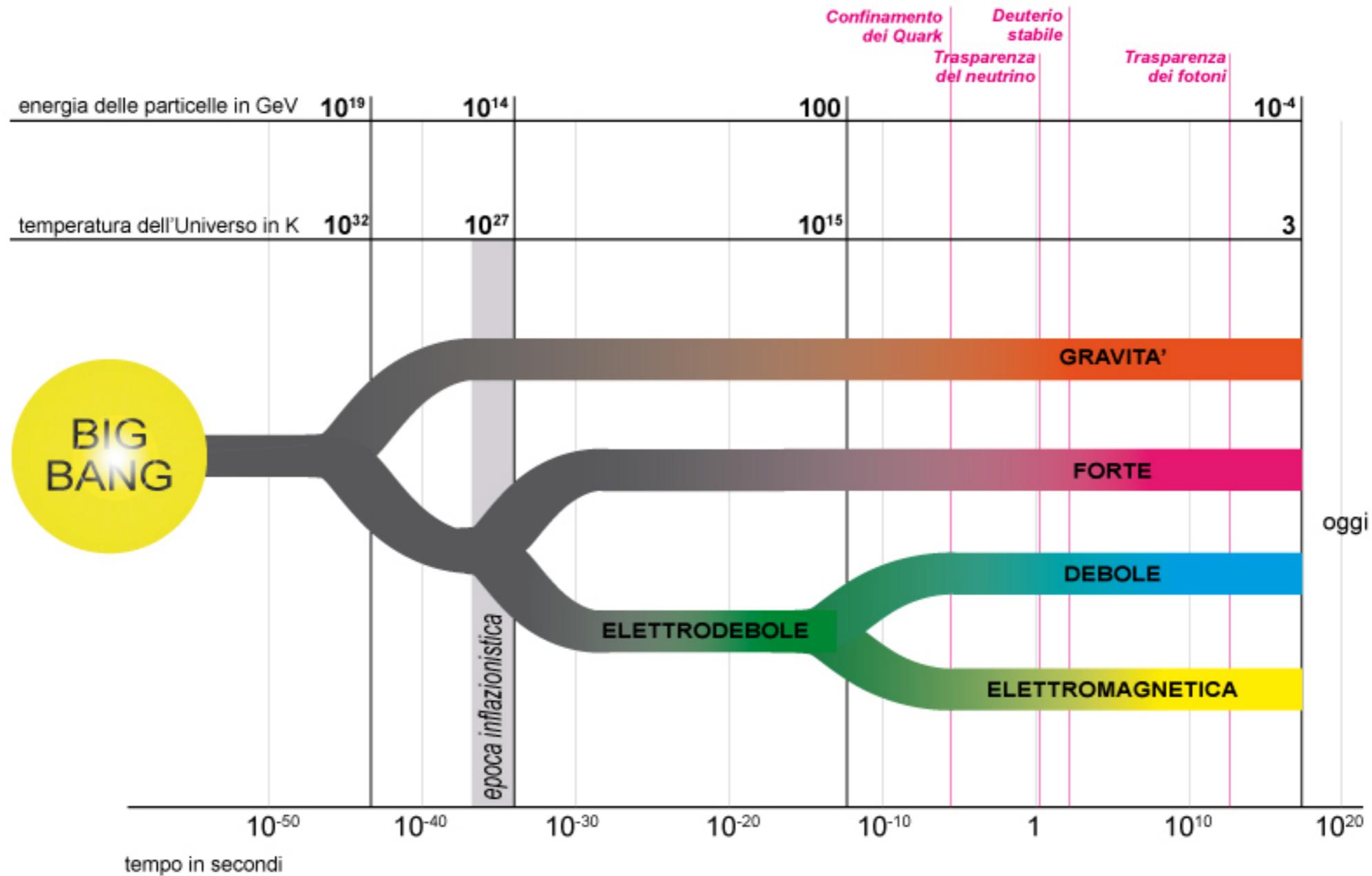


between quarks

Strong Interaction

... e la forza di gravità?

Unificazione delle forze



I confini della conoscenza



I confini della conoscenza

Se un alieno ci chiedesse: «Razza Umana, nel 2019 qual'è la vostra attuale comprensione del mondo esterno?». Ecco cosa risponderemmo:

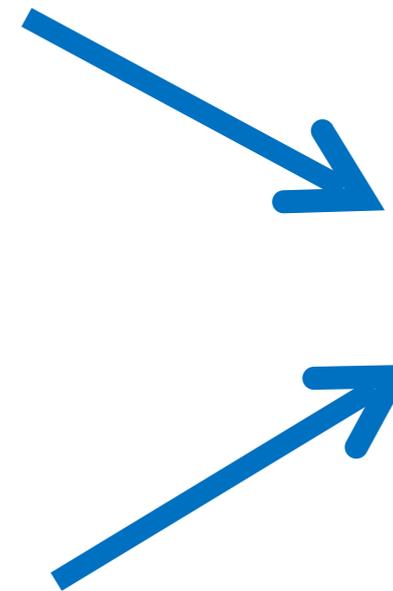
Meccanica Quantistica (relativistica)

- Cose piccole: mondo subatomico

Relatività Generale

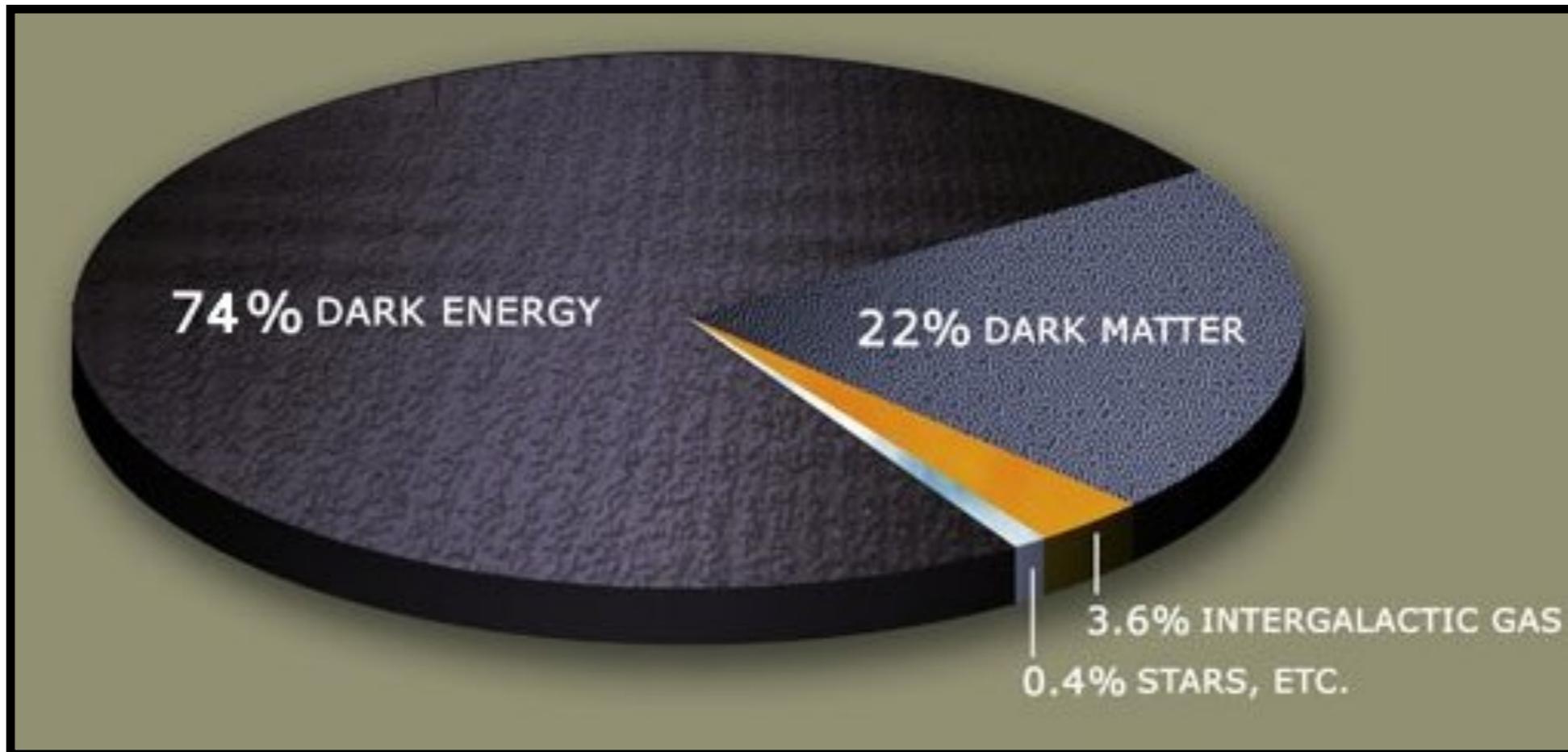
- Cose grandi: pianeti, stelle, cosmo

Meccanica Classica



*N.B. Queste teorie hanno già quasi un secolo di vita!
E da allora cosa abbiamo fatto? Molte cose, ma su un altro piano...*

Sappiamo già tutto?



A quanto pare sappiamo pochissimo della
composizione del nostro Universo!

Come si possono vedere cose invisibili?

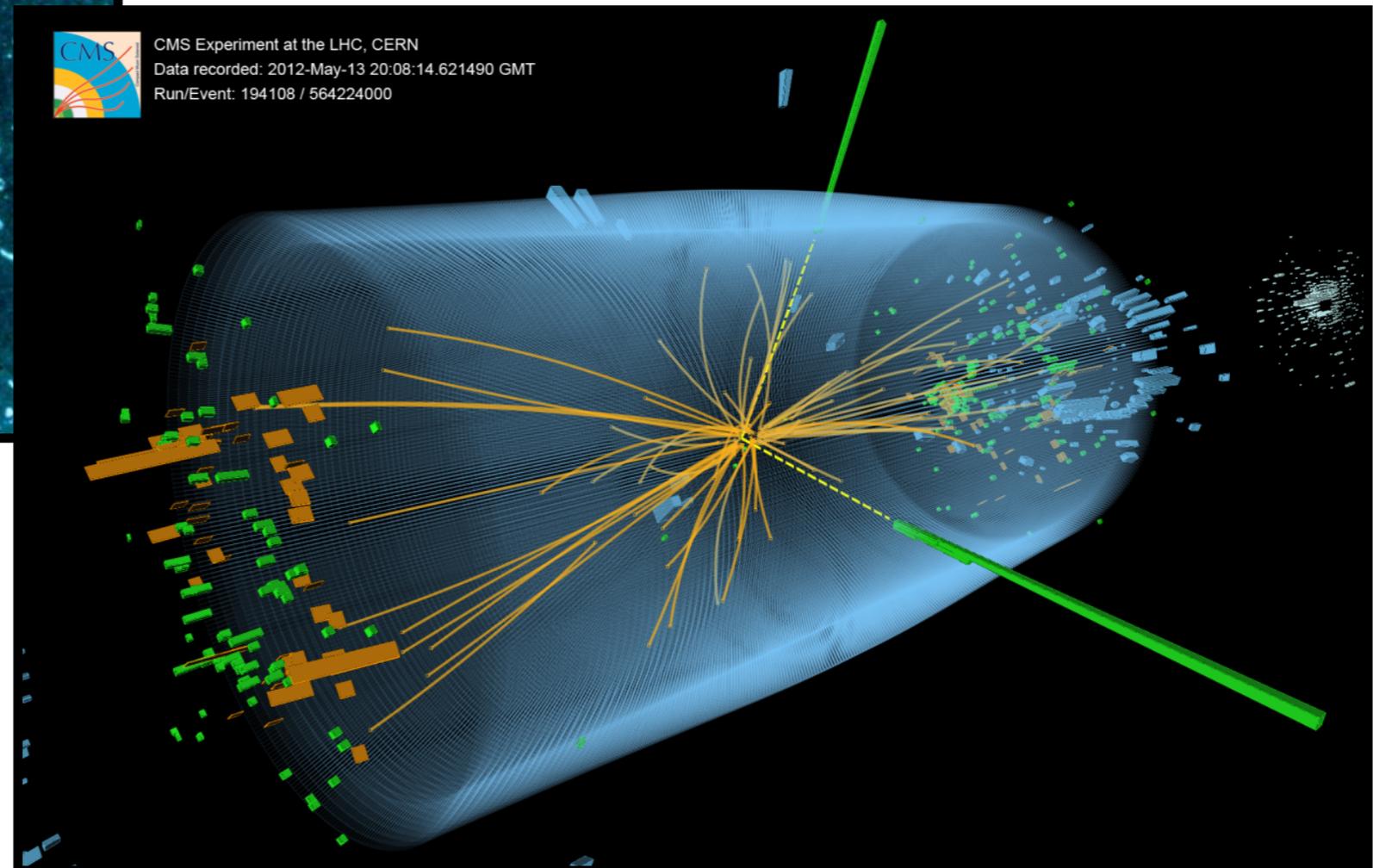


Semplice: mediante gli effetti che produce nel mondo circostante!

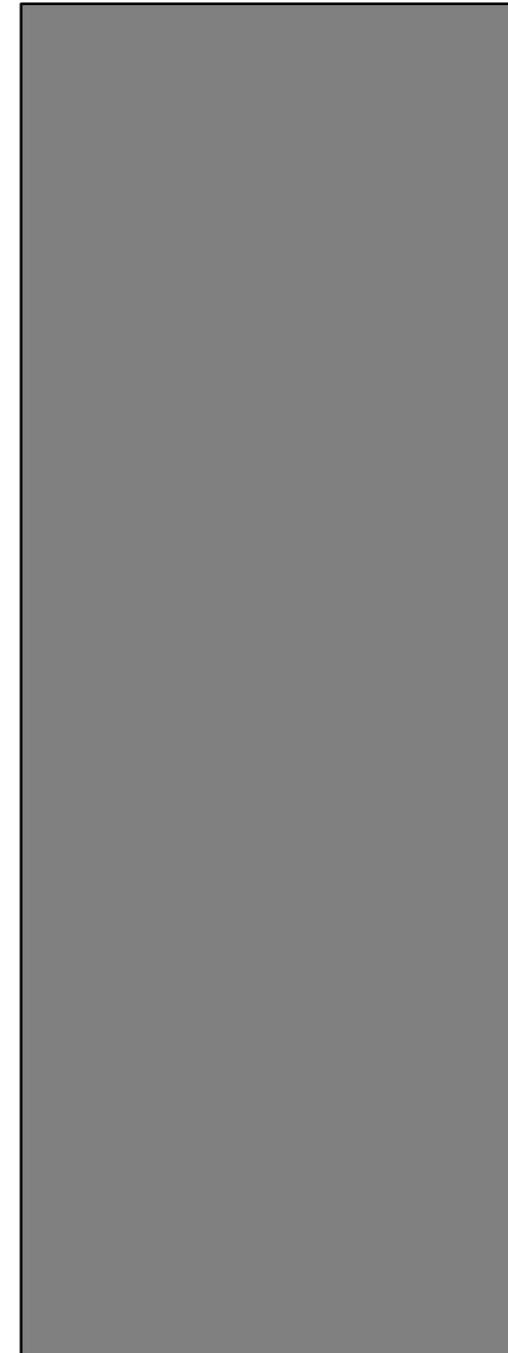
Come osserviamo le particelle



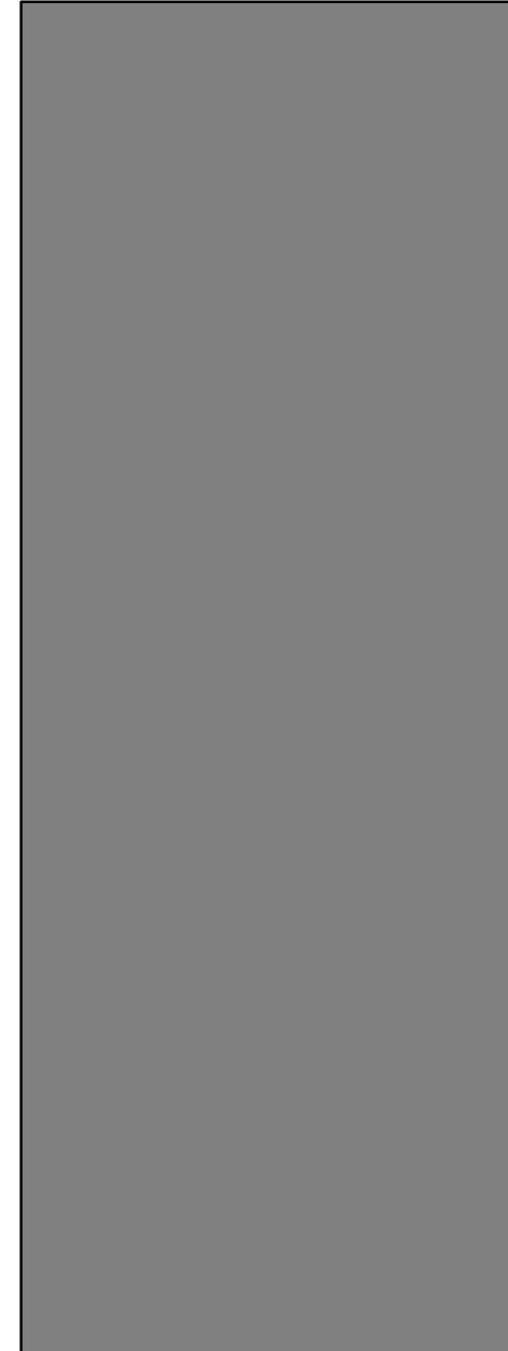
Mediante i «**rivelatori**», propaggini dei nostri organi di senso che sfruttano le caratteristiche delle particelle che vogliamo osservare...



Come si è scoperto il nucleo?



Come si è scoperto il nucleo?



Il Nucleo dell'atomo

Il nucleo atomico è composto da: **protoni** (carica positiva uguale e ESATTAMENTE opposta a quella degli elettroni) e da **neutroni**, di carica elettrica zero (ESATTAMENTE zero !)

Cariche elettriche uguali si respingono:

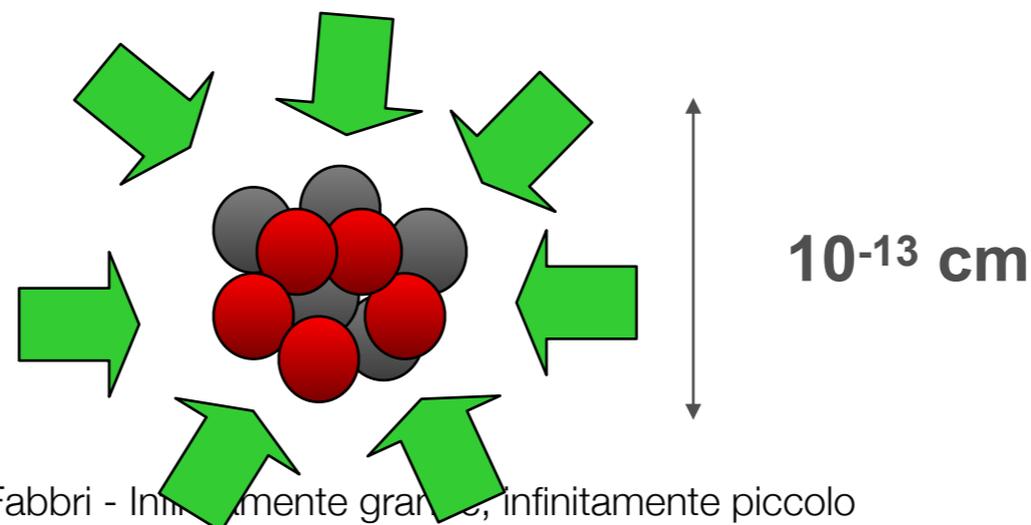
Cosa tiene assieme i protoni nel nucleo?

Deve essere una forza attrattiva, più forte della repulsione elettromagnetica.

LA FORZA NUCLEARE ! Protoni e neutroni hanno “carica nucleare” (in analogia alla forza elettrica) che li tiene uniti fra loro.

La forza nucleare agisce a distanze piccole (pari alle dimensioni del nucleo) ed è “schermata” a distanze maggiori.

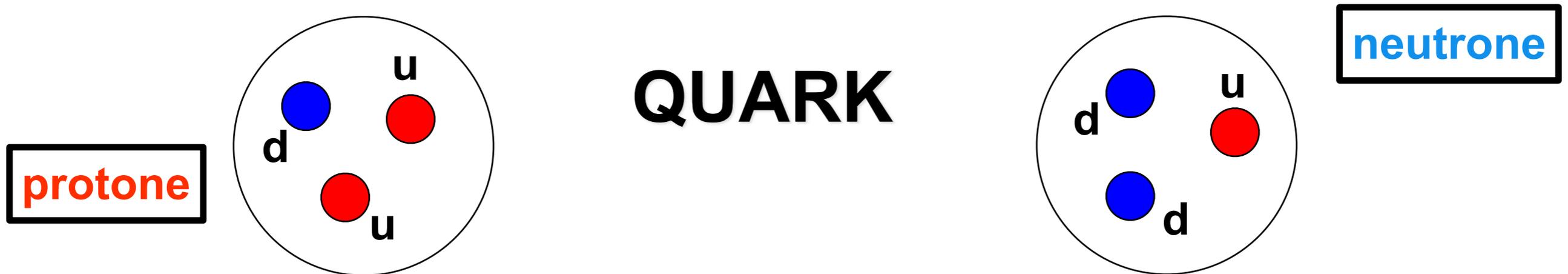
I neutroni servono a dare stabilità al nucleo



Laura Fabbri - Infinitamente grande, infinitamente piccolo

Protoni e Neutroni: I Nucleoni

Esperimenti condotti negli anni 70 hanno mostrato che protoni e neutroni (detti genericamente “nucleoni”) sono a loro volta composti di strutture più piccole, che sono state chiamate:



I quark hanno **CARICA ELETTRICA FRAZIONARIA**

Carica up = + 2 / 3.

Carica down = - 1 / 3

Le proprietà del nucleone sono date dalle proprietà dei quark, e dalle loro interazioni.

La forza nucleare fra nucleoni è in realtà la forza nucleare fra quark.

I *quark* sono particelle elementari

Nessuno, finora, è mai riuscito a guardare dentro un quark, a spezzarlo e a trovare qualcosa di più piccolo all' interno.

I quark quindi si comportano come oggetti puntiformi, senza struttura interna. **Sono particelle elementari nel senso stretto della parola.**

Questo non vuol dire che sia vero in assoluto, ma, con gli strumenti che abbiamo adesso a disposizione, **non riusciamo a vedere strutture interne al quark, più piccole di 10^{-15} cm.**

In futuro niente ci garantisce che, con tecniche più raffinate, e strumenti con una migliore risoluzione spaziale, non riusciremo a trovare strutture interne ai quark.

Gli elettroni sono particelle elementari

Come per i quark, nessuno, finora, è mai riuscito a guardare dentro un elettrone, a spezzarlo e a trovare qualcosa di più piccolo all'interno.

Anche gli elettroni, quindi si comportano come oggetti puntiformi, senza struttura interna. Sono particelle elementari nel senso stretto della parola.

Questo non vuol dire che sia vero in assoluto, ma, con gli strumenti che abbiamo adesso a disposizione, non riusciamo a vedere strutture interne agli elettroni, più piccole di 10^{-15} cm

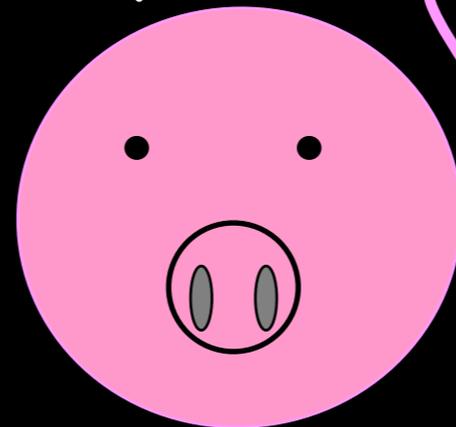
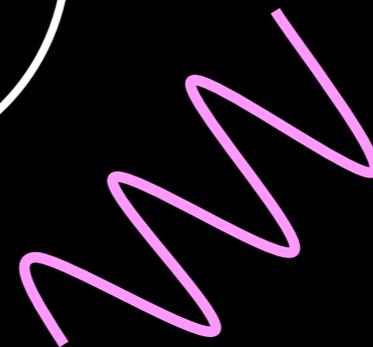
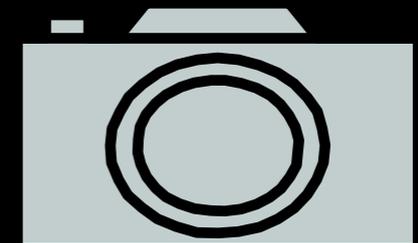
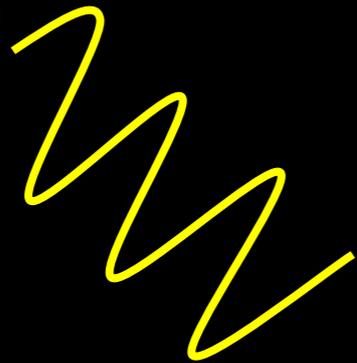
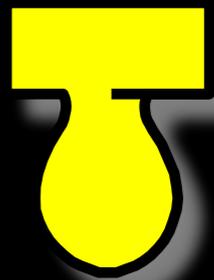
Come facciamo a vedere oggetti piccoli 10^{-15} cm ?

Per rispondere a questa domanda, è necessario capire:



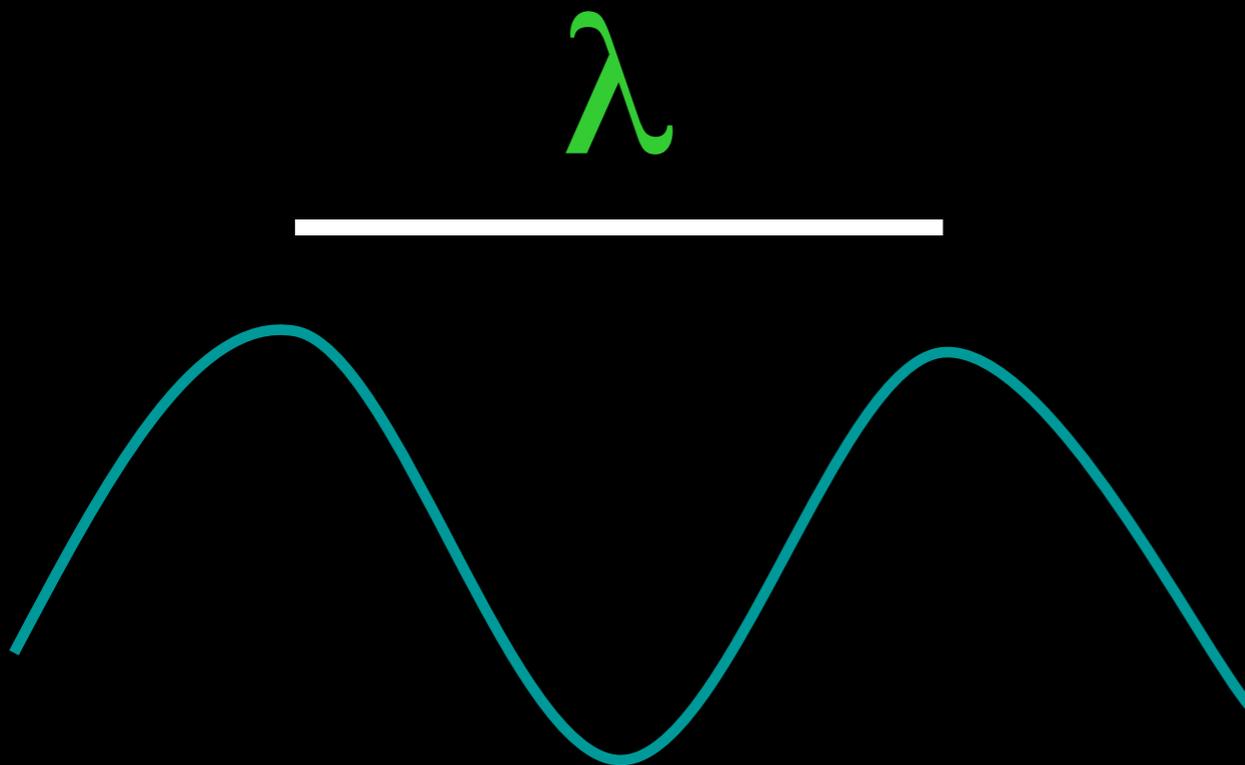
Cosa ci permette di vedere un oggetto ?

PER VEDERE UN OGGETTO ABBIAMO
BISOGNO DI QUALCOSA CHE LO ILLUMINI



La luce è un'onda elettromagnetica (così come i raggi X, i raggi γ , i raggi UV, i raggi infrarossi, le microonde e le onde radio...)

Le onde sono caratterizzate da una loro **velocità** (che in questo caso è la velocità della luce), e da una **lunghezza d'onda λ** :



Per la luce visibile,

$$\lambda = 0.00004 - 0.00007 \text{ cm}$$

Il punto cruciale per vedere un oggetto è **l'interazione fra la luce e l'oggetto stesso.**

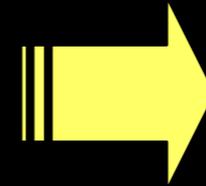
La luce **DEVE** interagire con l'oggetto per renderlo visibile, ovvero per "portarci" le informazioni sulla sua struttura, colore, forma, etc.

Per interagire con un oggetto, la luce deve avere lunghezza d'onda più piccola dell'oggetto stesso

Altrimenti l'oggetto diventa invisibile alla luce

E' POSSIBILE VEDERE GLI ATOMI CON UN MICROSCOPIO OTTICO ?

Atomo: $\sim 10^{-8}$ cm

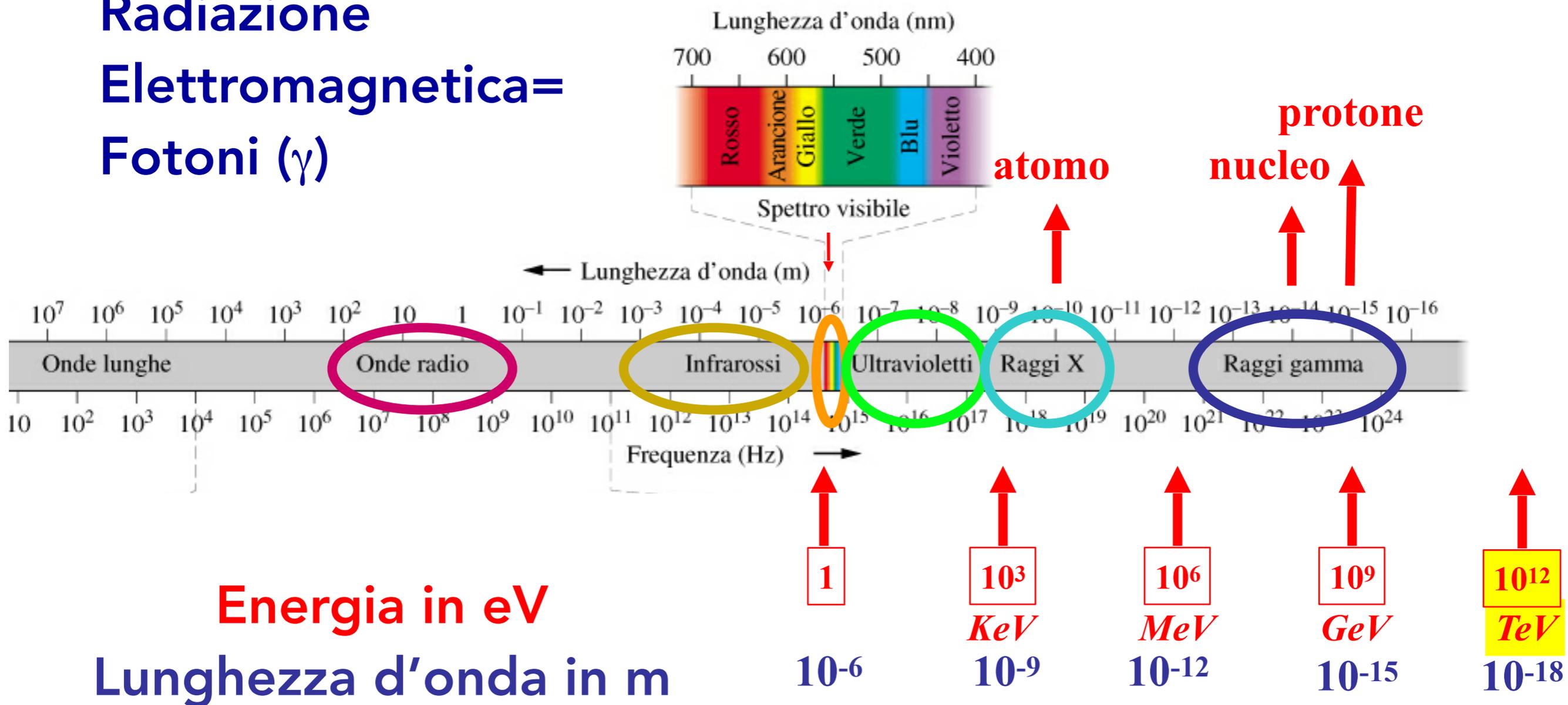


NO !!!

$\lambda_{\text{luce visibile}}$: $\sim 5 \times 10^{-5}$ cm

Non è una questione di lenti, o di microscopio potente.
Esiste una **LIMITAZIONE FISICA** che impedisce alla luce
visibile di farci vedere oggetti più piccoli della sua
lunghezza d'onda.

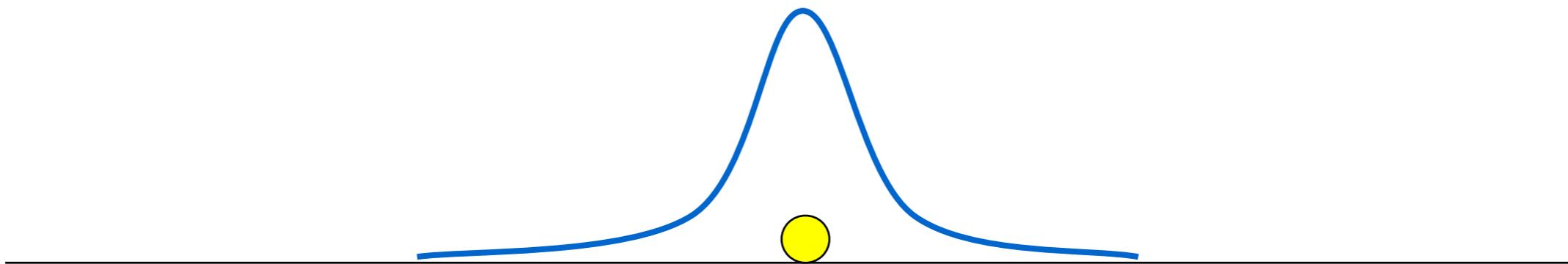
Radiazione Elettromagnetica= Fotoni (γ)



eV= energia accumulata da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

Come facciamo quindi a veder oggetti così piccoli ?

La meccanica quantistica ci dice che qualunque oggetto è descrivibile da una “**funzione d’onda**”



Una funzione d’onda è la sovrapposizione di tante onde di lunghezza d’onda diversa diverse.

La **lunghezza d’onda** di queste onde è legata all’impulso dell’oggetto, secondo la relazione:

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

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

h = costante di Plank
 m = massa dell'oggetto
 v = velocità dell'oggetto

Se l'oggetto è un elettrone, accelerato da una differenza di potenziale di 1000 Volt (e quindi con una energia cinetica di 1000 eV), la sua lunghezza d'onda associata è di circa **10^{-9} cm** ovvero inferiore alle dimensioni di un **atomo**

Un elettrone accelerato a questa energia riesce a “vedere” un atomo, se ci va a sbattere contro.

Questo è il principio di funzionamento del microscopio elettronico

Se invece di accelerare un elettrone con 1000 Volt lo acceleriamo con **1 Miliardo di Volt** la sua lunghezza d'onda associata sarà più piccola delle dimensioni di un **NUCLEO** atomico.

Quindi, se lo mandiamo a sbattere contro un bersaglio, sarà in grado di vedere i nuclei del bersaglio o addirittura quello che c'è al suo interno.

Questo è quello che si fa negli acceleratori di particelle

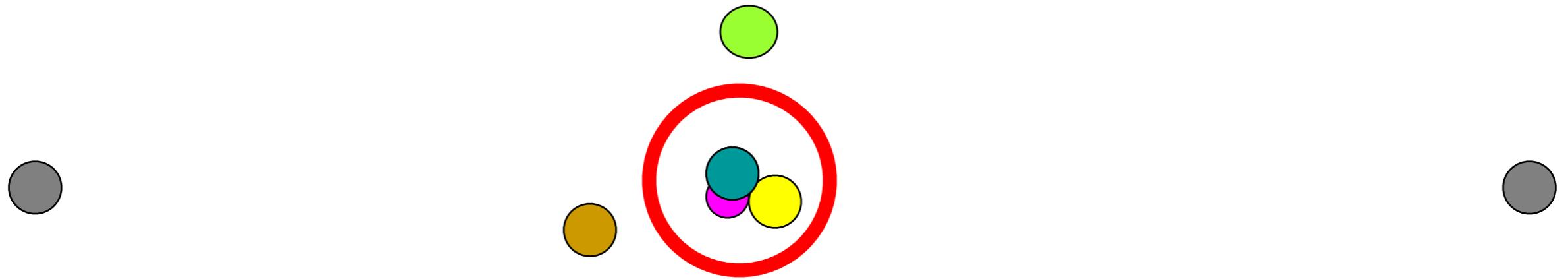
Lo studio degli urti fra particelle ad energie altissime (fino a 10 Milioni di Milioni di Elettronvolt) permette di capire:

1) Come è fatta la materia su scale estremamente piccole

2) Quali sono le "forze" (le interazioni) che regolano il comportamento della materia su scala così piccola.

Cosa avviene concettualmente in un urto tra particelle ?

Due protoni vengono fatti urtare fra loro ad altissima energia (accelerati da un acceleratore)



Quello che succede nell'urto, avviene su scale spaziali piccolissime, tanto più piccole tanto maggiore è l'energia a cui avviene l'urto.

Lo studio dei prodotti della collisioni ci da le informazioni per capire cosa è avvenuto nell'urto

Negli urti ad alte energie fra particelle viene “creata” nuova materia, grazie alla relazione relativistica:

$$E = mc^2$$

L'energia **E** e la massa **m** sono **equivalenti** e, sotto opportune condizioni, **intercambiabili**.

Una parte dell'energia cinetica iniziale dei proiettili si trasforma in materia dopo l'urto. Si assiste quindi alla “creazione” di nuove particelle, che non erano presenti prima dell'urto.

In questo modo è possibile **produrre particelle “pesanti”** (più di 100 volte la massa del protone), che non esistono stabilmente in natura nella materia ordinaria, ma che possono essere prodotte in fenomeni naturali nei quali entra in gioco una altissima energia.

L'universo nei primi istanti di vita era estremamente caldo, e la materia era presente “disgregata” nei suoi componenti fondamentali.

Questo implica che **la materia si “urtava” continuamente ad altissima energia.**

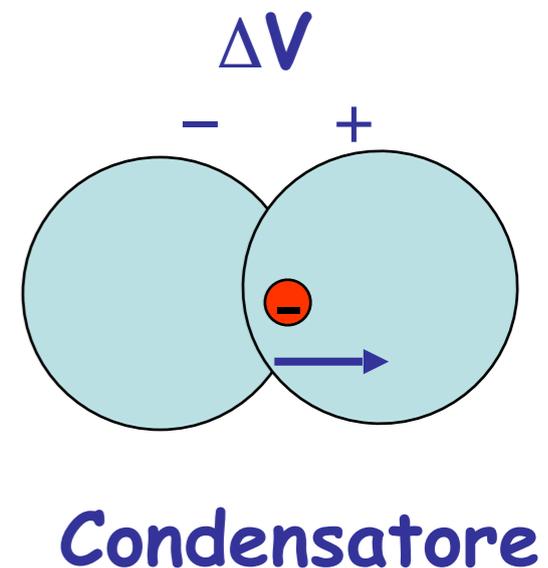
Negli acceleratori di particelle si riproducono localmente le condizioni presenti nell'universo quando questo aveva **10 miliardesimi di secondo di vita**

Particelle elementari come proiettili per gli esperimenti di alta energia

Partiamo da **elettroni** e **protoni**:

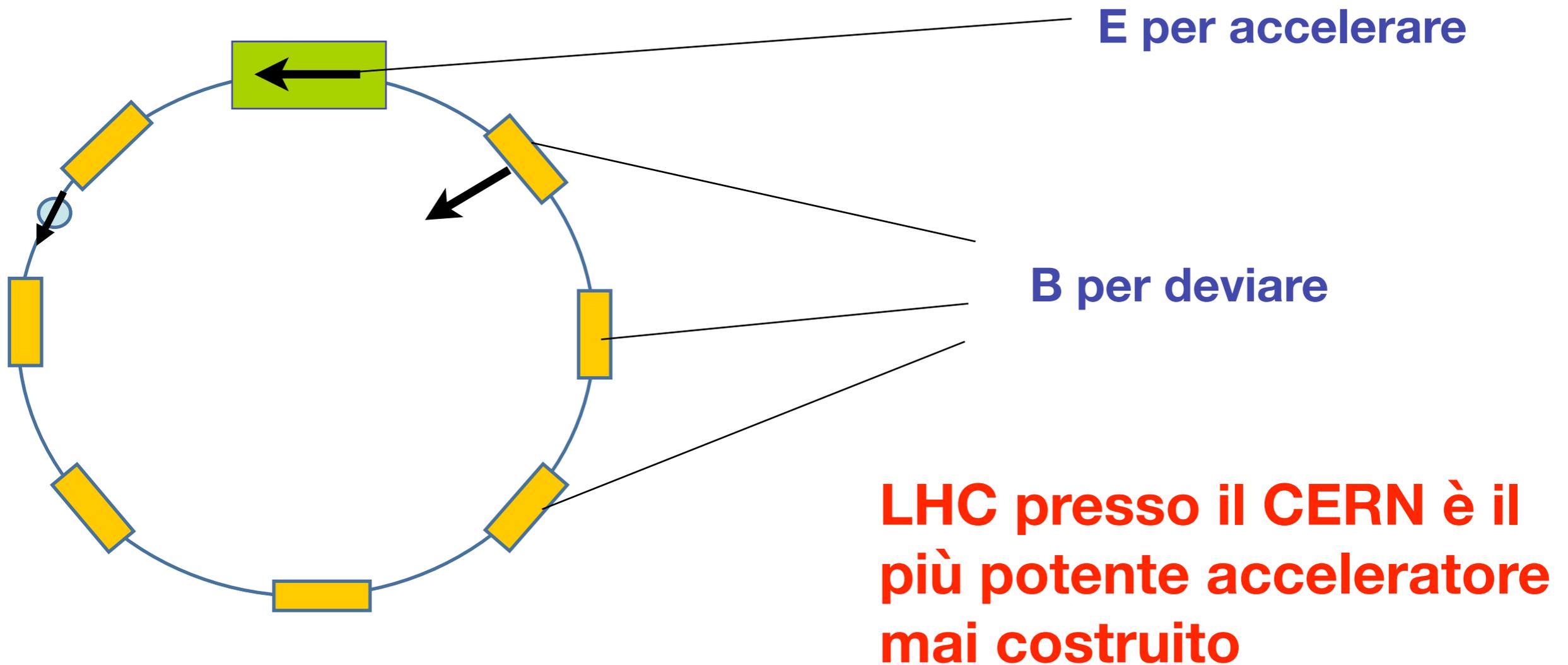
- **Elettroni** prodotti da riscaldamento di filamenti (come nel televisore)
- **Protoni** prodotti da ionizzazione dell'idrogeno tramite forti campi elettrici

L'accelerazione avviene tramite campi elettrici (proporzionale alla differenza di potenziale ΔV)

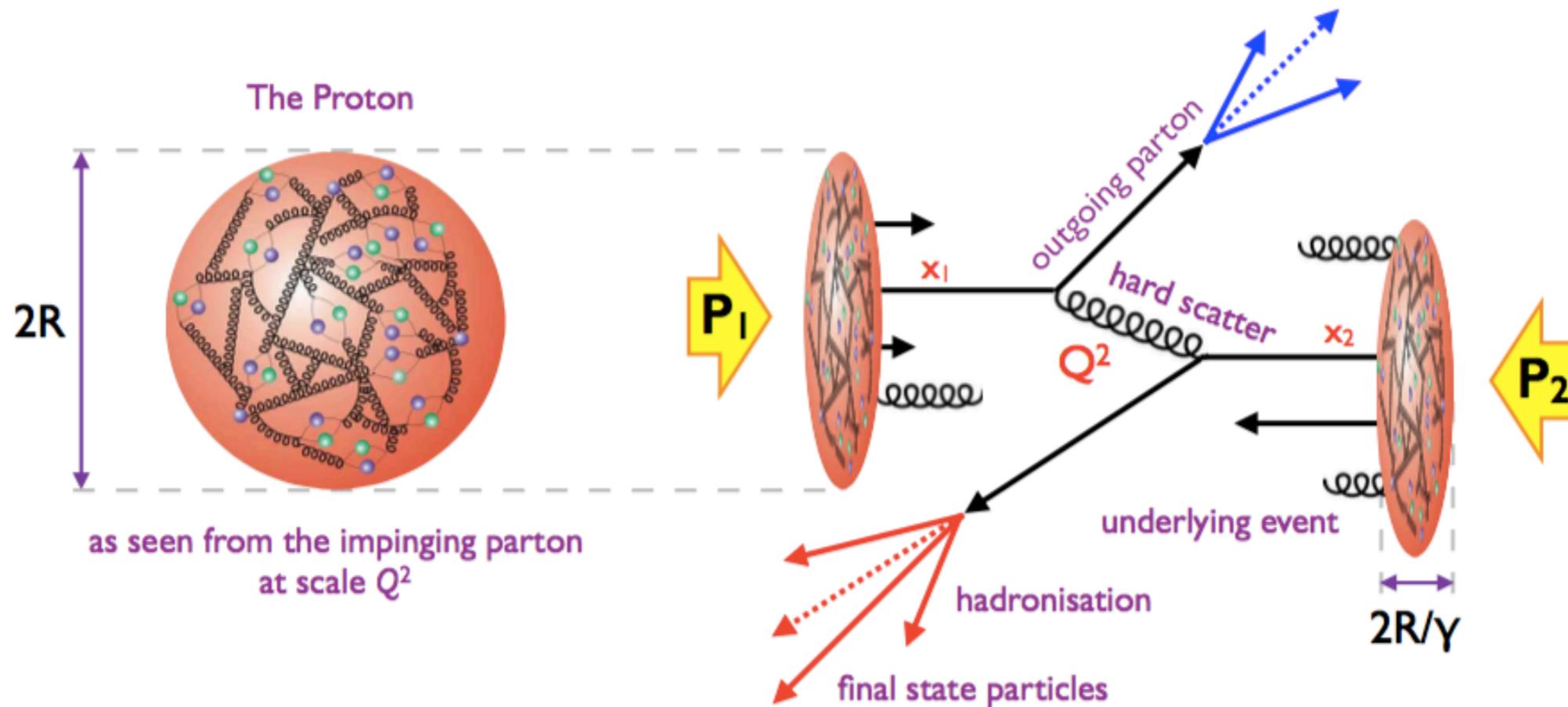


Come funziona un acceleratore

- Le particelle sono guidate su orbite circolari per mezzo di campi magnetici e accelerate tramite campi elettrici



Collisioni Protone-(anti)protone

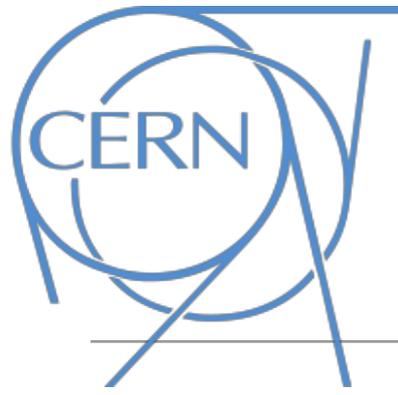


Underlying event

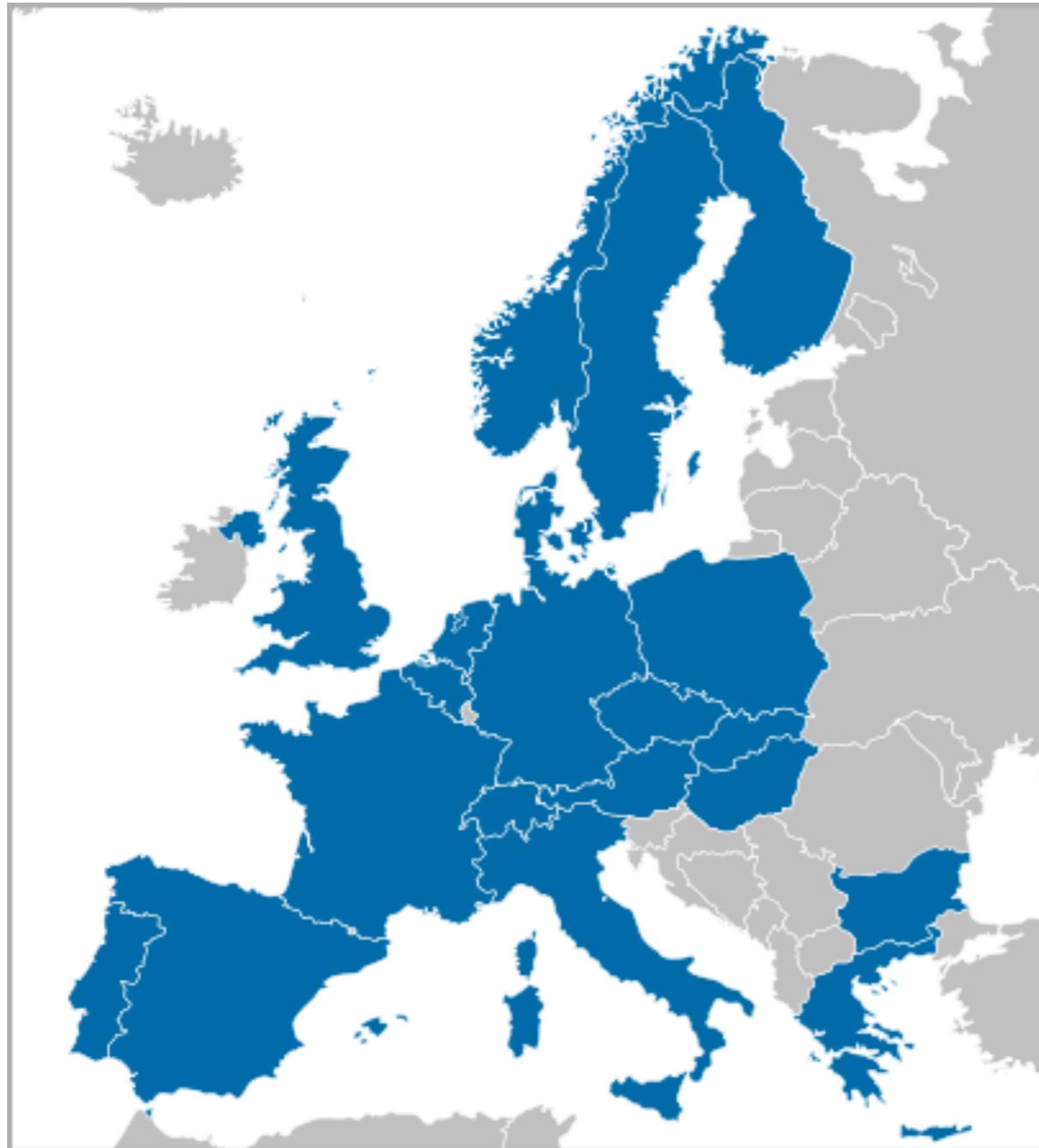
- proton remnants from collective interaction of partons not involved in hard scatter
- description necessitate “tuning” of non-perturbative MC parameters based on data

Parton shower and hadronisation

- ISR/FSR emission of gluons
- production of final states hadrons scale $< \Lambda_{\text{QCD}}$ (non-perturbative)
- MC models tuned on data



CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)
è il più grande laboratorio di fisica delle particelle del mondo



~ 3000 dipendenti
8000 ricercatori provenienti da
più di 500 Istituzioni da
80 paesi

Istituito nel 1954 e supportato
da 22 stati membri

Budget:
600 milioni di euro per anno

12% da Italy

LHC (Large Hadron Collider)

Situato presso il CERN, nei dintorni di Ginevra al confine tra Francia e Svizzera.

LHC con i suoi **27 chilometri** di circonferenza è il più grande acceleratore di particelle mai costruito al mondo.



nte grande, infinitamente piccolo

LHC: Large Hadron Collider

CERN Site



ATLAS

ALICE

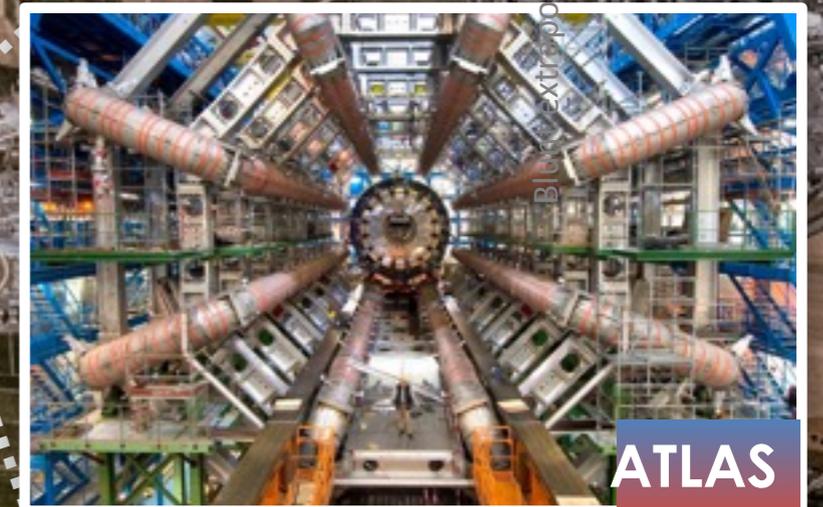
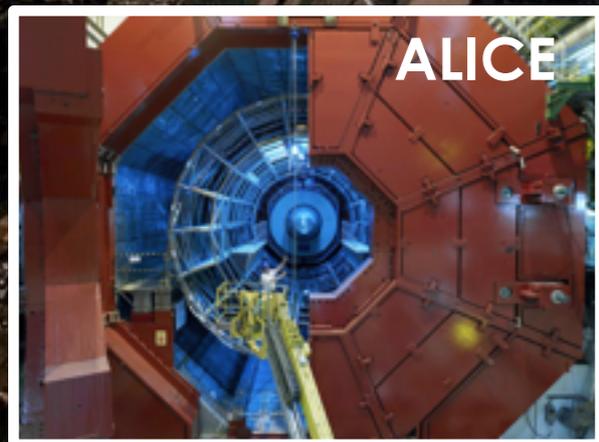
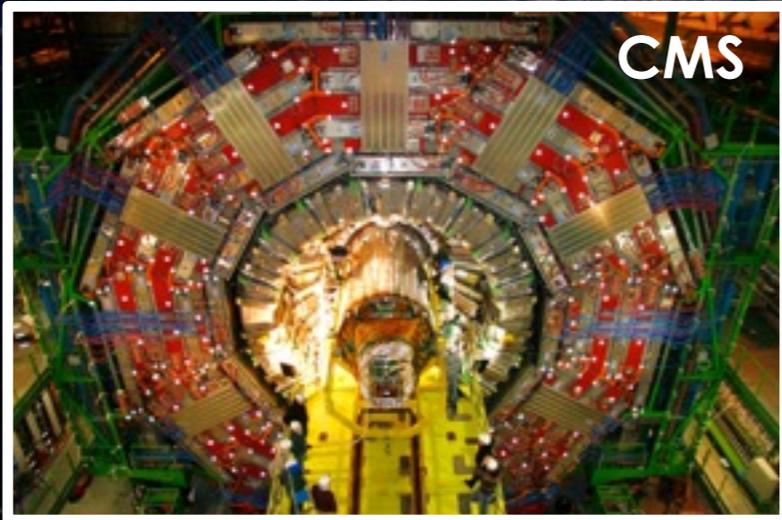
LHCb

CMS

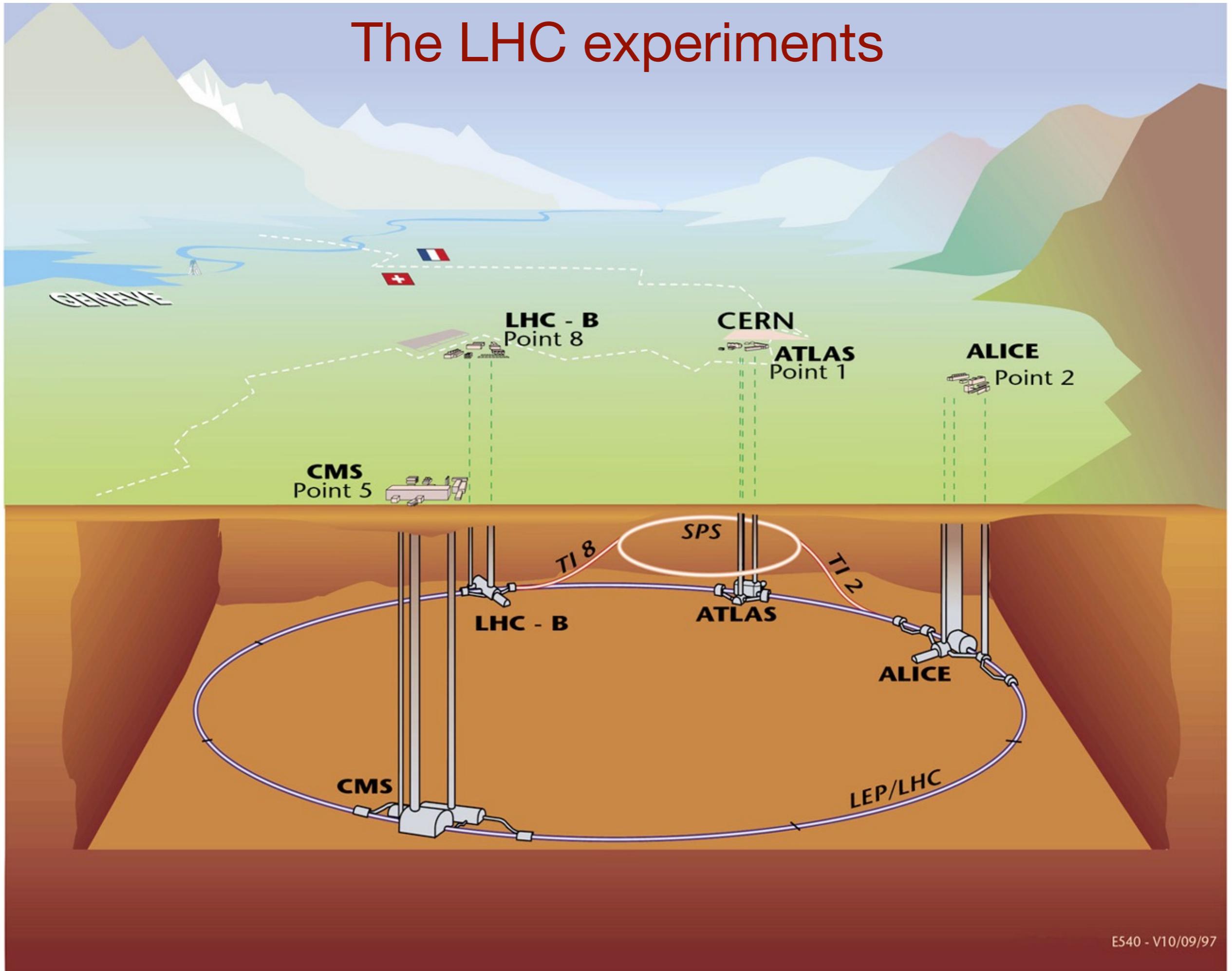


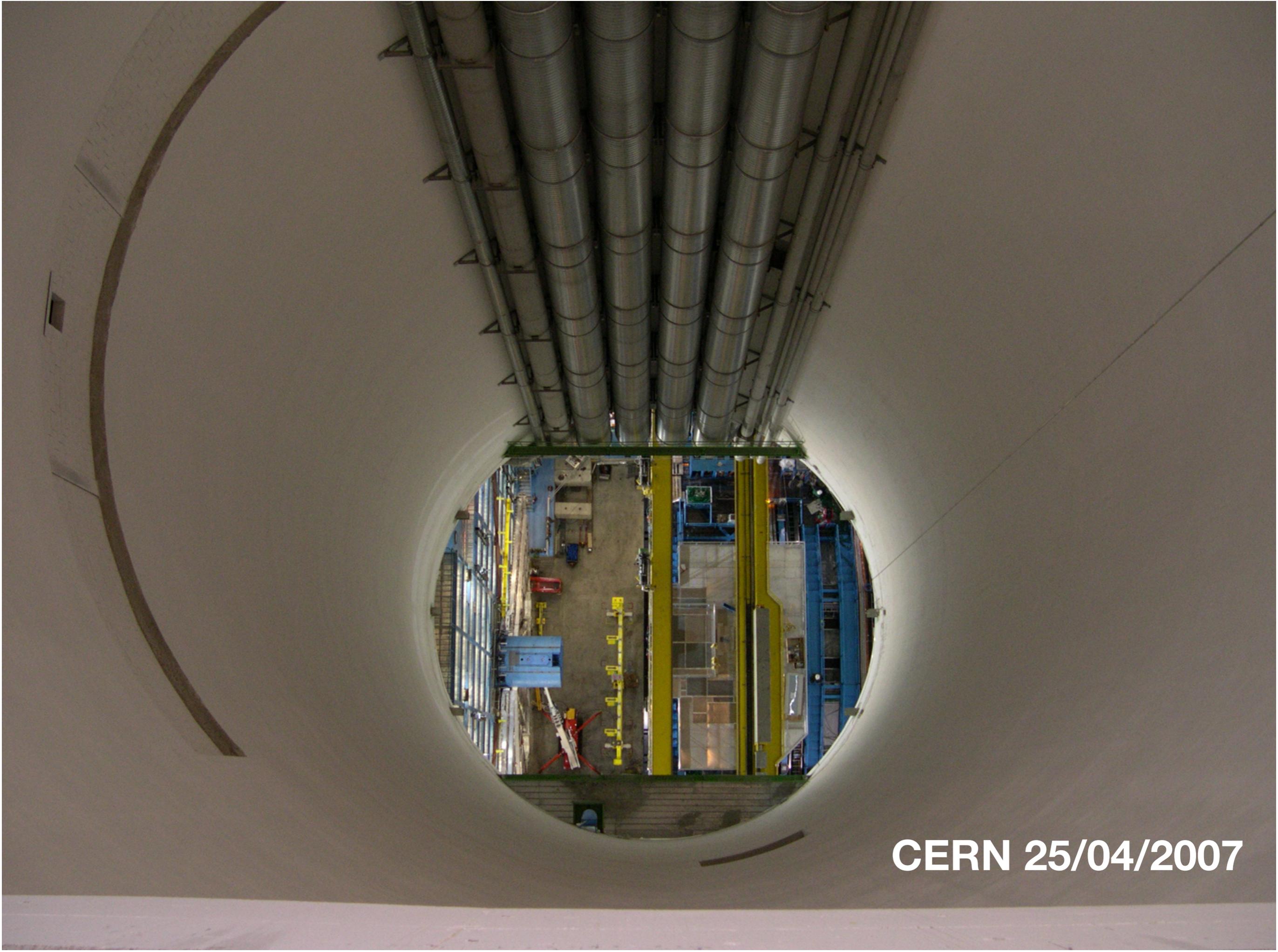
LHC, Large Hadron Collider

2010-2012 : proton-proton collisions at 7 and 8 TeV
since 2015: proton-proton at 13 TeV



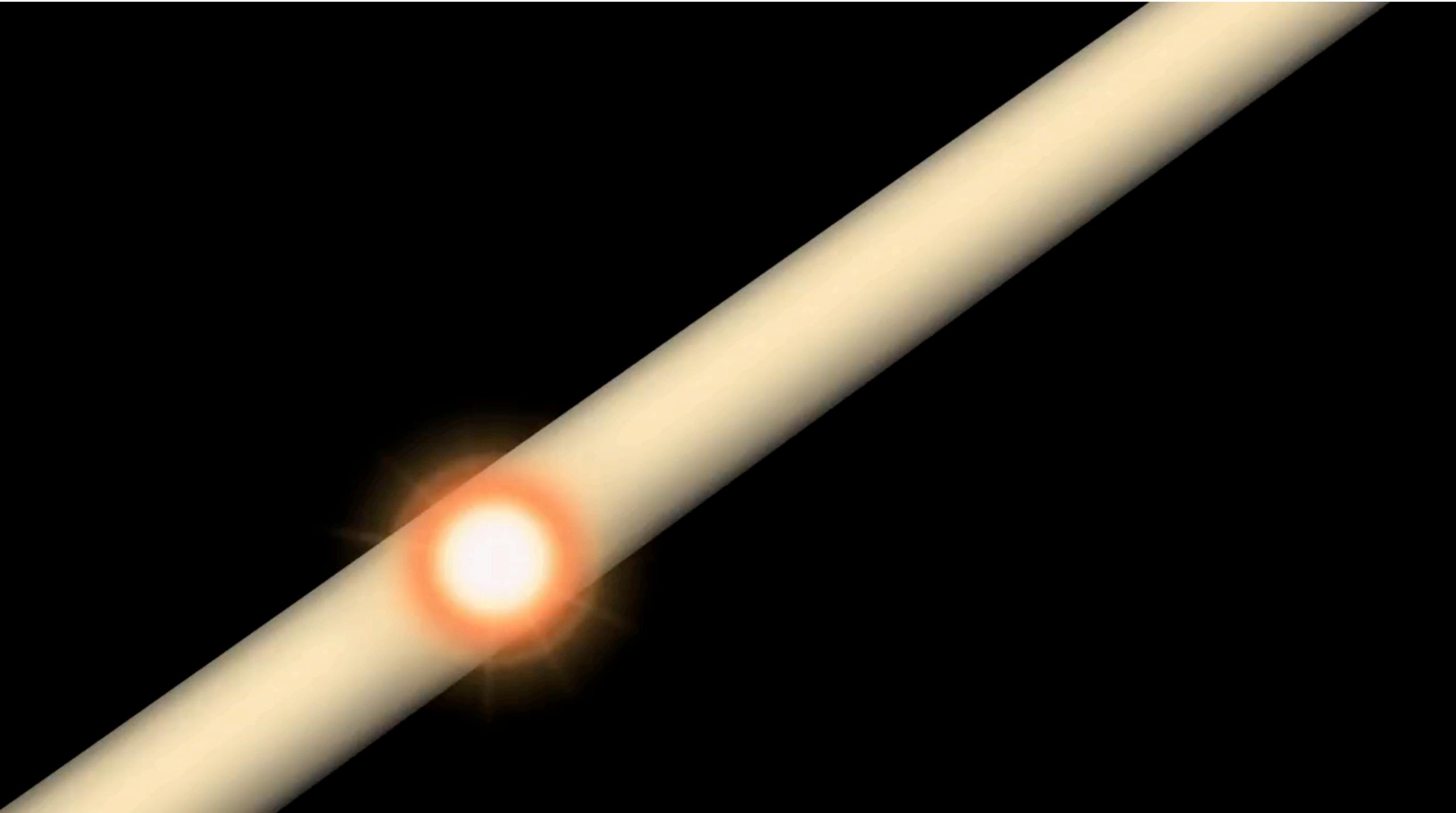
The LHC experiments



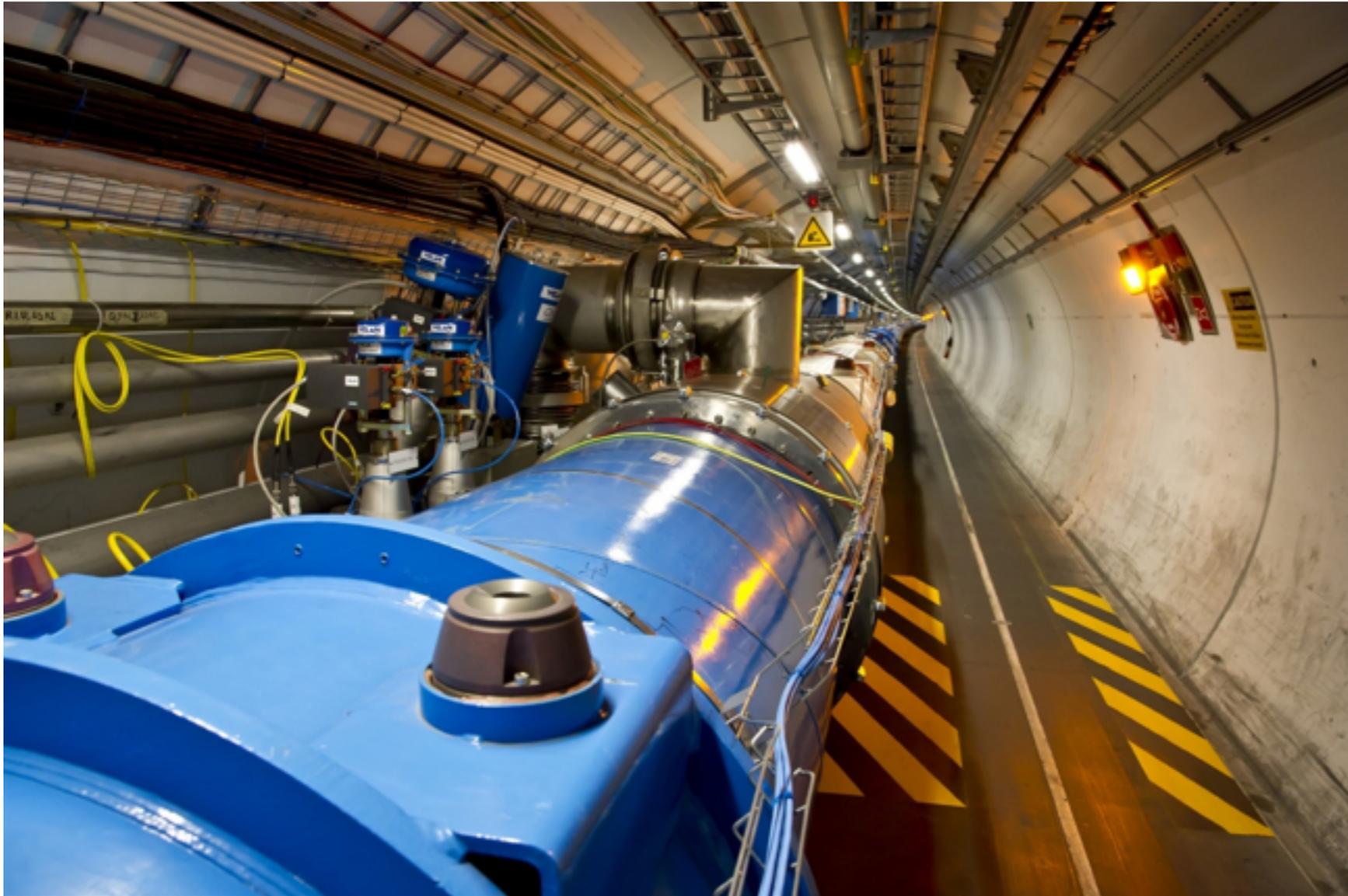


CERN 25/04/2007

Per riassumere ...



Large Hadron Collider (LHC)



It collides **protons** or **lead ions** at energies approaching the speed of light.

The beams in the LHC are made up of **bunches of protons**, spaced seven metres (25 nanoseconds) apart, with each one containing more than 100 billion protons (10^{11}).

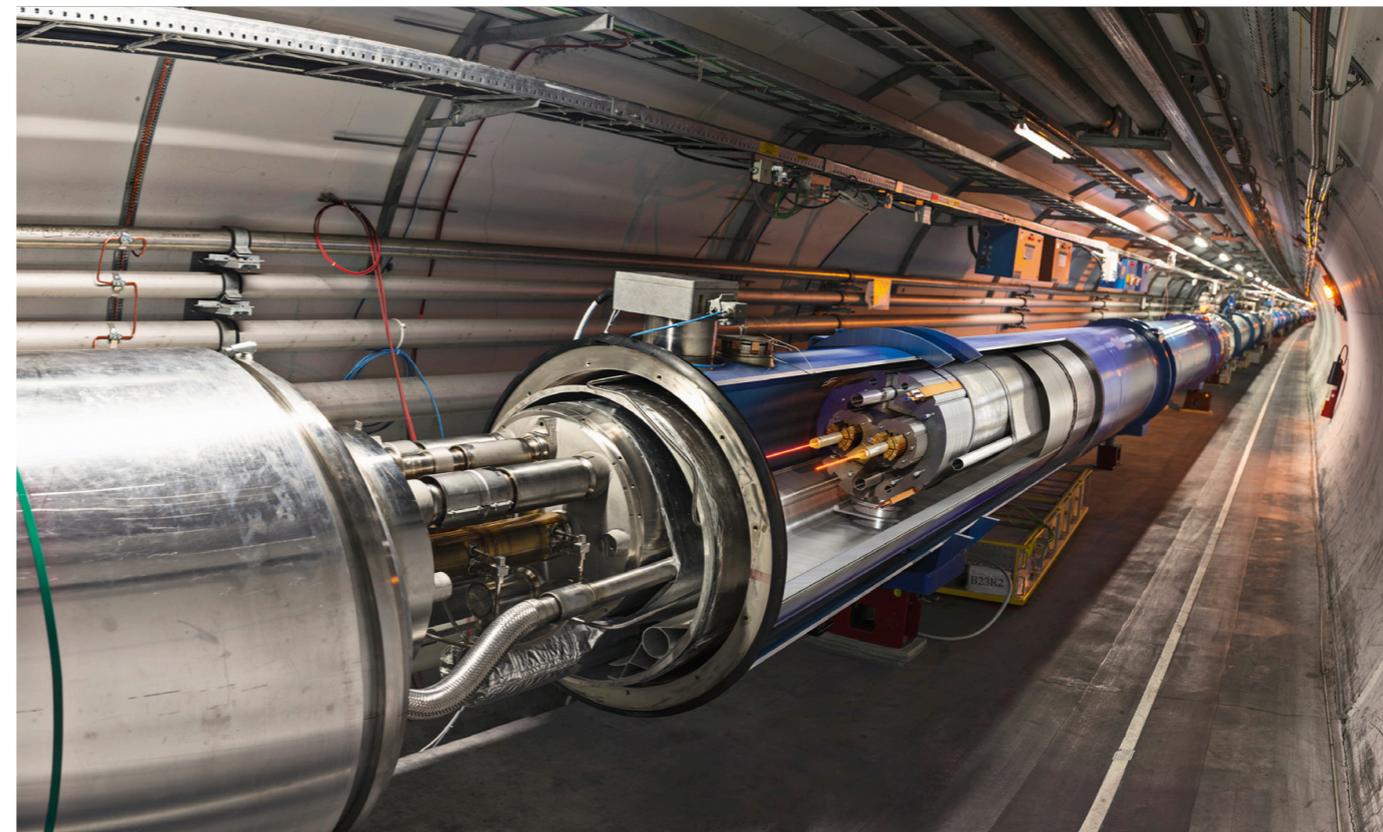
2556 is the maximum possible number of bunches that can be reached with the beam preparation method currently used.

All protons accelerated at CERN are obtained from standard hydrogen. Although proton beams at the LHC are very intense, only 2 nanograms of hydrogen are accelerated each day. Therefore, it would take the LHC about 1 million years to accelerate 1 gram of hydrogen.

LHC parameters

Quantity	Number
Circumference	26 659 m
Dipole operating temperature	1.9 K (-271.3oC)
Number of magnets	9593
Number of main dipoles	1232
Number of main quadrupoles	392
Number of RF cavities	8 per direction
Energy, protons*	6.5 TeV
Energy, ions	2.56 TeV/u (energy per nucleon)
Peak magnetic dipole field	7.74 T
Distance between bunches	~7.5 m
Luminosity (protons)	Peak Luminosity: $\sim 1.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
No. of bunches per proton beam (design value)	2808
No. of protons per bunch (at start)	1.2×10^{11}
Number of turns per second	11245
DC beam current	0.56 A
Number of collisions per second	1 billion

corresponding to a bunch spacing of 25 ns



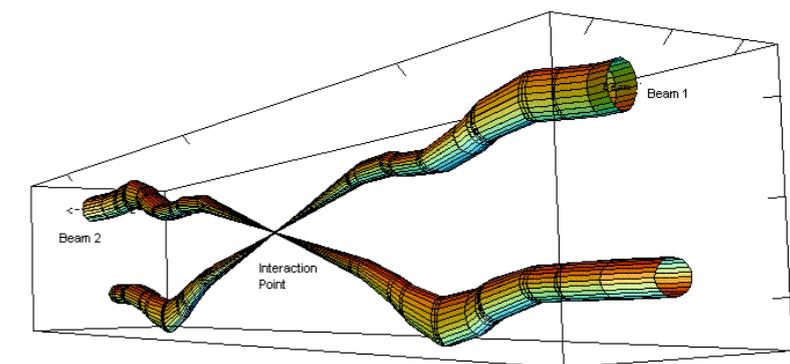
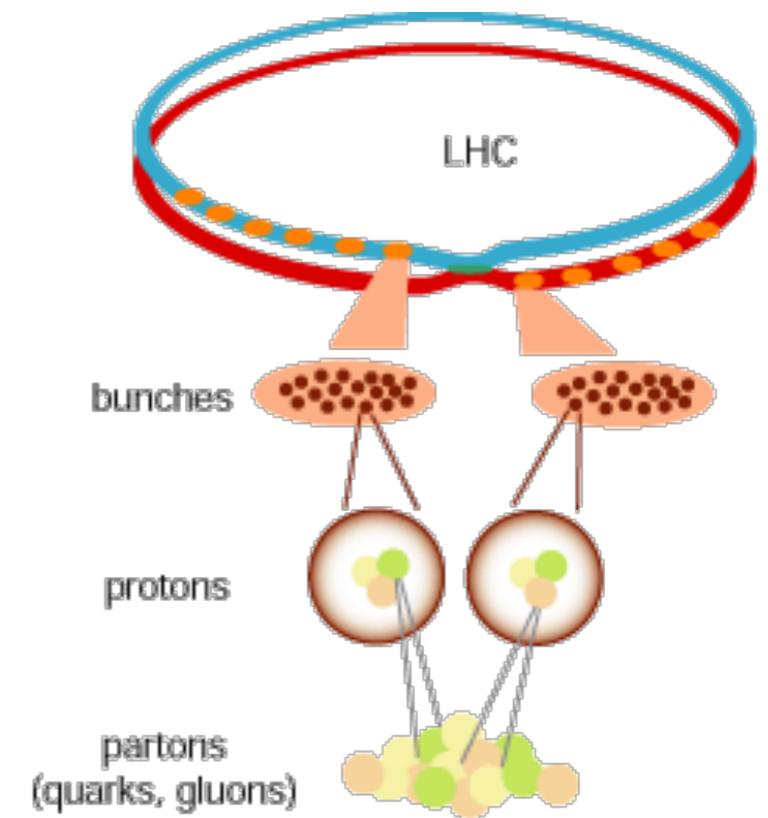
Each dipole is 15 m long and weighs around 35 t.

Curiosity:

Each of the 6000-9000 superconducting filaments of niobium–titanium in the cable produced for the LHC is about 0.007 mm thick, *about 10 times thinner than a normal human hair*. If you added all the filaments together they would stretch to the Sun and back six times with enough left over for about 150 trips to the Moon.

LHC BEAMS

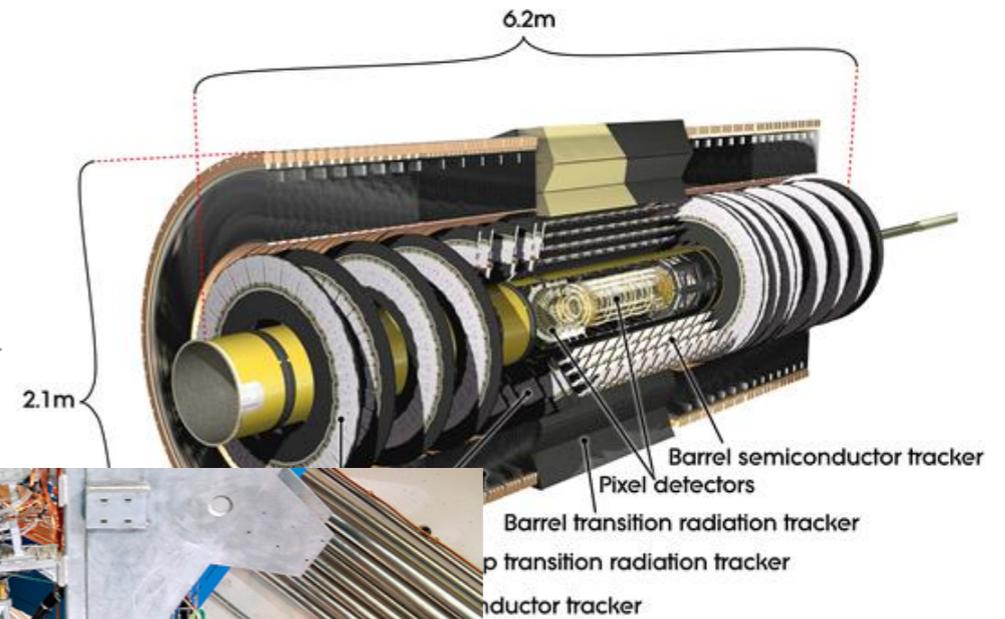
- The protons of the LHC circulate around the ring in well-defined bunches. The **bunch structure** of a modern accelerator is a direct consequence of the radio frequency (RF) acceleration scheme. Protons can only be accelerated when the RF field has the correct orientation when particles pass through an accelerating cavity, which happens at well specified moments during an RF cycle.
- The **bunch size** is not constant around the ring. Each bunch gets squeezed and expanded—for instance it gets squeezed as much as possible around the interaction points to increase the probability of a collision.
- Bunches of particles measure a few centimetres long and a millimetre wide when they are far from a collision point. However, as they approach the collision points, they are squeezed to about 20 mm (a human hair is about 50 mm thick) to allow for a greater chance of proton-proton collisions.



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

ATLAS

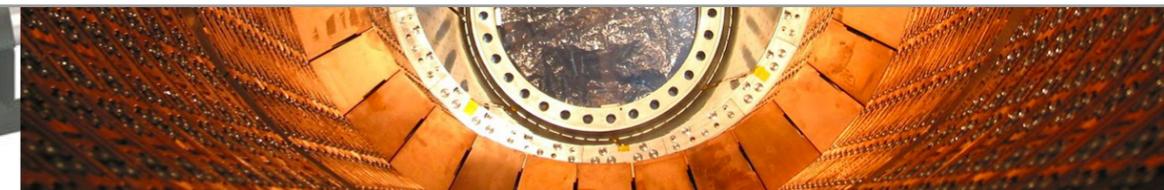
The Inner Detector measures the direction, momentum, and charge



25m

The Muon Spectrometer identifies and measures the momenta of muons.

Calorimeters measure the energy a particle loses as it passes through the detector



LAr electromagnetic calorimeters

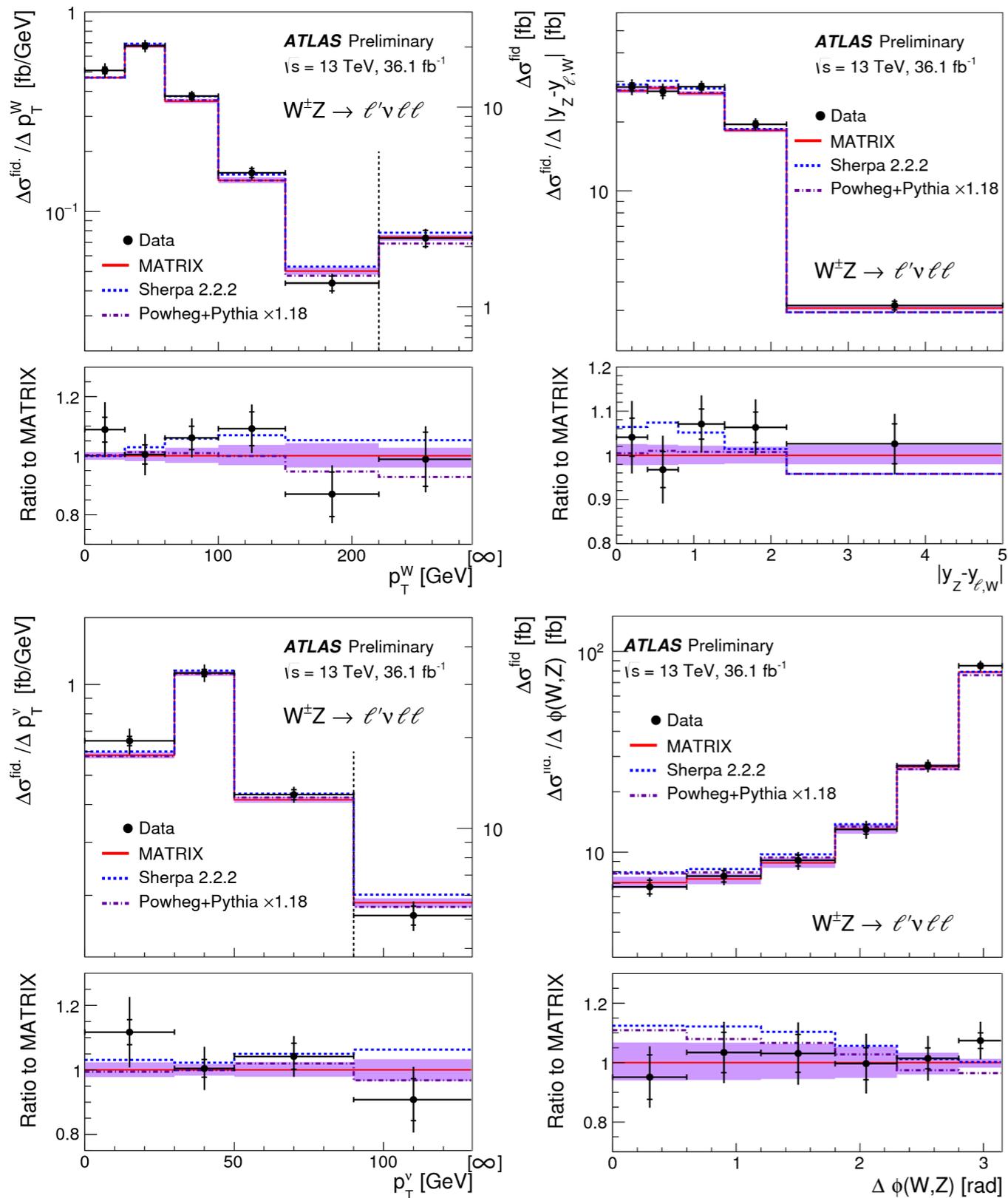
Transition radiation tracker

Semiconductor tracker

Cosa fa effettivamente un
“fisico delle particelle”?

Differential cross sections

DISCRETE 2018
VIENNA



- Kinematic distributions are unfolded with a response matrix computed using a Powheg+Pythia MC using Bayesian iterative approach.
- Measure cross section as a function of: p_T^Z , p_T^W , m_T^{WZ} , $\Delta\phi(W,Z)$, p_T^ν , $|y_Z - y_{\ell,W}|$, N_{jets} , m_{jj} ;
- Differential cross section results are compared to the NNLO QCD predictions from MATRIX

PER CONCLUDERE:

Negli ultimi 50 anni si è scoperto molto di come è fatta la materia.

MA...

La natura ci riserva ancora molto lavoro e molte sorprese

QUINDI C'E' ANCORA MOLTO LAVORO

Grazie !