

Liceo Scientifico Newton

15 Gennaio 2019

# La scoperta del bosone di Higgs al Large Hadron Collider del CERN: un passo in avanti sul sentiero della conoscenza

Antonio Policicchio

Sapienza Università di Roma & INFN



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA



# Alla ricerca di risposte

Da dove veniamo? Chi siamo? Dove andiamo?

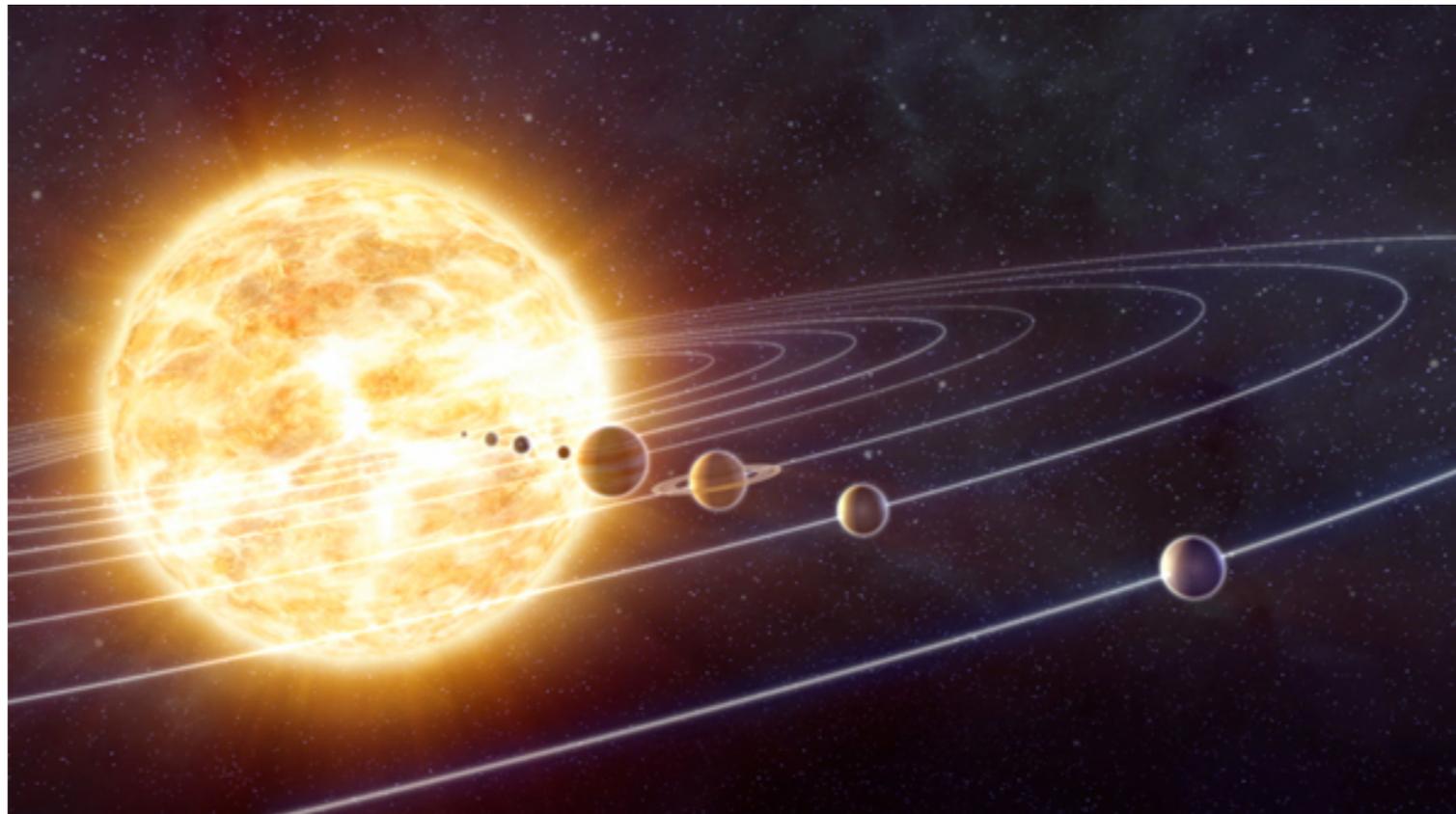
La fisica fondamentale può aiutarci a trovare delle risposte espandendo i confini della conoscenza.

La nostra conoscenza, se paragonata alla realtà, è primitiva e infantile. Ma resta il bene più grande di cui disponiamo.

La sete di conoscenza stimola il progresso, fa nascere l'evoluzione e cambia la percezione di noi stessi nell'Universo.

# La scoperta dello spazio

- Nel 1543 Copernico pubblica la sua teoria: **il Sole è al centro di tutte le cose**
  - 1400 anni dopo Tolomeo (170 d.C.)
  - riprende l'idea di Aristarco di un sistema eliocentrico e la dimostra con procedimenti matematici
- Galileo nel 1663 nel “**Dialogo sui massimi sistemi**” sostiene la teoria di Copernico
- Newton nel 1686 sopra la **Legge di Gravitazione Universale**: la legge che regola la caduta dei gravi sulla terra è la stessa che regola il movimento dei corpi celesti → **le leggi della meccanica descrivono il Cosmo!**



# Galileo: il Metodo Scientifico

- Galileo nel 1604 inventa il Metodo Scientifico
- Il **Metodo Scientifico** è la modalità con cui la scienza procede per raggiungere una conoscenza della realtà *oggettiva, affidabile, verificabile e condivisibile*.
- Esso consiste, da una parte, nella raccolta di evidenze empiriche e misurabili attraverso l'osservazione e l'esperimento e dall'altra, nella formulazione di ipotesi e teorie più generali da sottoporre al vaglio dell'esperimento per testarne l'efficacia
- **Il Metodo Scientifico è ancora oggi alla base della moderna ricerca fondamentale**

# La scoperta dell'età della Terra e della Vita

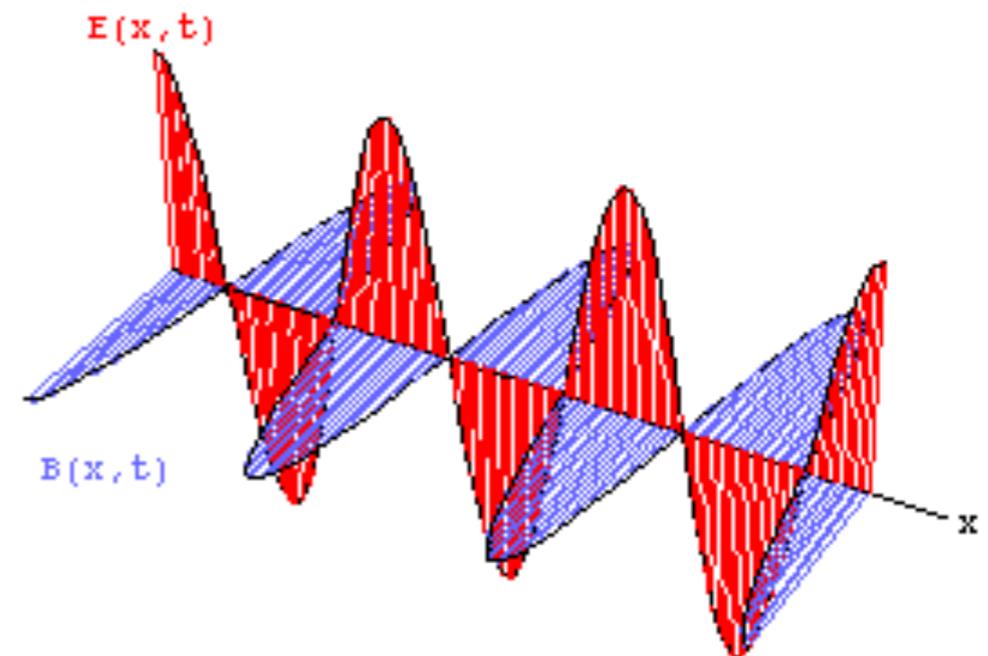
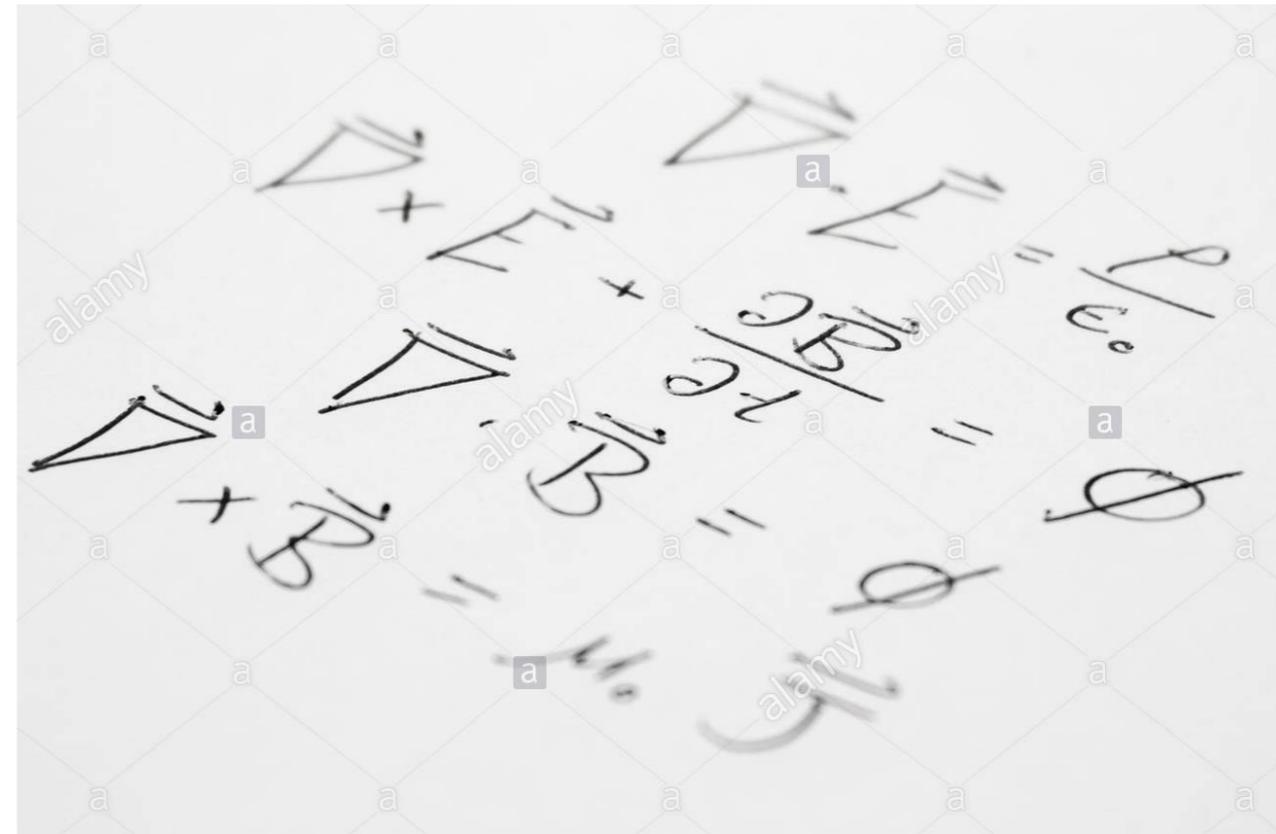
- 1650: James Ussher - Arcivescovo di Armagh in Irlanda - studia le genealogie del vecchio testamento: La CREAZIONE dell'Universo nel 4004 a.C
- John Lightfoot - vice rettore dell'Università di Cambridge - perfeziona il conto: La CREAZIONE alle ore 9.00 del 23 Ottobre del 4004 a.C
- Prima metà del 1800: **La scoperta della dinamica della vita**
  - Studio delle sedimentazioni marine
  - Osservate 3500 famiglie di animali, 50000 generi fossili, 250000 specie
  - Per ogni famiglia: tempo di comparsa e scomparsa
  - 248 Milioni di anni fa il 90% delle specie viventi nell'oceano scompare
- Meta' del XX secolo: **la Terra ha 4,6 Miliardi di anni**
  - La "vita" inizia nel 1° Miliardo di anni
- Oggi: **l'Universo che conosciamo ha circa 14 Miliardi di anni (dopo il Big Bang)**

# Le equazioni di Maxwell:

## unificazione dei fenomeni elettrici e magnetici

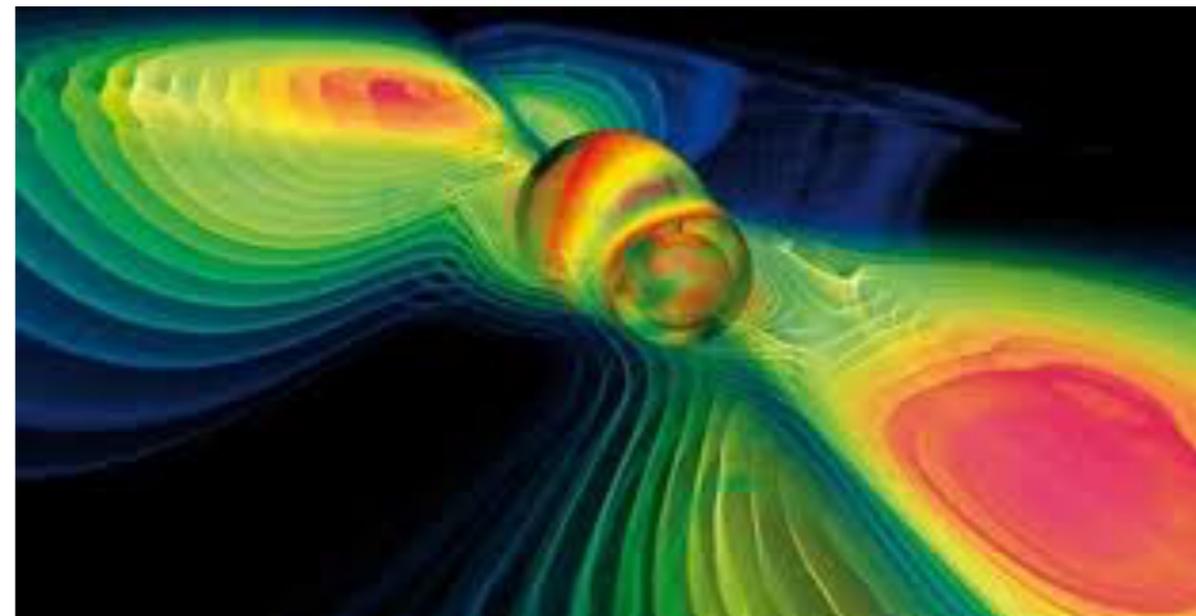
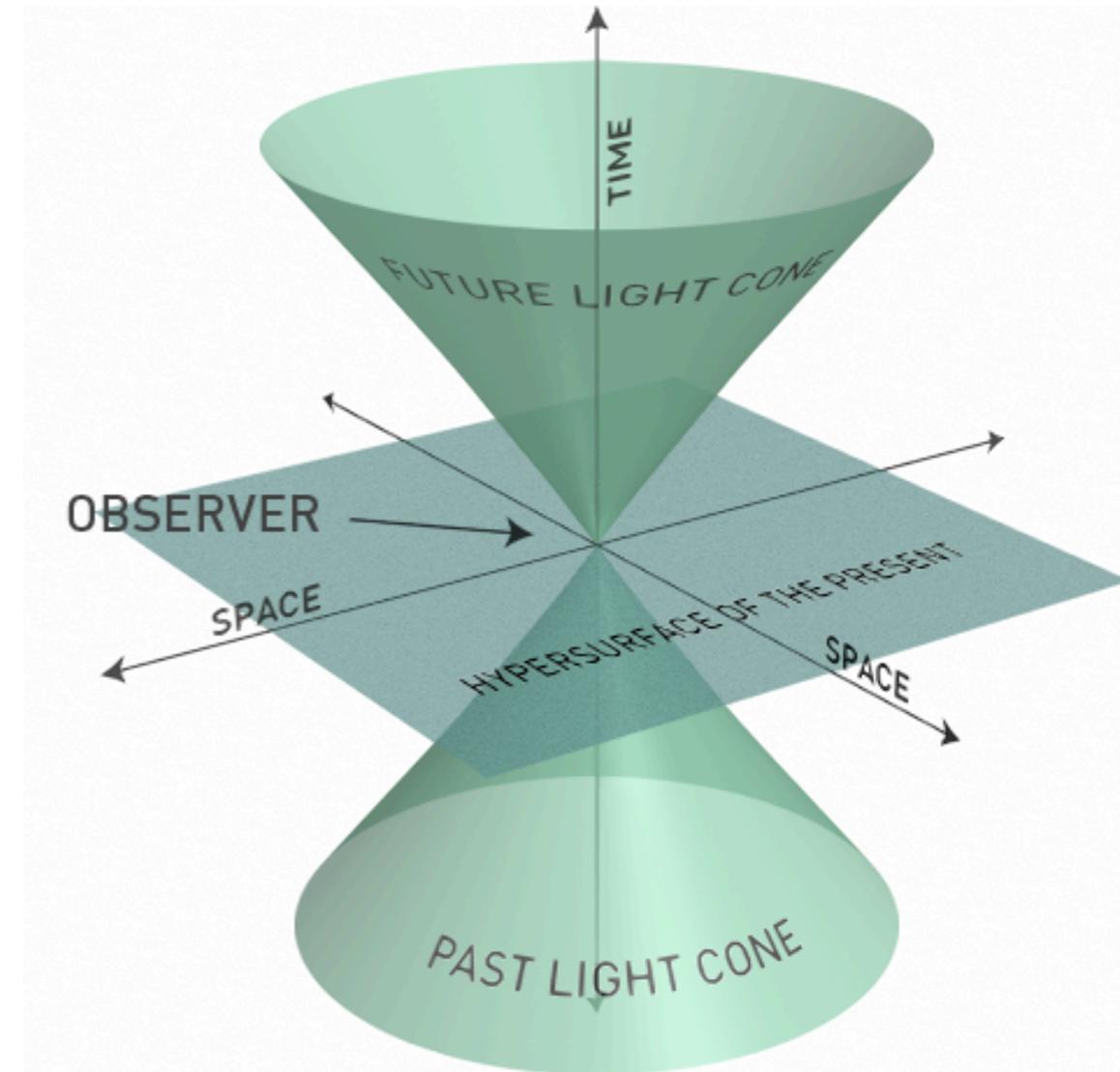
$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{J} \end{array} \right.$$

- 1865: Maxwell presenta le equazioni che **uniscono fenomeni magnetici ed elettrici** e che forniscono una sintesi di tutti i fenomeni sperimentali connessi a tali ambiti
- Soluzione delle equazioni di Maxwell: onde elettromagnetiche che si propagano nel vuoto (non hanno bisogno di un mezzo materiale!) alla **velocità della luce**
- La velocità della luce è costante e non dipende dal sistema di riferimento nel quale viene effettuata la misura (Michelson e Morley)



# La scoperta dello spazio-tempo

- 1905: **Einstein** presenta la **Teoria della Relatività Ristretta**
  - La velocità della luce è una costante ed è la massima velocità raggiungibile
  - Il tempo e lo spazio non sono come pensavamo: tempo e spazio sono equivalenti
    - Il tempo non è assoluto ma è percepibile, come lo spazio, in modo diverso da osservatori in condizioni differenti
  - Equivalenza tra massa ed energia:  $E=mc^2$ 
    - 1 grammo di massa ha l'energia di 47 milioni di camion da 10 tonnellate lanciati a 100Km/h
    - E' questo che permette, negli acceleratori di particelle del CERN, di creare nuova forma di materia da una concentrazione di energia
- 1916: **Einstein** presenta la **Teoria della Relatività Generale**
  - descrive l'interazione gravitazionale non più come azione a distanza fra corpi massivi, come nella teoria newtoniana, ma come effetto di una legge fisica che lega la geometria dello spazio-tempo con la distribuzione e il flusso in esso di massa, energia e impulso



# La scoperta della materia

La varietà di oggetti di differente forma e consistenza esistente in natura è forse il fatto osservativo più evidente ai nostri occhi.

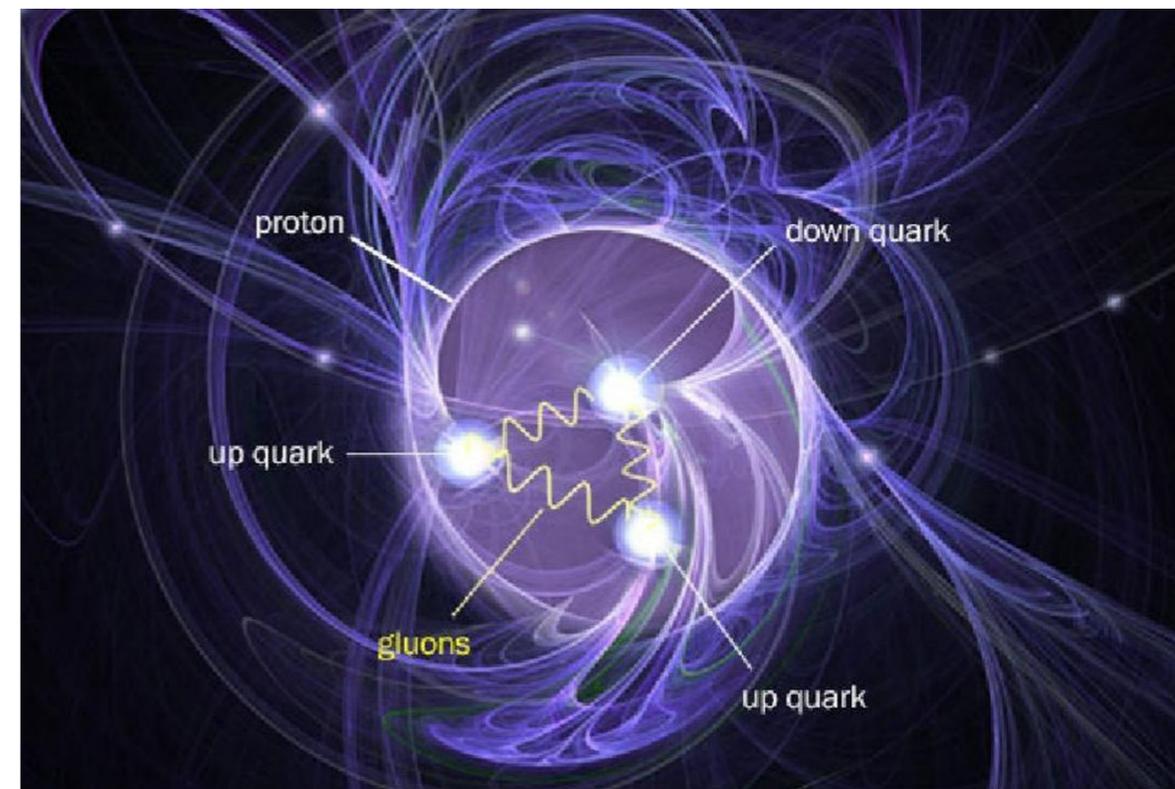
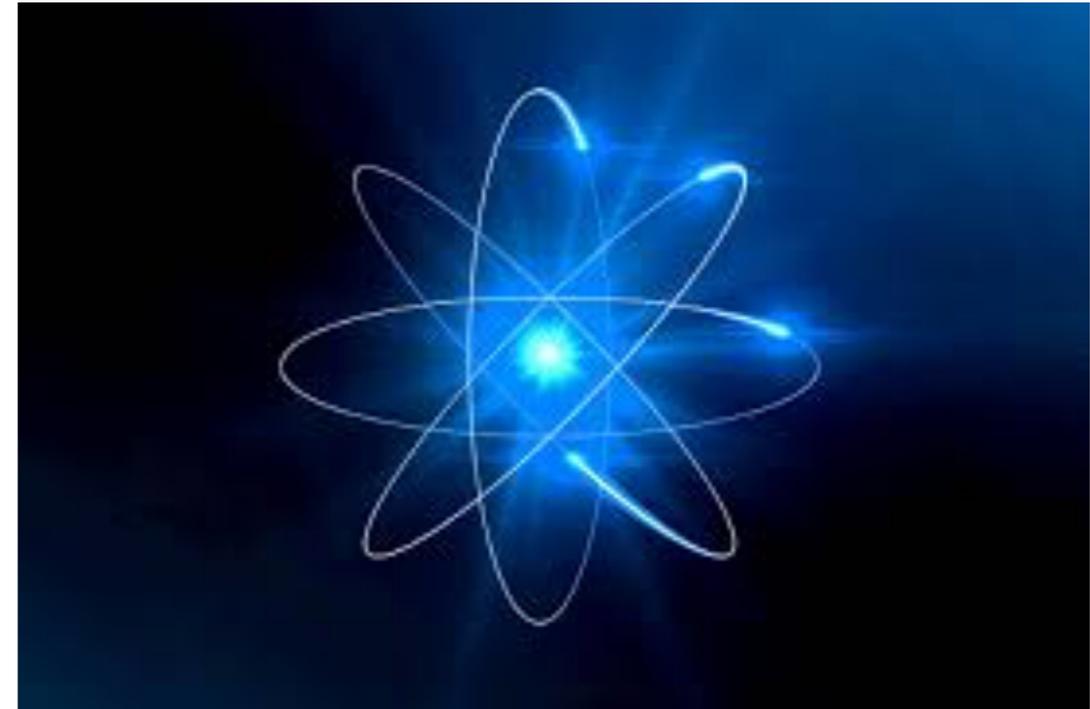
**E' possibile ricondurre l'intera realtà conosciuta ad un piccolo numero di componenti fondamentali interagenti tra loro attraverso poche leggi note?**

- All'inizio: Aria, terra, acqua e fuoco
- Seconda metà del 1800
  - Boltzmann spiega le proprietà di un gas assumendo che sia composto da particelle infinitesimali chiamate molecole
  - La tavola periodica di Mendeleef



# La scoperta della materia

- Primi decenni del '900: **il Modello Atomico**
  - 1909 Rutherford: gli elementi sono formati da atomi: nucleo ed elettroni
  - La fisica atomica e **Meccanica quantistica**: siamo onde di energia che obbediscono a leggi di probabilità
- **La Natura non è deterministica!**
- Prima metà del '900: Il Nucleo è composto da **protoni e neutroni**
- Seconda metà del XX secolo: I protoni e i neutroni non sono elementari ma composti da **quarks**



# La scoperta della materia

- Oggi: il **Modello Standard delle Particelle Elementari**

**Matter particles**  
All ordinary particles belong to this group

LEPTONS		QUARKS	
<b>FIRST FAMILY</b>	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1	<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second	<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one
<b>SECOND FAMILY</b>	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay	<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
<b>THIRD FAMILY</b>	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975	<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist	<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974
			<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964
			<b>Top</b> Heavier still
			<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory

**Force particles**  
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

<b>Gluons</b> Carriers of the <b>strong force</b> between quarks Felt by: quarks The explosive release of nuclear energy is the result of the <b>strong force</b>	<b>Photons</b> Particles that make up light; they carry the <b>electromagnetic force</b> Felt by: quarks and charged leptons Electricity, magnetism and chemistry are all the results of <b>electro-magnetic force</b>	<b>Intermediate vector bosons</b> Carriers of the <b>weak force</b> Felt by: quarks and leptons Some forms of radio-activity are the result of the <b>weak force</b>	<b>Gravitons</b> Carriers of <b>gravity</b> Felt by: all particles with mass All the weight we experience is the result of the <b>gravitational force</b>
--	---	---	--

GRAPHICS: PETER CROWTHER

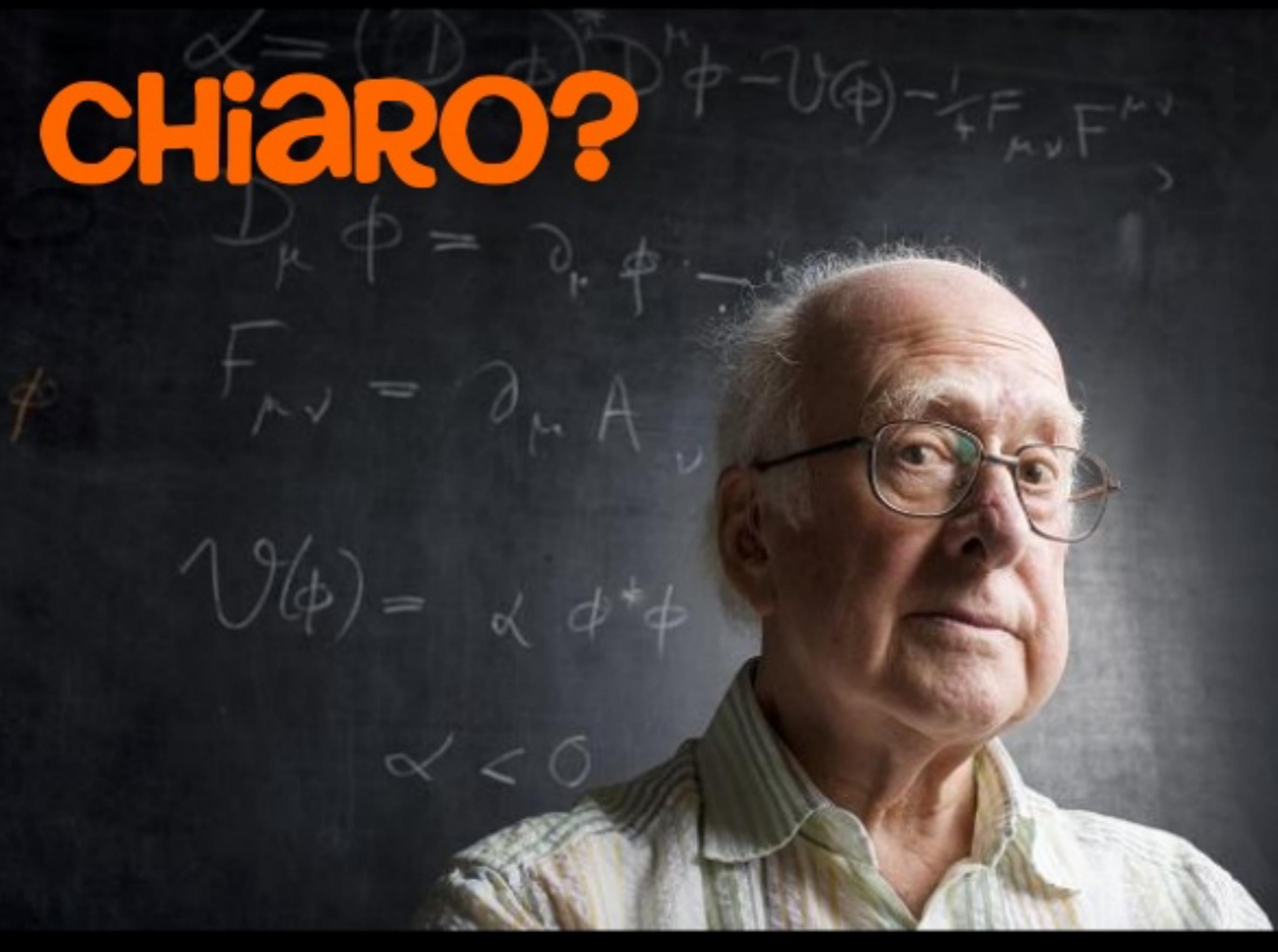
# L'origine della massa delle particelle

- Perché le particelle hanno massa?
- Acquistano massa grazie al bosone di Higgs!



Il bosone di Higgs è il quanto di una delle componenti di quel campo scalare complesso, con valore di aspettazione sul vuoto non nullo, alla base del meccanismo di rottura della simmetria dell'interazione elettrodebole

# CHIARO?



# L'origine della massa delle particelle

## Come funziona il campo di Higgs

Alla ricerca della particella che dà la massa alla materia

Il campo **permea tutto l'universo**.  
Le particelle che lo attraversano  
avvertono ognuna  
una resistenza diversa.  
Questa **resistenza** è quella  
che chiamiamo **massa**

**CAMPO DI HIGGS**

Particelle di massa  
piccolissima o zero  
(fotoni, elettroni, ecc.)

Particelle  
di massa media  
(muoni, ecc.)

Particelle  
di grande massa  
(quark top, ecc.)

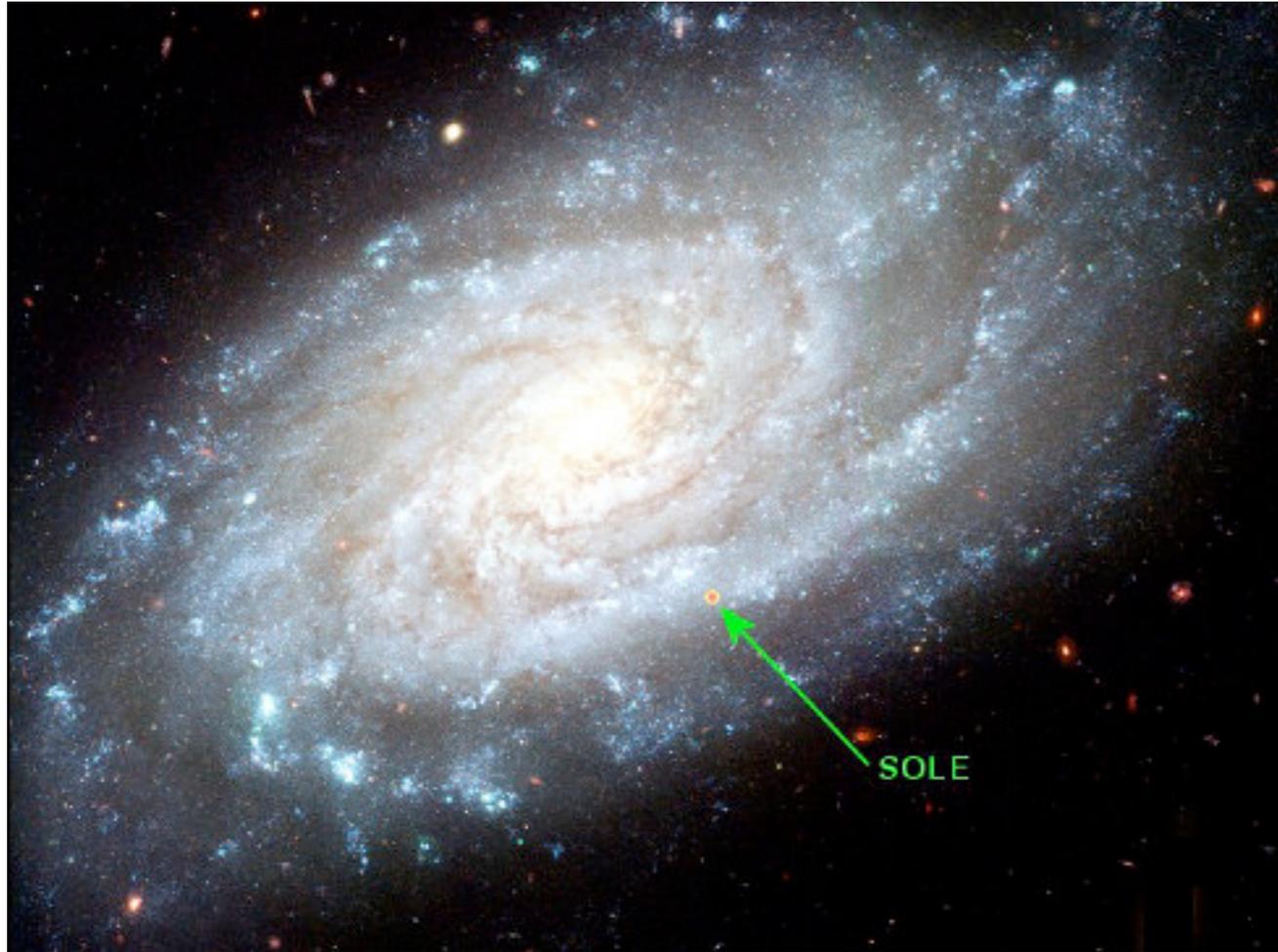
Per spiegare come mai  
la materia abbia massa,  
il fisico Peter Higgs  
nel 1960 ha ipotizzato  
l'esistenza del bosone  
di Higgs.

Il bosone di Higgs  
è la particella che dà  
la massa a tutte le altre.  
Ciò avviene quando queste  
interagiscono col campo  
prodotto dall'Higgs.

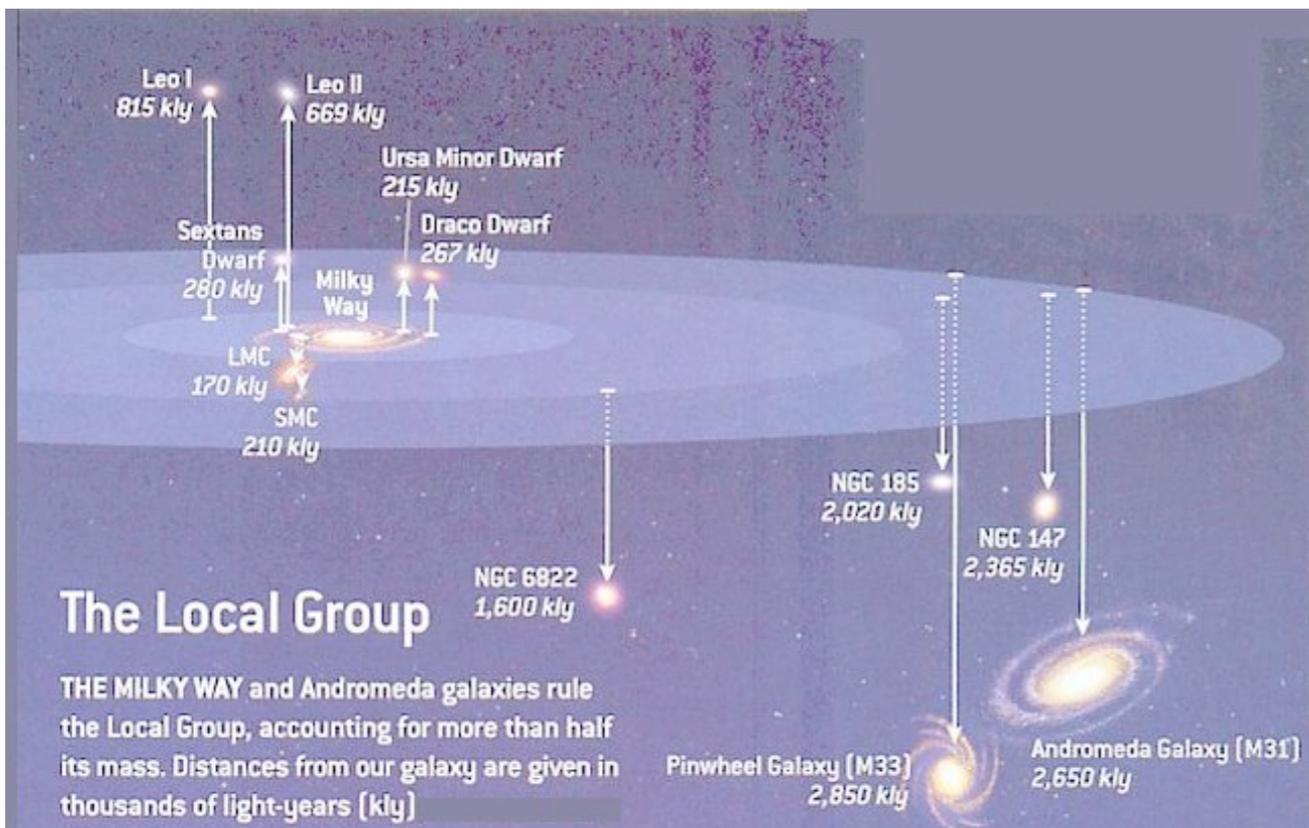
Provare l'esistenza  
dell'Higgs è uno degli  
obiettivi principali  
di LHC, in particolare  
degli esperimenti ATLAS  
e CMS.



# La scoperta del Cosmo



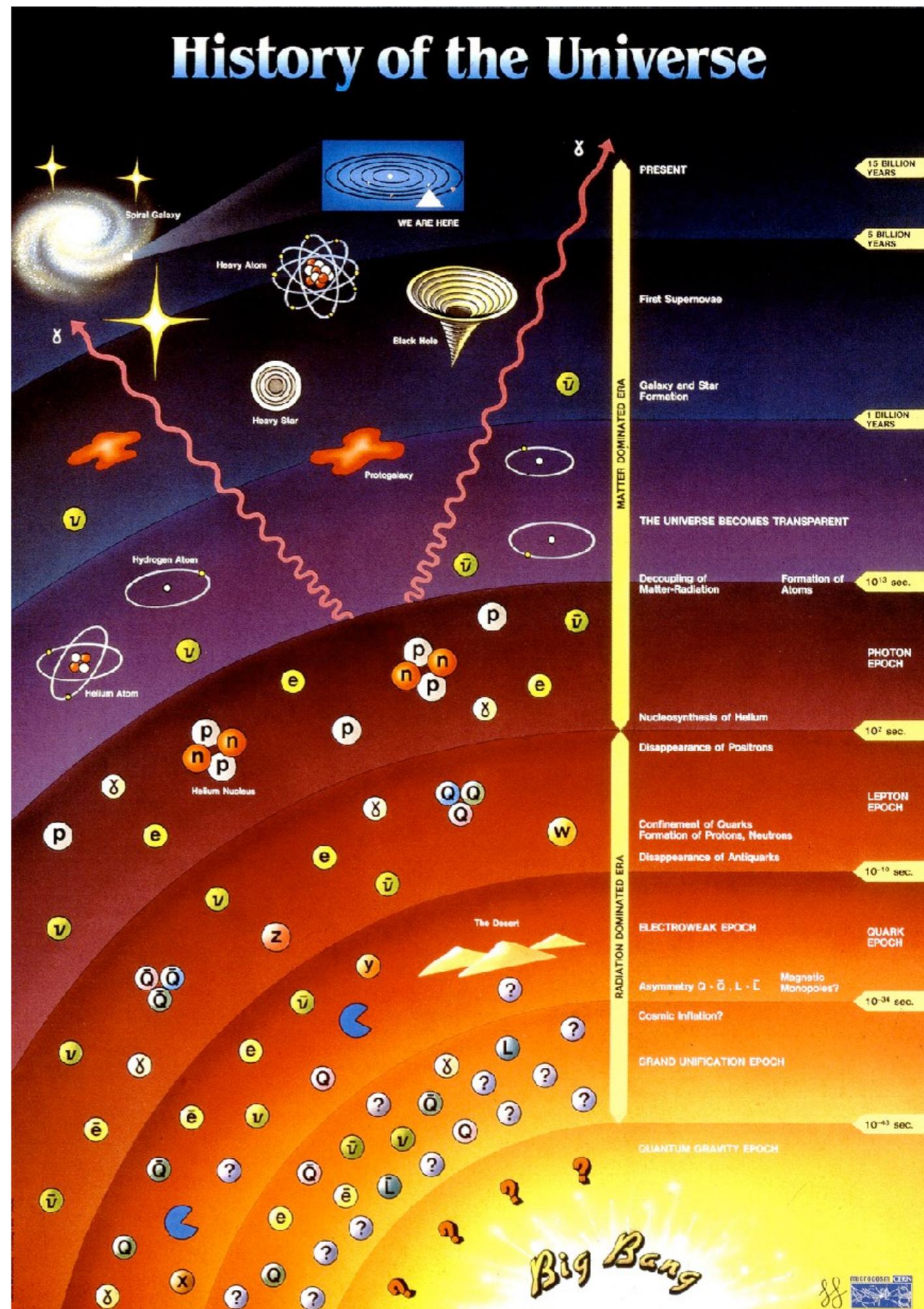
- XX secolo
- La Terra e il nostro sistema solare sono solo uno dei tanti possibili (10 milioni) all'interno della nostra galassia
- Centinaia di miliardi di galassie



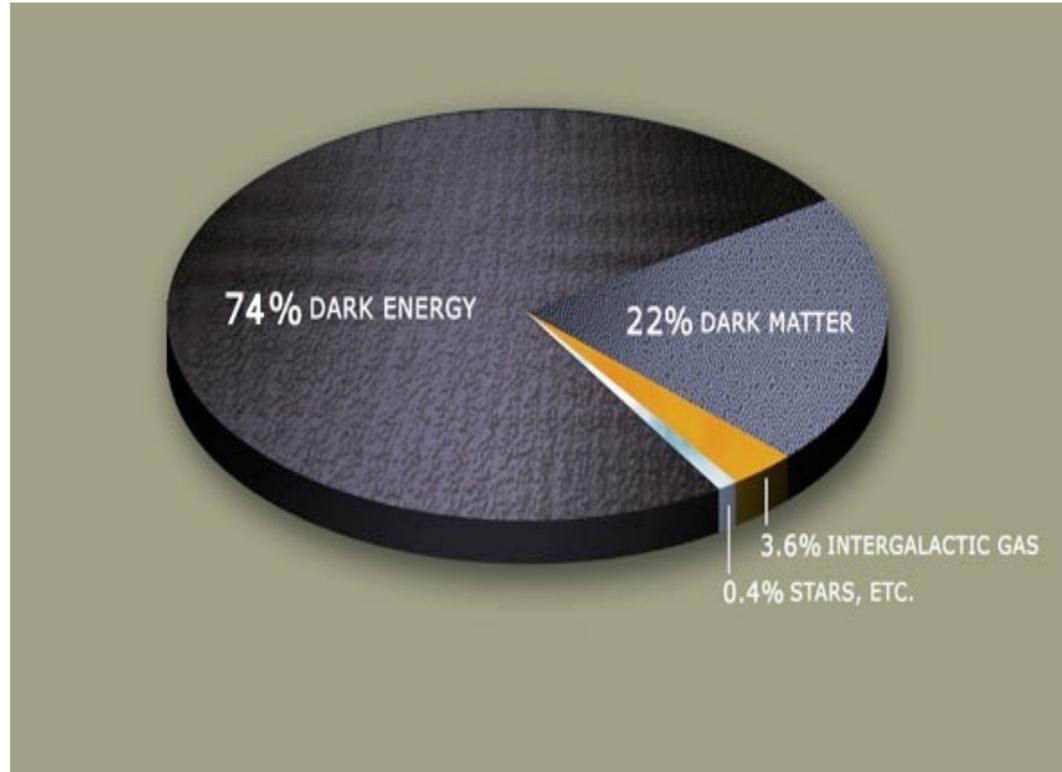


# La scoperta del Cosmo

- Il nostro Universo ha avuto origine da una singolarità chiamata Big Bang: le galassie continuano ancora oggi ad allontanarsi l'una dall'altra
- E quello che oggi vediamo è il frutto di 14 miliardi di anni di espansione e di raffreddamento
- La forza di gravità e la Fisica delle Particelle spiegano come si sono formate le galassie e come si è evoluto l'Universo a partire dal momento iniziale della creazione
- Il corso di questa evoluzione è stato determinato dalla natura delle particelle elementari che lo compongono e dalle interazioni tra di esse



# La scoperta del Cosmo

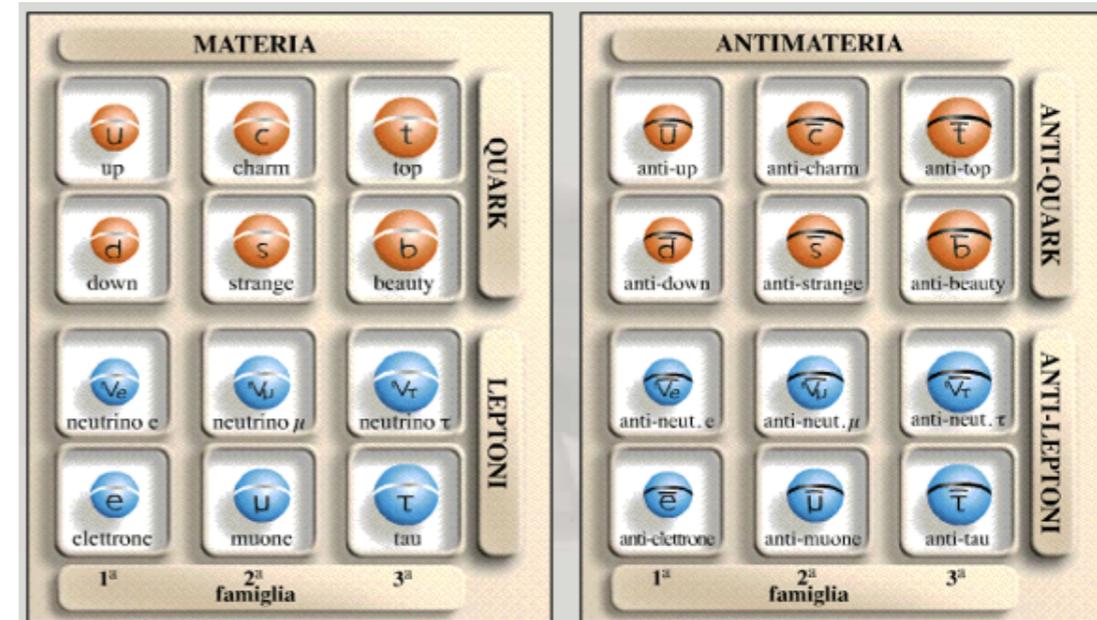


- Inequivocabili evidenze astrofisiche dimostrano che la materia “ordinaria” (cioè tutto ciò di cui ci siamo occupati finora) da’ conto solo del 4% del bilancio energetico dell’Universo. Cosa sia tutto il resto, ad oggi, è un mistero che chiamiamo **materia oscura ed energia oscura**

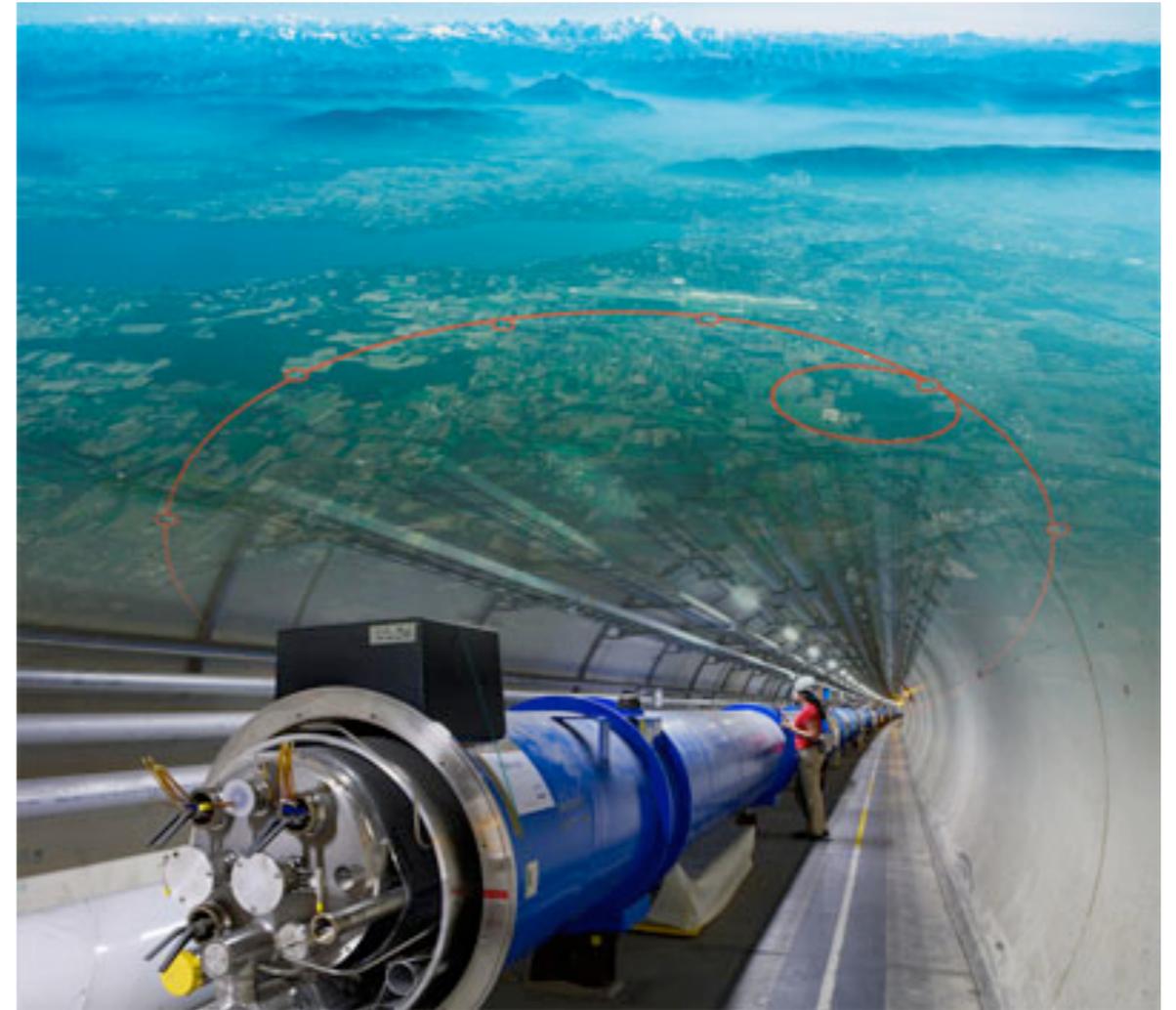
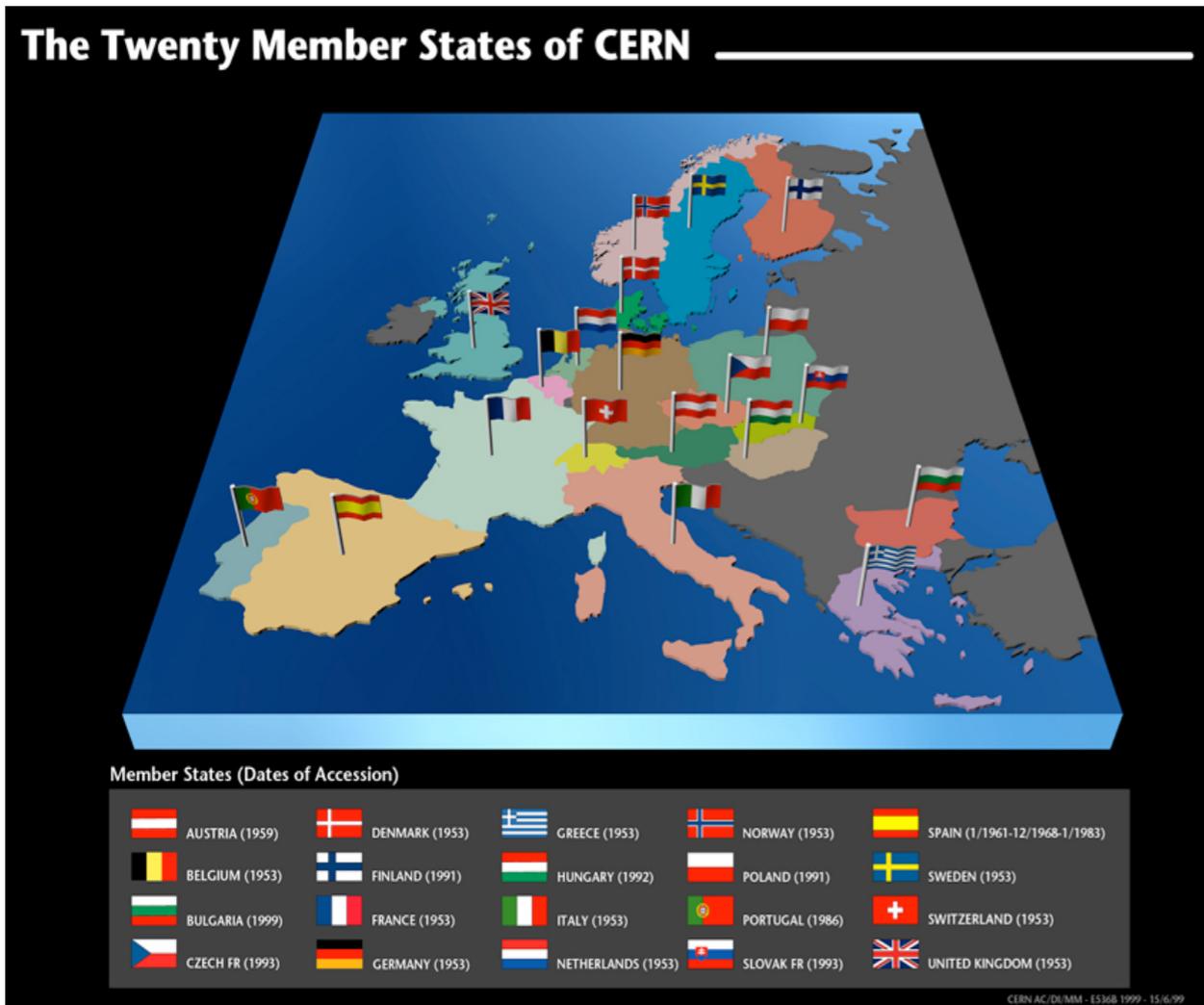


# Ma perché?

- Esiste il bosone di Higgs, che dà origine alla massa delle particelle?
- Perché le particelle hanno massa diversa?
- Perché siamo fatti di materia e non di antimateria? quale processo ha contribuito alla prevalenza della materia sull'antimateria se all'inizio la simmetria era perfetta?
- Perché solo queste particelle come mattoni fondamentali?
- Sono davvero particelle fondamentali?
- Il Modello Standard descrive bene la materia come la vediamo... m'è la teoria del tutto?
- Cos'è la materia oscura?
- Esiste un solo universo?
- E' vera la teoria del Big Bang che così bene descrive l'universo come oggi lo vediamo?

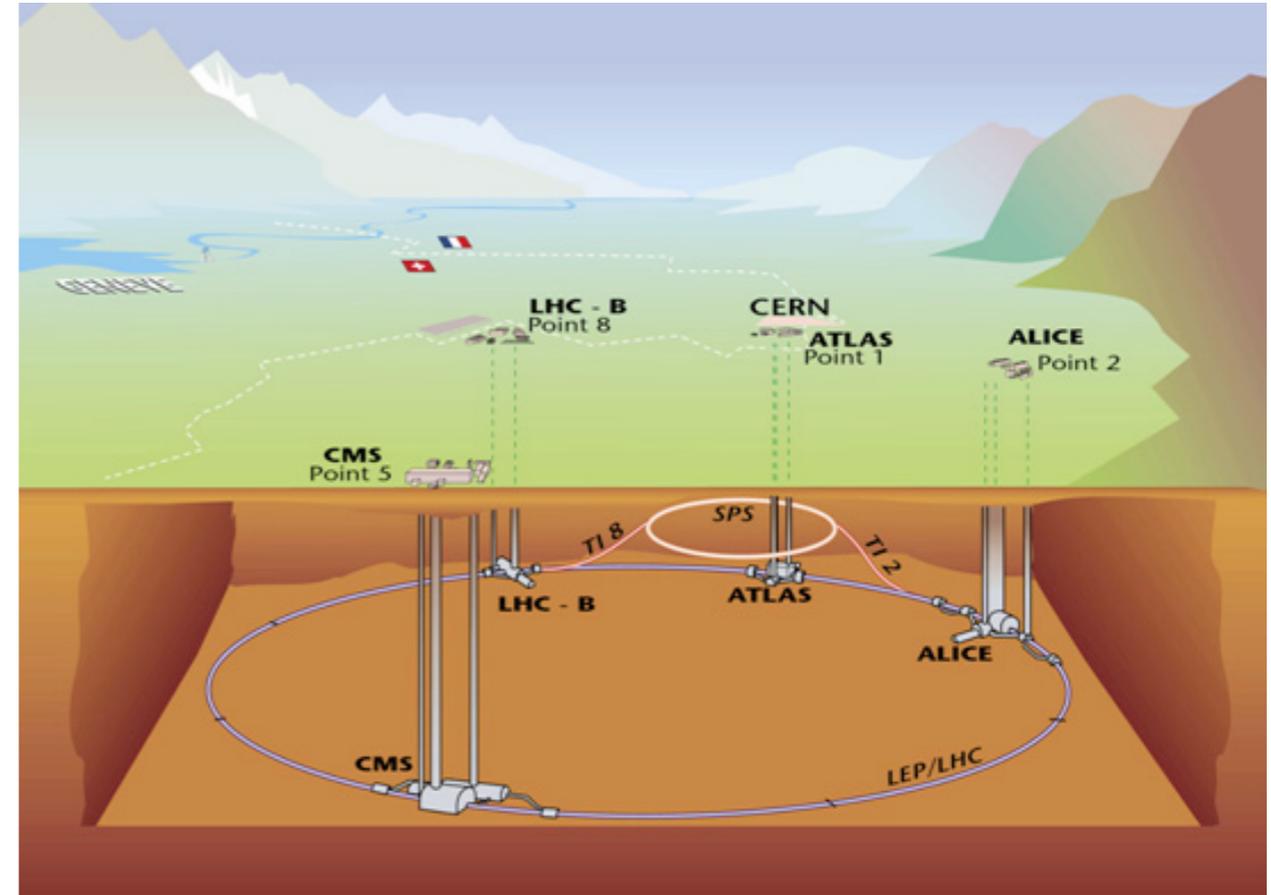


# Il CERN e il Large Hadron Collider (LHC)



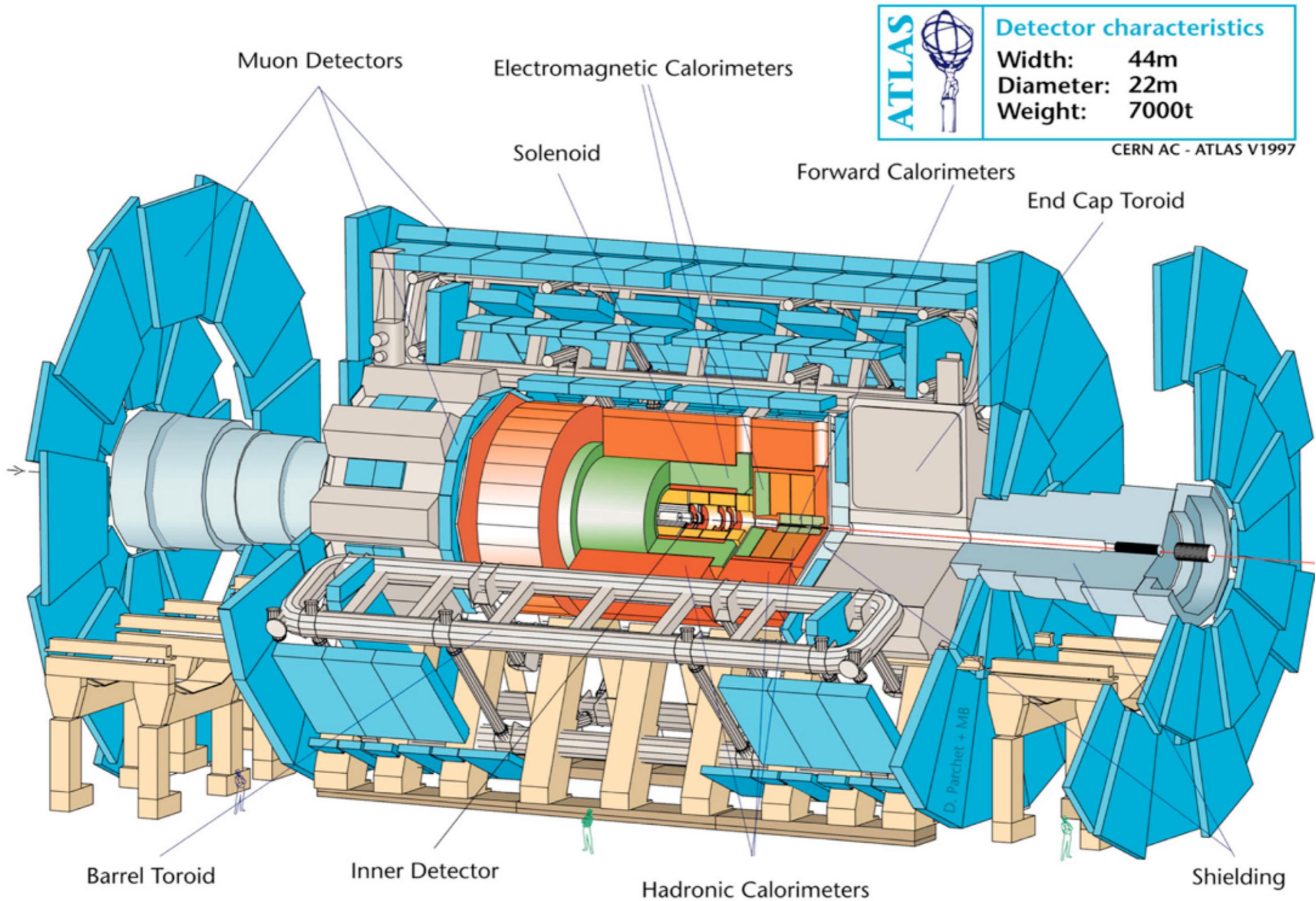
- Per dare una risposta alle domande ancora aperte
- Per continuare a conoscere ed immaginare
- Per affrontare nuove sfide

# Large Hadron Collider

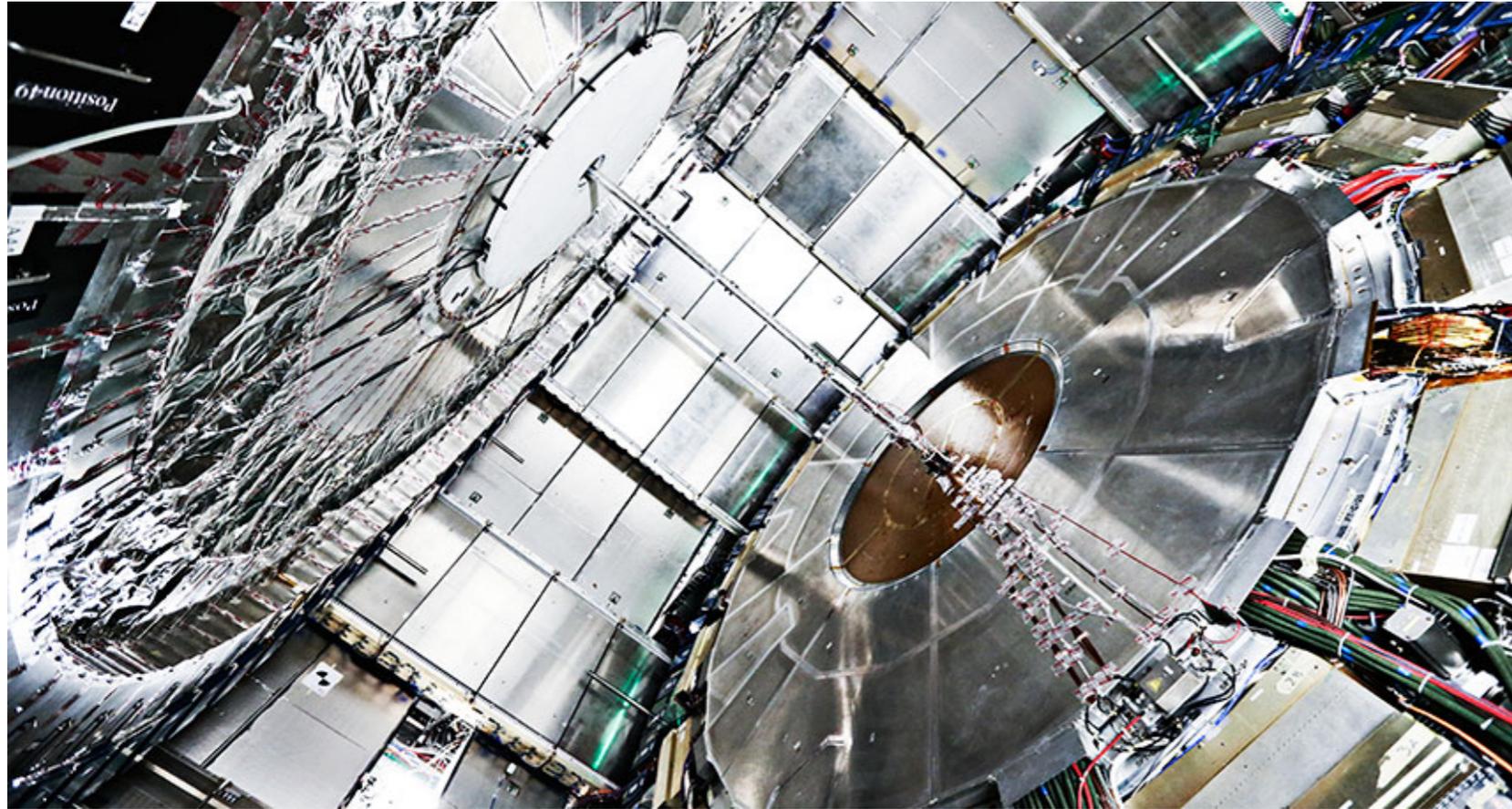


- Accelerare  $10^{14}$  protoni al 99.9999% della velocità della luce per:
  - Produrre collisioni ad un'energia simile a quella di pochi istanti dopo il Big Bang e studiare cosa avvenne
  - Produrre forme di materia e forze non più esistenti
  - Capire perché la materia prevale sull'antimateria
  - Capire com'è fatta e come si è originata la materia oscura
  - Verificare nuove teorie più generali rispetto al Modello Standard secondo cui le quattro forze in Natura sono manifestazioni di una sola forza (Grande Unificazione)

# L'esperimento ATLAS

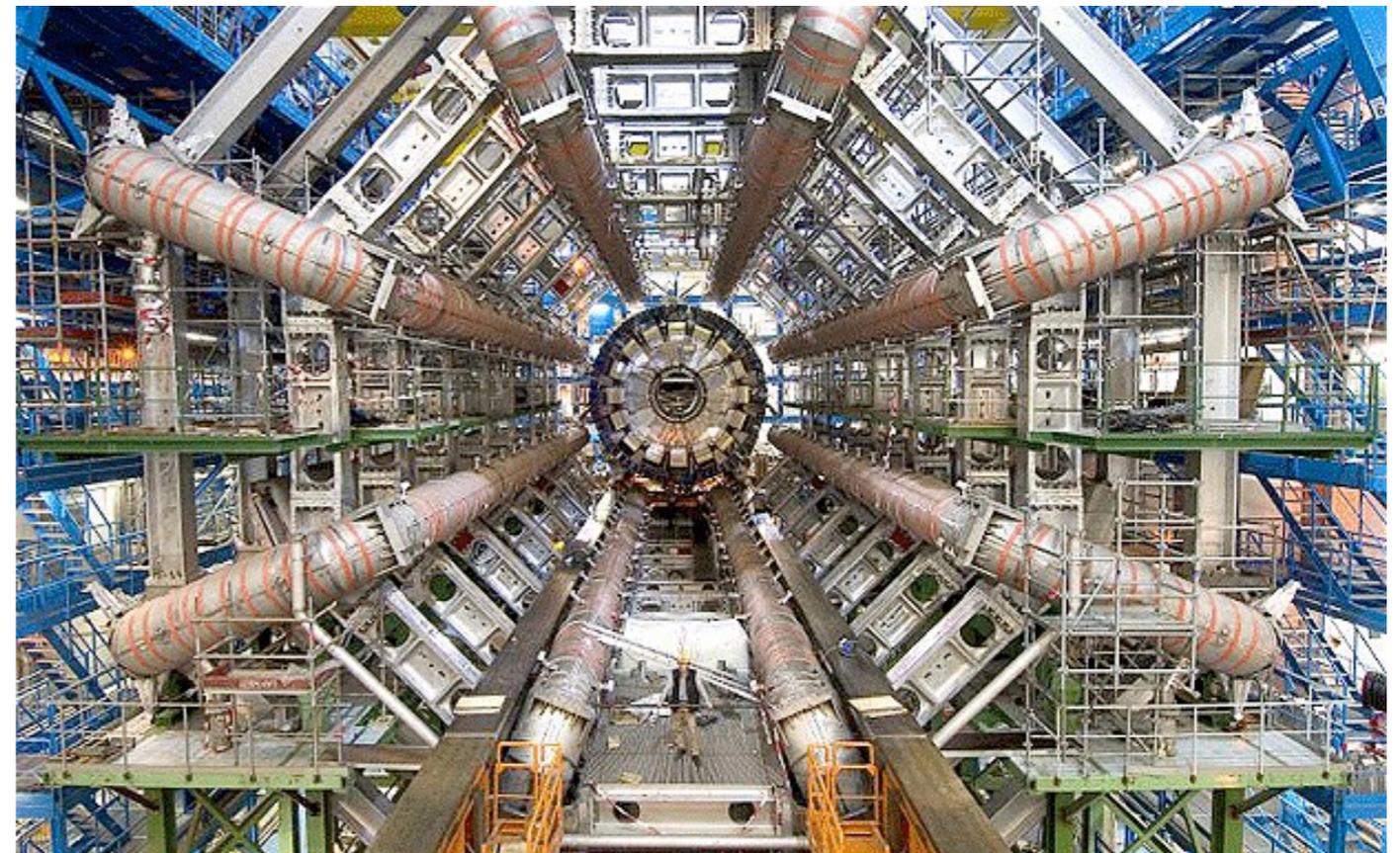
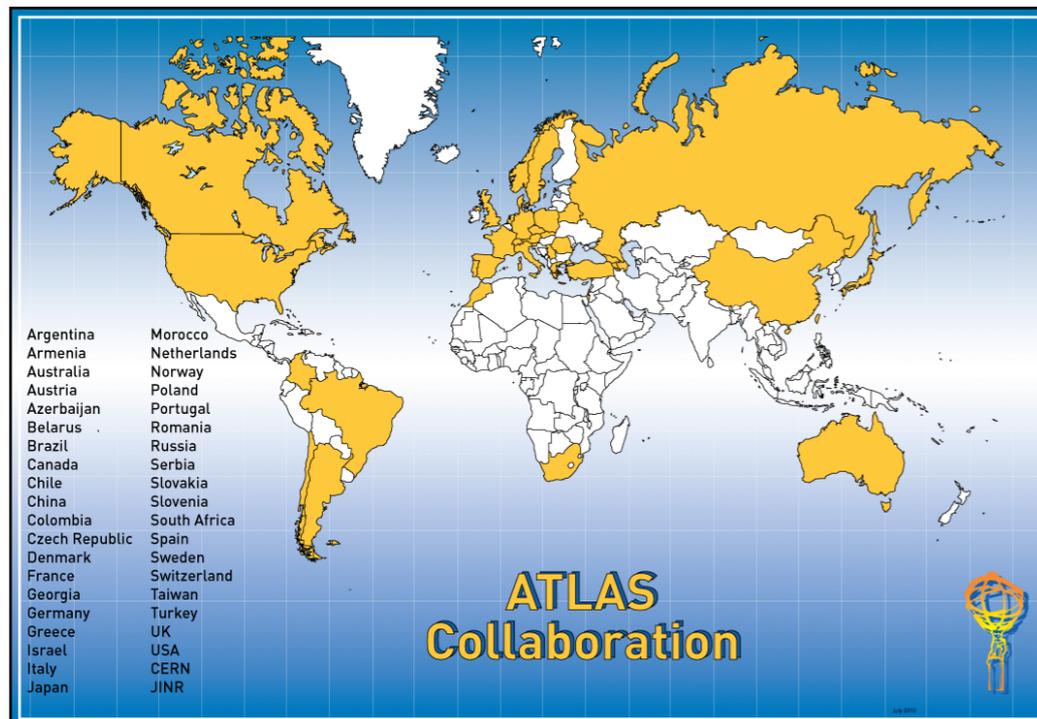


# L'esperimento ATLAS



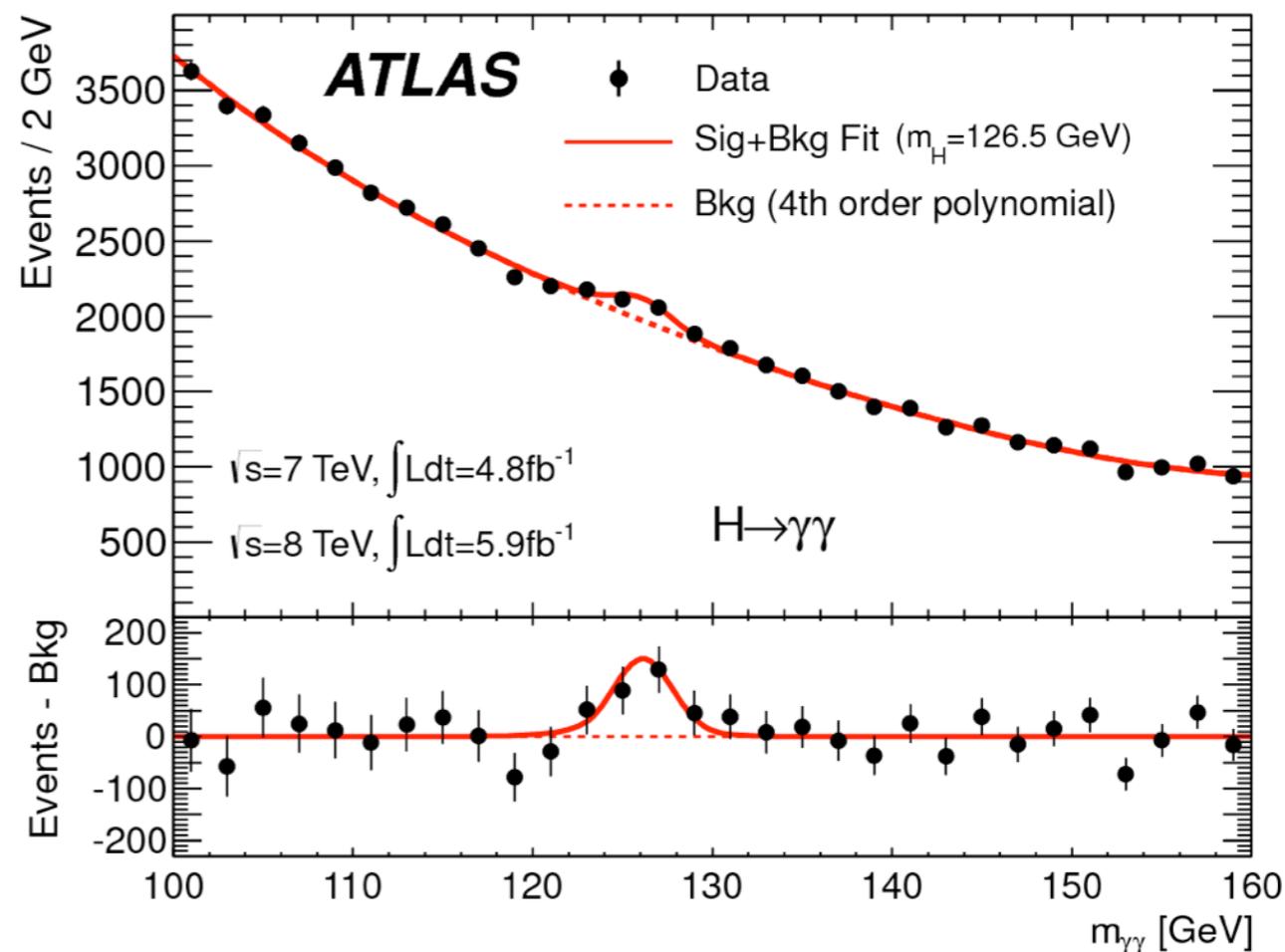
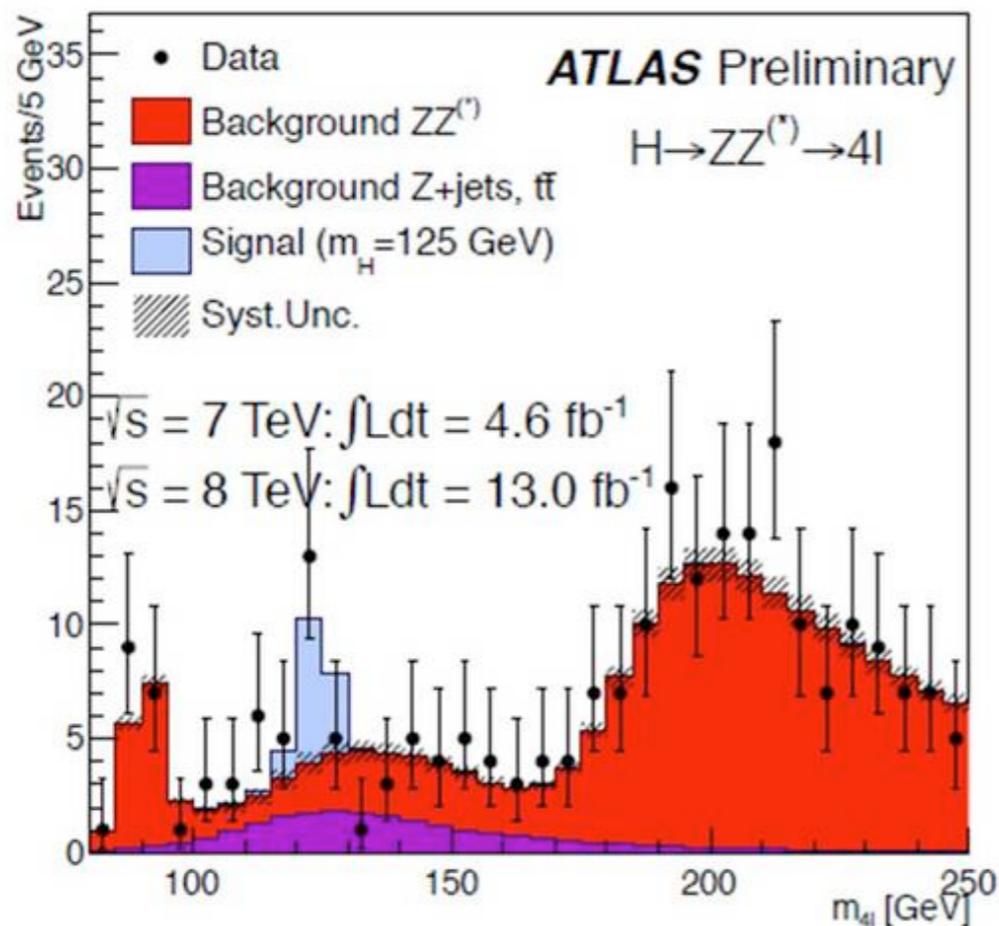
L'esperimento ATLAS è frutto di una collaborazione internazionale che coinvolge:

- 40 nazioni
- 170 Università e Istituti di ricerca
- 3000 fisici

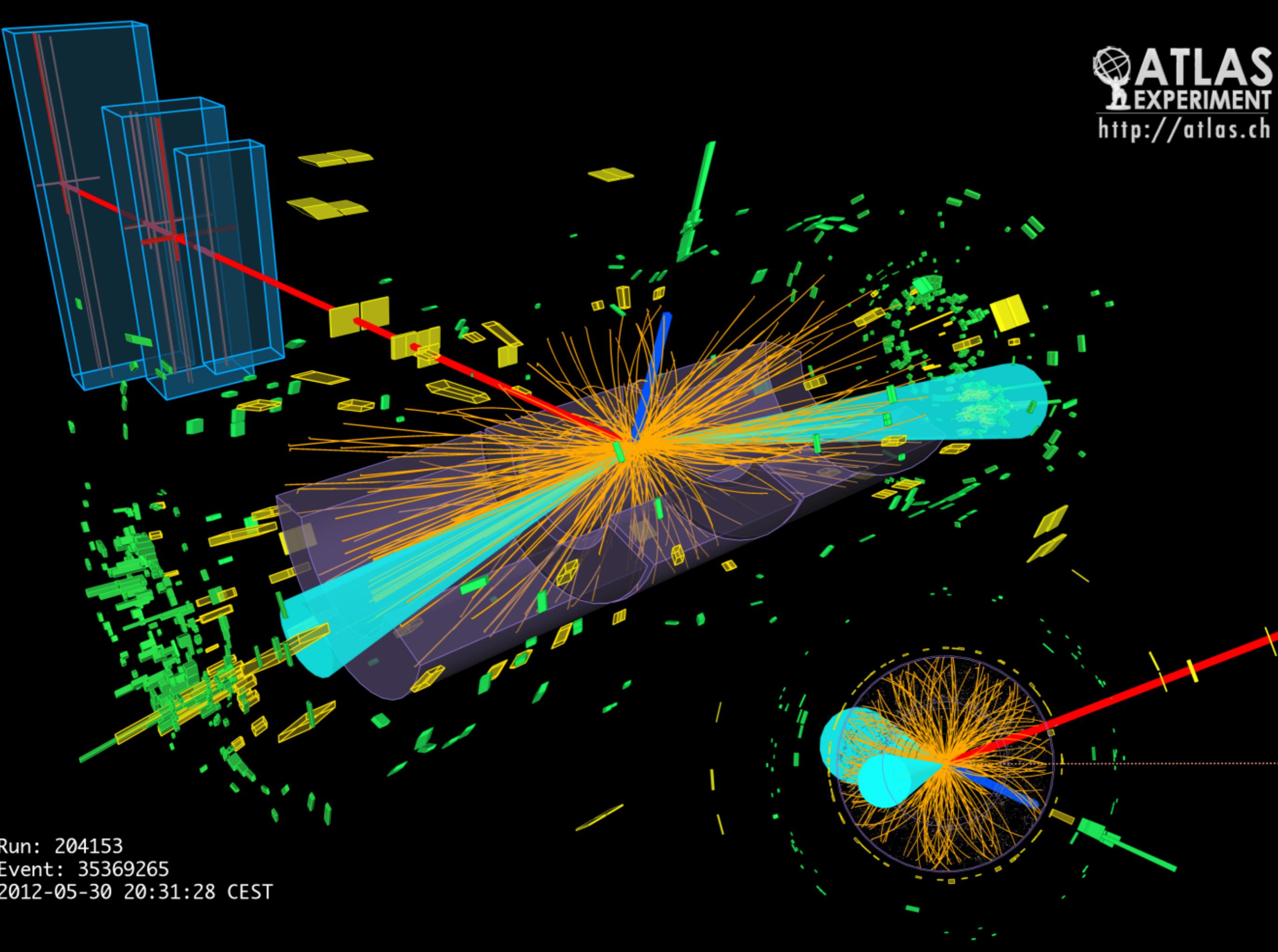


# La scoperta dell'origine della massa delle particelle

- Il 4 Luglio del 2012 gli esperimenti ATLAS e CMS del LHC del CERN hanno annunciato l'osservazione di una nuova particella (un bosone) nell'ambito della ricerca del bosone di Higgs
- I dati a disposizione confermano che è davvero il bosone di Higgs ricercato da quasi 50 anni di esperimenti
- Molto avremo ancora di capire e imparare su questa nuova particella negli anni a venire



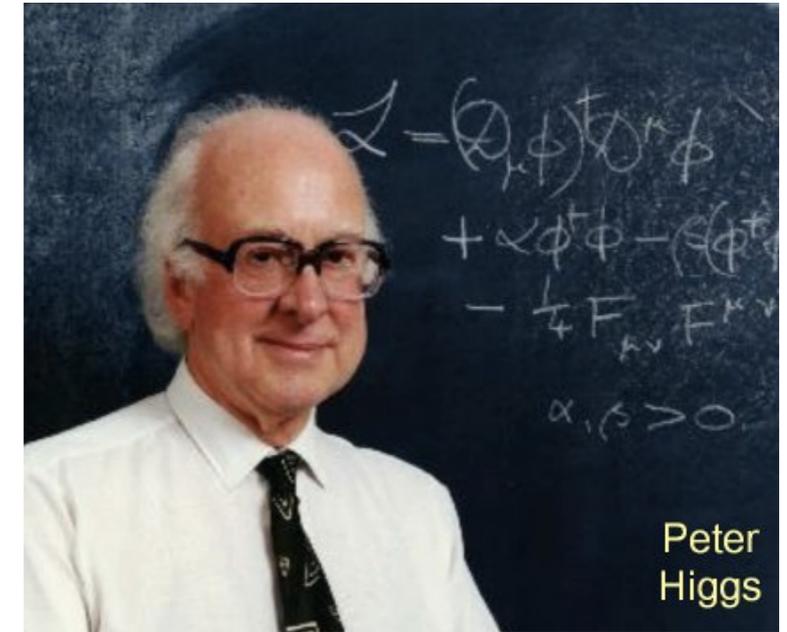
“This is the really the most incredible thing that has happened in my lifetime”  
*Peter Higgs*



Run: 204153  
Event: 35369265  
2012-05-30 20:31:28 CEST

# Ma perché?

- ✓ Esiste il bosone di Higgs, che dà origine alla massa delle particelle?
- Perché le particelle hanno massa diversa?
- Perché siamo fatti di materia e non di antimateria? quale processo ha contribuito alla prevalenza della materia sull'antimateria se all'inizio la simmetria era perfetta?
- Perché solo queste particelle come mattoni fondamentali?
- Sono davvero particelle fondamentali?
- Il Modello Standard descrive bene la materia come la vediamo... ma è la teoria del tutto?
- Cos'è la materia oscura?
- Esiste un solo universo?
- E' vera la teoria del Big Bang che così bene descrive l'universo come oggi lo vediamo?



MATERIA			ANTIMATERIA		
up	charm	top	anti-up	anti-charm	anti-top
down	strange	beauty	anti-down	anti-strange	anti-beauty
neutrino e	neutrino $\mu$	neutrino $\tau$	anti-neut. e	anti-neut. $\mu$	anti-neut. $\tau$
elettrone	muone	tau	anti-elettrone	anti-muone	anti-tau
1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup> famiglia	3 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup> famiglia	3 <sup>a</sup>



# Open questions before 4 July 2012

## EWSB

- Does the Higgs boson exist?

## Quarks and leptons:

- why 3 families ?
- masses and mixing
- CP* violation in the lepton sector
- matter and antimatter asymmetry
- baryon and charged lepton number violation

## Physics at the highest E-scales:

- how is gravity connected with the other forces ?
- do forces unify at high energy ?

## Dark matter:

- composition: WIMP, sterile neutrinos, axions, other hidden sector particles, ..
- one type or more ?
- only gravitational or other interactions ?

## Neutrinos:

- $\nu$  masses and their origin
- what is the role of  $H(125)$  ?
- Majorana or Dirac ?
- CP* violation
- additional species  $\rightarrow$  sterile  $\nu$  ?

## The two epochs of Universe's accelerated expansion:

- primordial: is inflation correct ?  
which (scalar) fields? role of quantum gravity?
- today: dark energy (why is  $\Lambda$  so small?) or gravity modification ?

# Open questions after 4 July 2012

## Higgs boson and EWSB

- $m_H$  natural or fine-tuned ?  
→ if natural: what new physics/symmetry?
- does it regularize the divergent  $V_L V_L$  cross-section at high  $M(V_L V_L)$  ? Or is there a new dynamics ?
- elementary or composite Higgs ?
- is it alone or are there other Higgs bosons ?
- origin of couplings to fermions
- coupling to dark matter ?
- does it violate CP ?
- cosmological EW phase transition

## Quarks and leptons:

- why 3 families ?
- masses and mixing
- CP violation in the lepton sector
- matter and antimatter asymmetry
- baryon and charged lepton number violation

## Physics at the highest E-scales:

- how is gravity connected with the other forces ?
- do forces unify at high energy ?

## Dark matter:

- composition: WIMP, sterile neutrinos, axions, other hidden sector particles, ..
- one type or more ?
- only gravitational or other interactions ?

## Neutrinos:

- $\nu$  masses and their origin
- what is the role of  $H(125)$  ?
- Majorana or Dirac ?
- CP violation
- additional species → sterile  $\nu$  ?

## The two epochs of Universe's accelerated expansion:

- primordial: is inflation correct ?  
which (scalar) fields? role of quantum gravity?
- today: dark energy (why is  $\Lambda$  so small?) or gravity modification ?

E' straordinario che il genere umano abbia acquisito tanta conoscenza e consapevolezza.

Ma esistono ancora molte domande alle quali non siamo ancora in grado di dare una risposta.

LHC è stato costruito per cercare di dare una risposta a queste domande.