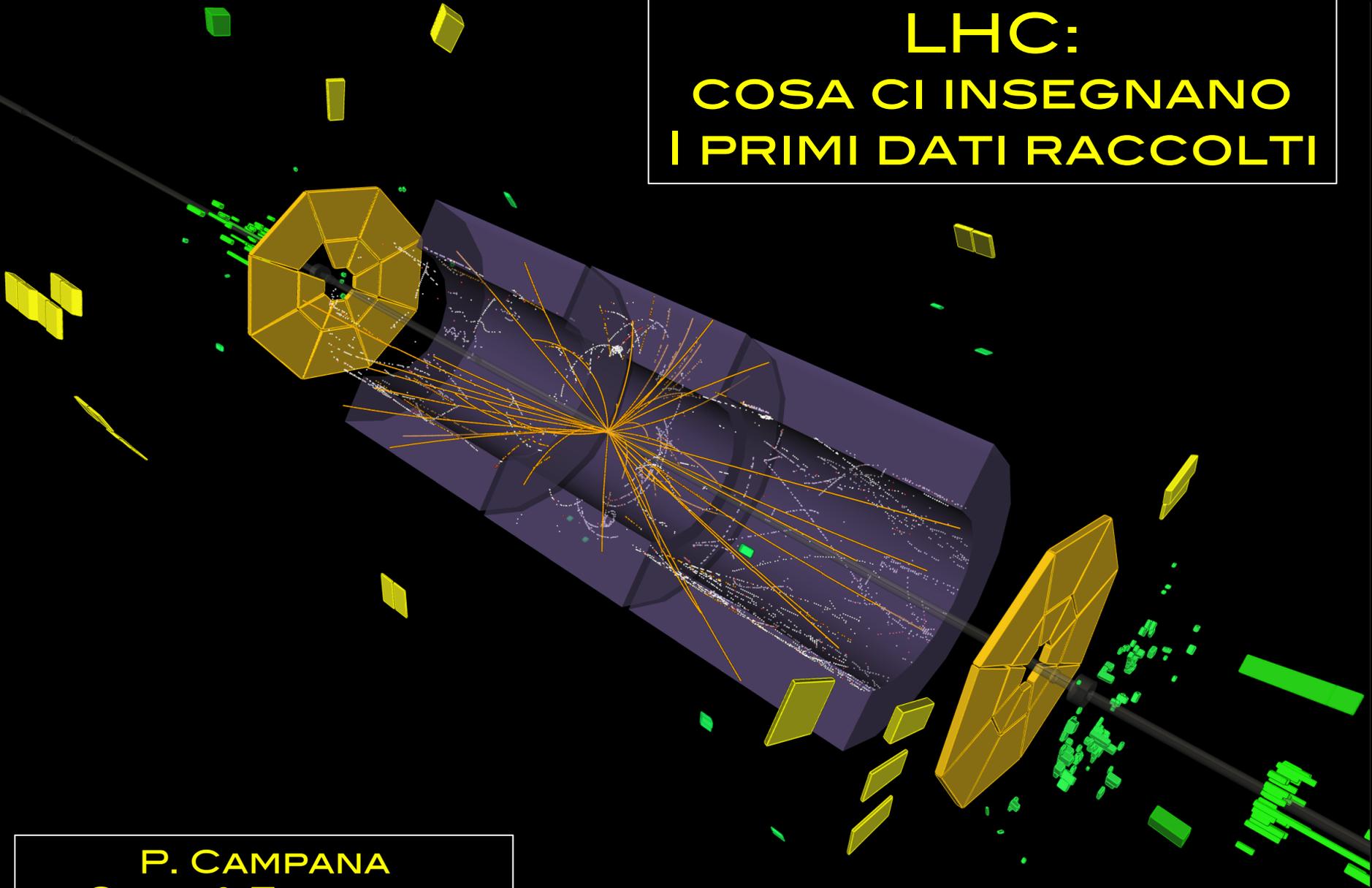


# LHC: COSA CI INSEGNANO I PRIMI DATI RACCOLTI



P. CAMPANA  
CERN & FRASCATI  
INCONTRI DI FISICA 2011

LHC e' in presa dati da ormai due anni (2010-11)

In questi ultimi anni l'attesa mediatica per l'evento LHC e' stata enorme

*I buchi neri, la particella di Dio, la materia oscura, gli Universi paralleli, ...*

La stampa e' piena di articoli sulla possibilita' o meno di scoprire il Bosone di Higgs o la Supersimmetria a brevissimo termine



Facciamo un po' di chiarezza ed andiamo per ordine per vedere cosa e' successo sino ad oggi ...

## Argomenti del Seminario

- L'acceleratore LHC
- Gli apparati sperimentali (ATLAS, CMS, LHCb, ALICE)
- Cosa si cerca all'LHC e con quali metodi
- La presa dati nel 2010-2011
- I primi risultati e le prime conclusioni
- Le prospettive future

# Il **Large Hadron Collider** del CERN

(ossia studiare la materia per capire l'Universo)



**L' LHC al CERN di Ginevra**  
(inizio delle operazioni e' cominciato alla fine del 2009)

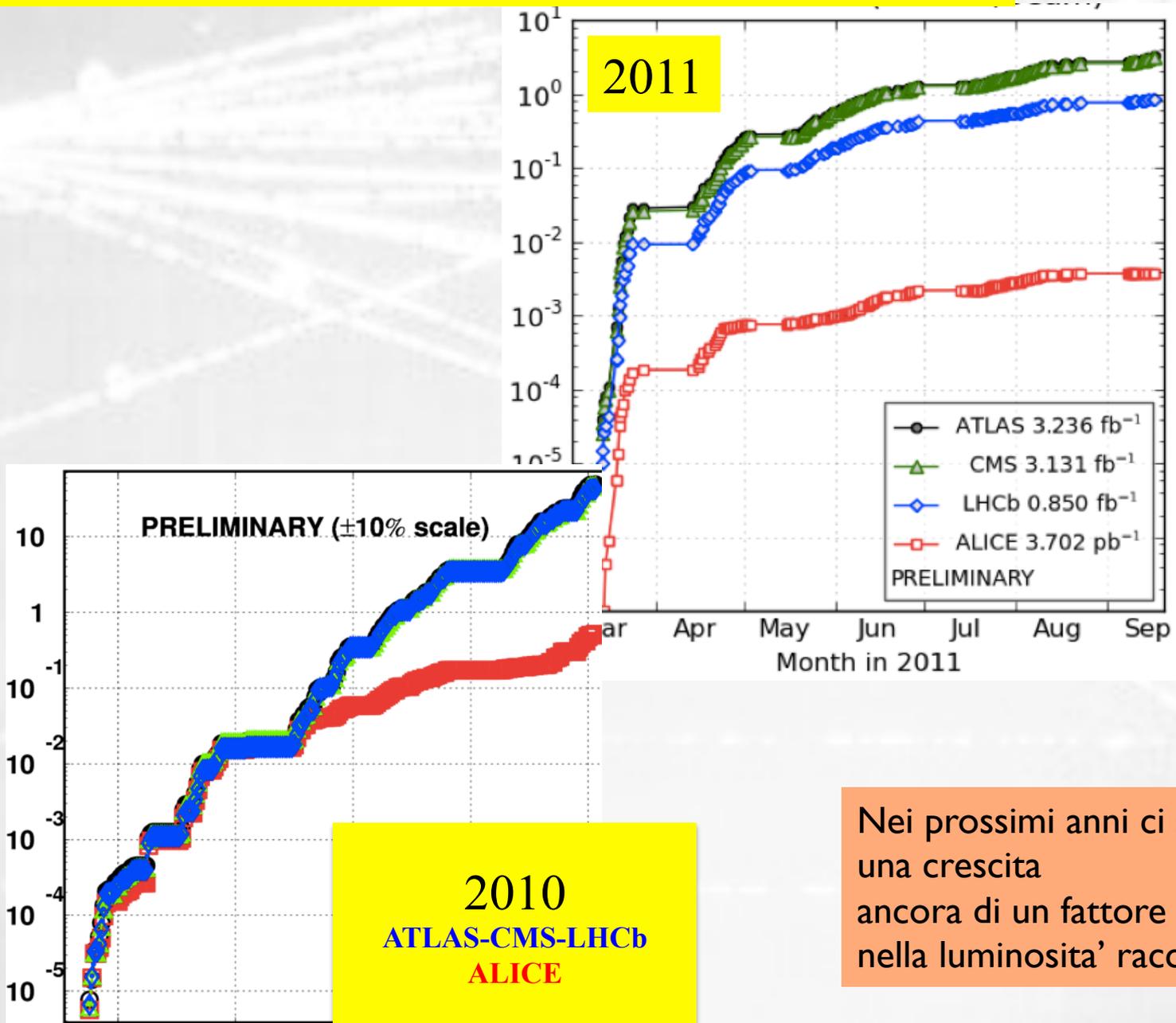
Collisioni tra protoni alla massima energia disponibile oggi (7 TeV)  
e con circa 1/3 della luminosita' istantanea finale  
Nel 2015 l'energia arrivera' a 14 TeV

**27 km**

An aerial photograph of the Geneva region in Switzerland, showing a patchwork of green agricultural fields and some urban areas. A large red oval is drawn over the landscape, representing the circular path of the Large Hadron Collider (LHC) tunnel. The text '27 km' is centered within the oval, indicating the total length of the tunnel.

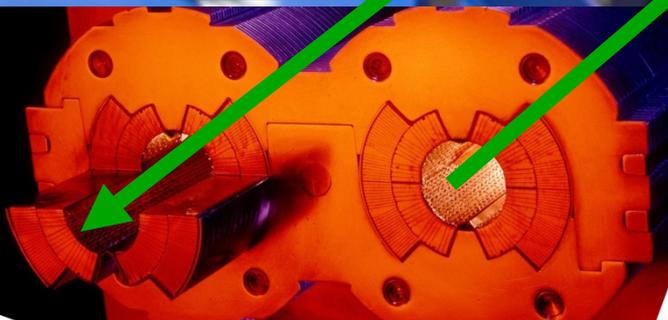
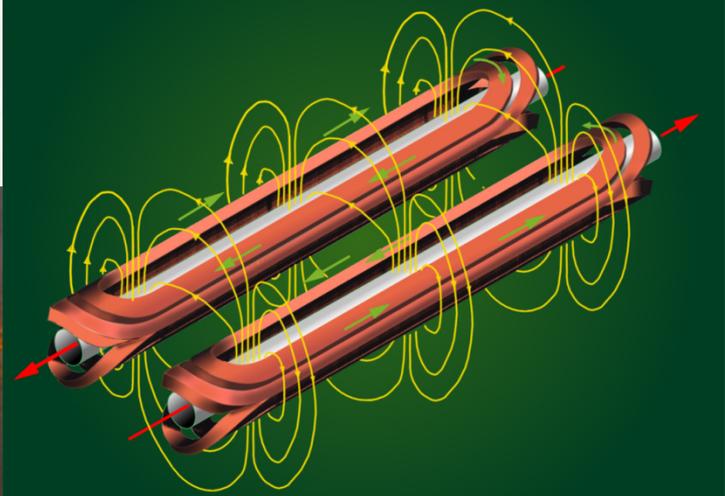
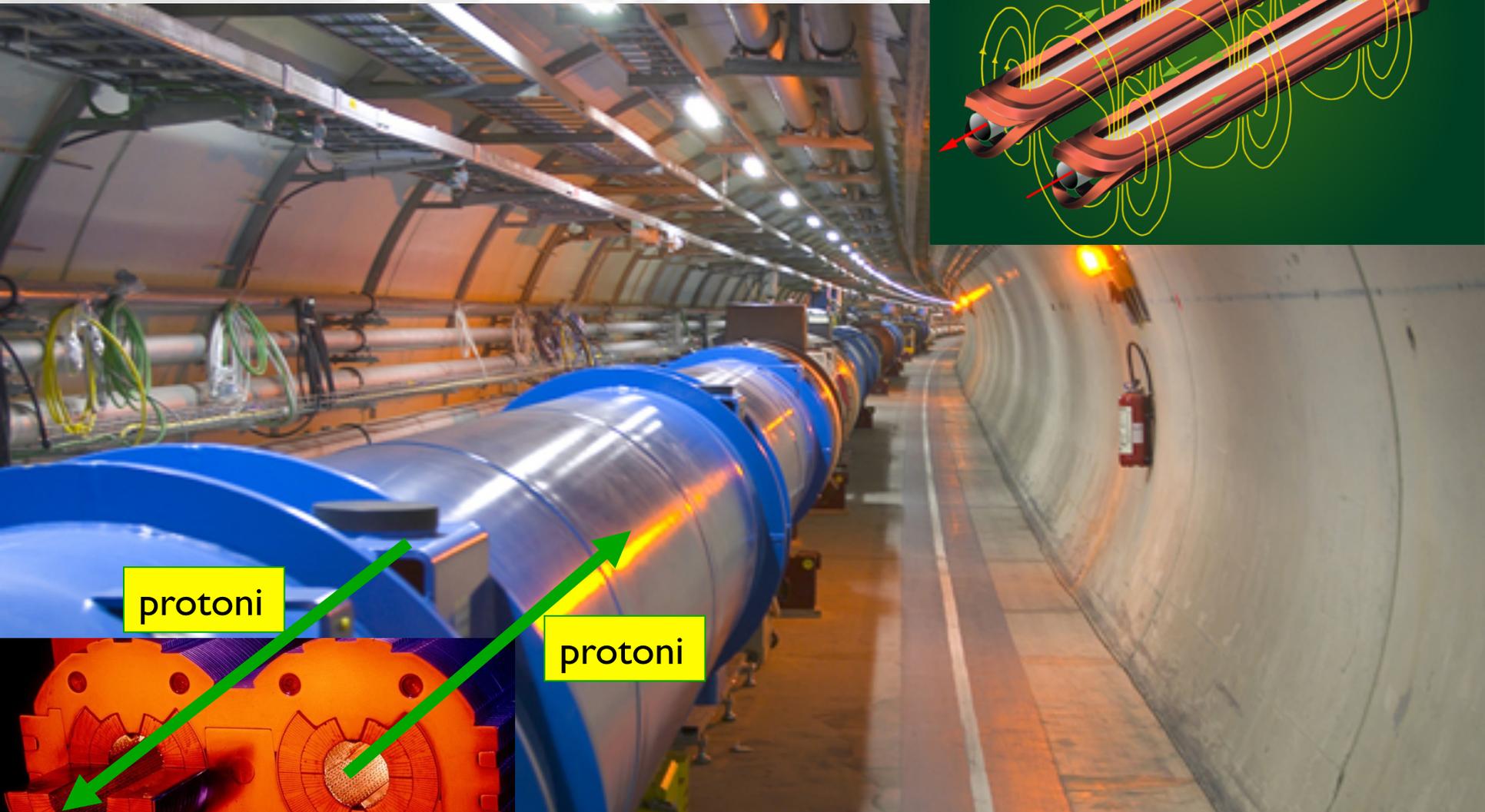
# La luminosita' (= il numero di eventi raccolti) negli esperimenti

12 ordini di grandezza



Nei prossimi anni ci si aspetta una crescita ancora di un fattore 100 nella luminosita' raccolta

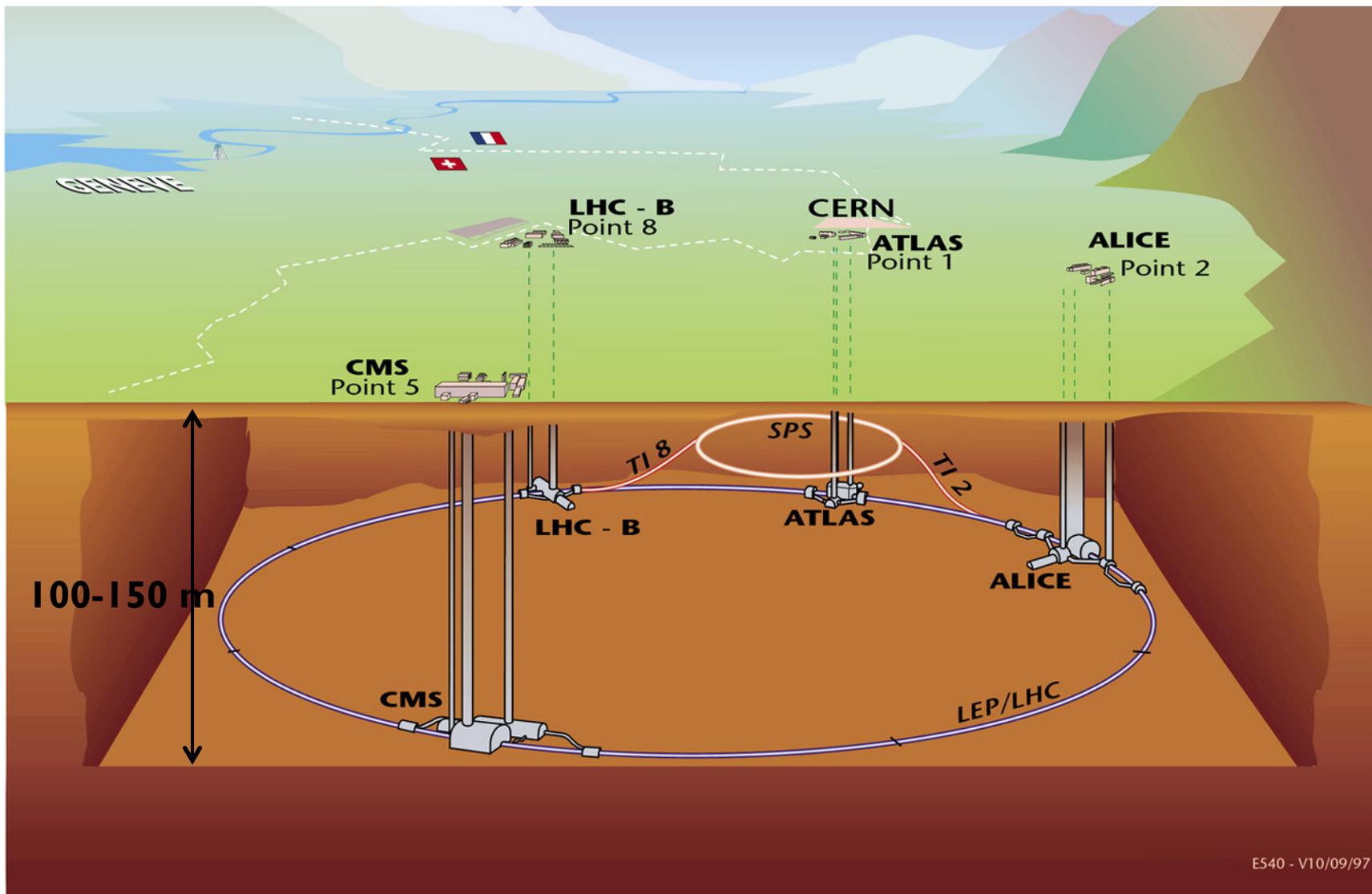
# Il Tunnel di LHC



# Atlas e Cms, di grandi dimensioni (generale purpose)

Lhcb, per la ricerca della violazione di CP (asimmetria materia/antimateria)

Alice, per lo studio del quark-gluon plasma (primi istanti Big Bang)



## La Macchina LHC

Un'impresa al limite delle tecnologie attuali (→ ricadute)

- 1200 dipoli magnetici superconduttori (tenuti a  $T=1.5$  K)
- 2800 pacchetti circolanti, ciascuno con  $\sim 10^{11}$  protoni  $\sim 370$  MJ

→ l'energia di un treno lanciato a 150 km/h

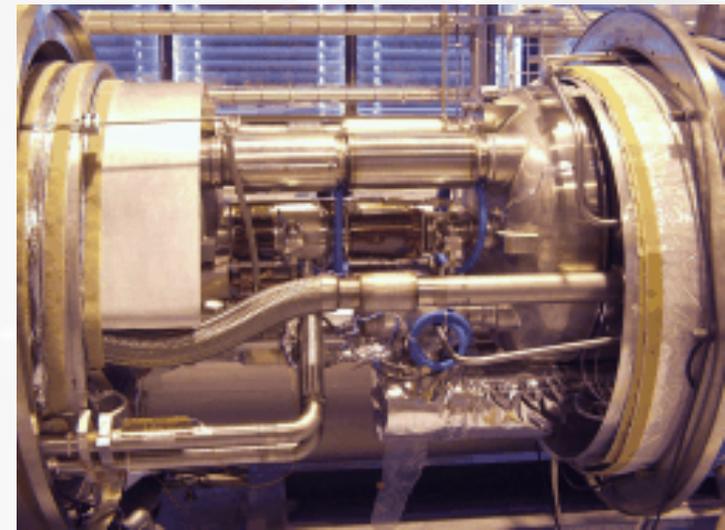
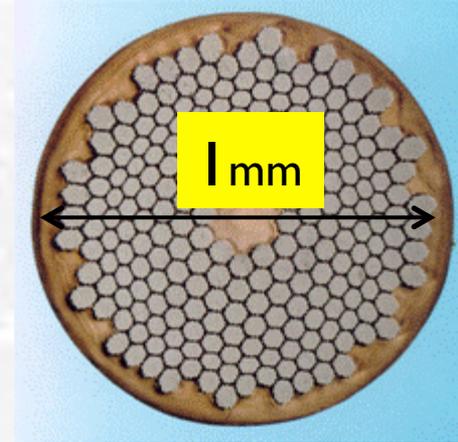
→ l'energia necessaria a fondere 1 T di rame

- Il sistema criogenico è ad Elio Superfluido (scelto per le sue caratteristiche di trasportabilità su grandi distanze) - Consumo di elettricità  $\sim 120$  MW

- Il fascio circolerà in una ciambella dove è stato fatto un vuoto ultraspinato per evitare le collisioni con il gas residuo:  $10^{-10}$  Torr ( $760$  Torr = 1 atm) ( $< 3 \cdot 10^6$  molecole/cm<sup>3</sup>): la stessa pressione che incontriamo a 1000 km di altezza

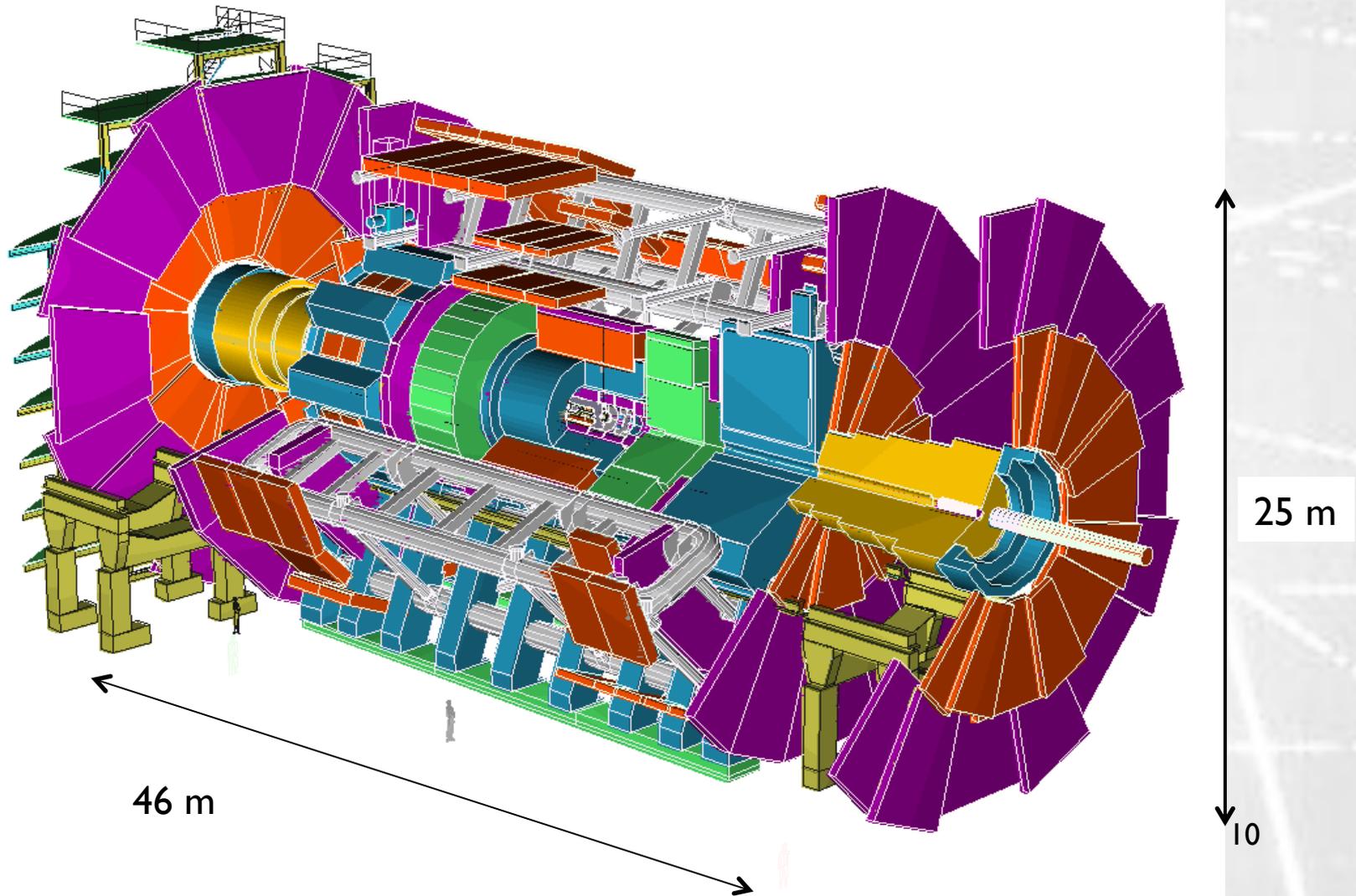
- I protoni si urtano ad una frequenza di 40 MHz  
Sulle fibre ottiche che portano gli eventi ai calcolatori, c'è un evento "in fila" ogni 4-5 m !

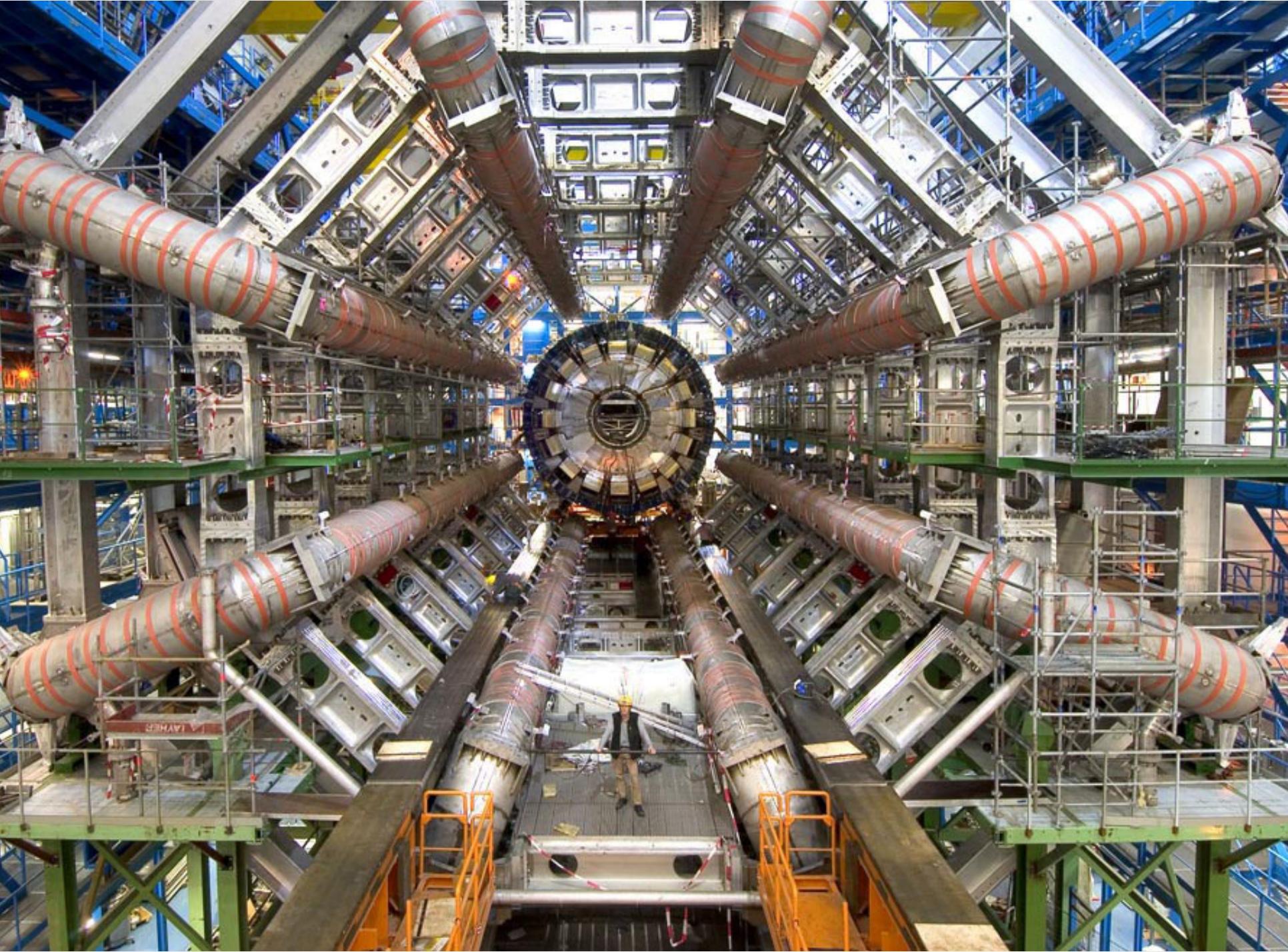
- I 4 esperimenti producono una quantità di dati pari ad 1 DVD ogni 10 sec. ( $> 100,000$  l'anno)



Atlas → atlas.ch

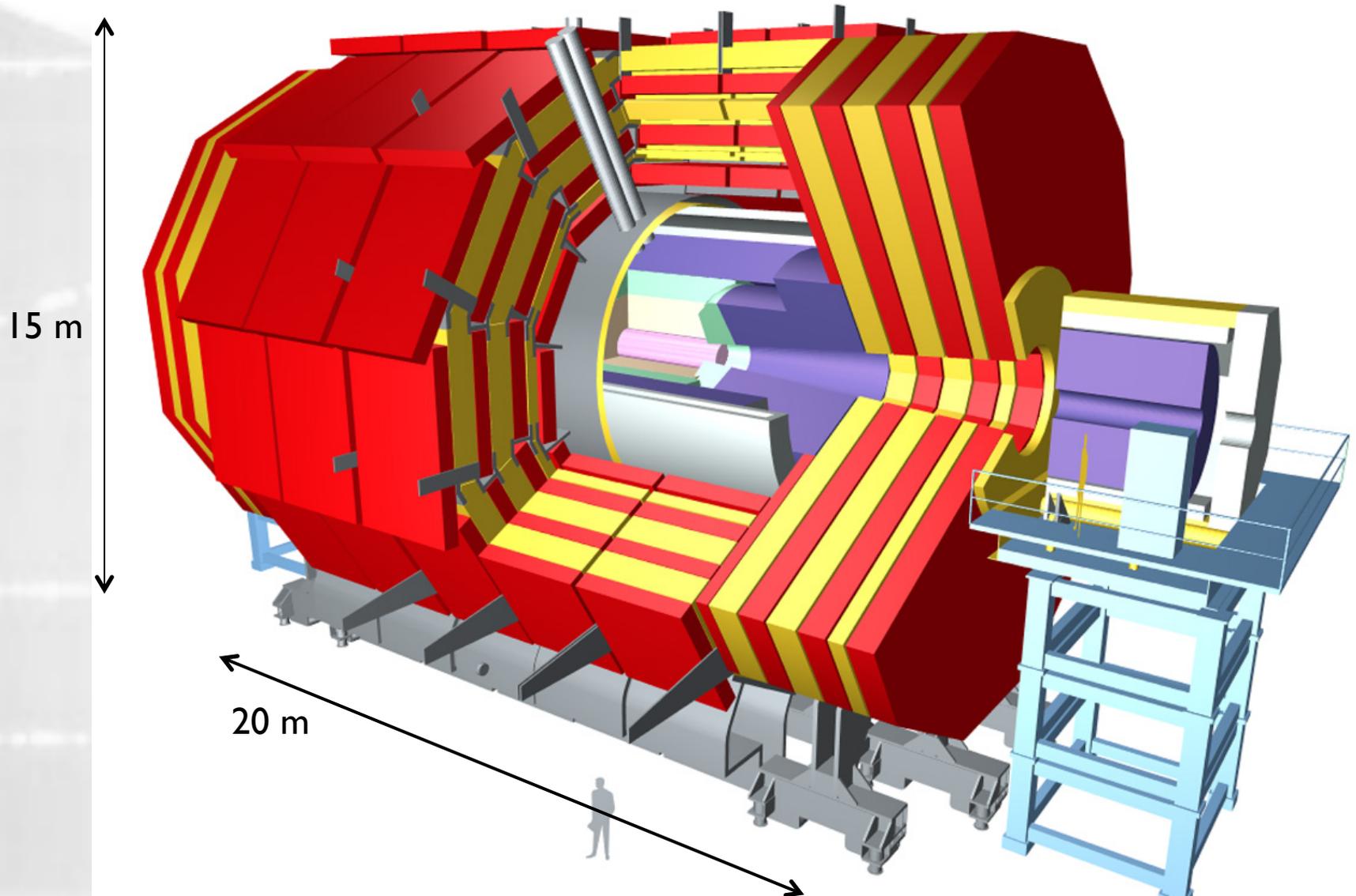
7000 t – 100,000,000 canali di elettronica - 2100 scienziati 37 nazioni 167 istituti  
Costo 400 M€

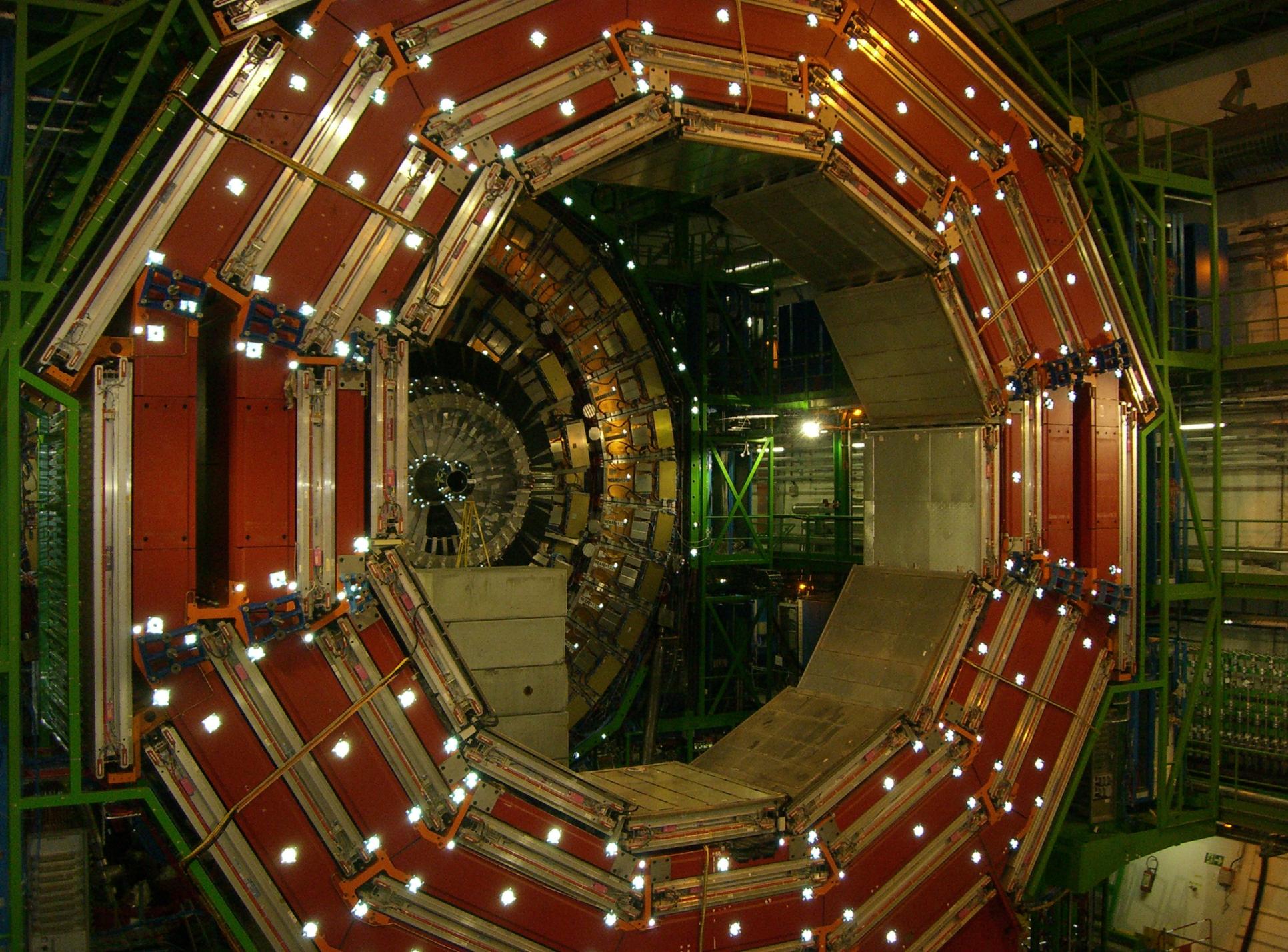




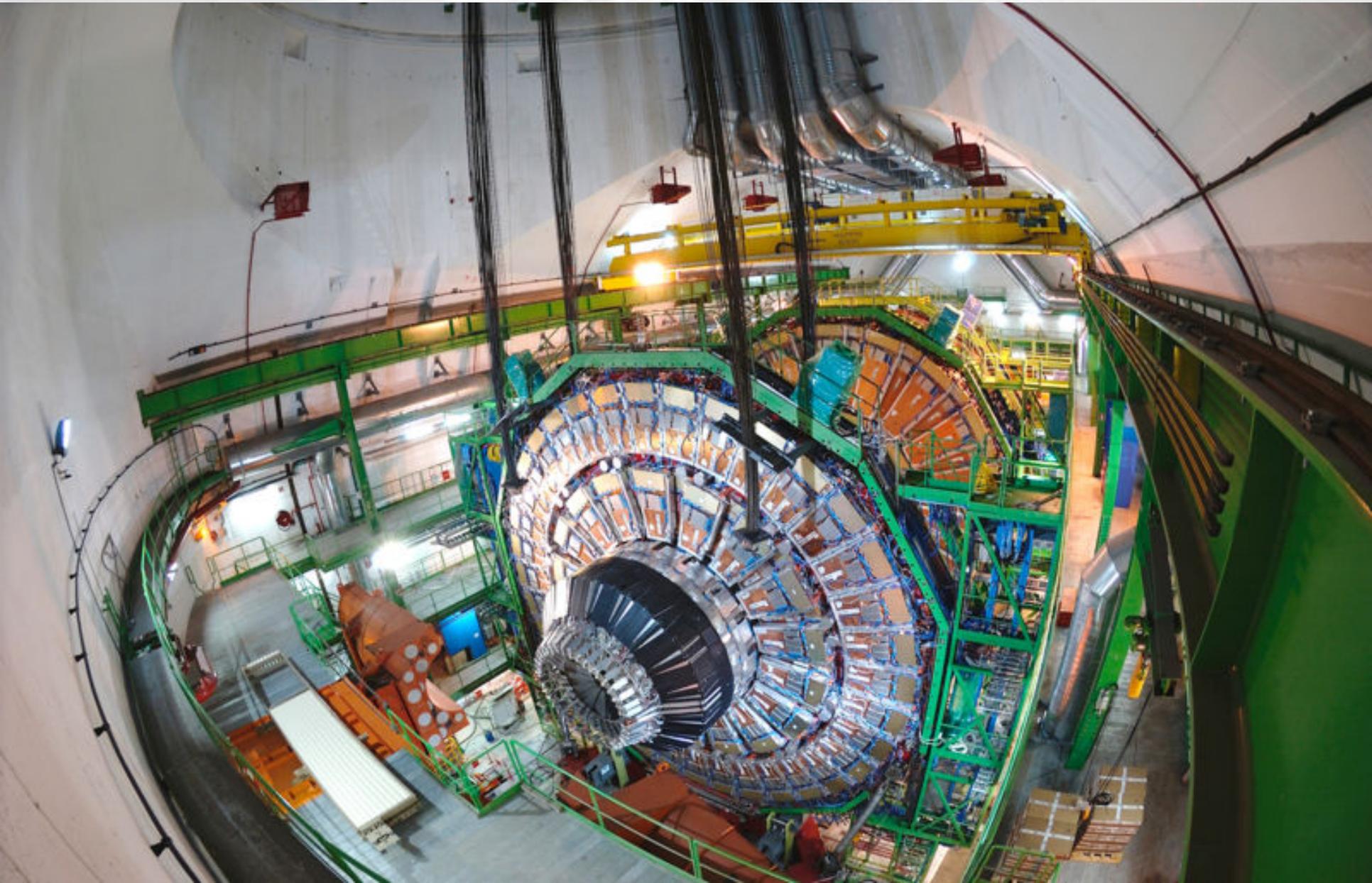
Cms → [cms.cern.ch](http://cms.cern.ch)

12,500 t - 2800 scienziati | 80 istituti - Costo 400 M€





La discesa nel pozzo di Cms di un pezzo del rivelatore da 1270 t



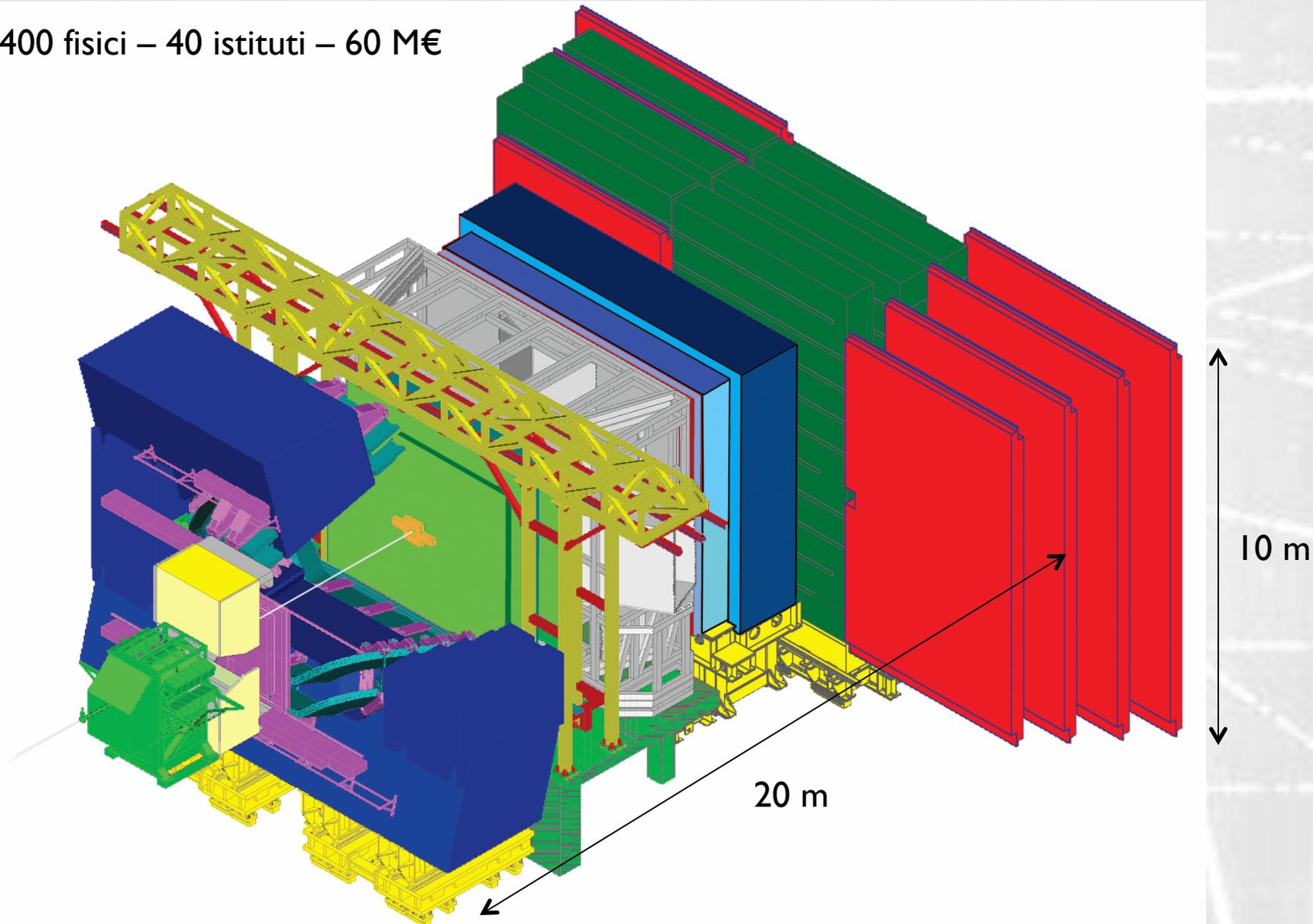
ATLAS



CMS

# Lhcb – [lhcb.web.cern.ch](http://lhcb.web.cern.ch)

400 fisici – 40 istituti – 60 M€



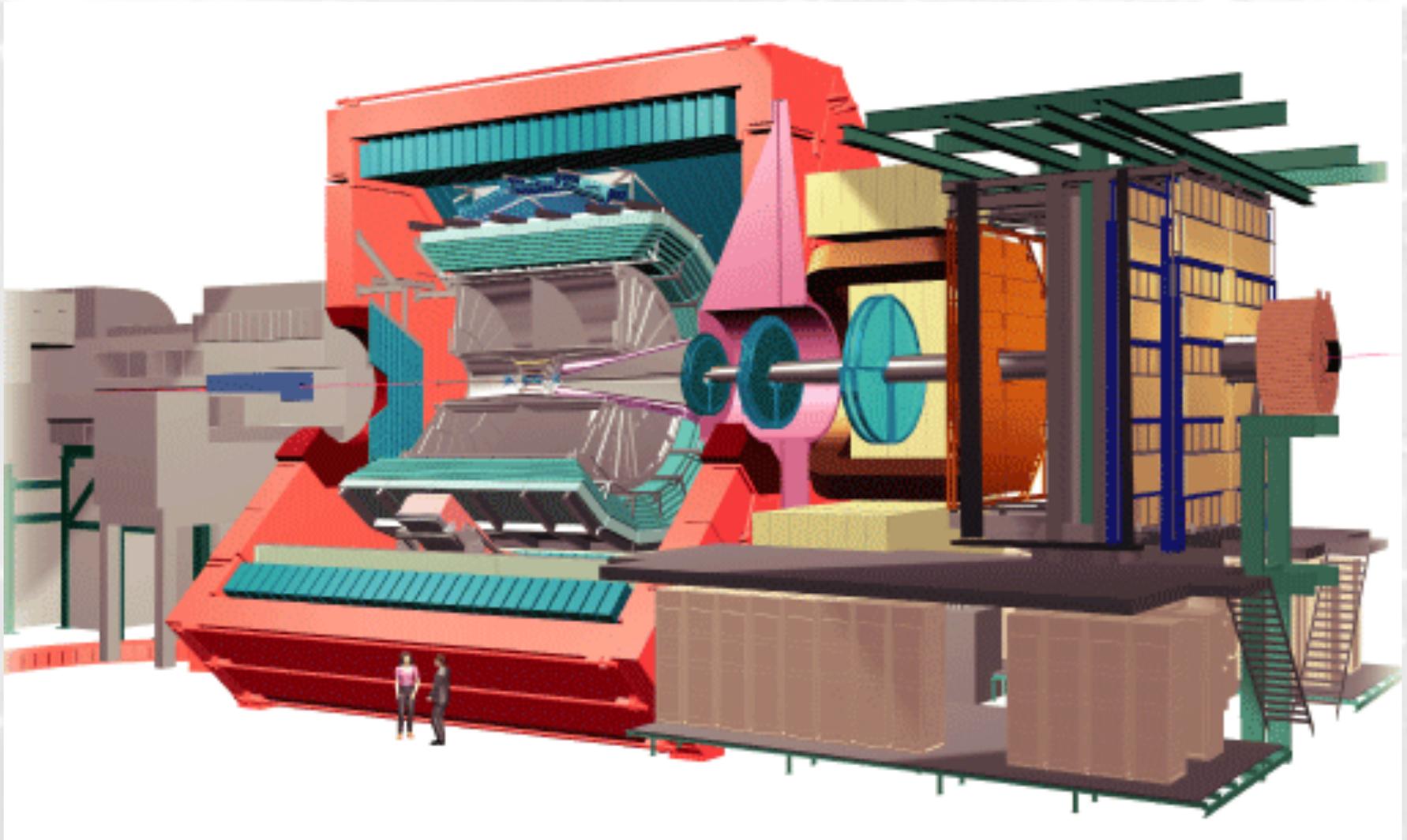
Un esperimento dedicato allo studio della violazione di CP nel sistema del quark b, ma anche dedicato alla ricerca di fenomeni inaspettati, possibilmente dovuti a Nuova Fisica, nei decadimenti molto rari. Un approccio alternativo ad Atlas / Cms

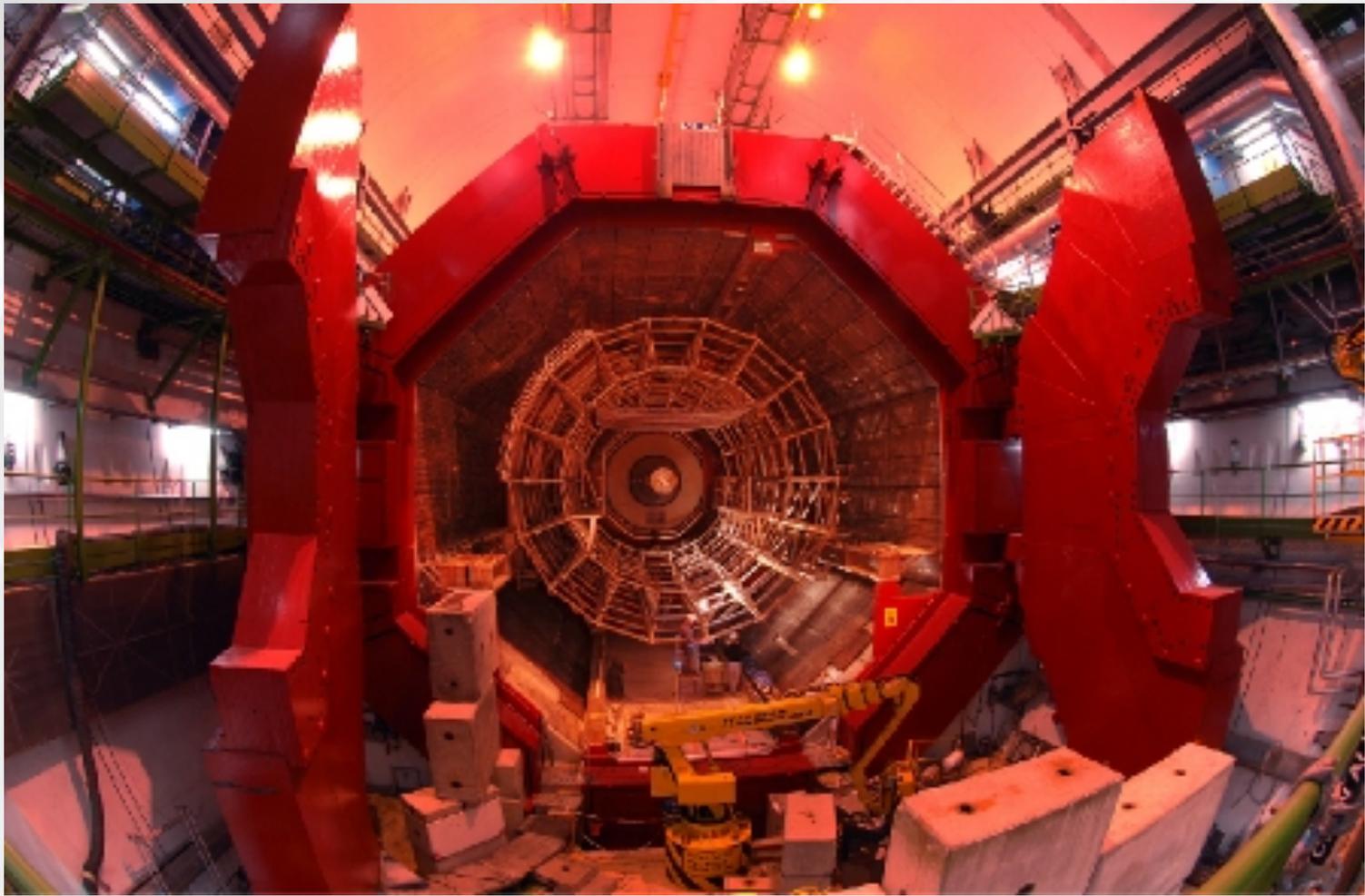


E' un apparato che ha la caratteristica di rivelare solo le particelle che vanno in avanti rispetto ad una direzione dei protoni, al contrario degli altri che accettano particelle in tutte le direzioni

Alice – [aliceinfo.cern.ch](http://aliceinfo.cern.ch)

1000 fisici – 105 istituti - 30 nazioni – Costo 150 M€





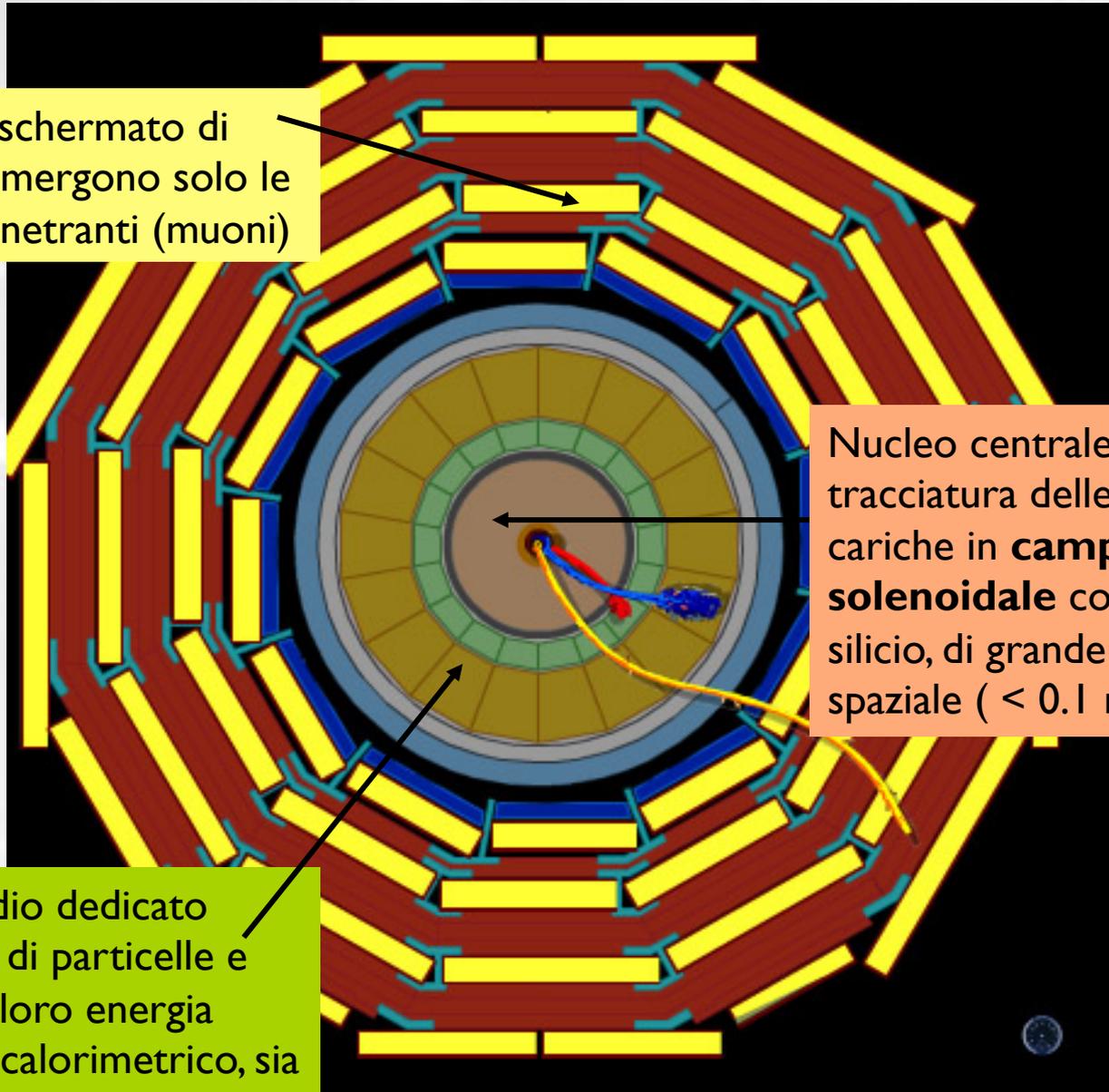
E' un esperimento che intende studiare le collisioni Pb-Pb in LHC.  
In questo tipo di eventi si crea una materia nucleare ad una temperatura tale che i quark e i gluoni sono liberi (plasma di quark e gluoni).  
Tali studi servono a capire la fisica delle particelle in condizioni di alta temperatura, ossia quelle che si sono verificate nei primi istanti (circa 0.1 msec) dal Big Bang 19

## Come e' concepito un grande apparato alla Atlas / Cms

Nucleo esterno schermato di ferro, dal quale emergono solo le particelle piu' penetranti (muoni)

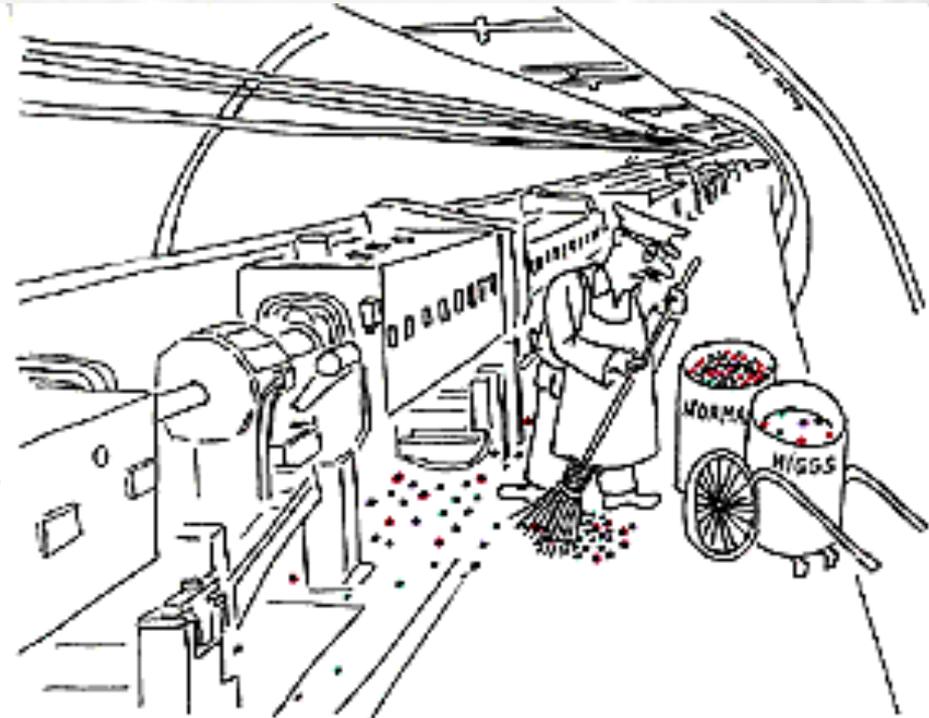
Nucleo centrale dedicato alla tracciatura delle particelle cariche in **campo magnetico solenoidale** con rivelatori al silicio, di grande risoluzione spaziale ( $< 0.1$  mm)

Nucleo intermedio dedicato all'assorbimento di particelle e alla misura della loro energia tramite metodo calorimetrico, sia per le cariche, che per le neutre (in particolare i fotoni)

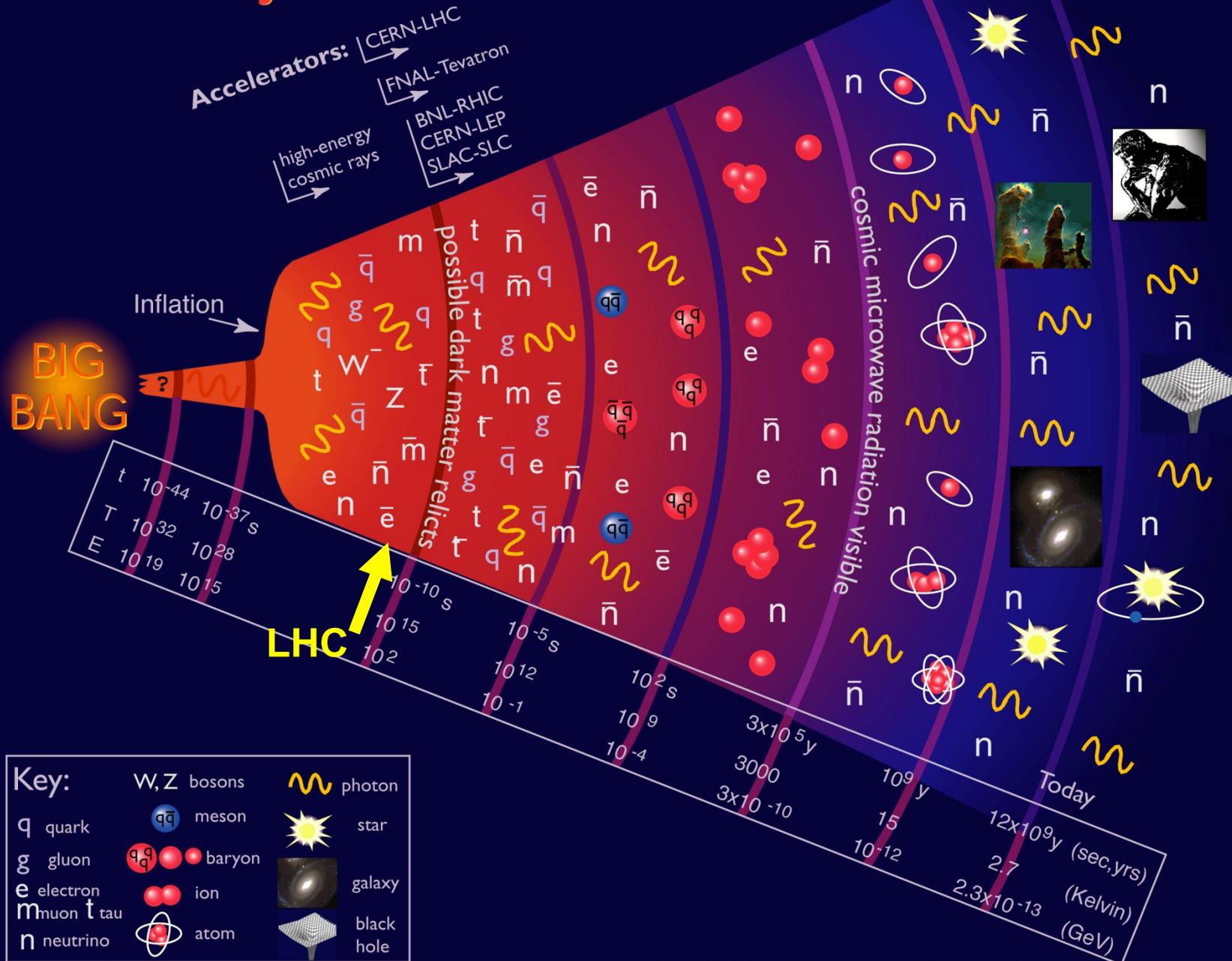




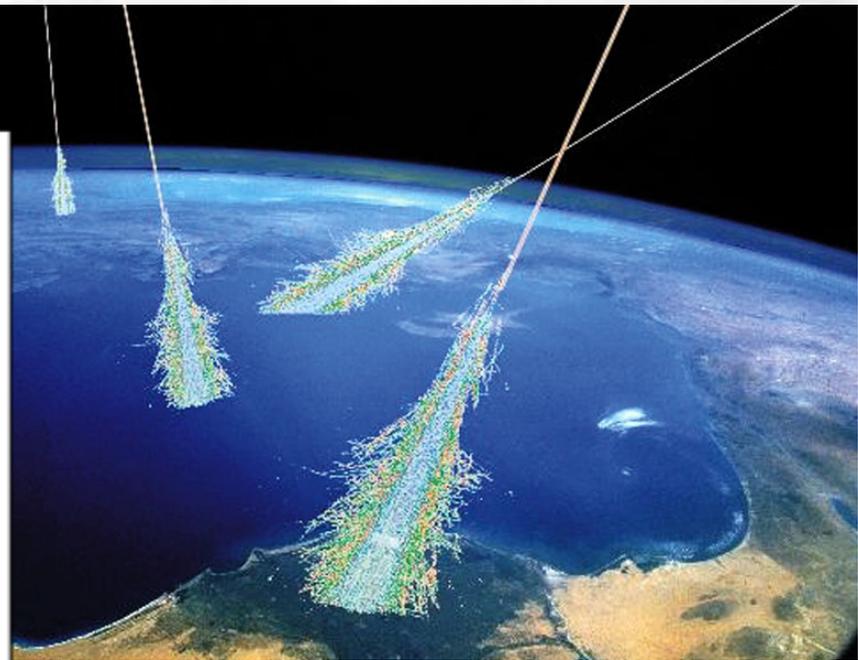
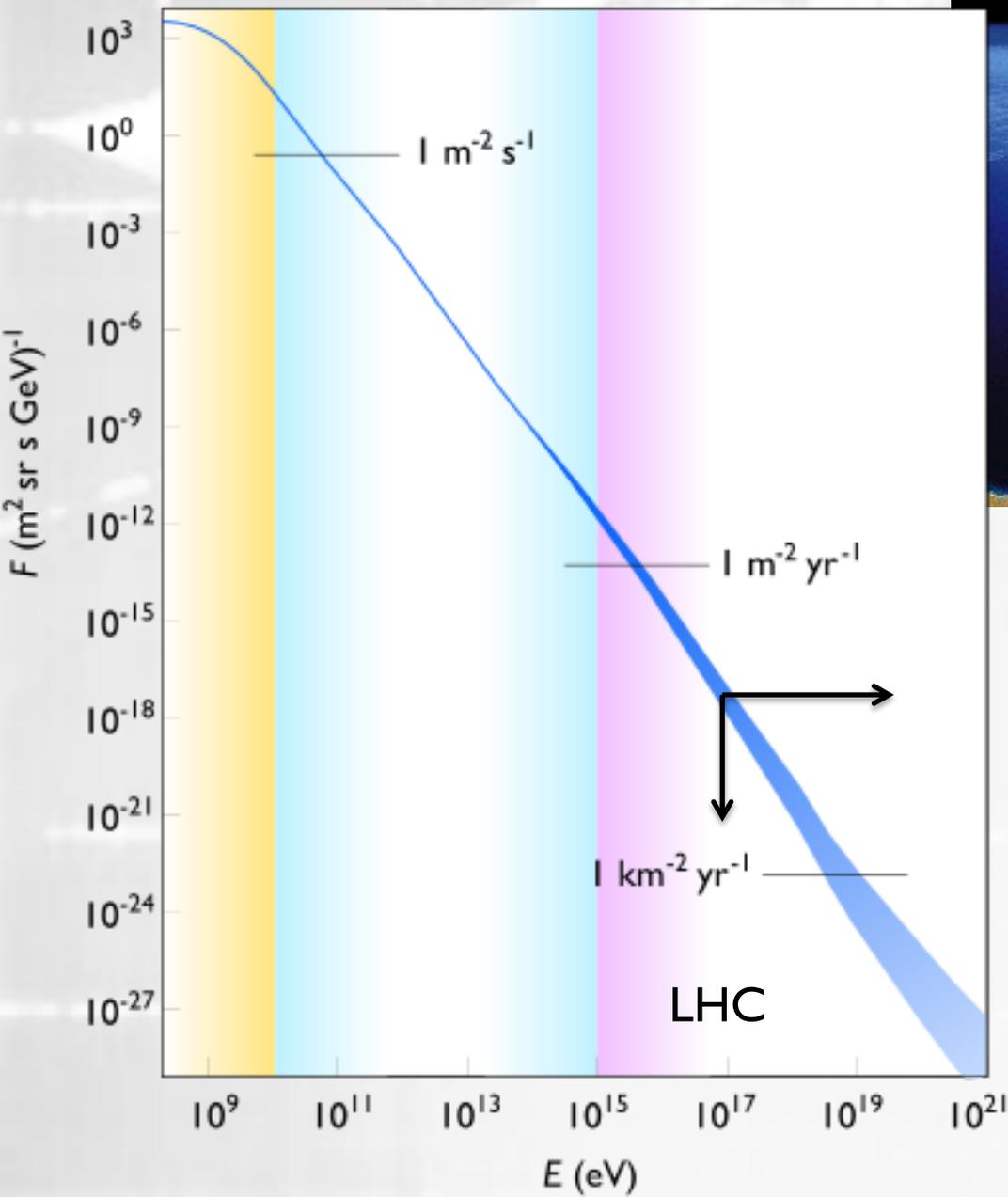
Cosa si cerca al **Large Hadron Collider** del CERN



# History of the Universe



# LHC e i buchi neri



Alle energie di LHC la Terra e' gia' stata bombardata dai Raggi Cosmici dell'energia di LHC innumerevoli volte

(e la Terra non e' sparita ...)

La **Ricerca a LHC** si prefigge di dare una risposta alle domande piu' elementari :

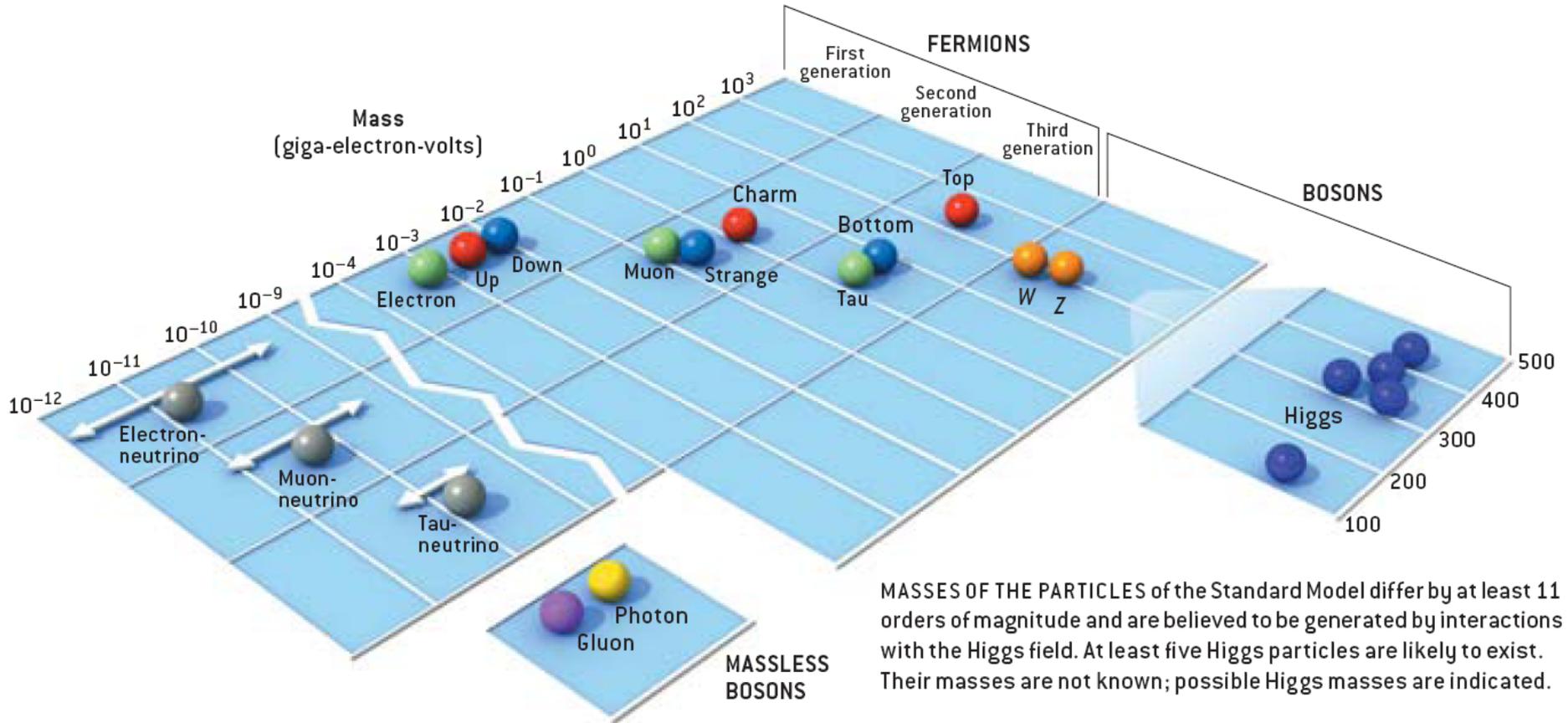
- come si e' formato l'Universo ?
- di cosa e' fatta la materia che ci circonda ?
- quali sono le forze che agiscono sulla materia ?
- come la materia e le forze determinano le proprieta' dell'Universo ?

Il goal della Fisica delle Particelle, dell'Astrofisica e della Cosmologia e' di creare una teoria che possa spiegare i dati che osserviamo: agli acceleratori, ai telescopi, sui satelliti, nei laboratori sotterranei

Negli ultimi 30 anni, e' stato messo a punto uno schema teorico della Fisica delle Particelle, che riproduce in maniera **eccezionale** i dati sperimentali, e che permette di spiegare i meccanismi di evoluzione dell'Universo dopo il Big Bang: il **Modello Standard (SM)** (come lo erano le Equazioni di Maxwell alla fine dell'800)

Lo SM e' ad es., in grado di spiegare i meccanismi di produzione delle abbondanze degli elementi nell'Universo, a partire dai modelli di evoluzione (nucleosintesi)

# La sintesi dello SM: la tavola delle Particelle Elementari



Si nota subito una grande ed inspiegabile diversita' di masse (11 ordini di grandezza)

Da molti anni pero' si intuisce che lo SM non puo' essere la Teoria Finale (cosi' come il sistema concepito da Maxwell non lo fu per l'elettromagnetismo).

Lo SM presenta alcune difficolta' teoriche e delle lacune:

Lo SM non spiega (osservazioni sperimentali):

- La **materia oscura** che c'e' nell'Universo (per non parlare dell'**energia oscura**)
- L'**asimmetria barionica** (non esiste antimateria nell'Universo – ma c'era al Big Bang)
- La **massa** dei neutrini (va messa “a mano”)

Lo SM non spiega (speculazioni teoriche):

- La **differente scala di massa delle particelle**
- La **diversita' di comportamento delle famiglie**
- L'**enorme diversita' di intensita' tra le forze**
- L'**incapacita' di unificare la Relativita' Generale con la Meccanica Quantistica**

Inoltre nello SM ci sono 19 parametri liberi.

Va sottolineato che non c'e', sino ad oggi, **nessuna misura sperimentale** che faccia pensare che lo SM non funzioni.

Tuttavia dagli anni '70, numerosi teorici hanno iniziato a prefigurare diversi scenari per il superamento dello SM: ad es. con le teorie supersimmetriche, o con le stringhe.

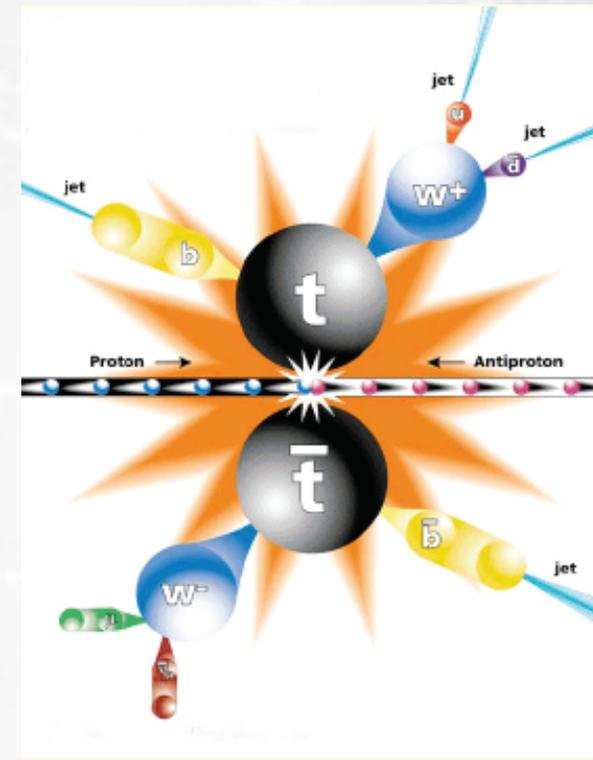
# Gli scopi scientifici di LHC

LHC e' una macchina lunga **27 km** nella quale protoni si scontrano contro altri protoni per rilasciare energia utile a creare nuovi stati della materia, mai visti dall'uomo, ma forse creati nei primi istanti del Big Bang.

Per quali finalita' e' stato costruito LHC ?

- Scoprire il **bosone di Higgs** (o scoprire che non c'e'...)
  - Cercare **nuove particelle** o nuove interazioni fondamentali
  - Scoprire la possibile **elementarieta'** di quarks e leptoni
  - Trovare la particella responsabile della **Materia Oscura**
- Dare indicazione su quali sono, tra le molte possibilita', i modelli teorici che meglio potrebbero risolvere i problemi elencati*

Questo aspetto, seppure importante, potrebbe essere pero' di non semplice risoluzione

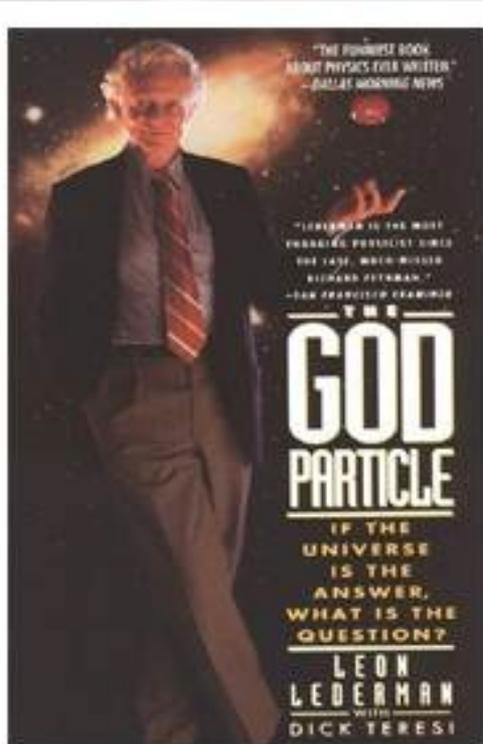


## Il Meccanismo di Higgs

Esiste pero' ancora un elemento da verificare nel Modello Standard: la scoperta della **particella di Higgs**

Il meccanismo di Higgs e' un elemento cruciale della teoria. Ha la funzione di:

- **rompere la simmetria** (quella che unifica le interazioni fondamentali);
- **dare massa alle particelle.**



Si e' osservato sperimentalmente che il meccanismo funziona, ma il **bosone di Higgs** non e' stato ancora trovato, ed uno degli scopi per cui e' stato costruito LHC e' scoprire questa particella.

Nel 1993 il Ministro inglese della Scienza, *William Waldegrave*, mise in palio una bottiglia di champagne per il fisico che fosse stato capace di spiegargli su un solo foglio di carta, come funzionasse il meccanismo di Higgs (e a cosa servisse scoprirlo...)

Il prof. David Miller vinse con il seguente esempio...

...un gruppo di politici alla buvette del Parlamento...



...improvvisamente arriva il Primo Ministro...



...tutti si affollano intorno a lui...  
(questo spiega come le particelle acquistano la massa)



Un altro modo per immaginare il Meccanismo di Higgs: lo spazio e' permeato di acqua (= campo di Higgs) che determina le caratteristiche di mobilita' (= massa) degli elementi che vi transitano (pesci = particelle)



## Il Problema della Materia Oscura

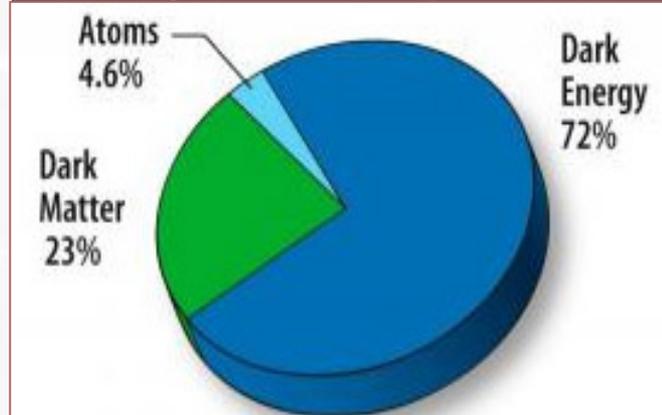
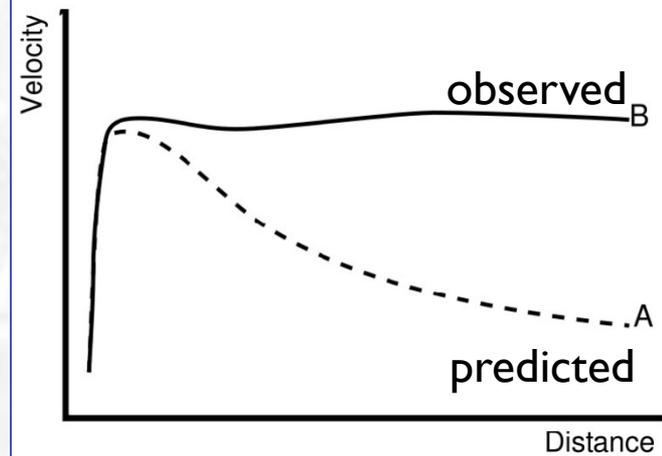
I cosmologi, che a partire dagli anni '60 hanno tentato di calcolare il contenuto di massa dell'Universo.

Dalle misure della velocità delle stelle periferiche delle Galassie a Spirale, si può determinarne – attraverso la meccanica classica – la massa.

Le osservazioni sperimentali ci dicono che c'è **molta più materia nell'Universo** di quanta se ne osservi (Galassie, gas intergalattico, raggi cosmici = **Materia Barionica**). Lo spazio è permeato di Materia Oscura (almeno 5 volte quella visibile).

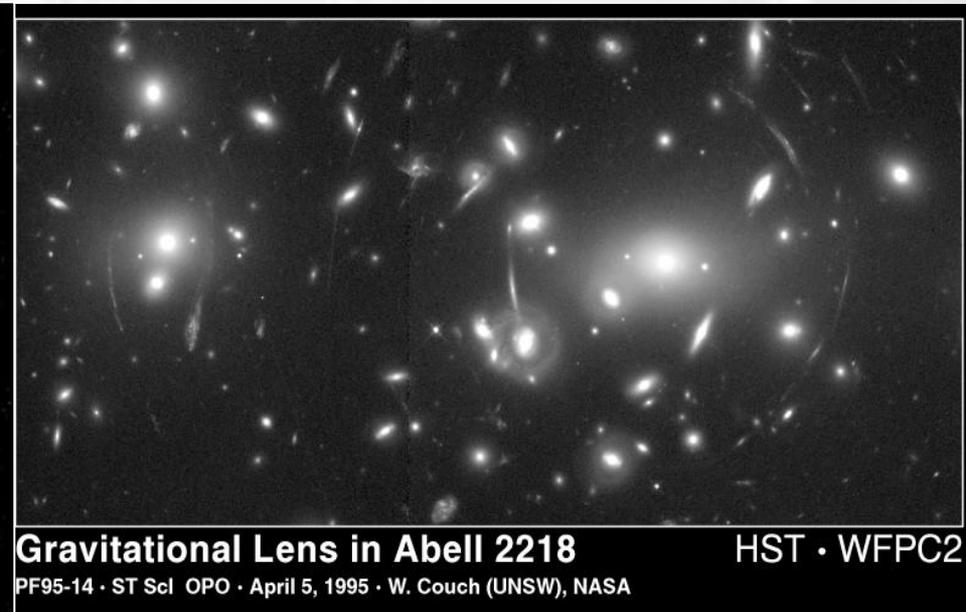
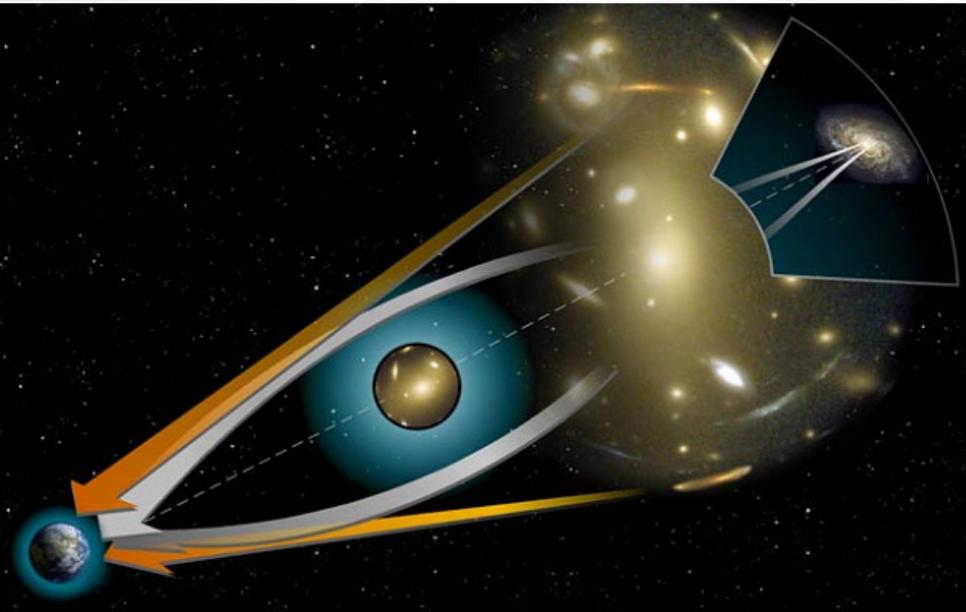
*Da cosa è costituita questa materia oscura ?*

Per molti anni si è pensato che fosse dovuta ad una massa – piccola – dei neutrini. Le misure sperimentali però rendono non percorribile questa ipotesi. Ora si ipotizza che sia formata da particelle di grande massa ( $\sim 1$  TeV), debolmente interagenti, generate nel Big Bang e da allora imprigionate nell'Universo.



## Una spettacolare indicazione sperimentale della Materia Oscura

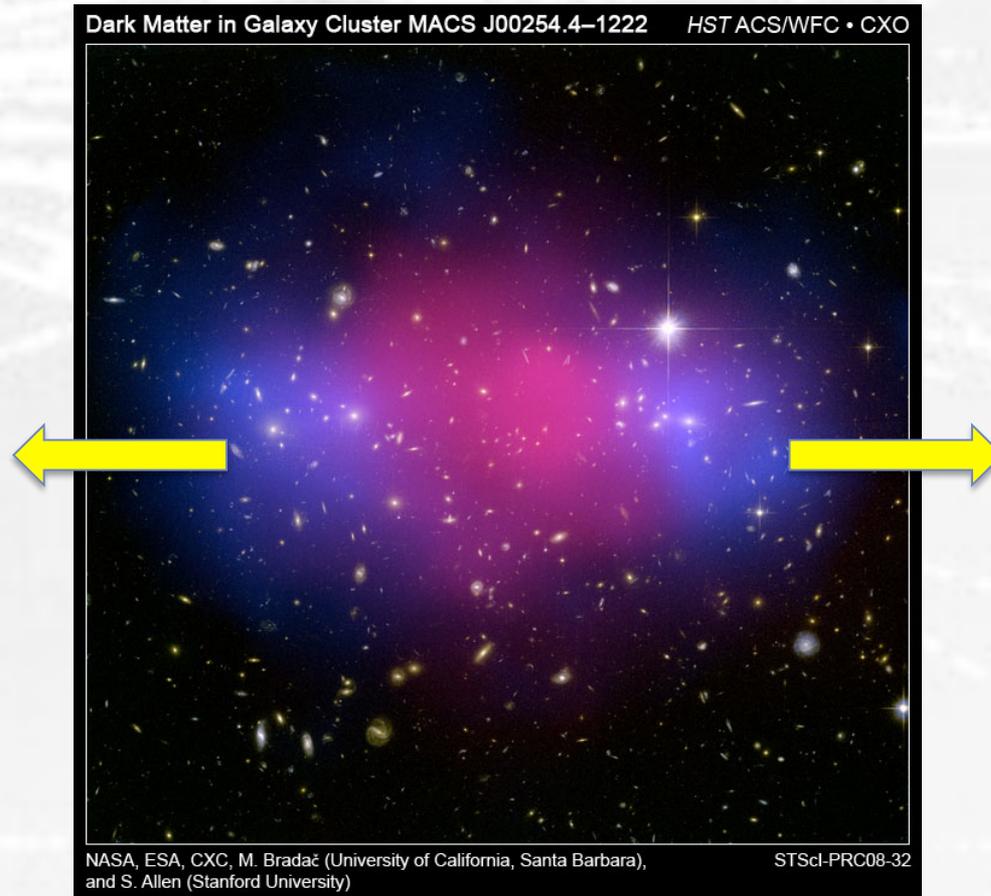
La teoria della Gravitazione di Einstein prevede che il campo di un oggetto molto massivo possa deviare significativamente la luce (Lenti Gravitazionali).



Ci sono ormai molte evidenze di oggetti celesti dei quali si osservano immagini speculari ed anelli di luce dovuti a questi effetti e causati da materia oscura che si frappone tra noi e l'oggetto osservato.

Il merito di molti dei progressi in Cosmologia va all'Hubble Space Telescope

## Un'altra spettacolare indicazione sperimentale della Materia Oscura



Due galassie si attraversano, ma nel passaggio, la materia “oscura” (IN BLU) sopravanza la materia “barionica” (IN ROSSO) che rimane “indietro” perché più interagente e quindi più lenta.

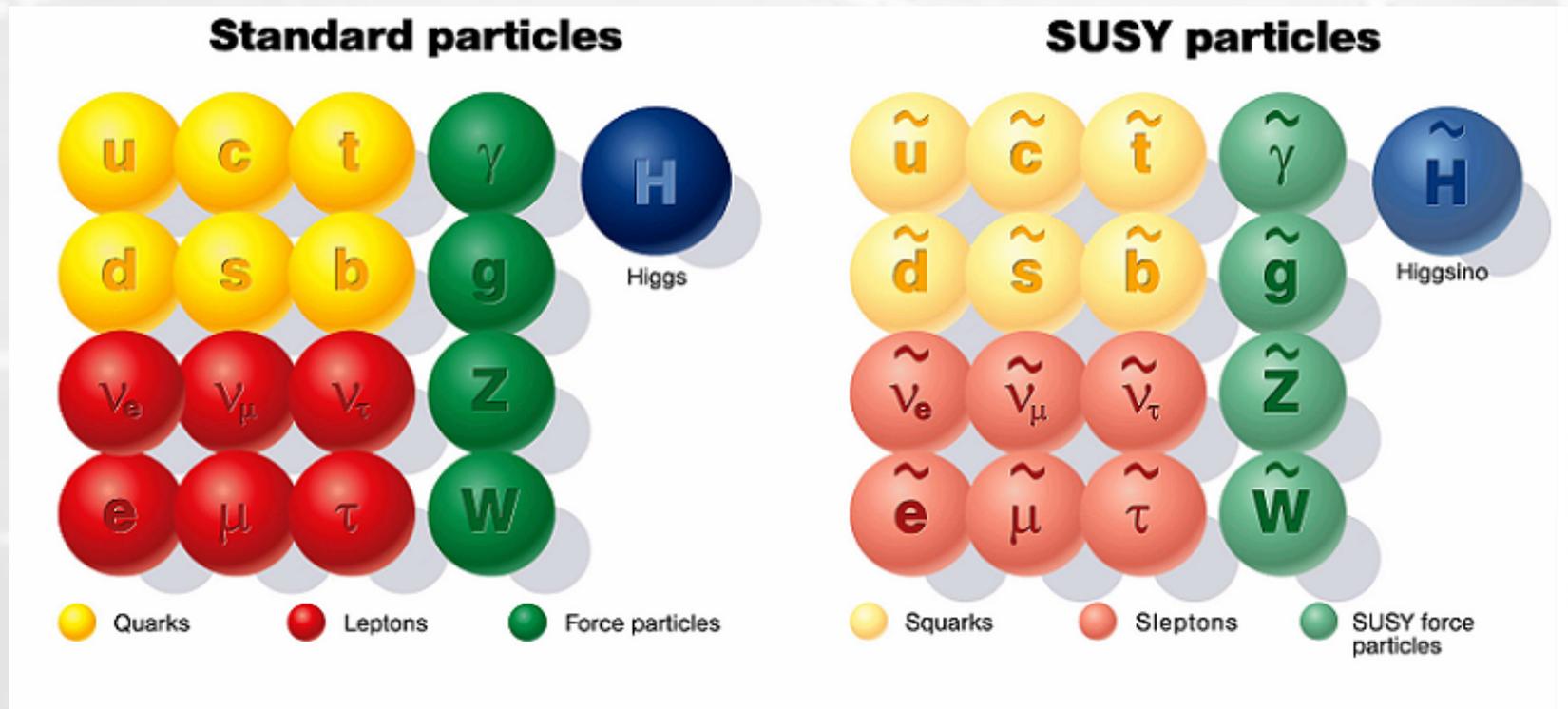


**La ricerca in ATLAS e CMS :  
Hic Sunt Dracones**

# Le Teorie Supersimmetriche (SUSY) (I)

Sono uno delle possibili ampliamenti del Modello Standard. Accanto alle particelle note esiste un Supermondo di particelle che hanno spin intero (o semintero): *s-particelle*

Quarks ( $s=1/2$ )  $\rightarrow$  sQuarks ( $s=1$ )    Fotone ( $s=1$ )  $\rightarrow$  sFotone ( $s=1/2$ )  
Leptoni ( $s=1/2$ )  $\rightarrow$  sLeptoni ( $s=1$ )    Bosoni ( $s=1$ )  $\rightarrow$  Gaugini ( $s=1/2$ )



## Le Teorie Supersimmetriche (II)

Le particelle Supersimmetriche hanno uno spettro di massa ad energie alte (forse qualche centinaio di GeV): questo e' il motivo per il quale non sono state osservate (ma potrebbero essere state prodotte nel Big Bang).

Le TEORIE SUSY permettono di risolvere alcuni problemi del MODELLO STANDARD:

- Il problema del FINE TUNING (“regolazione fine”)
- Il mistero della MATERIA OSCURA
- L'unificazione delle forze Elettrodeboli e Forti

## Il problema del FINE TUNING

Viviamo in un mondo nel quale tra la forza debole e la forza gravitazionale (caratterizzate da due costanti fondamentali, la Costante di Fermi e quella di Newton) esistono 32 ordini di grandezza di diversità

Inoltre, per dare stabilità al sistema dello Standard Model, l'apparato teorico deve predire delle cancellazioni matematiche particolarmente fortunate

PERCHE' QUESTE PARTICOLARITA' ?

- 1) C'è un quadro di simmetria superiore (ad es. SUSY) ?
- 2) E' un caso ?
- 3) Viviamo nell'unico mondo che ci consente di osservarlo ?

Il punto 3) prevede l'esistenza di MULTIVERSI (Universi Paralleli) e del PRINCIPIO ANTROPICO ... osserviamo solo quello che il fatto di esistere ci permette di osservare (!)



## La Grande Unificazione

Una evidenza indiretta che le SUSY siano un modello probabile per andare oltre lo SM e' dato dallo studio dell'andamento, in funzione dell'energia, delle costanti di accoppiamento delle interazioni.

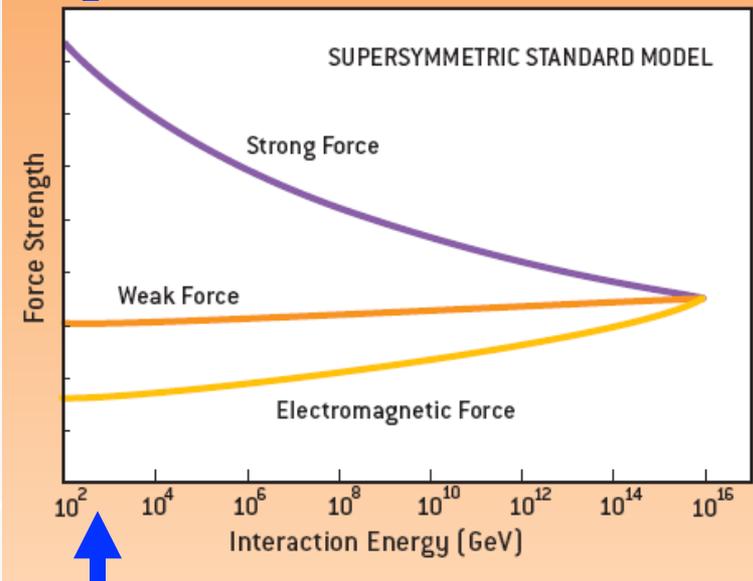
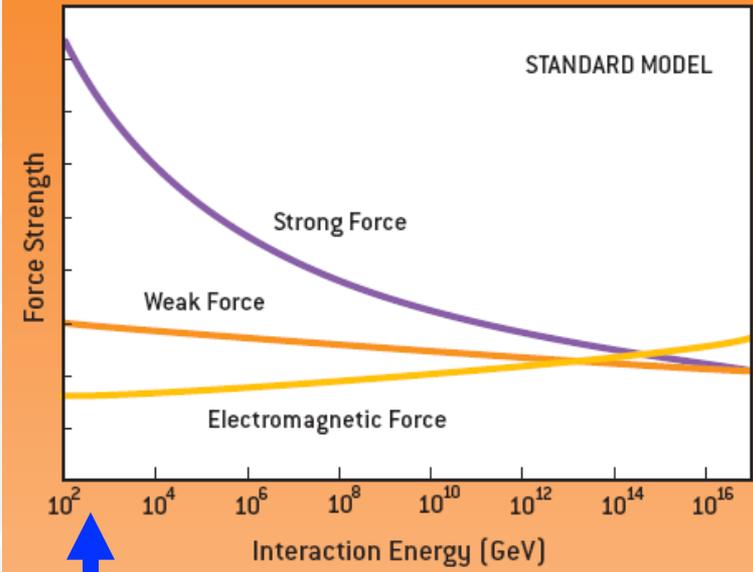
Uno dei successi dello SM e' la predizione di questo andamento, verificato ora sino ad energie di circa 200 GeV. Estrapolando sino ad energie piu' alte ( $10^{15}$  GeV) si nota che le curve si avvicinano ma non si uniscono (come si vorrebbe).

Invece, utilizzando la SUSY, le curve tendono a raggrupparsi in un punto ben preciso, detto di Grande Unificazione, attorno a  $10^{16}$  GeV.

Putroppo le SUSY hanno la caratteristica di non essere molto predittive, avendo bisogno, in generale, di un grande numero di parametri da fissare.

La SUSY piu' semplice (quella "Minimale") necessita di un numero piccolo di parametri.

## Evidence for Supersymmetry

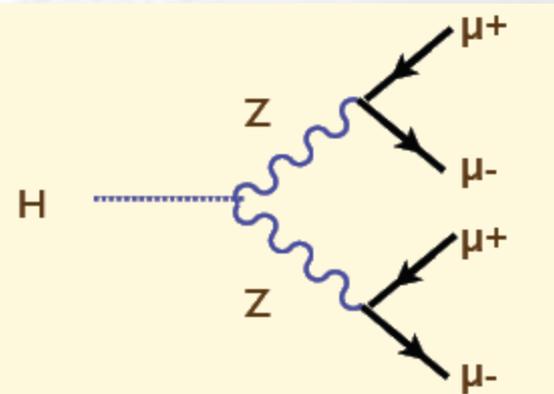


## Quali sono le caratteristiche di un evento con un Bosone di Higgs in Atlas / Cms ?

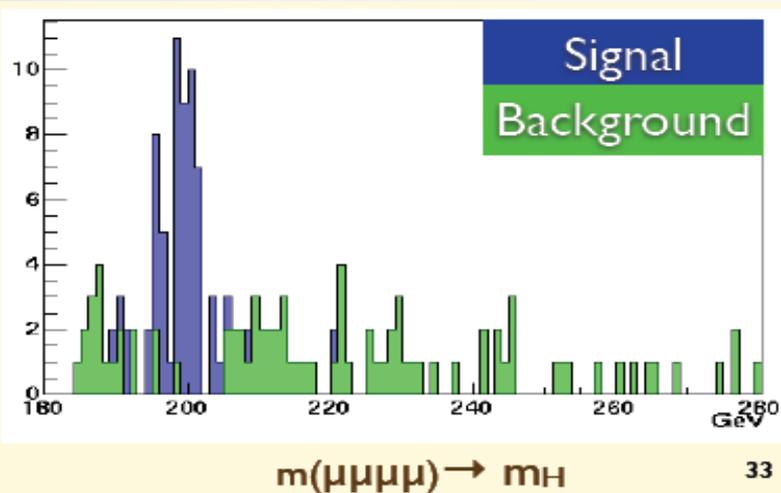
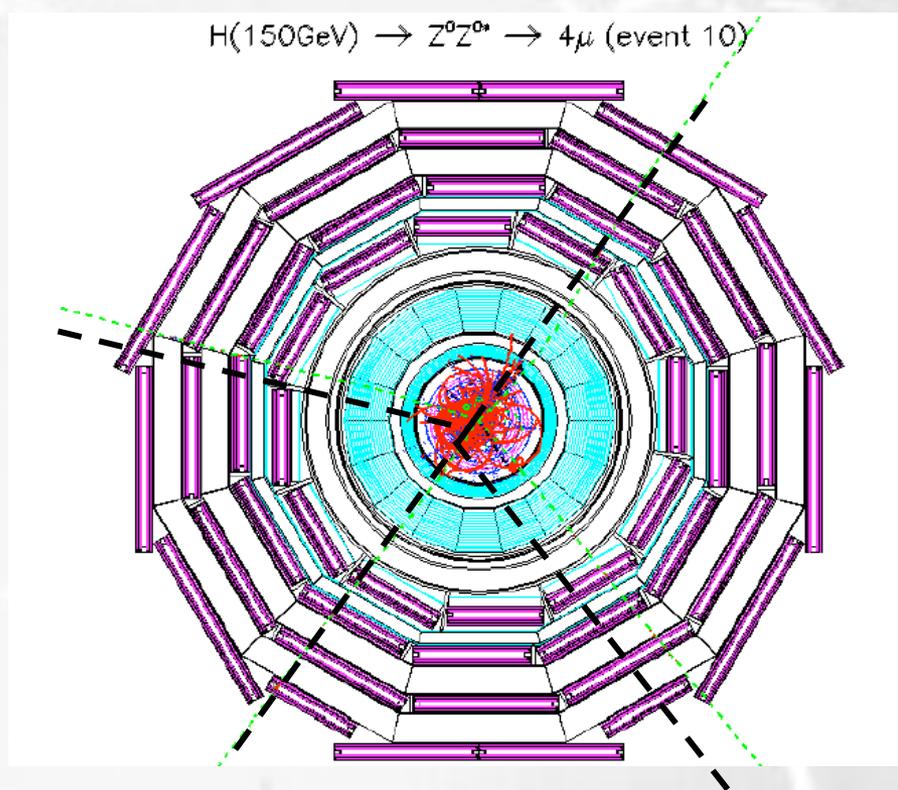
Il modo piu' semplice e' quello di cercare

4 muoni, i cui parametri cinematici determinano:

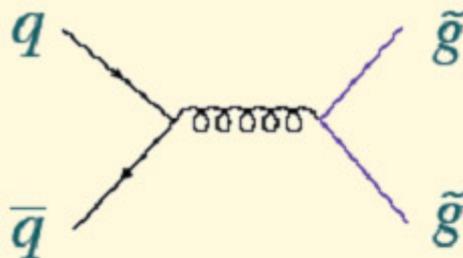
- a coppie (con cariche opposte) la massa dello Z da cui si originano;
- tutti e 4 insieme permettono di determinare la massa del bosone di Higgs



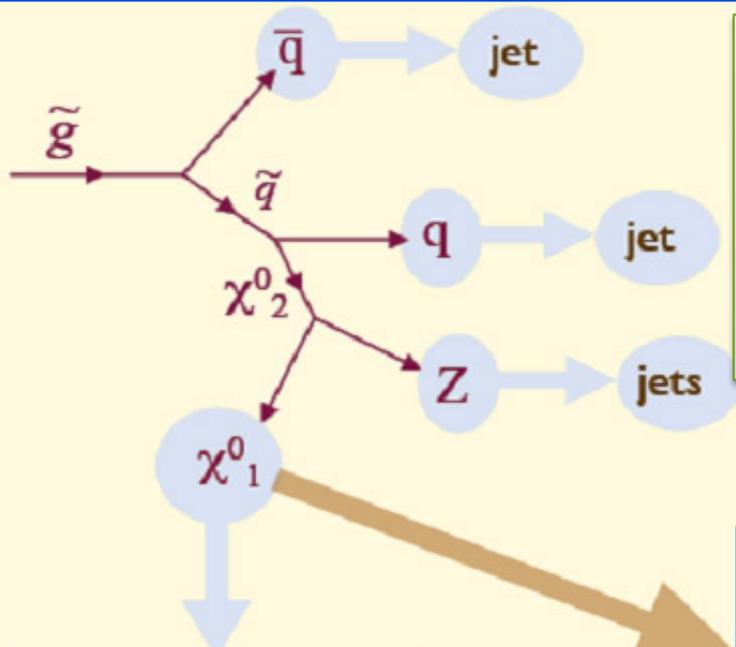
Questo e' pero' un evento molto raro, che deve essere identificato in un fondo altissimo di altre particelle che si sovrappongono (solo 1 evento ogni  $10^8$  e' tra quelli interessanti)



# Quali sono le caratteristiche di un evento con Materia Oscura in Atlas / Cms ?

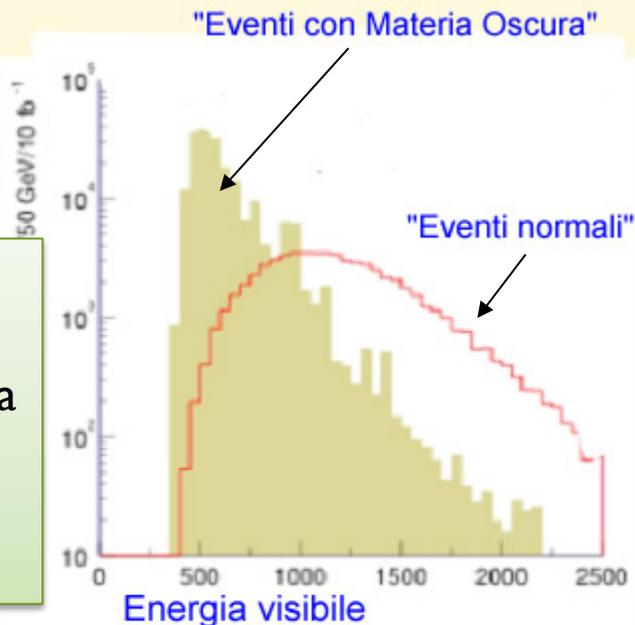


Nelle collisioni si producono particelle Supersimmetriche



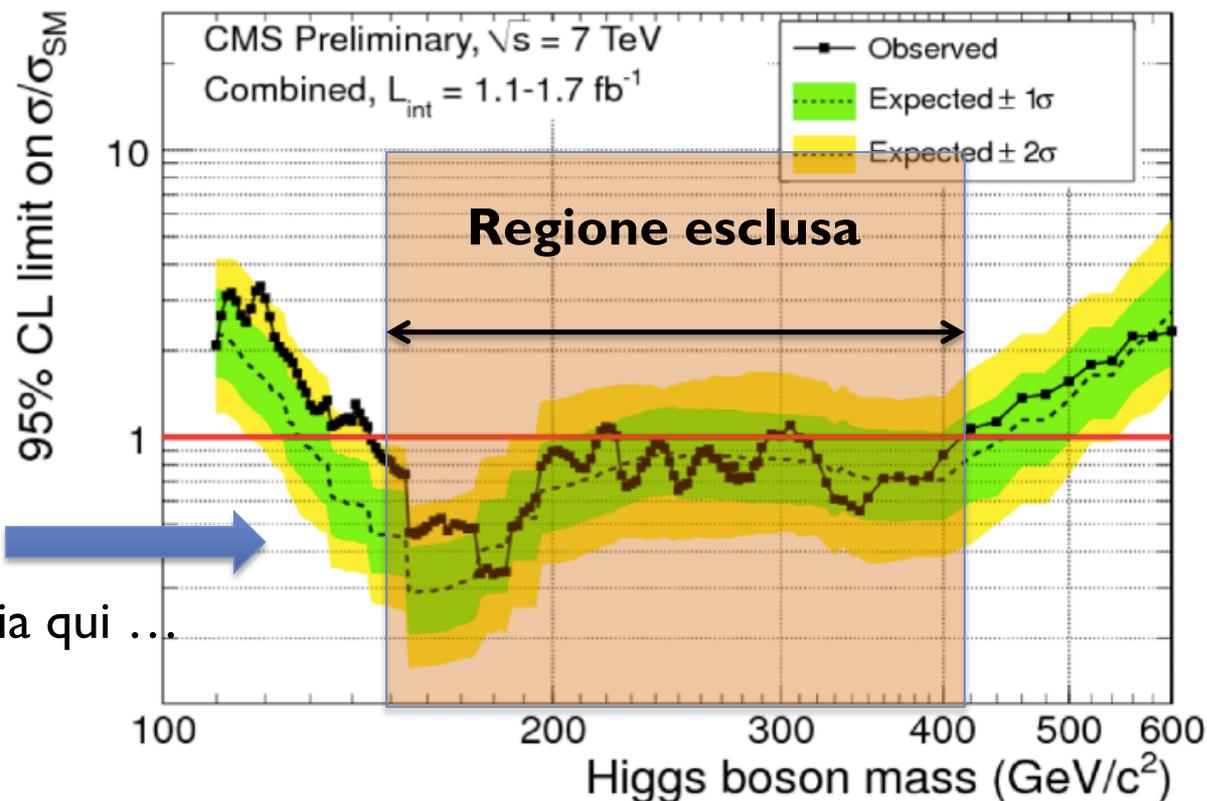
Queste decadono e producono la LSP, insieme alle altre

Energia Mancante



Poiche' nel rivelatore la particella LSP non interagira' e si portera' via una consistente fetta di Energia, l'evento sara' visto proprio per uno sbilanciamento di energia complessiva

# ATLAS & CMS: i risultati – Il Bosone di Higgs



Lo SM ci suggerisce che stia qui ...

**Expected exclusion mass range: 130 – 440 GeV**  
**Observed exclusion mass range: 145-216, 226-288, 310-400 GeV**

→ conclusioni: o e' leggero, o ha massa oltre i 400 GeV.

→ per la fine dell'anno, sommando ATLAS+CMS si dovrebbe saperne di piu'

## ATLAS & CMS: i risultati – La Supersimmetria

- Non vi e' traccia di una Supersimmetria “semplice” e con particelle di “bassa energia”:  $O(200-300 \text{ GeV})$
- Nei modelli minimali, il limite si estende a  $O(1 \text{ TeV})$
- Quindi, ad oggi, non c'e' un candidato per la Materia Oscura identificabile

Le Teorie Supersimmetriche non sono morte (ancora) ma non godono di grande salute ... peraltro non ci sono altre Teorie sufficientemente robuste da spiegare l'attuale Modello Standard (e che superino le SUSY)

TELL THE WORLD THE TRUTH

LHCb e la ricerca dell'antimateria mancante

TOM HANKS  
IS ROBERT LANGDON

# ANGELS & DEMONS

FROM THE AUTHOR OF THE DA VINCI CODE

MAY 15

AngelsAndDemons.com



## Le Simmetrie – La violazione di CP

In Fisica, le simmetrie rivestono un ruolo fondamentale, poiché determinano l'evoluzione dei sistemi. Tutte le volte che si osserva una violazione di una simmetria, la nostra conoscenza aumenta.

In particolare, negli anni '60 si scoprì che le interazioni deboli nei decadimenti del mesone K violavano (in misura minima, circa 1/1000) la Simmetria di CP, che deriva dall'applicazione di 2 trasformazioni:

- Parità [P] - Trasformazione che ribalta gli assi  $(x,y,z) \rightarrow (-x,-y,-z)$  (come ad es. osservata ad uno specchio, ma con ribaltamento sopra/sotto)
- Coniugazione di carica [C] - Trasformazione che inverte la carica  $(q_1,q_2) \rightarrow (-q_1,-q_2)$  (trasforma una particella nella sua antiparticella)



Si pensa che la **violazione di CP** abbia determinato il corso dell'evoluzione dell'Universo poiché il Big-Bang ha prodotto inizialmente un eguale quantità di materia e antimateria.

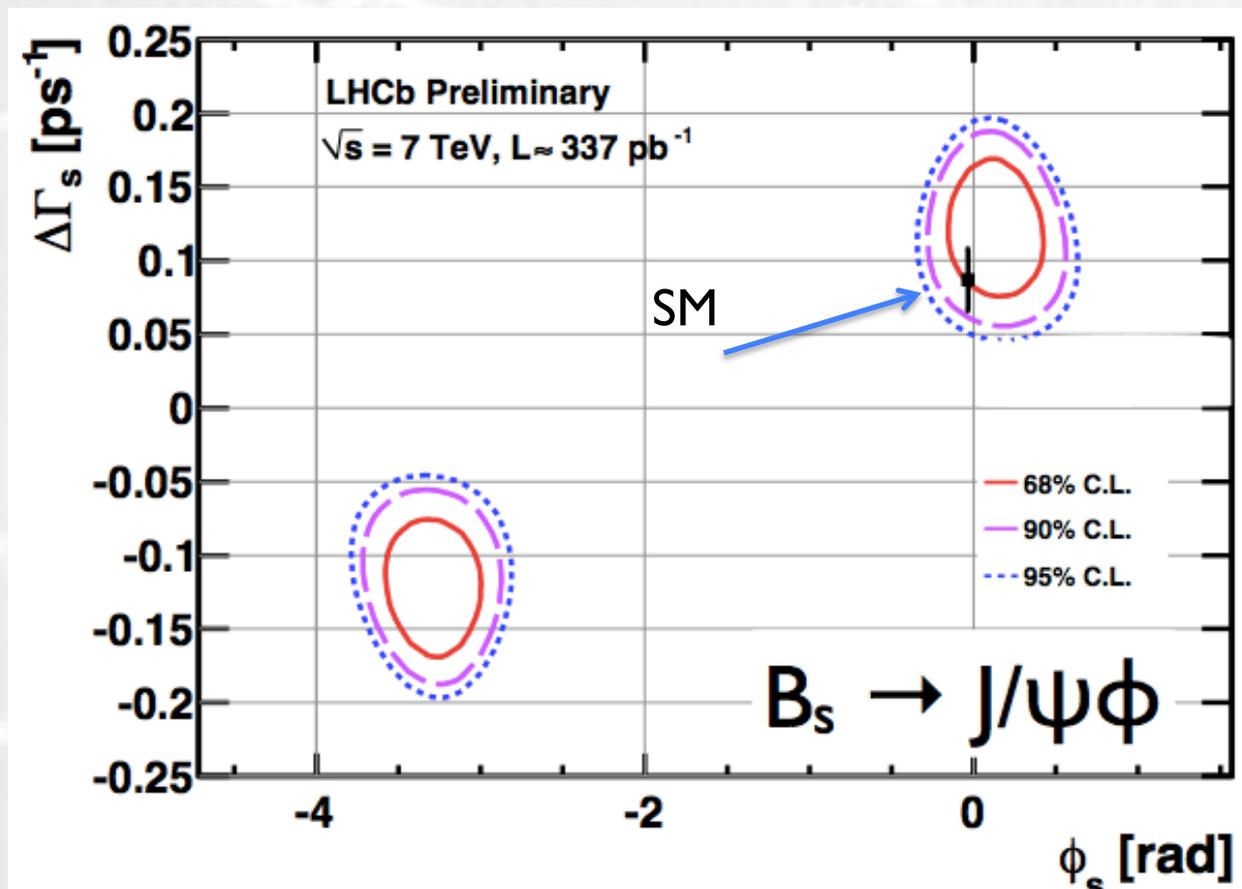
Ma oggi osserviamo una **asimmetria materia-antimateria**: l'Universo è dominato dalla materia.

Il problema (irrisolto) è che la violazione di CP misurata sperimentalmente è troppo piccola da giustificare l'asimmetria osservata. Quindi si va a cercare qualche nuova possibile fonte di violazione di CP (e conseguentemente di Nuova Fisica che oggi ci è ignota)

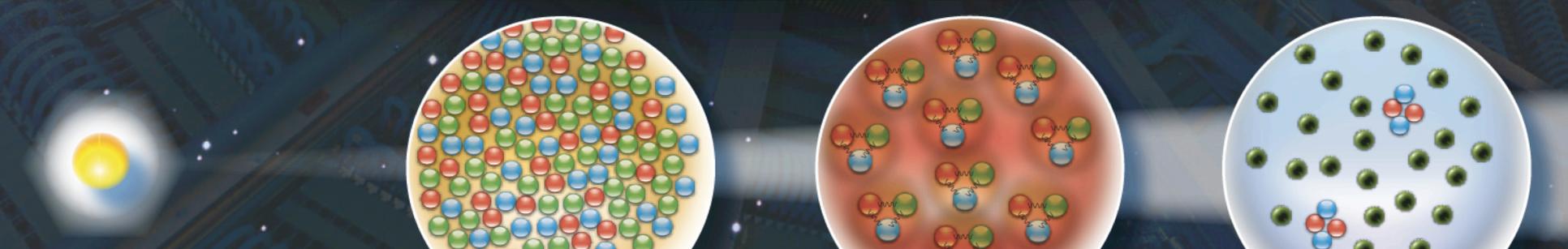
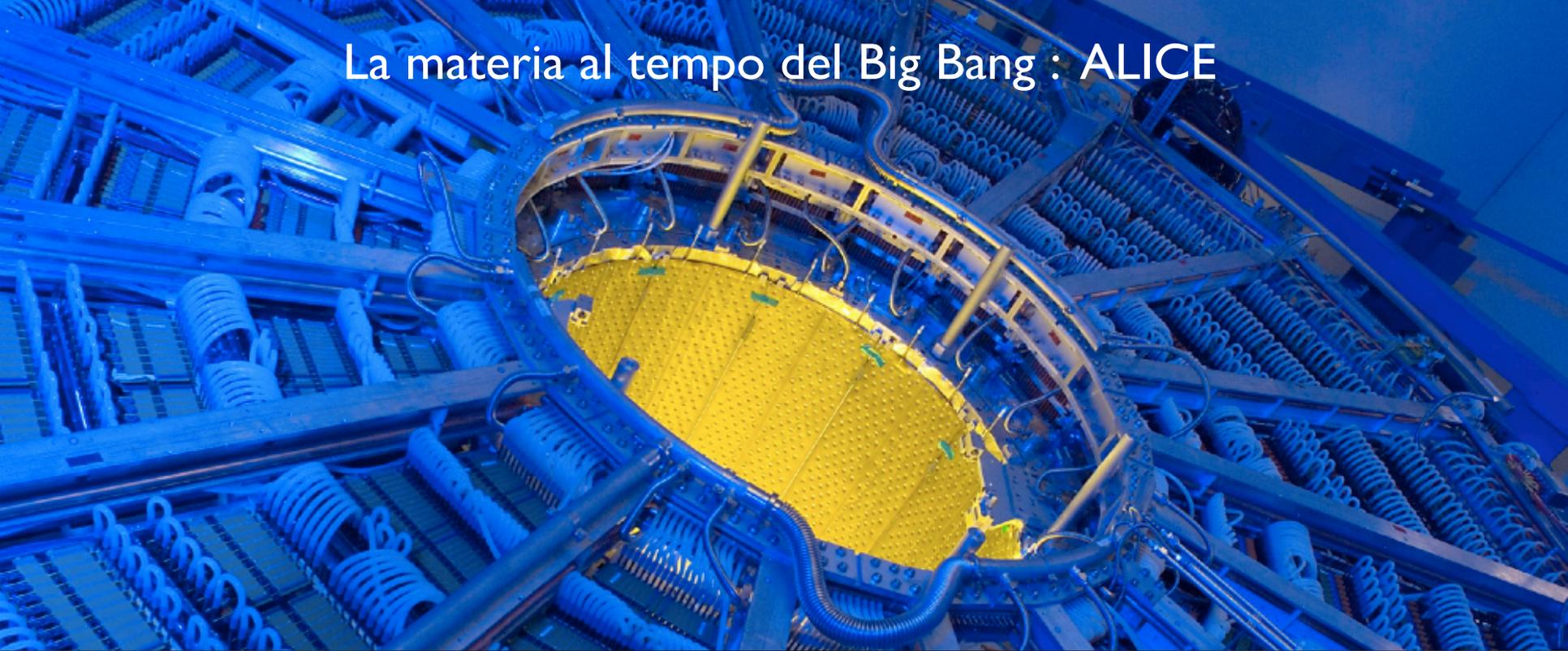


## Come si studia la violazione di CP a LHCb ?

Si studiano i decadimenti dei mesoni B (che contengono un quark b e che sappiamo che violano CP) e si misurano con grande precisione tutti i parametri del decadimento e si confrontano con le aspettative dello Standard Model, sperando di trovare qualcosa di anomalo... → FISICA DI PRECISIONE



# La materia al tempo del Big Bang : ALICE



Big Bang

Temperatura  
Tempo

Plasma di Quark  
e Gluoni

$< 10^{-5}$  s

Formazione di protoni  
& neutroni

$2 \times 10^{12}$  K  
 $4 \times 10^{-5}$  s

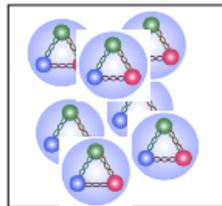
Formazione di nuclei  
a basso numero atomico

$5 \times 10^8$  K  
3 min

Fino a circa un centomillesimo di secondo dal Big Bang ( $10^{-37} - 10^{-5}$  s) l'Universo era formato da una "zuppa" di quark e gluoni ... il Quark Gluon Plasma (QGP)

Come costruire una tale "zuppa" dove le forze di attrazione nucleare tra i quarks sono ridotte al minimo e i quarks possono essere considerati "liberi" ?

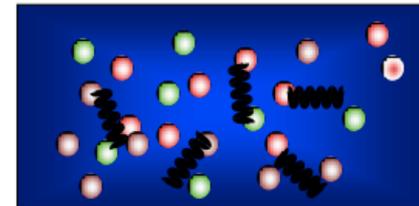
**Bisogna creare un sistema che abbia una densità enorme (ptc a distanza infinitesima) tale da rendere trascurabile l'interazione forte**



**adroni**

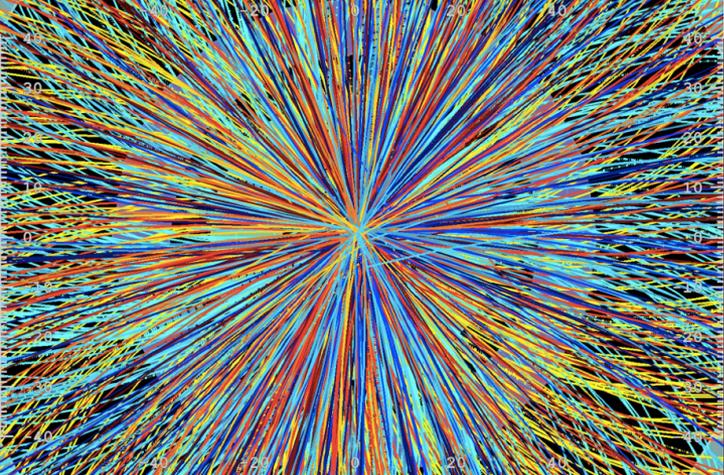


**ENERGIA**

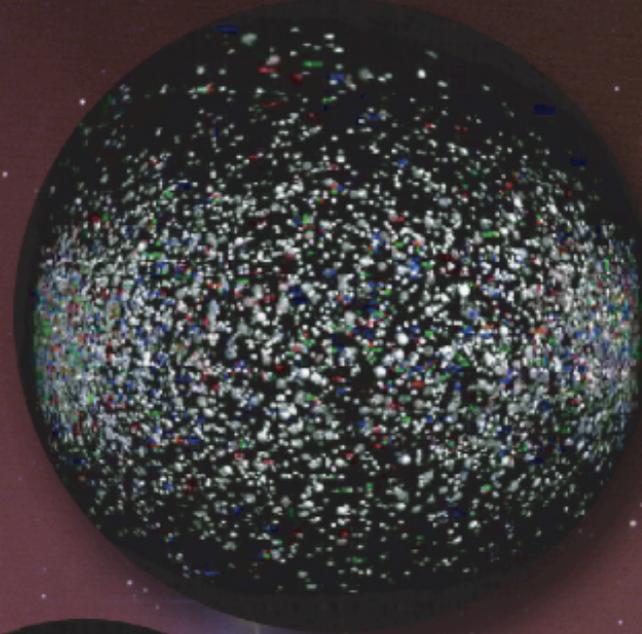


**Quark Gluon Plasma**

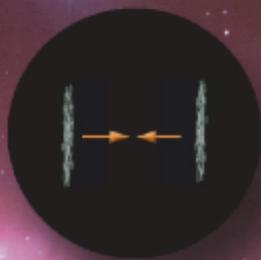
Tale condizione viene realizzata in ALICE facendo scontrare due ioni di Pb (con  $2 \times 208$  nucleoni con 2.8 TeV/nucleone) e studiando la Fisica delle Particelle in questo Laboratorio molto particolare



Le migliaia di particelle create nella collisione si muovono verso i sistemi di rivelazione.  
(Simulazione: H. Weber, UrQMD, Francoforte).



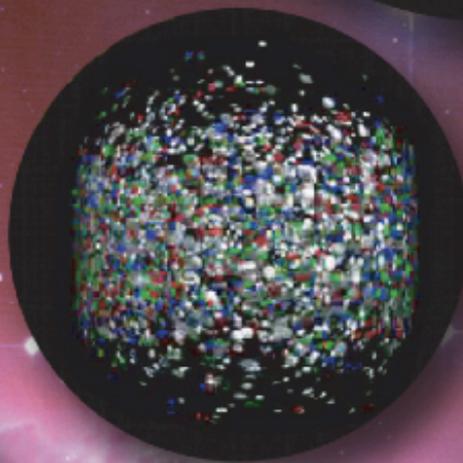
Due nuclei si avvicinano ad una velocità prossima a quella della luce (secondo la teoria della relatività di Einstein appaiono come dischi assottigliati).



I nuclei si scontrano. La temperatura estrema generata nella collisione permette di rilasciare i quark (qui colorati in rosso, blu e verdi) e i gluoni.



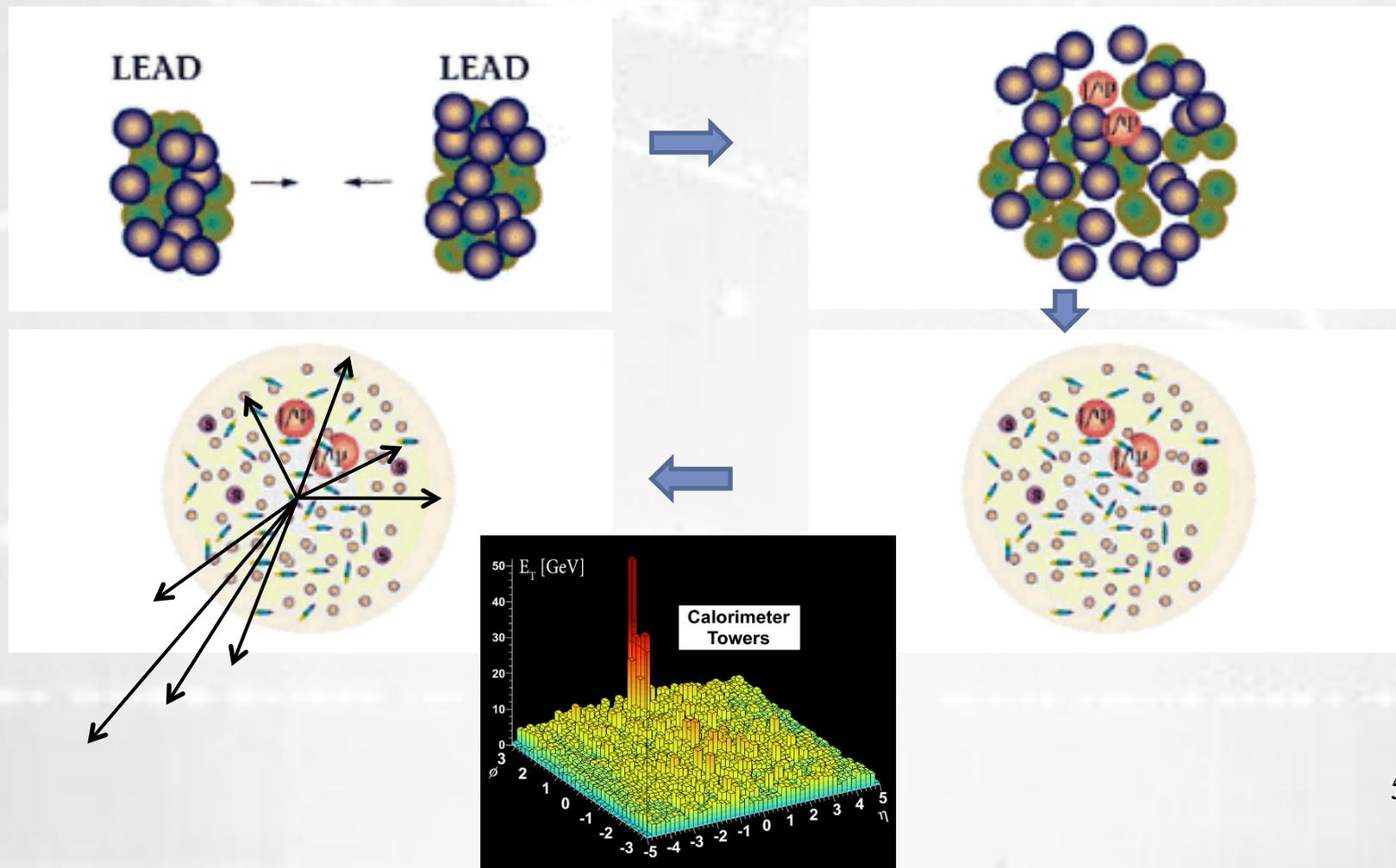
I quark e i gluoni cominciano a urtare fra loro, dando origine ad un sistema in equilibrio termico: il Plasma di Quark e Gluoni.



Il plasma si espande e si raffredda fino alla temperatura ( $\sim 2 \times 10^{12}$  gradi) alla quale i quark e i gluoni si ricombinano a formare materia ordinaria, in un tempo dell'ordine di  $10^{-23}$  secondi dall'inizio della collisione.

**Qualche cosa di interessante, anche se non del tutto inatteso, pero' si vede ...**

Alle energie di LHC la materia nucleare che si genera nelle collisioni Pb-Pb e' cosi' densa (e mai lo e' stata prima d'ora) che tende ad oscurare il passaggio delle particelle (il "quenching effect", proprio come avvenne nei primi attimi del BIG BANG)



## Prospettive future e conclusioni

LHC ha davanti a se ancora molti anni di presa dati: 2012 e poi, dopo due anni di fermata per raddoppiare l'energia, 2015-16-17

Ancora molti dati da prendere e forse nuove cose da scoprire

Certamente la visione di un “**Nuovo Mondo dietro l'angolo**” sta svanendo (la realta' appare piu' complessa)

Anche la “**particella di Dio**” e' elusiva: si potrebbe nascondere a bassa massa (120 GeV), ma se cio' e' vero, si sapra' alla fine del 2012.

Se l'Higgs non fosse trovato, **SAREBBE UNA GRANDE SCOPERTA** (ma porrebbe dei problemi teorici ancora piu' grandi)

L'asimmetria materia antimateria resta un mistero (per ora), ma e' presto per tirare delle conclusioni ...

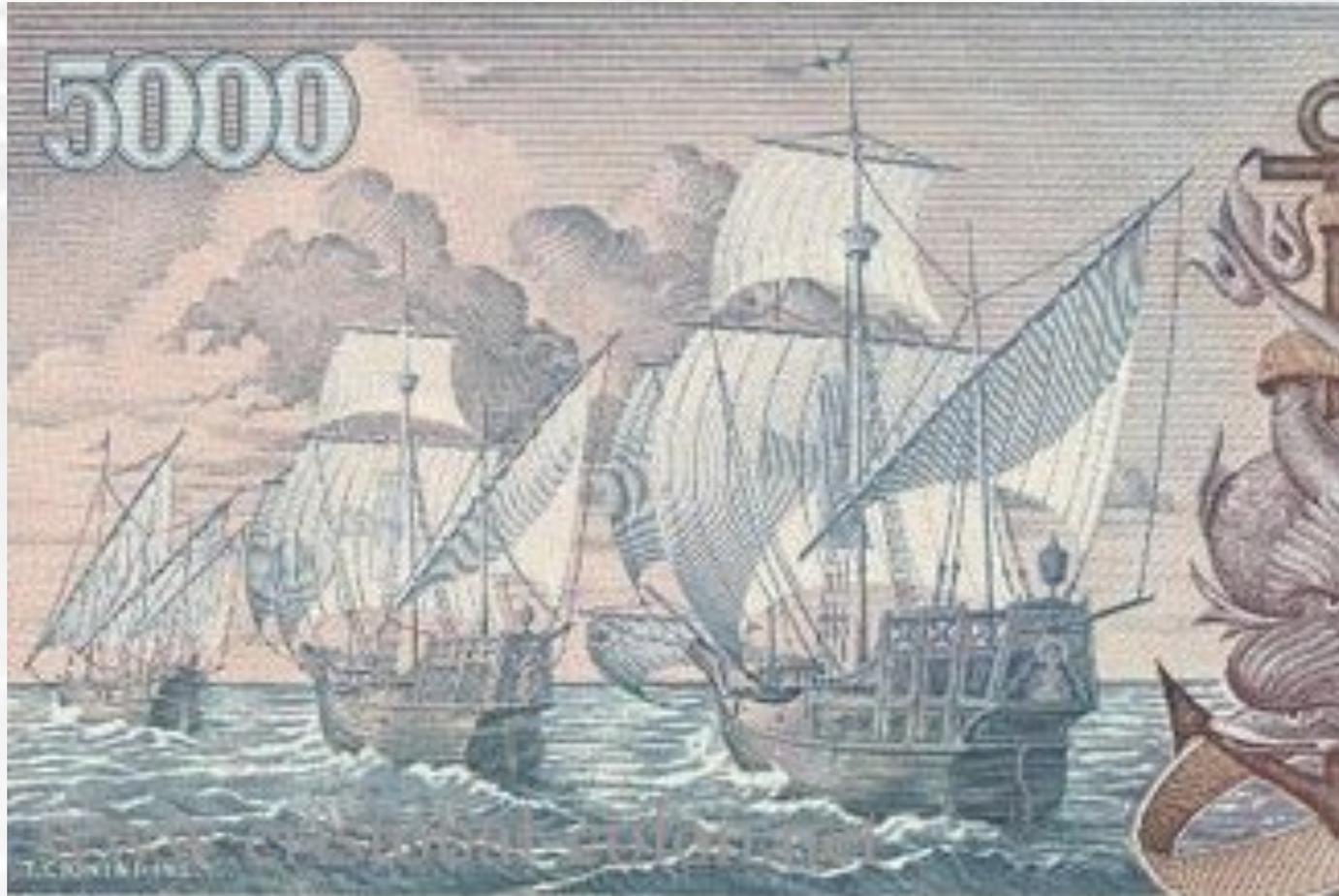
non ci sentiamo in questi panni ...



search ID: rde0780

" No, I haven't found the elusive *Higgs boson* yet. "

... preferiamo pensare di essere usciti dallo Stretto di Gibilterra  
e di far vela verso le Indie ...

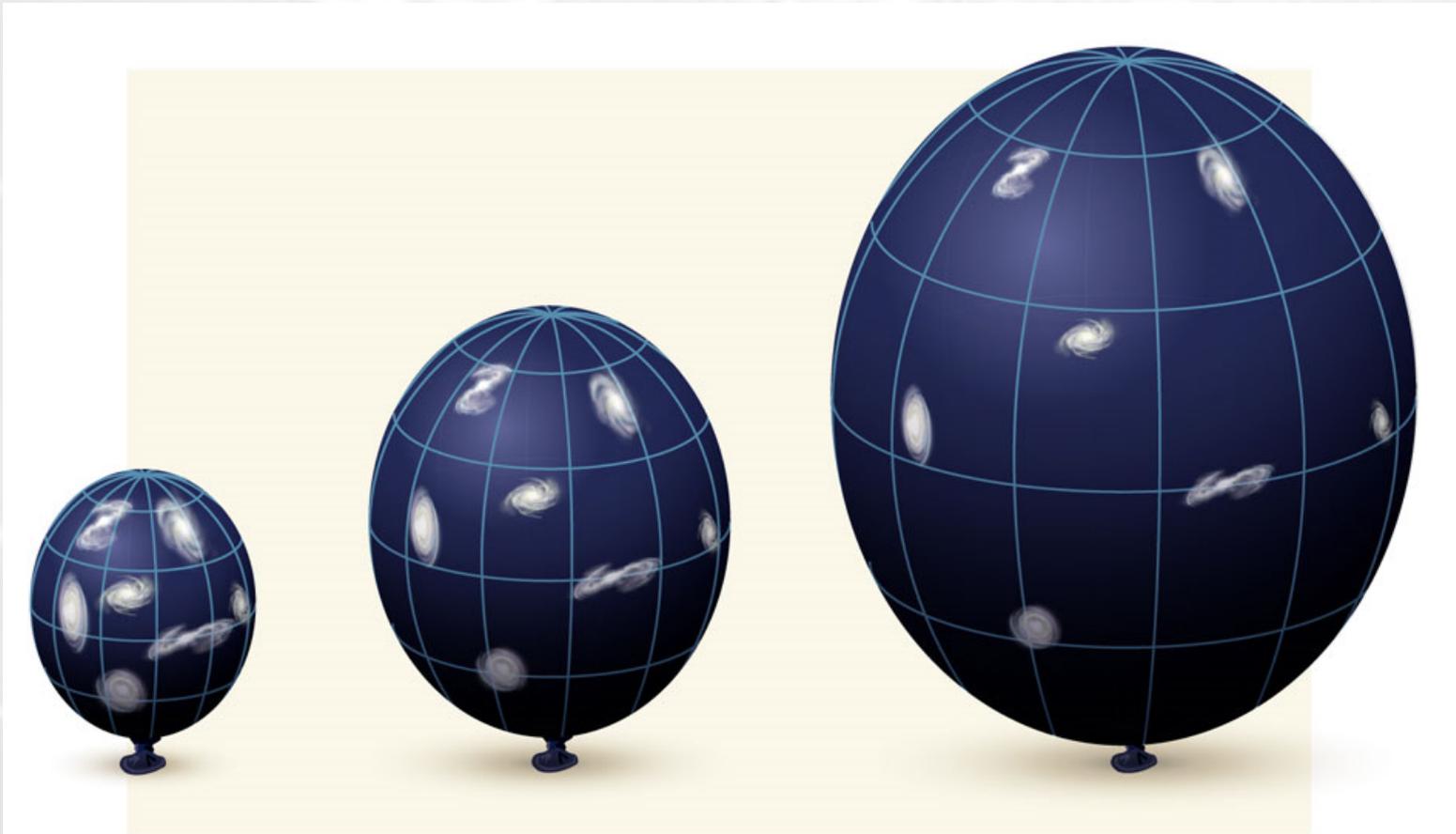




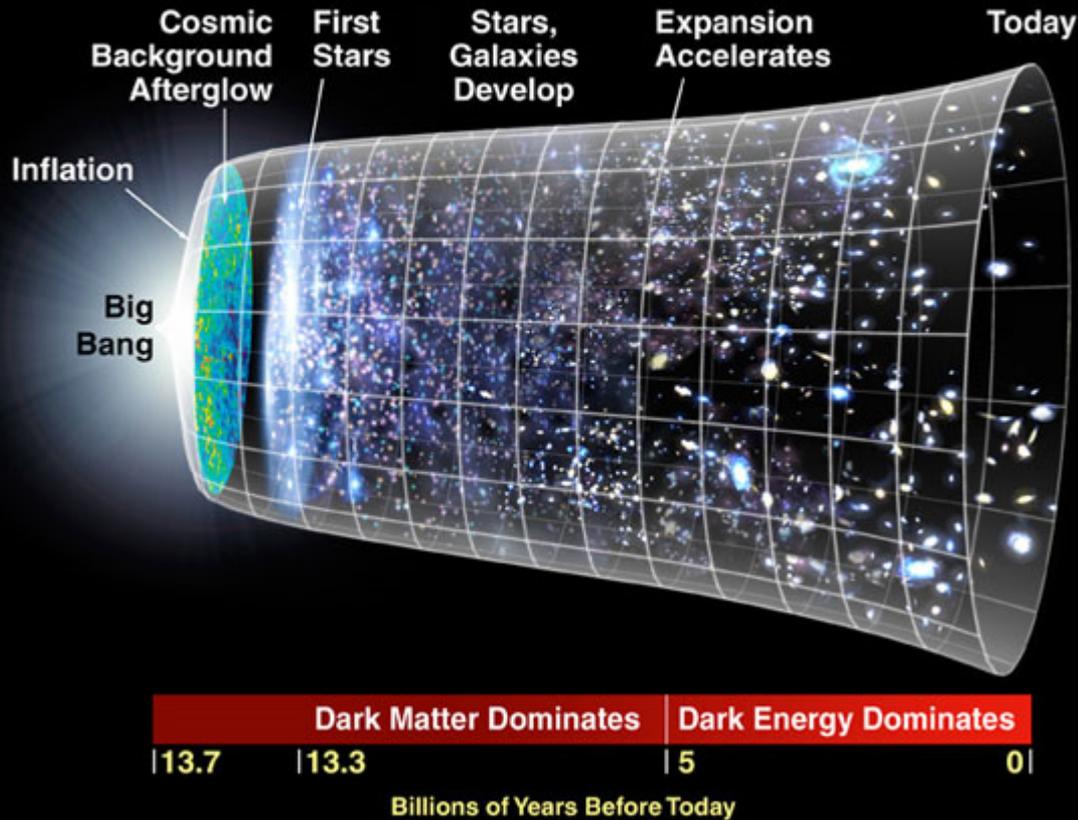
# Una questione piu “oscura” della Materia Oscura: l’Energia Oscura



Nel 1998 un gruppo di ricercatori americani, studiando le distanze tra le Supernovae molto lontane si e' accorto che – contrariamente a quanto si pensava dalla teoria di Einstein in poi – l'Universo e' in espansione e sta accelerando, sotto la spinta di una forza repulsiva ingente e sconosciuta (“Energia Oscura”).



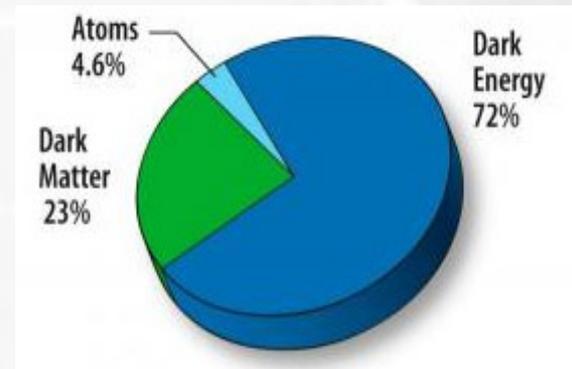
## THE EXPANDING UNIVERSE: A CAPSULE HISTORY



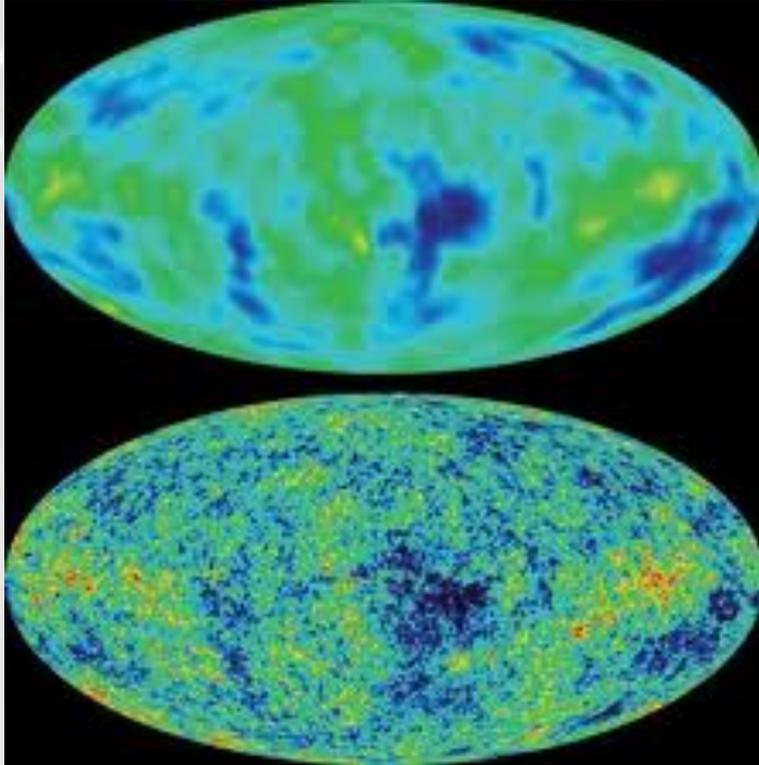
Dalle misure si deduce che:

- la materia oscura rappresenta circa il 20% della materia esistente
- l'energia oscura rappresenta oltre il 70% della materia dell'Universo

Sino ad oggi non si sa quale siano l'origine e le caratteristiche di questa forza misteriosa che si oppone alla gravitazione e allontana tra loro le Galassie



## Einstein e la Costante Cosmologica $\Lambda$



Anche altre misure, *quali quelle sulla distribuzione della radiazione di fondo a 2.7 K e lo studio dei Cluster a grande scala*, confermano che il nostro Universo sta accelerando nella sua espansione

Nel 1917, Einstein aveva predetto che, ipotizzando un Universo statico, era necessario introdurre “ad hoc” una forza repulsiva (Costante Cosmologica) che controbilanciasse l’attrazione gravitazionale

Nel 1929 Hubble scoprì che le Galassie si stanno allontanando (metodo del red shift) e quindi Einstein abbandonò l’ipotesi della costante cosmologica, definendola come “una delle sue peggiori sciocchezze” !

Oggi non si sa dare una spiegazione coerente. Vi sono molte ipotesi.

Una suggestiva è quella per la quale  $\Lambda$  potrebbe essere causata dalle fluttuazioni del vuoto (un fenomeno tipicamente quantistico) che potrebbero “generare” un’energia non nulla nello spazio. Il problema è che la stima differisce per 120 ordini di grandezza...<sup>61</sup>