



# La Fisica al Large Hadron Collider

## e i primi risultati

Luca Lista  
*INFN - Napoli*  
CMS

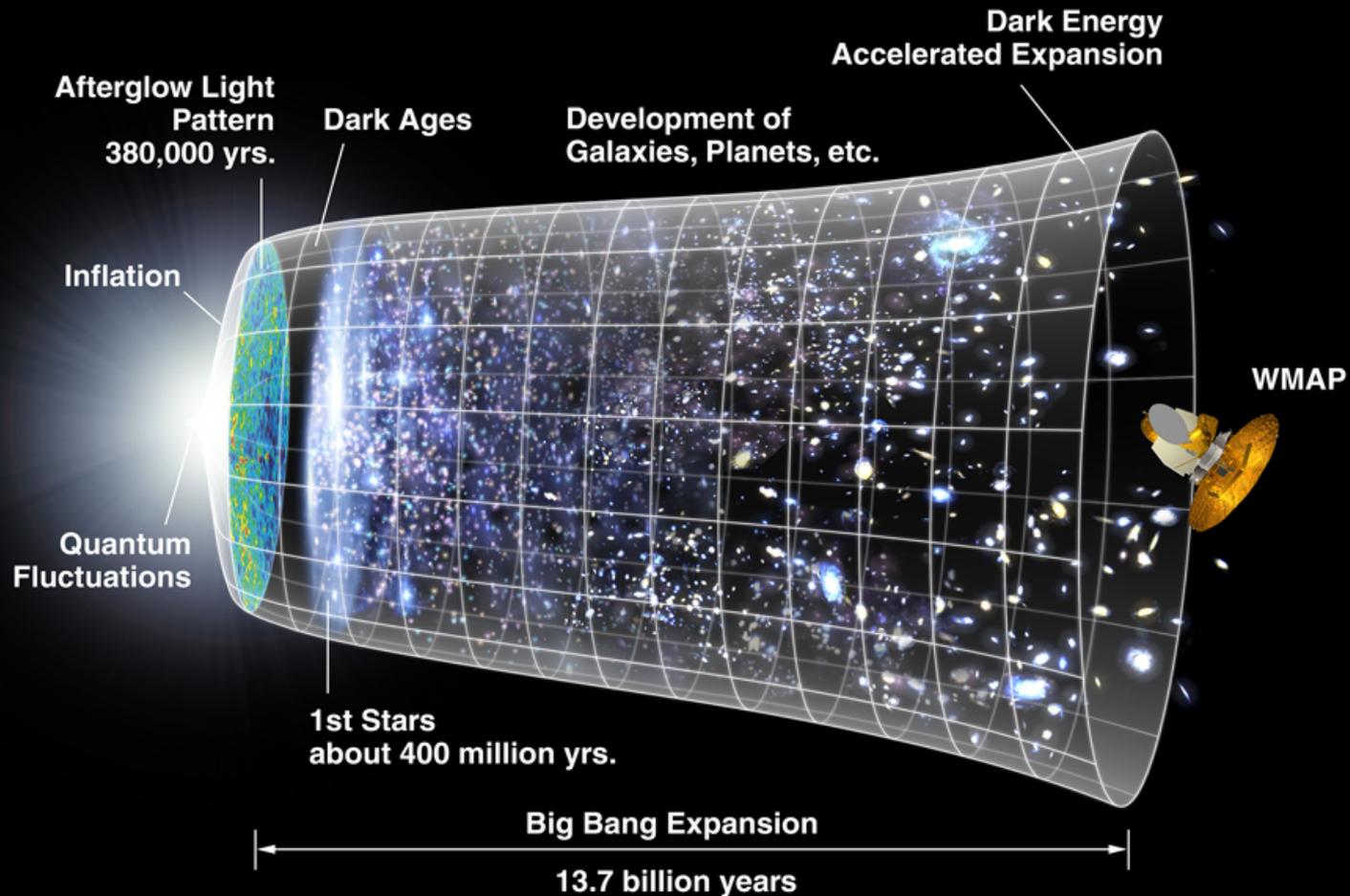
# Il Large Hadron Collider

- LHC è il più grande esperimento scientifico mai costruito dall'uomo
- Realizzato da oltre 10000 fisici e ingegneri di 85 diversi paesi, ha richiesto decenni per la sua realizzazione
- Accelera protoni a 0.99999999 volte la velocità della luce che si scontrano 11000 volte al secondo in una galleria sotterranea lunga 27 km

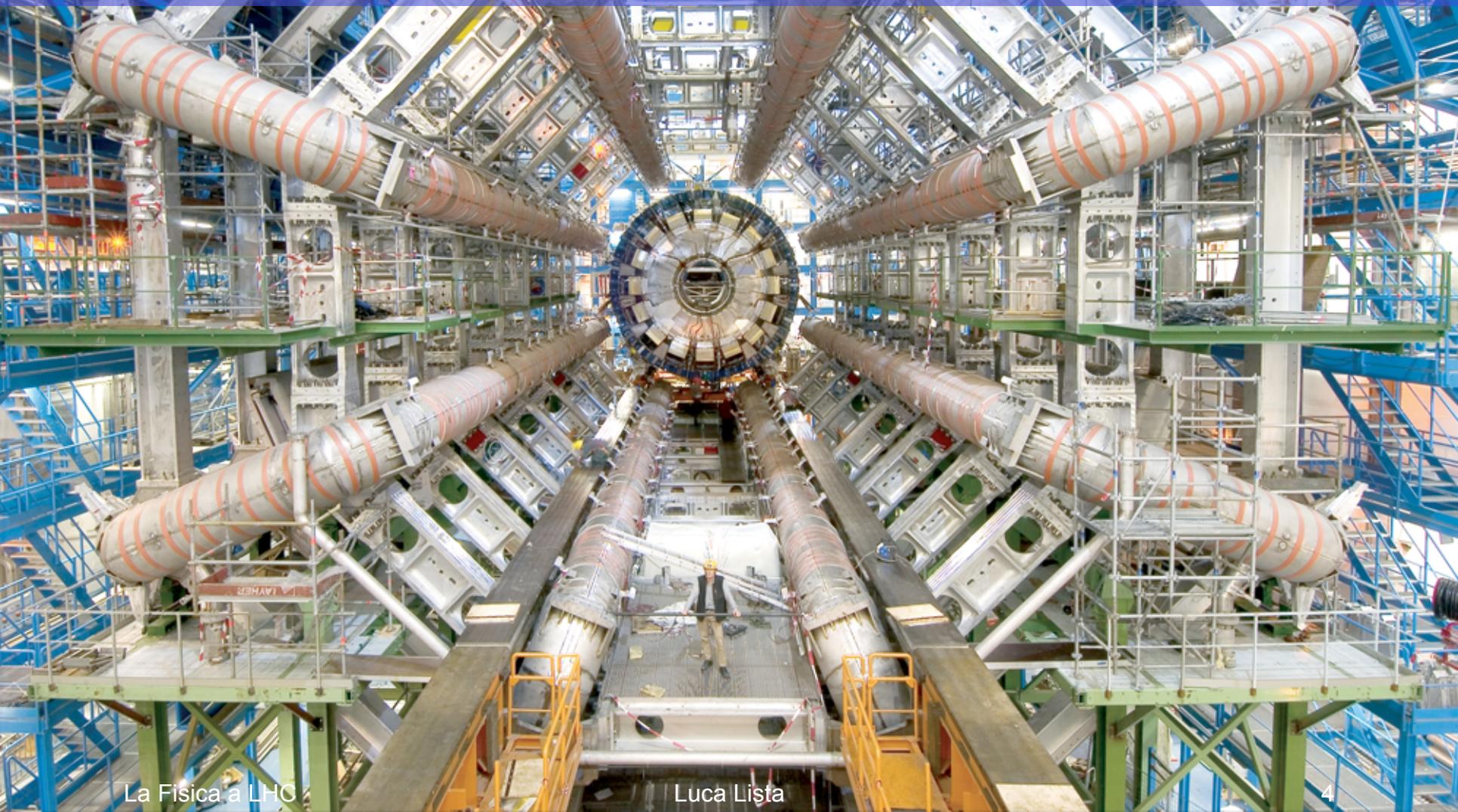


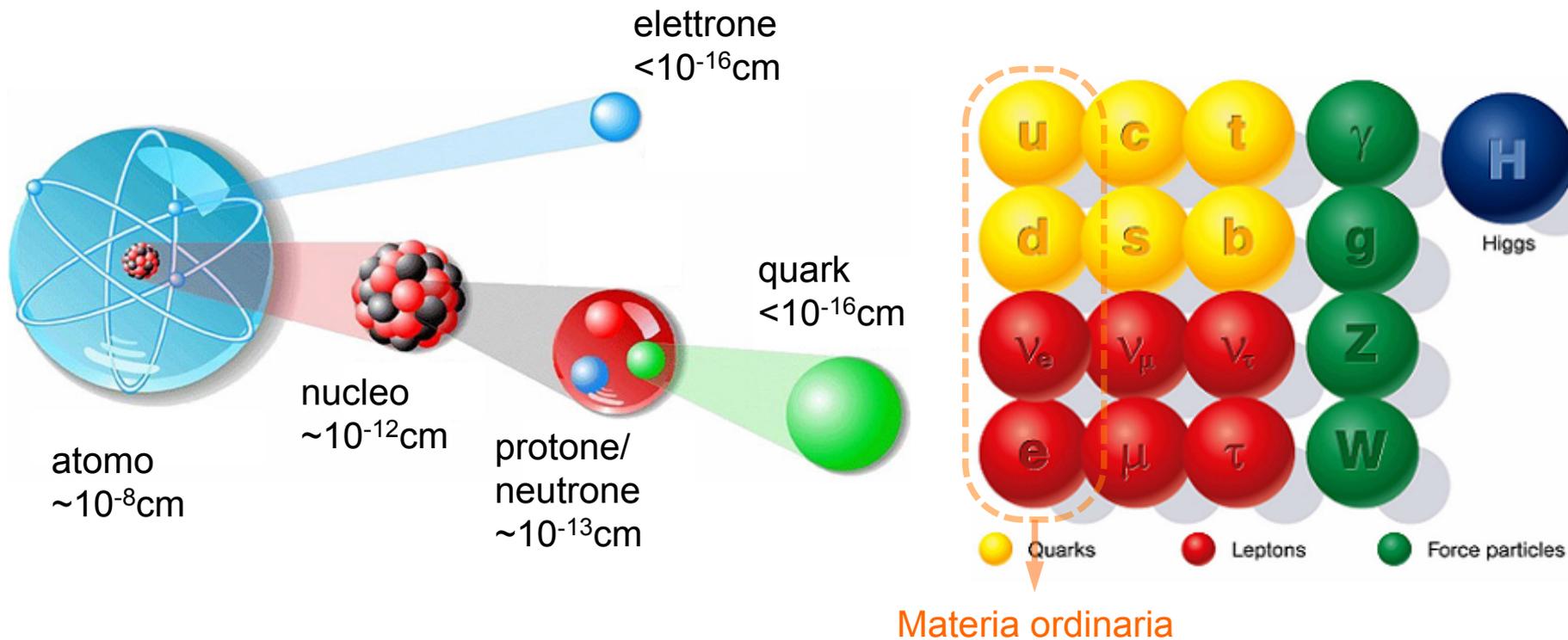
# Obiettivi di LHC

Riprodurre le condizioni dell'universo  $10^{-6}$  secondi dopo il big-bang per studiare fenomeni fisici mai osservati



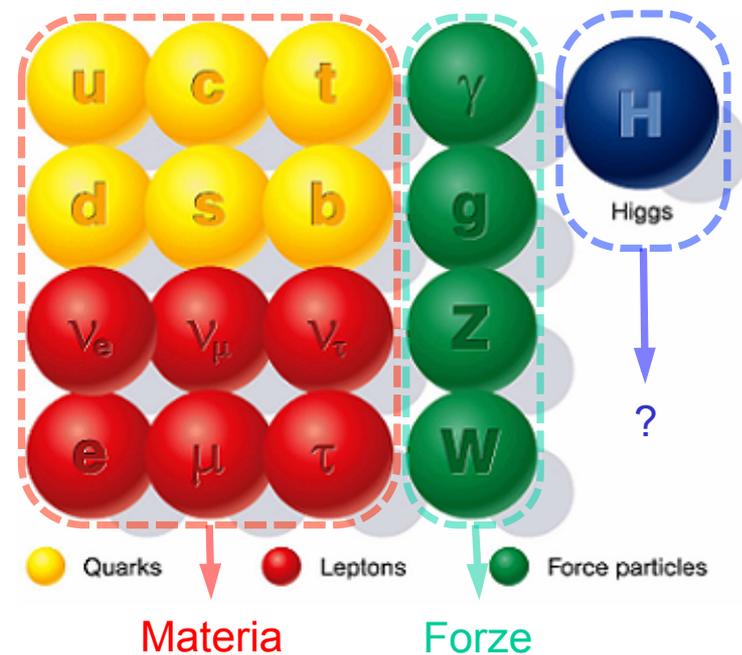
- Quattro esperimenti giganteschi funzionano come enormi macchine fotografiche le collisioni: ATLAS, CMS, LHCb, ALICE



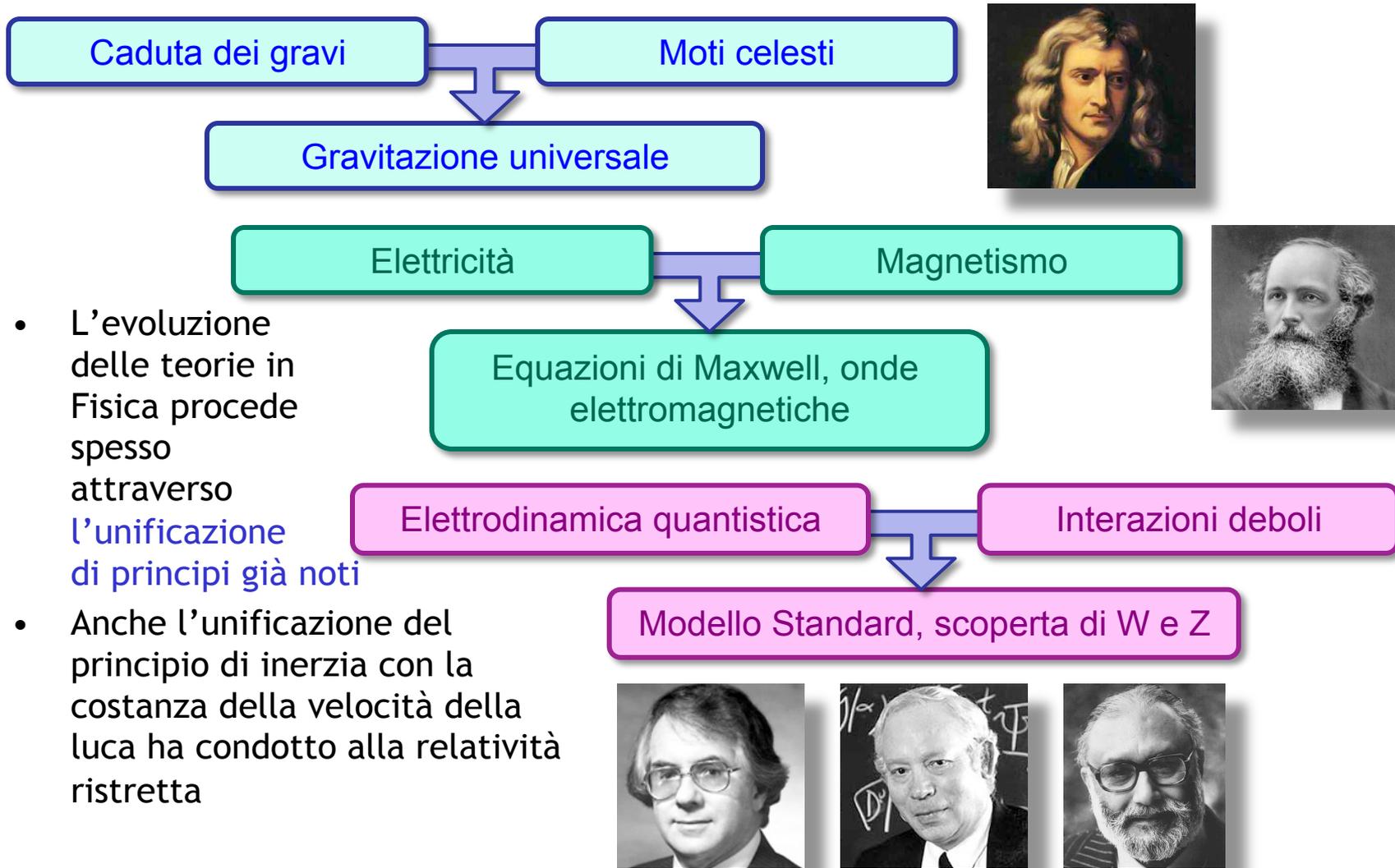


- La materia ordinaria è fatta da **elettroni** e **quark** (up, down)
- I decadimenti nucleari possono produrre **neutrini**
  - Moltissimi neutrini provengono dal Sole e ci stanno attraversando
- Esistono altre particelle simili a queste ma più **pesanti**
  - Ad esempio: i raggi cosmici contengono moltissimi **muoni**

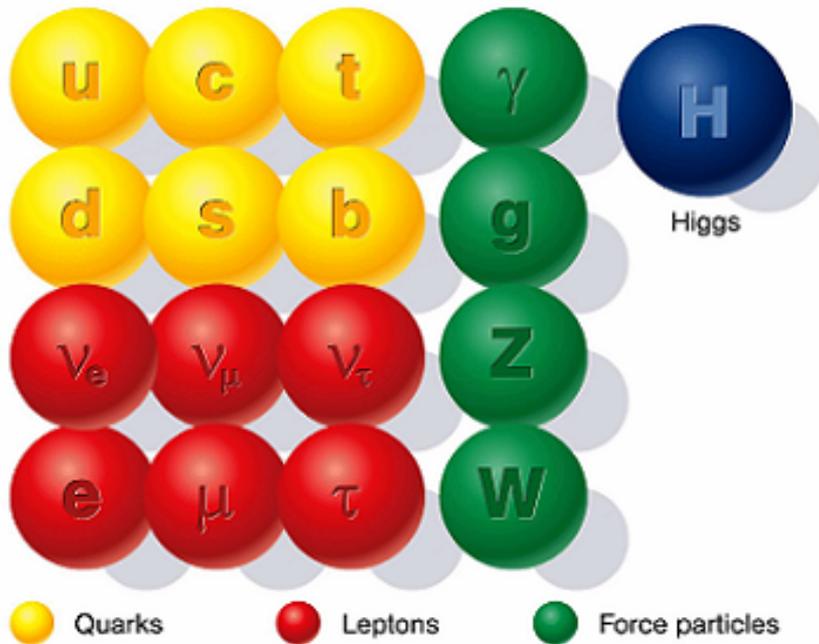
- È un **modello matematico** che descrive:
  - Le particelle che costituiscono tutta la materia che conosciamo
  - Le loro interazioni (= forze) fondamentali
- È un esempio di **unificazione** delle interazioni fondamentali
- **Non descrive tutti i fenomeni che conosciamo**
  - Es.: **gravità, materia oscura**



- **Non sono state confermate tutte le sue previsioni**
  - Il **bosone di Higgs** non è ancora stato scoperto



- L'evoluzione delle teorie in Fisica procede spesso attraverso l'unificazione di principi già noti
- Anche l'unificazione del principio di inerzia con la costanza della velocità della luce ha condotto alla relatività ristretta

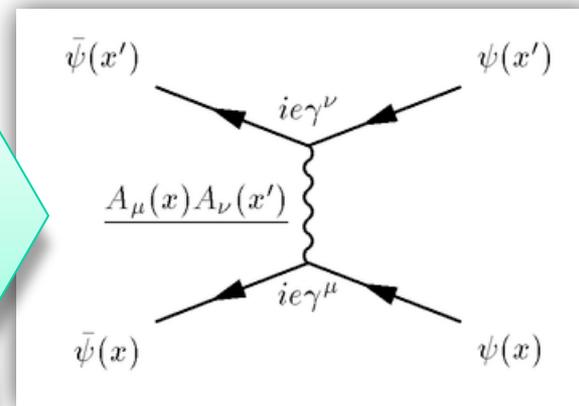


Per ogni particella esiste una corrispondente **antiparticella** con proprietà opposte (carica, ...):  
l'antimateria

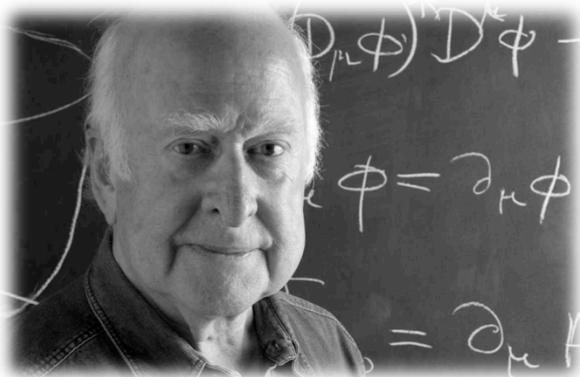
- Dall'energia iniziale del Big-bang sono state prodotte **coppie particella-antiparticella**
- Che come è scomparsa l'antimateria dell'universo primordiale?
  - Un esperimento dedicato ad LHC: **LHC-b**
- L'esistenza di **tre "famiglie"** è necessaria per spiegare perché l'antimateria è "diversa" dalla materia

- Matematicamente si definisce una funzione, detta **lagrangiana**, alla quale corrispondono i **diagrammi di Feynman** possibili e le regole per il loro calcolo
- Ma è necessario un nuovo ingrediente per rendere la teoria consistente

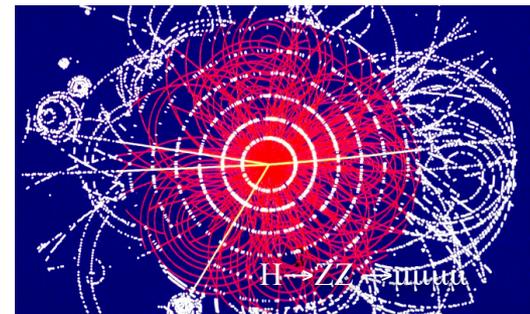
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - e Q_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
 & -\frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
 & -\frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
 & -ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
 & -\frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
 & -\frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
 & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
 \end{aligned}$$



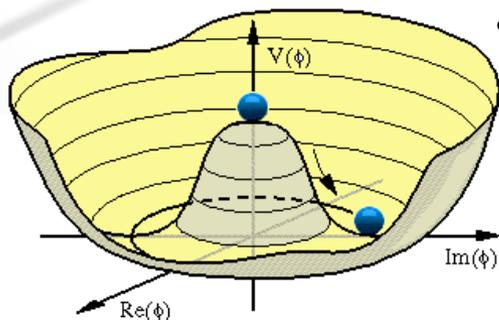
Higgs ?



- Il meccanismo di **rottura spontanea della simmetria**, preso a prestito dalla struttura della materia, spiega la presenza di particelle che hanno massa
- La simmetria è in realtà “**nascosta**” da un nuovo campo, **il campo di Higgs**, che, a differenza degli altri campi, non ha valore nullo nel vuoto



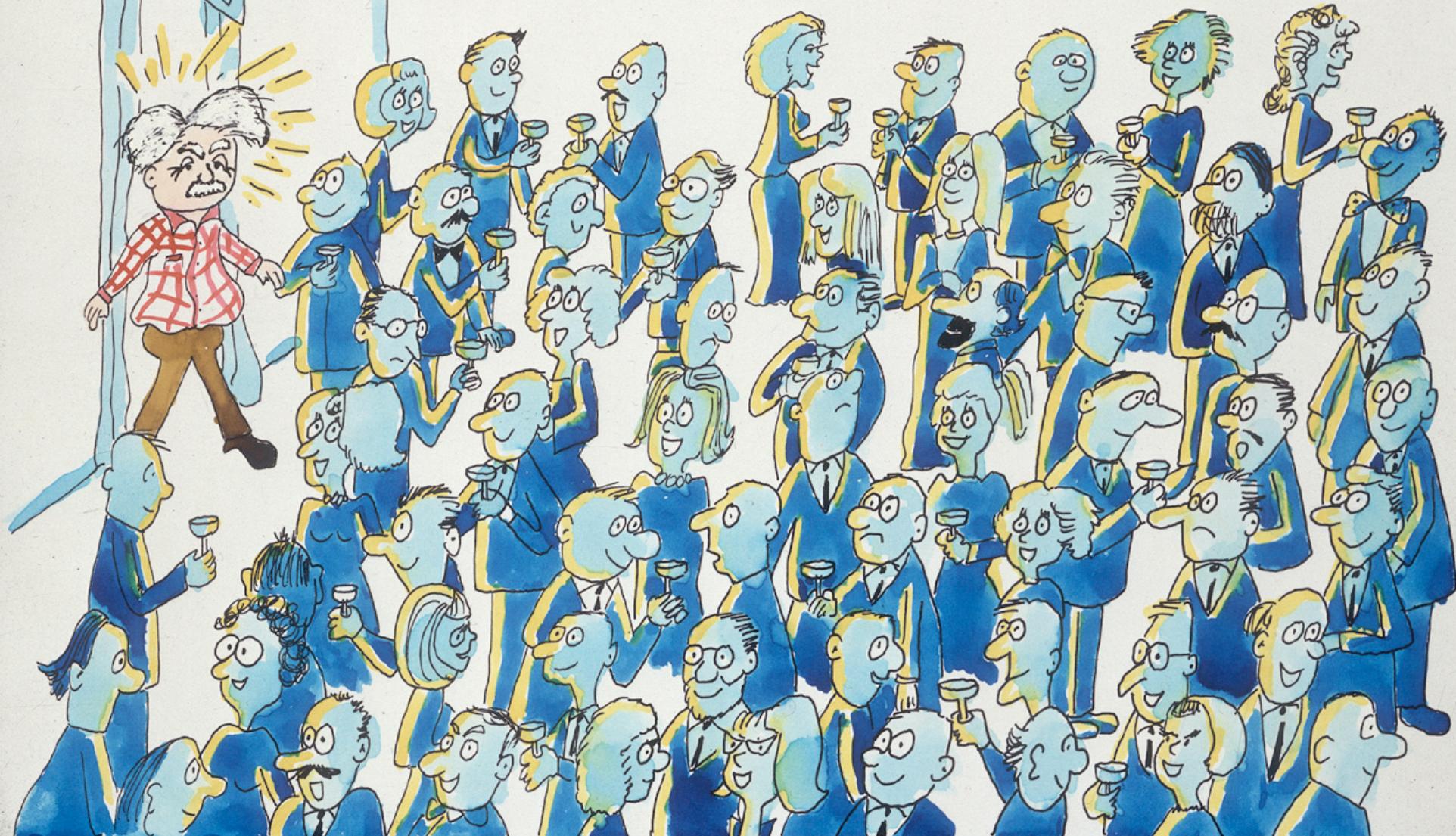
- Esistono **diversi stati di vuoto possibili**, tutti con uguale valore medio del campo di Higgs. La natura ne ha scelto uno dei possibili
  - L’interazione delle particelle con il campo di Higgs, anche nel vuoto, genera la loro **massa** che è tanto maggiore quanto più grande è la loro interazione
  - Come effetto collaterale, il campo di Higgs si manifesta con una nuova particella: il **bosone di Higgs**, fino ad ora cercato ma mai osservato



Una sala piena di fisici che chiacchierano: lo spazio vuoto permeato dal campo di Higgs



Uno scienziato famoso attraversa la stanza e suscita l'interesse e l'attenzione dei fisici presenti che si avvicinano



L'interazione aumenta la resistenza al suo moto, quanto più il personaggio è famoso: acquisisce "massa" come una particella nel campo di Higgs



Anche un "rumor" può attraversare la sala



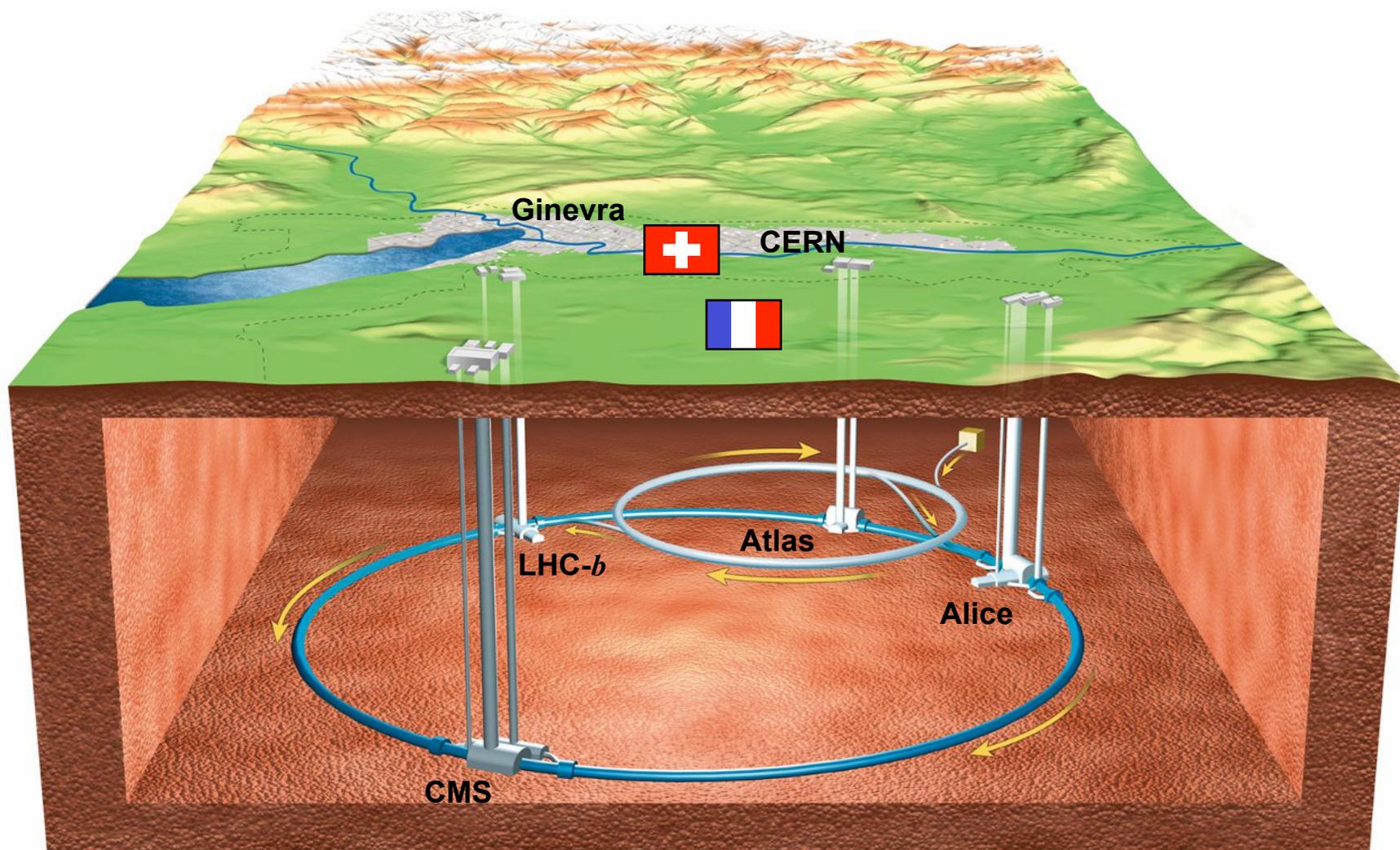
... e causa raggruppamenti di fisici: le particelle di Higgs



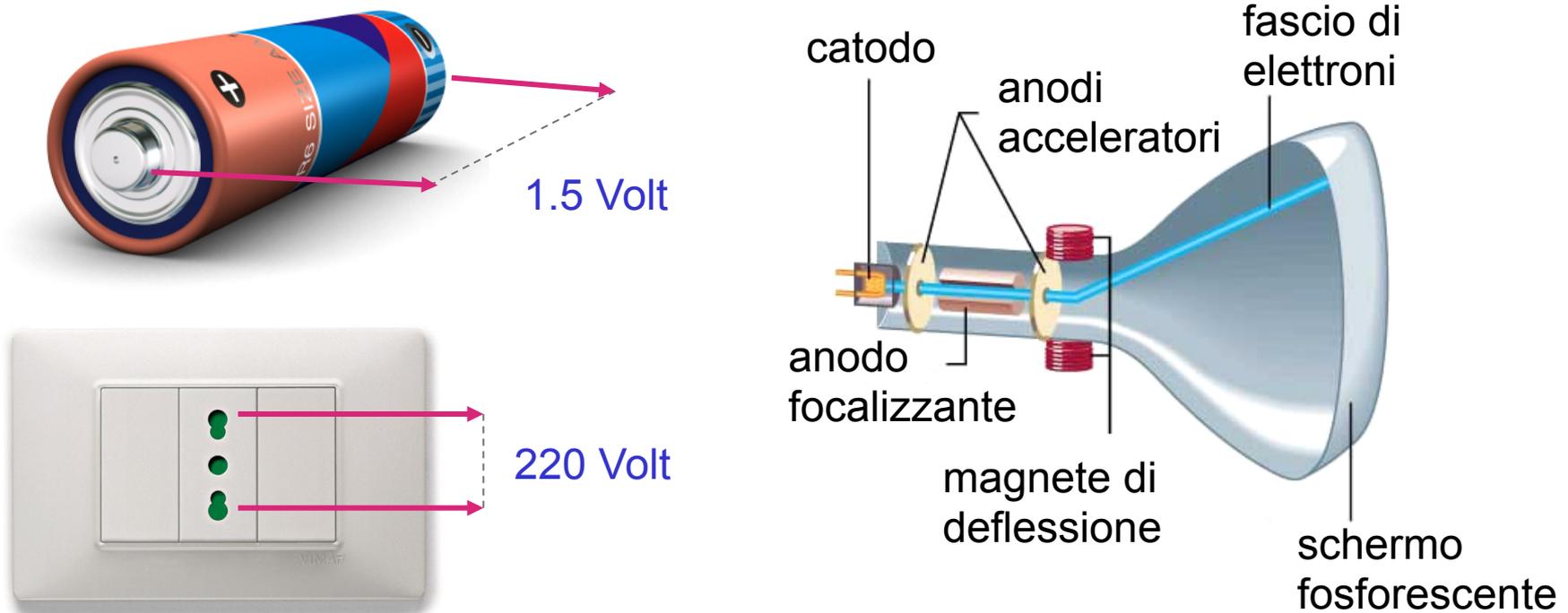
... ed ecco come spiegarlo ad un politico!



# Il Large Hadron Collider

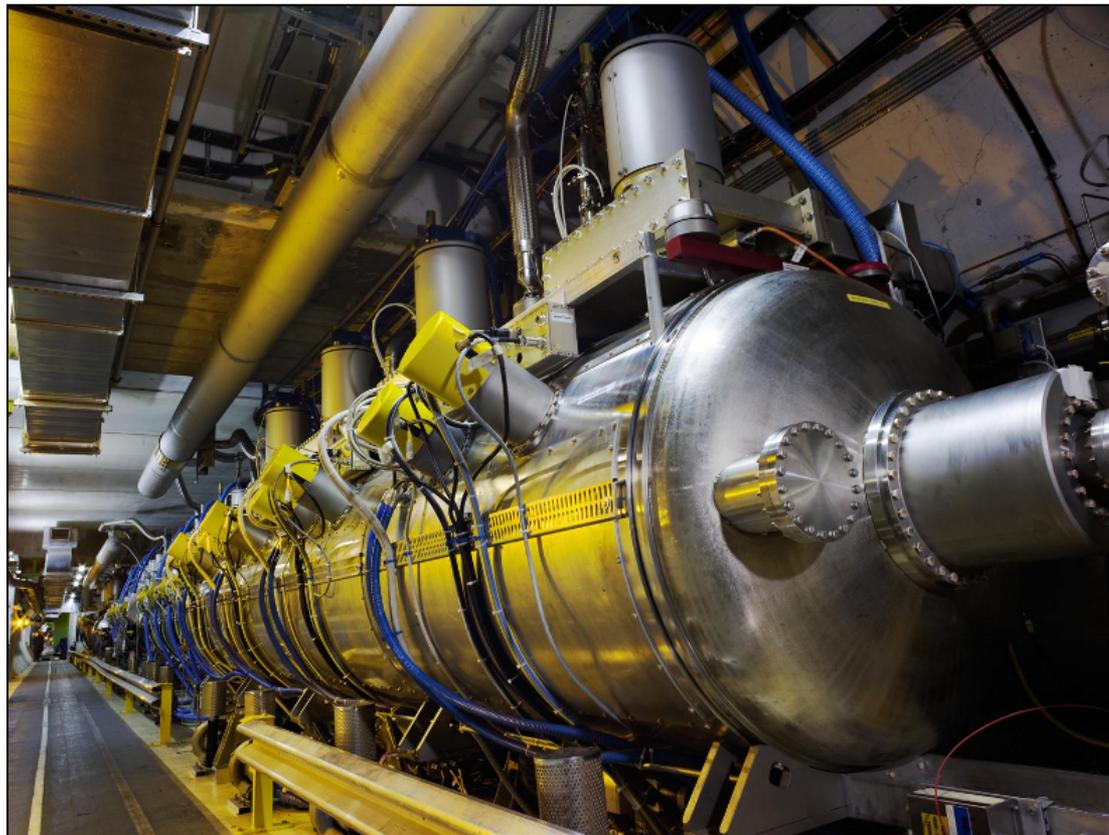
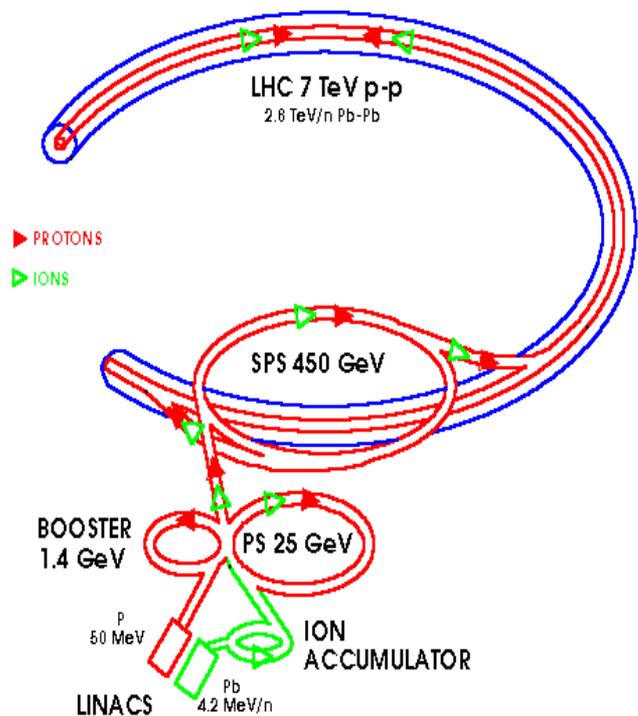


- Anche un (vecchio ...) televisore a CRT è un acceleratore



- I protoni in LHC collidono ad un'energia di  $\sim 20000 \text{ Volt}$   $14 \text{ TeV} = 14 \times 10^{12} \text{ eV}$

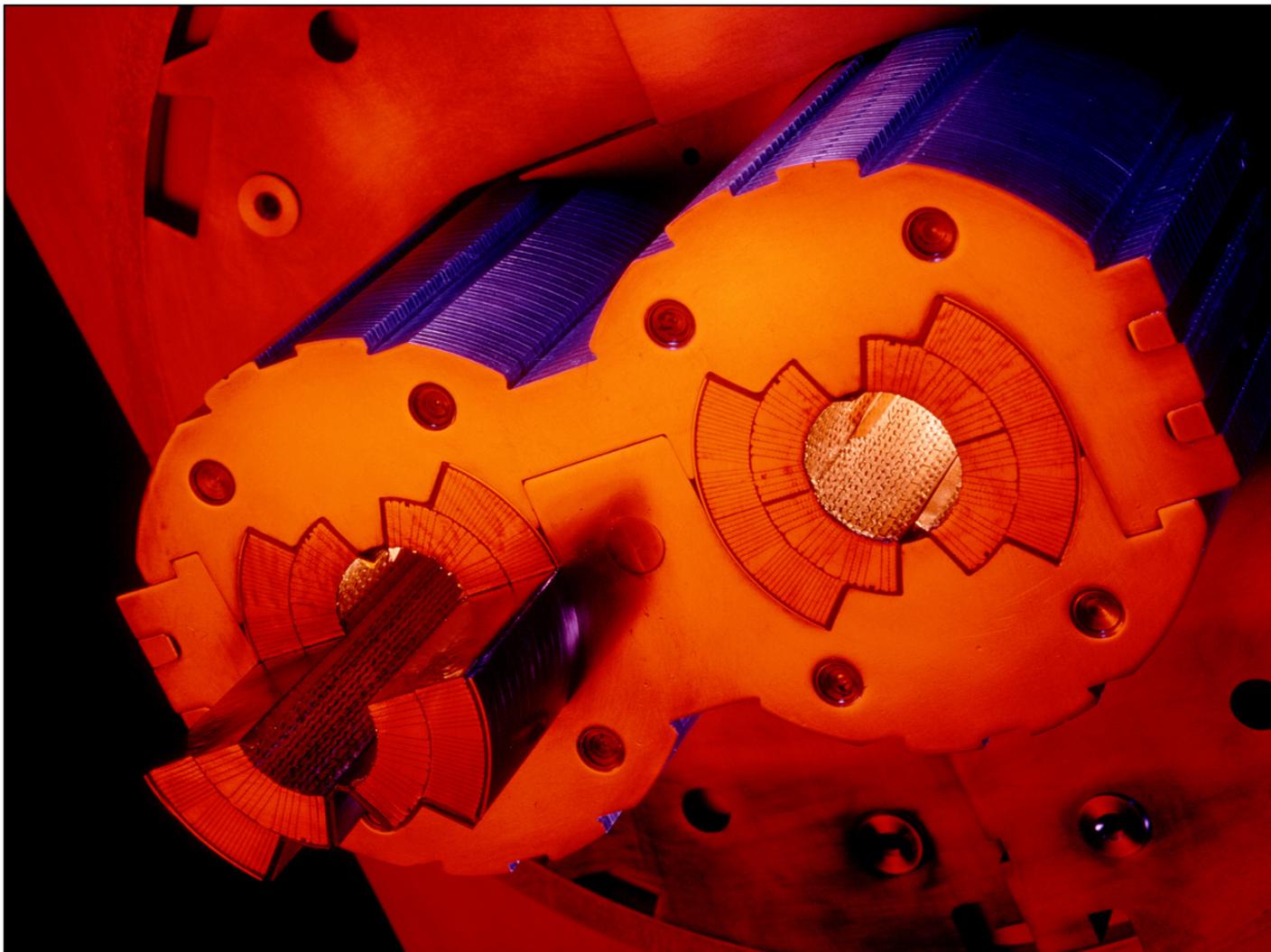
- I protoni sono accelerati da sistemi di cavità a radiofrequenza



Diversi acceleratori del CERN conducono i protoni fino ad LHC

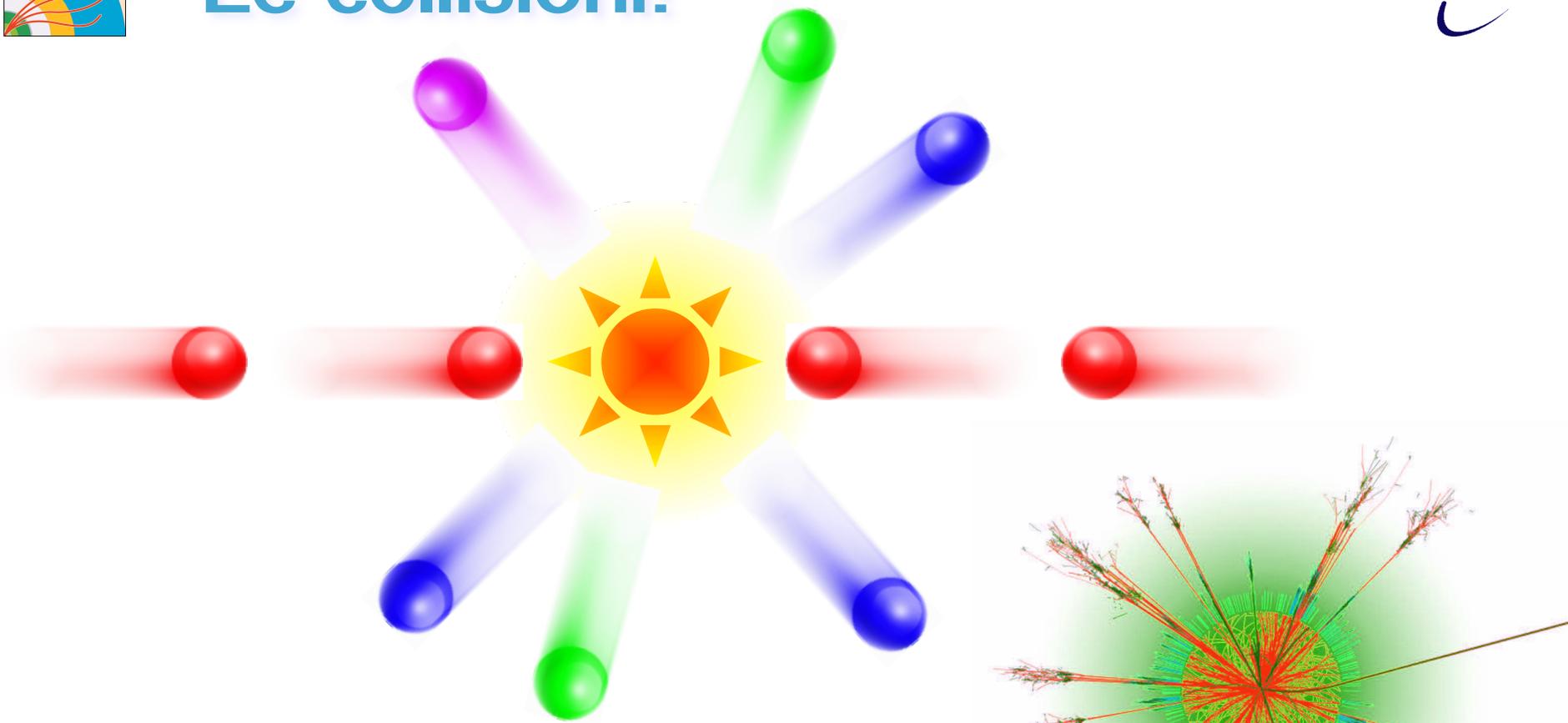
- Per far restare protoni da 7 TeV nell'orbita circolare di LHC sono necessari campi magnetici da circa **8 Tesla** (80000 volte il campo magnetico terrestre)
- **1600 magneti superconduttori** sono raffreddati con **He liquido superfluido** ad **1.9° K** (-271.25° C)
- LHC contiene il **sistema criogenico più grande al mondo**, ed è il luogo massivo **più freddo dell'universo!**
- ~7000 km di cavo superconduttore: l'intera produzione mondiale di due anni!





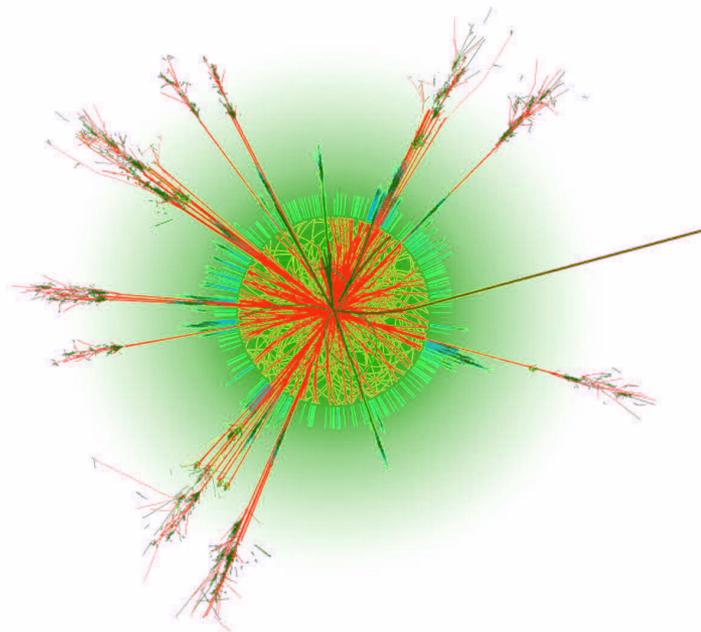


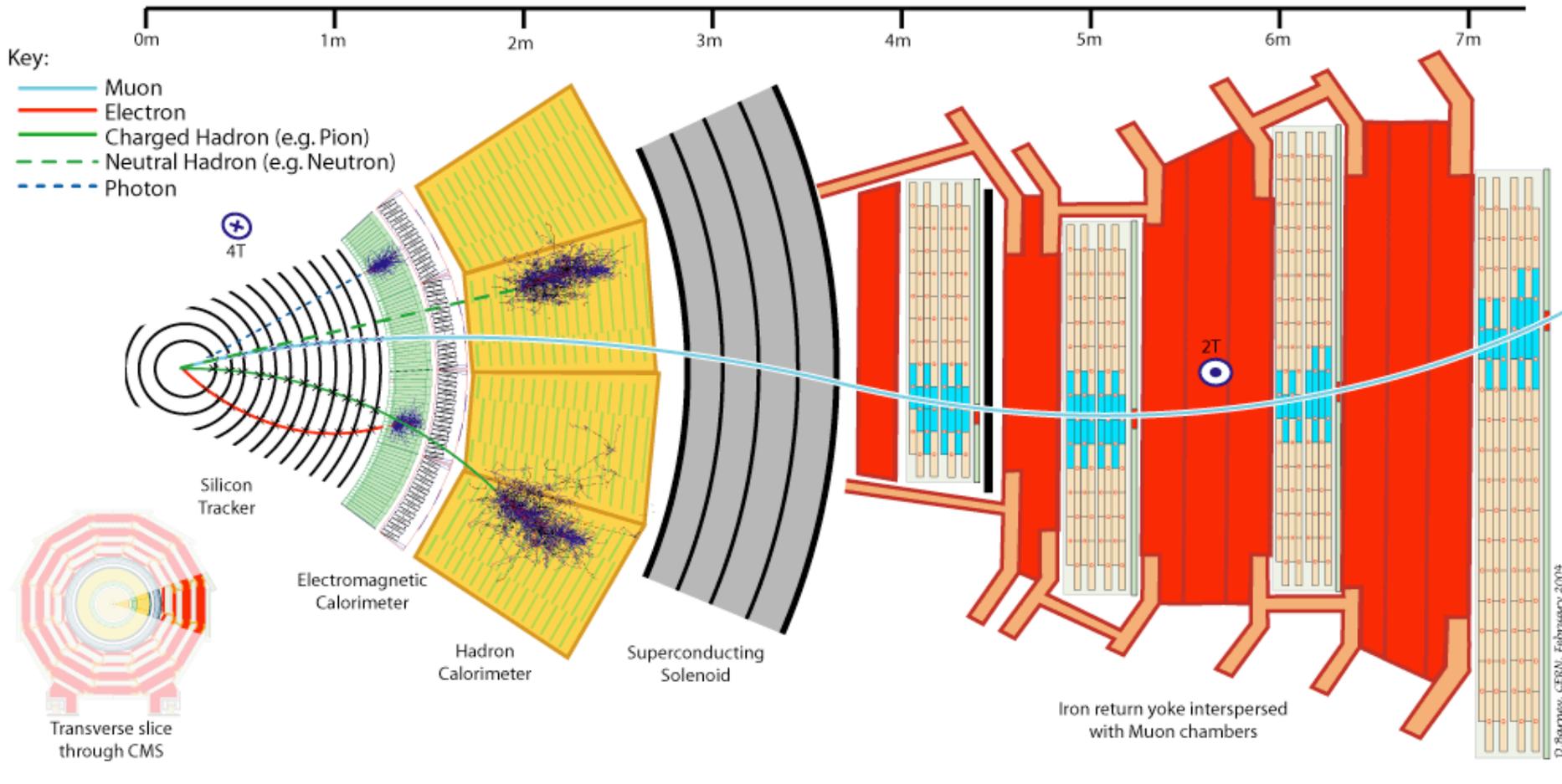


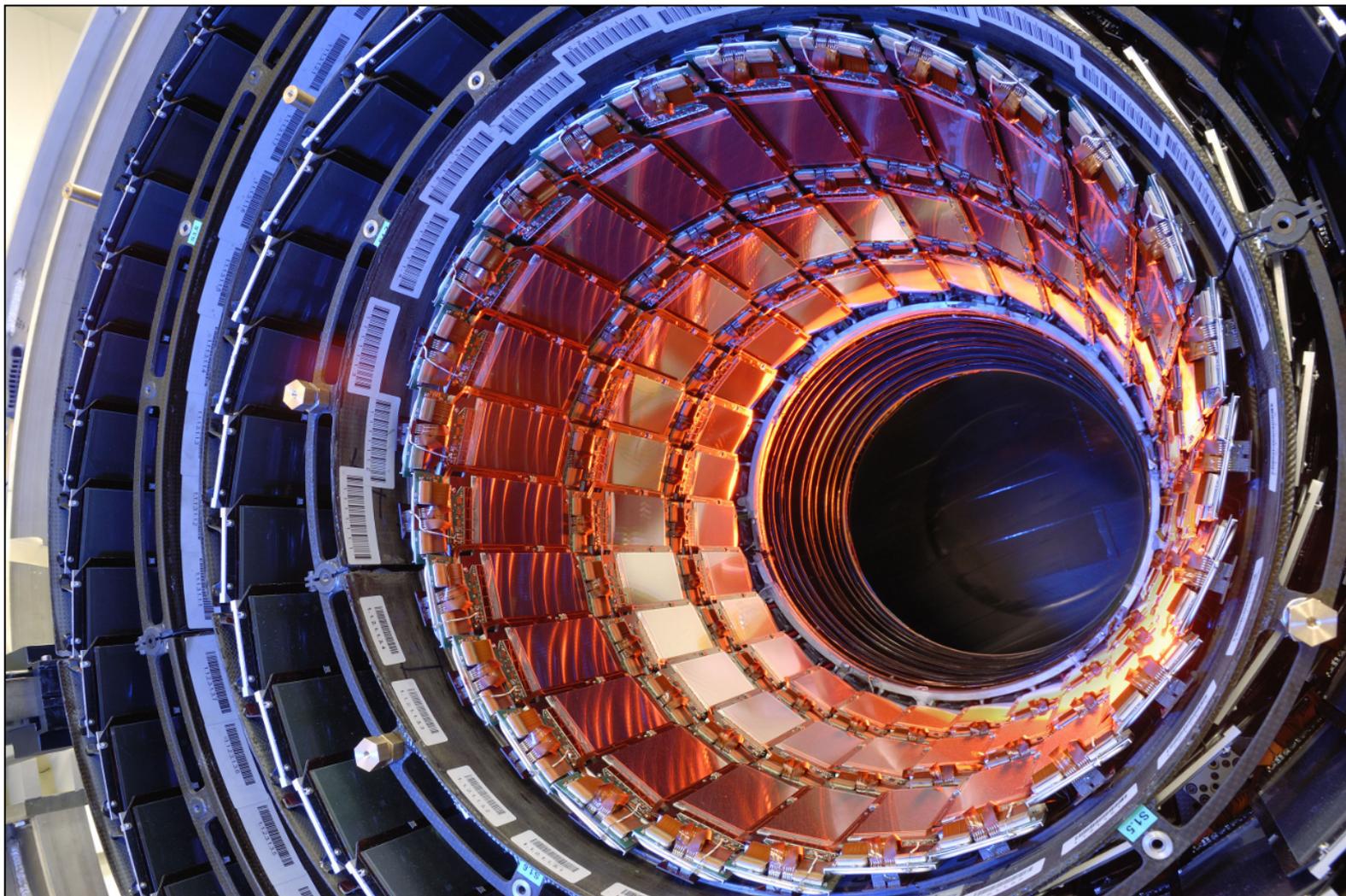


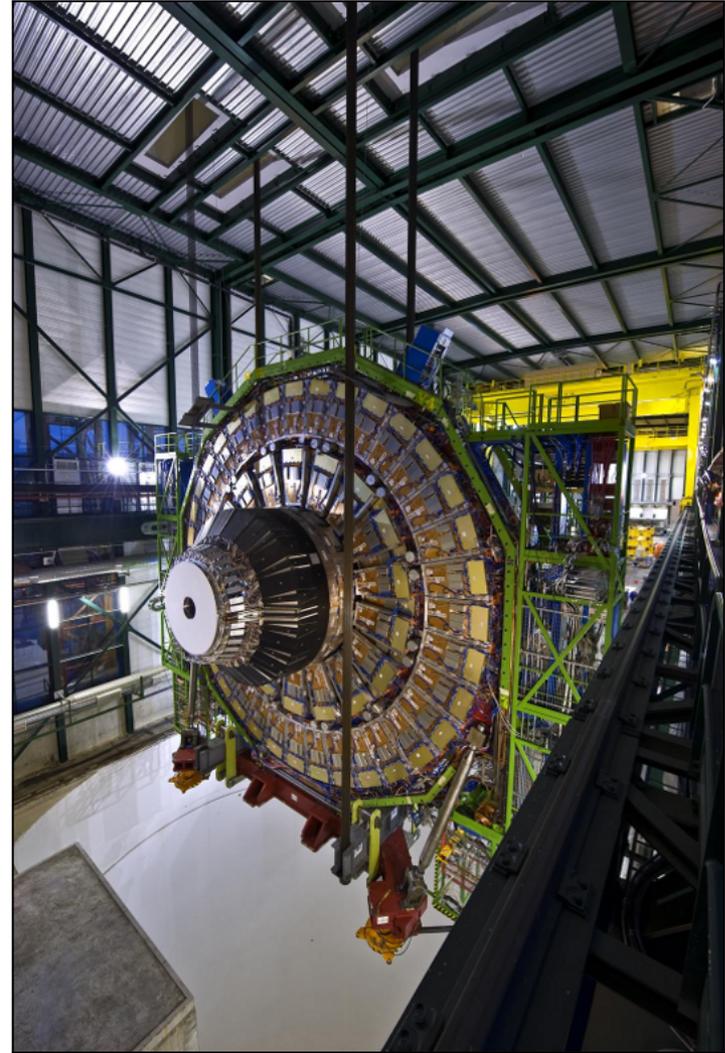
L'energia dei protoni che si scontrano  
 si trasforma in nuove particelle (= massa)

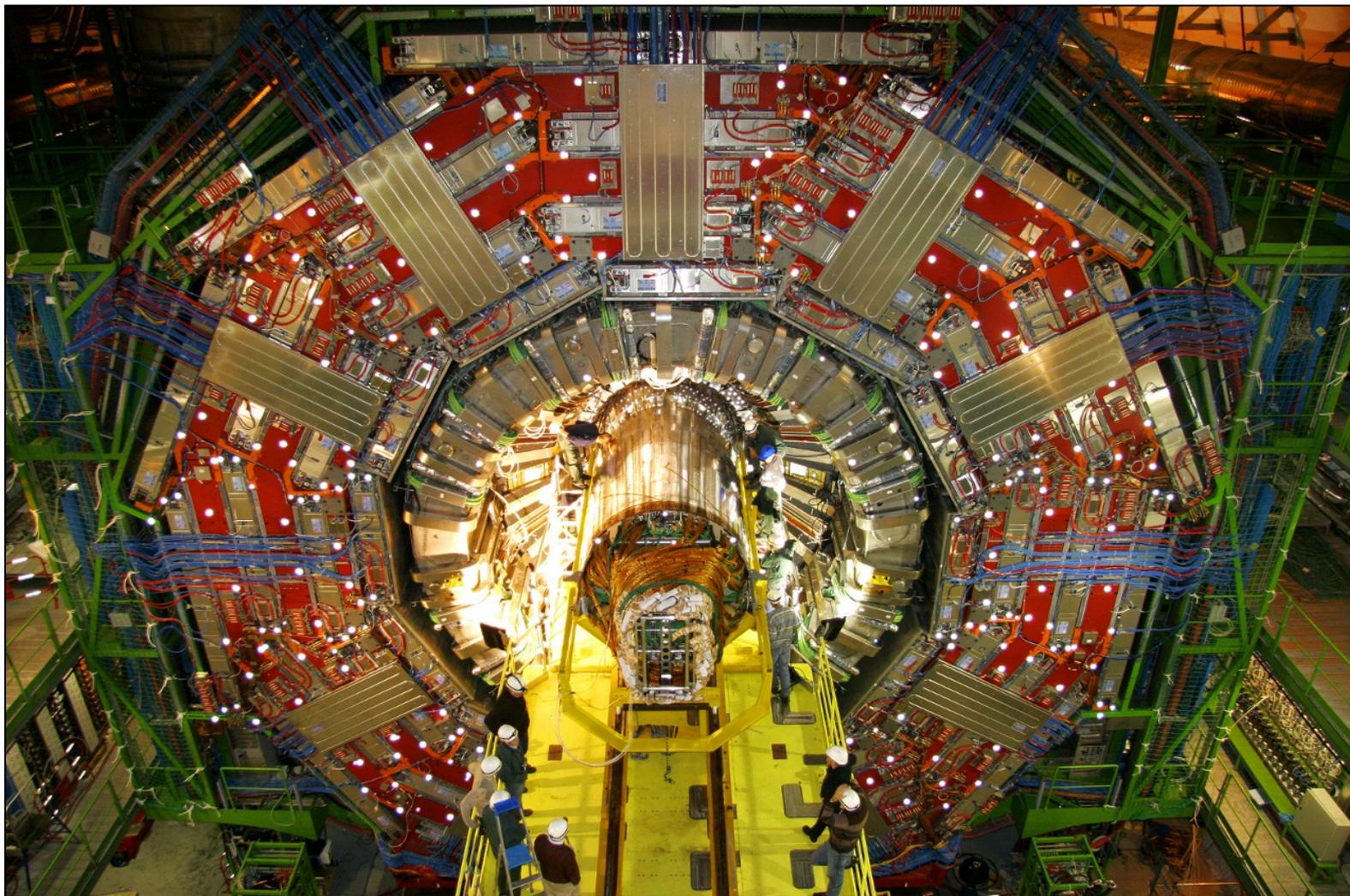
$$E = mc^2$$



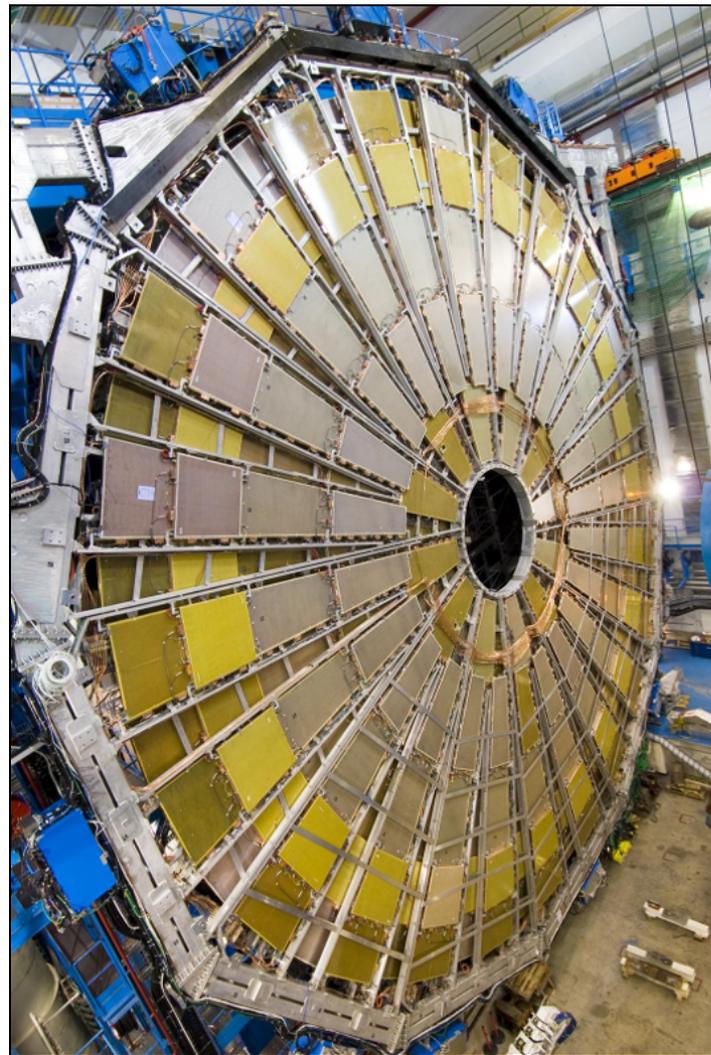


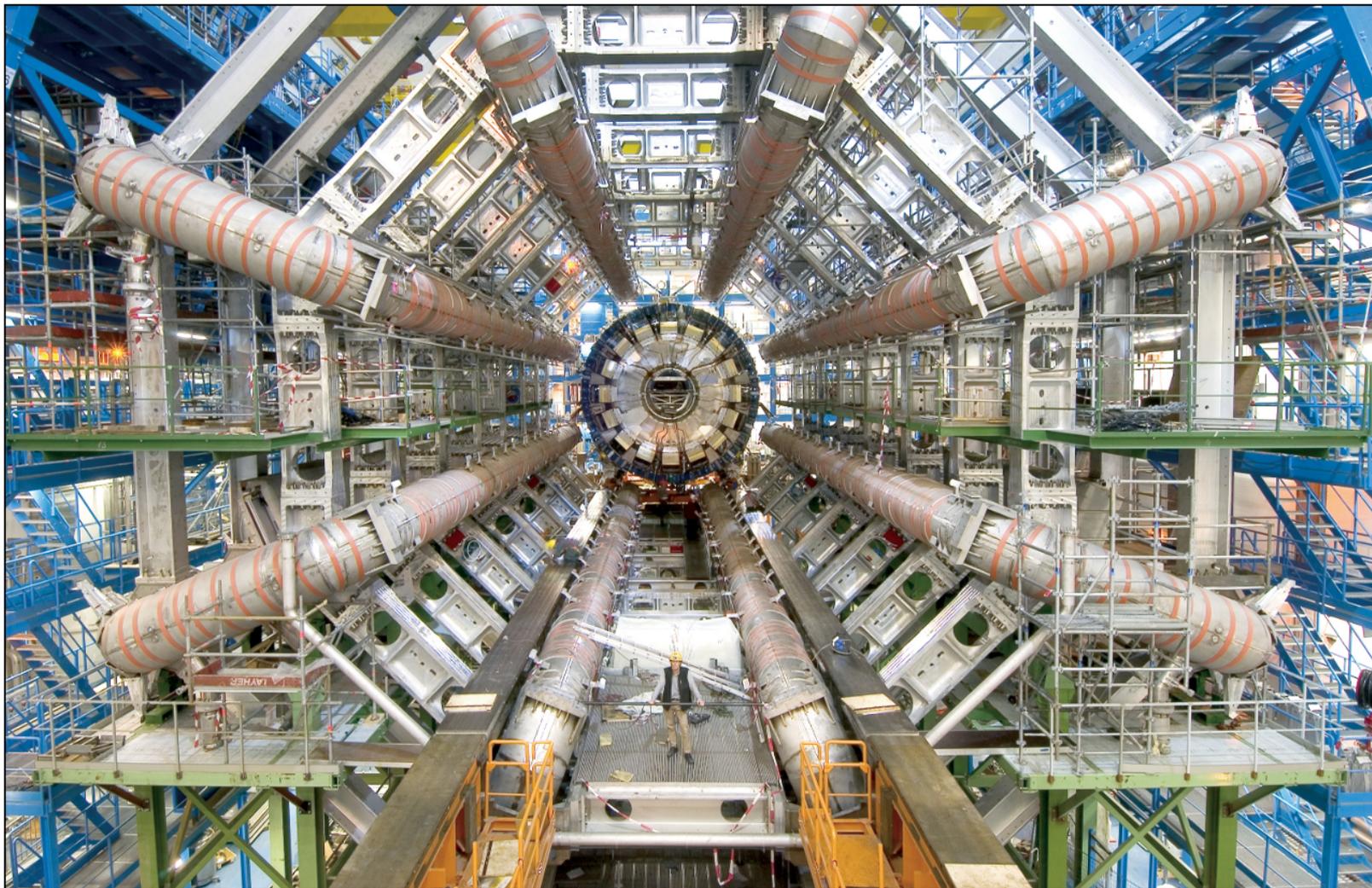




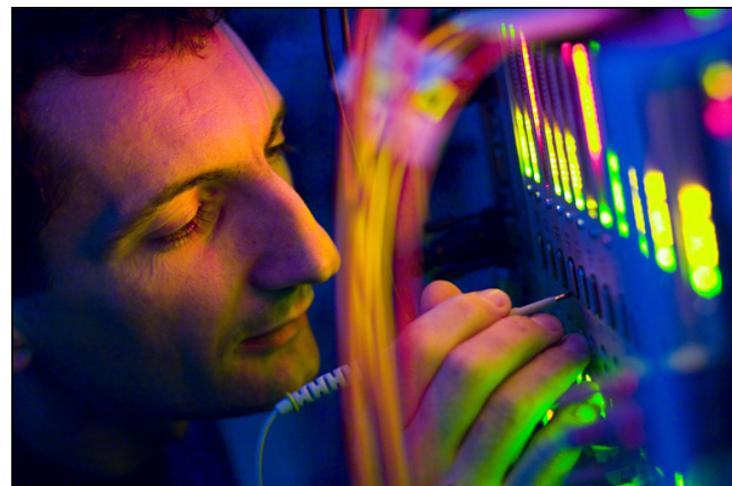
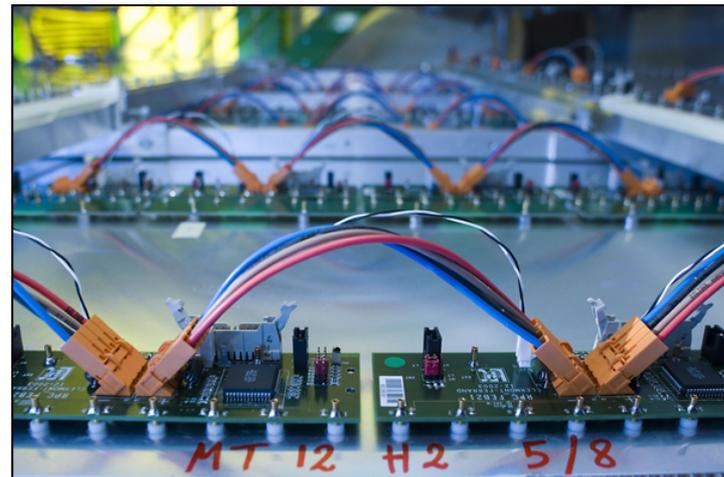


# L'esperimento ATLAS

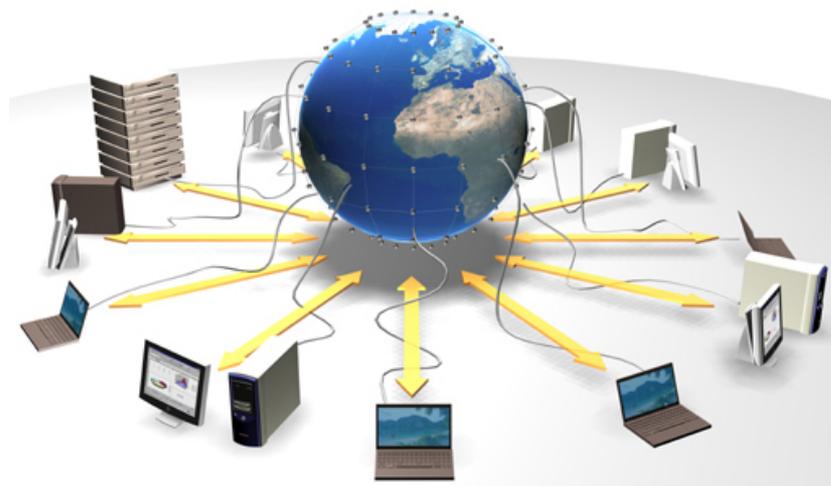




- Gli esperimenti ad LHC sono enormi “macchine fotografiche” tridimensionali da circa **100 Mega-pixel**
- Le collisioni tra protoni avvengono con una frequenza di circa  **$\sim 1$  GHz**
- Ma gli esperimenti possono acquisire a circa **100-200 Hz**
- Il trigger è un complesso sistema elettronico che seleziona in tempo (quasi ...) reale le collisioni interessanti tra tutte quelle “banali”

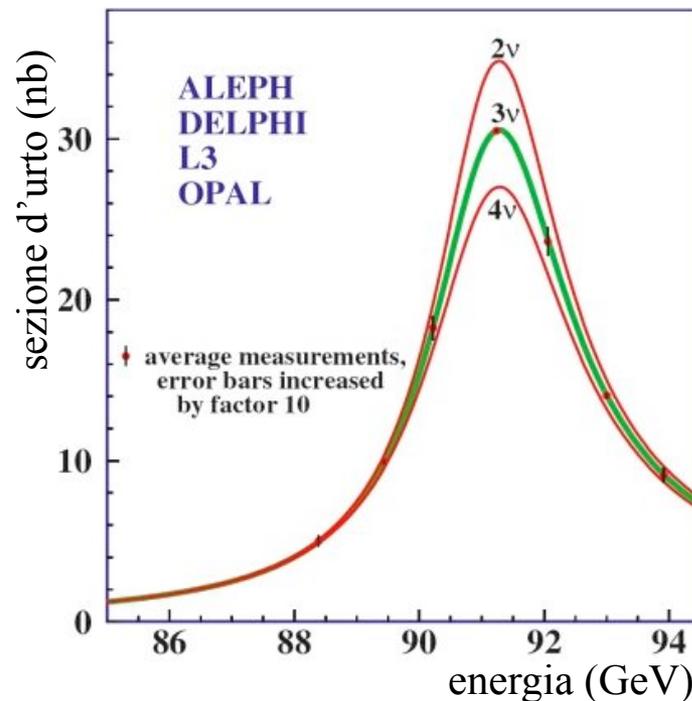
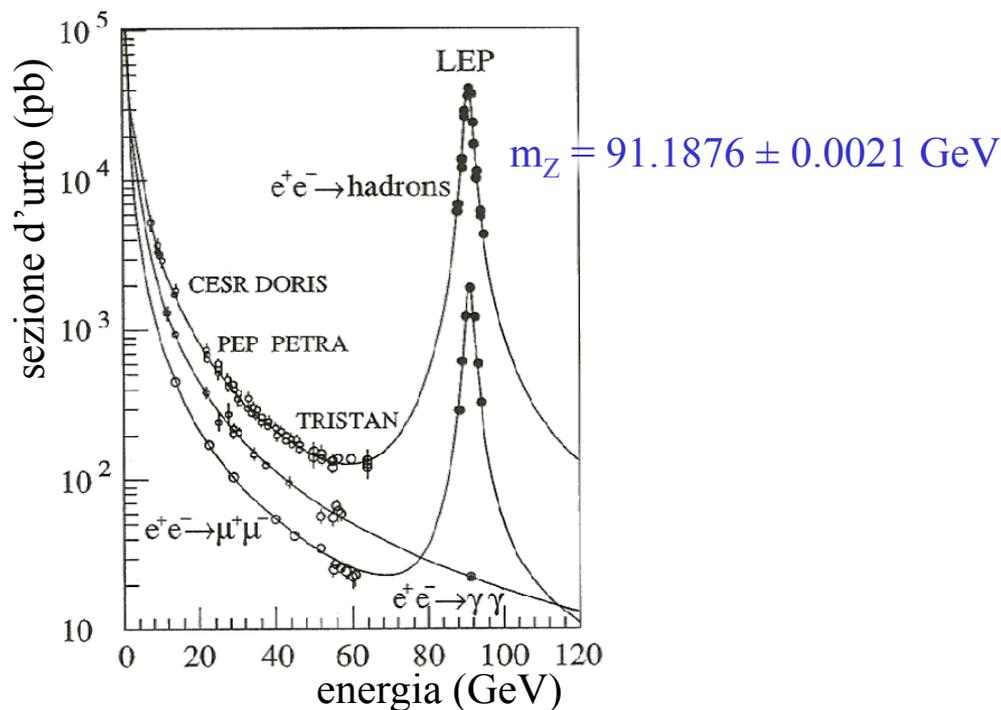


- I dati acquisiti ammontano a circa **10-15 Peta-byte l'anno**
- LHC dovrà usare molti centri di calcolo distribuiti sull'intero pianeta
- Il CERN ha sviluppato il **World Wide Web (WWW)** per permettere lo scambio di documenti tra scienziati
- Per LHC è stato sviluppato il sistema di calcolo distribuito **GRID**

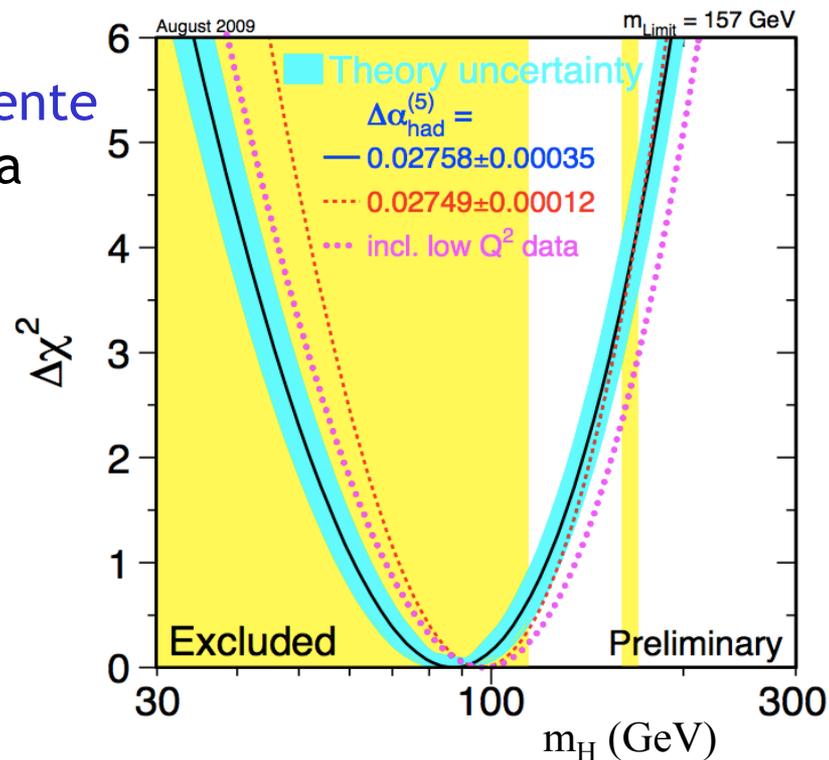
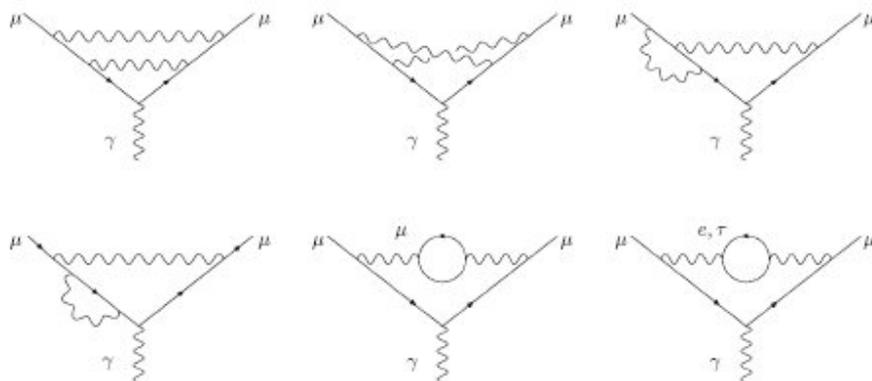


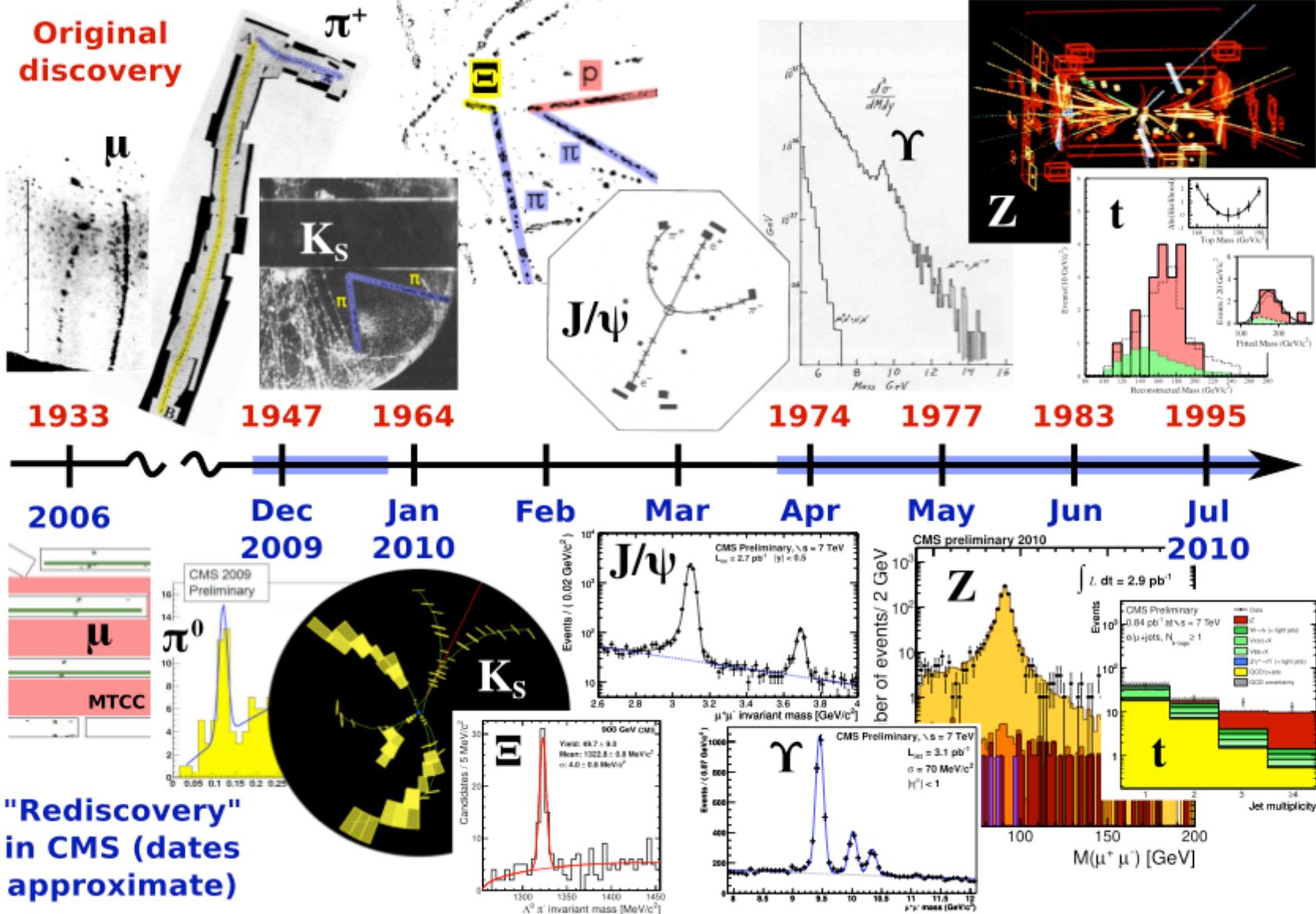


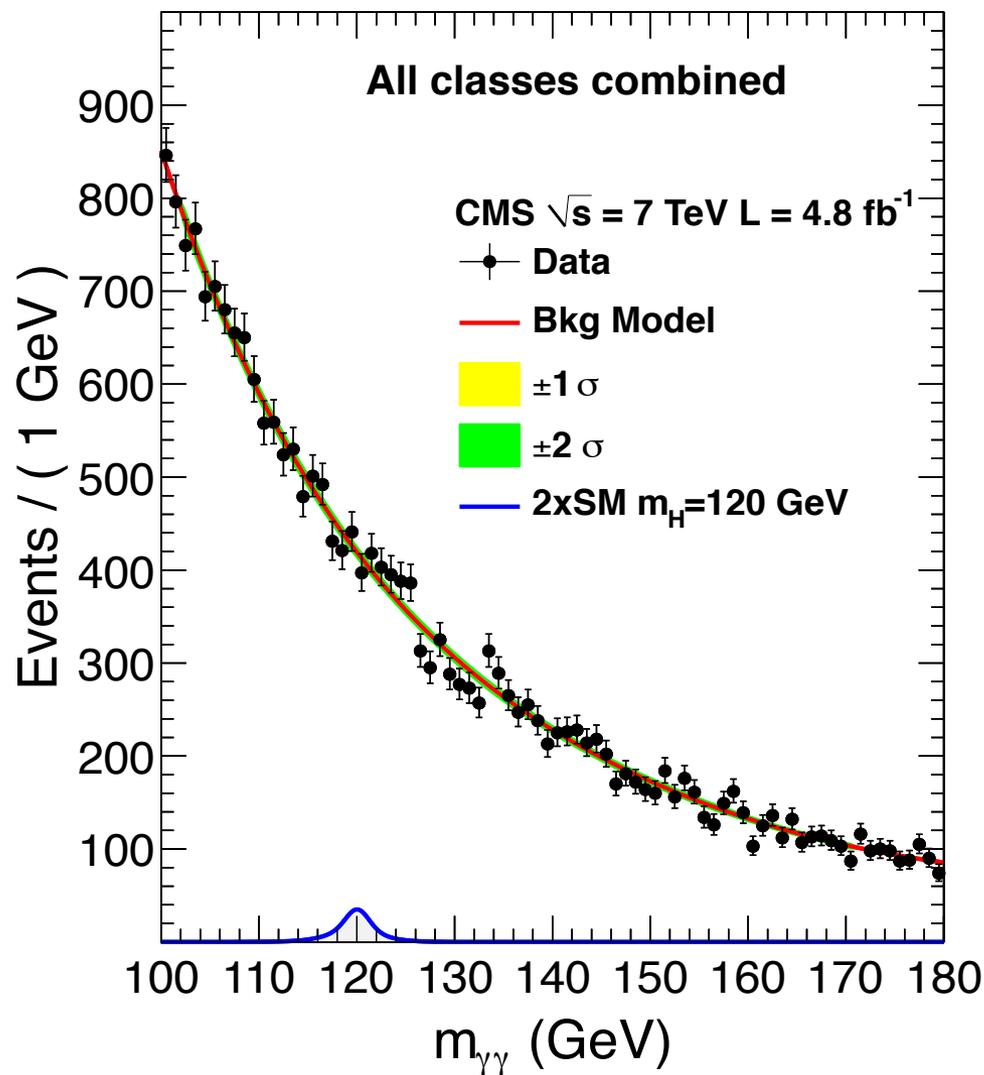
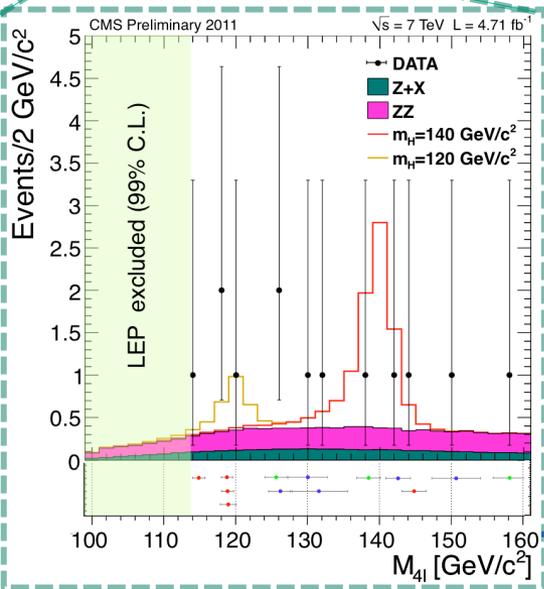
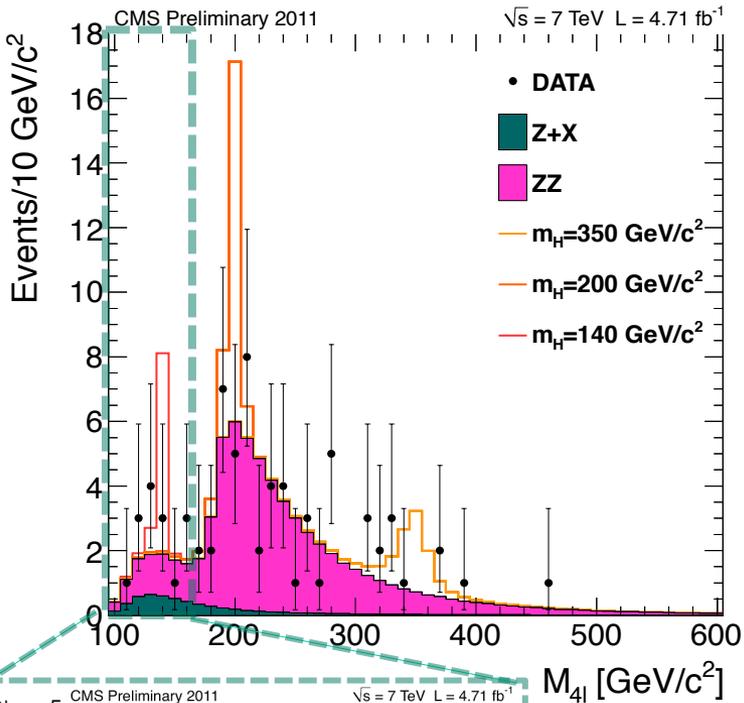
- Scoperta dei bosoni **W** e **Z** al CERN, 1983
- Misure di precisione al **LEP** e **SLC** in collisioni elettrone-positrone (1989-2000)
- Energia di lavoro intorno alla massa della Z (risonanza!)
- Misure di precisione da milioni di decadimenti del bosone Z

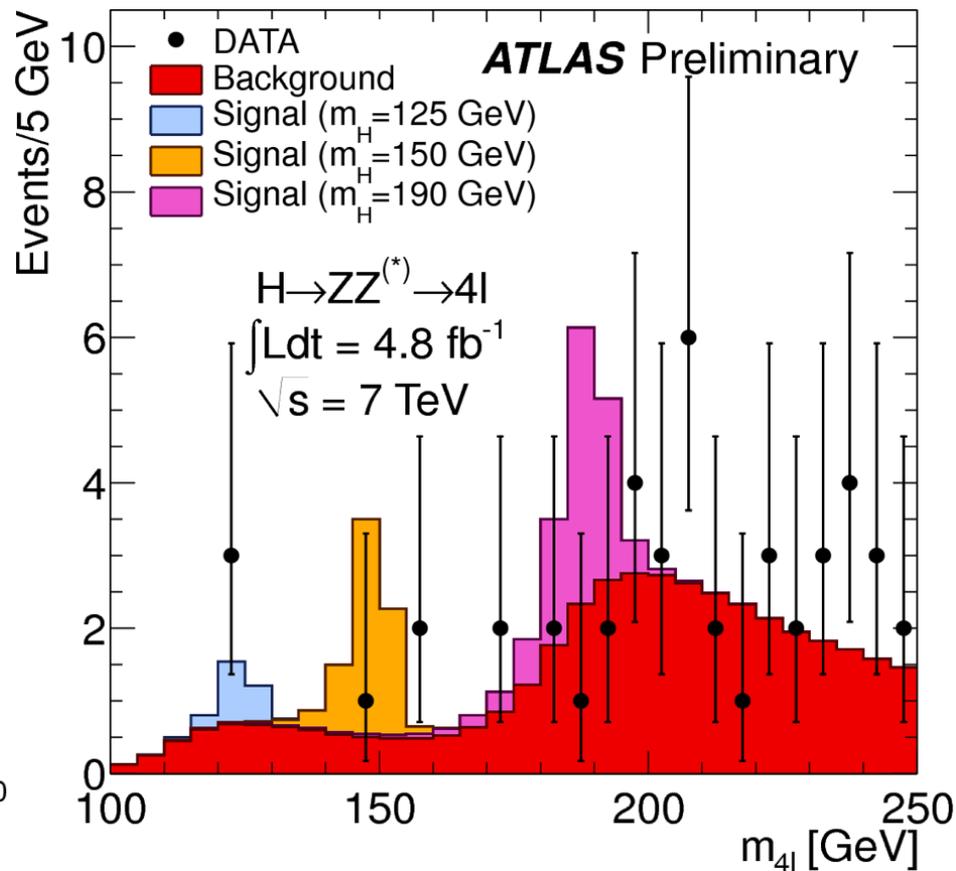
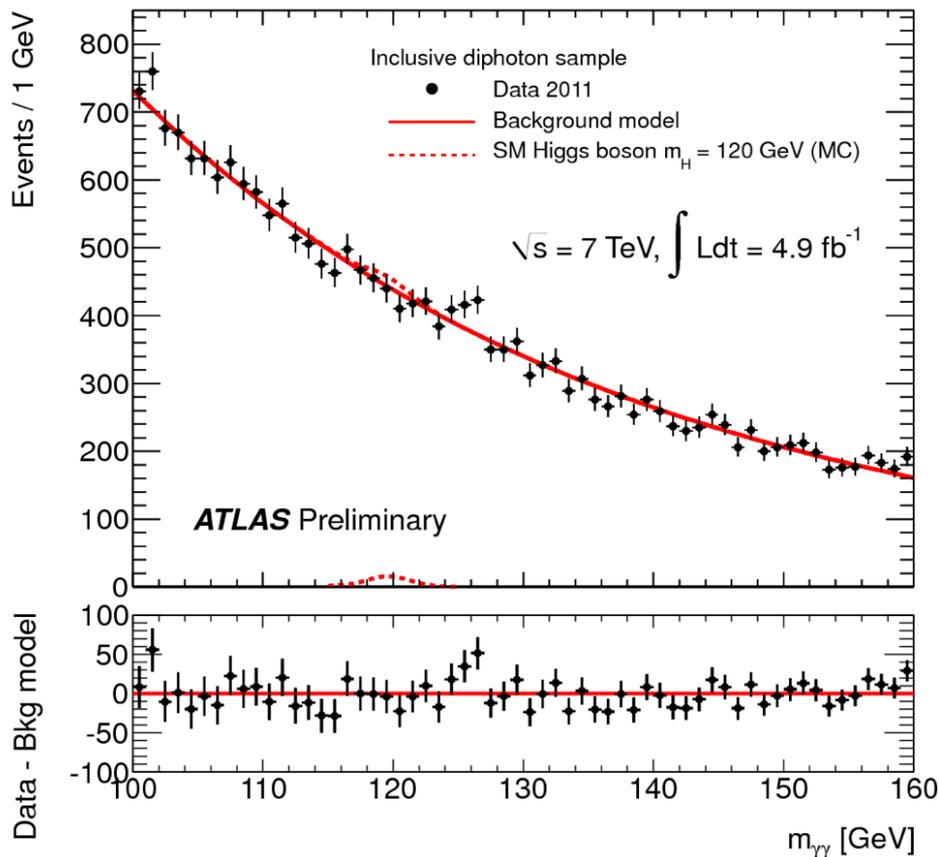


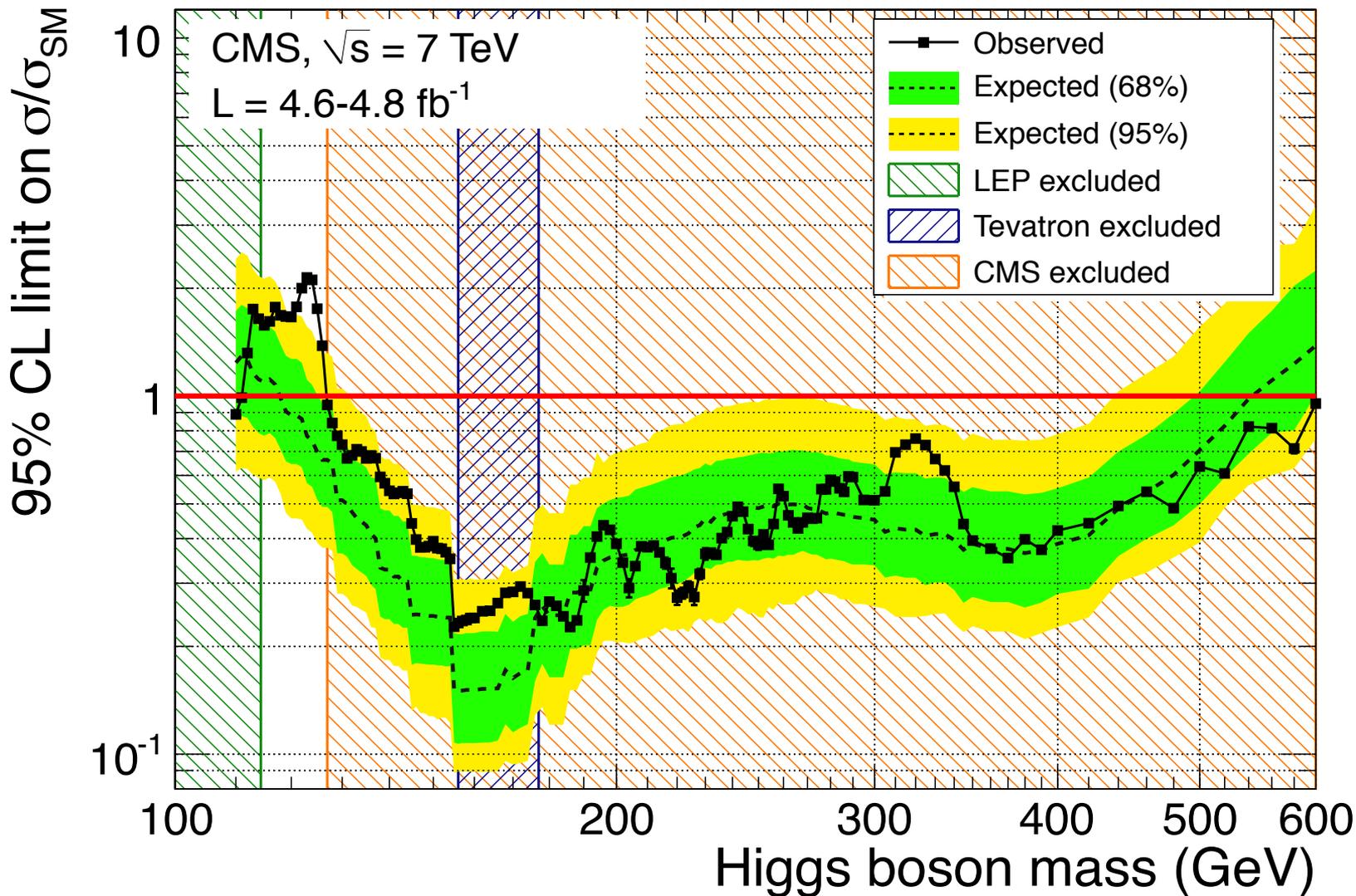
- I processi quantistici possono coinvolgere lo scambio di **particelle virtuali**, anche se di massa troppo grande per essere prodotte direttamente con le energie disponibili
- Molti processi al LEP possono contenere scambi di particelle di Higgs virtuali
- Dalle misure di precisione è possibile determinare **indirettamente** il valore **più probabile** della massa del bosone di Higgs



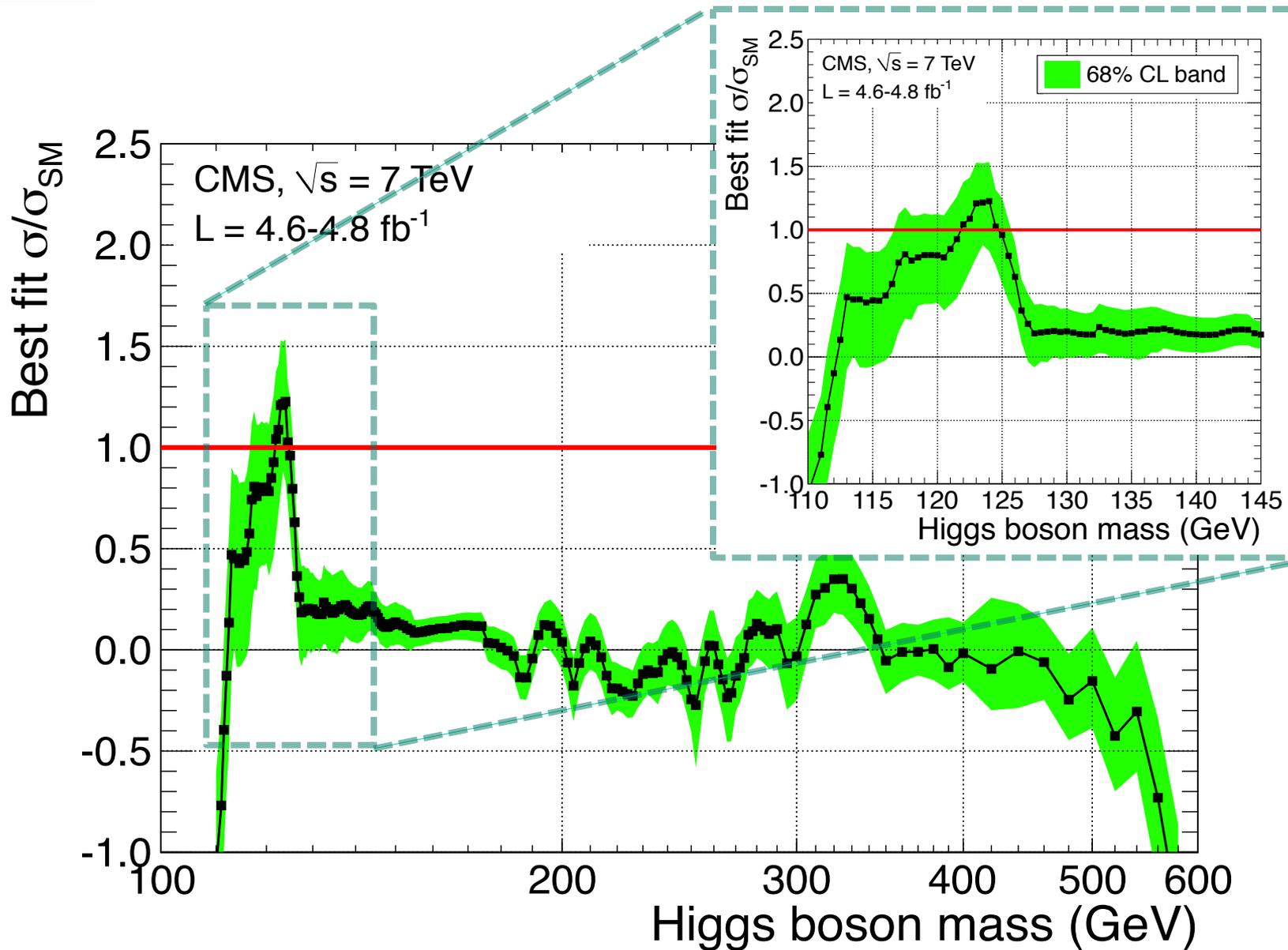






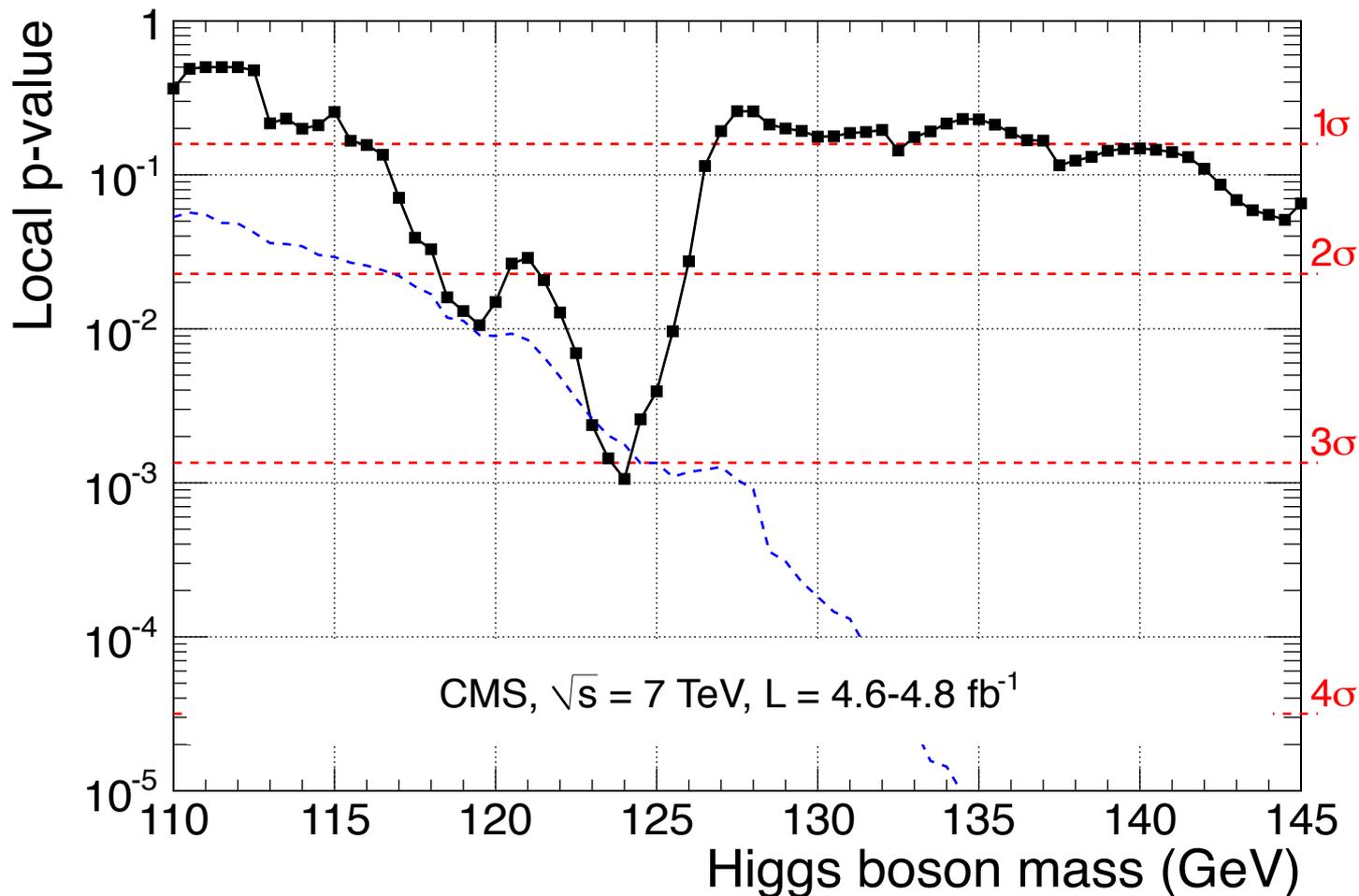


# Il “segnale” di Higgs



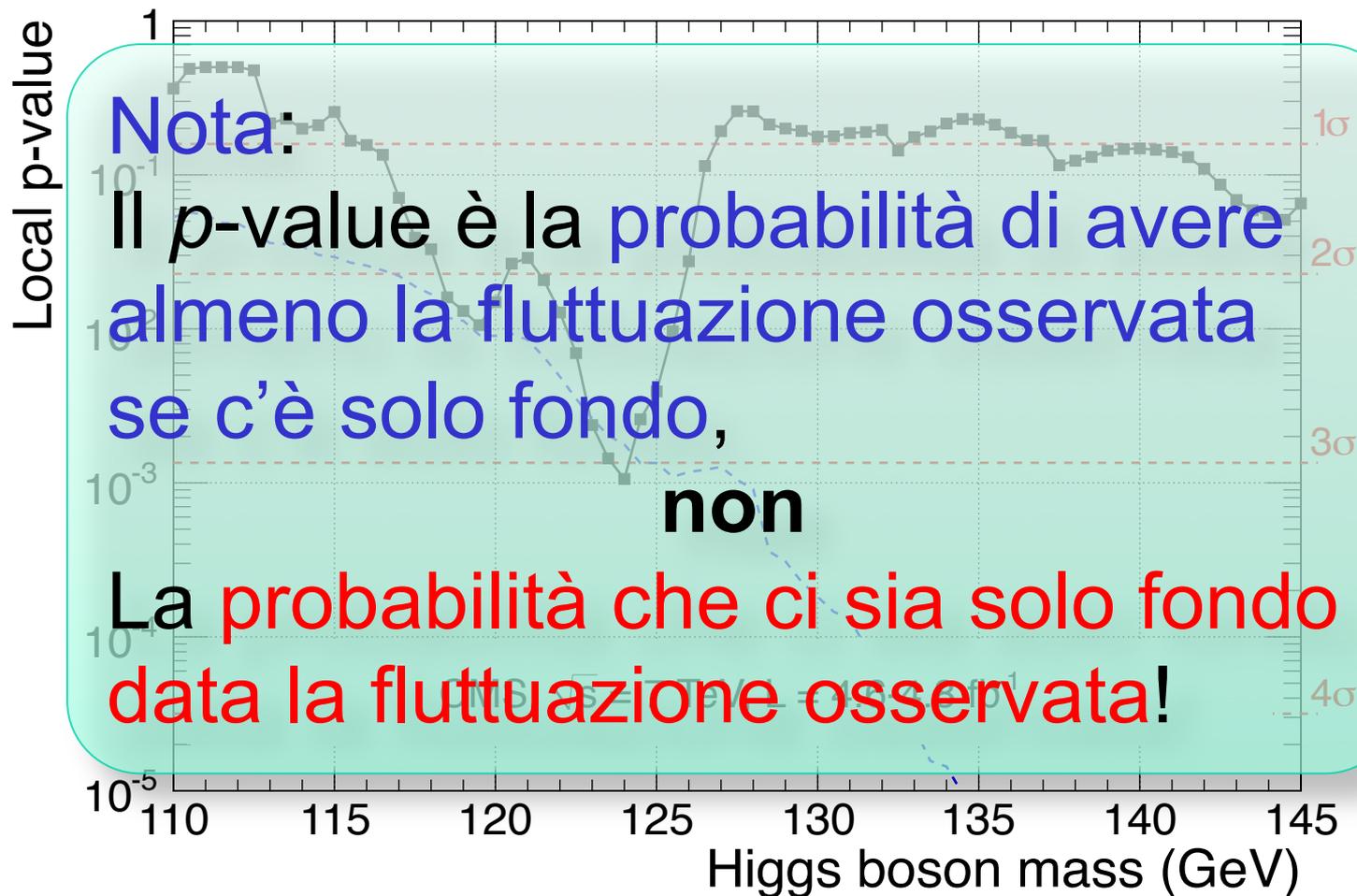
# “Indizio” o fluttuazione?

Probabilità di avere una fluttuazione del fondo  $\geq$  di quella osservata



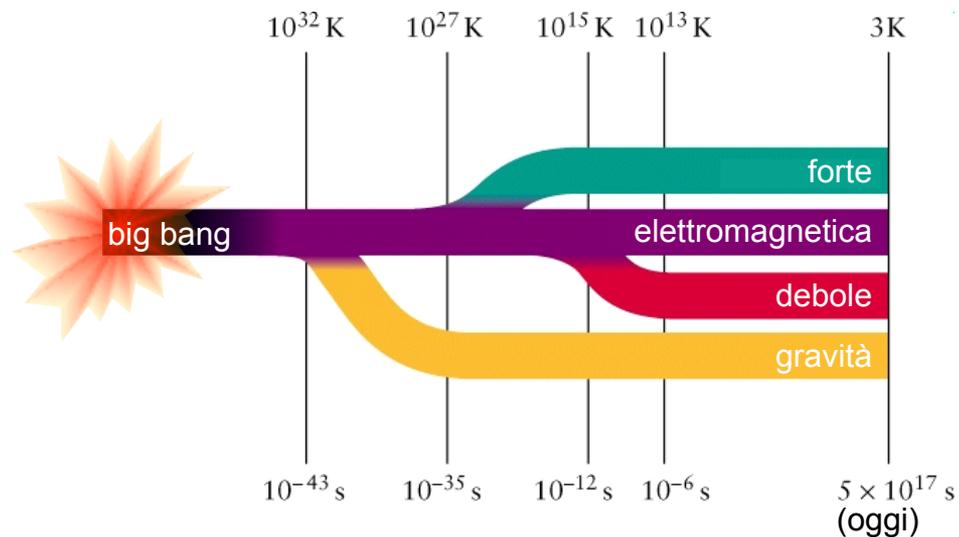
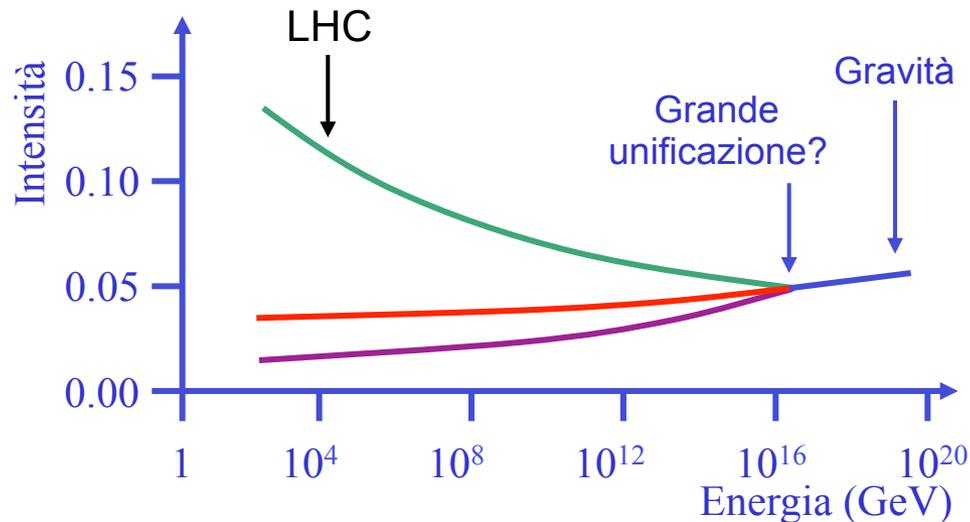
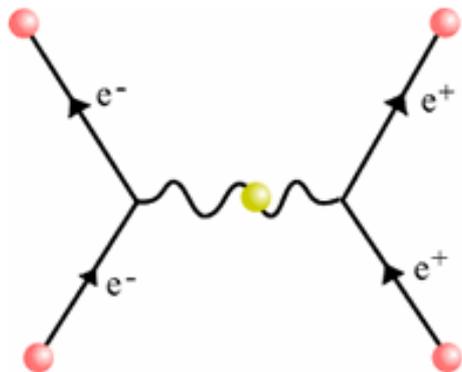
Significatività globale (LEE): 2.1 $\sigma$  (110-145GeV) or 1.5 $\sigma$  (110-600 GeV)

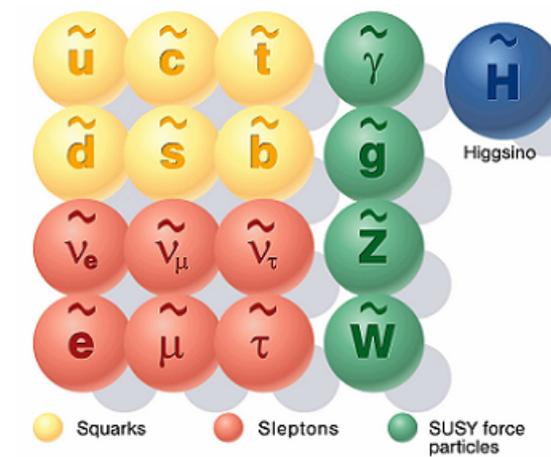
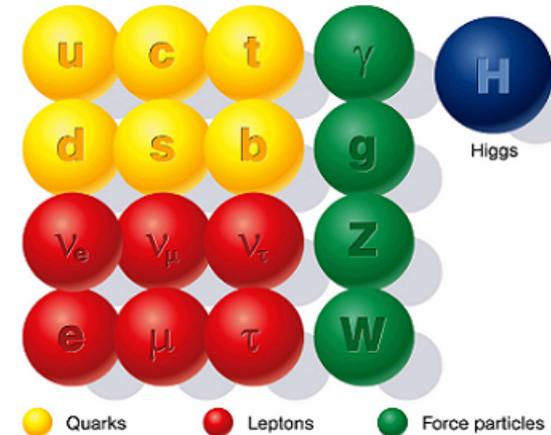
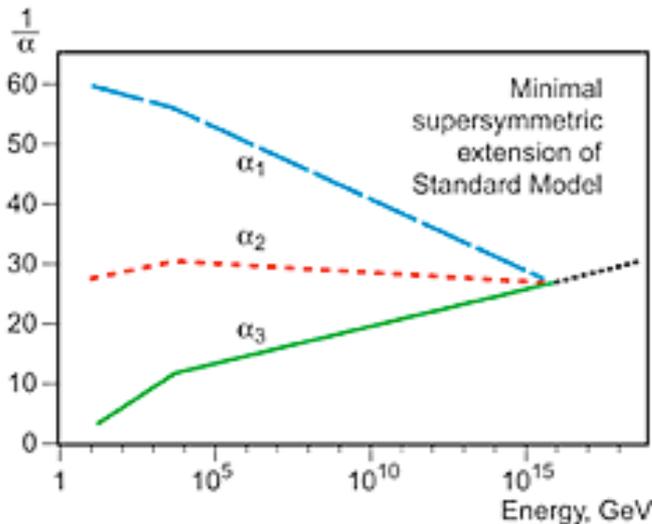
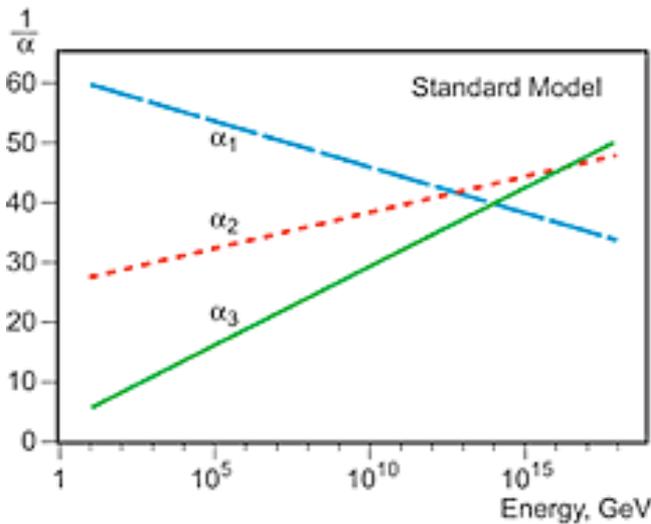
# “Indizio” o fluttuazione?



Significatività globale (LEE):  $2.1\sigma$  (110-145GeV) or  $1.5\sigma$  (110-600 GeV)

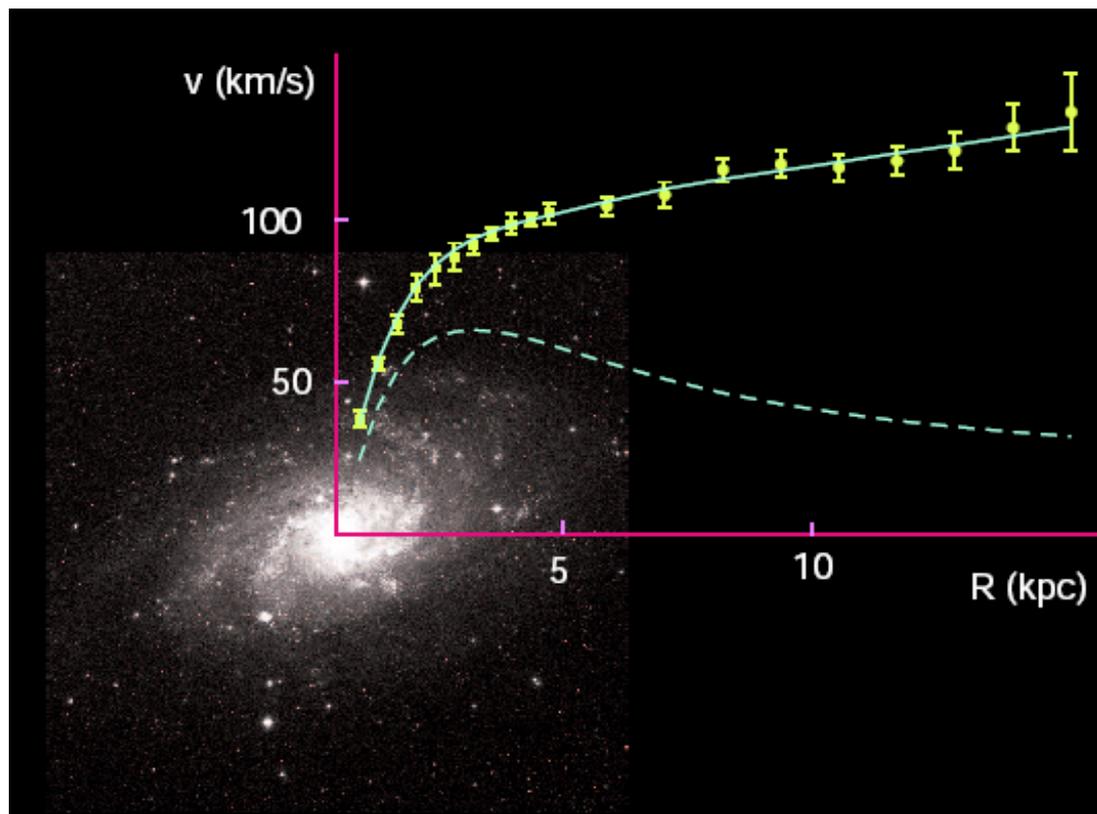
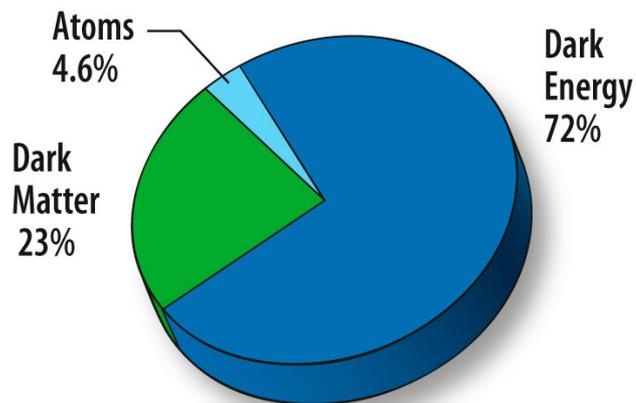
- Ognuna delle quattro interazioni fondamentali è mediata da una particella (bosone vettore)
- Il Modello Standard unifica le interazioni elettromagnetiche e nucleare debole
- È possibile che tutte le forze siano in realtà unificate in un'unica interazione fondamentale?





- Le intensità degli accoppiamenti nello SM non sono compatibili con una grande unificazione
- La **Supersimmetria** (SUSY) potrebbe essere un meccanismo necessario per garantire l'unificazione delle interazioni
- Per ogni particella sarebbe presente una **s-particella**
- SUSY fornisce anche particelle candidati di **materia oscura**

- Stelle e pianeti costituiscono **solo il 5%** circa del contenuto dell'universo
- Gran parte della massa **non è visibile** direttamente, ma solo attraverso i suoi **effetti gravitazionali**



Curva di rotazione della galassia M33

# Distribuzione della materia luminosa



Immagine ai raggi X e nel visibile (Chandra)

Galaxy cluster  
1E 0657-56, "bullet cluster"

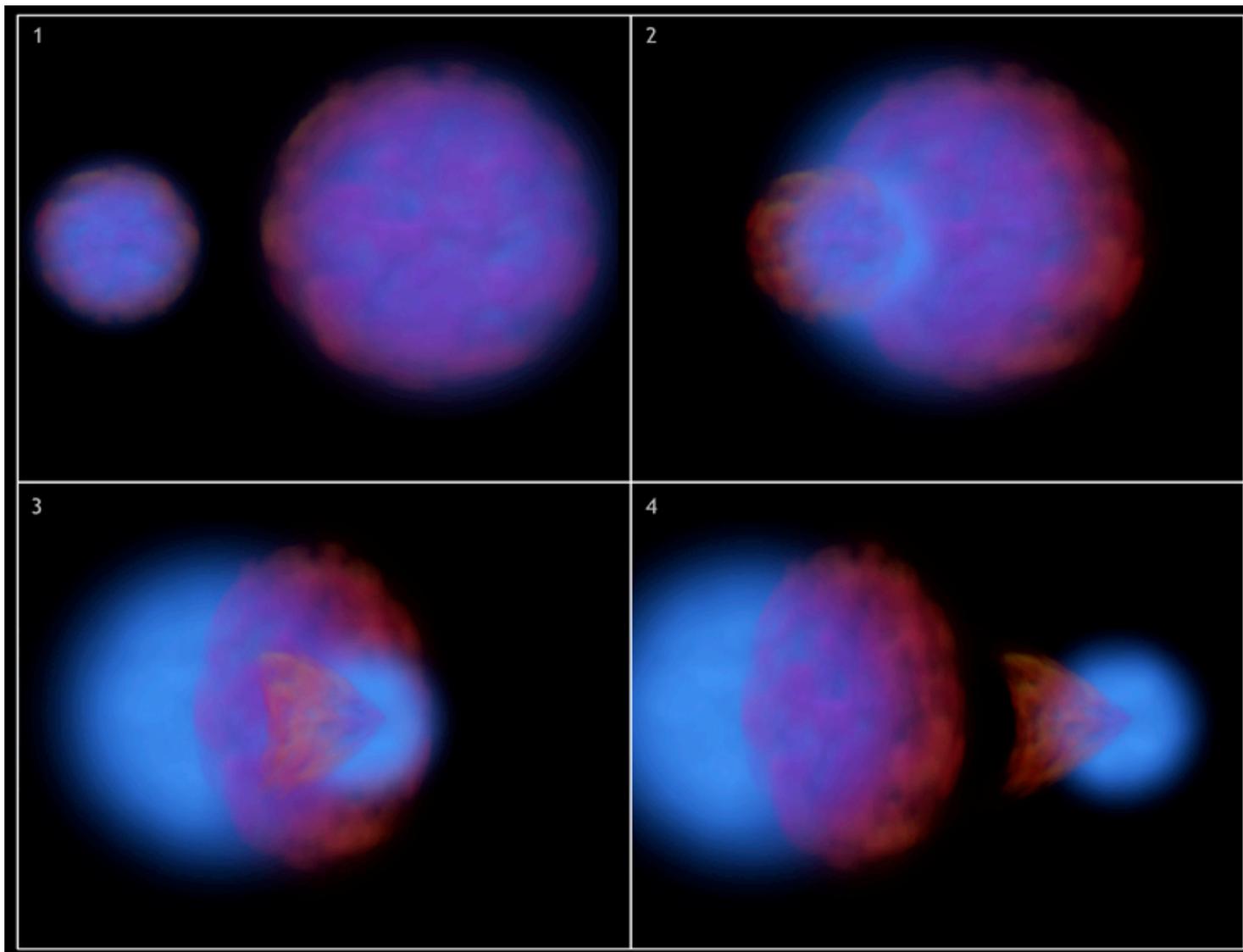
# Distribuzione di massa

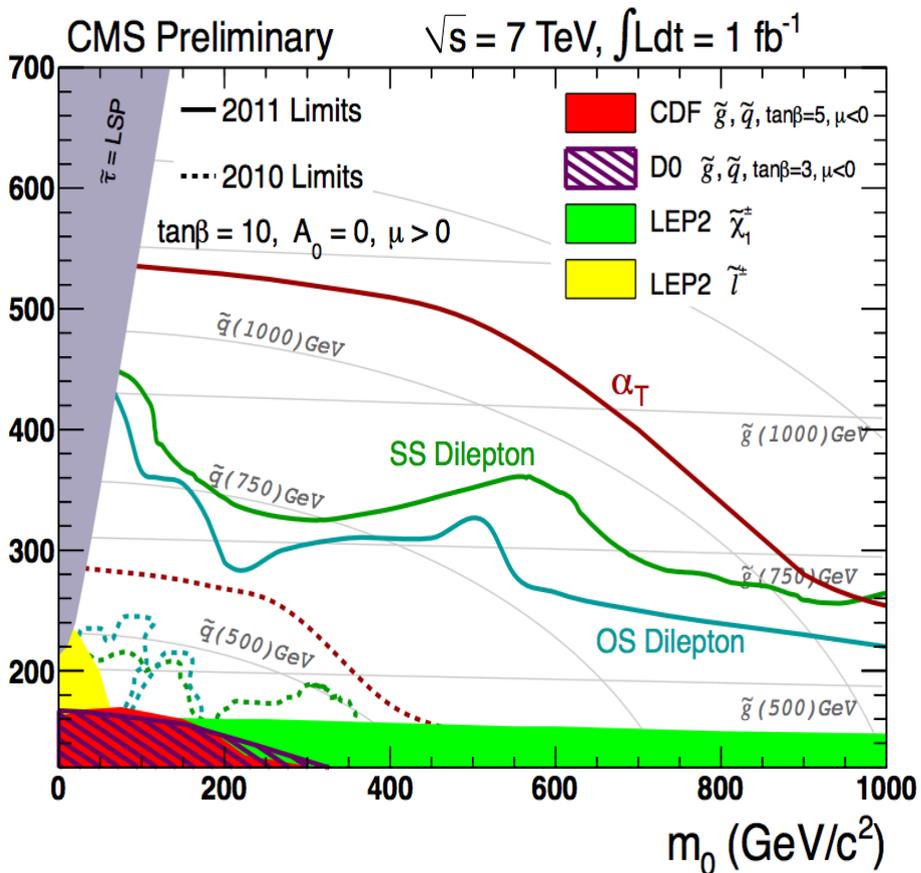
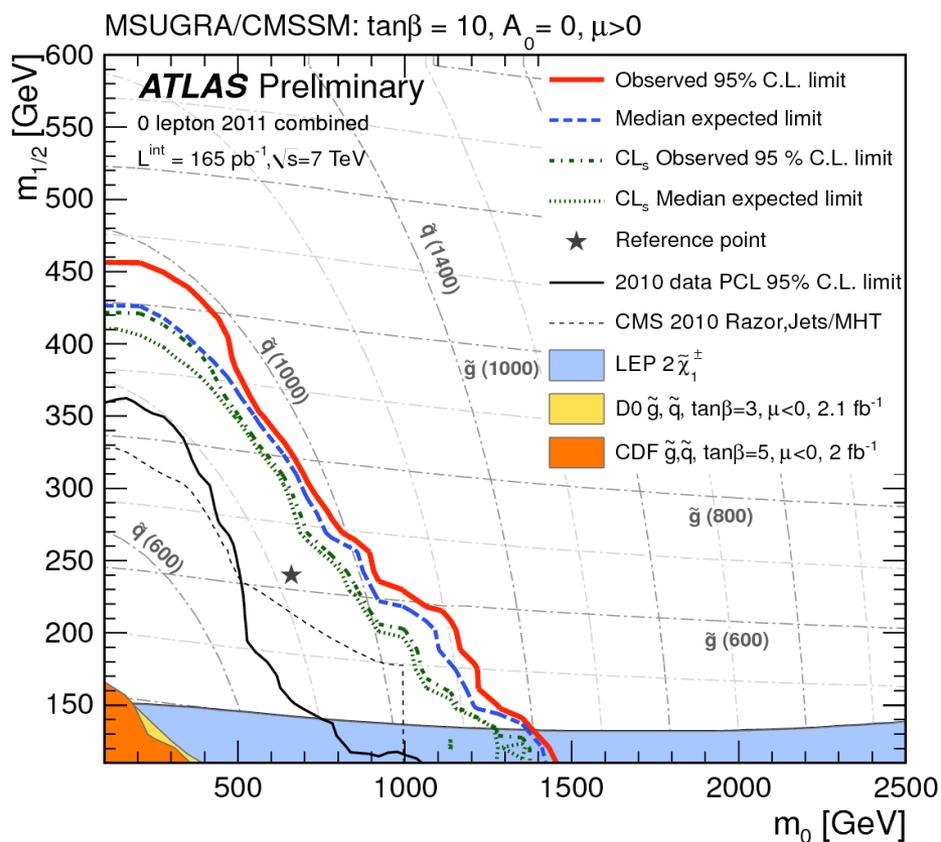


Immagine dal gravitational lensing e nel visibile

# Materia ordinaria e oscura

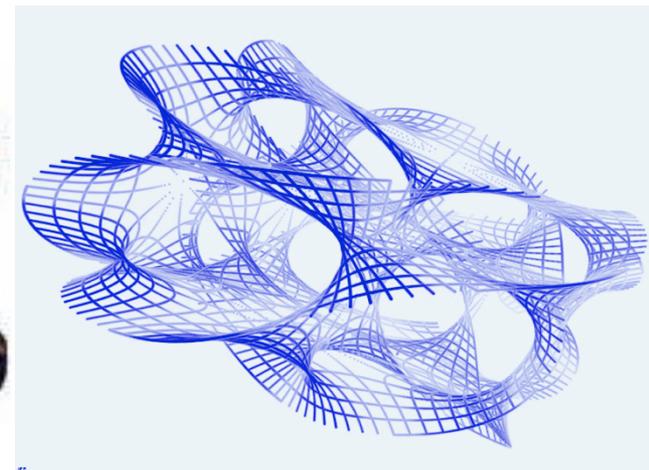
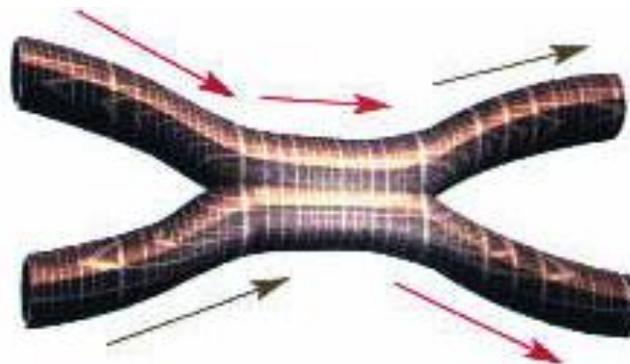
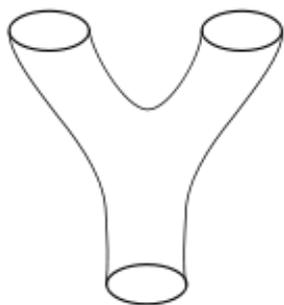
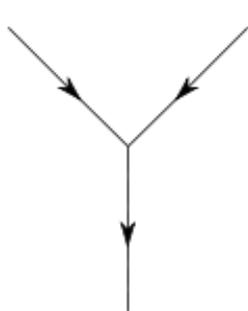






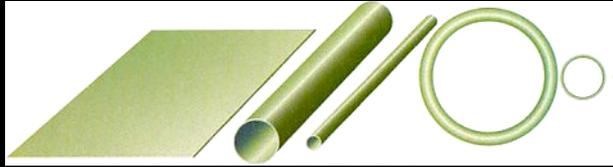
- LHC non ha trovato finora segnali di supersimmetria
- Se esistono, le particelle SUSY devono essere molto pesanti

- Unificare anche la gravità richiede sormontare difficoltà teoriche per la sua trattazione quantistica
- Una teoria in studio tratta le particelle come oggetti non puntiformi, ma come **stringhe**

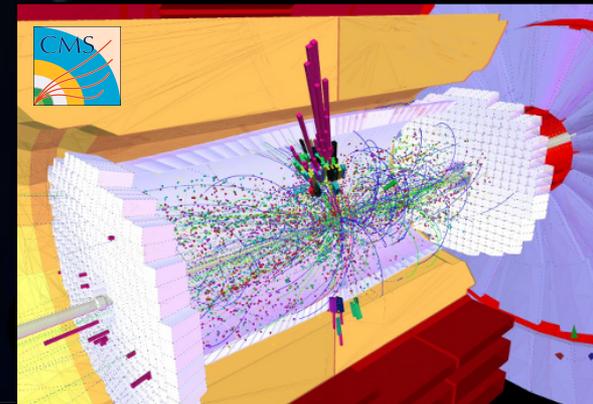


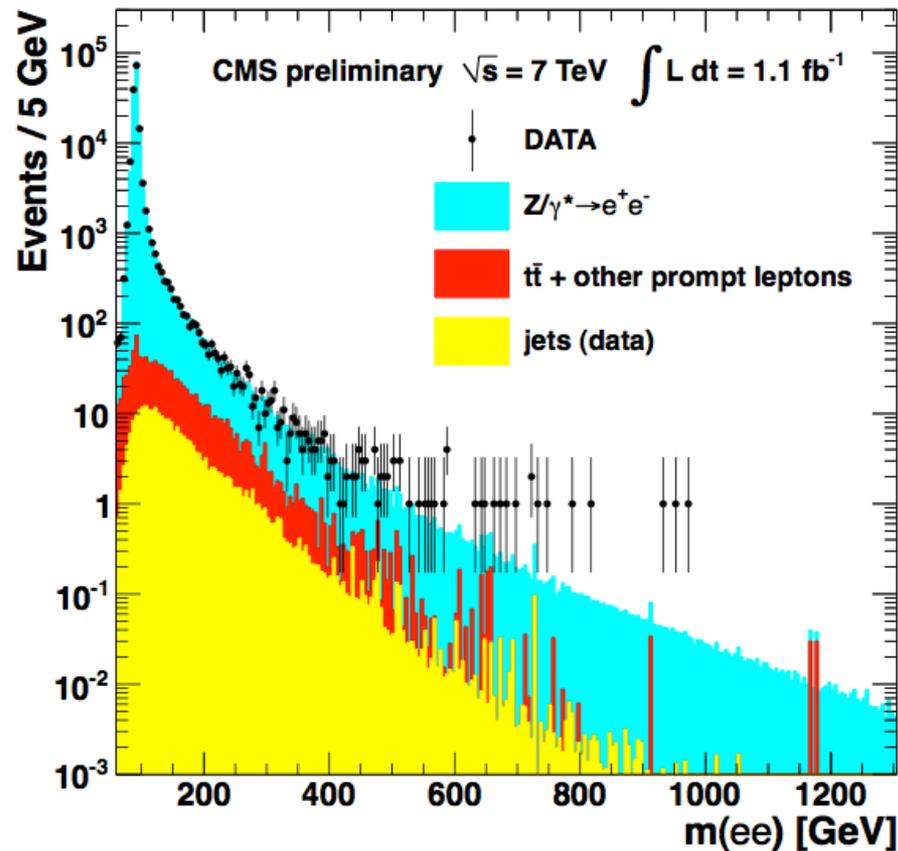
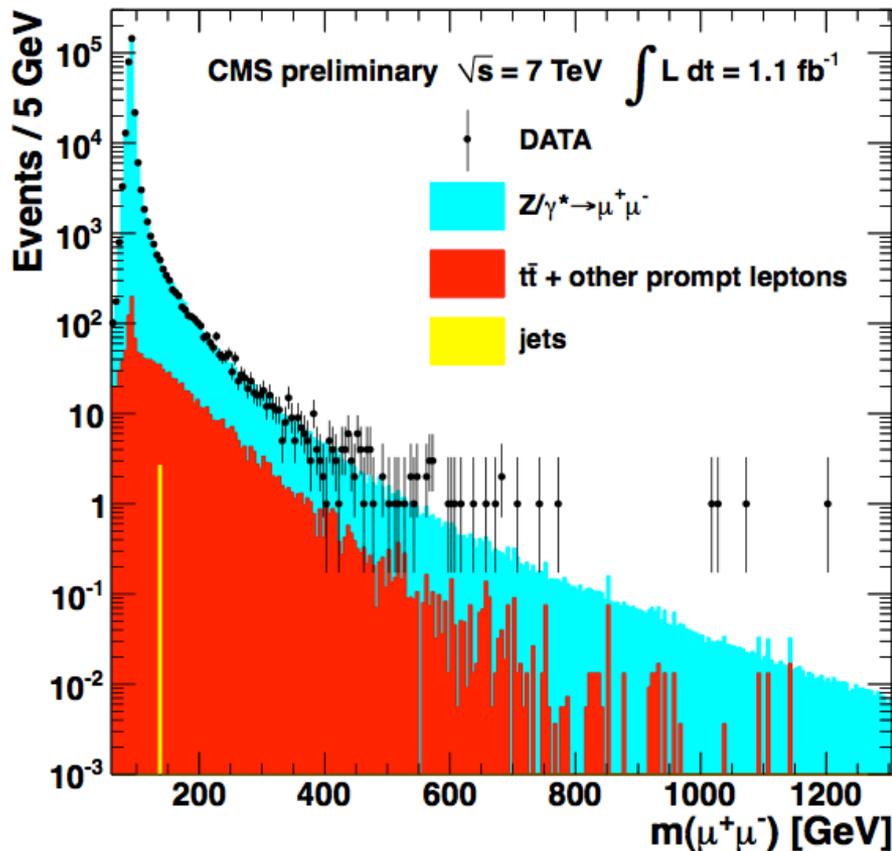
- Questi modello richiedono la presenza di **nuove dimensioni spazio-temporali**, e non sono ad oggi sufficientemente predittivi

# Extra dimensioni



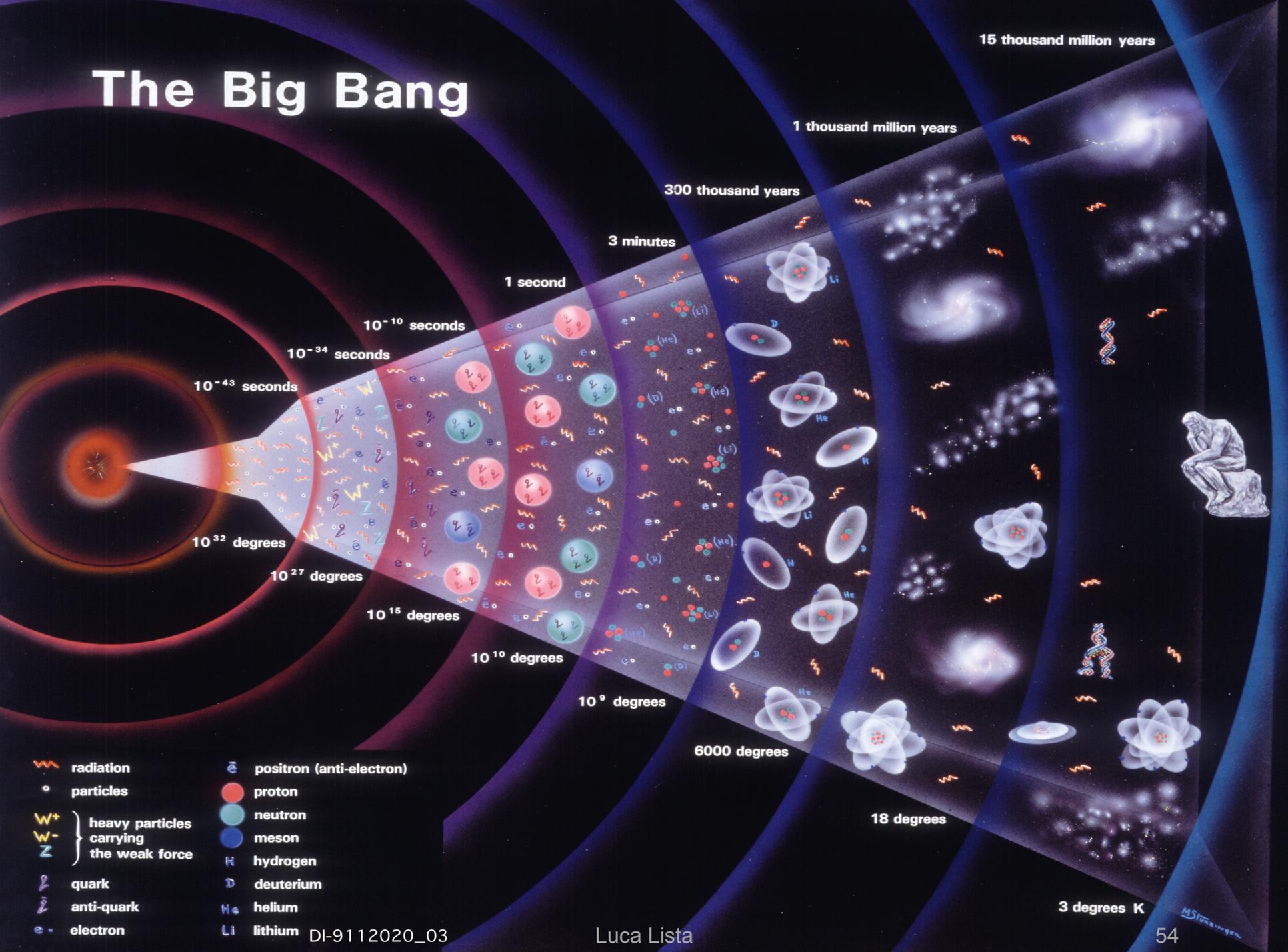
- Alcune teorie prevedono l'esistenza di nuove dimensioni spaziali
- Le nuove dimensioni non sono accessibili nella nostra esperienza perché "compattificate" con raggi di curvatura molto piccoli
- Extra dimensioni si possono manifestare con uno spettro di nuove particelle rivelabili ad LHC





- LHC non ha trovato finora segnali di nuove particelle

# The Big Bang



15 thousand million years

1 thousand million years

300 thousand years

3 minutes

1 second

$10^{-10}$  seconds

$10^{-34}$  seconds

$10^{-43}$  seconds

$10^{32}$  degrees

$10^{27}$  degrees

$10^{15}$  degrees

$10^{10}$  degrees

$10^9$  degrees

6000 degrees

18 degrees

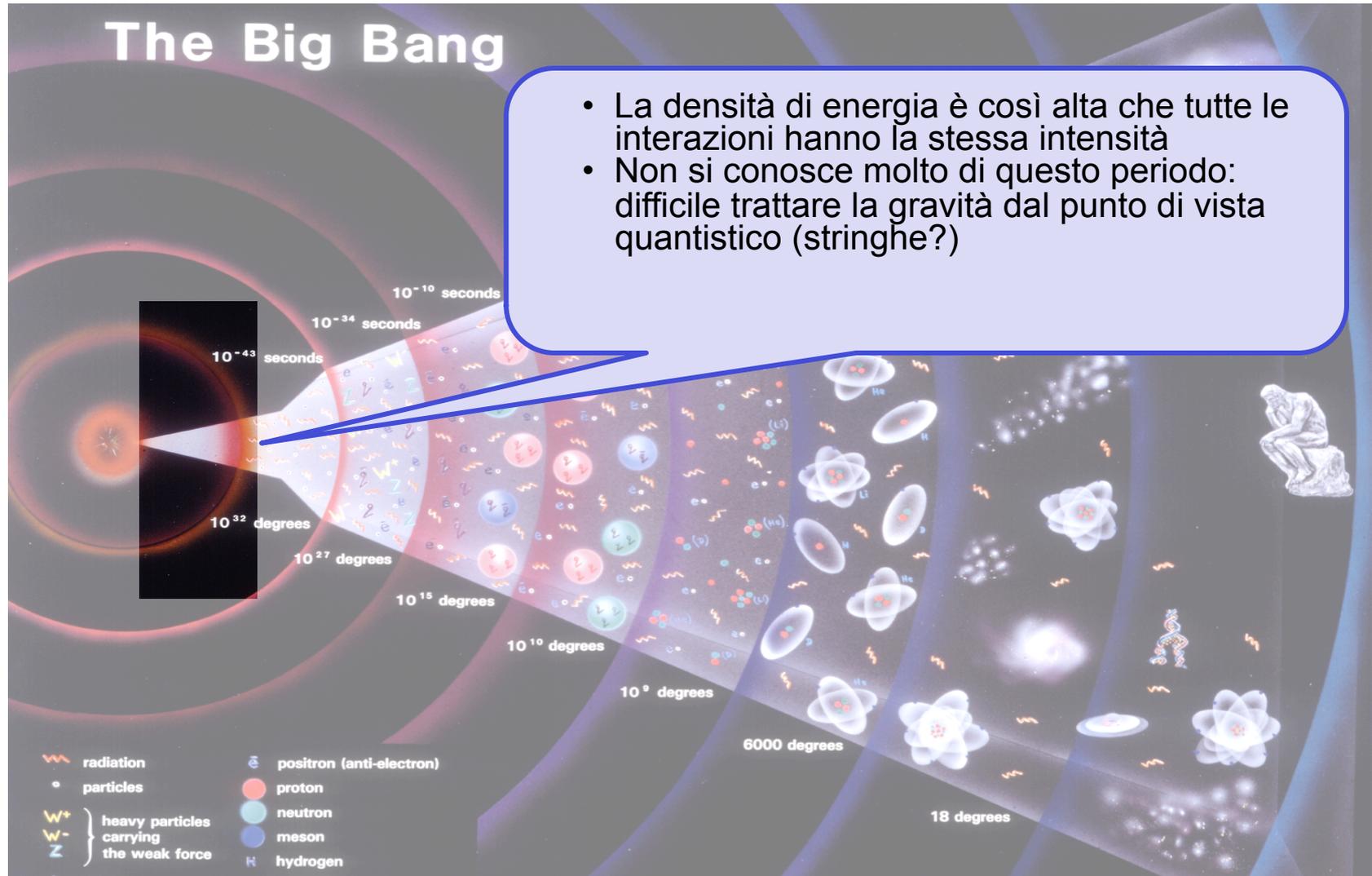
3 degrees K

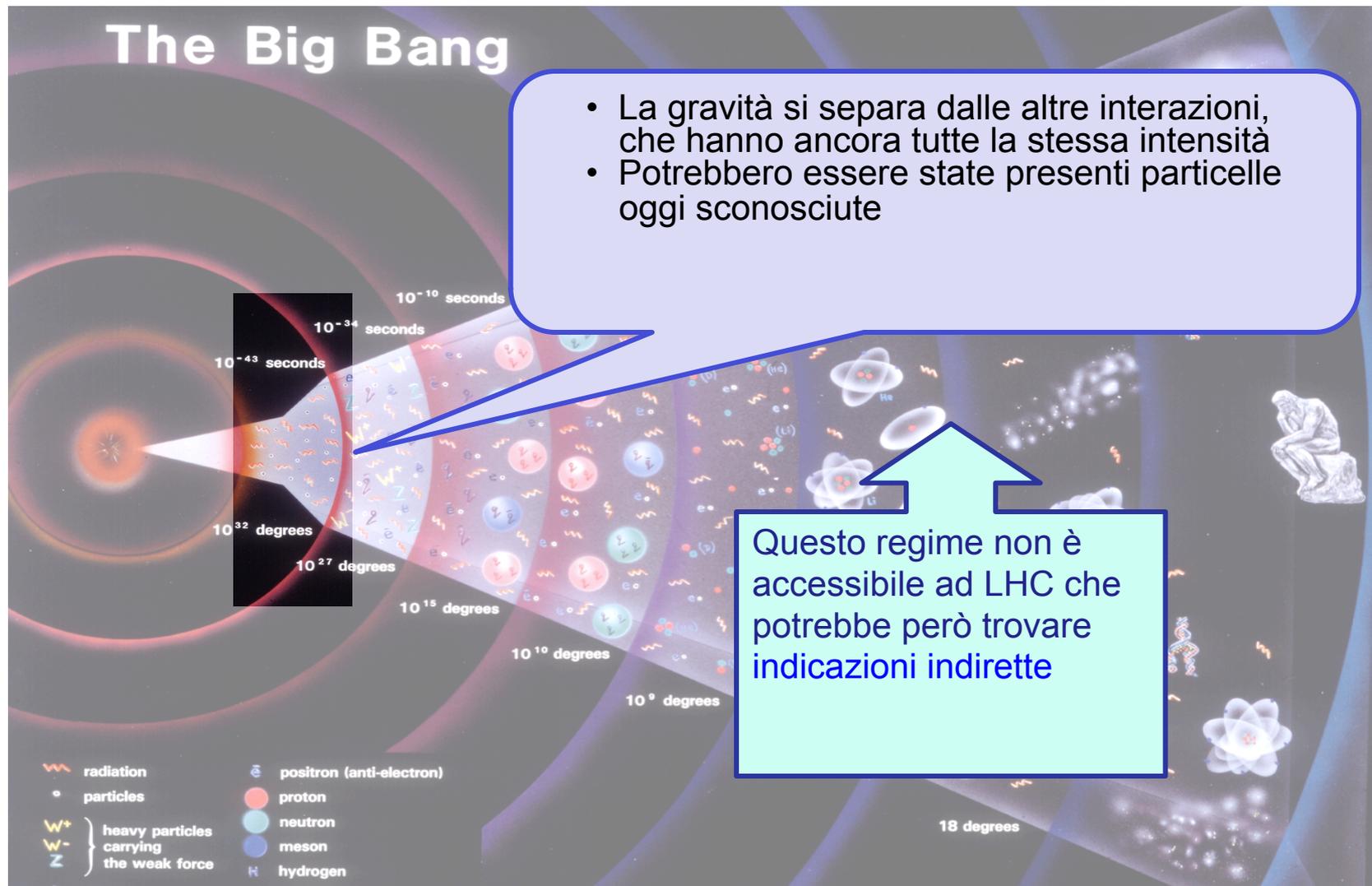
- radiation
- particles
- $W^+$  } heavy particles carrying the weak force
- $W^-$  }
- $Z$  }
- quark
- anti-quark
- electron
- positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- hydrogen
- deuterium
- helium
- lithium

DI-9112020\_03

Luca Lista

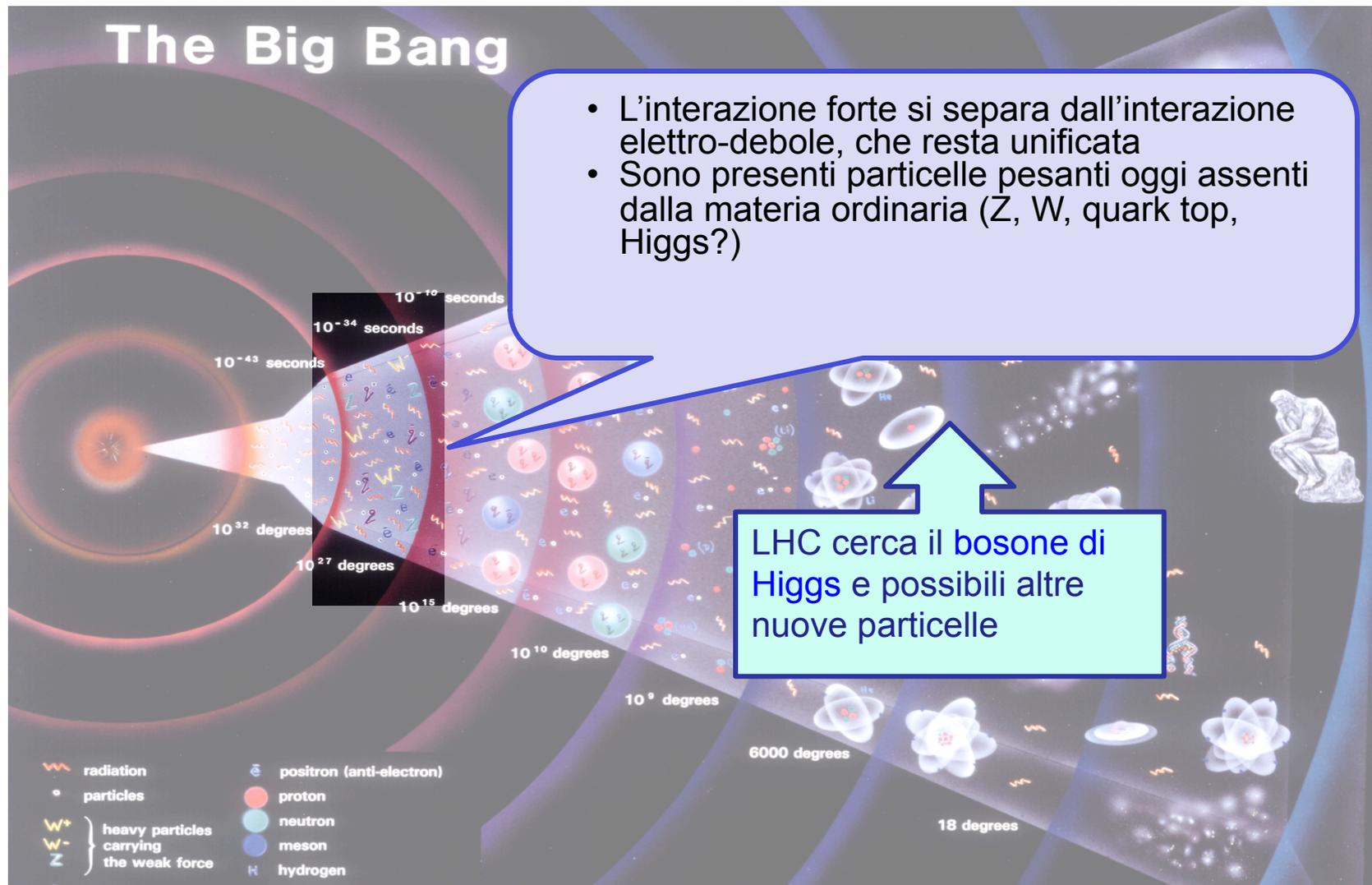
M. S. ...

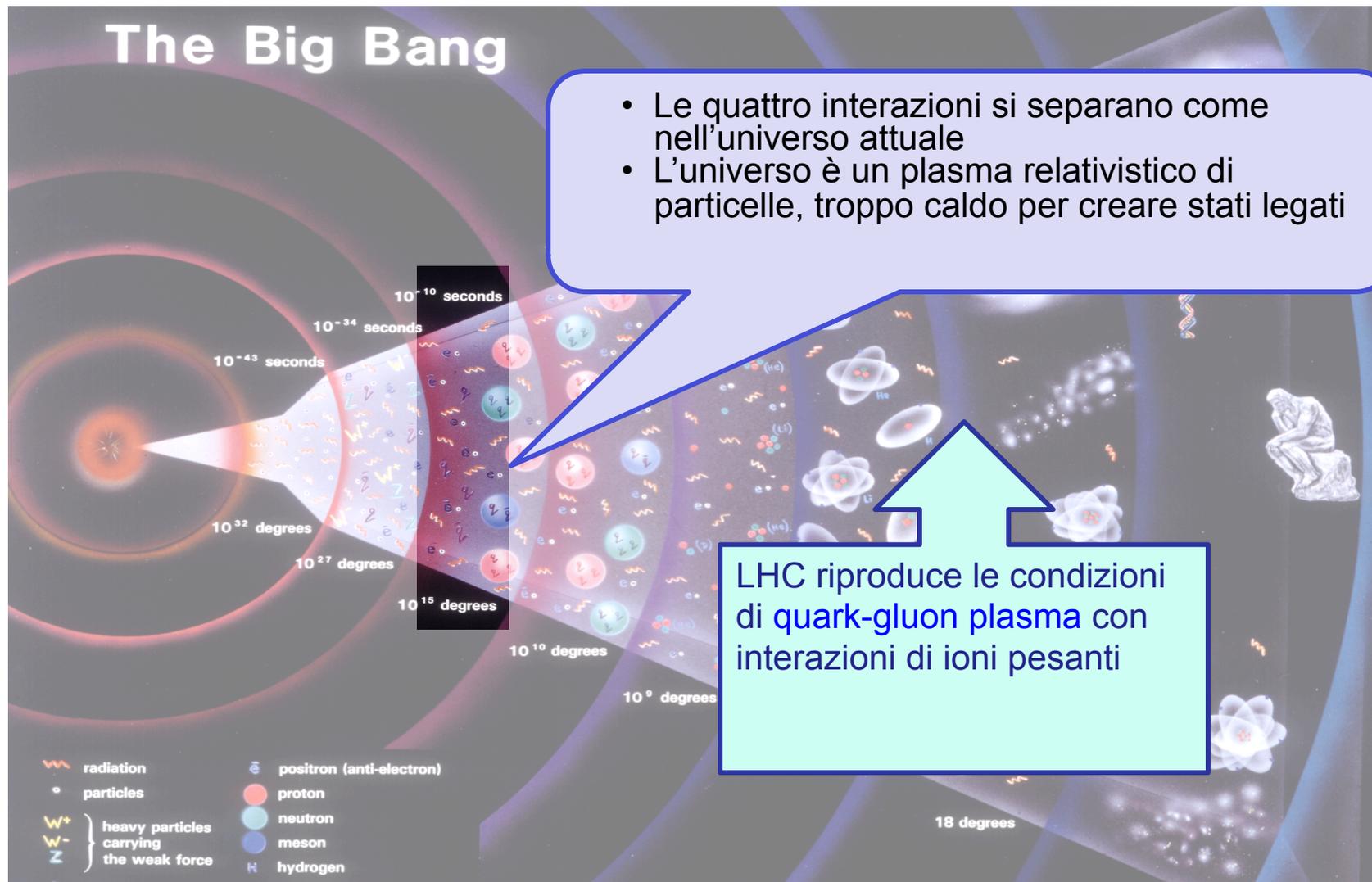


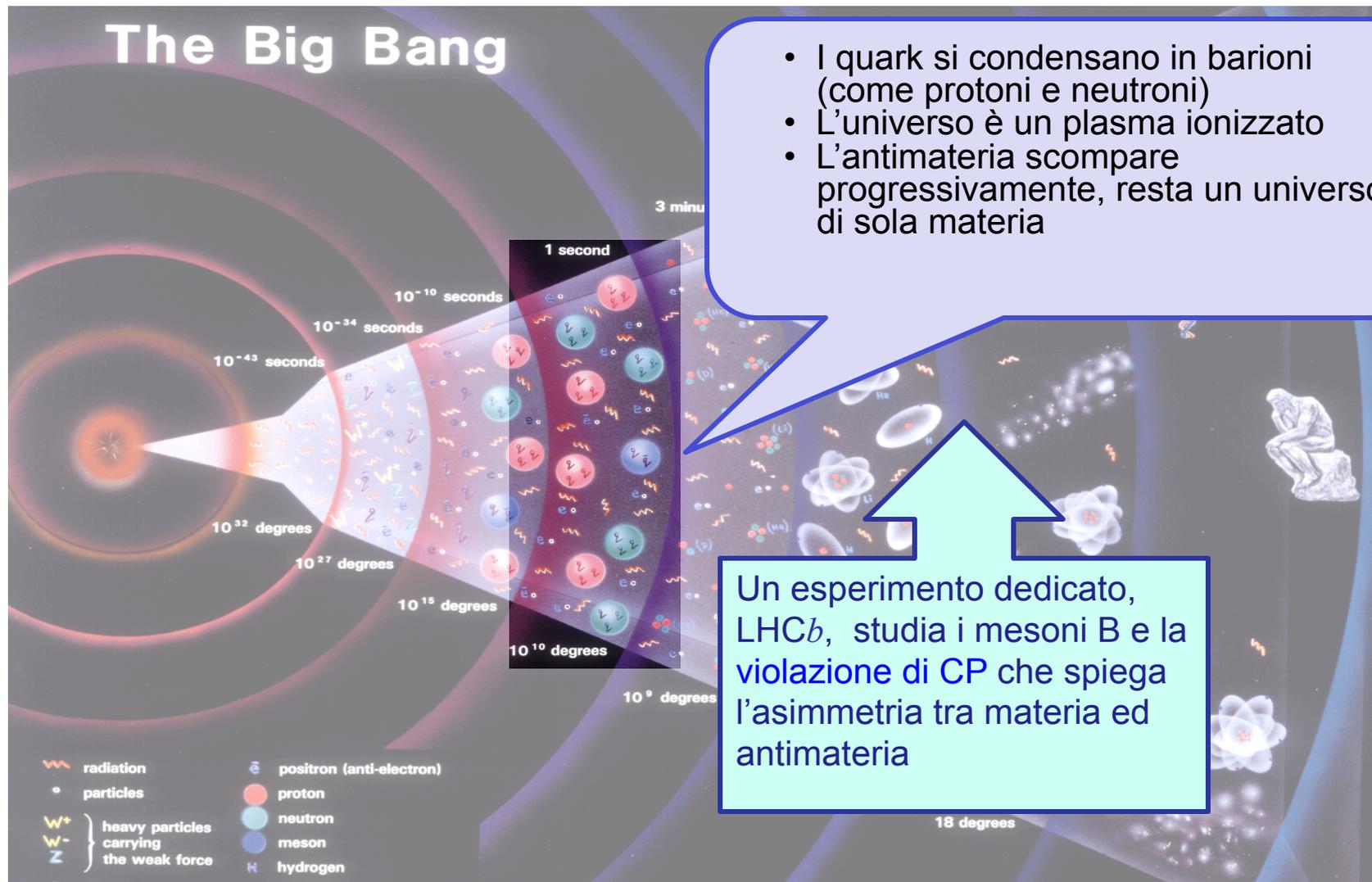


- La gravità si separa dalle altre interazioni, che hanno ancora tutte la stessa intensità
- Potrebbero essere state presenti particelle oggi sconosciute

Questo regime non è accessibile ad LHC che potrebbe però trovare indicazioni indirette



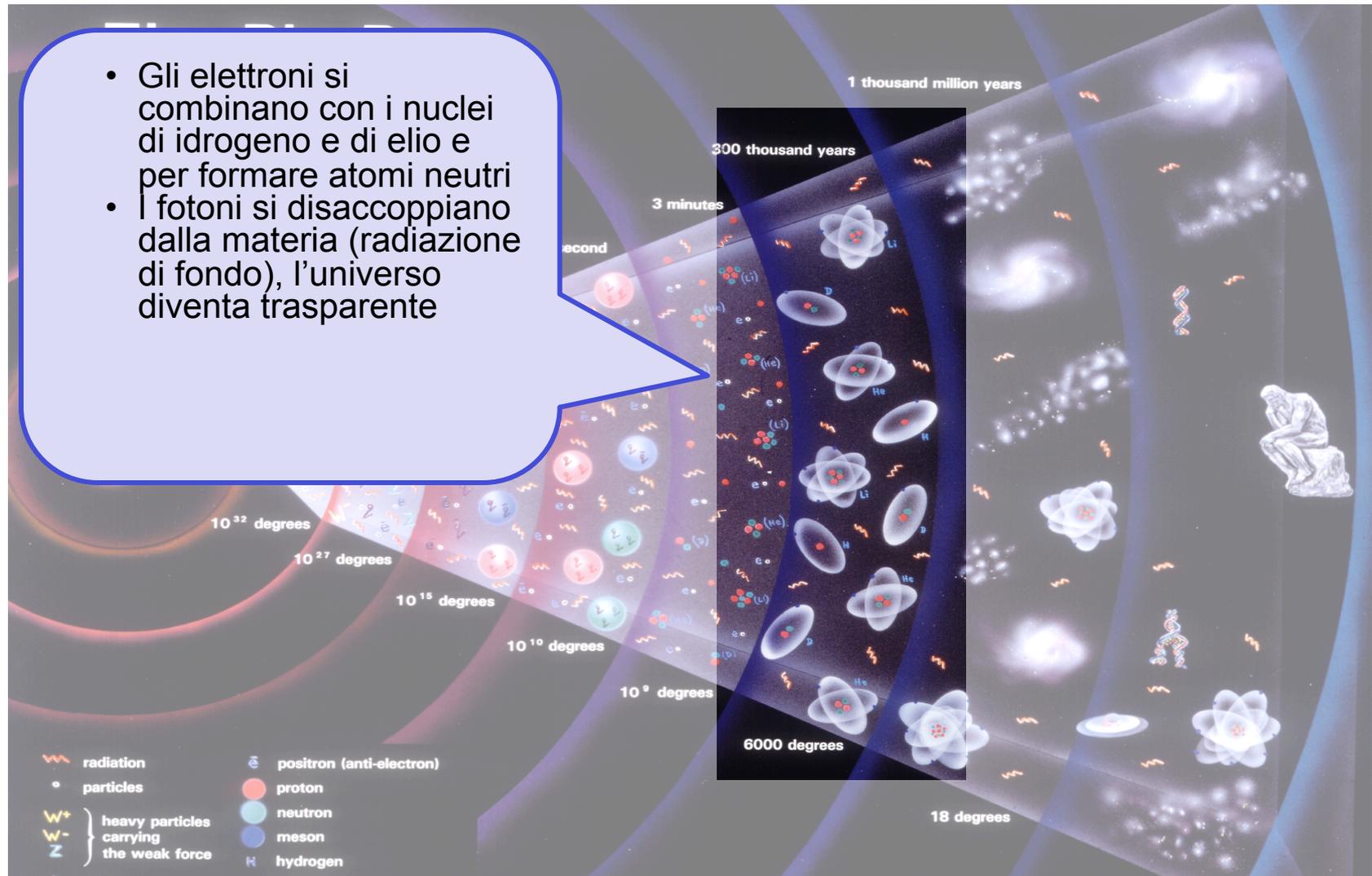




- I quark si condensano in barioni (come protoni e neutroni)
- L'universo è un plasma ionizzato
- L'antimateria scompare progressivamente, resta un universo di sola materia

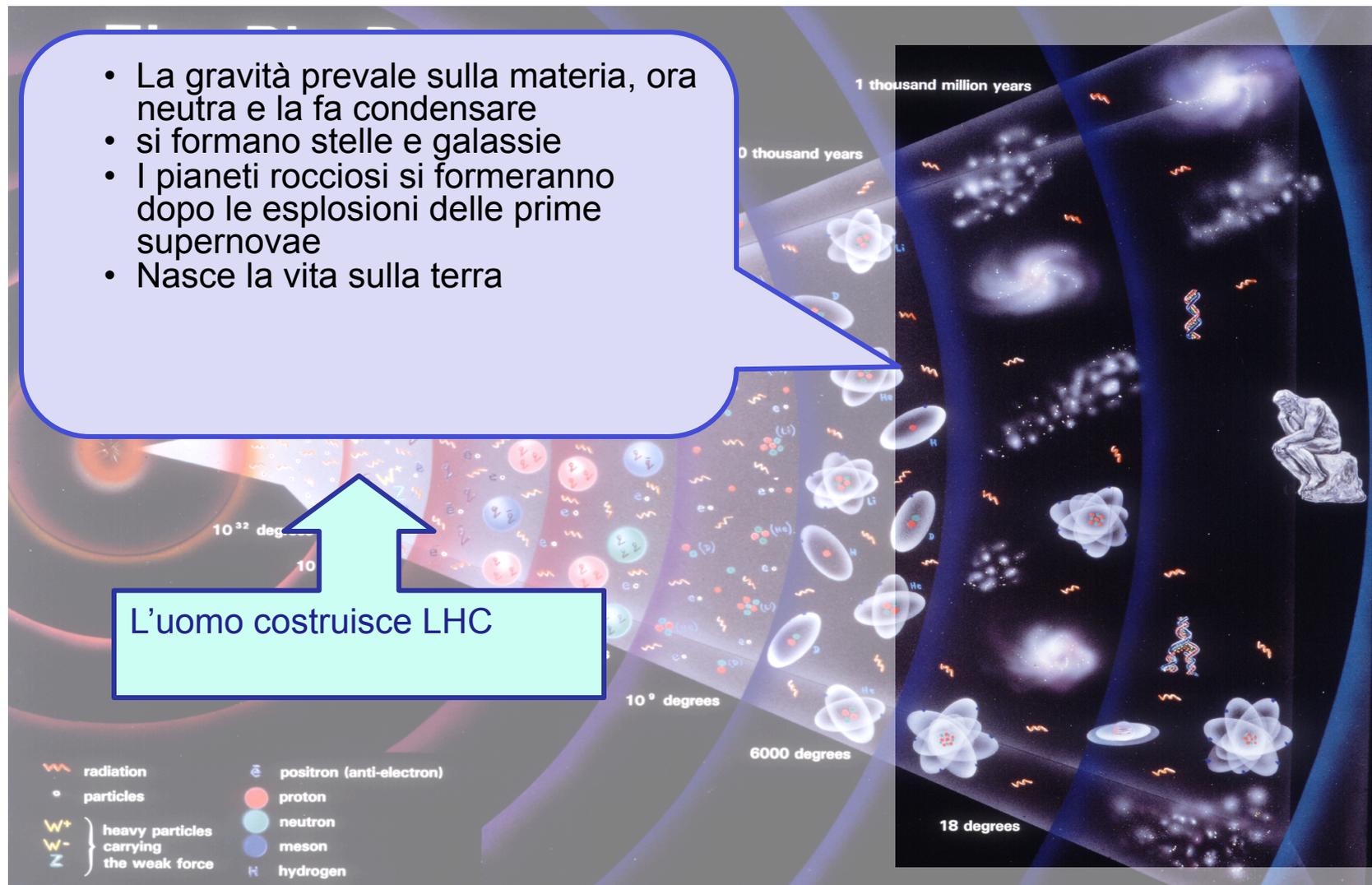
Un esperimento dedicato, LHC**b**, studia i mesoni B e la violazione di CP che spiega l'asimmetria tra materia ed antimateria

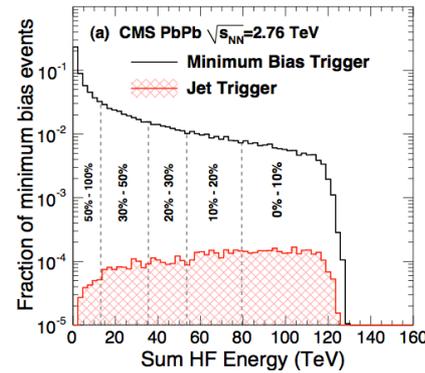
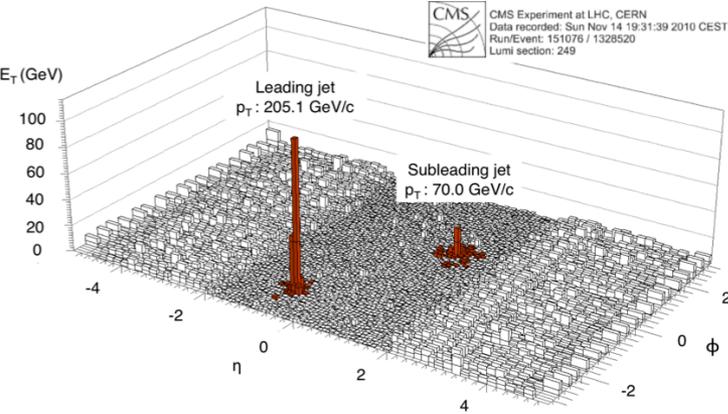
- Gli elettroni si combinano con i nuclei di idrogeno e di elio e per formare atomi neutri
- I fotoni si disaccoppiano dalla materia (radiazione di fondo), l'universo diventa trasparente



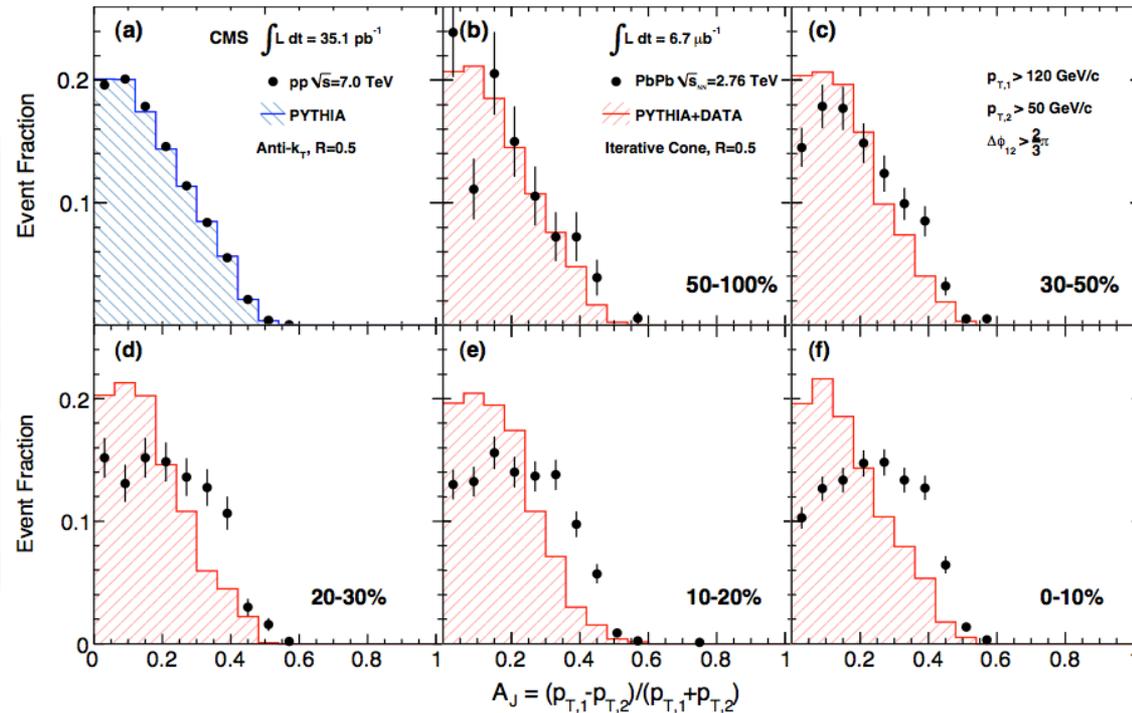
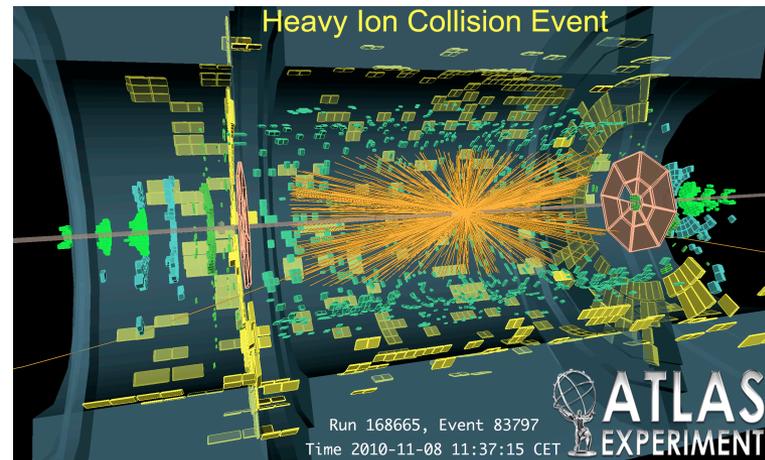
- La gravità prevale sulla materia, ora neutra e la fa condensare
- si formano stelle e galassie
- I pianeti rocciosi si formeranno dopo le esplosioni delle prime supernovae
- Nasce la vita sulla terra

L'uomo costruisce LHC





## Jet quenching in collisioni Pb-Pb



- LHC ha cominciato a studiare fenomeni fisici di frontiera e ha prodotto le prime misure sulla ricerca del bosone di Higgs
- Il programma di LHC durerà per i prossimi 10 anni ed oltre
- Forse anche qualcuno di voi parteciperà alle scoperte di LHC nei prossimi anni!





# Riferimenti



- CERN: <http://www.cern.ch>
- LHC: <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
- CMS: <http://cms.cern.ch>
- ATLAS: <http://atlas.cern.ch>
- Visita il CERN: <http://outreach.web.cern.ch/outreach/en/Visits/Intro-en.html>

- Potete trovarmi su:



[luca.lista@na.infn.it](mailto:luca.lista@na.infn.it)

