



# La Fisica al Large Hadron Collider

## e i primi risultati

Luca Lista

*INFN - Napoli*

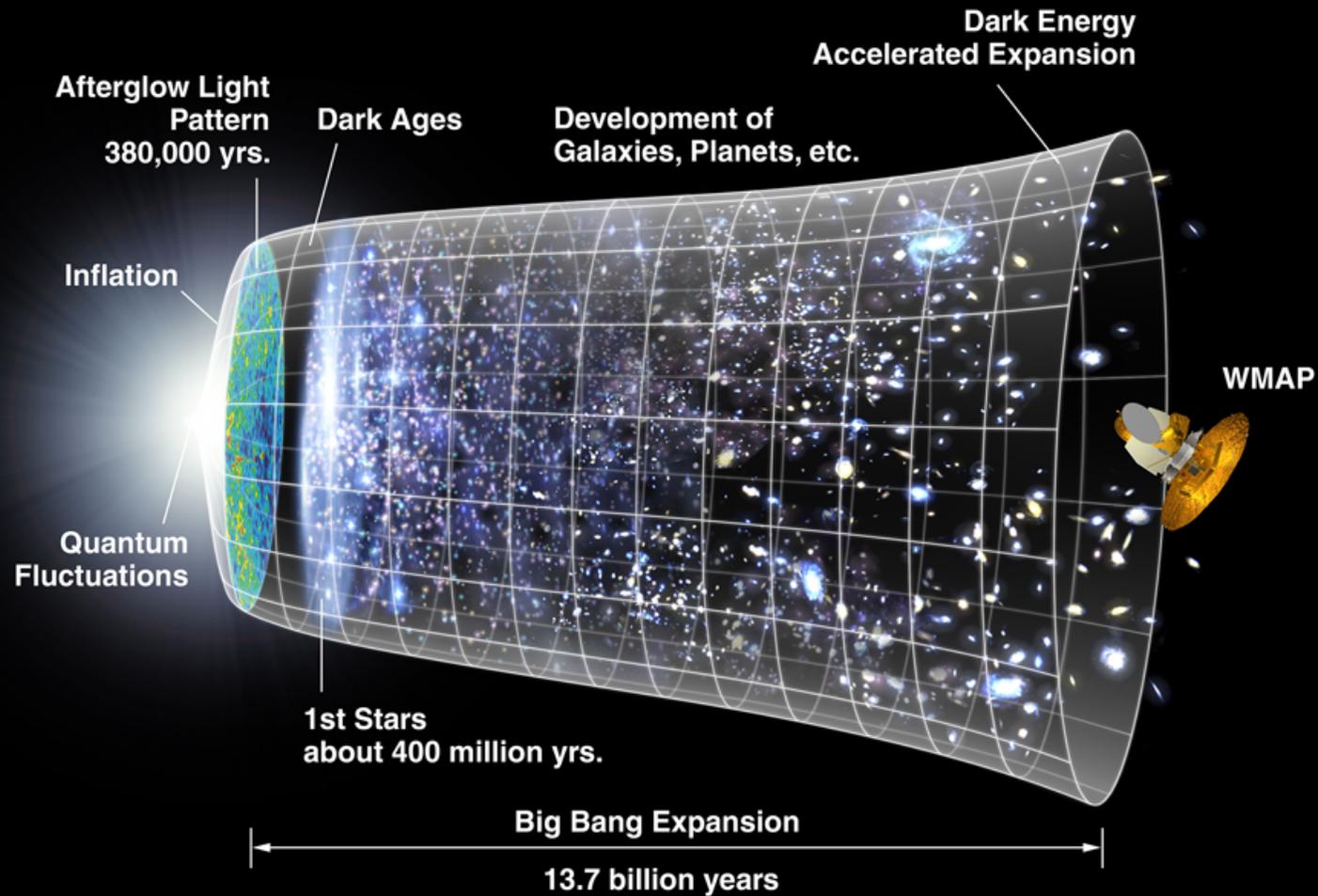
*CMS*

# 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

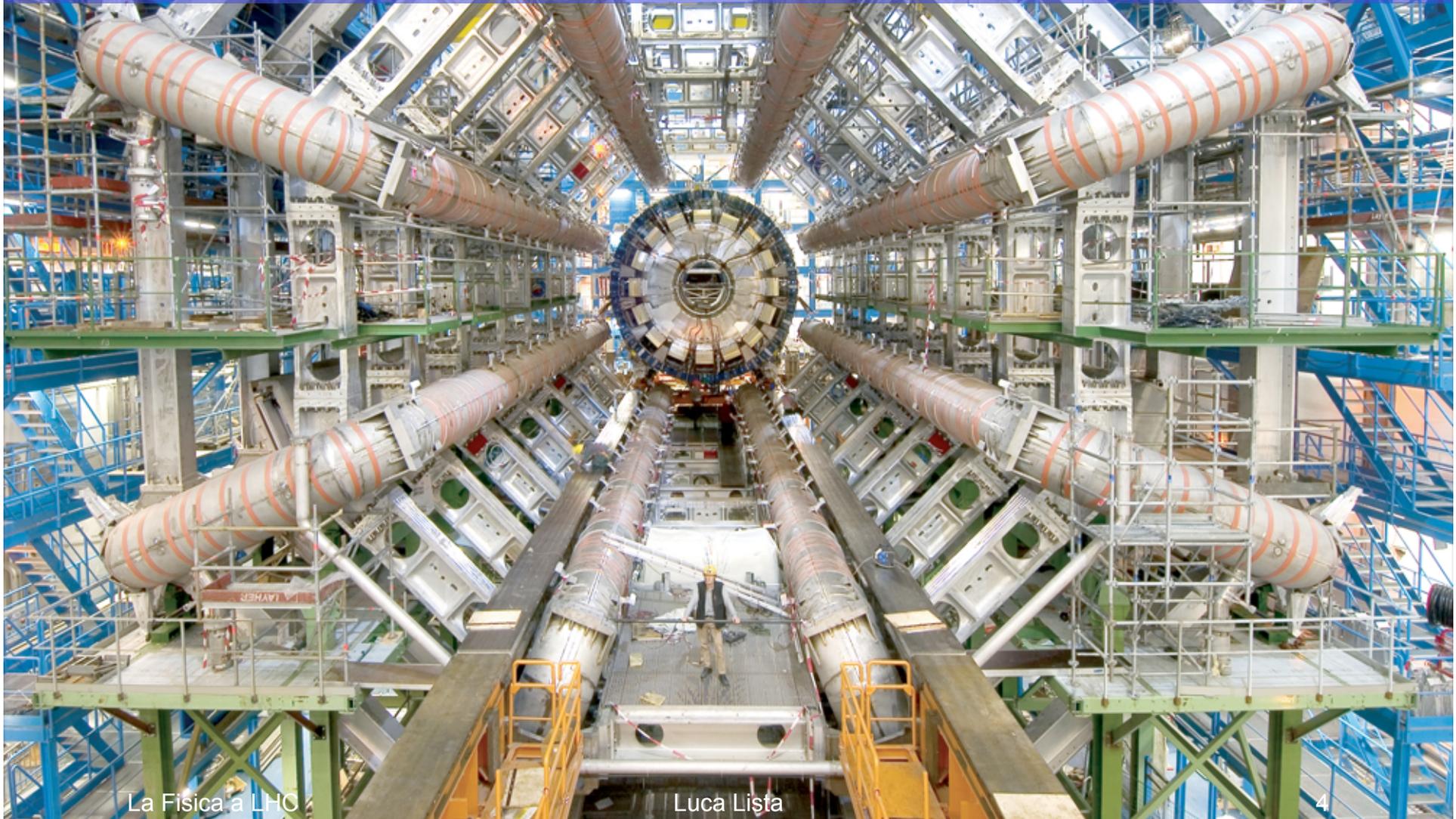


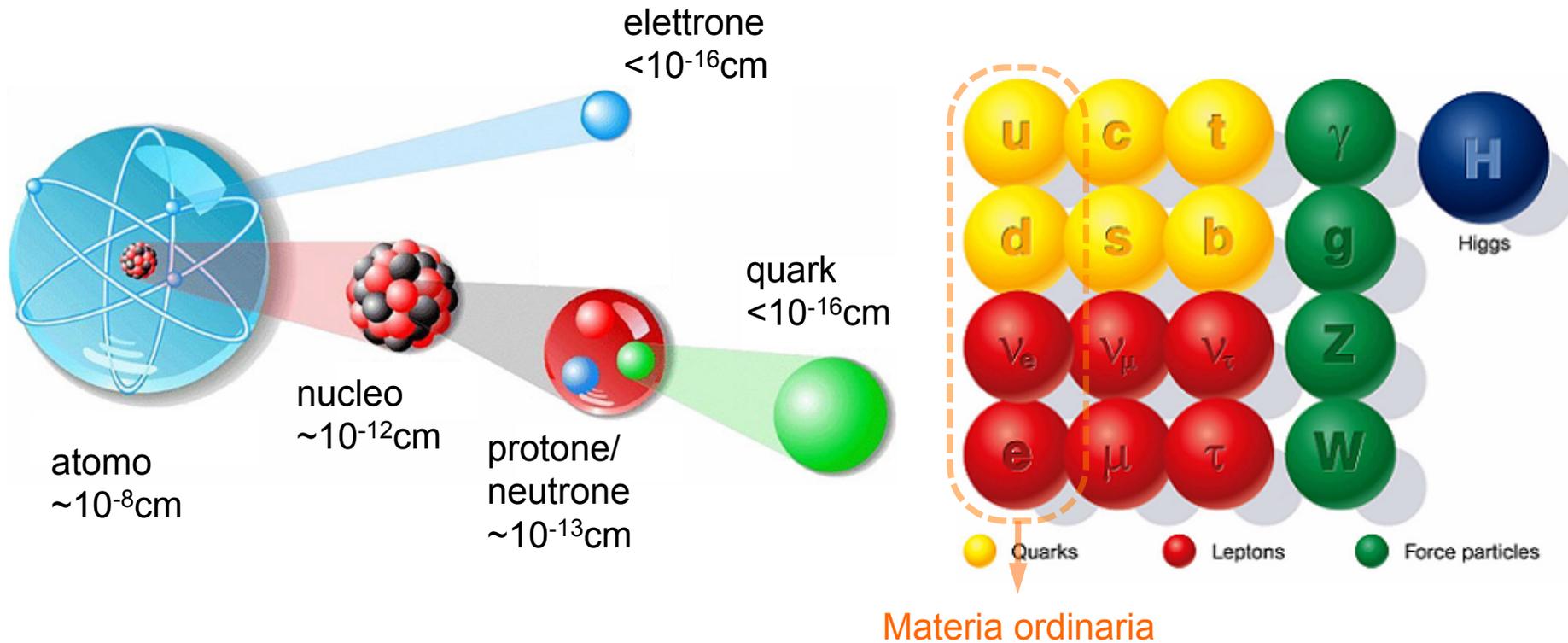


# Gli esperimenti



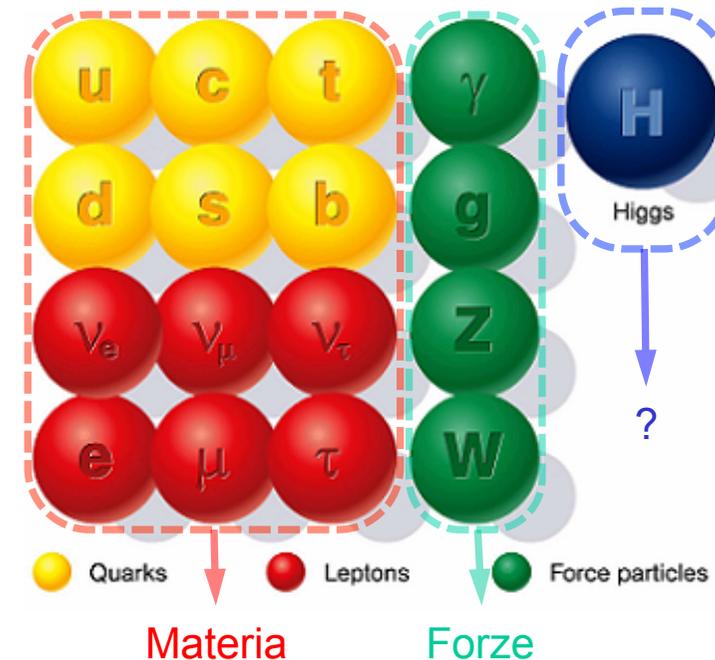
- Quattro esperimenti giganteschi funzionano come enormi macchine fotografiche le collisioni: ATLAS, CMS, LHCb, ALICE



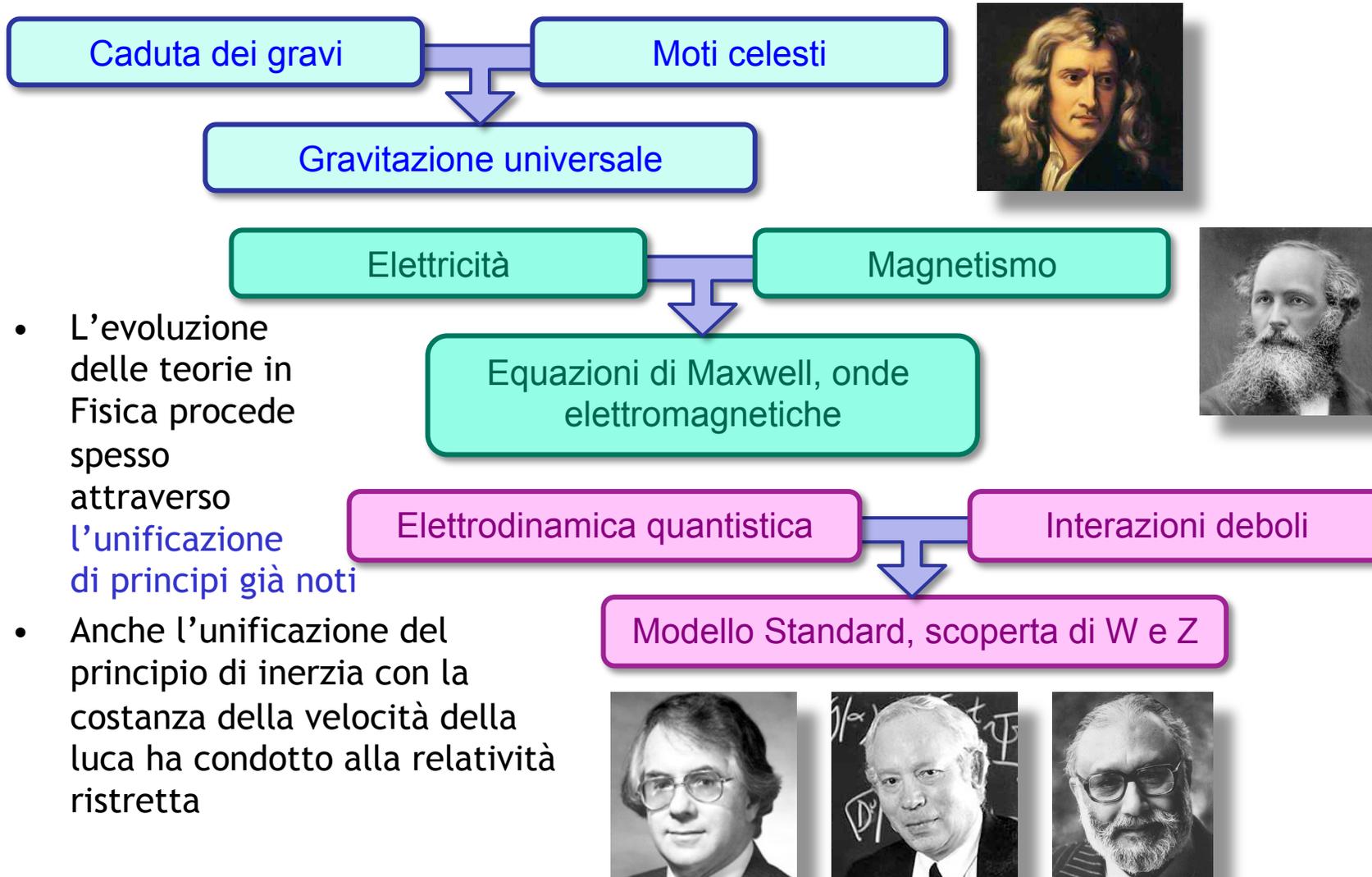


- La materia ordinaria è fatta da **elettroni** e **quark** (up, down)
- I decadimenti nucleari possono produrre **neutrini**
  - Moltissimi neutrini provengono dal Sole e ci stanno attraversando
- Esistono altre particelle simili a queste ma più **pesanti**
  - Ad esempio: i raggi cosmici contengono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

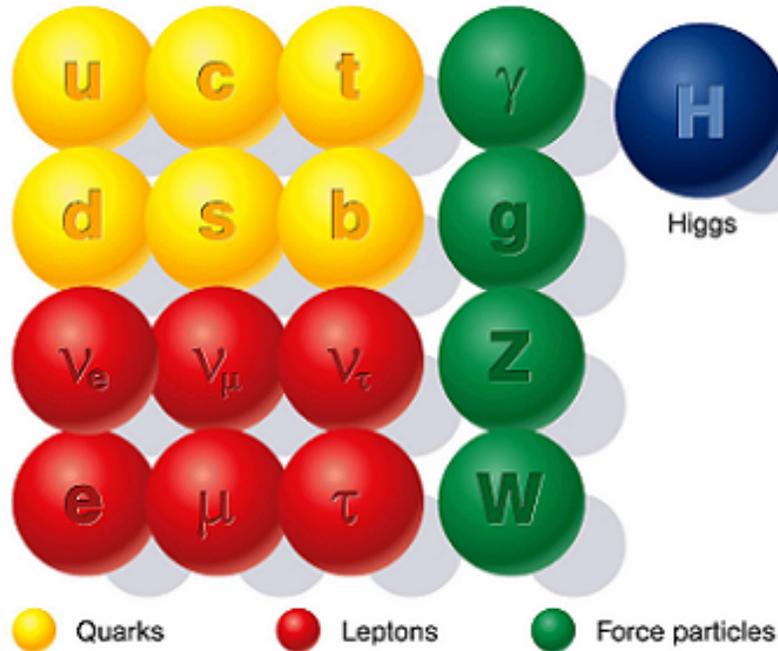
- È un **modello matematico** che descrive:
  - Le particelle che costituiscono tutta la materia che conosciamo
  - Le loro interazioni (= forze) fondamentali
- È un esempio di **unificazione** delle interazioni fondamentali
- **Non descrive tutti i fenomeni che conosciamo**
  - Es.: gravità, materia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



# Formulazione matematica



- 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

$$\mathcal{L}_{GWS} = \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - e Q_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) +$$

$$-\frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu +$$

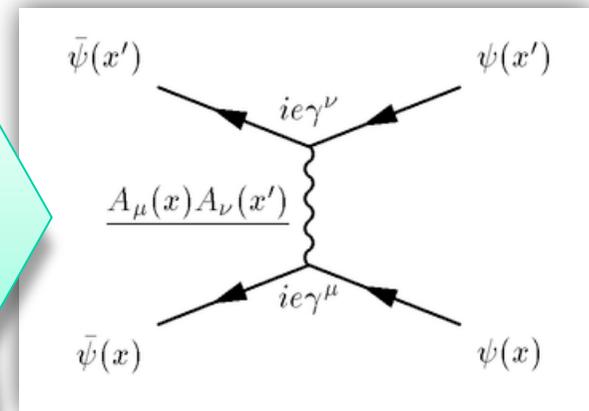
$$-\frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ +$$

$$-ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 +$$

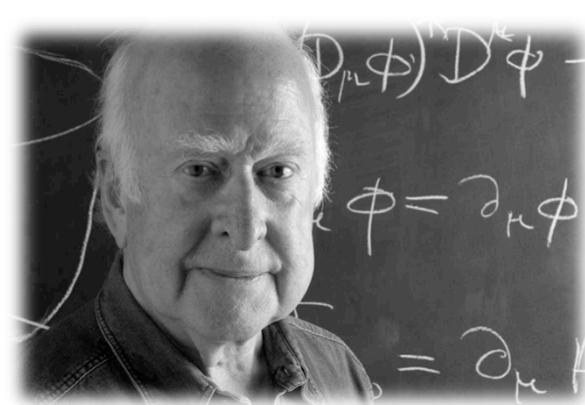
$$-\frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 +$$

$$-\frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 +$$

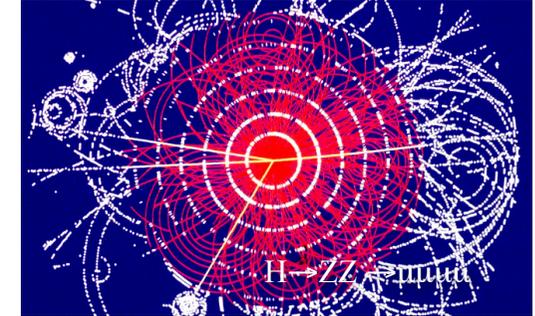
$$+\frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta$$



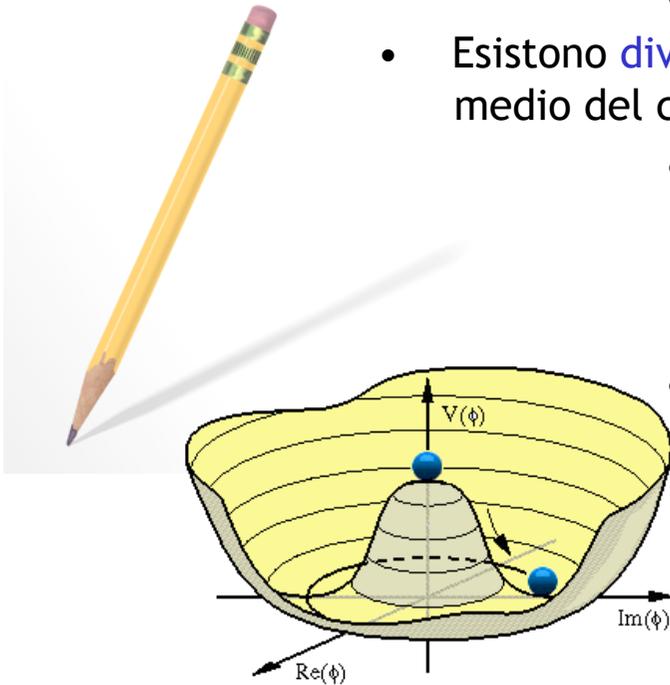
Higgs ?



- 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 valor 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!

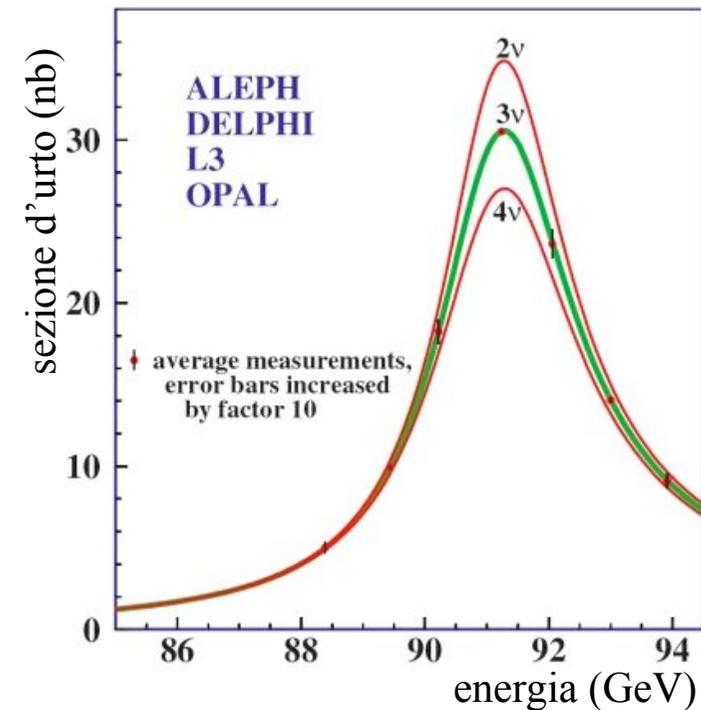
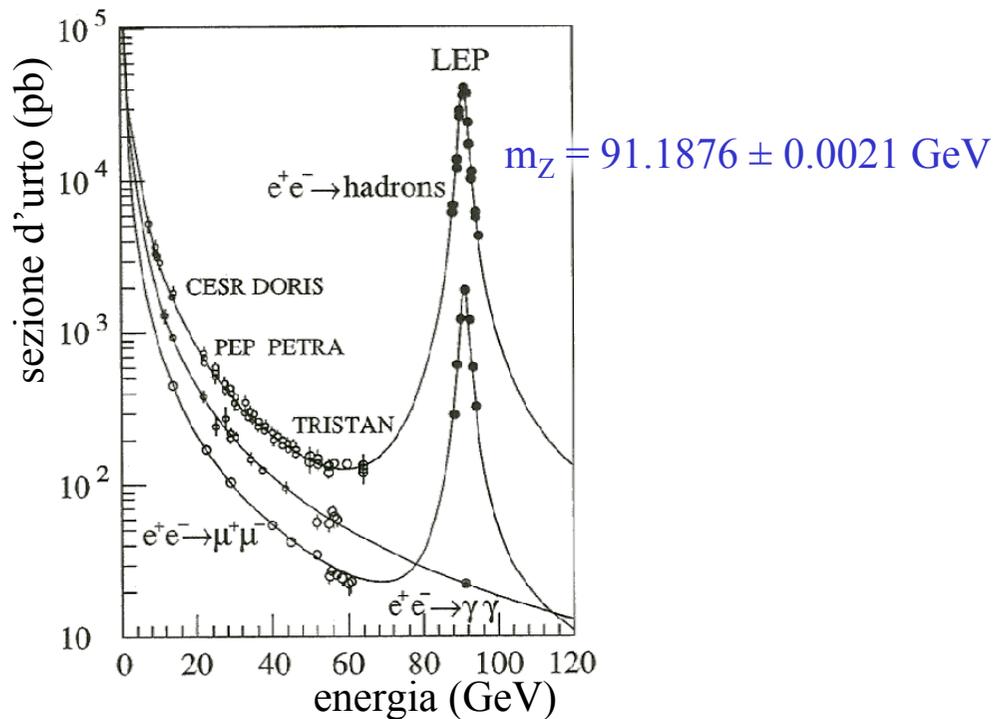




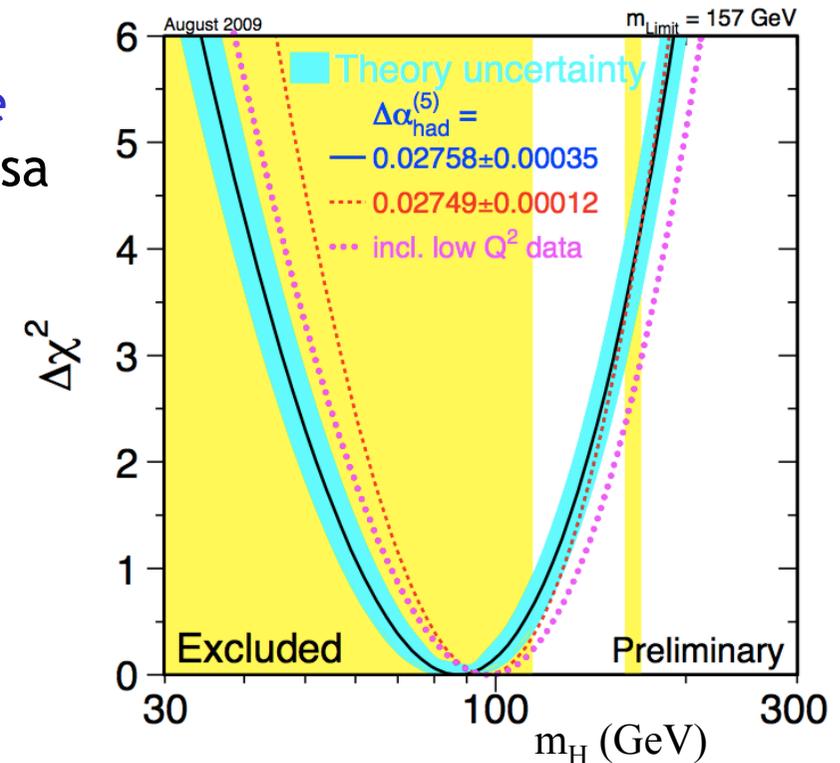
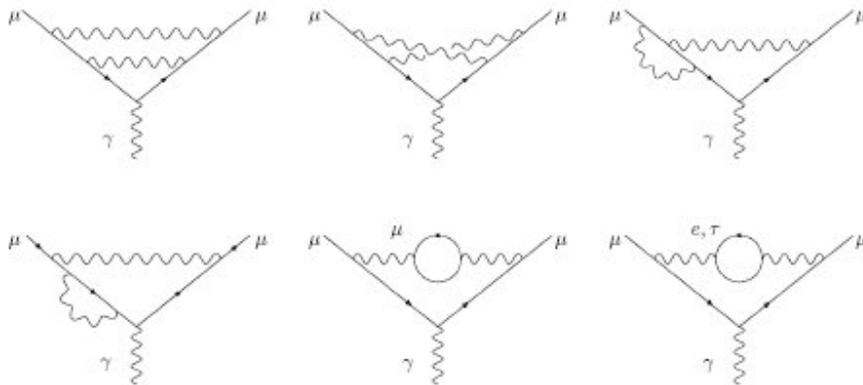
# Verifiche del Modello Standard



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

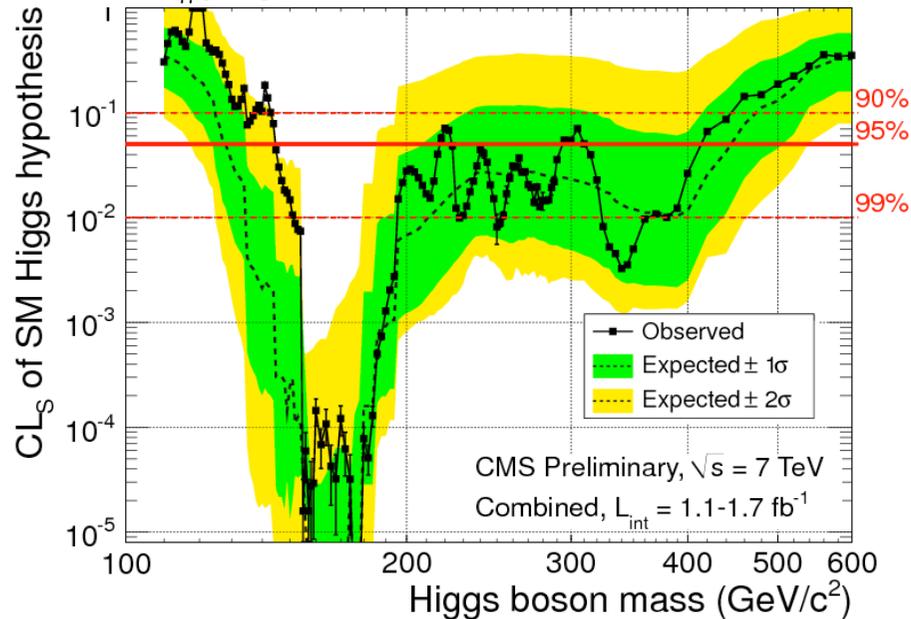
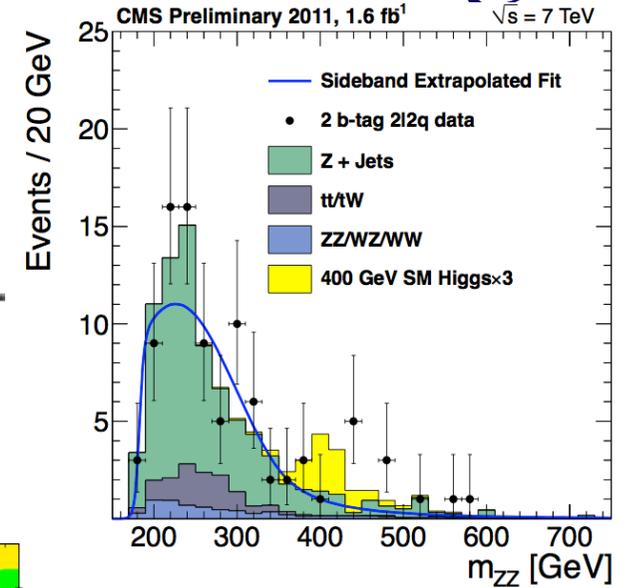
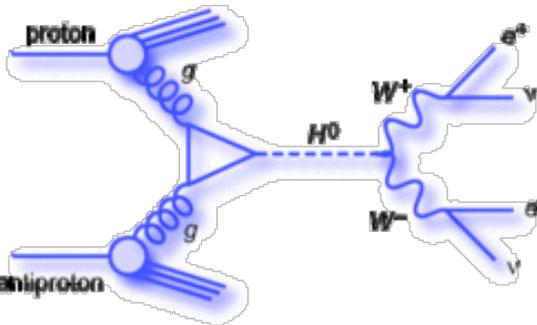
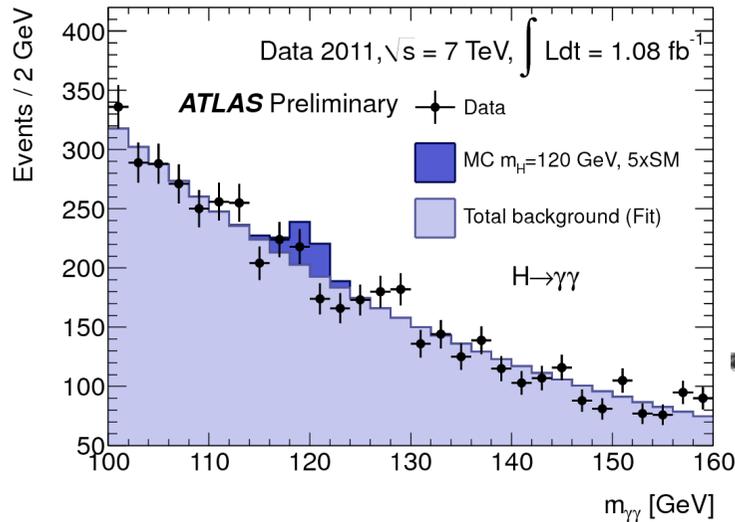


- I processi quantistici possono coinvolgere lo scambio di **particelle virtuali**, anche se di massa troppo grande per essere prodotte direttamente
- Molti processi al LEP possono contenere scambi di particelle di Higgs virtuali
- Dalle misure di precisione è possibile inferire **indirettamente** il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





# Ricerca dell'Higgs a LHC



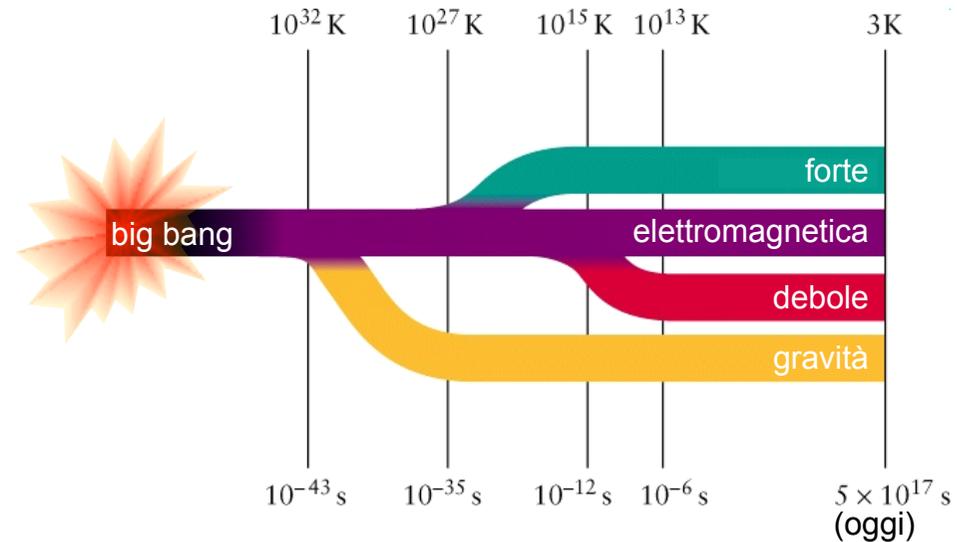
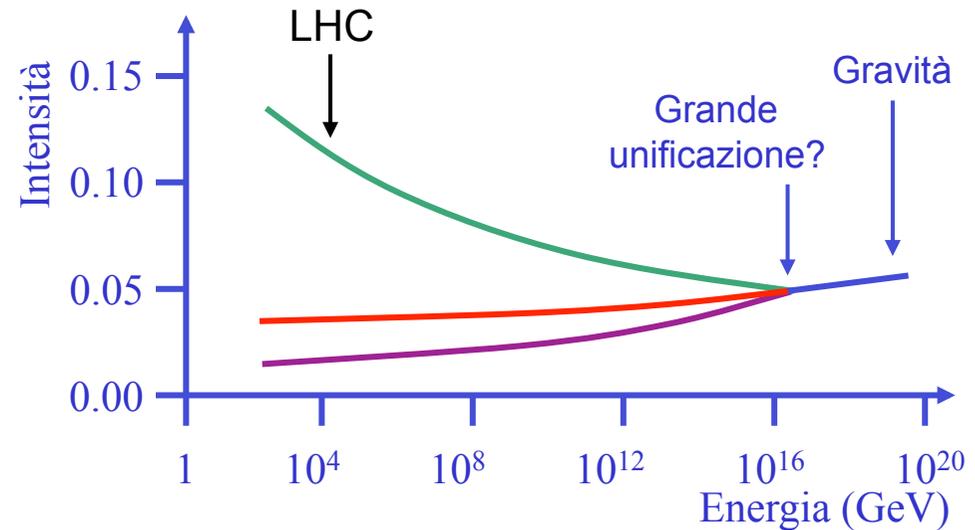
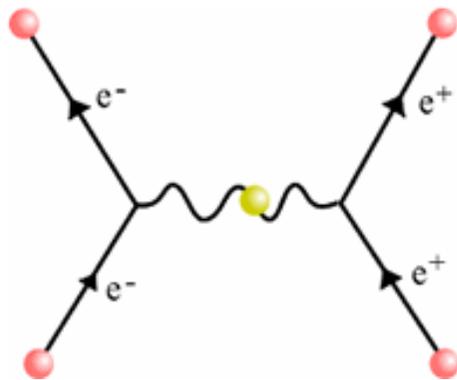
- LHC ha già escluso parte dello spettro di massa del bosone di Higgs

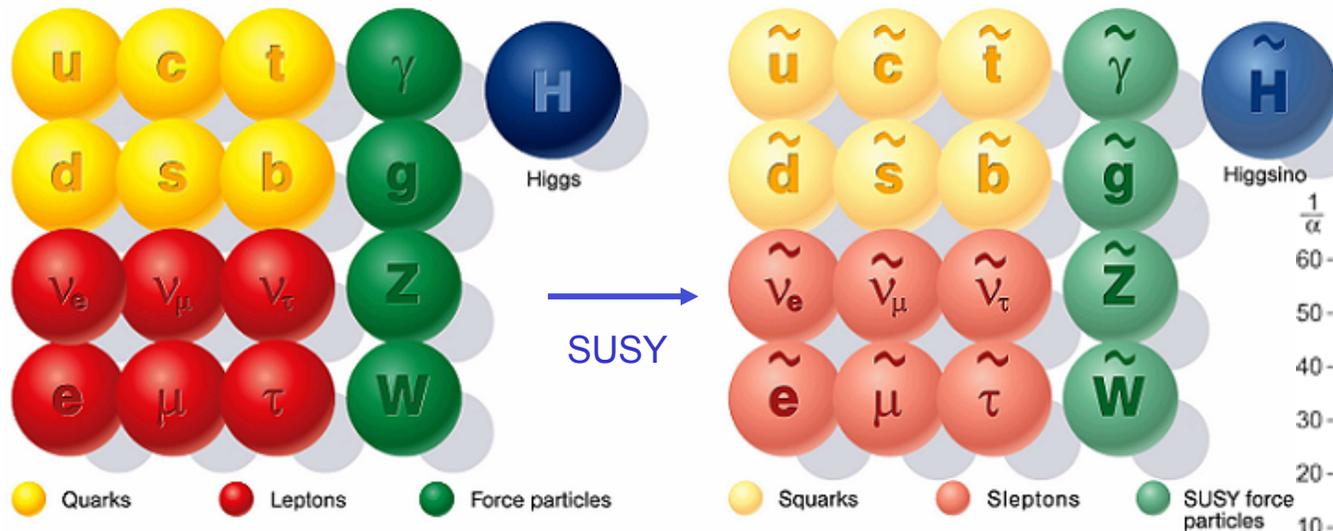


# La Grande Unificazione

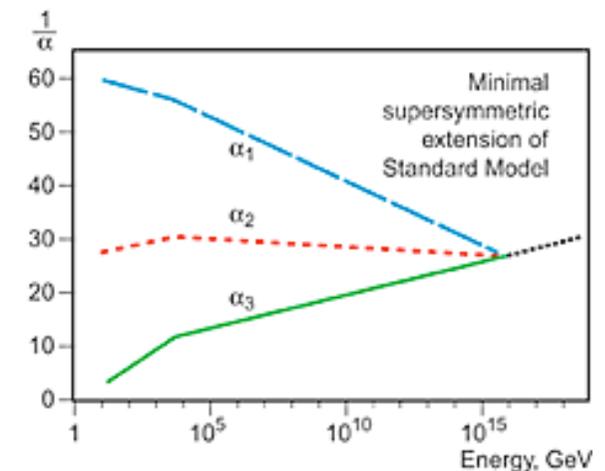
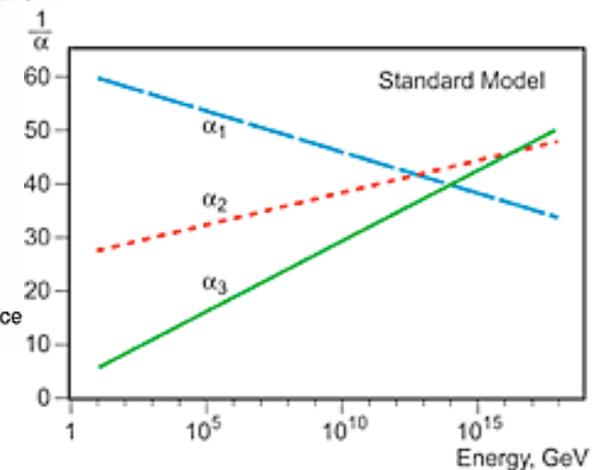


- Ognuna delle quattro interazioni fondamentali è mediata da una particella (bosone vettore)
- Il Modello Standard unifica le interazioni elettromagnetiche e nucleare debole
- È possibile che tutte le forze siano in realtà unificate in un'unica interazione fondamentale?





- 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**

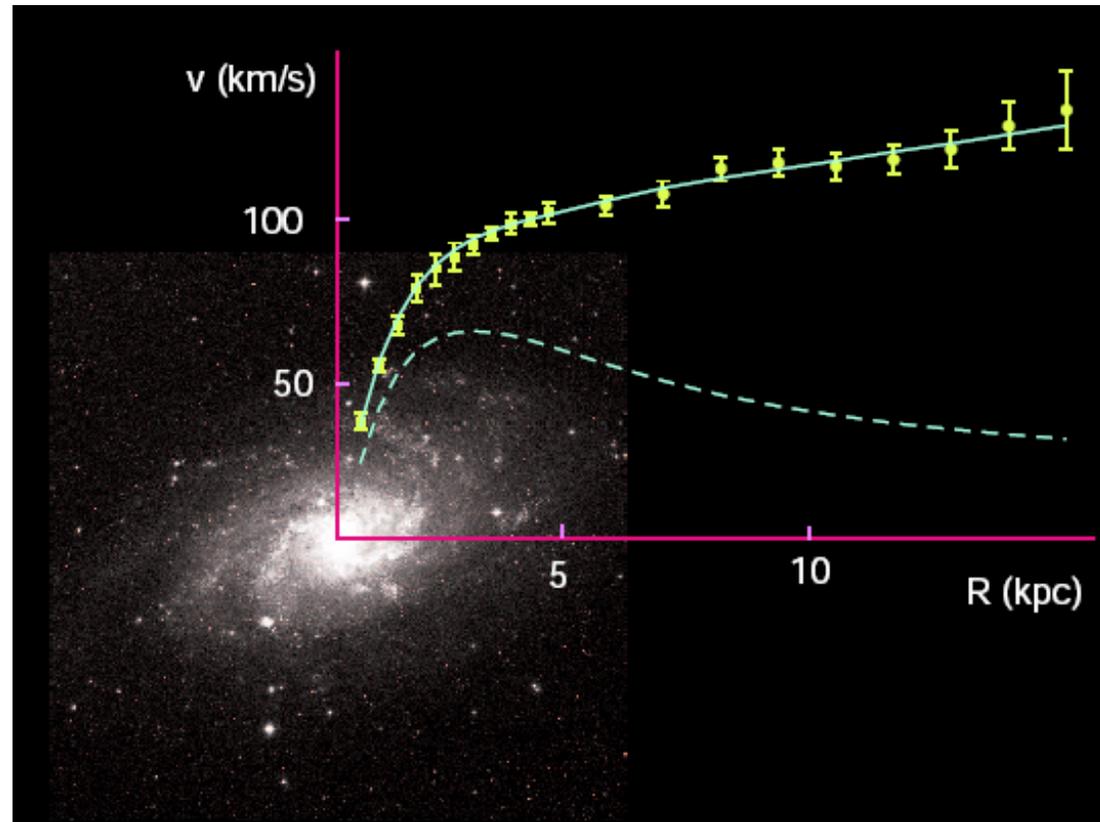
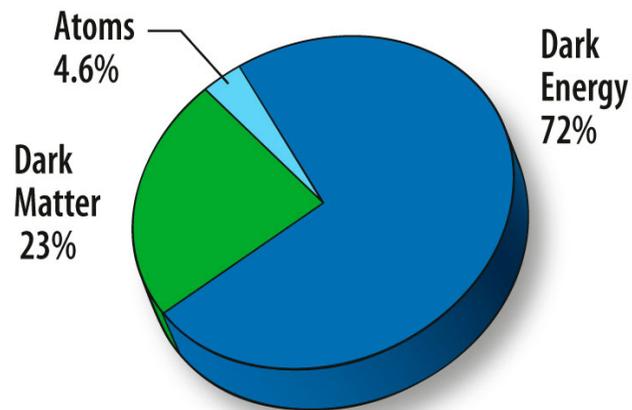




# La materia oscura



- 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



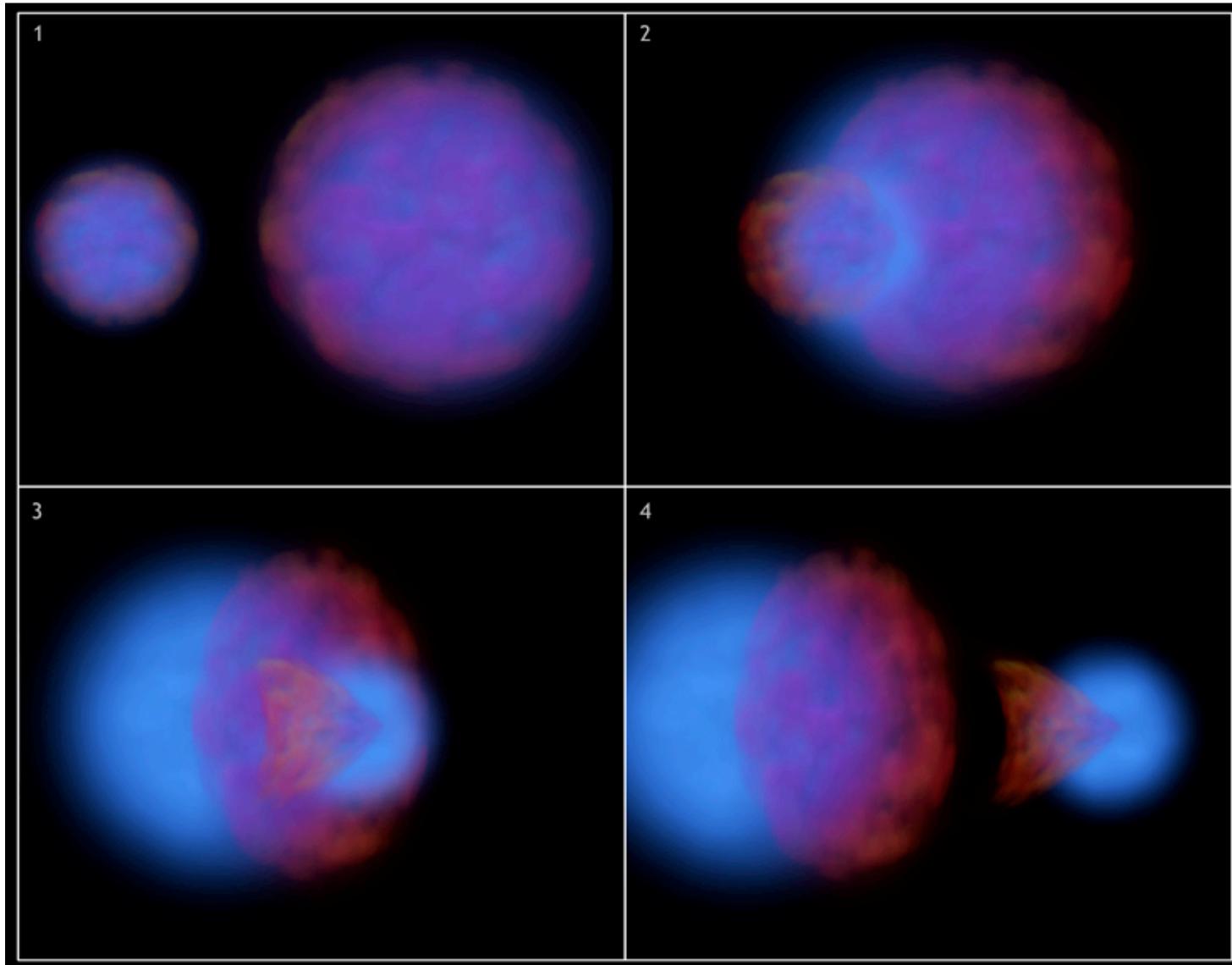
Immagine dal gravitational lensing e nel visibile

# Materia ordinaria e oscura



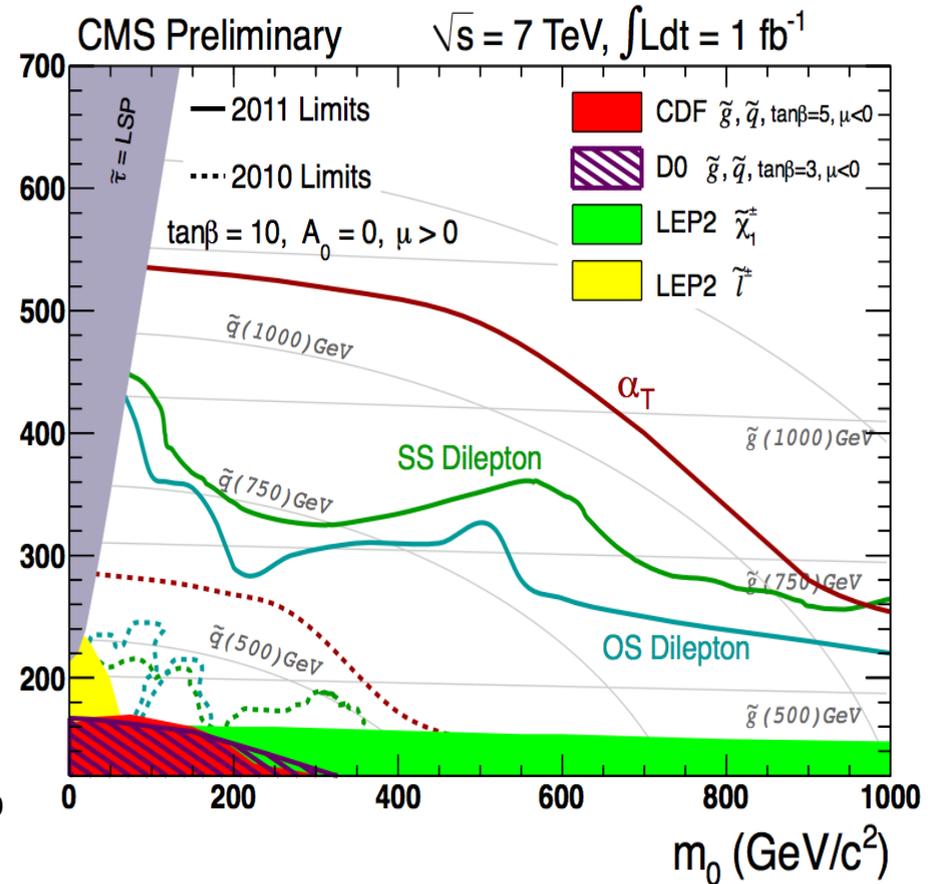
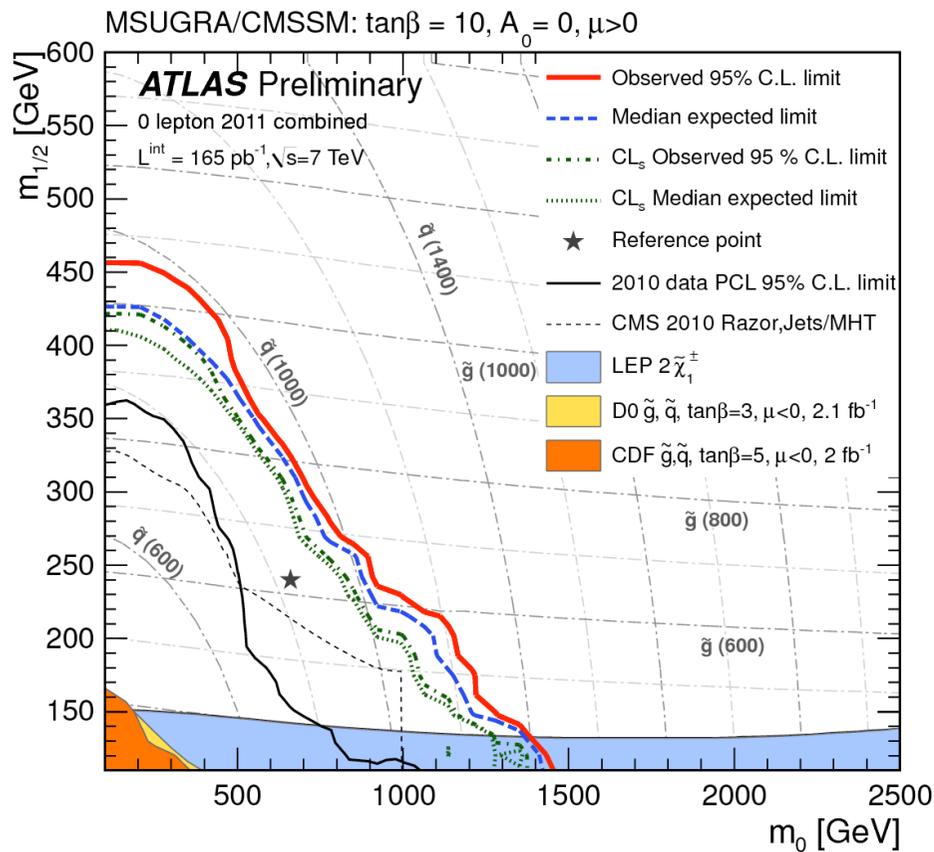


# Simulazione della collisione





# Ricerca di SUSY a LHC



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



# Unificare anche la gravità?



- 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**

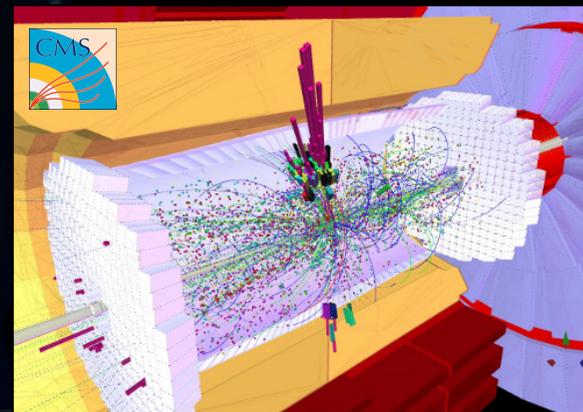


- Questi modello richiedono la presenza di **nuove dimensioni spazio-temporali**, e non sono ad oggi sufficientemente predittivi

# Extra dimensioni

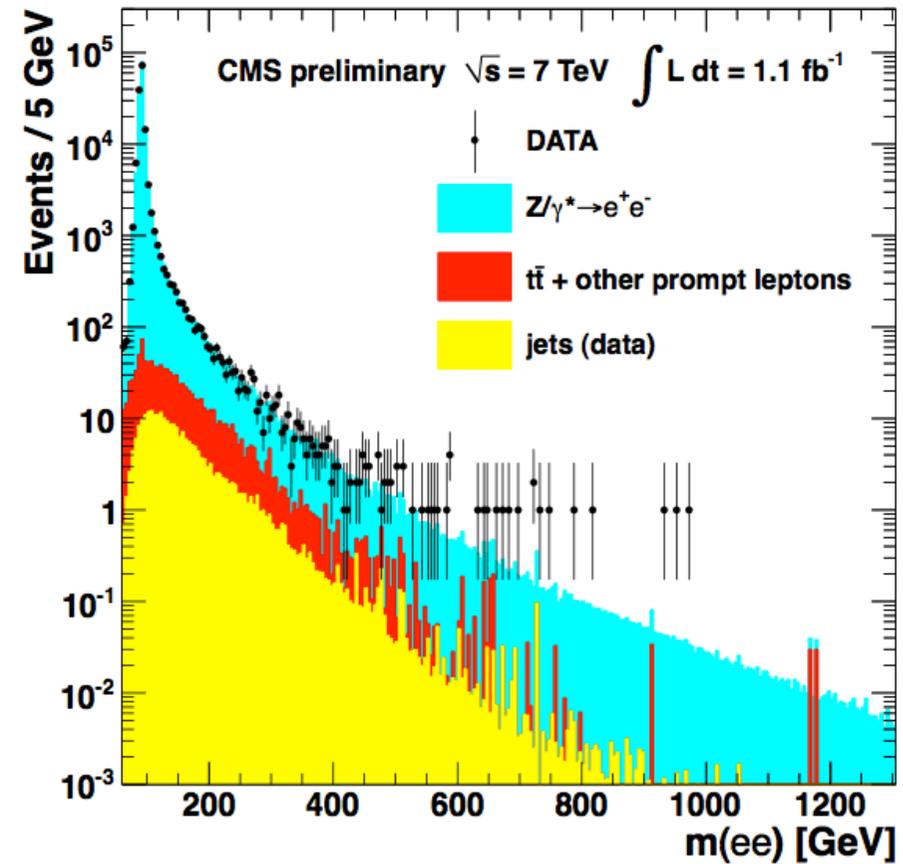
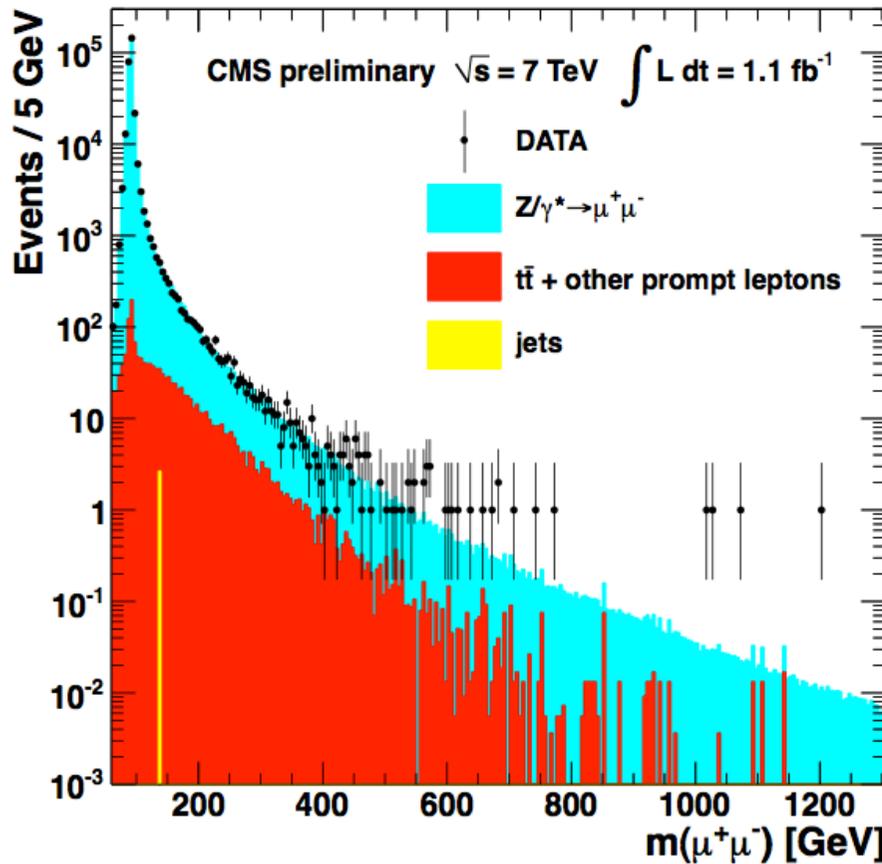


- Alcune teorie prevedono l'esistenza di nuove dimensioni spaziali
- Le nuove dimensioni non sono accessibili nella nostra esperienza perché "compattificate" con raggi di curvatura molto piccoli
- Extra dimensioni si possono manifestare con uno spettro di nuove particelle rivelabili ad LHC



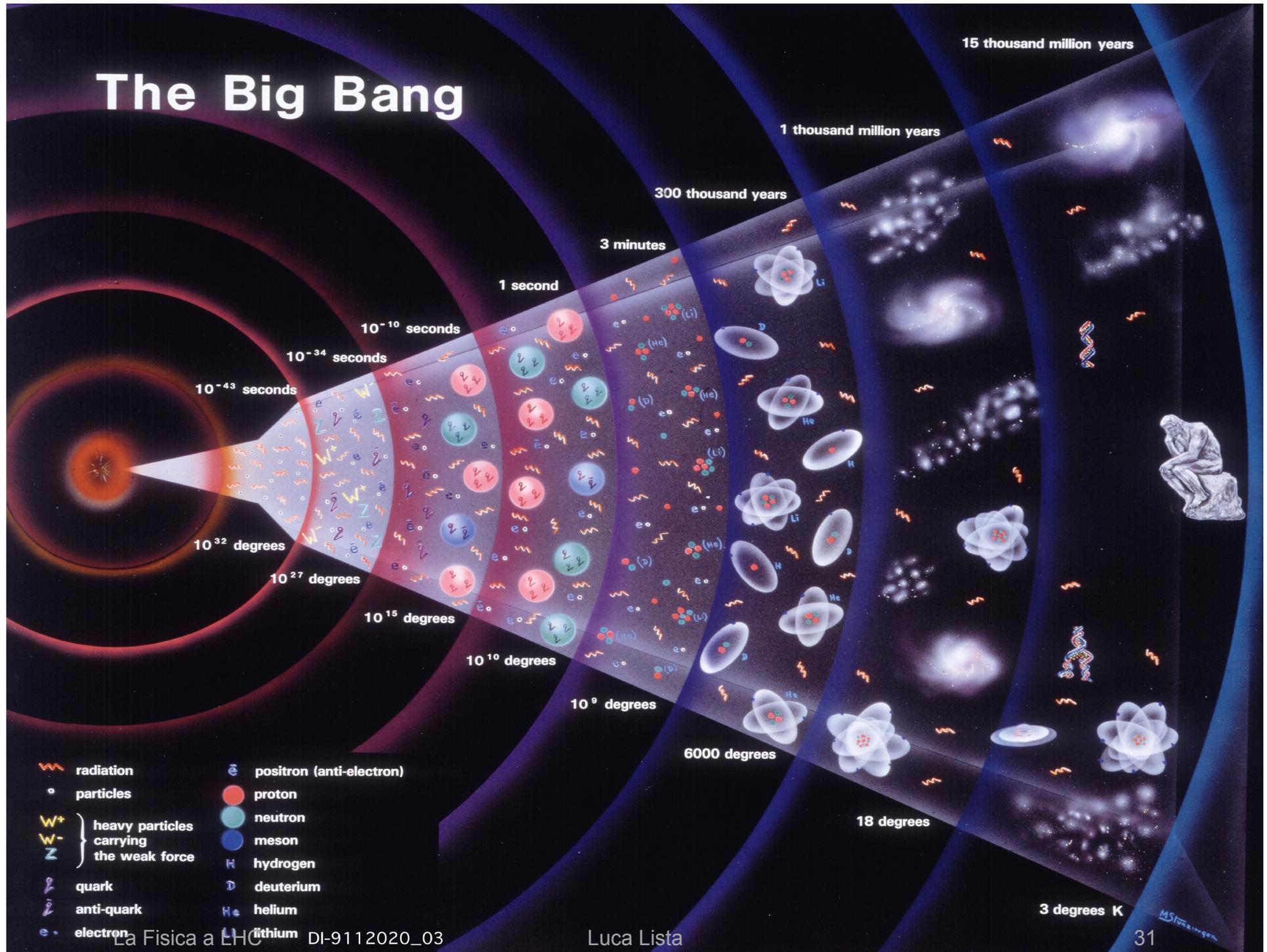


# Ricerca di $Z'$ ad LHC



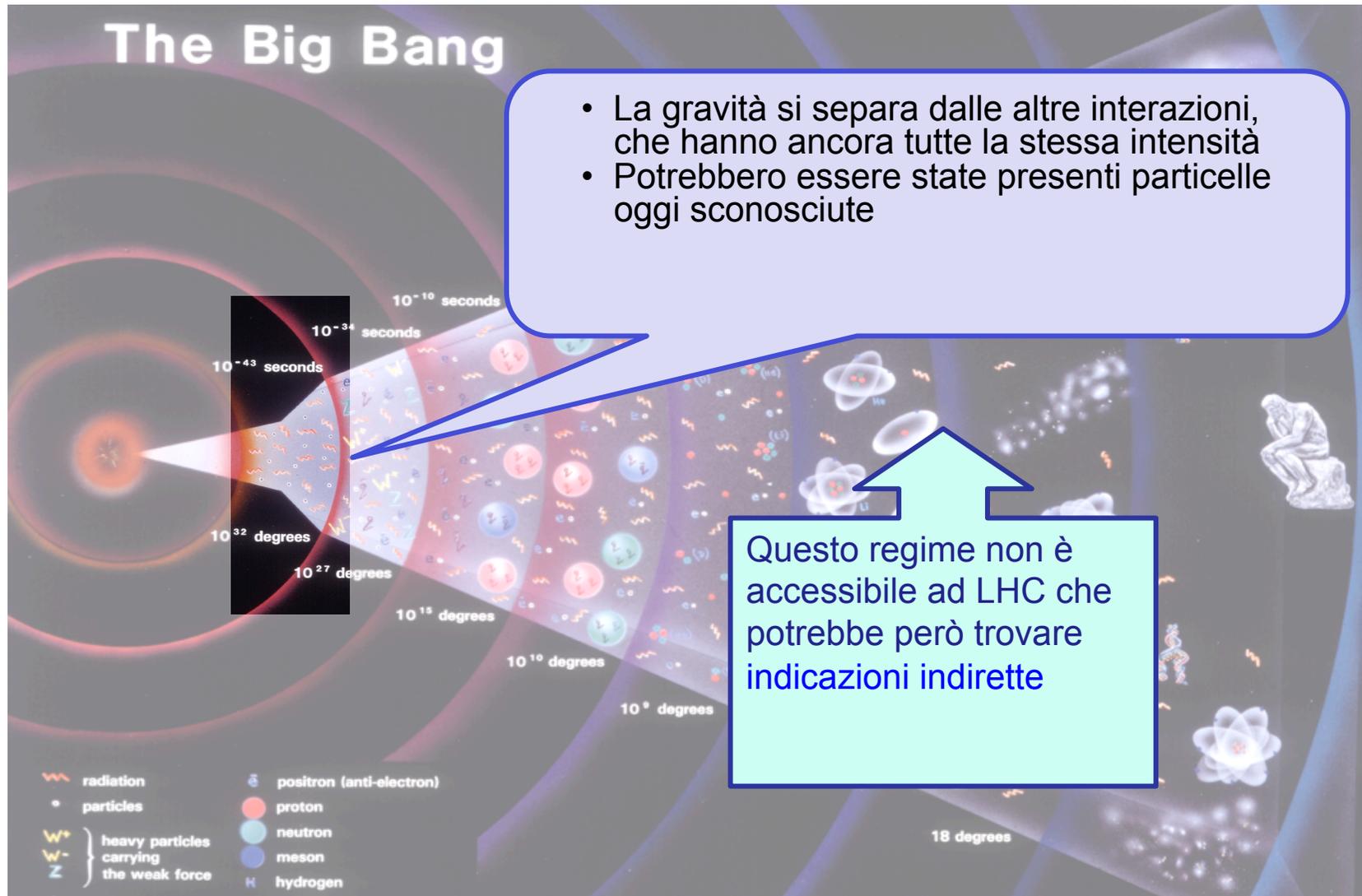
- LHC non ha trovato finora segnali di nuove particelle

# The Big Bang



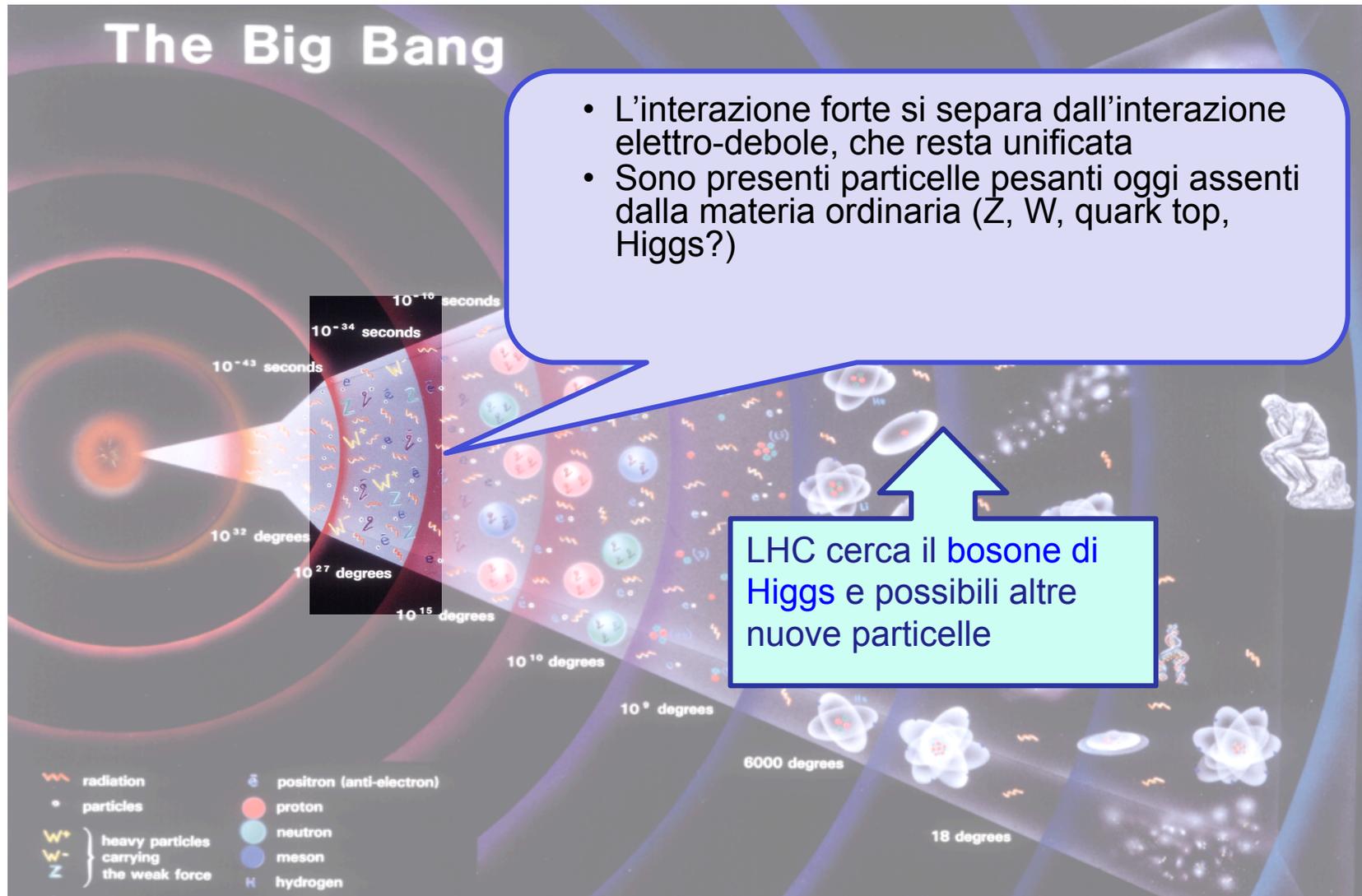


- La densità di energia è così alta che tutte le interazioni hanno la stessa intensità
- Non si conosce molto di questo periodo: difficile trattare la gravità dal punto di vista quantistico (stringhe?)



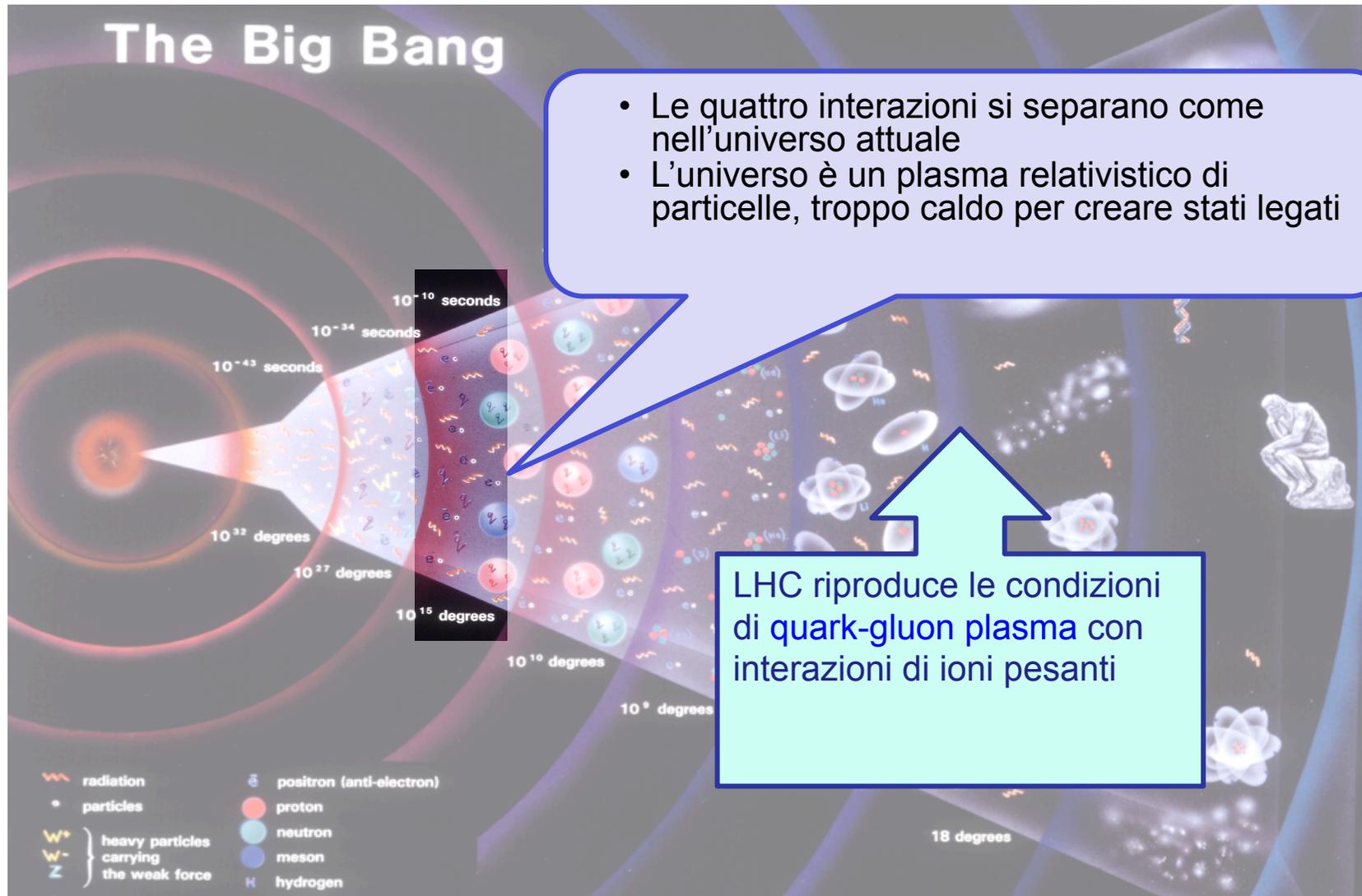
- La gravità si separa dalle altre interazioni, che hanno ancora tutte la stessa intensità
- Potrebbero essere state presenti particelle oggi sconosciute

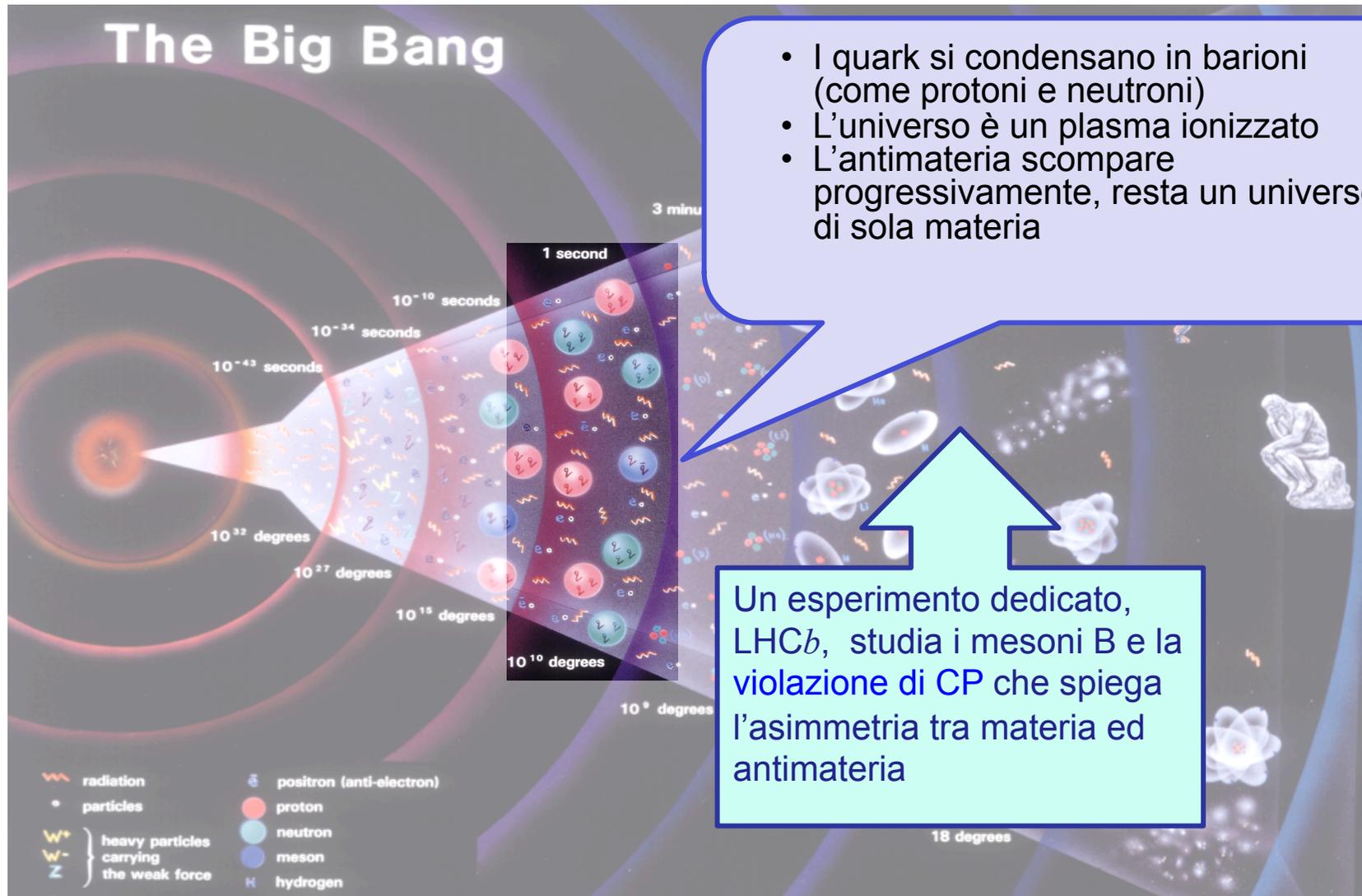
Questo regime non è accessibile ad LHC che potrebbe però trovare indicazioni indirette



- L'interazione forte si separa dall'interazione elettro-debole, che resta unificata
- Sono presenti particelle pesanti oggi assenti dalla materia ordinaria (Z, W, quark top, Higgs?)

LHC cerca il bosone di Higgs e possibili altre nuove particelle



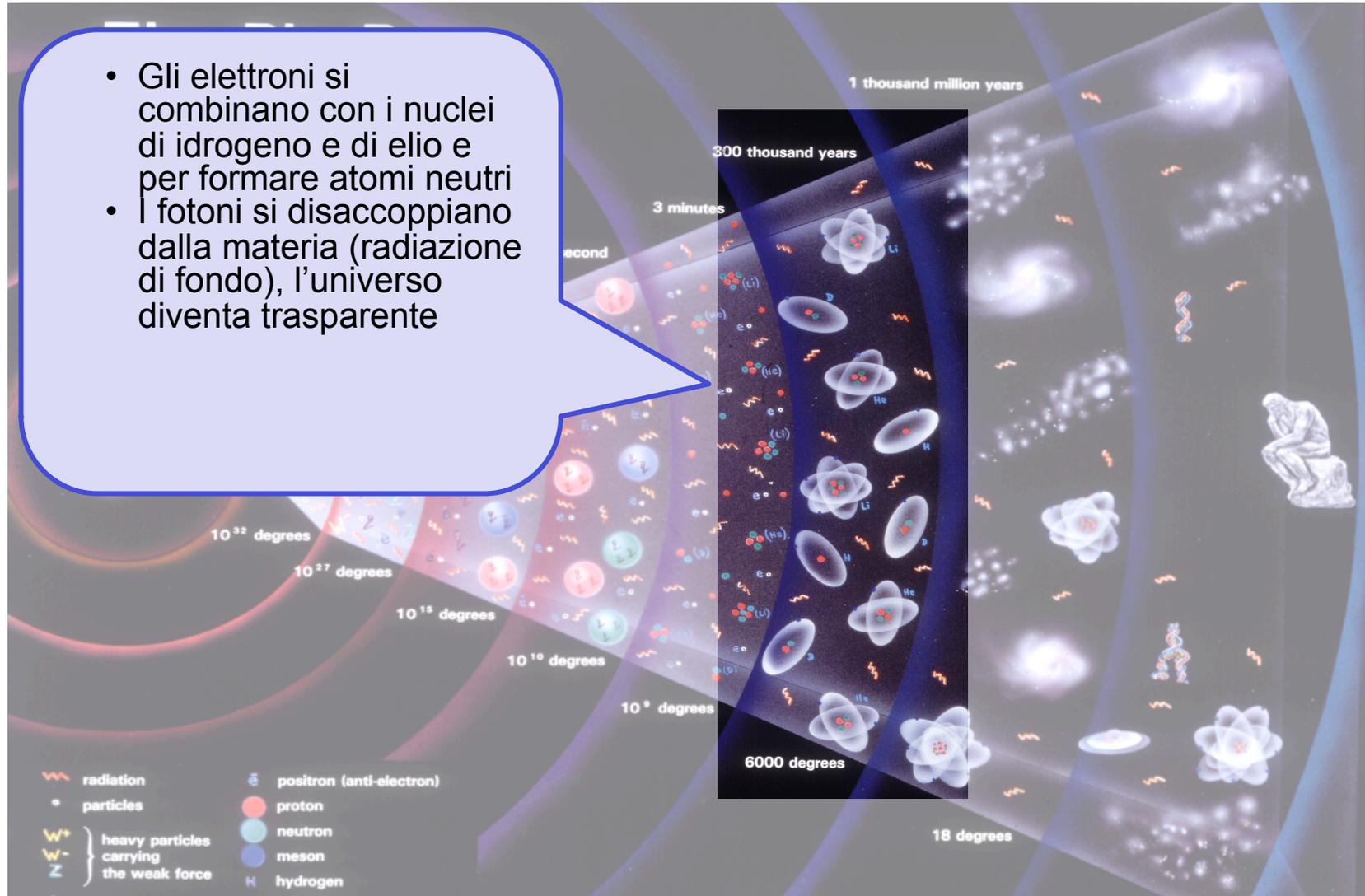


- I quark si condensano in barioni (come protoni e neutroni)
- L'universo è un plasma ionizzato
- L'antimateria scompare progressivamente, resta un universo di sola materia

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

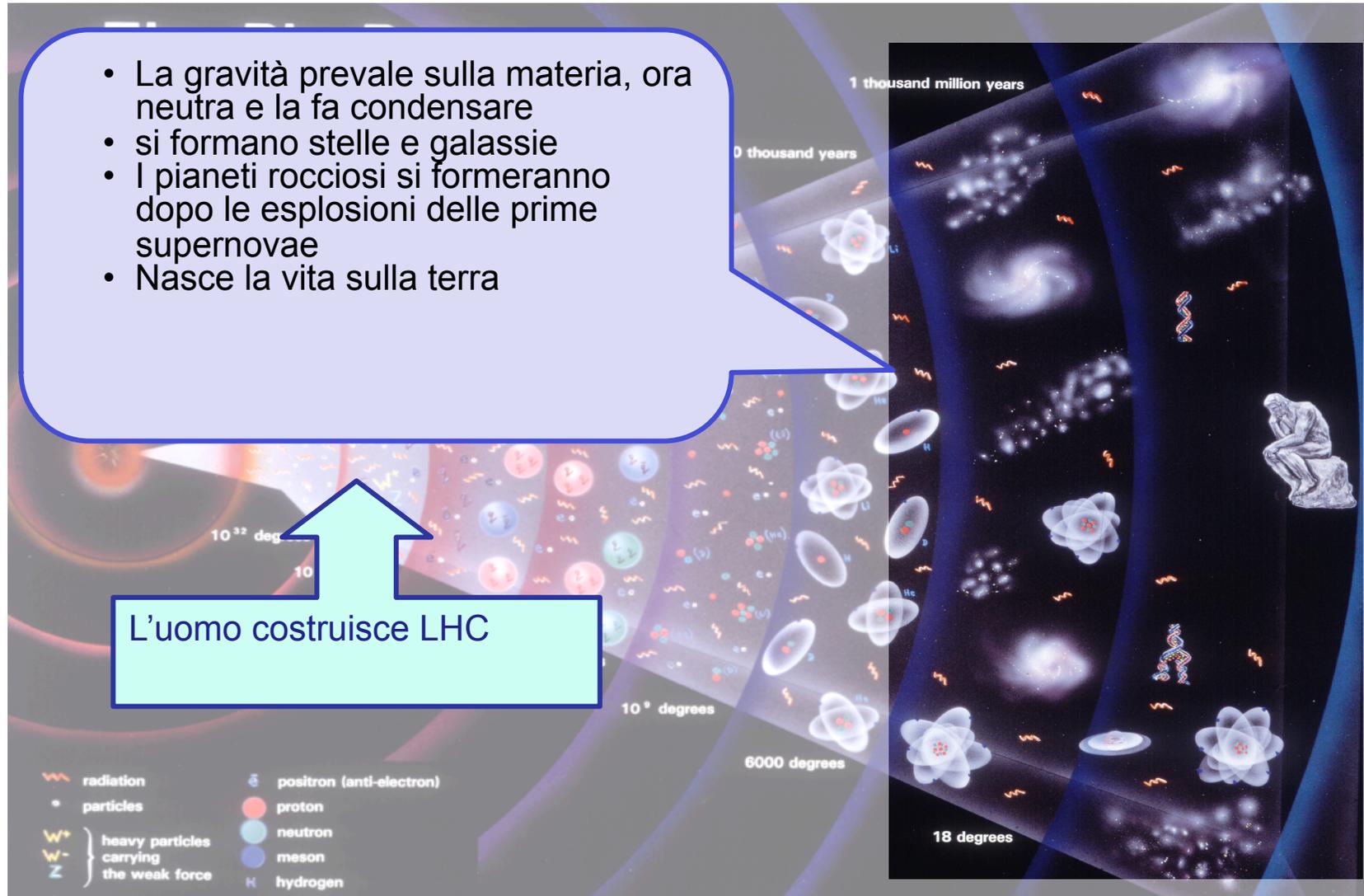
# Gli atomi (240000÷300000 anni)

- 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





# Conclusioni



- 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 il 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)

