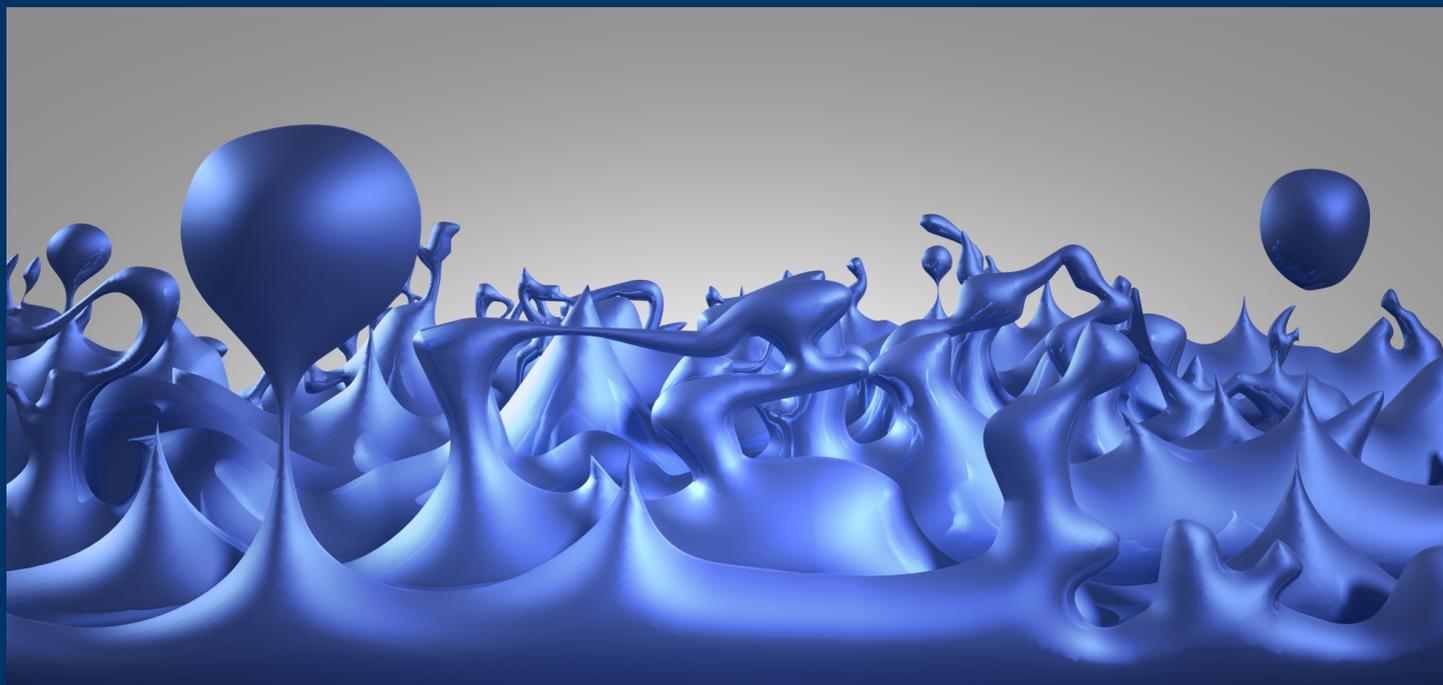


# *Il Vuoto Non è Vuoto!*

Stefano Spagocci

GACB





- Perché parlare del vuoto? Il vuoto non è forse assenza di tutto, quindi nulla? Ha senso parlare del nulla?
  - Intendiamo forse trattare del vuoto dei filosofi? Di quello degli ingegneri che, a rigore, vuoto non è?
  - Il vuoto della fisica moderna, in realtà, è un “oggetto” estremamente complesso ma tutto sommato facile da capire.
- 
-

# *Entra in Gioco Einstein*

- Come si può definire il concetto di “vuoto”?  
Definiamolo come “assenza di qualunque forma di materia” (lo spirito lasciamolo ai teologi, non per sminuire la religione ma perchè stiamo parlando di altro).
  - Tutti (o quasi tutti) sanno che, secondo la relatività (speciale) di Einstein, materia ed energia si equivalgono. Dire quindi “assenza di materia” equivale a dire “assenza di energia”.  
Quindi “energia zero”?
- 
-

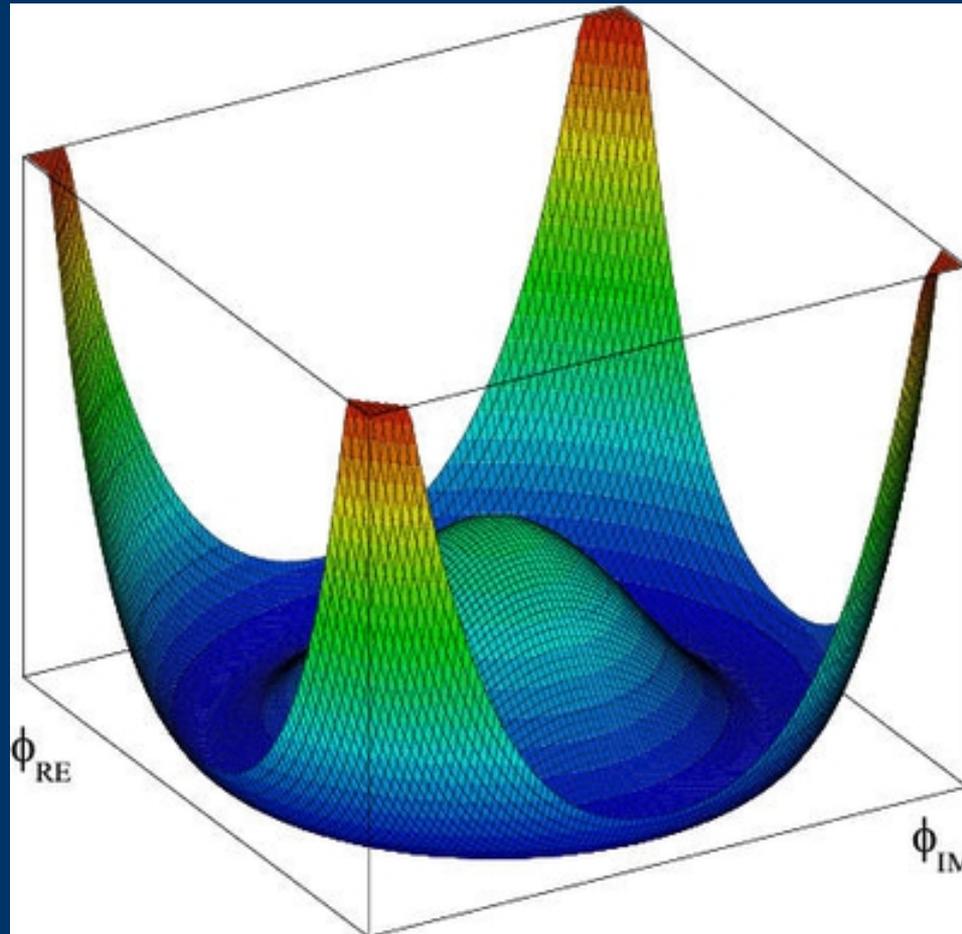
# *Un Semplice Argomento*

- Pensiamo ad una comune pila, magari da 12 volt. Tutti (o quasi tutti) sanno che i 12 volt sono una differenza di potenziale.
  - In altre parole, potremmo definire il potenziale di uno dei poli come 1000 volt e quello dell'altro polo come  $10^{12}$  volt o un miliardo e un miliardo più dodici o un fantastiliardo e un fantastiliardo più 12 e non cambierebbe nulla!
  - In paroloni “l'energia è definita a meno di una costante additiva arbitraria”.
- 
-

# *Livelli di Vuoto*

- Dunque non ha senso definire il vuoto come “stato ad energia zero”: lo definiremo invece come “stato ad energia costante nel tempo e nello spazio” (diciamo “nel tempo e nello spazio” perchè è ragionevole aspettarsi che il vuoto sia un “oggetto” indifferenziato).
  - Ma allora è ragionevole assumere che esistano diversi stati di vuoto, caratterizzati da diversi valori di energia, e che l'universo possa passare da uno stato di vuoto ad un altro!
- 
-

# *Livelli di Vuoto*



## *Come Fisici Teorici!*

- Il ragionamento che abbiamo fatto è tutto sommato semplice. Eppure abbiamo ragionato come in ultima analisi ragionano i fisici teorici (che poi rivestono il tutto con abbondanti equazioni, necessarie come il pane ma delle quali qui non ci occupiamo perchè ci interessa capire il senso delle cose e troppe formule sarebbero solo un ostacolo).
- 
-

# *Entra in Gioco Heisenberg*

- Facciamo ora appello ad un principio della meccanica quantistica che non tutti conoscono ma tutto sommato facile da enunciare e comprendere: il principio di indeterminazione di Heisenberg.
  - Secondo il principio esistono coppie di grandezze tali per cui tanto meno precisamente si misura l'una, tanto più precisamente si misura l'altra: forse un concetto troppo astratto ma con esempi concreti lo si comprende facilmente.
- 
-

# *Entra in Gioco Heisenberg*

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

## *Entra in Gioco Heisenberg*

- Consideriamo ad esempio particelle elementari quali l'elettrone (carica negativa), il protone (positivo) e il neutrone (neutro) che compongono gli atomi dei quali noi siamo composti. Anzi, per fissare le idee consideriamo un solo elettrone isolato.
- 
-

## *Entra in Gioco Heisenberg*

- Confinando l'elettrone in una scatola di piccole dimensioni ne conosceremo la posizione con grande precisione; osserveremo però (è un fatto sperimentale) che l'elettrone si agita freneticamente e dunque ne potremo misurare la velocità con scarsa precisione (una volta avrà una velocità, un'altra volta avrà velocità molto diversa).
- 
-

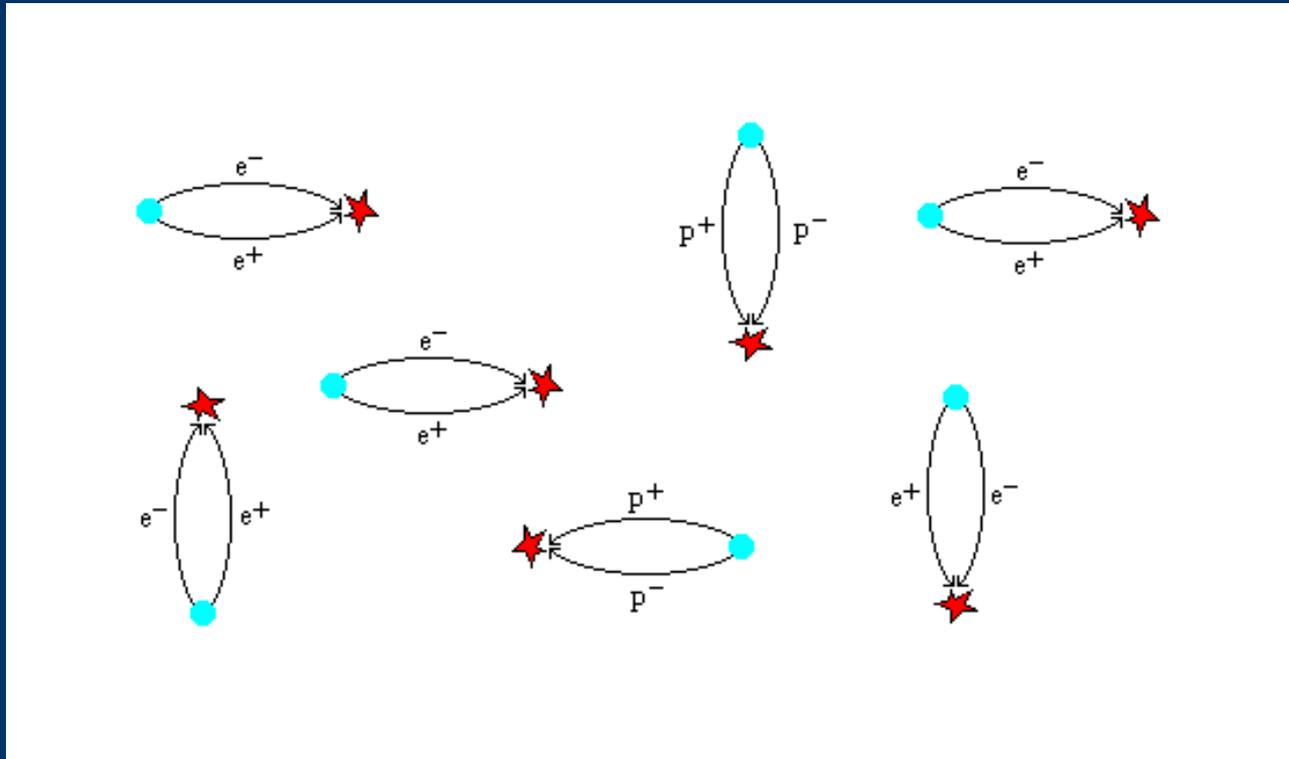
# Principio di indeterminazione di Heisenberg

$$\Delta x \Delta p > \frac{h}{4\pi}$$
$$\Delta t \Delta E > \frac{h}{4\pi}$$

Proprietà accoppiate di un elettrone come posizione e momento o energia e tempo di permanenza in un dato volume non possono essere determinate **simultaneamente** con precisione infinita.

# *Un Mare di Particelle Virtuali*

- Abbiamo però visto che massa equivale ad energia. Quindi se osserviamo un piccolo volume di vuoto per tempi brevissimi (ottima precisione nel misurare il tempo) avremo una grande incertezza sulla massa/energia contenuta nel volume in questione.
  - Ciò significa che “dal nulla” appariranno particelle, anzi coppie di particella più antiparticella! Perché coppie? Non è questa la sede per trattare in dettaglio di fisica delle particelle, prendetelo come un fatto sperimentale.
- 
-



- In definitiva possono esistere diversi vuoti, l'universo (o parti di esso) può passare da un vuoto all'altro ed ogni stato di vuoto è un mare di particelle virtuali che appaiono e scompaiono!

# *L'Evidenza Sperimentale*

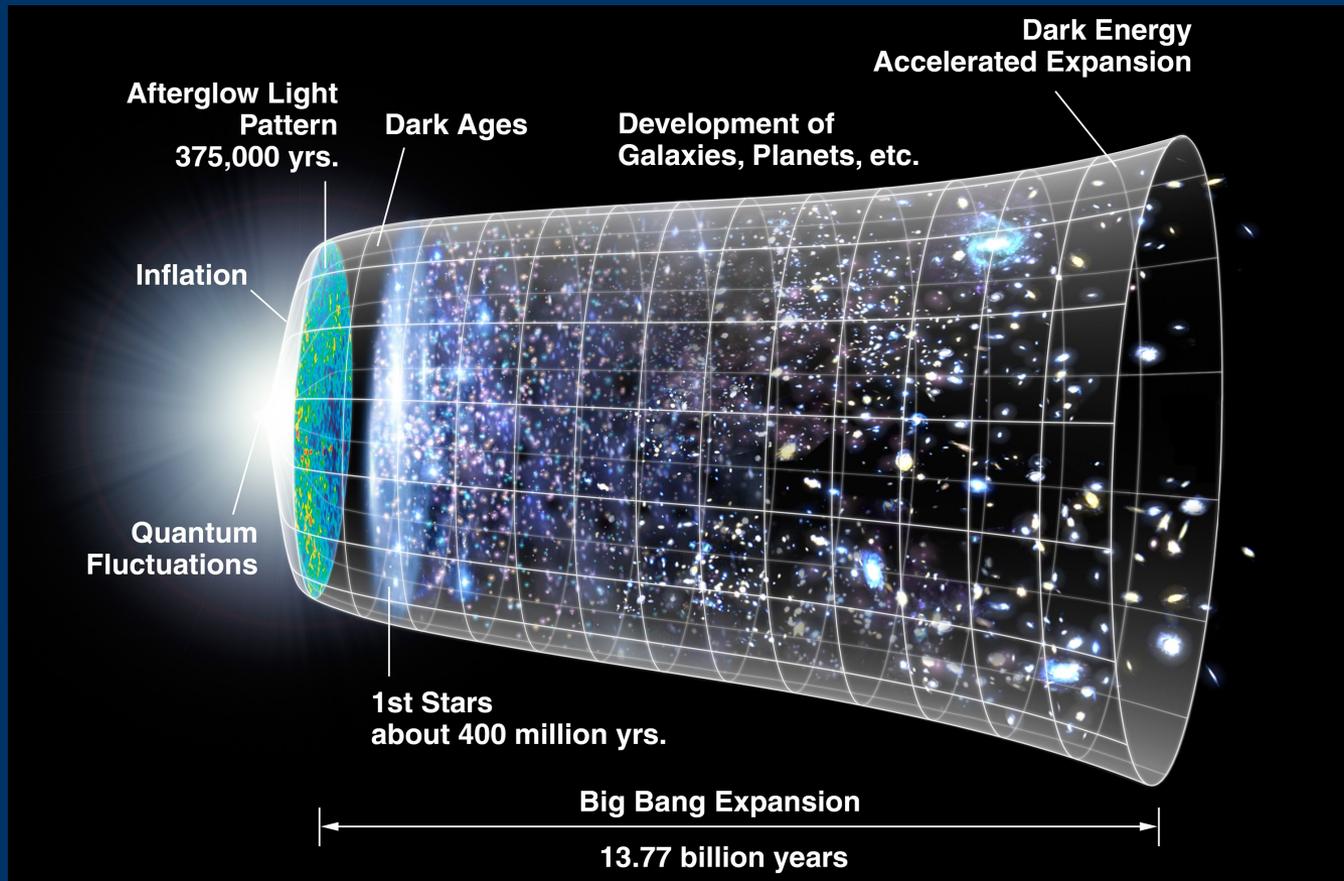
- L'effetto delle particelle virtuali di cui brulica il vuoto è stato dimostrato sperimentalmente, analizzando alcuni fenomeni tra cui l'effetto Casimir e il momento magnetico anomalo dell'elettrone.
  - Senza scendere nei dettagli (ci occuperemo piuttosto dei fenomeni legati al vuoto più rilevanti per la nostra esistenza): l'effetto Casimir è una debole pressione che si esercita su due lastre parallele e molto vicine, dovuta alle particelle virtuali, il momento magnetico anomalo è un'anomalia del comportamento di un elettrone in un campo magnetico che si spiega solo considerando le particelle virtuali.
- 
-

# *Un Universo dal Nulla*

- Come abbiamo già detto, secondo la meccanica quantistica un grumo di materia/energia può comparire “dal nulla” (il vuoto) e restare “in vita” per un tempo tanto più lungo quanto è più piccola la massa/energia del grumo.
  - Se la massa/energia fosse pari a zero tale grumo potrebbe esistere per un tempo infinito, quindi letteralmente comparire dal nulla ed almeno potenzialmente “vivere” in eterno!
- 
-

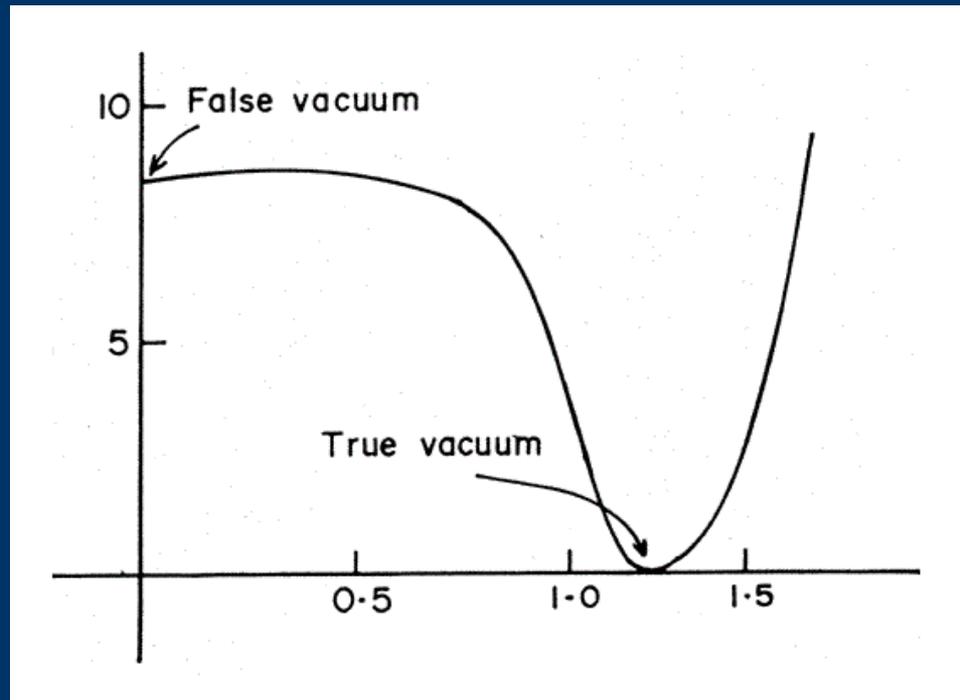
# *Un Universo dal Nulla*

- Sorprendentemente, è possibile ipotizzare un universo letteralmente nato dal nulla! Infatti un universo di forma sferica ha energia totale pari a zero. Non sappiamo però se una tale “creazione” si sia effettivamente verificata.
  - Si tratterebbe di un vuoto privo non solo di materia/energia ma anche di spazio e tempo. Prima dell'universo sarebbero esistite solo le leggi matematiche in base alle quali si può ipotizzare un tale meccanismo!
- 
-



- Sembra certo che l'universo, subito dopo il Big Bang, sia stato soggetto ad un rapidissimo ed enorme aumento di volume o “inflazione”.

- L'inflazione, si suppone, avvenne quando l'universo primordiale, per fluttuazioni quantistiche, passò da uno stato di falso vuoto ad uno di vero vuoto. L'energia liberata si sarebbe convertita nel gas primordiale di particelle da cui ebbe origine l'attuale universo!



# *Il Bosone di Higgs*

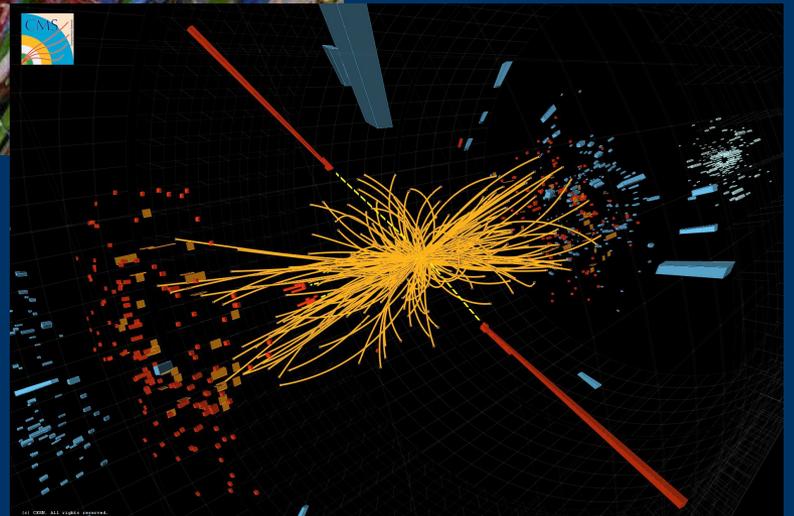
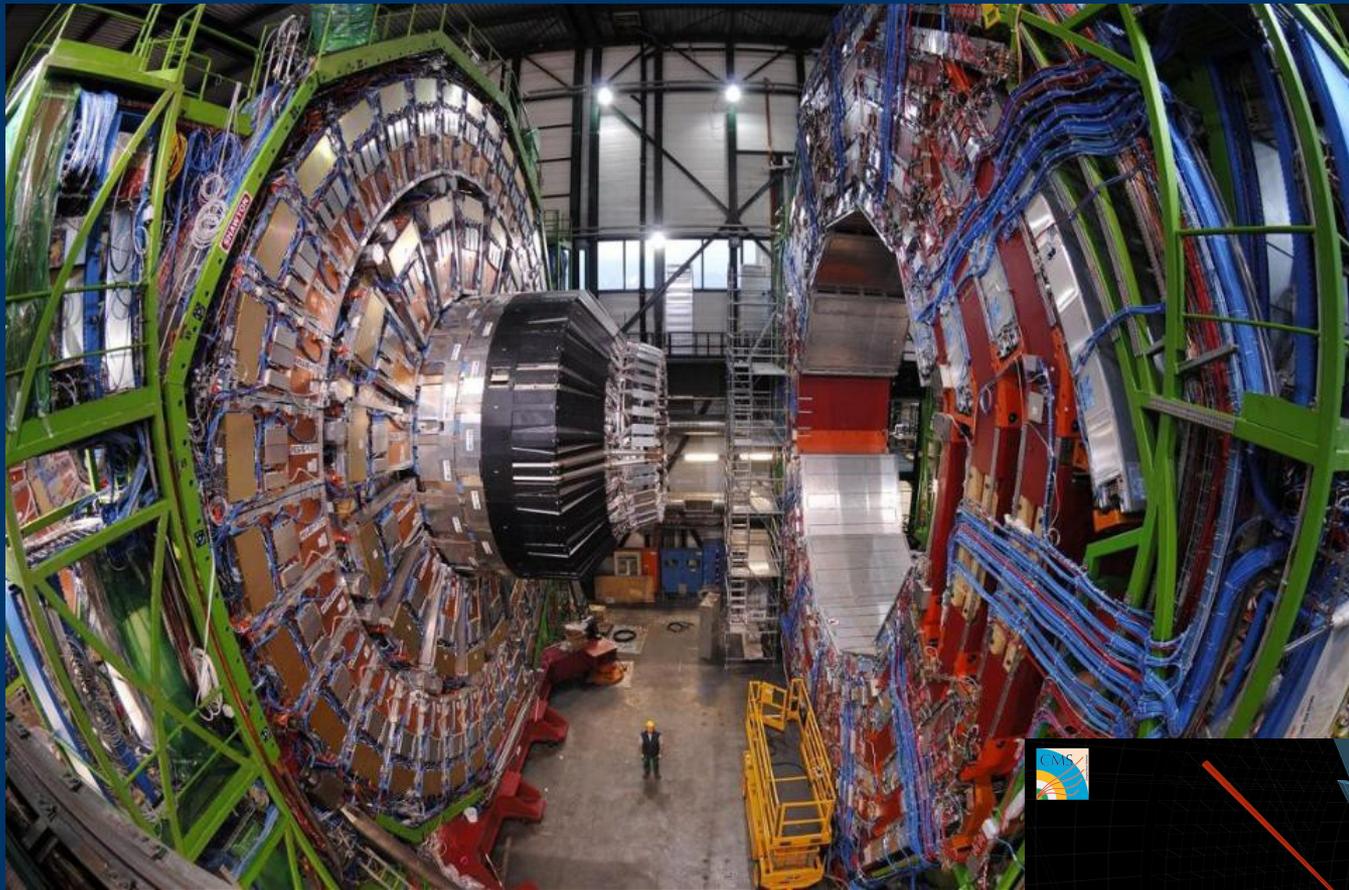
- Molti di voi avranno sentito parlare del bosone di Higgs, teorizzato negli anni '60 del secolo scorso e scoperto nel 2012 all'acceleratore LHC del CERN.
  - Secondo il Modello Standard della fisica delle particelle elementari, le particelle non avrebbero massa se non ci fosse stato il campo di Higgs a permeare l'universo primordiale.
- 
-

# *Il Bosone di Higgs*

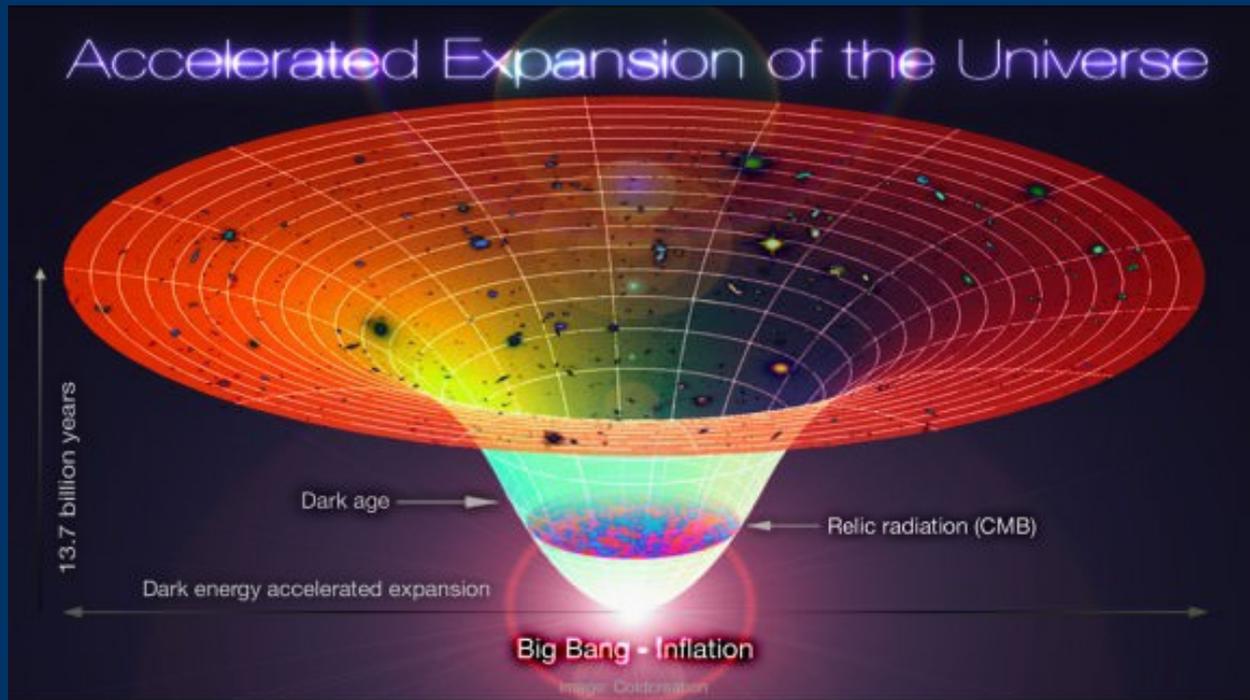
- Ogni particella ha un campo ad essa associato (pensiamo al campo elettromagnetico, composto da particelle dette “fotoni”) ma un campo può esistere anche in uno stato a zero particelle!
  - Il campo di Higgs passò da uno stato di falso vuoto ad uno stato di vero vuoto (vedi figura precedente).
- 
-

# *Il Bosone di Higgs*

- Nello stato di falso vuoto il campo aveva valore zero in tutto l'universo. Nello stato di vero vuoto il valore del campo divenne diverso da zero, quindi il campo si “accese”.
  - Le particelle hanno massa solo perchè la acquisiscono interagendo con l'onnipresente campo di Higgs. Senza il vuoto/campo di Higgs non esisterebbe massa nell'universo, quindi non sarebbe possibile la formazione di galassie, stelle e pianeti, dunque la nostra vita!
- 
-



(c) CERN. All rights reserved.



- Come si è scoperto alla fine del secolo scorso, da circa 5 miliardi di anni l'universo ha cominciato ad espandersi in maniera accelerata, cioè aumentando nel tempo la propria velocità di espansione!
- 
-

# *L'Espansione Accelerata*

- L'espansione accelerata ha (probabilmente) a che fare con il vuoto. Infatti tale espansione dovrebbe essere stata causata dai molti campi nello stato a zero particelle che permeano l'universo.
- In relatività generale si dimostra che l'effetto di tali campi è quello di fornire una “spinta antigravitazionale” all'universo, provocandone l'espansione accelerata.



# *Morte dell'Universo*

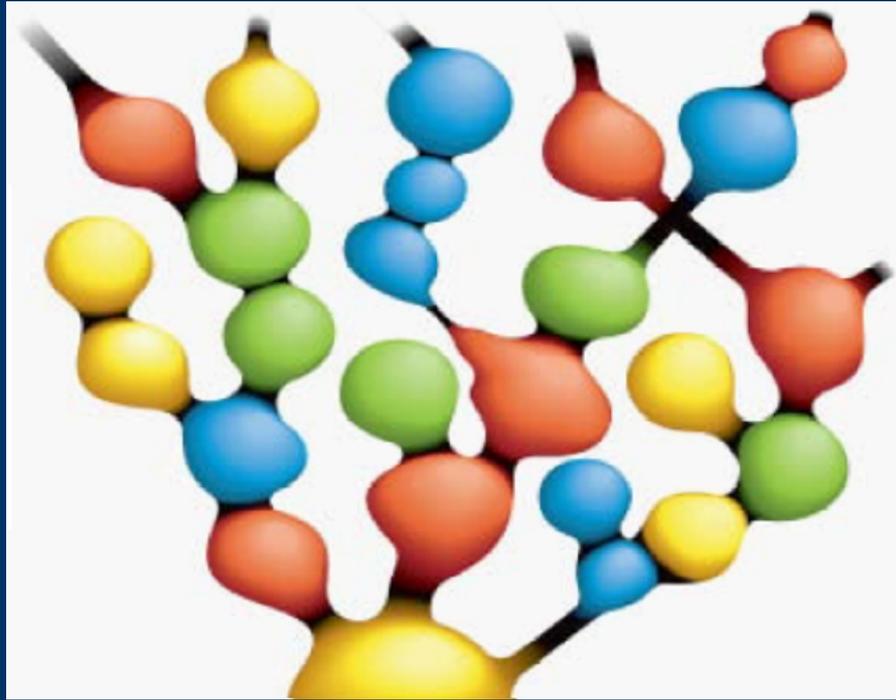
- L'espansione accelerata dell'universo ne causerà la morte per “diluizione”. In un tempo molto remoto (e se le previsioni teoriche sono corrette), infatti, le galassie si troveranno a distanze incommensurabili l'una dall'altra, la materia si sarà aggregata e quindi trasformata in buchi neri che lentamente evaporeranno, lasciando come ricordo di sé un gas principalmente composto da fotoni che inesorabilmente si raffredderà, fino ad avvicinarsi allo zero assoluto!
- 
-

# *Morte dell'Universo*

- Non una bella fine, dunque? Forse ma c'è una speranza (o certezza, se i calcoli teorici sono corretti).
  - La meccanica quantistica prevede infatti che tutto fluttui. Nell'inflazione l'universo precipitò da uno stato di falso vuoto ad uno stato di vero vuoto, liberando una enorme quantità di energia. Per fluttuazioni quantistiche, prima o poi l'universo acquisirà l'energia necessaria per risalire nello stato di falso vuoto.
- 
-

# *Rinascita dell'Universo*

- Tornato nello stato di falso vuoto, prima o poi l'universo (o meglio un angolo del vecchio universo) subirà un'ulteriore inflazione.
  - Se i calcoli sono corretti, si avrà dunque un nuovo Big Bang e la nascita (o rinascita) di un altro universo!
- 
-



- Secondo la maggior parte dei modelli di inflazione, il nuovo universo ne gemmerà un altro e così via, a cascata e all'infinito (multiverso).
  - Ciò conclude la nostra carrellata che spero vi abbia incuriosito e fatto riflettere. Grazie!
- 
-

- Per informazioni, suggerimenti e chiarimenti:  
[stefanspag@gmail.com](mailto:stefanspag@gmail.com)
  - Queste slide (in pdf) saranno scaricabili gratuitamente dal sito:  
[gacb.astrofili.org](http://gacb.astrofili.org)
- 
-