

Lezione Fermi 29

Luciano Maiani, AA 14-15

Inflazione Cosmica

Sommario

1. Una premessa necessaria
2. Superare il Big-Bang: perche'?
3. Inflazione Cosmica
4. La Nuova Inflazione
5. Inflazione "eterna"?

Una premessa necessaria

- La fisica Newtoniana si preoccupava di ricavare previsioni sul futuro di un sistema fisico, es. la futura posizione di un pianeta, partendo da condizioni iniziali fissate
- Lo stesso vale per Meccanica Quantistica e Relatività, Speciale e Generale
- Le condizioni iniziali sono considerate dei dati assegnati e da non discutere (purche' compatibili con i principi generali, es. non posso partire da uno stato in cui momento e posizione di una particella siano esattamente specificati, oppure che contenga particelle con velocità iniziale maggiore di c).
- In Cosmologia invece, in particolare in questa lezione, mettiamo sotto esame proprio le condizioni iniziali, cercando di capire come modificare la teoria più semplice (Modello Standard delle Interazioni e del Big-Bang) in modo che le condizioni iniziali siano in linea con alcuni principi esterni (un critico direbbe "pregiudizi") dettati da criteri di "naturalità".
- Abbiamo già visto un esempio nella questione del numero barionico dell'Universo: il rapporto tra numero di barioni e numero di fotoni è un dato iniziale necessario, perfettamente ammissibile e da non discutere, se vale la conservazione del numero barionico.
- Ma il fatto che l'Universo che vediamo richieda un rapporto $\eta \approx 10^{-9}$ sembra richiedere una spiegazione e rimandare alla possibilità che la condizione iniziale sia in realtà $\eta=0$, il valore "naturale", e che il valore piccolissimo osservato sia una conseguenza di nuove leggi che regolano l'evoluzione dell'Universo stesso (es. Grande Unificazione).

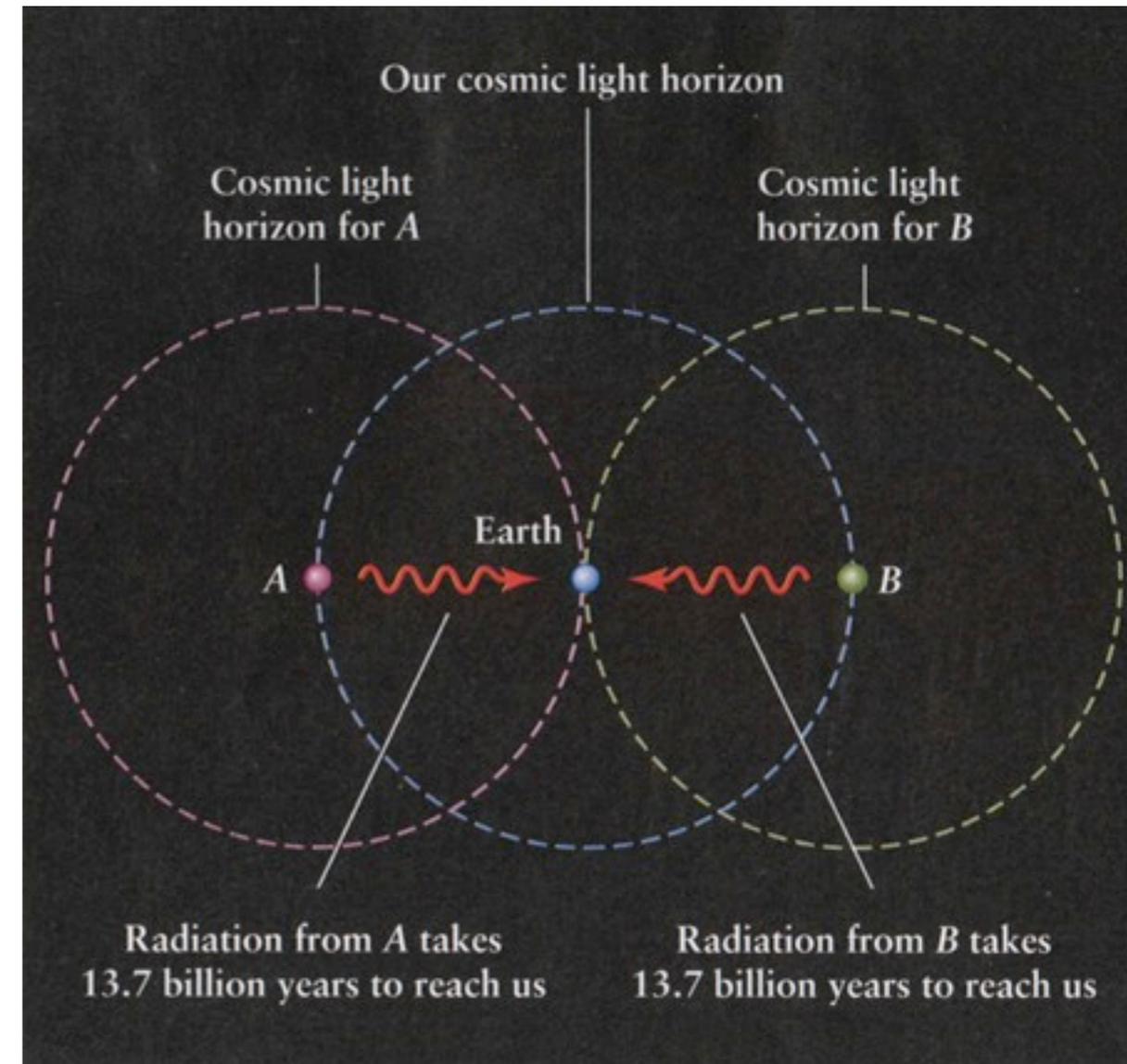
Principio Antropico ?

- La questione delle condizioni iniziali si intreccia in modo indissolubile con la questione della nostra stessa presenza nell'Universo, che certamente richiede $\eta \approx 10^{-9}$, una costante cosmologica piccolissima, un Universo non troppo curvo su se stesso, etc..
- Come vedremo, tutto cio', per essere naturale, richiede dei cambiamenti stupefacenti della Teoria Standard, che sono al limite delle possibilita' di verifica di oggi.
- Sarebbe perfettamente possibile ribaltare la questione e dire che le condizioni innaturali sono state fissate (da chi?) proprio per creare un Universo in cui fosse possibile la nostra esistenza: il Principio Antropico.
- Ma se questa e' la risposta, perche' dovremmo allora farci delle domande?
- Noi preferiamo correre il rischio di compiere un lavoro inutile, e continuare a cercare una teoria che risponda alle questioni delle condizioni iniziali in modo naturale, pensano che questo condurra' a prevedere nuovi fenomeni che siano, prima o poi verificabili (o, meglio, falsificabili) nei futuri esperimenti.

2. Superare il Big-Bang: perche'?

1. *Una temperatura troppo uniforme?* La temperatura della radiazione che proviene dalle diverse parti della superficie dell'ultima diffusione e' la stessa, entro fluttuazione relative che abbiamo visto essere dell'ordine di 10^{-5} . Tuttavia, regioni della LSS che hanno una distanza angolare tra loro superiore di circa 2° non hanno avuto il tempo, dall'inizio del Big-Bang, di trasmettersi segnali luminosi.

L'eguaglianza estrema delle loro temperature e' sospetta, come sarebbero due persone che danno esattamente la stessa versione di un fatto che nessuno dei due ha visto. Come e' avvenuta la sincronizzazione?



These photons could not have communicated with each other unless inflation took place during the very early Universe

2. ***Un Universo troppo piatto?*** L'equazione di Friedmann che collega la curvatura dello spazio alla densità di energia normalizzata alla densità critica (cfr. Lez. 21, Sect. 4) ha la forma:

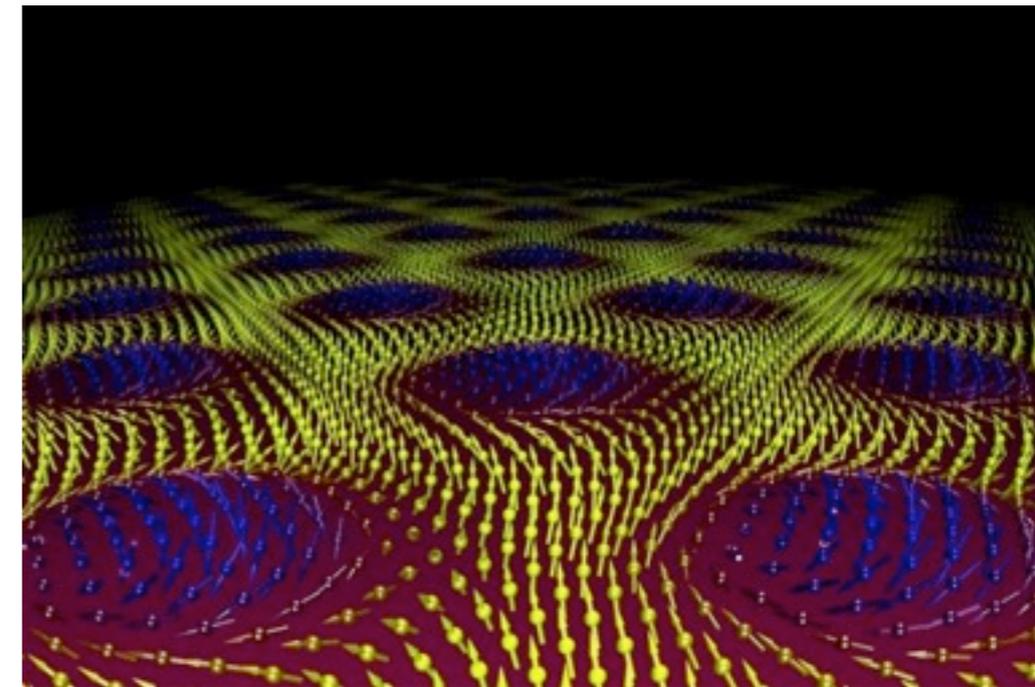
$$\frac{K}{H^2 a(t)^2} = \Omega_{tot} - 1$$

- NOTA: K è l'inverso del raggio di curvatura al quadrato, in unità fisiche di lunghezza, l'Universo è Euclideo per $K \rightarrow 0$; $a(t)$ è il fattore di scala, un numero adimensionale, $a(t_0)=1$; $c=1$
- la scala dei tempi dell'interazione gravitazionale è fissata da $1/\sqrt{G_N} \approx 10^{-44}$ sec e i vari termini in Ω variano con potenze diverse di $a(t)$, quindi del tempo:
 - come è possibile che dopo 10^{10} anni dal Big-Bang i diversi termini di Ω_{tot} siano dello stesso ordine?
 - ovvero, come è possibile che i diversi termini si compensino a dare $\Omega_{tot} \approx 1$ ***adesso?***
- piu' da vicino:
 - $H^2 a(t)^2$ cresce al diminuire del tempo, quindi il primo membro diventa sempre piu' piccolo andando verso il Big-Bang;
 - per avere ***oggi*** un valore $\approx 10^{-2}$, $\Omega_{tot} - 1$ doveva essere ***straordinariamente piccolo nell'Universo primordiale,***
- ritroviamo, come condizione iniziale, un numero estremamente piccolo, corrispondente ad un Universo estremamente piatto

3. *Dove sono i monopoli magnetici?* In un Universo ad alta temperatura la simmetria alla base delle teorie di Grande Unificazione dovrebbe essere esatta, per rompersi al decrescere della temperatura (cfr. Lez. 26).

Al di sotto della temperatura critica, si dovrebbero formare nello spazio dei domini in cui il campo di Higgs condensa in direzioni diverse e ai bordi dei domini, nelle zone di conflitto tra orientamenti diversi, si dovrebbero formare delle configurazioni di campo corrispondenti a Monopoli Magnetici di massa $m \approx 10^{16} \text{ GeV} \approx M_{\text{GUT}}$

La densita' di energia dovuta ai monopoli prodotti da questo meccanismo e' stata stimata da Kibble nel 1976 e risulta assolutamente inaccettabile dal punto di vista cosmologico, e in contrasto con il fatto che monopoli magnetici dal Cosmo non sono stati mai osservati in laboratorio.



This illustration shows a grid of magnetic vortex structures. Credit: Copyright TUM.

3. Inflazione cosmica

- Alan Guth, nel 1981, propone di risolvere i problemi assumendo che l'Universo sia passato attraverso una fase iniziale di espansione esponenziale (inflazione cosmica).
- Un regime di questo tipo si ha se la densità di energia dell'Universo è dominato dall'energia del vuoto, ad esempio dovuta al valore di aspettazione nel vuoto di un campo scalare
- Guth pensa ad un campo di Higgs, nel quadro delle teorie di grande unificazione e propone lo schema che adesso va sotto il nome di “vecchia inflazione”.



Alan Guth

Physicist

Alan Harvey Guth is an American theoretical physicist and cosmologist. Guth has researched elementary particle theory. He is currently serving as Victor Weisskopf Professor of Physics at the Massachusetts Institute of Technology. [Wikipedia](#)

Born: February 27, 1947 (age 68), New Brunswick, New Jersey, United States

Books: [The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins](#)

Education: [Massachusetts Institute of Technology \(1971\)](#), [Massachusetts Institute of Technology](#)

Awards: [Breakthrough Prize in Fundamental Physics](#), [Dirac Medal of the ICTP](#), [Franklin Medal](#), [Benjamin Franklin Medal](#)

People also search for

[View 10+ more](#)



[Andrei Linde](#)



[Alexander Vilenkin](#)



[Steven Weinberg](#)



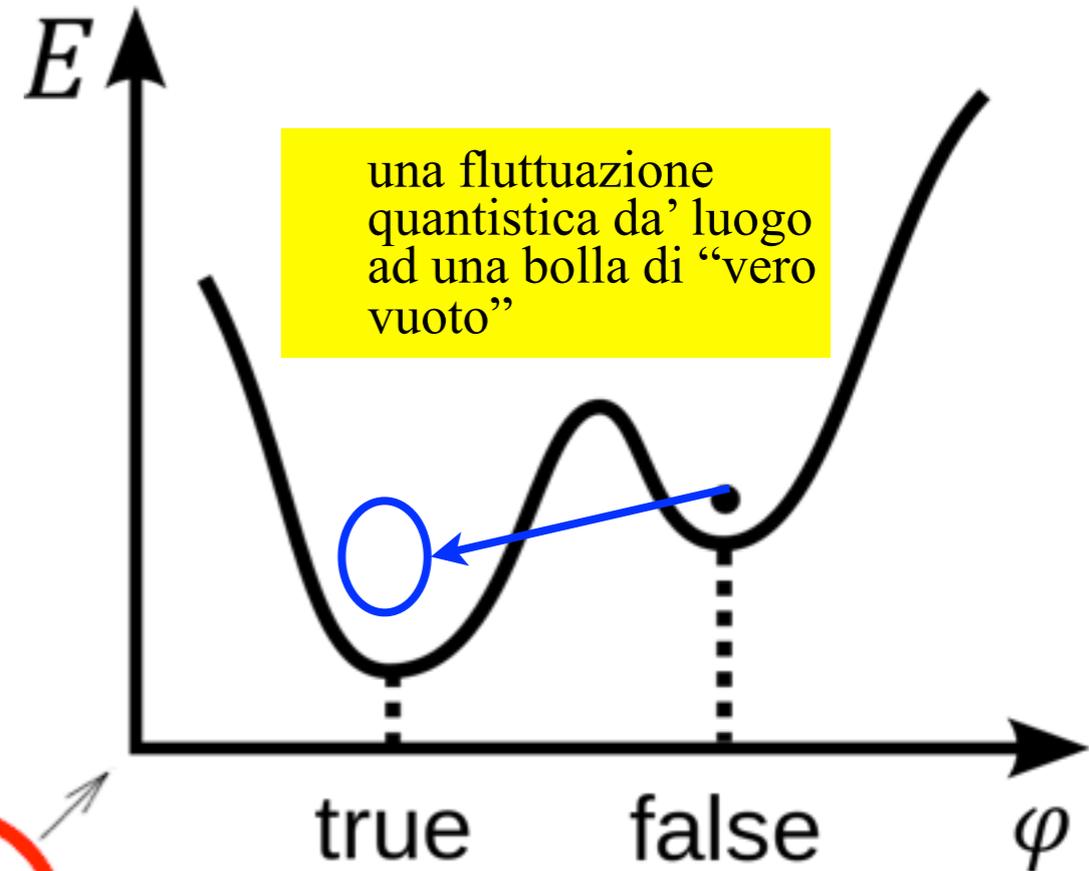
[Paul Steinhardt](#)



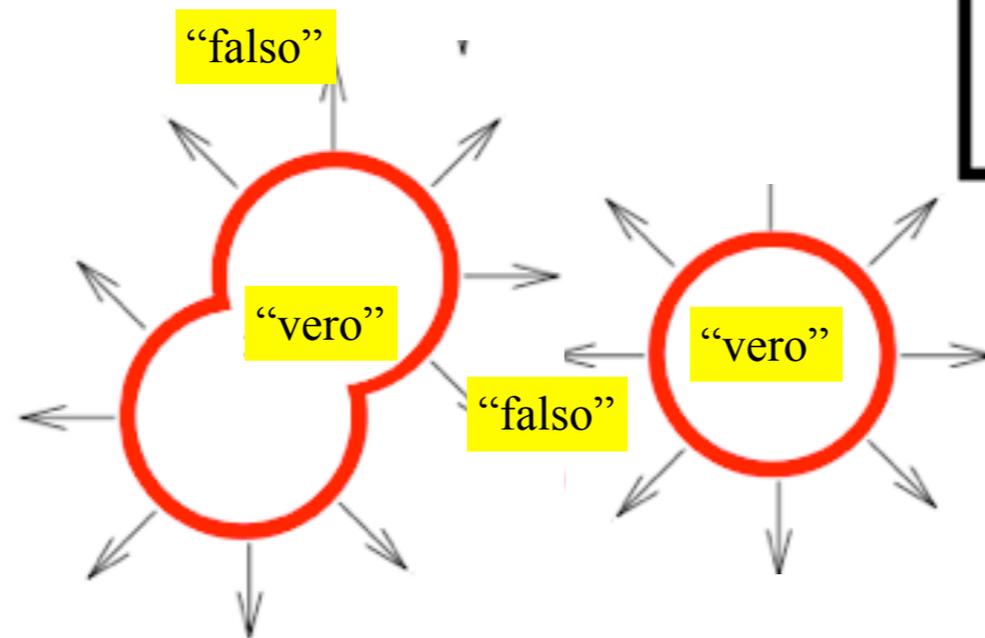
[Alexei Starobinsky](#)

“Vecchia inflazione”: transizione del 1° ordine al vero vuoto

- Partiamo da una temperatura altissime, $T > T_c$ e scendiamo verso $T=0$.
- Il campo di Higgs potrebbe restare intrappolato in un minimo secondario
- lo spazio si trova in uno stato di “falso vuoto” (un minimo relativo dell’energia), che e’ instabile

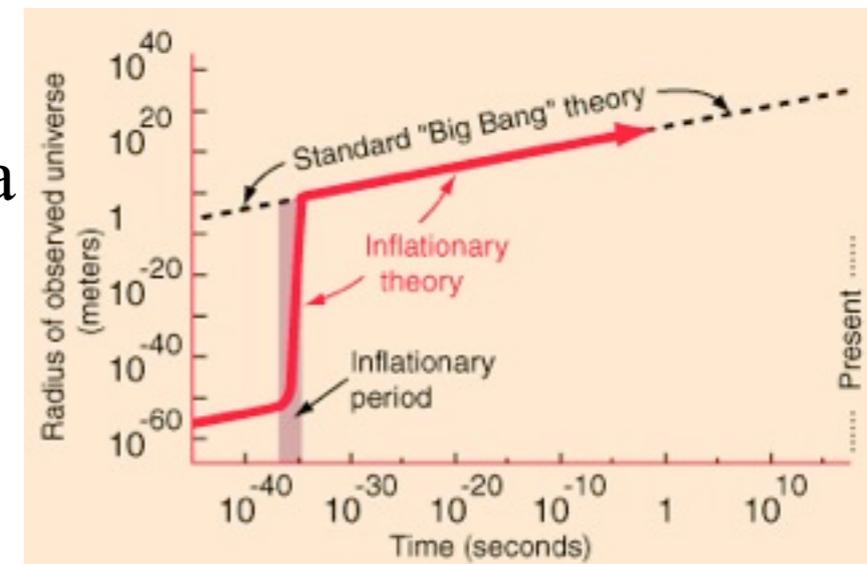


- per effetto tunnel quantistico si formano delle bolle di “vero vuoto”
- le bolle invadono tutto lo spazio fino a far scomparire il falso vuoto



$$\frac{K}{H^2 a(t)^2} = \Omega_{tot} - 1$$

- Nel tempo in cui lo spazio resta nel falso vuoto, c’e’ solo l’energia del falso vuoto, che da’ una costante cosmologica
- il fattore $a(t) = Ae^{Ht}$ (!!!), la curvatura diminuisce esponenzialmente e Ω si schiaccia su 1 con un errore esponenzialmente piccolo: la nostra condizione iniziale

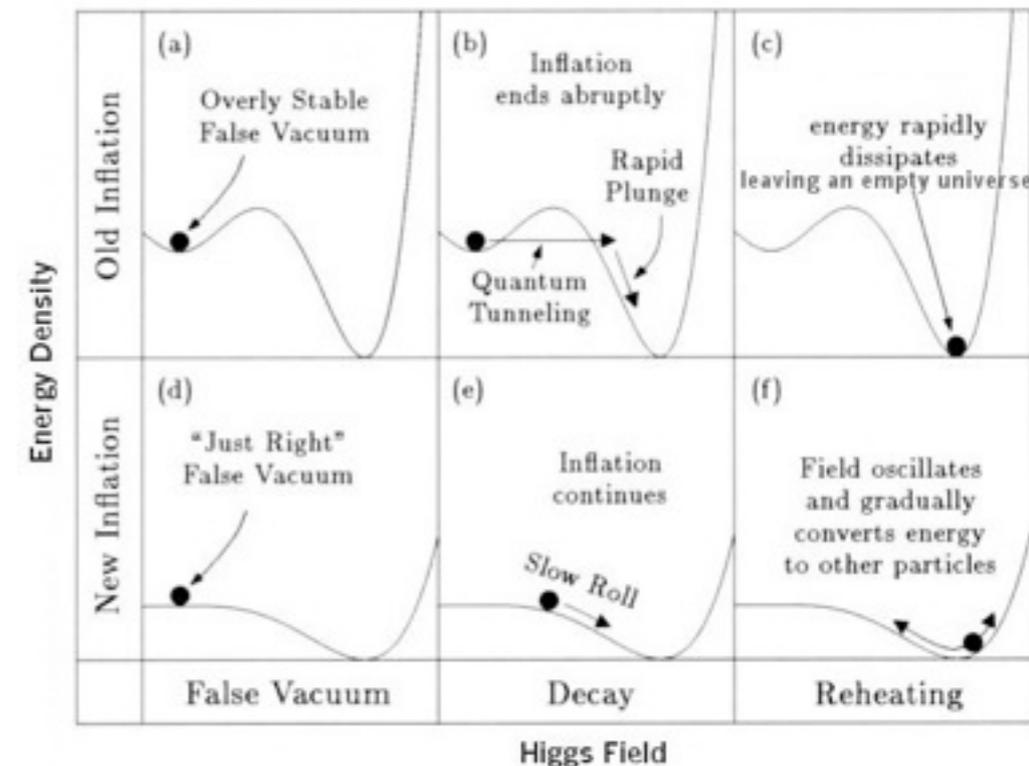
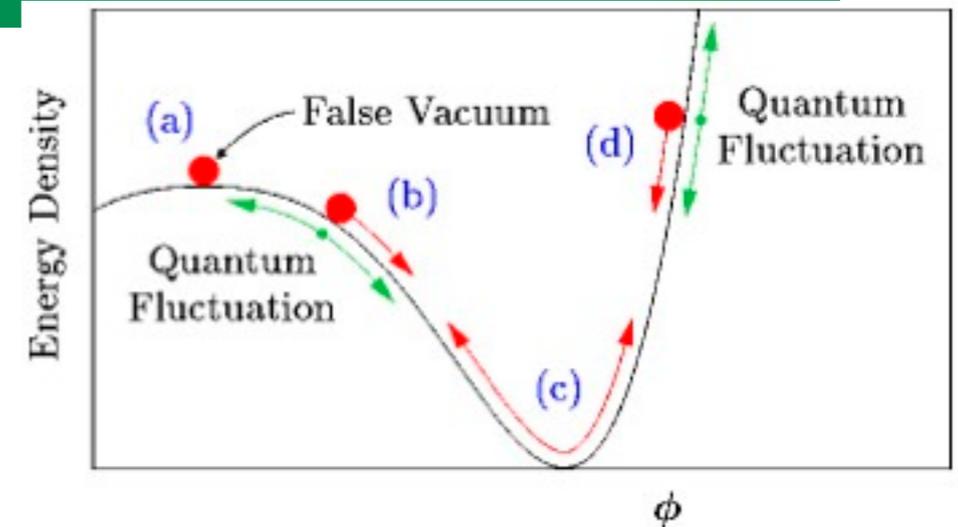


Effetti dell'inflazione e problemi

- L'inflazione amplifica una porzione piccolissima di spazio dell'Universo iniziale
 - qualunque curvatura ci fosse, la porzione e' talmente piccola (esponenzialmente) da apparire “piatta”, proprio come la Terra appare piatta vista dalla nostra scala
 - nella porzione amplificata la temperatura e' costante (entro precisione esponenziale): le fluttuazioni verranno dopo per effetti quantistici, e sono quelle che misuriamo, su uno sfondo assolutamente uniforme
 - se ci fossero stati dei monopoli, la porzione amplificata e' talmente piccola da contenerne zero, al massimo, uno/Universo
- Tutto risolto???
- Lo stesso Guth riconobbe che occorreva superare la “vecchia inflazione” per una serie di motivi:
 - se il tunnel ad una bolla ha una *probabilita' piccola*, non si formano molte bolle, gran parte dell'Universo resta nel falso vuoto;
 - se ha una probabilita' *grande* si formano molte bolle, l'Universo va nel vero vuoto in modo efficiente e la crescita esponenziale si ferma troppo presto. Inoltre, si producono troppe onde gravitazionali.
- Occorre una *graceful transition*, di qui la proposta della “nuova inflazione”

4. La nuova Inflazione (A. Linde e altri)

- Andrei Linde (1981) propone un diverso meccanismo.
- Il campo scalare e' un campo specifico, l'inflatone, accoppiato pochissimo alla materia
- il campo si trova, prima del Big Bang, a temperatura zero, su un potenziale quasi piatto
- nella fase di inflazione, il campo si muove lentamente verso il minimo del potenziale, secondo un moto che e' stato chiamato di "slow roll"
- quando arriva intorno al minimo, esegue oscillazioni che producono onde gravitazionali, materia e radiazione, riscaldando l'Universo ad una temperatura sopra la GUT (reheating) e mettendo in moto la macchina del Big Bang;
- Lo slow roll fornisce un meccanismo concreto per la graceful transition.
- Le fluttuazioni dell'inflatone sono il seme delle fluttuazioni del CMB e quindi delle strutture che vediamo nell'Universo
- Le onde gravitazionali produrrebbero degli effetti rilevabili nella polarizzazione del CMB
- l'esperimento BICEP2 sembrava aver rivelato effetti di questo tipo, ma i dati di PLANCK hanno messo seri dubbi che si trattasse di un fondo dovuto alla polvere cosmica



That's life... vedremo al prossimo round di misure

5. Inflazione caotica ed “eterna”?

- Nella Nuova Inflazione, l’inflatone parte da una condizione di quasi quiete e temperatura zero
 - Se consideriamo l’Universo in grande, ci sono punti in cui l’inflazione parte, formando bolle-Universo
 - e bolle che, alla fine dell’espansione, ricadono e si riassorbono con un Big Crunch.
- l’Universo in grande appare come un continuo caotico in cui Universi appaiono e scompaiono, ma che “sub specie eternitatis” è stazionario ed eterno
- non “creazione continua”, ma “inflazione e deflazioni continue”.
- L’inflazione caotica potrebbe dare un fondamento al Principio Antropico:
 - Universo con tutti i tipi di condizioni iniziali sono prima o poi possibili, anche quelli in cui le costanti di base assumono valori molto innaturali
 - la vita si sviluppa solo in quelli in cui i parametri sono tali da rendere l’Universo “ospitale”

Wanted:

**effetti fisici convincenti che possano mettere
alla prova queste idee ???**