

Lezione Fermi 26

Luciano Maiani, AA 14-15

Scenari per la Bariogenesi

Sommario

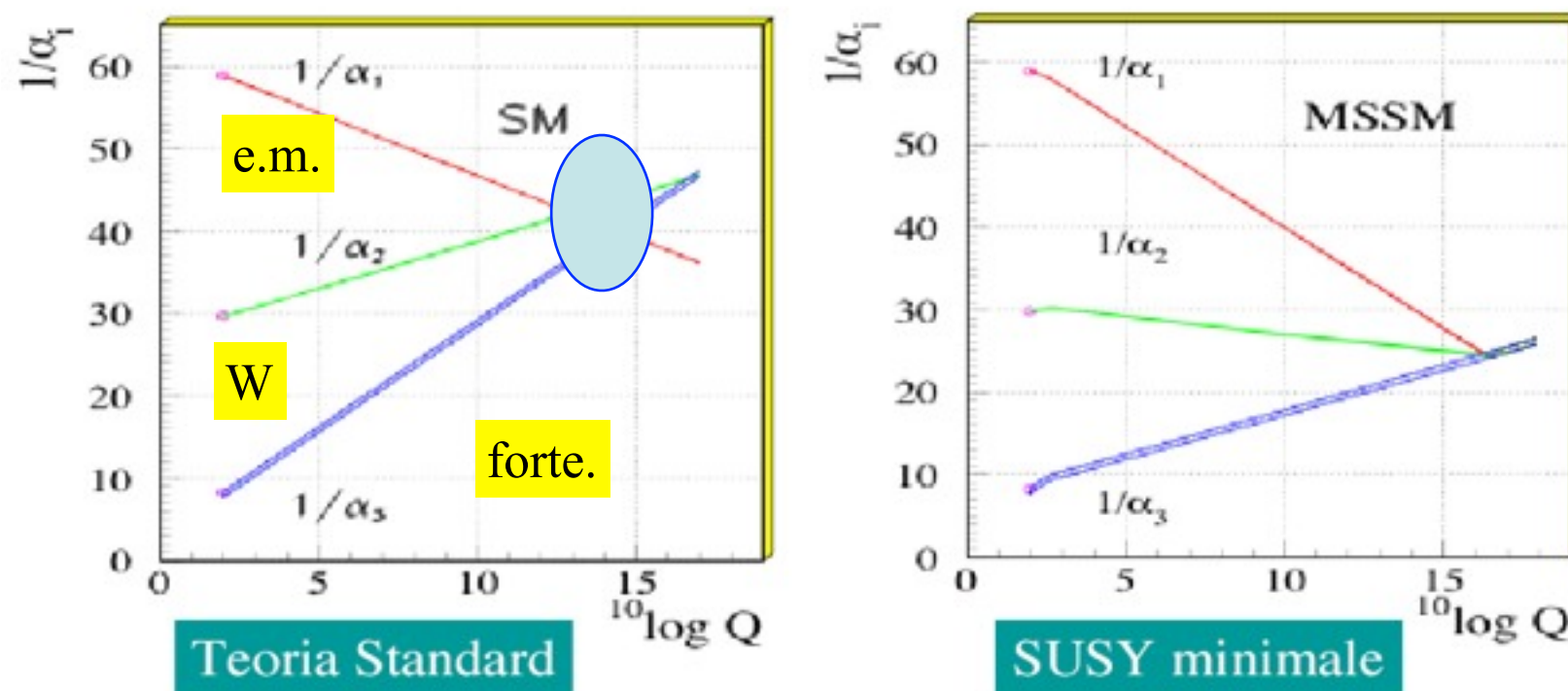
1. Premessa
2. L' Universo della Grande Unificazione
3. Teoria Standard alle temperature del Big Bang
4. Solitoni, istantoni e sfaleroni
5. Bariogenesi nella Teoria Standard
6. Leptogenesi ?
7. Conclusioni

1. Premessa

- Alle energie dove siamo arrivati non ci sono evidenze di violazione del Numero Barionico
- La Bariogenesi, se e' avvenuta, si deve essere prodotta in un Universo ad alta temperatura, ai limiti o oltre i limiti di validita' della Teoria Standard
- In queste condizioni, possiamo ipotizzare diversi scenari, piu' o meno realistici e accontentarci di vedere se, in qualcuno di questi, si puo' produrre una bariogenesi plausibile
- In questa ricerca, sono emerse idee rivoluzionarie nella teoria dei campi su cui, fino a non molti decenni fa pensavamo di sapere tutto;
- ... e delle relazioni inattese, come la connessione con la fisica dei neutrini e le particelle ipotizzate da Majorana.
- Per questo e' interessante discutere di Bariogenesi, anche al di la' della possibilita' di farne una teoria quantitativa.

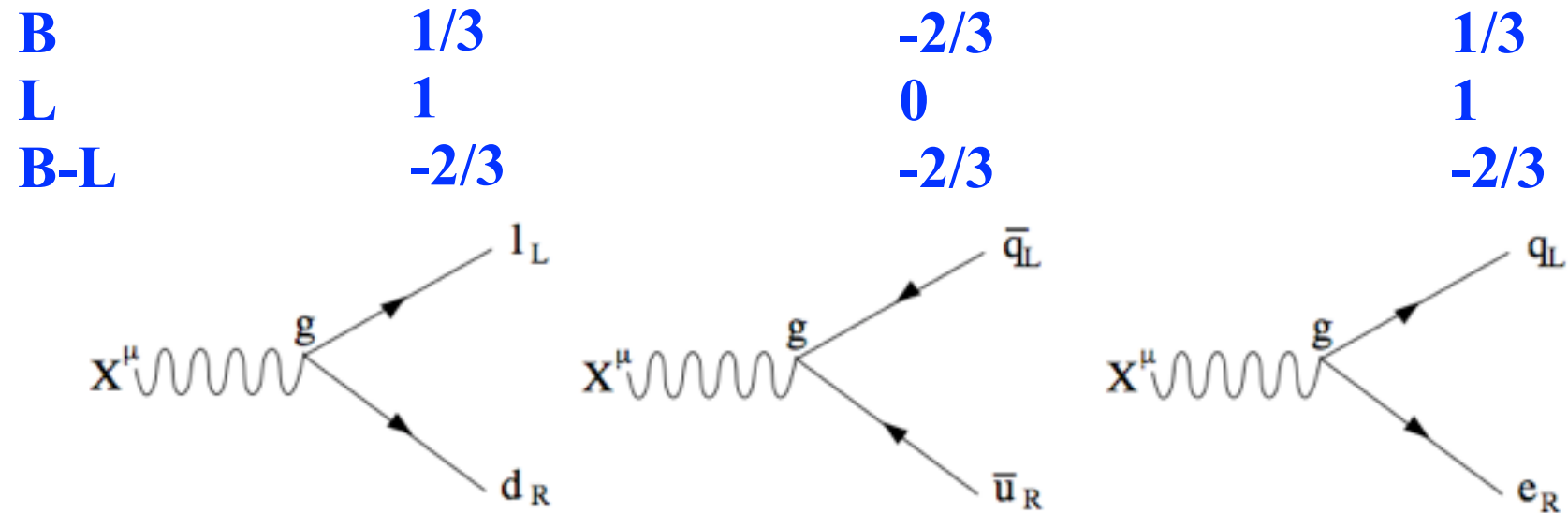
2. L'Universo della Grande Unificazione

- 3 forze nella teoria Standard
 - forte: costante di accoppiamento quark-gluone decresce con la scala delle energie
 - elettromagnetica: costante di accoppiamento quark-fotone cresce con la scala delle energie
 - debole: costante di accoppiamento quark-W decresce con la scala delle energie
- ad una certa energia, $M_{\text{GUT}} \approx 10^{15}$ GeV, le tre interazioni si potrebbero fondere in una sola, una Grande Unificazione delle forze (Y. Pati e A. Salam; H. Georgi, S. Glashow, 1974)
- Alla scala della GUT, ci devono essere nuove particelle intermedie che rendono l'interazione simmetrica
- le nuove interazioni collegano quark e leptoni, ma non conservano separatamente B e L, solo la combinazione B-L

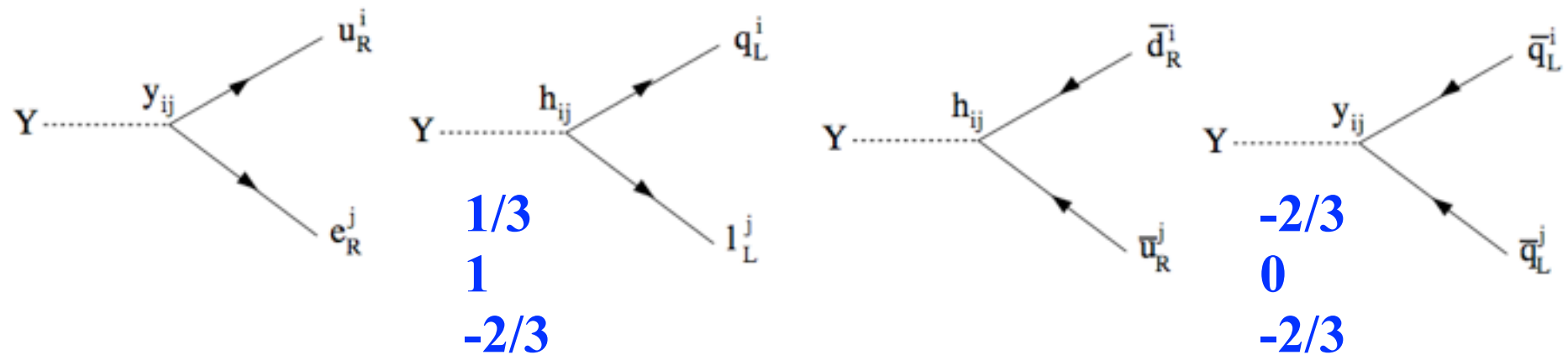


Nuove interazioni nella GUT SU(5) (Georgi&Glashow)

Bosone intermedio vettoriale



Bosone di Goldstone scalare



- Reazioni mediate da X o Y violano la conservazione di B:

$$u + e^- \rightarrow X, Y \rightarrow \bar{u} + \bar{d}, \text{ ovvero}$$

$$u + u \rightarrow e^+ + \bar{d}, \text{ ovvero}$$

$$Protone = [uud] \rightarrow e^+ + [d\bar{d}] = e^+ + \pi^0$$

- Il grande valore di M_{GUT} rende la vita media attesa del protone (quasi) compatibile con i limiti sperimentali di SuperKamiokande (lez. 25)

Bariogenesi nella GUT

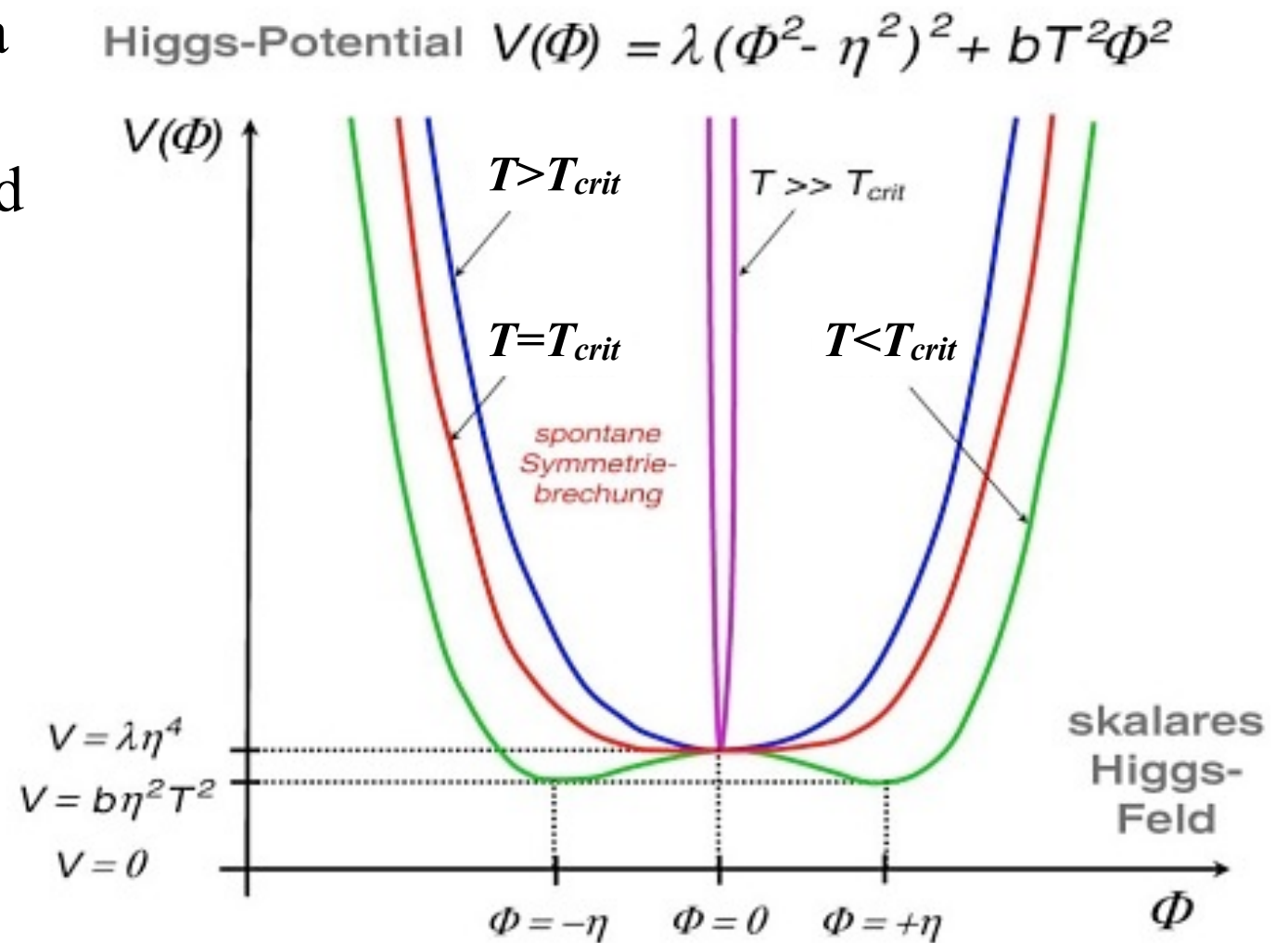
- X e Y possono decadere in modo da violare la conservazione di B
- si devono ipotizzare interazioni di Y che:
 - non rispettano la simmetria CP (e' ragionevole)
 - sono abbastanza lente da andare fuori dell'equilibrio termico a M_{GUT} (questo non e' realistico per i decadimenti di X)
- in queste condizioni, partendo da una popolazione simmetrica di particelle Y+anti Y si puo' generare un' asimmetria quark-antiquark che corrisponde a valori di n_B/n_γ prossimi, o anche superiori, ai valori forniti dalla nucleosintesi primordiale (Weinberg, Yoshimura, 1979; Kolb, Wolfram, 1980)
- tuttavia, dopo questi lavori si scopri' che nella Teoria Standard esiste un meccanismo che potrebbe cancellare l'asimmetria GUT (il troppo stropia) ma anche produrre una nuova asimmetria ad energie (temperature) molto inferiori, dell'ordine di M_W e collegata alle stesse interazioni della TS

3. Teoria Standard alle temperature del Big Bang

- L'acqua portata a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (al livello del mare) bolle, un ferromagnete sopra la temperatura di Curie si smagnetizza: sono esempi di 'cambiamenti di fase'
- ci possiamo chiedere cosa succede al "vuoto" se lo scaldiamo, mettendoci in un ambiente a temperatura T , come nel Big Bang
- il meccanismo di Higgs, dopotutto, e' simile ad una "magnetizzazione" del vuoto: puo' sparire ad alta temperatura? e in che modo?
- Negli anni '80 si svilupparono le tecniche per il calcolo delle proprieta' di una teoria di campo a temperatura finita, per vedere come cambiava con T il potenziale di Higgs, usando le tecniche sviluppate da Landau e Ginzburg nello studio delle transizioni di fase della materia condensata
- purtroppo i metodi di calcolo approssimato disponibili (la teoria delle perturbazioni) non sono completamente affidabili, pero' ci possono dare almeno degli orientamenti

transizione del secondo ordine

- Il potenziale di Higgs a $T=0$ e' dato dalla curva verde
- lo stato di minima energia corrisponde ad un valore del campo $\neq 0$, la massa del bosone di Higgs e' determinata dalla curvatura nel minimo ed e' quella che osserviamo
- le correzioni dovute alla temperatura vanno nella direzione della curva rossa
- a $T=T_{crit}$, curva rossa, il minimo ritorna nell'origine, il valore di del campo e' nullo e anche la massa del bosone di Higgs e' zero
- a T_{crit} , si passa dalla simmetria rotta spontaneamente alla simmetria esatta: i bosoni vettoriali hanno massa $=0$, come i fotoni, e le interazioni deboli sono come la QED
- La temperatura cui questo avviene e' dell'ordine di $m_H=100 \text{ GeV}=10^{24} \text{ } ^0\text{K}$
- molto minore di M_{GUT} , ma sempre di tipo Big-Bang
- la transizione e' simile alla smagnetizzazione del ferromagnete ad alta temperatura ed e' classificata come transizione del 2° ordine



ma la transizione potrebbe essere del 1° ordine

- ci potrebbero però essere altri andamenti, compatibili con una transizione del 1° ordine
- Partiamo da una temperatura altissima, $T > T_c$ e scendiamo.
- Il vuoto corrisponde alla simmetria esatta, $\phi = 0$
- scendendo in T , il potenziale forma una buca allo stesso livello di $\phi = 0$ e dà luogo alla formazione di “bolle” all’interno delle quali $\phi \neq 0$ e la simmetria è rotta
- al calare di T , le zone fuori delle bolle sono quelle del “falso vuoto”, il vuoto che è diventato instabile, e le bolle invadono tutto lo spazio fino a far scomparire il falso vuoto
- è il film al contrario di come l’acqua bolle

primo ordine

secondo ordine

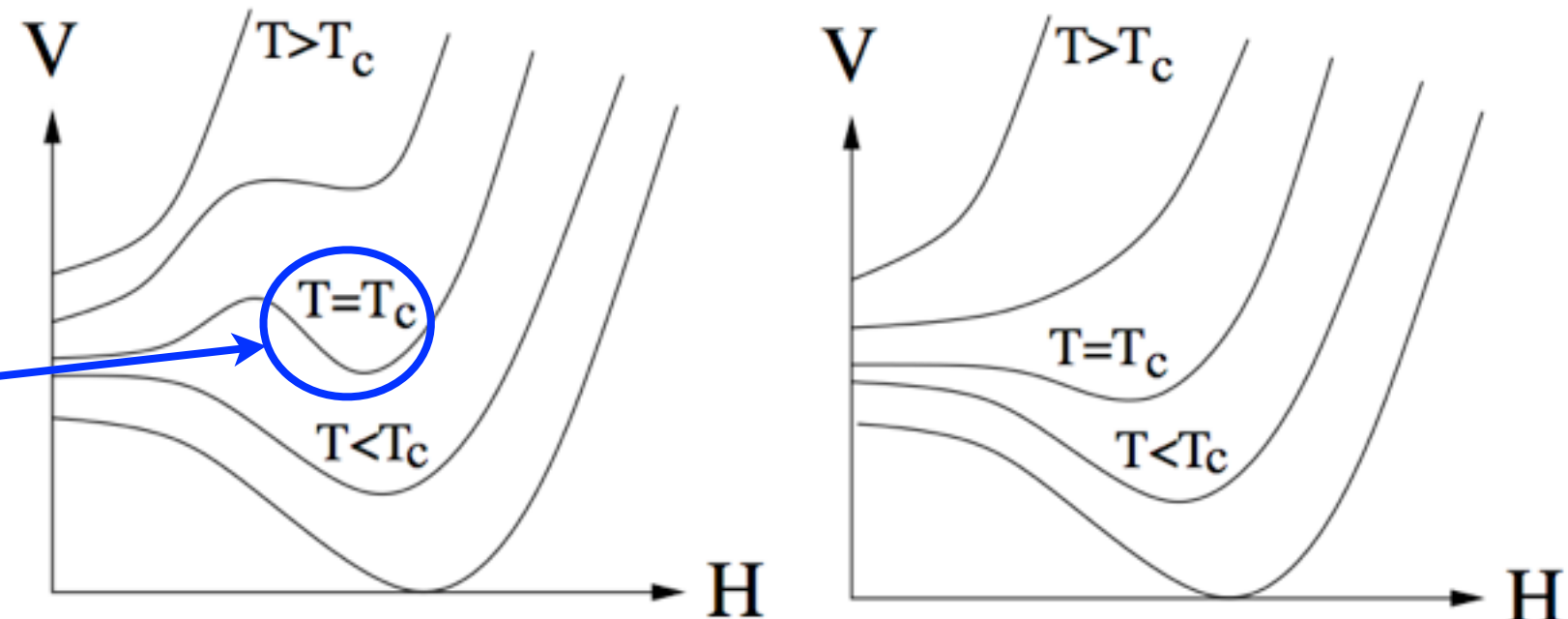


Fig. 10. Schematic illustration of Higgs potential evolution with temperature for first (left) and second (right) order phase transition.

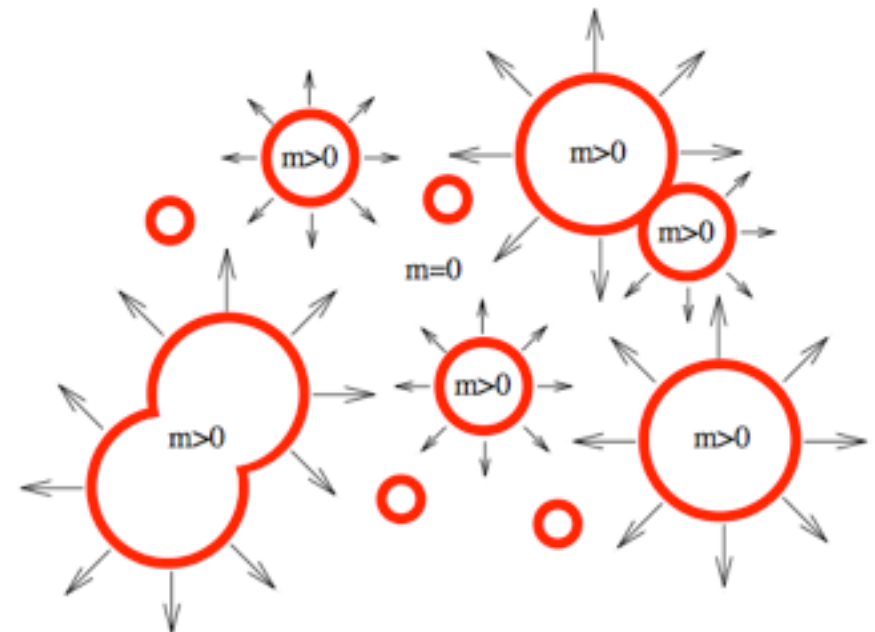


Fig. 11. Bubble nucleation during a first-order EWPT.

4. Solitoni, istantoni, sfaleroni

Wikipedia. SOLITON a self-reinforcing solitary [wave](#) (a [wave packet](#) or pulse) that maintains its shape while it propagates at a constant velocity. Solitons are caused by a cancellation of [nonlinear](#) and [dispersive effects](#) in the medium...Solitons are the solutions of a widespread class of weakly nonlinear dispersive [partial differential equations](#) describing physical systems.

In 1834, [John Scott Russell](#) describes his [wave of translation](#).^[nb 1] The discovery is described here in Scott Russell's own words:^[nb 2]

I was observing the motion of a boat which was rapidly drawn along a narrow channel by a pair of horses, when the boat suddenly stopped – not so the mass of water in the channel which it had put in motion; it accumulated round the prow of the vessel in a state of violent agitation, then suddenly leaving it behind, rolled forward with great velocity, assuming the form of a large solitary elevation, a rounded, smooth and well-defined heap of water, which continued its course along the channel apparently without change of form or diminution of speed. I followed it on horseback, and overtook it still rolling on at a rate of some eight or nine miles an hour, preserving its original figure some thirty feet long and a foot to a foot and a half in height. Its height gradually diminished, and after a chase of one or two miles I lost it in the windings of the channel. Such, in the month of August 1834, was my first chance interview with that singular and beautiful phenomenon which I have called the Wave of Translation.^[2]

Istantoni (Belavin, Polyakov, Schwarz, Tyupkin, 1975)

- Soluzioni classiche delle equazioni di Yang-Mills che descrivono la QCD, nello spazio-tempo a 4 dimensioni
- sono centrate intorno ad un punto dello spazio tempo, donde il nome (BPST li avevano chiamati pseudoparticles)
- soluzioni la cui stabilita' e' dovuta a proprieta' topologiche non triviali, che le distinguono dalla soluzione in cui i campi si annullano
- ci sono in QCD infiniti stati con energia zero e con numeri topologici diversi. L'istantone fornisce l'ampiezza di transizione da un vuoto all'altro

istantoni elettrodeboli

- Ci sono istantoni anche per la teoria elettrodebole, collegati al numero barionico e leptonico
- I vuoti tra cui interpolano gli istantoni elettrodeboli differiscono per $\Delta B = \Delta L = \pm 3$
- occorre superare (per effetto tunnel) una barriera di altezza $\approx m_H$

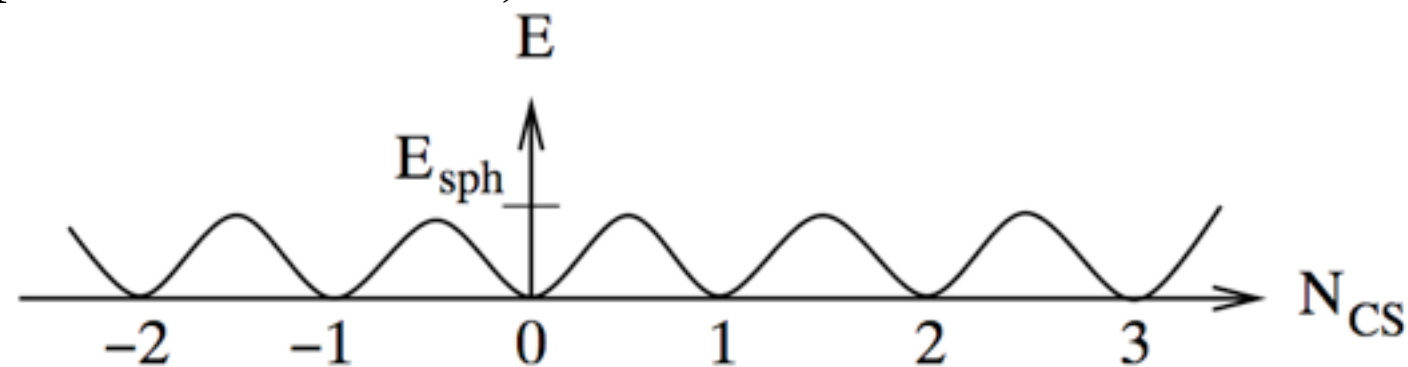


Fig. 8. Energy of gauge field configurations as a function of Chern-Simons number.

- L'istantone elettrodebole potrebbe produrre il decadimento con $\Delta B = -3$, $\Delta B - \Delta L = 0$ ('t-Hooft, 1976):

$$(pn) = D \rightarrow \bar{n} + e^+ + \bar{\nu}_\mu + \bar{\nu}_\tau$$

$$(B = 2, L = 0) \rightarrow (B = -1, L = -3)$$

- all'energia del deuterio la barriera e' cosi' alta che l'effetto darebbe una vita media $\gg$ eta' dell'Universo

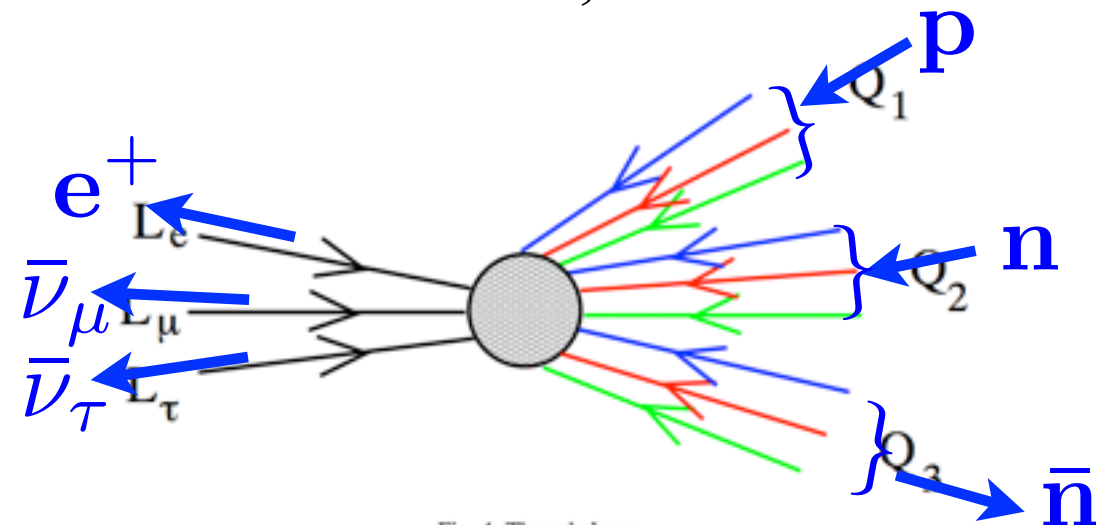


Fig. 4. The sphaleron.

5. Bariogenesi nella Teoria Standard

- ma a temperature $T \gg m_H = 100 \text{ GeV} = 10^{24} \text{ K}$ la barriera non c'è più e la transizione avviene liberamente. Gli istantoni, in questo caso, sono stati denominati sfaleroni da Klinkhamer a Manton
- nel vuoto si creano spontaneamente gli sfaleroni, per fluttuazioni quantistiche, che decadono in particelle e antiparticelle, violando B e L di tre unità
- Violazione di B negli sfaleroni e violazione di CP nella TS possono generare un'asimmetria barionica alla transizione di fase elettrodebole, *se la transizione è del 1° ordine*: in questo caso, le pareti delle bolle creano il disequilibrio termodinamico per soddisfare la terza condizione di Sakharov
- gli sfaleroni sono attivi nel falso vuoto e inattivi all'interno delle bolle
- ogni asimmetria al di fuori viene cancellata dagli sfaleroni, mentre dentro le bolle resta congelata
- quando la transizione è completa, l'asimmetria resta
- cautela: il parametro che regola la violazione di CP nella TS è stimato valere circa 10^{-20} e potrebbe essere di molti ordini di grandezza troppo piccolo per spiegare il valore osservato $\eta_B \sim 10^{-10}$.

6. Leptogenesis (Fukugita and Yanagida, 1986)

- Nella GUT di Pati e Salam, basata sul gruppo $O(10)$ c'è un neutrino pesante, N , che può essere una particella di Majorana, violando la conservazione di L .
- I decadimenti di N , fuori dell'equilibrio, possono generare un eccesso, L_{dec} , di numero leptonico, che corrisponde ad un eccesso di neutrini rispetto agli antineutrini
- gli sfaleroni conservano $B-L$ e distruggono $B+L$ e possono portare ad una situazione con $B_f + L_f = 0$, $B_f - L_f = 0 - L_{dec}$, ovvero $B_f = -L_{dec}/2$
- la grande massa di N favorisce una massa piccolissima dei neutrini che osserviamo
- tutto sommato sembra essere lo schema più promettente

Conseguenza inevitabile è che i neutrini del decadimento beta dovrebbero essere anch'essi particelle di Majorana e si dovrebbero osservare i decadimenti doppio beta senza neutrini...molti esperimenti li stanno cercando, anche al GranSasso..... i prossimi anni ci diranno

7. Conclusioni

- esistono meccanismi e scenari che possono spiegare l'asimmetria materia-antimateria dell'Universo anche se una predizione quantitativa appare lontana
- Bariogenesi esplora energie molto superiori a quelle della nucleosintesi: $m_H=100$ GeV, $M_{GUT}=10^{14}$ GeV, su cui, prima della TS, non avremmo saputo che dire
- Istantoni, sfaleroni confermano i sospetti su B e L: una simmetria solo globale può essere violata da anomalie non perturbative nella Teoria dei Campi
- Le prossime macchine misureranno il potenziale di Higgs, per fare luce sull'ordine della transizione di fase EW?
- Neutrini di Majorana a bassa energia ($0\nu-\beta\beta$ decay) possono “spiegare” perché siamo qui
- la ricerca di indicazioni precise sulle alte e altissime energie del Big Bang deve continuare.