

Luciano Maiani:  
Lezione Fermi 18

Tutto quello che volevate sapere sul bosone di Higgs...e non avete osato chiedere. 1

1. Cataloghi
2. le masse delle particelle elementari
3. Massa come campo
4. Fluttuazioni intorno al minimo
5. Il meccanismo di Brout-Englert-Higgs
6. Qualche problema, filosofico ma non troppo

# 1. Cataloghi



- *Three Stars Each*, circa 1200 aC. Catalogo babilonese con una lista di 36 stelle visibili nelle diverse zone del cielo. Il cielo e' diviso in tre bande di latitudine (nord, equatore, sud), ciascuna suddivisa in 12 settori. Per ogni settore sono riportate tre stelle, una per banda.
- ciascuna stella era considerata un oggetto unico, indivisibile, con caratteristiche primarie di movimento, luminosita', colore: il prototipo di "particella elementare".
- i cataloghi stellari moderni sono liste di oggetti di cui sappiamo composizione, storia, destino e che descriviamo in termini di particelle piu' elementari, legate dalla forza di gravita'.
- lo stesso vale per la tavola degli elementi, un tempo caratterizzati da proprieta' primarie, N-atomico e massa, oggi retrocessi a stati composti da elettroni protoni, neutroni,
- la frontiera: quark, leptoni, particelle forza, ciascuno caratterizzato da *massa, spin, numero barionico, carica elettrica*.

• MUL.APIN (1000 aC)  
Catalogo babilonese con una lista di 71 stelle visibili nelle diverse zone del cielo, rielaborazione del catalogo *Three Stars Each*.

## 2. Le masse delle particelle elementari

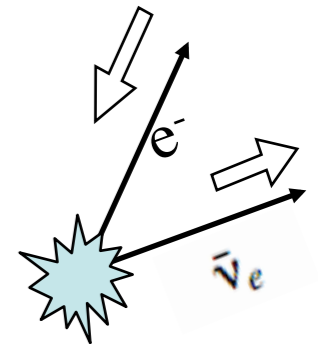
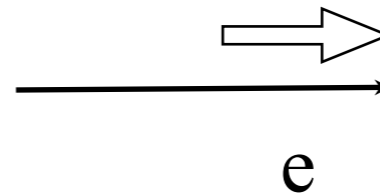
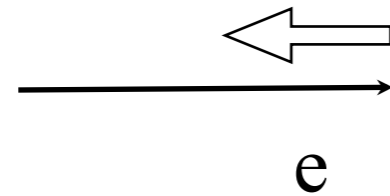
- In una teoria di campo, le masse sono dati primari, da desumere dai dati sperimentali, es. la massa dell'elettrone.
- Il problema nasce quando ci sono piu' campi con le stesse proprieta': c'e' qualcosa che determina le masse dei quark  $up_{\text{rosso}}$  o  $up_{\text{blue}}$  ?
- la simmetria esatta risolve il problema:  $up_{\text{rosso}}$ ,  $up_{\text{blue}}$ ,  $up_{\text{verde}}$  sono tre manifestazioni dello stesso oggetto e hanno esattamente la stessa massa
- ma che dire se la simmetria e' approssimata?
  - $up$ ( $\approx 4$  MeV),  $down$ ( $\approx 8$  MeV),  $strange$ ( $\approx 150$  MeV): Eightfold Way
- Il problema e' ancora piu' acuto nella teoria elettrodebole
- se la simmetria alla base della teoria di Yang-Mills elettrodebole e' rispettata,
  - i mediatori delle interazioni deboli dovrebbero avere  $M=0$  ( $M_W \approx 80 M_{\text{protone}}$ ,  $M_Z \approx 90 M_{\text{protone}}$ )
  - tutti i quark e tutti i leptoni dovrebbero avere massa = 0 ( $M_{\text{top}} \approx 173 M_{\text{protone}}$ )

# perche' l'elettrone dovrebbe avere massa =0

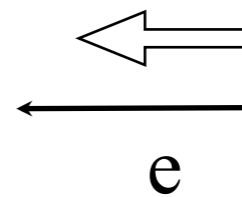
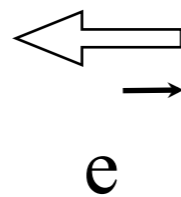
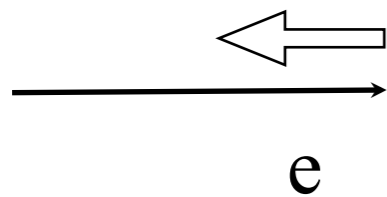
- le particelle emesse nei decadimenti beta hanno (approx.) elicità definita
- questo ci dice che i due stati dell'elettrone hanno cariche deboli diverse

$Q_W=1$ , partecipa alle interazioni

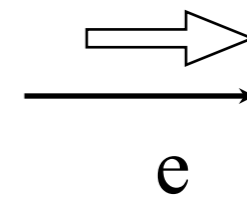
$Q_W=0$ , non partecipa



- se l'elettrone avesse una massa, potrei guardarlo da un sistema di riferimento che va più veloce
- in questo sistema, l'elettrone va all'indietro e lo stato che prima aveva  $Q_W=1$  appare come lo stato con  $Q_W=0$ :



=



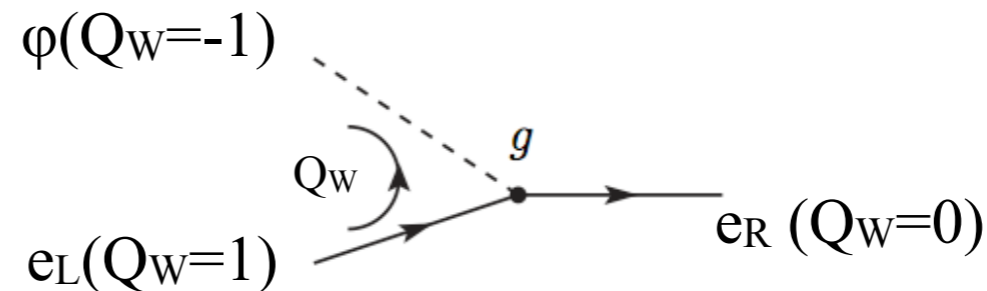
- al contrario, se  $m=0$ , lo stato con  $Q_W=1$  sarebbe diverso da quello con  $Q_W=0$  in tutti i sistemi di riferimento.
- Conclusione: la simmetria elettrodebole è violata se  $m_e \neq 0$
- lo stesso vale per le altre particelle-materia, quark e leptoni.

### 3. Massa come campo

- la massa (ad es. dell'elettrone) e' rappresentata da un termine nell'Azione della forma:

$$m_e \bar{\psi}(x) \psi(x)$$

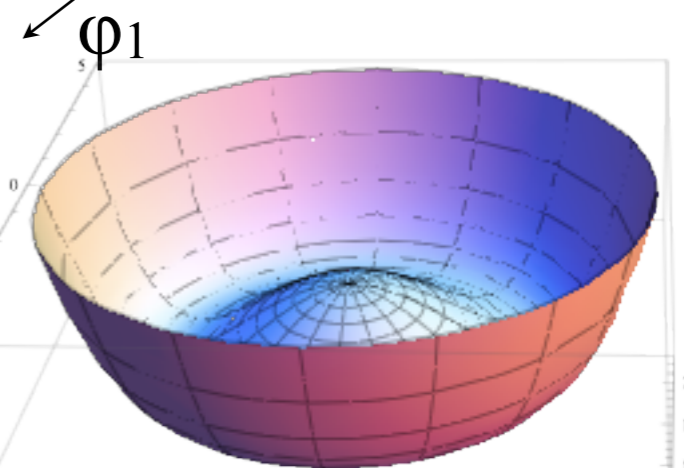
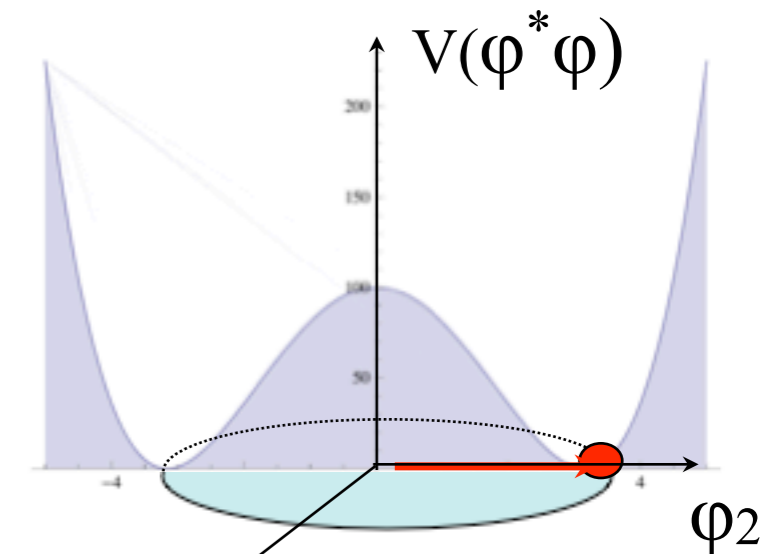
- mentre un termine ( $g$  e' una costante):  $g \phi(x) \bar{\psi}(x) \psi(x)$  rappresenta l'interazione dell'elettrone con i quanti del campo  $\phi$ , rappresentata dalla "storia"



- questa interazione conserva la carica  $Q_W$  se  $\phi$  ha  $Q_W=-1$ : la carica fluisce da  $e_L$  a  $\phi$ .
- Se  $\phi$  e' un campo scalare (spin 0) *si puo' realizzare una configurazione con  $\phi(x) = costante = \eta$ ,*
- se siamo partiti con  $m_e=0$  nell'Azione (simmetria esatta) l'interazione genera un termine di massa:  $m_e=g \eta$  e la simmetria e' violata*
- la massa dipende dalle condizioni ambientali !
- si parla in questo caso di *Rottura Spontanea della Simmetria*
- la prima applicazione del concetto alle particelle elementari e' dovuta a Yoichiro Nambu e Giovanni Jona-Lasinio (1961).

# Come si genera $\varphi(x) = \text{costante}$ ?

- Un quanto del campo con momento  $q$  si estende su una zona di dimensioni:  $\lambda = \frac{\hbar}{q}$
- se molti quanti (infiniti!) condensano nello stato con  $q=0$ , si forma un campo classico costante ( $\lambda = \infty$ )
- la condensazione spontanea e' possibile se corrisponde al minimo dell'energia
- per campi costanti, l'energia e' un "potenziale", una funzione  $V(\varphi)$
- se abbiamo un potenziale simmetrico e lo stato di minima energia corrisponde a  $\varphi = \eta \neq 0$ , il gioco e' fatto:
  - lo stato di "vuoto" rompe la simmetria
  - l'elettrone (materia) acquista una massa:  $m_e = g \eta$
- **figura.** Il potenziale e' funzione del modulo di un campo complesso  $\varphi = \varphi_1 + i\varphi_2$  e la simmetria e' quella per trasformazioni di fase:  $\varphi \rightarrow e^{i\alpha}\varphi$ , che corrisponde alle rotazioni del piano ( $\varphi_1, \varphi_2$ ).
- E' mostrato un possibile minimo che, evidentemente, non e' simmetrico per rotazioni e corrisponde alla rottura spontanea della simmetria.



Potenziale "a sombrero"

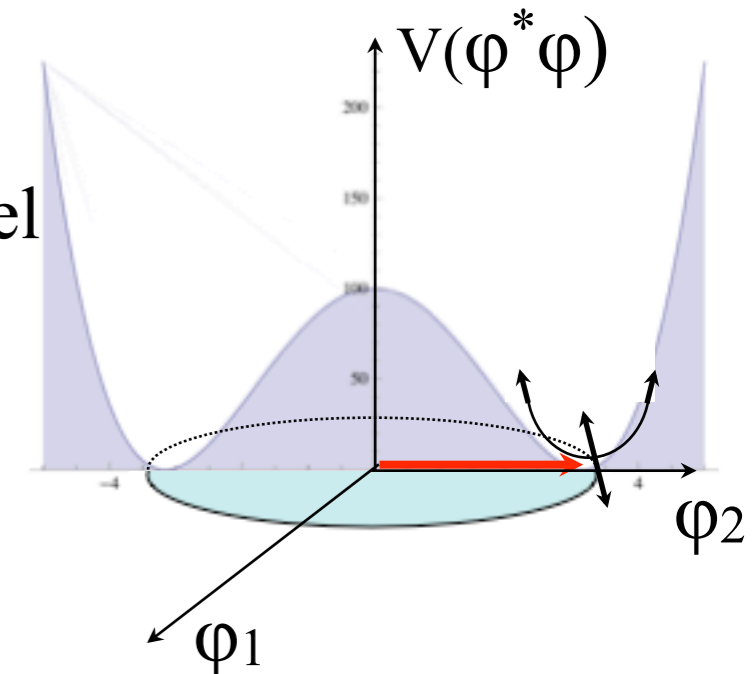
# Analogie

- nelle condizioni appena descritte, il campo  $\phi$  ha due componenti distinte:
  - il “condensato”: il modo di oscillazione con  $q=0$ , occupato da infiniti quanti, che si comporta come un campo classico costante
  - gli altri modi di oscillazione, occupati da pochi quanti (0,1..), che si comportano come un campo quantistico
- possiamo scrivere:  $\phi(x) = \eta + \phi_{quant}(x)$
- la situazione e' conosciuta nella fisica della materia condensata:
  - gas di Bose Einstein presenta la stessa condensazione al di sotto di una temperatura critica
  - lo Elio ha una simile transizione sotto 4<sup>0</sup>K, il condensato si comporta come un fluido senza attrito (superfluidita')
  - il condensato BE e' stato osservato in molti altri atomi
  - diversi metalli presentano una transizione a bassa temperatura ad uno stato in cui la corrente circola senza resistenza (superconduttivita'): secondo la teoria di Bardeen, Cooper e Schrieffer, il condensato e' costituito da coppie di elettroni (coppie di Cooper) che si comportano come un condensato di bosoni.

## 4. Fluttuazioni intorno al minimo

$$\phi(x) = \eta + \phi_{quant}(x)$$

- Il campo  $\phi$  assomiglia alla superficie di un lago: un livello costante,  $\eta$ , e delle fluttuazioni quantistiche rappresentate da  $\phi_{quant}$ . L'Azione per le piccole fluttuazioni si ottiene dalla forma del potenziale intorno al minimo
- la frequenza delle oscillazioni si deriva dalla curvatura del potenziale nel minimo ed e' collegata alla massa dei quanti
- ci sono due tipi di oscillazioni:
- “radiali”, curvatura diversa da zero, definita dalla forma del potenziale,  $m \neq 0$
- “tangenziali” al cerchio dei minimi con curvatura nulla
- queste ultime corrispondono a una particella di massa  $m=0$
- un risultato non accidentale, che deriva direttamente dalla simmetria del potenziale: il minimo non e' in posizione simmetrica, quindi ce ne devono essere (infiniti) altri allo stesso livello.
- Questo risultato e' noto come Teorema di Goldstone (1960) e la particella di massa 0 come Bosone di Nambu-Goldstone



ma queste particelle non esistono



# CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF THE UNIFIED THEORY OF WEAK AND ELECTROMAGNETIC INTERACTIONS

Nobel Lecture, December 8, 1979

by STEVEN WEINBERG

Lyman Laboratory of Physics Harvard University and Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics  
Cambridge, Mass., USA.

.....

As theorists sometimes do, I fell in love with this idea. But as often happens with love affairs, at first I was rather confused about its implications.

I thought (as turned out, wrongly) that the approximate symmetries - parity, isospin, strangeness, the eight-fold way - might really be exact a priori symmetry principles, and that the observed violations of these symmetries might somehow be brought about by spontaneous symmetry breaking.

It was therefore rather disturbing for me to hear of a result of Goldstone (*Nuovo Cimento* **19**, 154, 1961), that in at least one simple case the spontaneous breakdown of a continuous symmetry like isospin would necessarily entail the existence of a massless spin zero particle - what would today be called a “Goldstone boson.”

It seemed obvious that there could not exist any new type of massless particle of this sort which would not already have been discovered.

## 5. Una via d'uscita stupefacente (Brout-Englert, Higgs, 1964-1966)

- Il teorema di Goldstone e' un ostacolo insormontabile per attribuire la violazione delle simmetrie globali (spin isotopico, Eightfold way) ad una rottura spontanea
- ma l'applicazione a teorie con simmetrie locali aveva sollevato dei dubbi fin dall'inizio
- due lavori (Brout e Englert, 1964; Higgs 1966) hanno mostrato che, in questi casi, un fenomeno sorprendente elimina l'ostacolo.
- Consideriamo trasformazioni di fase, come prima, ma locali:
  - $\varphi(\mathbf{x}) \rightarrow e^{i\alpha(\mathbf{x})}\varphi(\mathbf{x})$
- ci vuole anche un campo vettoriale a massa nulla:
  - $A_\mu(\mathbf{x}) \rightarrow A_\mu(\mathbf{x}) + \partial_\mu\alpha(\mathbf{x})$
- dopo rottura spontanea, si vede che:
  - il campo di Goldstone puo' essere completamente eliminato con una trasformazione di gauge
  - il campo  $A_\mu(\mathbf{x})$  acquista una massa  $M_A$

**Il Meccanismo di Brout-Englert-Higgs elimina il bosone di Goldstone e produce una teoria senza particelle di massa zero**

- Come si elimina il campo di Goldstone:

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \eta + \frac{\psi_1(x) + i\psi_2(x)}{\sqrt{2}} \approx \\ &= \eta e^{\frac{\psi_1(x) + i\psi_2(x)}{\sqrt{2}\eta}} = \rho(x) e^{i\frac{\psi_2(x)}{\sqrt{2}\eta}} \\ &\text{equivalente a } \rho(x) = \eta + \frac{\sigma(x)}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

- Come si produce la massa di A:  $M_A^2 = 2g^2\eta^2$

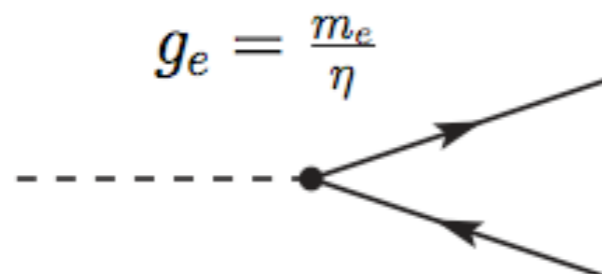
$$\begin{aligned} D_\mu \rho(x) &= \frac{\partial_\mu \sigma}{\sqrt{2}} + igA_\mu \left( \eta + \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right) \\ (D_\mu \rho)^* (D^\mu \rho) &= g^2 \left( \eta + \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right)^2 A_\mu A^\mu \end{aligned}$$

- Come si produce la massa dell'elettrone:  $m_e = g_e \eta$

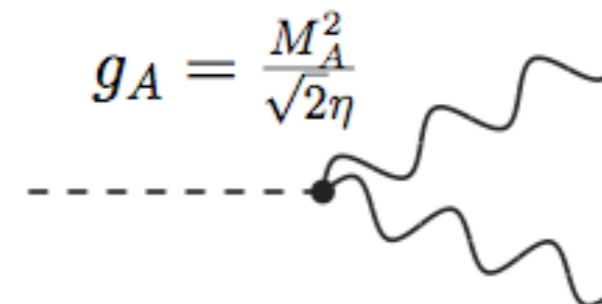
$$g_e \left( \eta + \frac{\sigma(x)}{\sqrt{2}} \right) \bar{\psi}(x) \psi(x)$$

- **Importante:** gli accoppiamenti si ottengono con la sostituzione:  $\eta \rightarrow \sigma/\sqrt{2}$ ,
- conosco  $\eta$  (dalla costante di Fermi), quindi gli accoppiamenti sono noti dalle masse
- questa e' la firma del bosone di Higgs !

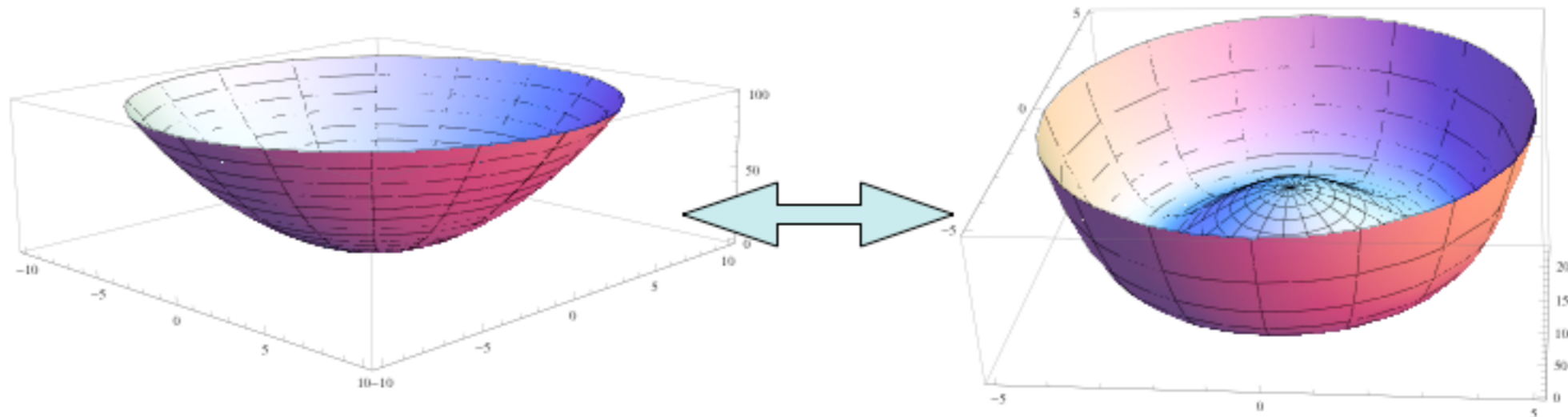
$$\sigma \rightarrow e^+ e^-$$



$$\sigma \rightarrow A A$$



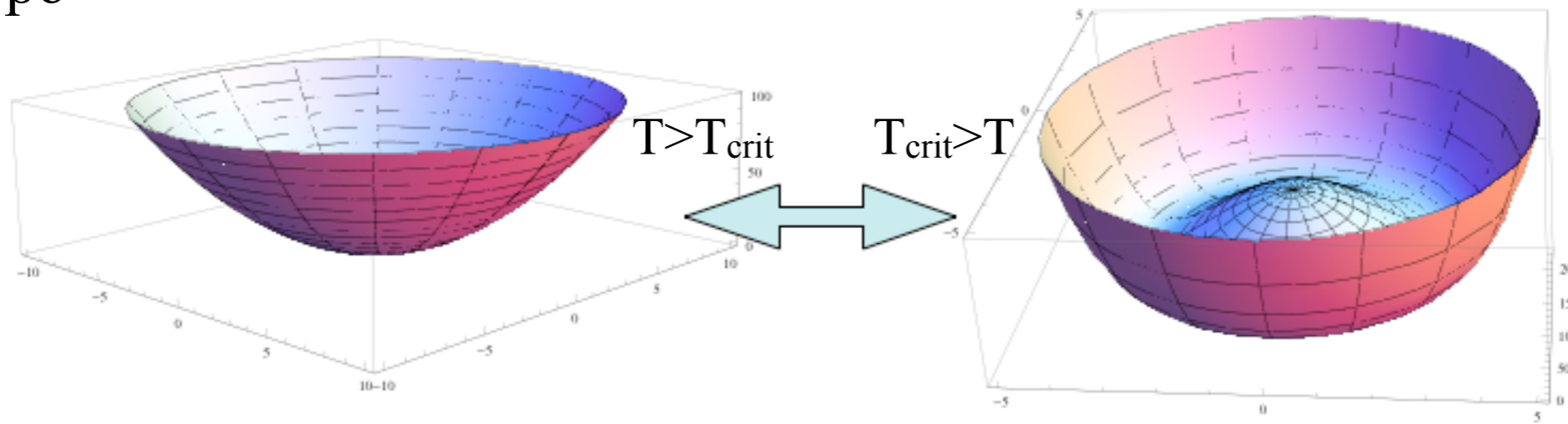
# gradi di liberta'



- La teoria con  $\varphi(x)$  e  $A_\mu(x)$  e con un potenziale puramente concavo (senza rottura) ha quattro gradi di liberta':
  - $\varphi = 2$  campi scalari,  $A_\mu = 2$  stati di elicitati, come il fotone
- Variamo il potenziale in modo da ottenere la rottura spontanea
- otteniamo: 1 campo scalare + una particella con massa di spin 1 = 3 stati di elicitati
- il totale e' invariato!
- il meccanismo di Higgs ridistribuisce i gradi di liberta': quello che sarebbe stato il campo di Goldstone diventa il terzo stato di elicitati di A.

## 6. Qualche problema, filosofico ma non troppo

- Il campo costante:  $\varphi = \eta$  si estende in tutto lo spazio
- ma che succede nel Big Bang?
- gli effetti della temperatura sul potenziale  $V(\varphi)$  si possono stimare, entro certi limiti
- ad alta temperatura il cappello messicano diventa concavo e la simmetria e' ristabilita: subito dopo il Big Bang eravamo in una fase senza masse, che si sono create dopo



- l'energia immagazzinata nel campo di Higgs ha effetti gravitazionali? se si stima la "costante cosmologica" corrispondente si trova un risultato sbagliato di circa 120 ordini di grandezza!
- le masse non sono piu' costanti immutabili, scritte nel quaderno del Padreterno: ci sono altri universi in cui quark e leptoni hanno masse diverse? sono ospitali/ inospitali alla vita?
- il campo di Higgs ha a che vedere con l'inflazione dell'Universo primordiale ?