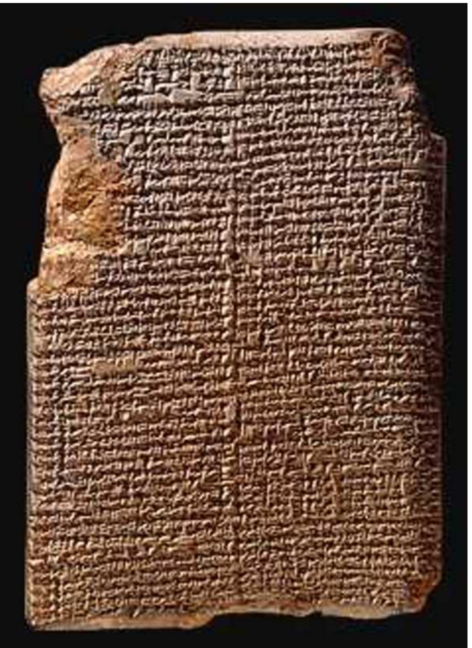
. Lezione Fermi 18

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



L.APIN (1000 aC)
logo babilonese con
lista di 71 stelle
bili nelle diverse zone

- *Three Stars Each*, circa 1200 aC. Catalogo babilonese con una lista di 36 stelle visibili ne diverse zone del cielo. Il cielo e' diviso in tre 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 unic indivisibile, con caratteristiche primarie di movimento, luminosita', colore: il prototipo d "particella elementare".
- i cataloghi stellari moderni sono liste di ogget cui sappiamo composizione, storia, destino e descriviamo in termini di particelle piu' eleme legate dalla forza di gravita'.
- lo stesso vale per la tavola degli elementi, un caratterizzati da proprieta' primarie, N-atomic massa, oggi retrocessi a stati composti da elett protoni, neutroni,

una teoria di campo, le masse sono dati primari, da desumere dai dati
erimentali, es. la massa dell'elettrone.

problema nasce quando ci sono piu' campi con le stesse proprieta': c'e'
alcosa che determina le masse dei quark up_{rosso} o up_{blue} ?

simmetria esatta risolve il problema: up_{rosso}, up_{blue}, up_{verde} sono tre
nifestazioni dello stesso oggetto e hanno esattamente la stessa massa

che dire se la simmetria e' approssimata?

up(≃4 MeV), *down*(≃8 MeV), *strange*(≃150 MeV): Eightfold Way

problema e' ancora piu'acuto nella teoria elettrodebole

la simmetria alla base della teoria di Yang-Mills elettrodebole e' rispet

i mediatori delle interazioni deboli dovrebbero avere M=0 ($M_W \simeq 80\ M_{\mathrm{protone}}$, $M_Z \simeq 90\ M_{\mathrm{p}}$

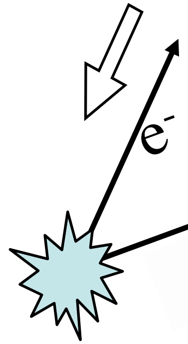
tutti i quark e tutti i leptoni dovrebbero avere massa = 0 ($M_{\mathrm{top}} \simeq 173\ M_{\mathrm{protone}}$)

particelle emesse nei decadimenti beta hanno (approx.) elicita' definit

esto ci dice che i due stati dell'elettrone hanno cariche deboli diverse

$Q_W=1$, partecipa alle interazioni

$Q_W=0$, non partecipa



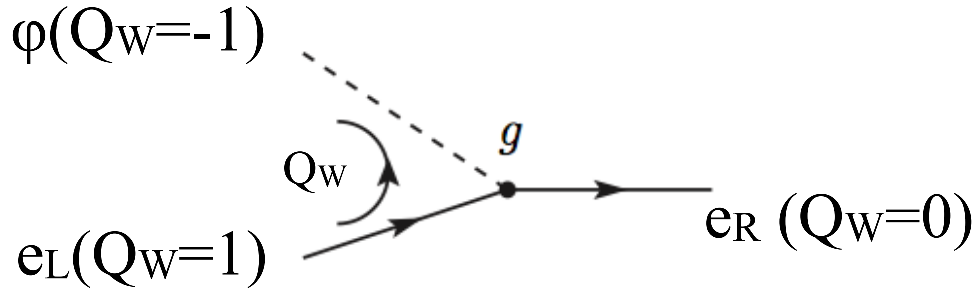
l'elettrone avesse una massa, potrei guardarlo da un sistema di riferim
e va piu' veloce

questo sistema, l'elettrone va all'indietro e lo stato che prima aveva Q
pare come lo stato con $Q_W=0$:

contrario, se m=0, lo stato con $Q_W=1$ sarebbe diverso da quello con Q
tutti i sistemi di riferimento.

a 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 φ, rappresentata dalla "storia"



questa interazione conserva la carica Q_W se φ ha Q_W=-1: la carica fluisce da e_L a φ.

Se φ e' un campo scalare (spin 0) ***si puo' realizzare una configurazione con φ(x)= costante = η,***

se siamo partiti con m_e=0 nell'Azione (simmetria esatta) l'interazione genera un termine di massa: m_e=g η e la simmetria e' violata

a massa dipende dalle condizioni ambientali !

si parla in questo caso di ***Rottura Spontanea della Simmetria***

a prima applicazione del concetto alle particelle elementari e' dovuta a quanto del campo con momento q si estende su una zona di dimensioni: λ

molti quanti (infiniti!) condensano nello stato con q=0, si forma un campo ssico costante ($\lambda = \infty$)

condensazione spontanea e' possibile se corrisponde al minimo dell'energia

campi costanti, l'energia e' un "potenziale", una funzione $V(\varphi)$

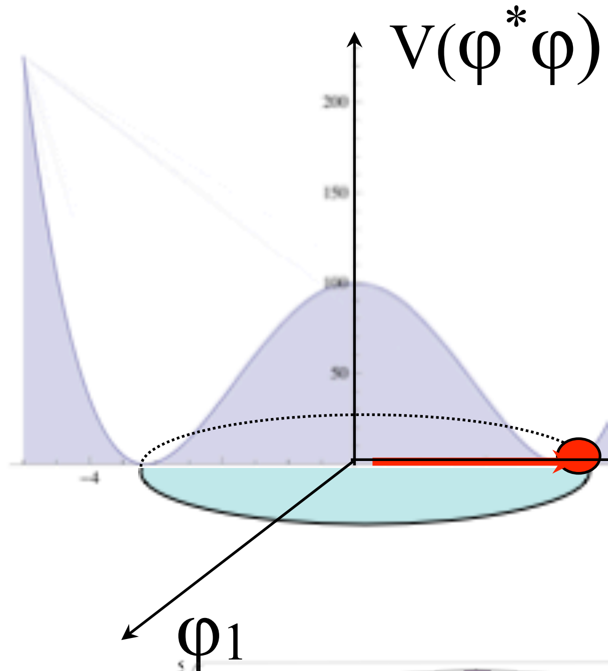
abbiamo un potenziale simmetrico e lo stato di minima energia corrisponde $\eta \neq 0$, il gioco e' fatto:

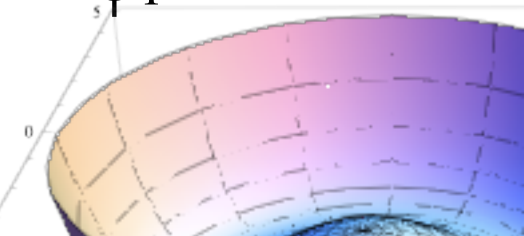
lo stato di "vuoto" rompe la simmetria

l'elettrone (materia) acquista una massa: $m_e = g\,\eta$

ra. Il potenziale e' funzione del modulo di un campo plesso $\varphi=\varphi_1+i\varphi_2$ e la simmetria e' quella per ormazioni di fase: $\varphi \rightarrow e^{i\alpha}\varphi$, che corrisponde alle ioni del piano (φ_1, φ_2).

ostrato un possibile minimo che, evidentemente, non nmetrico per rotazioni e corrisponde alla rottura tanea della simmetria.





- nelle condizioni appena descritte, il campo φ 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 4^0K, 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 abassa temperatura ad uno stato in cui la corrente circola senza resistenza (superconduttivita’): secondo la teoria di

$$\varphi(x) = \eta + \varphi_{quant}(x)$$

l campo φ assomiglia alla superficie di un lago: un livello costante, η, e
elle fluttuazioni quantistiche rappresentate da φ_{quant}. L'Azione per le
piccole fluttuazioni si ottiene dalla forma del potenziale intorno al
minimo

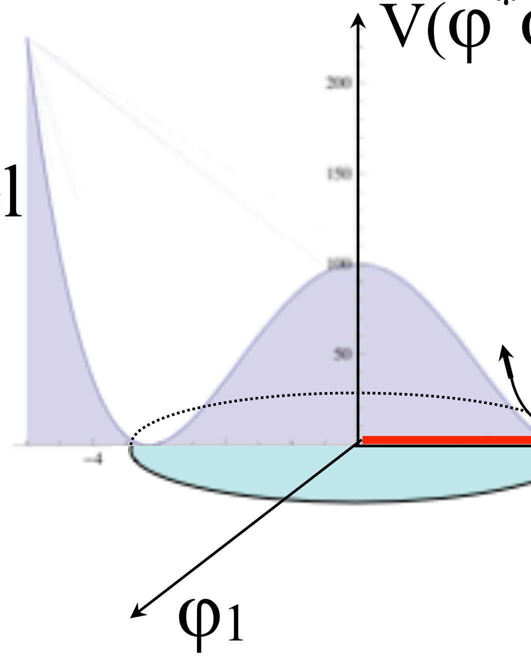
a frequenza delle oscillazioni si deriva dalla curvatura del potenziale nel
minimo ed e' collegata alla massa dei quanti
sono due tipi di oscillazioni:

radiali", curvatura diversa da zero, definita dalla forma del
otenziale, m ≠ 0

angenziali" al cerchio dei minimi con curvatura nulla

ueste ultime corrispondono a una particella di massa m=0

risultato non accidentale, che deriva direttamente dalla
mmetria del potenziale: il minimo non e' in posizione
mmetrica, quindi ce ne devono essere (infiniti) altri allo
esso livello.



uesto risultato e' noto come Teorema di Goldstone (1960) e
particella di massa 0 come Bosone di Nambu-Goldstone

Nobel Lecture, December 8, 1979
by STEVEN WEINBERG
Lyman Laboratory of Physics Harvard University and Harvard-Smithson- ian 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.

eorema di Goldstone e' un ostacolo insormontabile per attribuire la
lazione delle simmetrie globali (spin isotopico, Eightfold way) ad una
ura spontanea

l'applicazione a teorie con simmetrie locali aveva sollevato dei dubbi
'inizio

lavori (Brout e Englert, 1964; Higgs 1966) hanno mostrato che, in qu
i, un fenomeno sorprendente elimina l'ostacolo.

nsideriamo trasformazioni di fase, come prima, ma locali:

$\varphi(x) \to e^{i\alpha(x)}\varphi(x)$

uole anche un campo vettoriale a massa nulla:

$A_\mu(x) \to A_\mu(x)+\partial_\mu\alpha(x)$

o rottura spontanea, si vede che:

l campo di Goldstone puo' essere completamente eliminato con una trasformazione di g

l campo $A_\mu(x)$ acquista una massa M_A

Il Meccanismo di Brout-Englert-Higgs elimina il bosone di ne si elimina il campo di Goldstone:

$$\phi(x) = \eta + \frac{\psi_1(x) + i\psi_2(x)}{\sqrt{2}}$$

$$= \eta\, e^{\frac{\psi_1(x)+i\psi_2(x)}{\sqrt{2}\eta}} = \rho(x)\, e^{i\frac{\psi_2}{\sqrt{}}}$$

$$\text{equivalente a } \rho(x) = \eta + \frac{\sigma(}{\sqrt{}}$$

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

$$D_\mu\rho(x) = \frac{\partial_\mu\sigma}{\sqrt{2}} + igA_\mu(\eta + \frac{\sigma}{\sqrt{2}}$$

$$(D_\mu\rho)^\star(D^\mu\rho) = g^2(\eta + \frac{\sigma}{\sqrt{2}})^2 A$$

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

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

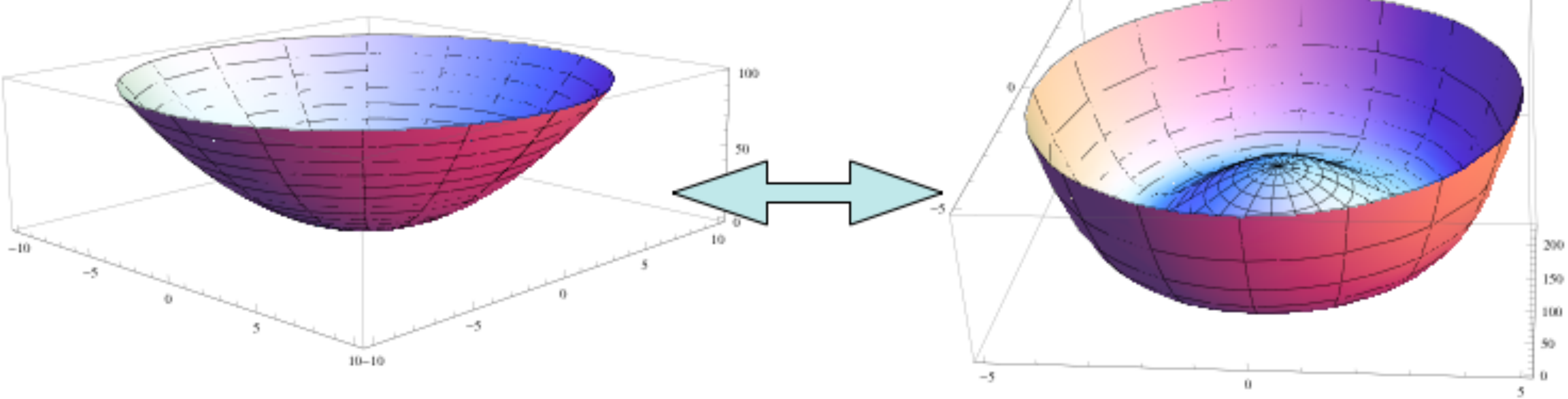
rtante: gli accoppiamenti si ottengono con la sostituzione: $\eta \to \sigma/\sqrt{2}$,

sco η (dalla costante di Fermi), quindi gli accoppiamenti sono noti dalle ma

ta e' la firma del bosone di Higgs !

$$\boxed{\sigma \to e^+\, e^-} \qquad \boxed{\sigma \to A\, A}$$

$$g_e = \frac{m_e}{\eta} \qquad g_A = \frac{M_A^2}{\sqrt{2}\eta}$$



La teoria con $\varphi(x)$ e $A_\mu(x)$ e con un potenziale puramente concavo (senza rottura) ha quattro gradi di liberta':

– φ =2 campi scalari, A_μ =2 stati di elicita‘, 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 elicita'

il totale e‘ invariato!

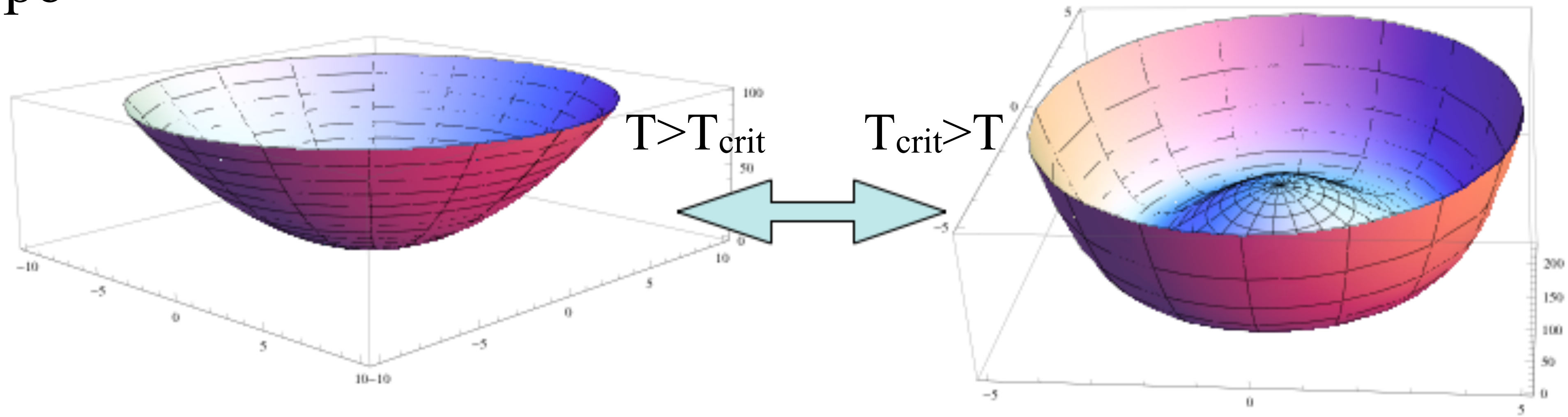
il meccanismo di Higgs ridistribuisce i gradi di liberta': quello che sarebbe stato il campo di Goldstone diventa il terzo stato di elicita‘ di A.

ampo costante: φ= η si estende in tutto lo spazio

che succede nel Big Bang?

effetti della temperatura sul potenziale V(φ) si possono stimare, entro certi

alta temperatura il cappello messicano diventa concavo e la simmetria e'
abilita: subito dopo il BigBang eravamo in una fase senza masse, che si son
ate dopo



nergia immagazzinata nel campo di Higgs ha effetti gravitazionali? se si stin
ostante cosmologica" corrispondente si trova un risultato sbagliato di circa 1
ini di grandezza!

masse non sono piu' costanti immutabili, scritte nel quaderno del Padreterno
no altri universi in cui quark e leptoni hanno masse diverse? sono ospitali/
spitali alla vita?