

*Campi Quantistici  
&  
Interazioni*

*Danilo Babusci*

INFN - Laboratori Nazionali di  
Frascati

Stage Estivo LNF 2011

# Meccanica Quantistica

---

- L'aspetto probabilistico sembra essere l'essenza ultima delle leggi fondamentali della natura
- La fusione dei concetti di onda e particella richiedono l'abbandono di alcune idee classiche:
  - Onda: rinuncia all'idea di un mezzo materiale che vibra e fornisce supporto alla propagazione
  - Particella: rinuncia all'idea della localizzabilità



onda - particella  $\equiv$  **campo quantistico**

# Concetto di Campo

---

Faraday & Maxwell

Concetto fondamentale: **etere** = sostanza impalpabile che riempie tutto lo spazio

Concetto ausiliario: **campo** = disturbo, stato di tensione, disomogeneità dell'etere

(benché ausiliario è il solo ente suscettibile di misura)

Einstein (1) : rivoluzione **relativistica**

**etere non misurabile** → **non esiste**: equazioni della teoria e.m. inalterate ma il **campo** diviene **entità reale** residente in spazio altrimenti vuoto

# Concetto di Campo

---

Einstein (2) : rivoluzione quantistica

campo come entità corpuscolare che può essere creato o distrutto in pacchetti discreti (quanti)



campo = disturbo in un fluido → campo = fluido  
diffuso in una regione definita dello spazio +  
propagazione ondosa da un punto all'altro

N.B. anche in eventi di assorbimento/emissione si ha  
comportamento ondoso quando agiscono coerentemente  
un n. sufficiente di campi → continuità del mondo  
macroscopico

# Concetto di Campo

---

Fusione **M.Q. - T.R.** : (per motivi puramente matematici)  
possibile solo se tutte le particelle sono **campi quantistici**



concetto moderno di **Campo**

Entità fisica che si propaga sotto forma di **onda**  
attraverso lo spazio trasportando **E** e **p** (ed altre  
quantità fisiche misurabili)

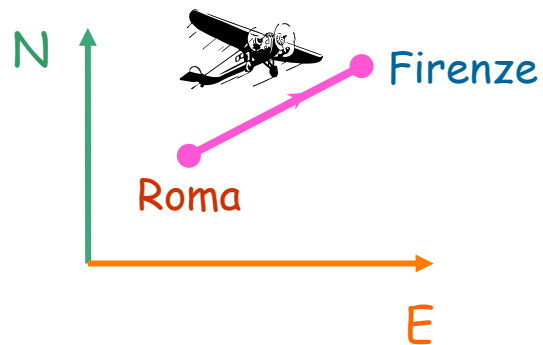
Entra/esce dall'esistenza **istantaneamente** in un  
**punto definito** dello **spazio-tempo**

Ad esso risulta associata una **massa ben precisa**

il campo **e-** può essere creato con **E** (o **p**) qualsiasi,  
ma ha sempre  **$mc^2 = 511 \text{ keV}$**

# Interazioni tra Campi

Carte geografiche 2-dimensionali

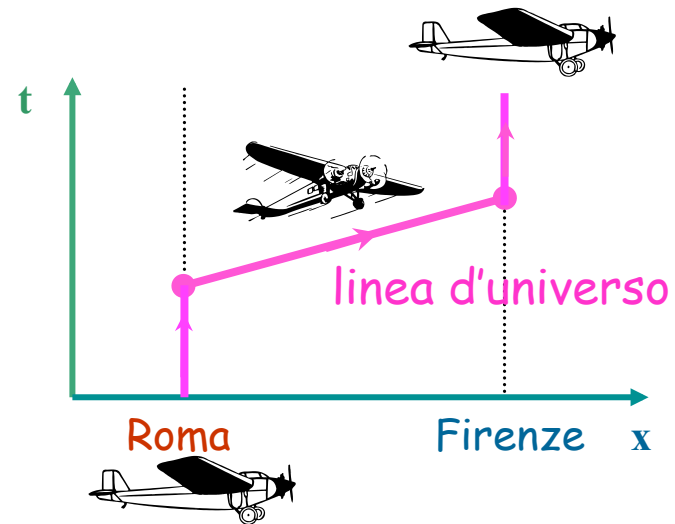


Solo ordinamento temporale degli eventi:  
nulla **sull'istante** in cui accadono

Raffinamento: aggiungo **3<sup>a</sup> dimensione**  
→ conosco l'altezza dell'aereo rispetto al suolo

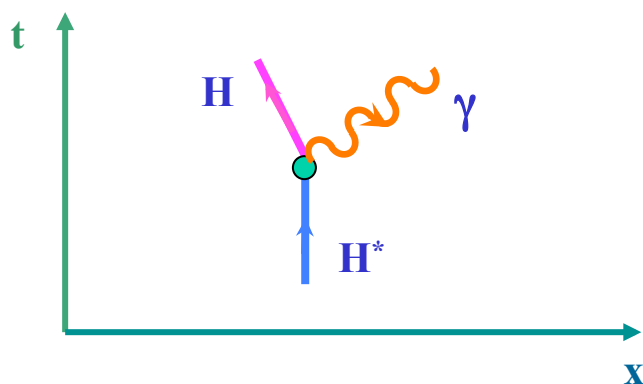
**T.R.** : spazio-tempo →  
geografia 4-dim.

impossibile da rappresentare  
→ surrogato 2-dim.

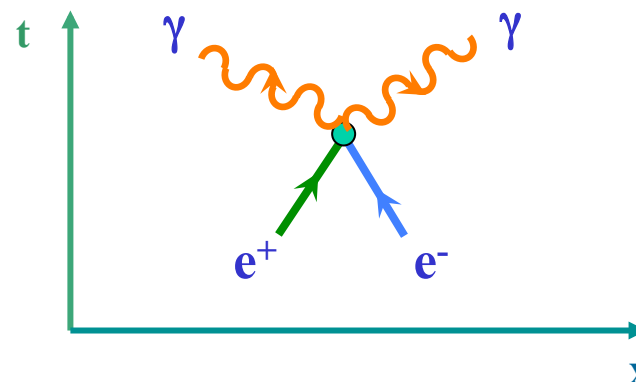


# Interazioni tra Campi

Processi tra particelle: **diagrammi di Feynman**



diseccitazione atomo H

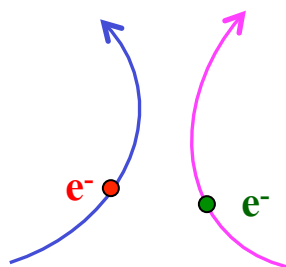


$e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$

- ✓ Inclinazione linea d'universo rispetto asse **t**  
= **velocità della particella**
- ✓ **Vertice** •  $\equiv$  particella cessa di esistere e nello stesso punto dello spaziotempo ne nascono altre

# Interazioni tra Campi

## Fisica Classica

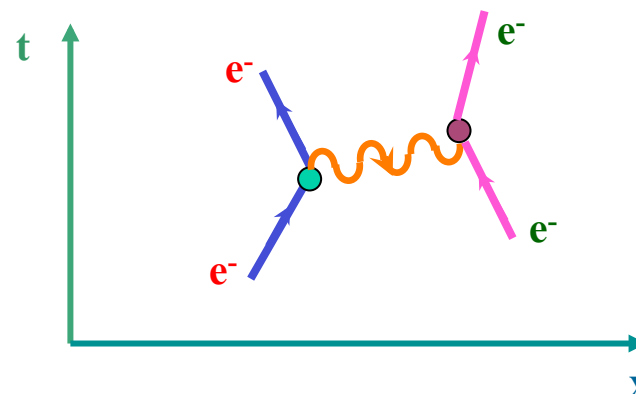


elettroni si avvicinano →  
mutua repulsione →  
rallentati e deviati



Azione a distanza

## Fisica Quantistica



- $e^-$  emette  $\gamma$  → cambia velocità
- $e^-$  assorbe  $\gamma$  → cambia velocità



Interazione = scambio del  $\gamma$

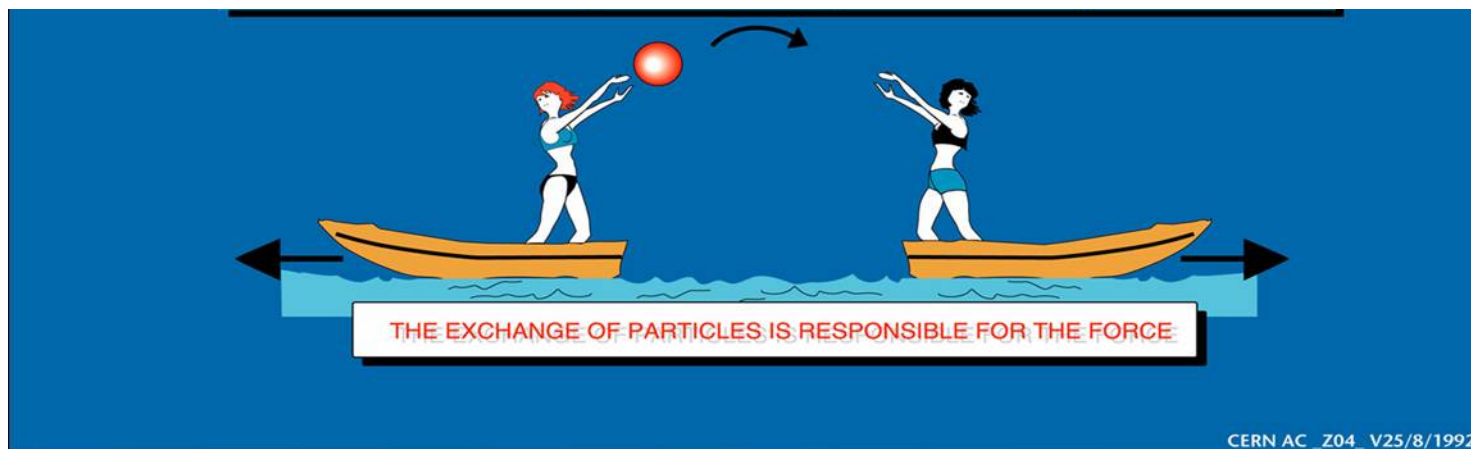


# Interazioni tra Campi

---

Attenzione alle metafore non completamente corrette del processo d'interazione tra campi

(fonte: sito Educational del CERN; ripresa nel testo di fisica per licei di U. Amaldi)



... concetti della Fisica Quantistica non sempre descrivibili con esempi tratti dalla vita quotidiana

# Particelle Virtuali

---

Interazione base non è tra i 2  $e^-$ , ma tra ciascuno di essi ed il  $\gamma$  → sostituisco azione a distanza con l'idea di interazione locale:  $e^-$  localmente (i.e. dove si trova) interagisce con il  $\gamma$



ruolo chiave dei vertici

**Problema:** nei vertici è impossibile conservare allo stesso tempo energia ed impulso\* → il  $\gamma$  in volo tra i vertici non può essere reale !!



\*conservazione simultanea di E e p

$$\Rightarrow \cos \Theta_{ey} > 1 !!$$

particelle virtuali

# Particelle Virtuali

---

Cos'è una **particella virtuale** ??

$\Delta E \Delta t \geq \hbar$  → indulgenza nella legge di conservazione di E

è **consentita** una violazione di entità  $\Delta E$  della legge di conservazione dell'energia, **purché duri per un tempo**

$$\Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E}$$

Esempio :  $\Delta E = 1 \text{ MeV}$   
 $\hbar = 7 \times 10^{-22} \text{ MeV s}$  →  $\Delta t = 7 \times 10^{-22} \text{ s}$

spazio percorso dal fotone in  $\Delta t$ :  $c \Delta t \approx 2 \times 10^{-13} \text{ m}$

# Particelle Virtuali

---



Immagine moderna delle interazioni

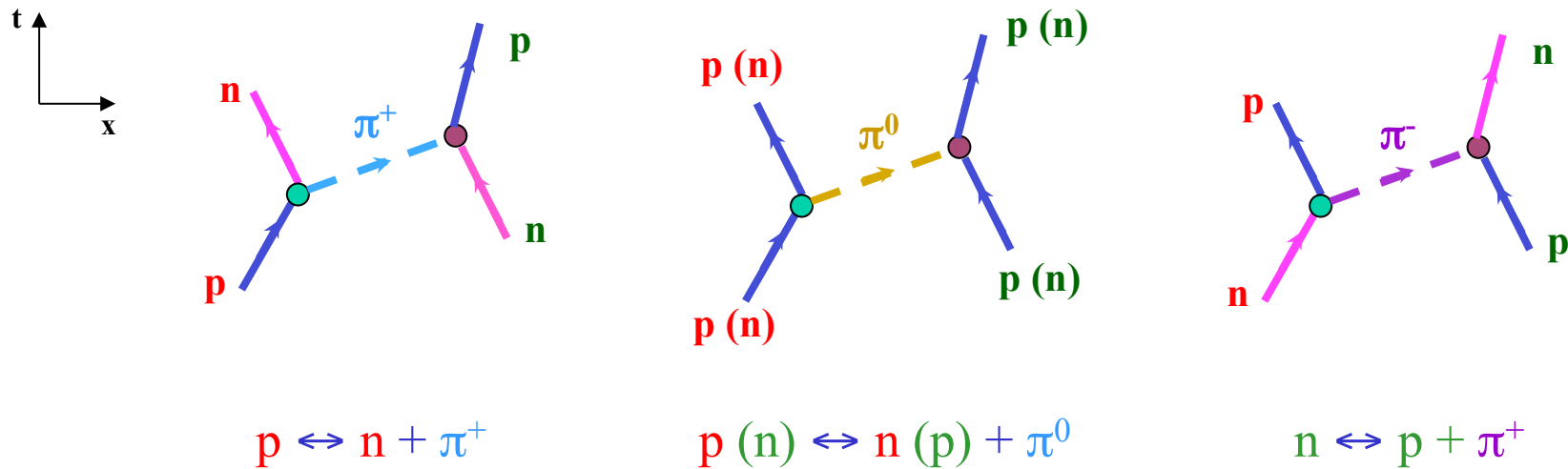
$e^-$  libero non è inerte: continuamente emette e riassorbe (entro il  $\Delta t$  consentito dal P.d'I.) dei  $\gamma$  virtuali che percorrono distanze tanto maggiori quanto minore è la loro energia, ma che non sono reali (quindi rivelabili)

Ogni elettrone è circondato da una nuvola fotonica

2 elettroni che si avvicinano: scambio dei fotoni delle rispettive nuvole → repulsione

# Particelle Virtuali

Esempio : interazione nucleare (Yukawa)



$m_\pi = 140 \text{ MeV} \rightarrow$  durata violazione energia nei vertici  $< 5 \times 10^{-24} \text{ s} \rightarrow$  raggio nuvola pionica minore di :  $c \Delta t = 1.5 \times 10^{-13} \text{ cm}$

# Raggio d'Azione

---

N.B. - interazione e.m. completamente diversa:  $m_\gamma = 0$   
→  $E_\gamma$  può anche essere nulla → nuvola fotonica  
può estendersi fino a distanza infinita !!



Come conseguenza del P.d'I. il raggio d'azione di una interazione è tanto maggiore quanto più piccola è la massa della particella scambiata

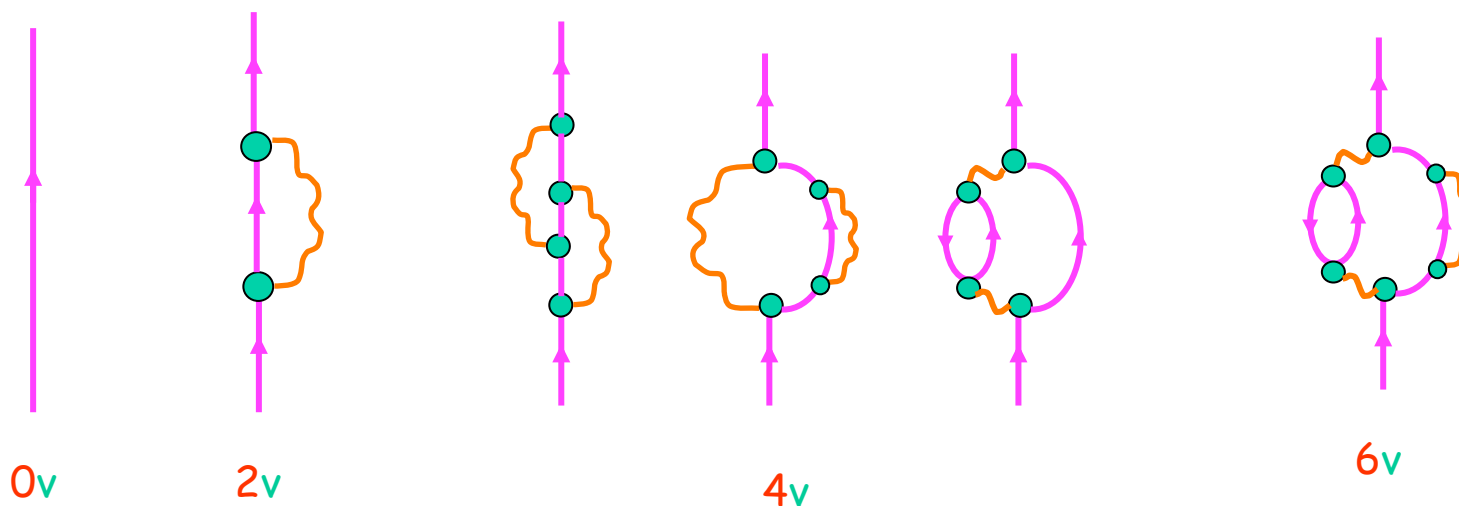
$$R \propto \frac{1}{mc^2}$$

# Diagrammi di Feynman

---

Violazione (temporanea) della conservazione di  $E \rightarrow$   
possibili tutti i tipi + complicati di **stati virtuali**

Esempio : diagrammi di Feynman per l'elettrone



Stati arbitrariamente complicati: **unico vincolo** è che in  
ciascun vertice sia **conservata la carica elettrica**

# Diagrammi di Feynman

---

Electrone reale =  $\Sigma$  pesata su tutti gli stati virtuali con peso inversamente proporzionale al numero di vertici che appaiono nel diagramma corrispondente

Quale elettrone nei diagrammi ??

L'elettrone che compare nei diagrammi è ideale : ha massa  $n$  ( $\neq m$ ) e carica elettrica  $j$  ( $\neq e$ ) che sono inosservabili ed imprecisate

non suscettibile  
di misura

no relazione  
matematica  
 $(n,j) \leftrightarrow (m,e)$



# Infiniti

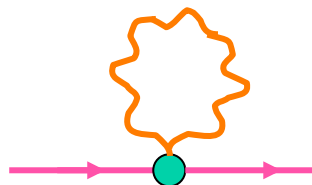
---

## Problema formidabile

Ogni diagramma va calcolato per ogni possibile localizzazione nello spazio-tempo di ciascun vertice

→ in particolare, anche il caso in cui **emissione** e **riassorbimento** della particella virtuale avviene nello **stesso punto**, i.e. per una **distanza tra i vertici = 0**

Esempio : diagramma con “cappio”



**grafico  
divergente**

# Rinormalizzazione

---

Ricalcolo per distanza  $d$  tra vertici molto piccola ( $\sim 10^{-30}$  cm)  
→ determino **valori definiti** di  $n$  e  $j$  tali che:

$$(m, e)_{\text{teorica}} = (m, e)_{\text{sperimentale}}$$

**Nasce l'inghippo:** rifaccio il calcolo per  $d = 10^{-40}$  cm →  
per riottenere gli stessi  $(m, e)$  devo usare valori di  $(n, j)$   
diversi dal caso precedente !!

Però : se questi valori diversi di  $(n, j)$  vengono usati per  
calcolare la risposta a **qualche altro problema**, sommati tutti i  
possibili grafici, si ottiene un risultato **praticamente identico**

# Rinormalizzazione

---

Le **uniche grandezze** dipendenti da  $d$  sono  $n$  e  $j$   
(non osservabili): ogni altra grandezza misurabile  
è **indipendente** da tale distanza !!



**Rinormalizzazione** (Feynman, Schwinger, Tomonaga) :  
metodi analitici che formalizzano tale osservazione

(dimostrazione che per ogni  
diagramma  $+\infty$  ne esiste  $-\infty$   
→ nella somma si elidono)



**QED**

(Quantum ElectroDynamics)

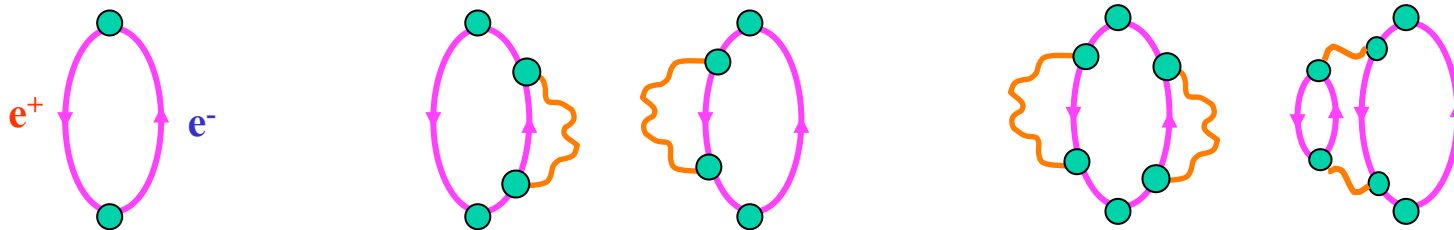
N.B. – è sensato considerare  $d = 0$  ?? per distanze così piccole  
la gravità diviene importante → la geometria cambia !!

# Vuoto Quantistico

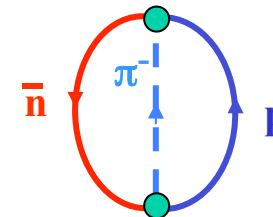
---

P.d'I. → “danza” delle particelle virtuali anche nello spazio vuoto

Esempio : diagrammi di vuoto della QED



... e se “accendiamo”  
interazione nucleare



# Vuoto Quantistico

---

Una scatola vuota non è mai vuota: lo impedisce il P.d'I.

tutte le particelle note (con tutte le energie possibili)  
nello stato virtuale sono presenti nel vuoto fisico



Lo stato di vuoto è quello a cui compete la  
minima energia possibile

Annichilazione di particelle fornisce energia  $E$  al vuoto  
fisico  $\rightarrow$  particelle virtuali promosse nello stato reale

tipo di particelle create dipende da  $E$  e dal tipo di particelle  
annichilate, i.e. da leggi di conservazione

# Simmetria

(1900 ÷ 1970)

Noether, Weyl, Luders, Pauli, Wigner, Lee,  
Yang, Mills, Gell-Mann, Zweig, Glashow,  
Weinberg, Salam, Goldstone, Higgs,  
Englert, Brout, t'Hooft, Veltman, ...

# Leggi di Conservazione

---

affermazione di una costanza nella natura  
durante una variazione

Esempio: numero di persone in questa sala = costante

- ❖ Nessuno entra o esce: legge di conservazione  
**poco interessante**
- ❖ Continuamente entra o esce gente: legge di  
conservazione **ben più interessante** →  
**n. arrivi = n. partenze !!**

**Semplicità**: qualcosa rimane costante durante  
un processo complicato

# Simmetria

---

Linguaggio corrente: **simmetria** ha 2 significati diversi

1. eleganza nelle proporzioni (vago)
2. ripetizioni dei motivi in una forma (+ preciso)

Matematica: interesse per le **trasformazioni** a cui può essere sottoposto un oggetto simmetrico



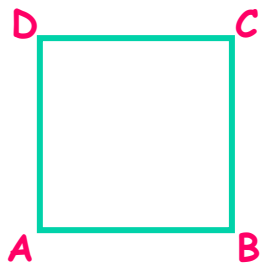
**Simmetria come origine di invarianza: quando un oggetto è sottoposto ad una particolare trasformazione il suo aspetto rimane inalterato**



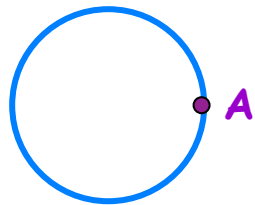
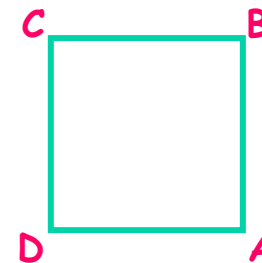
# Simmetria

---

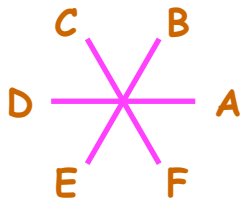
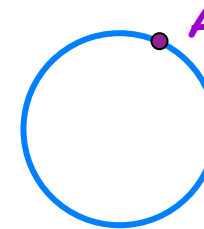
## Esempi: simmetrie geometriche



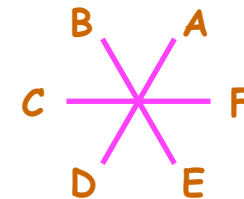
Rotazione  
di  $\pi/2$



Rotazione  
arbitraria



Rotazione  
di  $2\pi/5$



# Simmetria

---

Simmetrie interessanti per la Fisica: quelle in cui non cambia aspetto la **forma** stessa delle leggi naturali

Teorema di **Noether** : stabilisce la connessione  
**simmetria** → **invarianza** → **legge di conservazione**

| <b>Simmetria</b>         | <b>Invarianza</b>           | <b>Conservazione</b>    |
|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| <b>Omogeneità Spazio</b> | <b>Traslazioni Spaziali</b> | <b>Impulso</b>          |
| <b>Omogeneità Tempo</b>  | <b>Traslazioni Temporal</b> | <b>Energia</b>          |
| <b>Isotropia Spazio</b>  | <b>Rotazioni Spaziali</b>   | <b>Momento Angolare</b> |

# Simmetria

---



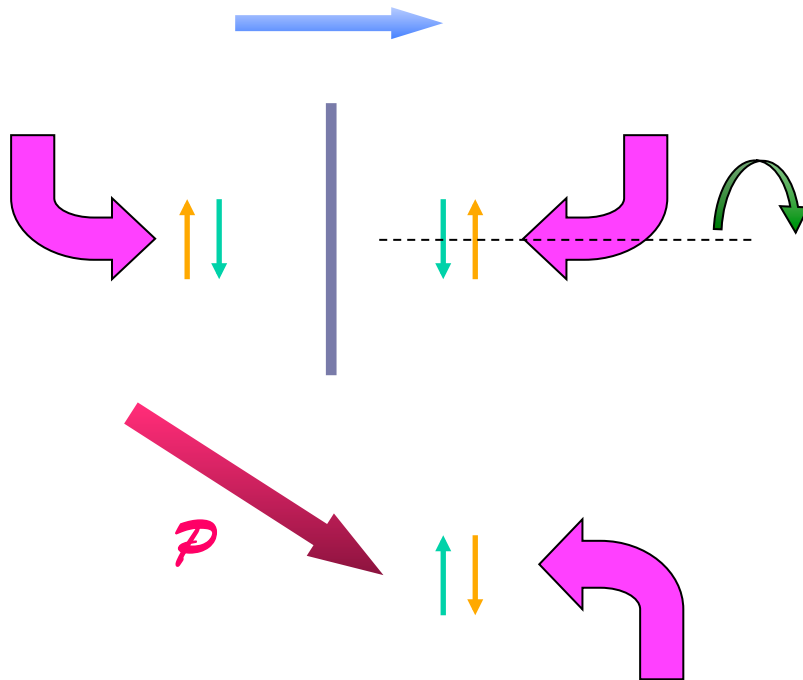
Le 3 leggi di conservazione classiche più importanti derivano dal fatto che le leggi della Fisica sono **le stesse** a tutti i tempi ed in **tutti i punti** e in **tutte le direzioni dello spazio**

ovvero

**Leggi della Fisica non dipendono da come osservatore sceglie origine e orientazione assi del sistema di riferimento spazio-temporale**

# Parità

riflessione in uno specchio + rotazione di  $\pi$  intorno ad asse  $\perp$  allo specchio



$$\mathcal{P}: (x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$$

# Parità

---

Invarianza rispetto a  $\mathcal{P}$

applicando tale trasformazione ad un qualunque processo ne ottengo uno altrettanto plausibile, governato dalle stesse leggi fisiche

Esempio: proiettore per diapositive

Diapositiva invertita → immagine che viola il buon senso o che sia ovviamente impossibile ?? **NO !!**

Non è una coincidenza: mondo macroscopico è simmetrico per trasformazioni di parità

# Inversione Temporale

---

Inversione del flusso del tempo

$$\mathcal{T} : t \rightarrow -t$$

**Invarianza** rispetto a  $\mathcal{T}$

data una sequenza di eventi, anche quella che si svolge in ordine inverso è fisicamente possibile

**Paradosso:** se osservo bicchiere che cade in terra e si frantuma **deve essere possibile** osservare anche il bicchiere che si ricompone e torna sul tavolo !!

# Inversione Temporale

---

Invarianza rispetto a  $\tau$  violata macroscopicamente ??

NO

possibilità non implica probabilità:

potremmo attendere un miliardo di volte la vita dell'Universo e non potremmo ancora aspettarci di vedere il bicchiere ricomporsi e risalire sul tavolo

Però, sebbene estremamente improbabile, il processo invertito nel tempo è in linea di principio possibile: non viola alcuna legge di natura !!

# Inversione Temporale

---

→ significato vero dell'invarianza sotto  $\mathcal{T}$ :

accade solo quello che potrebbe accadere anche in ordine inverso: **se un processo invertito nel tempo è impossibile, lo è anche quello diretto**



Le leggi della natura sono anche il risultato della condizione di invarianza sotto  $\mathcal{T}$

... la traiettoria che il bicchiere descrive cadendo è in parte determinata dall'invarianza sotto  $\mathcal{T}$ , anche se è **praticamente impossibile** per il bicchiere ricomporsi e risalire sul tavolo



# Coniugazione di Carica

---

sostituzione di particella con  
corrispondente antiparticella

$$e: p \rightarrow \bar{p}$$

(e.g. massa e spin inalterati; carica elettrica cambia segno)

**Invarianza** rispetto a  $e$

dato un processo, quello ottenuto sostituendo ad  
ogni particella la sua antiparticella è governato  
dalle stesse leggi

Esempio :  $e (\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-) \Rightarrow (\gamma e^+ \rightarrow \gamma e^+)$

i 2 processi si verificano con uguale probabilità

# Simmetria CPT

---

trasformazioni  $\mathcal{C}$ ,  $\mathcal{P}$ ,  $\mathcal{T}$  soggette a vincolo assoluto:

**Teorema CPT** (Lüders & Pauli)

applicazione successiva delle trasformazioni  $\mathcal{C}$ ,  $\mathcal{P}$ ,  $\mathcal{T}$   
(ordine arbitrario) ad un qualunque processo fisico  
genera un **processo ugualmente possibile**

la trasformazione  $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P} \otimes \mathcal{T}$  è sempre una simmetria  
qualunque sia l'interazione responsabile del processo

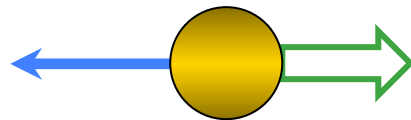
... e le singole trasformazioni ??

# Rottura di Simmetrie

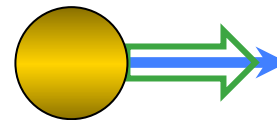
---

Problema: interazione debole

Particelle con  $m = 0$  : orientamento del vettore di spin rispetto a quello dell'impulso



right



left

$\mathcal{P} : (\vec{s}, \vec{p}) \rightarrow (\vec{s}, -\vec{p}) \quad \longrightarrow \quad \text{left} \leftrightarrow \text{right}$

$\gamma$  (interazione e.m.) : entrambe le versioni

$\nu$  (interazione debole) : solo left  $\rightarrow$  violazione di  $\mathcal{P}$

# Rottura di Simmetrie

---

NON esistono antineutrini left  $\rightarrow$  interazione  
debole viola anche  $e$  !!

... però, esistono antineutrini right  $\rightarrow$  interazione  
debole invariante sotto  $e \otimes \mathcal{P}$  ??

NO

Mesoni K neutri esistono in 2 stati con proprietà di  
trasformazione diverse sotto  $e \otimes \mathcal{P}$

$$K_S \rightarrow \pi \pi \quad (\tau = 8.9 \times 10^{-11} \text{ s})$$

$$K_L \rightarrow \pi \pi \pi \quad (\tau = 5.2 \times 10^{-8} \text{ s})$$

# Rottura di Simmetrie

---

Osservazione sperimentale: circa 1 volta su 1000 anche il  $K_L$  decade in 2 pioni  $\rightarrow$  violazione di  $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P}$

(simmetria  $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P} \otimes \mathcal{T}$  + violazione di  $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P} \rightarrow$   
invarianza rispetto a  $\mathcal{T}$  deve essere violata )

Teoria: violazione possibile se n. di famiglie  $\geq 3$

Inoltre: rapporto tra  $\pi$  neutri e  $\pi$  carichi differisce di (0.1 ÷ 1) ‰ tra  $K_L$  e  $K_S \rightarrow$  si debbono osservare effetti che si verificano 1 volta su 1 milione o 10 milioni  $\rightarrow$  esperimenti ad alta statistica



DAΦNE & KLOE a Frascati

# Rottura di Simmetrie

---

? Importante stabilire con precisione l'esatta entità della violazione di  $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P} \rightarrow$  soluzione di un fondamentale mistero cosmologico:

**asimmetria cosmica materia-antimateria**

Invarianza sotto  $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P}$  (insieme ad altre condizioni)  
→ l'Universo, inizialmente composto di materia ed antimateria in uguale quantità, continuerebbe a scomparire in esplosioni d'energia dovute all'annichilazione dei suoi componenti !!

# Simmetrie Locali

---

Finora **Simmetrie Globali**: trasformazione applicata  
simultaneamente a tutti i punti dello spazio

**Simmetrie Locali**: invarianza per trasformazione di  
diversa entità in ogni punto dello spazio e per ogni  
istante di tempo

**S. Globale** → trasformazione indipendente da  $(t, \vec{r})$

**S. Locale** → trasformazione dipendente da  $(t, \vec{r})$



**Teoria di Gauge Locale**

# Teorie di Gauge

---

Prototipo teoria di gauge locale: teoria di Maxwell

- Cariche in quiete: solo campo elettrico  $\vec{E}$ 
  - S. Globale: campo elettrico inalterato per variazioni del potenziale elettrico  $V$  a cui si trova il laboratorio
- Cariche in moto: anche campo magnetico  $\vec{H}$ 
  - potenziale magnetico  $U$  → S. Locale: qualunque variazione locale di  $V$  può essere compensata da corrispondente variazione di  $U$  in modo tale che  $\vec{E}$  ed  $\vec{H}$  inalterati



# Teorie di Gauge

---

Importante : la **localizzazione** della simmetria è stata ottenuta per mezzo dell'introduzione di un **altro campo**

conseguenza diretta della **T.R.**



**S. Locale** → comunicazione all'osservatore nel punto B delle definizioni adottate da quello nel punto A

trasmissione informazione non può essere istantanea:

**velocità massima di propagazione = c**

→ **standardizzazione delle definizioni richiede propagazione di un campo**

# QED

---

Invarianza rispetto a variazioni nella fase del campo elettronico  $\psi$  è una simmetria globale

Posso renderla locale ??

SI

introduco ulteriore campo che compensa variazioni di fase di  $\psi$

Quale campo ??

- $R = \infty \rightarrow m = 0$
- carica elettrica = 0
- spin = 1

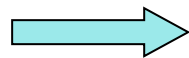
FOTONE

# Interazione Debole

---

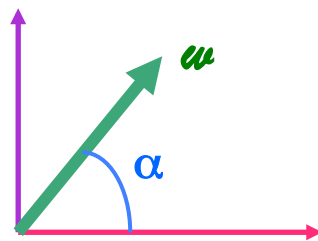
## Osservazione Sperimentale:

nei processi governati dall'interazione debole l'elettrone ed il suo neutrino manifestano comportamenti simili



Ipotesi:  $e^-$  &  $\nu_e$  sono 2 stati diversi di una stessa particella

Nuovo numero quantico: isospin debole  $\rightarrow$  vettore in spazio interno 2-dimensionale



$$|w\rangle = \cos \alpha |e_L\rangle + \sin \alpha |\nu_L\rangle$$

N.B. - solo particelle left nelle interazioni deboli

# Interazione Debole

---

Simmetria Locale di Isospin Debole:

fisica inalterata per variazioni locali indipendenti di  $\alpha$



6 nuovi campi di spin = 1 con  $m = 0$

|                             |   |                   |
|-----------------------------|---|-------------------|
| 2 con carica elettrica = 0  | → | fotone            |
| 2 con carica elettrica = -1 | → | “fotone” negativo |
| 2 con carica elettrica = +1 | → | “fotone” positivo |

# Interazione Debole

---



Teoria in disaccordo con l'osservazione

Problemi

- $e^-$  &  $\nu_e$  simili ma non indistinguibili
- no particelle cariche con  $m = 0$   
(che fortuna !! e sarebbe instabile !!)

Modifica: aggiunta “ad hoc” di  $m \neq 0$  ai campi carichi,  
i.e. introduco rottura esplicita della simmetria

Quale valore per  $m$  ? In accordo con il raggio d'azione  
( $\approx 10^{-15}$  cm) dell'interazione debole

# Interazione Debole

---

Funziona ??

NO

per la teoria modificata non è possibile elaborare una procedura di rinormalizzazione, a causa del fatto che la  $m \neq 0$  conferita ai “fotoni” carichi l’ha resa asimmetrica



serve meccanismo che conferisca massa ai campi carichi senza danneggiare la simmetria

Esiste ?? SI, ed (anche questa volta) ha a che fare con le proprietà del vuoto quantistico !!

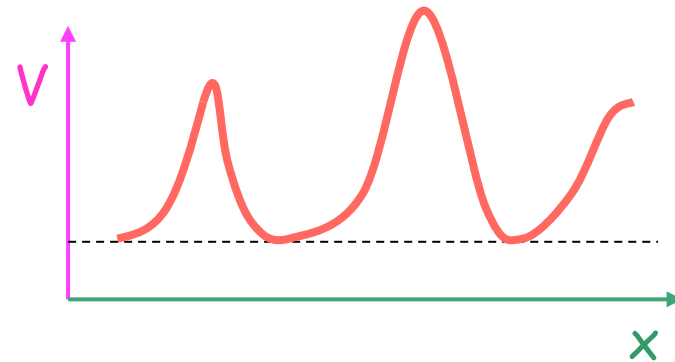
**Rottura Spontanea della Simmetria**

# Rottura Spontanea

---

Vuoto = stato di minima energia → è unico ??

Esempio : andamento  
spaziale dell'energia  
potenziale  $V$



Nuove possibilità:

- molti vuoti → dove ci troviamo ??
- possibile cambiare vuoto, saltando da un minimo ad un altro ??

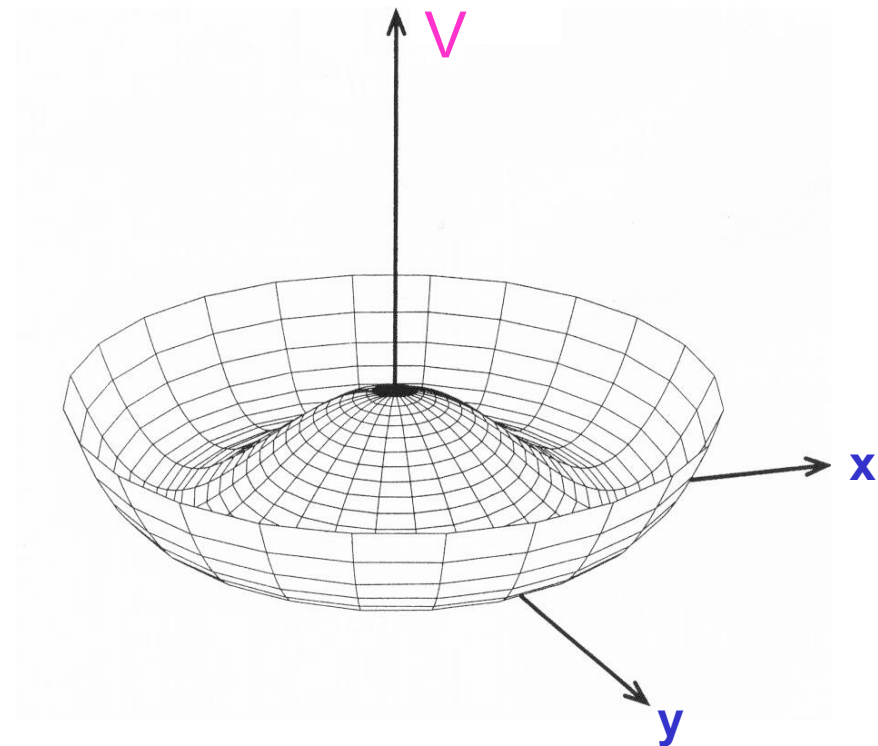
# Rottura Spontanea

---

Ulteriore dimensione spaziale → può esistere curva continua che collega stati di vuoto di uguale energia

Esempio: andamento energia potenziale tipo “mexican hat”

$$V = (x^2 + y^2 - \eta)^2$$

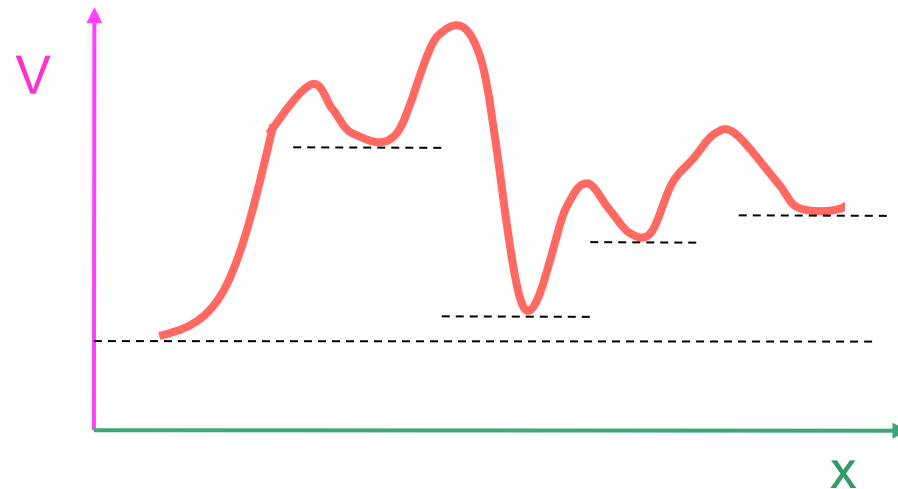




# Rottura Spontanea

---

Profili più complicati: minimi non corrispondono tutti allo stesso valore di  $V$ ; diversa curvatura della funzione nell'intorno di minimi diversi



Effetto della temperatura: può cambiare numero ed energia dei minimi → alcuni possono cessare di essere dei minimi !!

# Rottura Spontanea

---

Esempio: magnetizzazione del ferro

Energia di magnetizzazione dipende dalla temperatura:

- ❖ riscaldamento sopra temperatura di Curie ( $T_c \approx 750 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $\rightarrow$  scomparsa delle proprietà magnetiche: no polo N e polo S
- ❖ raffreddamento sotto  $T_c$   $\rightarrow$  magnetizzazione spontanea: tornano a manifestarsi poli N e S

Cicli successivi di riscaldamento/raffreddamento  $\rightarrow$  polo N in generale non ubicato alla stessa estremità

# Rottura Spontanea

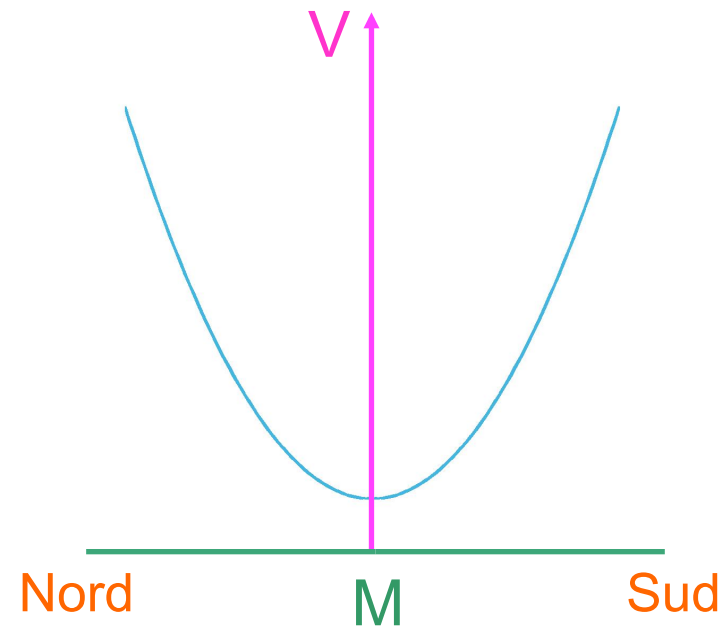
---

diagramma Energia - Magnetizzazione

$$T > T_c$$

Stato di minima energia unico:  $M = 0$

lo stato iniziale del ferro  
non ha importanza: si  
perde memoria di qualsiasi  
magnetizzazione  
precedente



# Rottura Spontanea

$$T < T_c$$

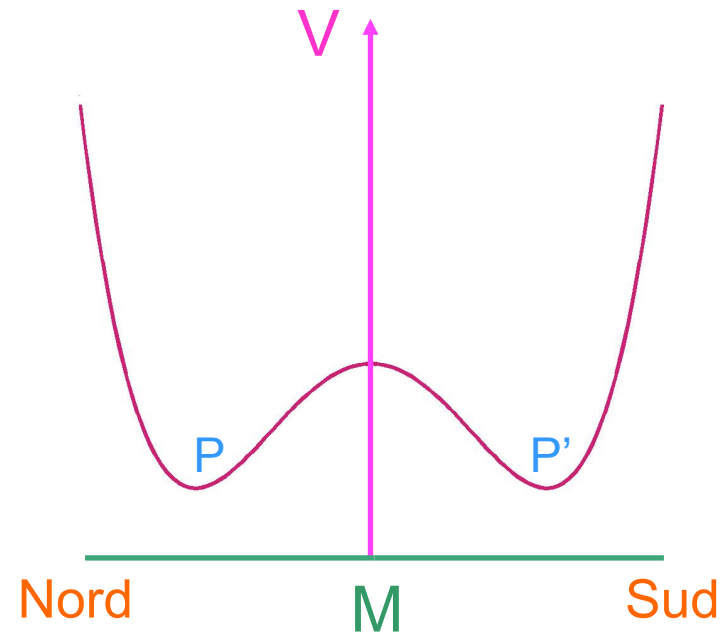
2 stati diversi di minima energia con  $M \neq 0$

stato  $M = 0$  è instabile:  
uguale probabilità di  
andare in P o P'

P:



P':



# Rottura Spontanea

---

 **Simmetria:** manifesta ad alta temperatura;  
nascosta a bassa temperatura

Rottura Spontanea: scelta tra possibilità diverse →  
stato ordinato



**le leggi di natura sono infallibilmente simmetriche ma  
le loro conseguenze possono essere strutture e stati  
che non posseggono le stesse simmetrie delle leggi**

# Rottura Spontanea

---

Universo governato da ridottissimo numero di leggi simmetriche (una sola ??) , ma che manifestano questo loro carattere soltanto per certe scale di energia (tempi, distanze, ...)



Salendo o scendendo tali scale si verificano transizioni di fase e si entra in un dominio dove la simmetria è nascosta

Come realizzare questa transizione di fase nel caso della teoria delle interazioni deboli ??

# Modello GWS

---

(Glashow – Weinberg – Salam)

Aggiunta di **campo scalare** (spin = 0) peculiare:

(contrariamente a tutti gli altri), per essere annullato richiede spesa di energia, i.e. **energia** di tale campo è minima quando esso ha un valore (uniforme)  $> 0$

bosone di Higgs

direzione fissata nello spazio di isospin debole rispetto al quale riferire quella del **vettore** che descrive **miscela**  $e - \nu_e$



N.B. – **direzioni assolute** indeterminate  
(teoria è **ancora** simmetrica)

# Modello GWS

---

In realtà necessari 4 campi di Higgs:

doppietto  $(H^+, H^0)$   $\oplus$  anti-doppietto  $(H^-, \bar{H}^0)$

Rottura spontanea Simmetria di Isospin Debole



- fotone rimane privo di massa
- $W^\pm$  e  $Z^0$  acquistano massa “mangiando”  $H^\pm$  e  $\bar{H}^0$
- $H^0$  sfugge cannibalizzazione  $\rightarrow$  osservabile



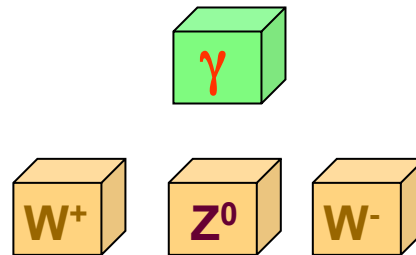
# Modello GWS

---

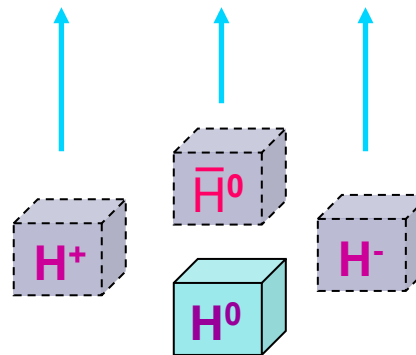
Leptoni  
( $s = 1/2$ )



Bosoni Vettori  
( $s = 1$ )



Bosoni di Higgs  
( $s = 0$ )



# Modello GWS

---



Interazione ElettroDebole (E.W.): E.M. & Debole  
derivano entrambe da un'unica simmetria

**N.B.** – costanti d'accoppiamento rimangono diverse !!

È la teoria giusta ?? **SI**

- Teoricamente: rinormalizzabile (t'Hooft – Veltman)
- Sperimentalmente: osservazione di  $W^\pm$  e  $Z^0$  (Rubbia)

Problema:  $H^0$  non ancora osservato !!

LHC @ CERN  
(2011?)

# QCD

---

(Quantum ChromoDynamics)

Teoria dell'interazione di colore è modellata sulla QED

Principio d'invarianza relativo alle trasformazioni locali di colore dei quark

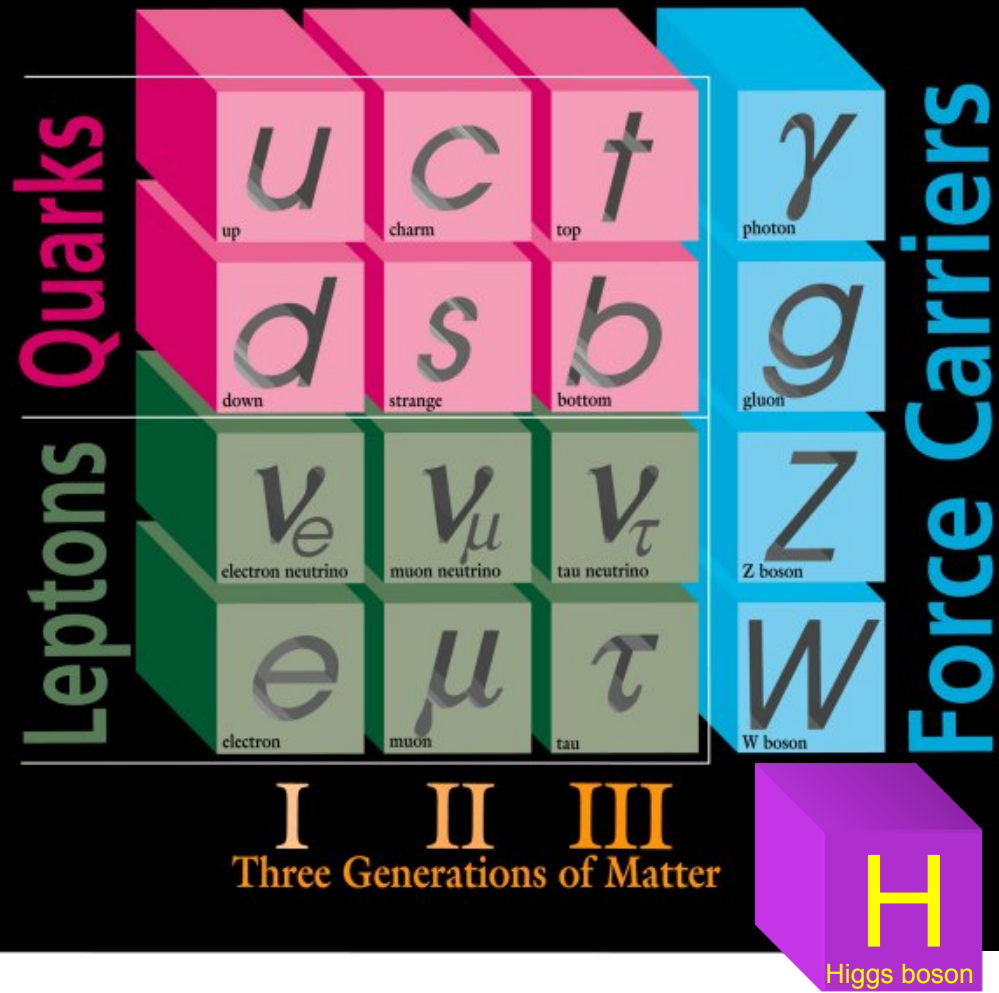
Simmetria di gauge è esatta e non richiede alcun meccanismo di rottura spontanea

Struttura più complicata: gluoni sono a massa & carica elettrica nulle ma possiedono carica di colore

(R finito malgrado  $m = 0$ )

Gravity  
?

# The Standard Model



?