

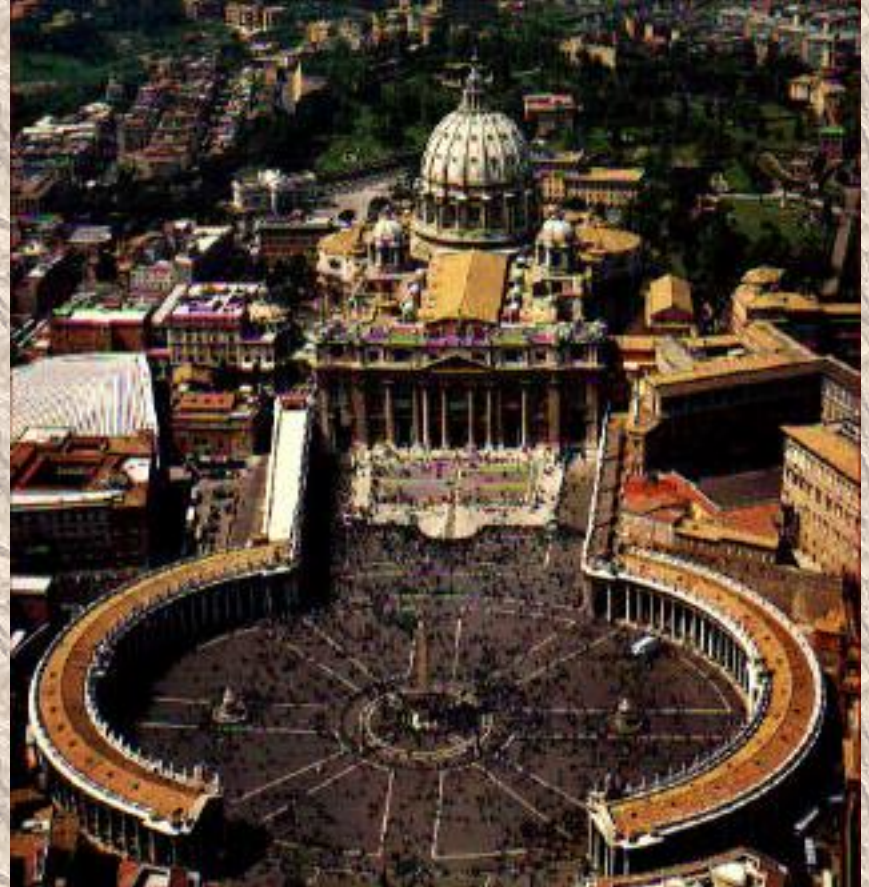
Simmetrie nascoste dell'Universo

G.L. Marra

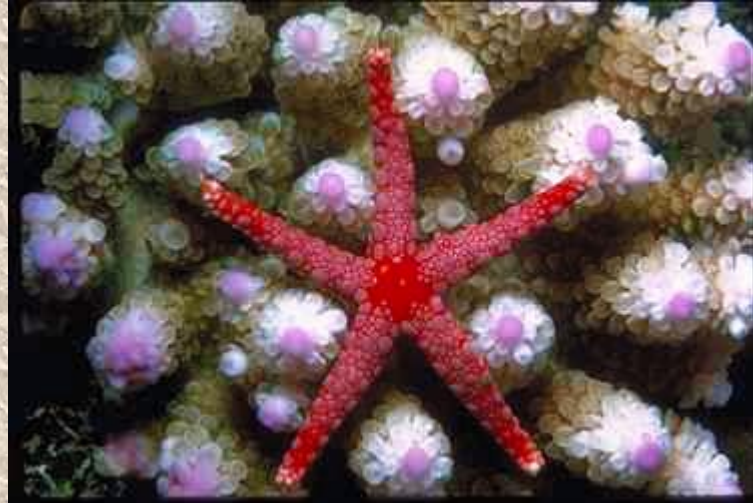
Renewable Energy and Environmental R&D
Istituto Eni Donegani, Novara Italy.

Il concetto di simmetria
Nasce da un'esigenza umana
profonda e antica, ed è
associato all'idea di bellezza e
all'ideale di perfezione.

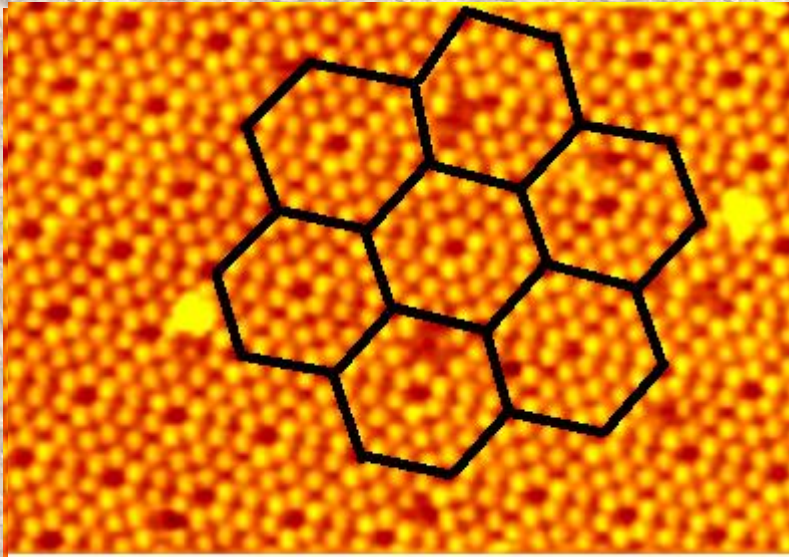
Architettura antica, luoghi
religiosi...
in cui Dio avrebbe voluto
vivere



Simmetrie in Natura



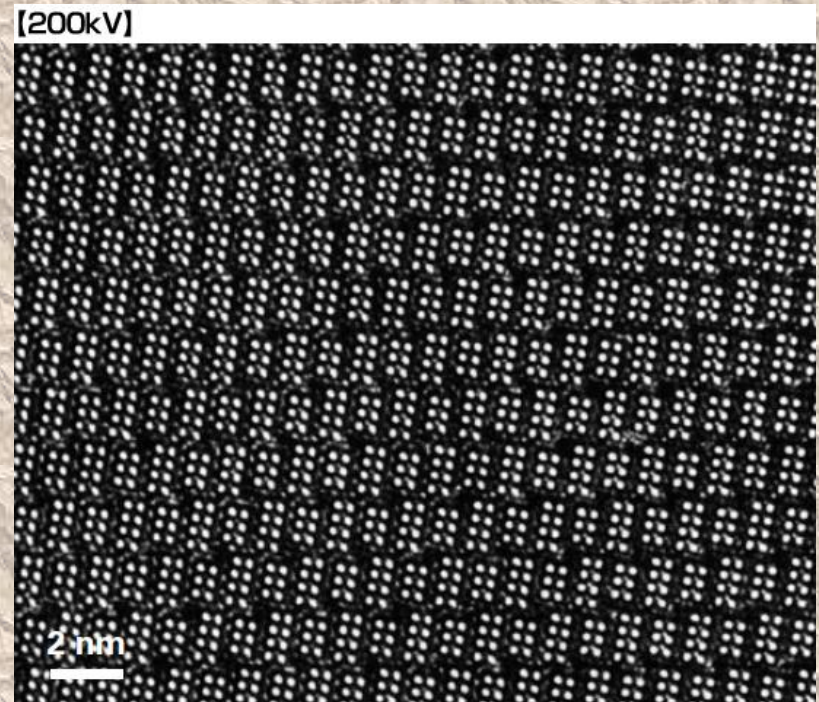
a livello microscopico
l'ordine e la simmetria
sono molto più presenti
di quanto non si possa
pensare.



AFM Topographic Image of Si(111) surface

Figure : Si (111) 7 x 7 by NC-AFM

Scan size: 13nm x 9nm



UHR-TEM Image Nb₂O₅ Catalyst

Maurits Cornelis Escher

il "pittore dei matematici"



Palazzo Reale Milano

Simmetrie discrete e continue

simmetria
discreta



simmetria
continua



Se si considera un "oggetto" come un *sistema fisico*, diciamo che questo possiede una certa *simmetria* quando le sue proprietà, dopo la trasformazione che abbiamo

operato su di esso, sono indistinguibili da quelle che aveva prima.
la simmetria è una *trasformazione dei punti dello spazio definita in astratto*.

Invarianza è una proprietà acquisita dal sistema in oggetto rispetto alla trasformazione.

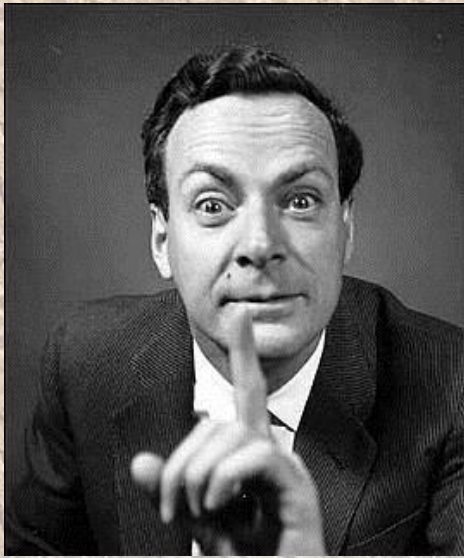
La simmetria diventa per i fisici uno strumento potentissimo di conoscenza



Steven Weinberg (1933)

Da " Dirac Memorial Lecture (1986)"

"At the deepest level, all we find are symmetries and responses to symmetries"



Paragona la natura ad una partita a scacchi in cui i ricercatori devono imparare da soli le regole del gioco, senza nessuno che gliele spieghi direttamente

Richard Feynman (1918-1988)

Le regole del gioco sono ciò che chiamiamo i fondamenti della fisica.



Leggi di Conservazione

Alcune
forme
com
Esse
com
ques
svol
fend





Emma Noether (1892-1935)

Teorema di Noether (1918)

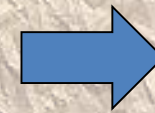
se un sistema fisico è invariante sotto alcuni gruppi di trasformazioni continue, allora da ciascuna proprietà di simmetria segue la conservazione di una quantità fisica del sistema.

Per ogni simmetria continua delle leggi della Fisica esiste una legge di conservazione.

Per ogni legge di conservazione esiste una simmetria continua

Proprietà intrinseche dello spazio-tempo

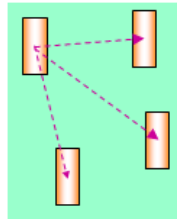
- Il tempo è omogeneo



Conservazione
Energia

- Lo spazio è omogeneo

Spazio omogeneo



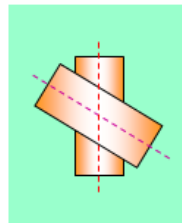
Invarianza per traslazione



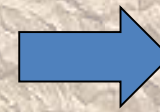
Conservazione
Quantità di moto

- Lo spazio è isotropo

Spazio isotropo



Invarianza per rotazione



Conservazione
momento angolare



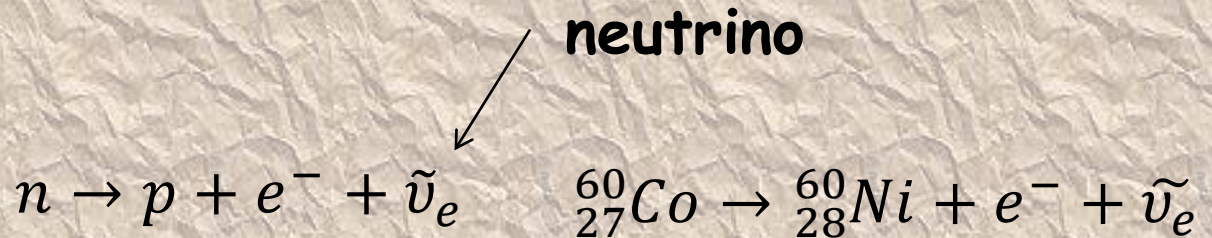
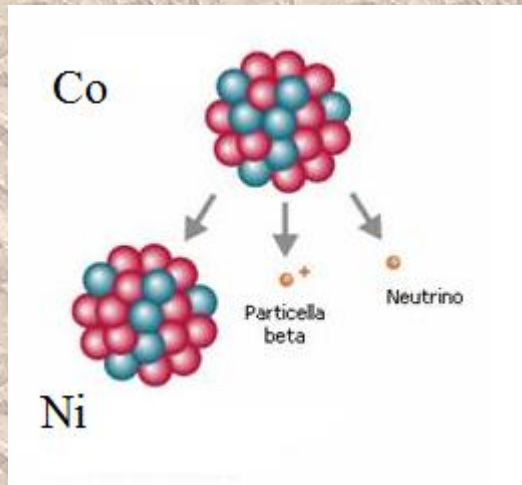
Wolfgang Pauli (1900-1958)

Successi clamorosi

Il 4 dicembre 1930 Wolfgang Pauli, pur di impedire che in un processo di decadimento di un nucleo atomico

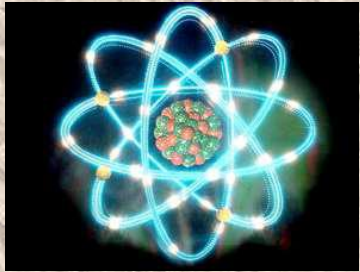
la conservazione dell'energia venisse violata

Ipotizzò l'esistenza di una nuova particella



Scoperto solo nel 1956

Le leggi di conservazione sono riconducibili a proprietà intrinseche dello spazio-tempo



Ci sono altre simmetrie ?

Meccanica quantistica (1900)

Ad ogni particella è assegnata un'onda con λ appropriata e viceversa.

$$\lambda \sim 1/E$$

ψ

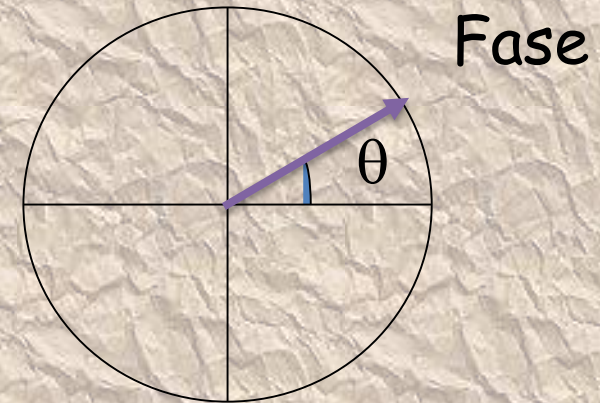


Il calcolo di quest'onda lo si fa attraverso algoritmi molto complessi che se risolti restituiscono la ψ

Equazione di Schrödinger

Simmetria di Gauge

La fisica non cambia se la funzione d'onda del campo viene moltiplicata per un fattore di fase arbitrario θ con θ identico in tutti i punti dello spazio tempo.



La quantità conservata corrispondente è la
carica elettrica

$$\psi(x, t) \rightarrow \psi(x, t)e^{i\theta}$$

L'invarianza della fisica per il fattore di fase prende il nome di **simmetria di Gauge globale**

Simmetria di Gauge Locale

con θ identico in tutti i punti dello spazio tempo la
 $\psi(x, t) \rightarrow \psi(x, t)e^{i\theta}$
dinamica è invariante

$\theta = \theta(x, t)$ Vediamo cosa succede

$$\psi(x, t) \rightarrow \psi(x, t)e^{i\theta(x, t)}$$

La dinamica per particelle libere non è
invariante per trasformazioni di Gauge locali

$\theta = \theta(x, t) \longrightarrow$ Le particelle devono interagire

when She invented gauge symmetry,

God said: 'Let there be light

**La simmetria è il motore della dinamica. Se c'è una
simmetria c'è un campo che esercita una forza.**



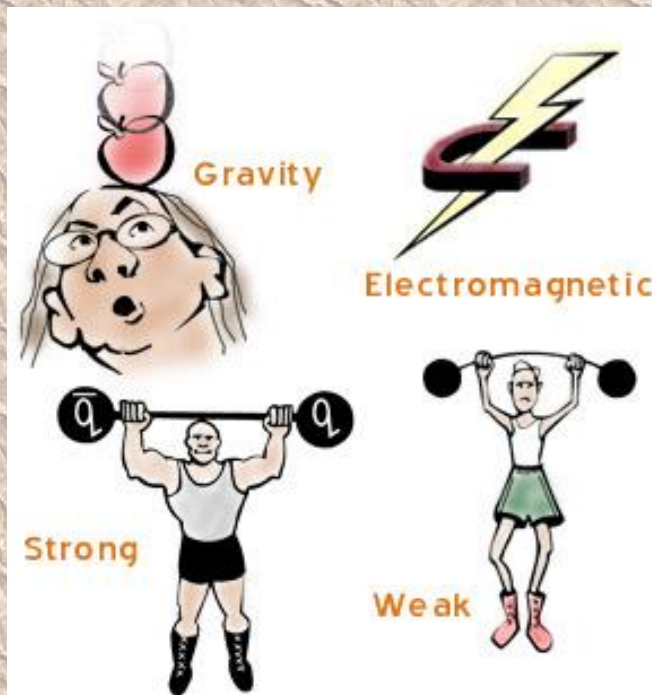
Leon Lederman (1922)

La simmetria di Gauge locale è
una proprietà intrinseca dell'Universo

La simmetria di Gauge è così potente da "creare" le *interazioni*, cioè le forze fondamentali presenti nell'universo fin dal Big Bang.

La invarianza locale di gauge richiede l'esistenza dei campi

Quattro Interazioni



- Tutte le forze possono essere attribuite a queste particelle e le loro interazioni sono **teorie di gauge**.
- La gravità e, attrattiva, le altre possono essere repulsive.
- Le cariche possono interagire senza toccarsi.

Interazione Forte

tra nucleoni

Simmetrie e Fisica delle particelle

- Per descrivere le particelle e le interazioni note attualmente, abbiamo bisogno di **3 simmetrie o invarianze interne**.
- Attualmente tutti gli esperimenti sono consistenti con la nozione che queste tre simmetrie sono necessarie e sufficienti.

Tutte le interazioni sembrano avere

● La simmetria $U(1)$ QED

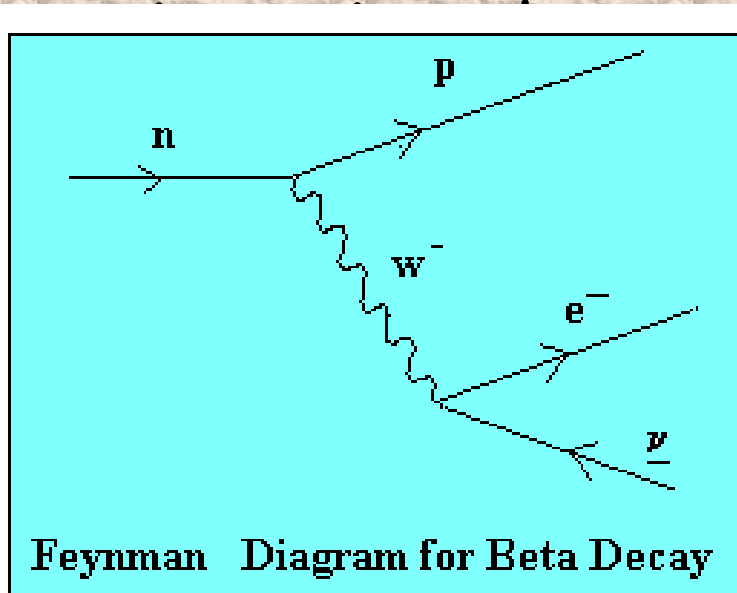
1 bosone vettore spin 1
scarico: Fotone massa=0

● La simmetria $SU(2)$ Interazione debole

3 bosoni vettori spin 1
 W^+, W^-, Z^0 massa=0

Gros.
trova

● La sim



Feynman Diagram for Beta Decay

zione forte QCD

8 bosoni vettori spin 1
Carichi Gluoni massa=0

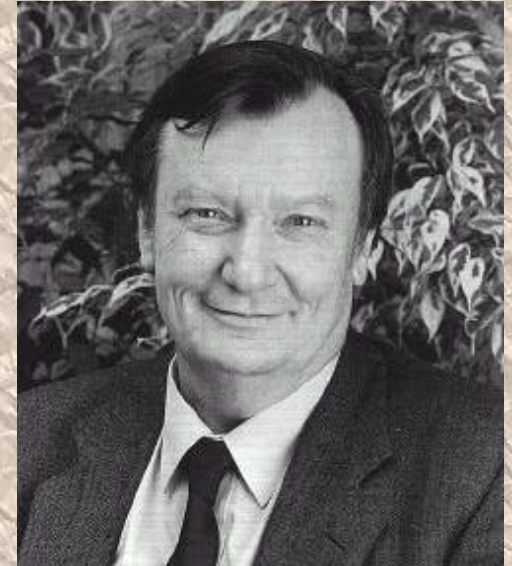
Il Modello Standard

**Tutte le interazioni
(esclusa la gravità)
sono spiegate da una
simmetria di gauge**

$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$



Abdus Salam (1926-1996)

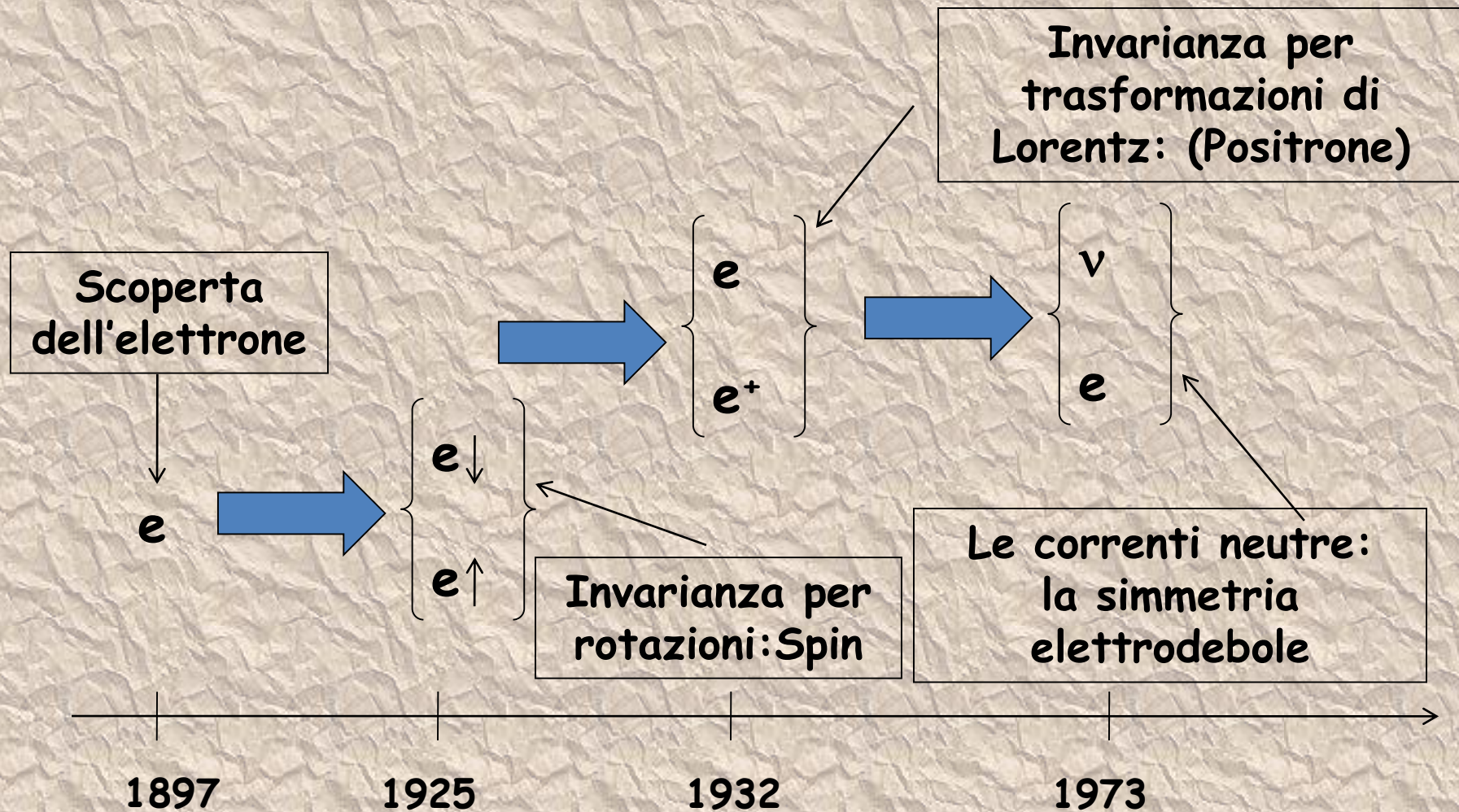


Carlo Rubbia (1934)

**Impressionanti verifiche sperimentali
(Nobel Rubbia (1984)
(Nobel F. Englert, P. Higgs (2013))**

L'interplay tra fisica e matematica
trova un campo di applicazione
bellissimo (e fruttifero) nello studio
delle simmetrie

Grazie per la vostra paziente attenzione

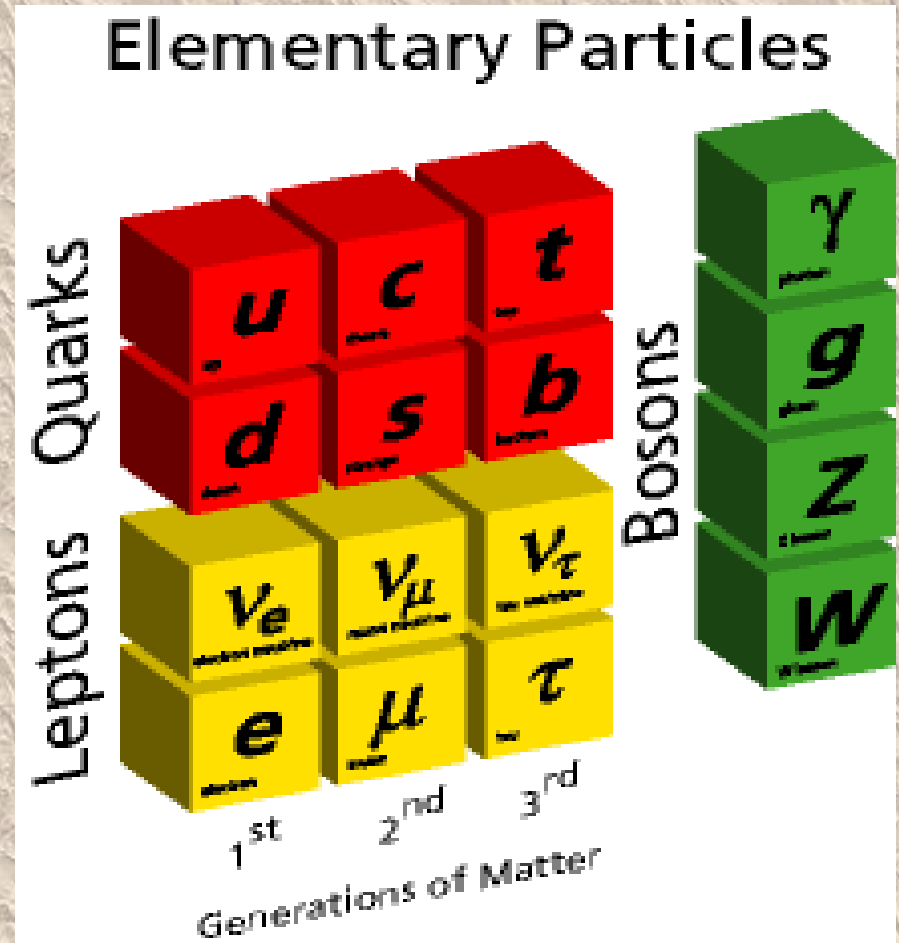


Gli oggetti fondamentali

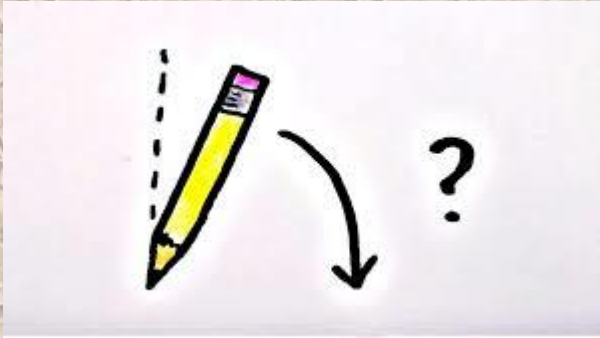
- **quark e leptoni** che sono **fermioni puntiformi**
- Essi interagiscono scambiandosi dei **bosoni di gauge**.

Le forze tra le particelle

- **elettrodebole** in cui bosoni di gauge sono i **fotoni** e i bosoni $W^\pm, Z^0$.
- **forte** in cui i bosoni di gauge si chiamano **gluoni** e sono 8. La teoria delle forze forti è la **QCD** (Quantum Chromodynamics).



Rottura spontanea di simmetria



Lo stato finale spezza la simmetria e cade in uno stato non simmetrico

Scambio tra simmetria e stabilità è detto rottura spontanea di simmetria

MS unifica la forza debole con e.m
Sono così diverse perché la simmetria che
le lega è nascosta.

Lo stato di vuoto non è simmetrico
Deve esistere un campo X che rompe la
simmetria del vuoto ed interagendo con le
particelle dà loro massa.

$\langle 0|X|0 \rangle = 0$ è *simmetrico* ma **instabile**

$\langle 0|X|0 \rangle \neq 0$ è *stabile* ma *spezza la simmetria*

X campo di Higgs

Rotture spontanee di simmetria e meccanismo di Higgs

- 1961: Nambu e Jona Lasinio: rotture spontanee di simmetria (SSB).
- 1961: Goldstone: una SSB deve essere accompagnata dalla comparsa di particelle di massa e spin nulli.
- 1964-67: Higgs, Brout ed Englert, Kibble: il teorema di Goldstone può essere eluso nelle teorie di gauge. Insomma, si possono dotare i campi di Yang e Mills di massa conservando un'esatta simmetria di gauge.

Rotture spontanee di simmetria: il meccanismo di Higgs

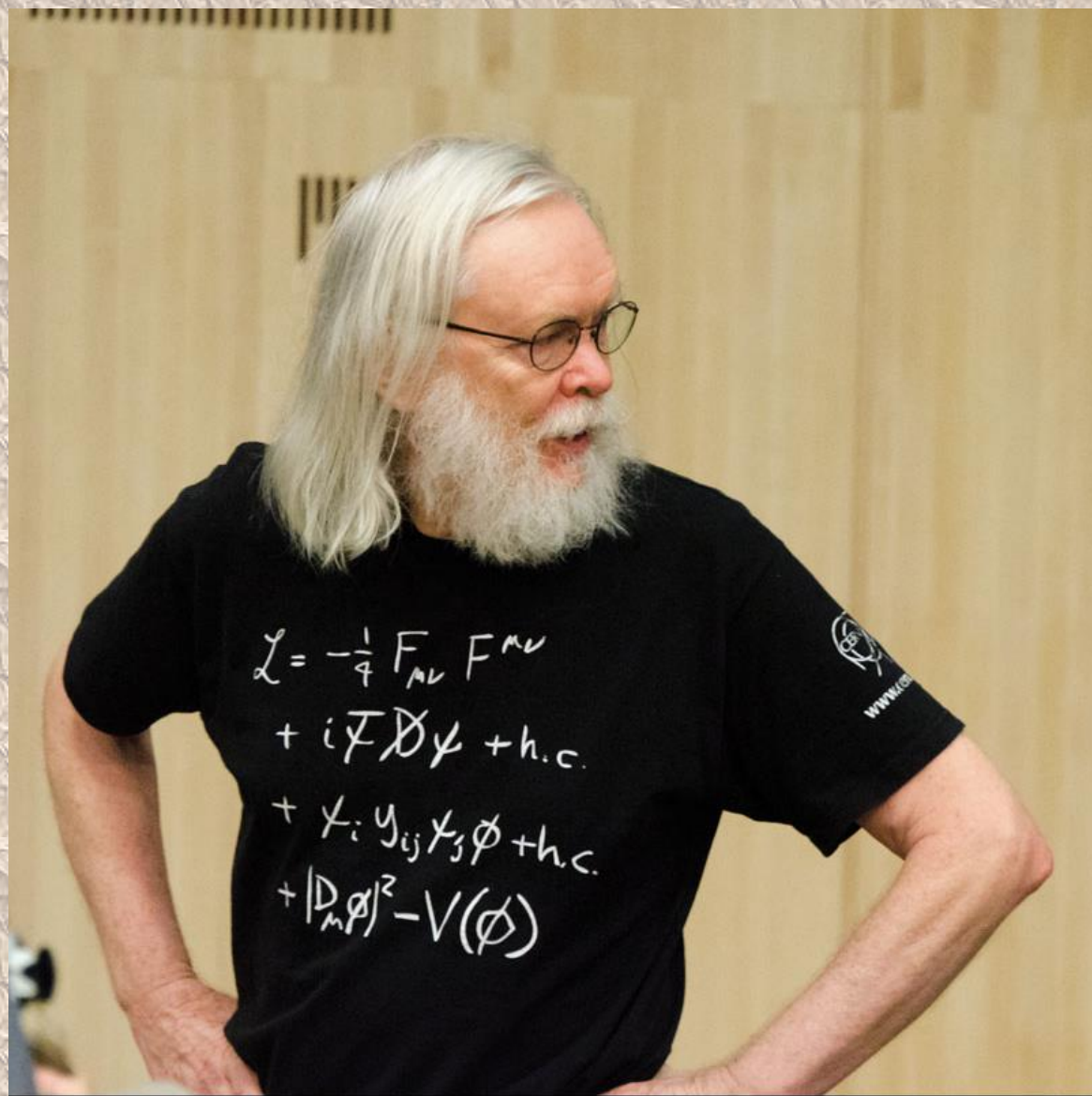
Higgs: includere nella lagrangiana QED un paio di campi scalari, accoppiati fra loro e al fotone in modo da preservare la gauge-invarianza dell'e. m.; dando ai campi scalari una massa negativa nella lagrangiana, lo spettro fisico conteneva un fotone privo di massa e una particella massiva.

Nella teoria dei campi, il vuoto è appropriatamente definito come lo stato in cui tutti i campi hanno la loro energia minima. In genere questo si consegue quando il valore del campo è zero ovunque. Non così per il campo di Higgs: i campi di Higgs hanno la proprietà inconsueta di non annullarsi nel vuoto.

Il colore è "come" una carica, sebbene con una differenza essenziale: le cariche possono essere solo positive o negative, ciò che rende possibile indicarle con un + o un - .

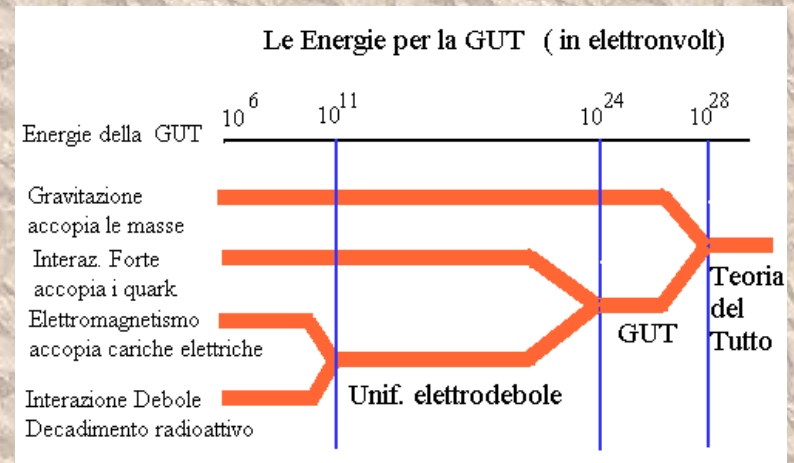
Ma qui siamo in presenza di tre cariche, ciascuna delle quali, di conseguenza, non ha una "opposta". I "segni" possibili sono solo due; i colori di più (quelli cosiddetti fondamentali - combinazione - sono tre).

I singoletti di colore - che colore non hanno - sono il corrispettivo delle particelle scariche. Essi, nell'analogia col caso elettrico, sono dunque il corrispettivo degli atomi (neutri). A quanto pare, la cromodinamica non ammette "ioni".



Teoria di Grande Unificazione

- Si crede che una GUT unifichera' le forze forte, debole ed elettromagnetica
- Queste 3 forze saranno allora visibili come manifestazioni diverse - a bassa energia - di una stessa forza
- Le 3 forze si unirebbero ad una energia alquanto elevata.



Il Modello Standard + SUSY

