



UNIVERSITY OF  
BIRMINGHAM

# La rottura di simmetria e il suo ruolo nella fisica delle particelle elementari

Prof Cristina Lazzeroni

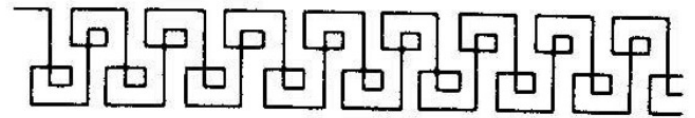
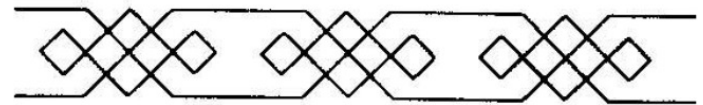
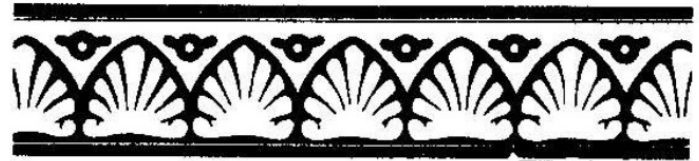
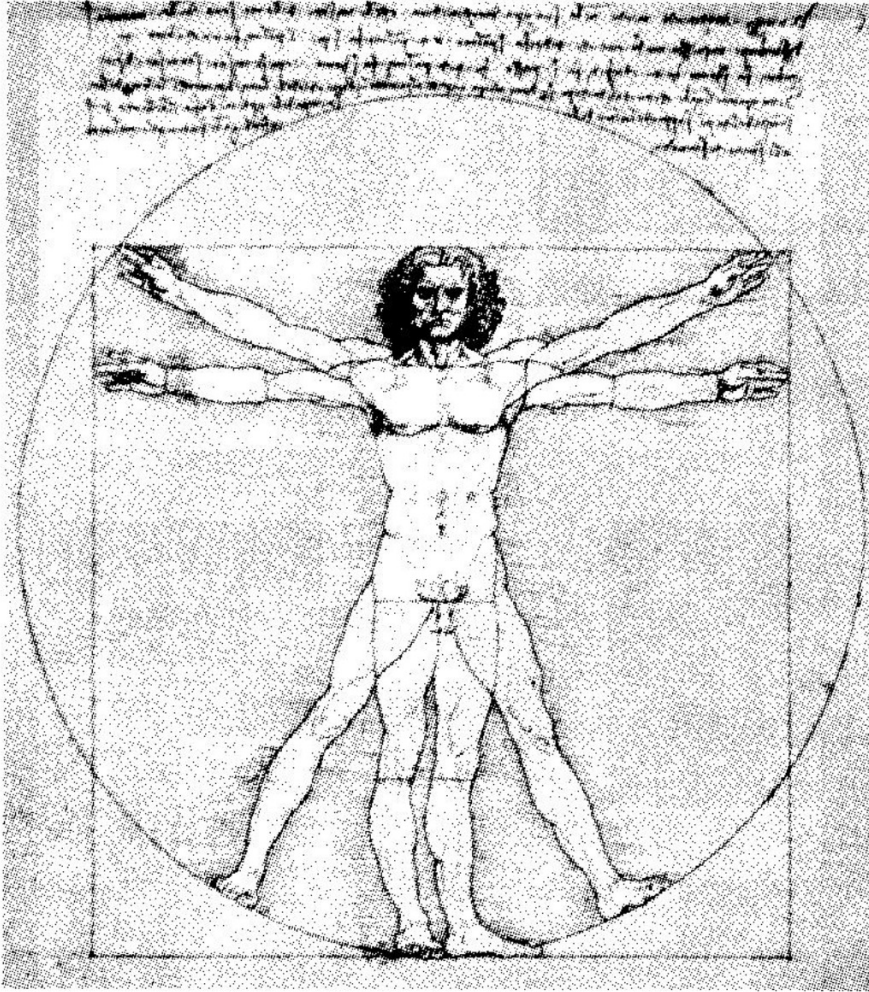
Incontro con il pubblico, Scuola Primaria di Carvico,  
via Cavour 9, Carvico (Bergamo)  
16 Gennaio 2023

Le simmetrie sono essenziali per capire il mondo che ci circonda.

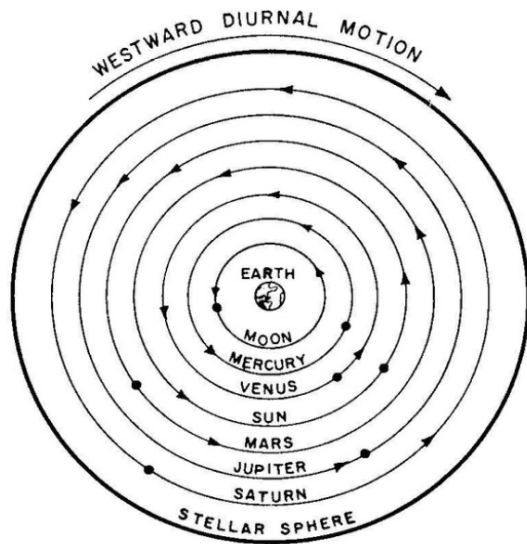
La rottura di simmetria e' fondamentale per l'esistenza stessa del mondo in cui viviamo.

**In questo intervento, discuterò esempi presi dalla fisica delle particelle elementari per giustificare queste affermazioni**

# Simmetrie nella natura e nell'arte

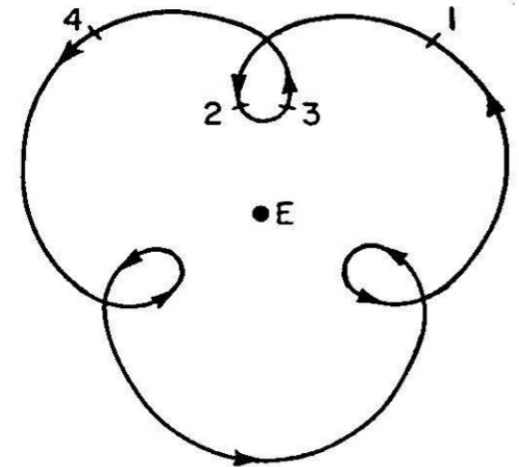
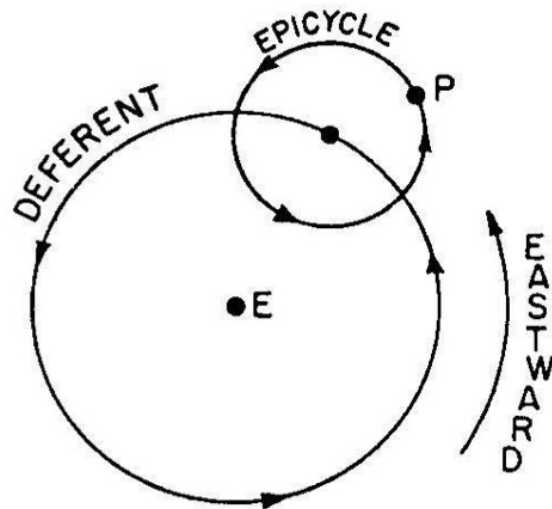


# Simmetria e armonia nella cosmologia greca

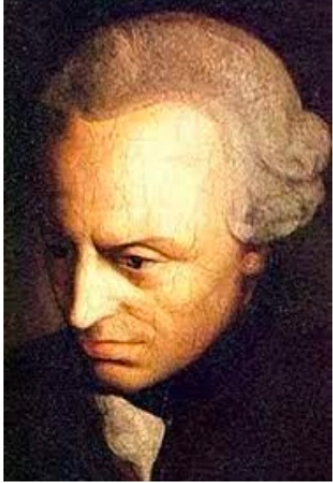


Universo di Platone e' centrale e simmetrico, con la terra al centro. Il Sole e I pianeti si muovono in circolo. La circonferenza piu' esterna ospita le stelle fisse.

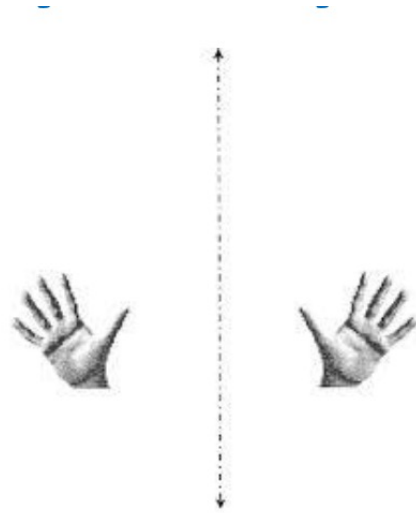
I movimenti dei pianeti osservati sono considerati come rotture di simmetria dell'armonia cosmica. Devono essere spiegati da movimenti circolari uniformi per "salvare" la simmetria celeste.



# Simmetria di orientazione



I. Kant (1724-1804)



Filosofo Kant, 1768:

Si pose il problema se esista una differenza assoluta tra destra e sinistra.

Oppure se la definizione dell'una esiste solo in virtù dell'altra  
Le "controparti incongruenti".

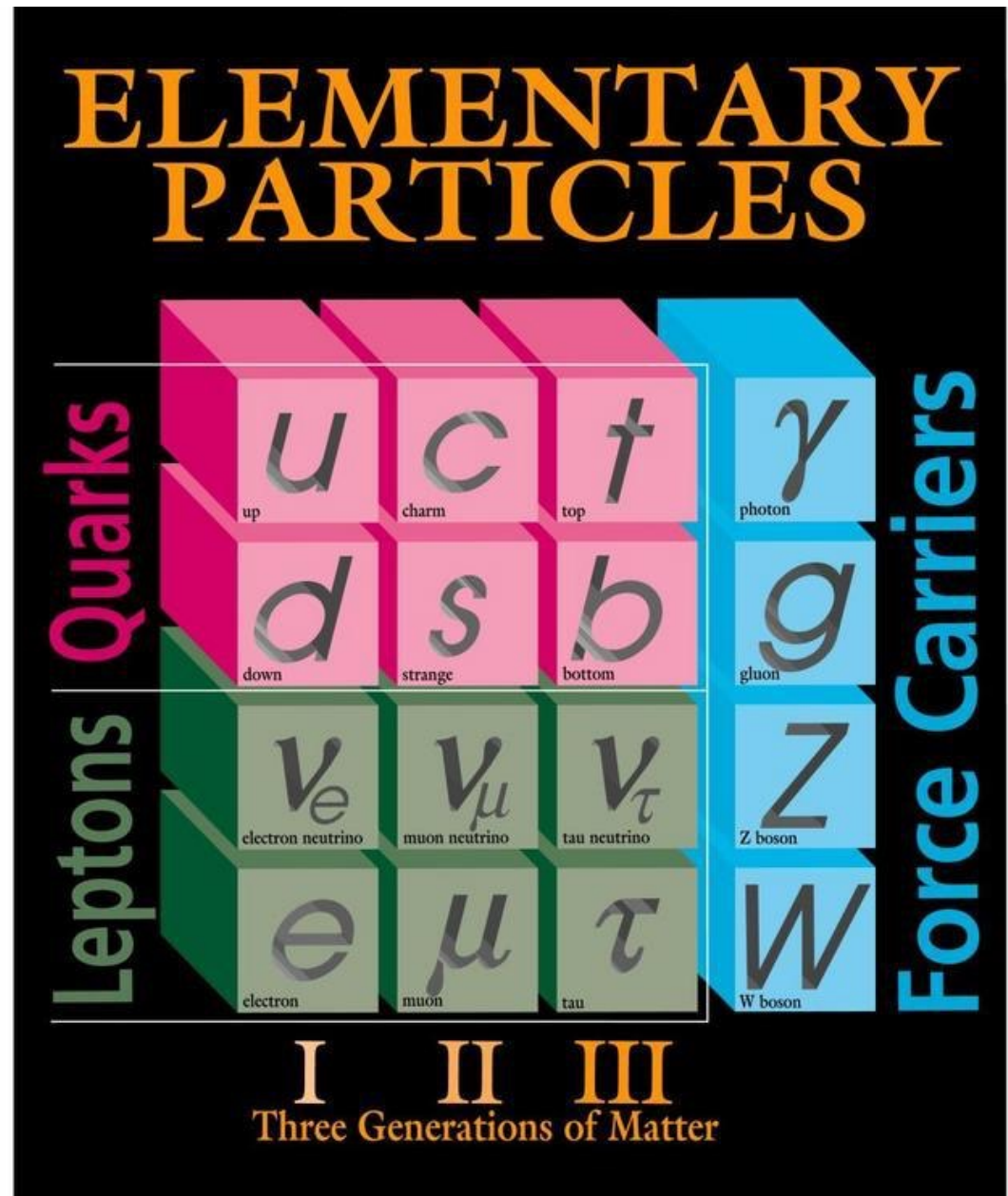
In uno spazio omogeneo e isotropo, non c'è motivo di distinguere destra e sinistra in modo assoluto.

Oppure si' ?

# Lo Zoo delle particelle

6 quarks, 6 leptoni,  
4 mediatori di forze

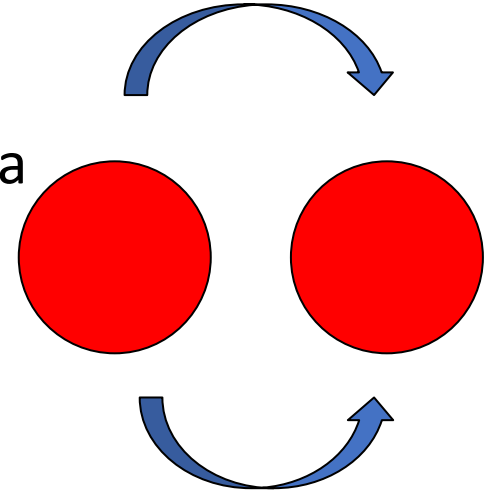
Le simmetrie governano  
la struttura del Modello  
Standard



# Simmetrie e particelle elementary

## Permutazioni:

la prima simmetria non spazio-temporale introdotta nella fisica delle particelle, da W. Heisenberg nel 1926, in relazione alla indistinguibilità di elettroni identici in un sistema atomico.



Punto fondamentale della meccanica statistica quantistica:

Statistiche di Bose-Einstein and Fermi-Dirac

governano il comportamento di particelle quantistiche indistinguibili (e.g. bosoni e fermioni). Principio di esclusione di Pauli.

Due modi possibili in cui particelle indistinguibili possono occupare livelli discreti di energia nello stato di equilibrio.

Importanti applicazioni pratiche: struttura atomica, superconduttori

# Momento angolare

Un oggetto che ruota attorno ad un fulcro possiede un momento angolare, che dipende dalla distanza dal centro di rotazione e dalla velocità di rotazione.

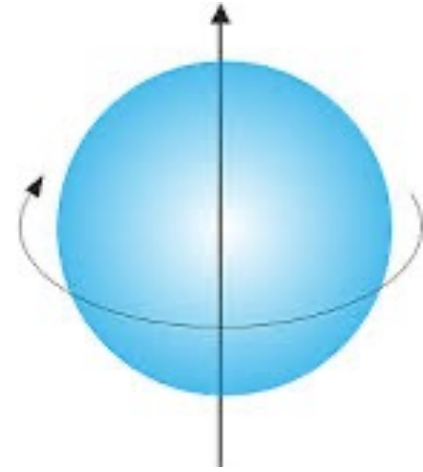
La conservazione del momento angolare (attrito minimo) fa sì che la pattinatrice piroetti con velocità diversa se estende o piega le braccia.





# Lo Spin

Le particelle posseggono come proprieta' intrinseca un momento angolare che non e' assimilabile a quello orbitale. Come se ruotassero su se stesse (idea introdotta nel 1925, ma controversa)



Spin introdotto da Pauli nel 1924 come una nuova quantita' propria del mondo quantistico.

1927: Pauli formula la teoria dello spin (non relativistico).

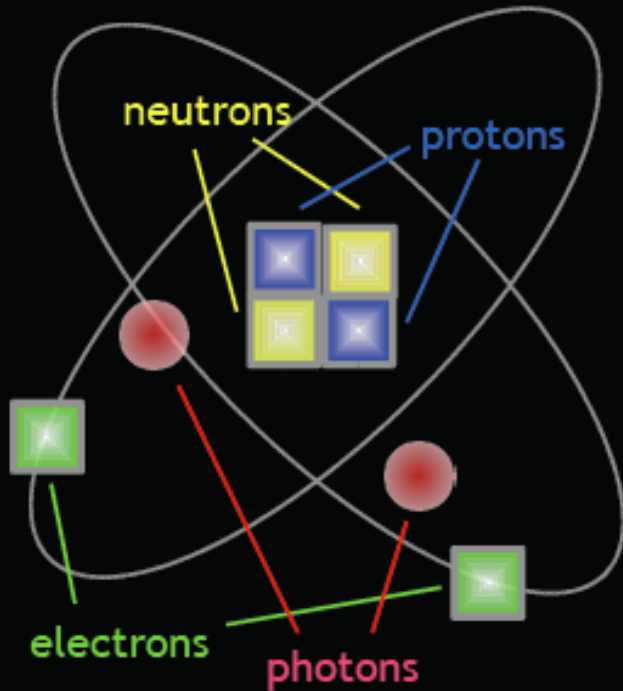
1928: descrive l'elettrone come uno oggetto con spin.

1940: Pauli dimostra il teorema dello spin:

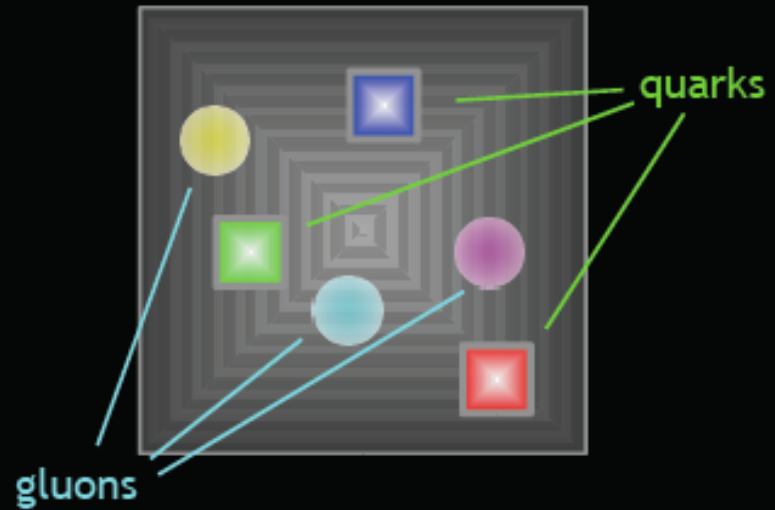
fermioni hanno spin semi-intero, bosoni hanno spin intero.

# La materia ordinaria e' fatta di fermioni, tenuti insieme da bosoni

Atoms:



Nucleons (protons  
and neutrons):



- matter particle
- force particle

Fotoni e gluoni sono eccitazioni del campo  
quantistico (elettromagnetico, forte)

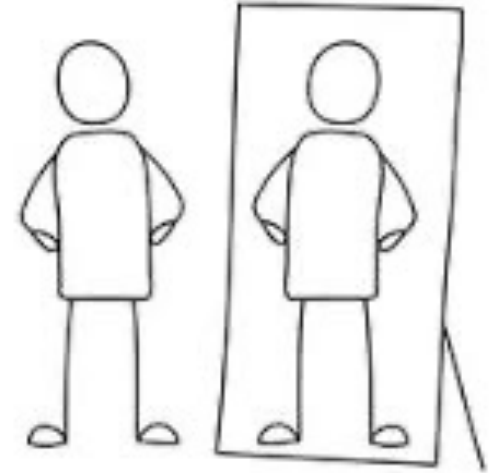
Z,W : portatori della forza debole

# Parita'

**Riflessione rispetto all'origine del sistema di coordinate.**

Equivalente a prendere l'immagine nello specchio e ribaltarla (eg ruotarla di 180 gradi).

Il nostro cervello e' abituato alla parita': per questo un oggetto visto allo specchio appare cosi' reale !



shutterstock.com · 329525726

Parita' introdotta nella fisica quantistica nel 1927 da Wigner che la uso' per interpretare risultati di struttura atomica.

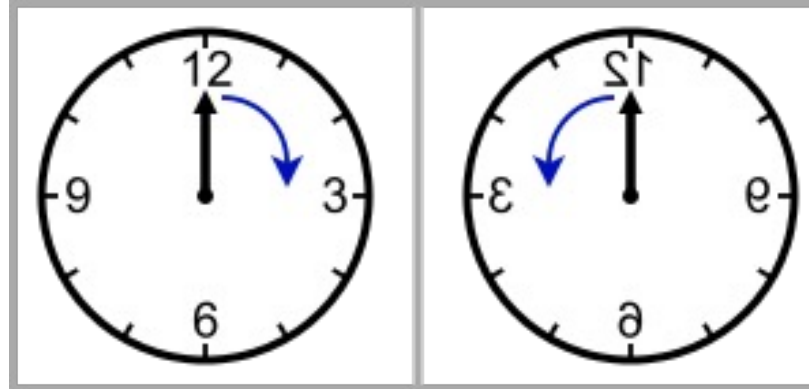
La struttura atomica e' dominata dalla forza elettromagnetica, che rispetta la parita'.

Infatti le leggi fisiche che governano la gravita', elettromagnetismo e la forza "forte" (o nucleare) rispettano tutte la parita'.

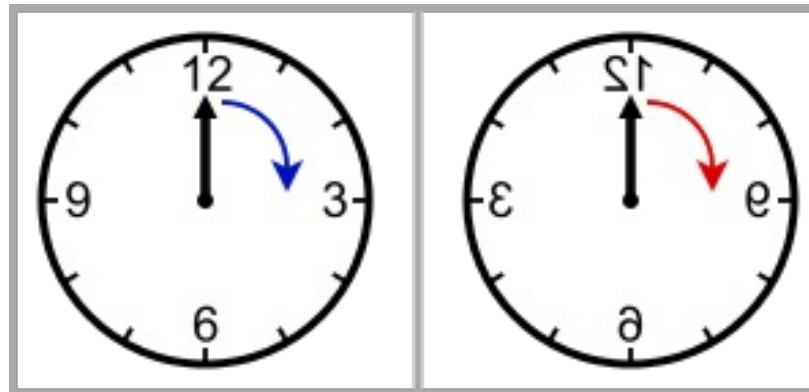


Stato "naturale" = parita' e' rispettata

# Parita' allo specchio



conservazione



violazione

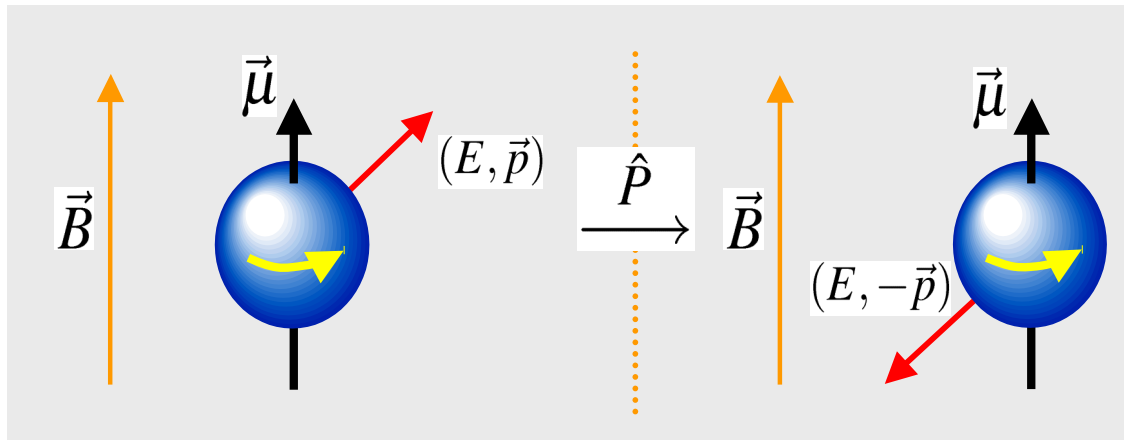
# La simmetria si rompe

1956: Lee e Yang notano che i decadimenti beta (radioattività) non sono stati ancora esaminati riguardo alla parità

1957: C.S.Wu et al. conducono un esperimento coi decadimenti beta del cobalto-60



**Elettroni sono emessi preferenzialmente in direzione opposta al campo magnetico applicato**



**Se parità fosse conservata:  
stessa probabilità di  
produrre elettroni allineati  
o opposti allo spin**

La “corrente” debole carica, mediata dal bosone W, che è responsabile per i decadimenti beta, si accoppia SOLO a particelle che hanno lo spin anti parallelo alla velocità.

100% violazione della parità: differenza assoluta tra destra e sinistra

# Simmetrie C e P

**C = coniugazione di carica:** scambia particelle con antiparticelle (e viceversa). Il nome deriva dal fatto che antiparticella di solito ha carica elettrica opposta.

Da allora molti esperimenti hanno mostrato che la simmetria C e' anche massimalmente violata. E che P e' compensata da C.

**Finche' l'azione combinata CP e' una simmetria rispettata, e' possibile evitare una distinzione assoluta tra destra e sinistra.**

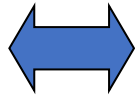


**Guardiamo piu' da vicino alla antimateria ...**

Cambridge, UK, 1928 :

Dirac predice esistenza del positrone  
e+, stessa massa ma carica opposta a e-

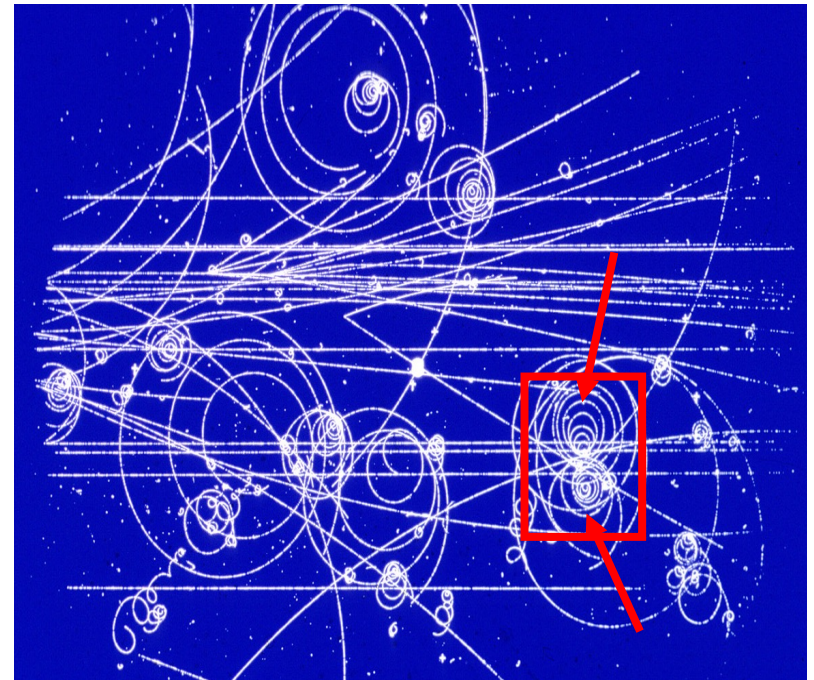
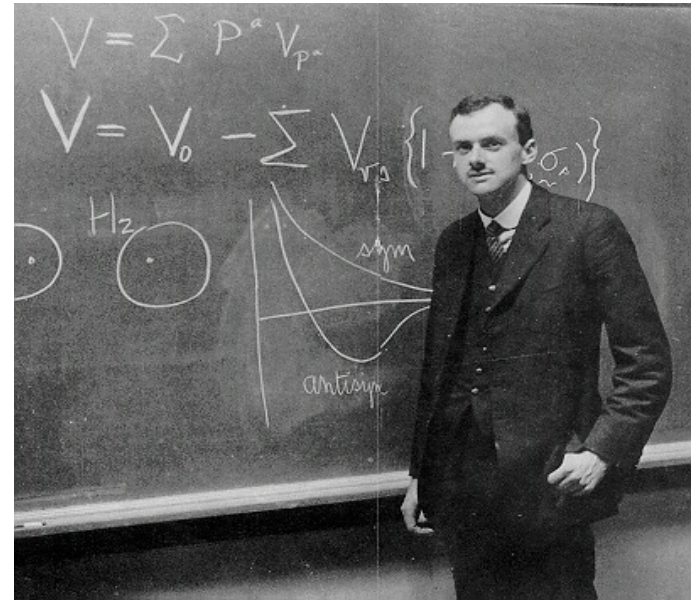
Meccanica  
Quantistica



Relativita'  
speciale

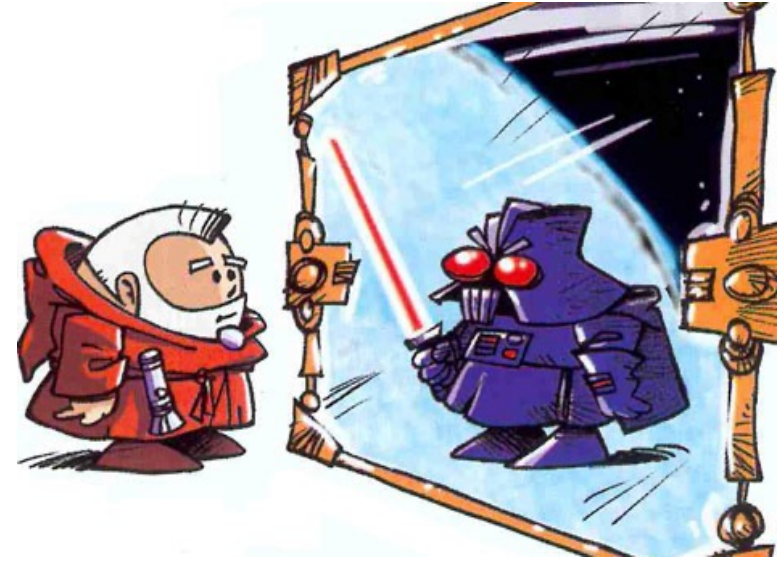
## Equazione di Dirac

Fascio di particelle interagisce in  
idrogeno – scoperta del positrone,  
fatta da Anderson nel 1933

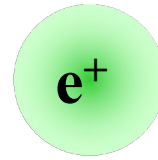
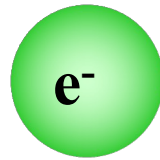


# Antimateria

Ogni particella elementare di  
materia ha la sua antiparticella  
Stessa massa ma carica opposta

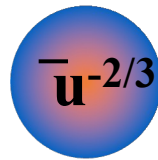


elettrone



positrone

up quark



up anti-quark

(se sono instabili, hanno la stessa vita media)



# Antimateria

Quando una particella e anti-particella, ciascuna di massa  $m$ , collidono, si annichiliscono, producono energia  $E$  sotto forma di radiazione – la massa totale  $2m$  si converte in energia secondo la famosa equazione:

$$E = mc^2$$



Analogamente, data sufficiente energia, si puo' convertire energia in materia e antimateria

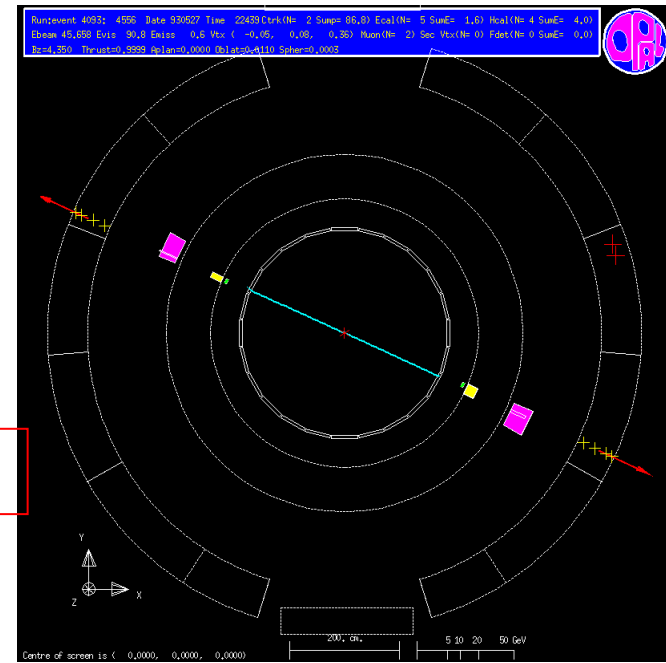
# Simmetria in azione

Finora gli esperimenti hanno dimostrato che una quantità esattamente uguale di materia e anti-materia viene prodotta quando l'energia è convertita in materia

Per ogni quark prodotto, un anti-quark viene anche prodotto, etc.

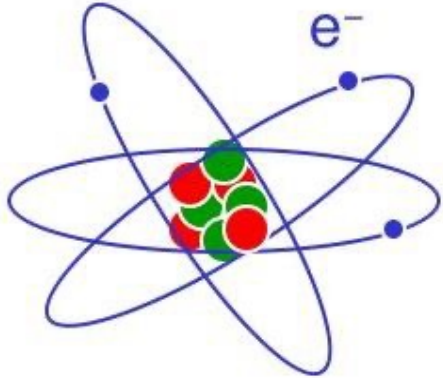


Dunque, quantità uguale di materia e anti-materia sono state create nel Big Bang



# Materia verso anti-materia

Matter



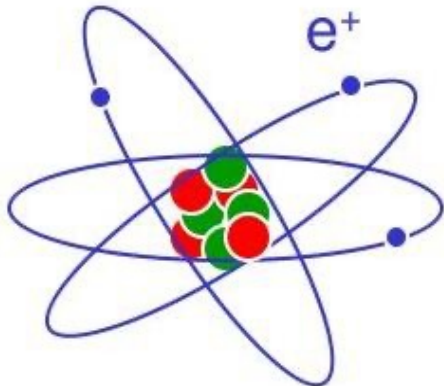
p

n

Tuttavia e' un fatto che viviamo in un Universo fatto di materia.

C'e' pochissima antimateria nell'Universo. Prodotta in collisioni di particelle, ad acceleratori o nel cosmo. E non sopravvive a lungo.

Antimatter



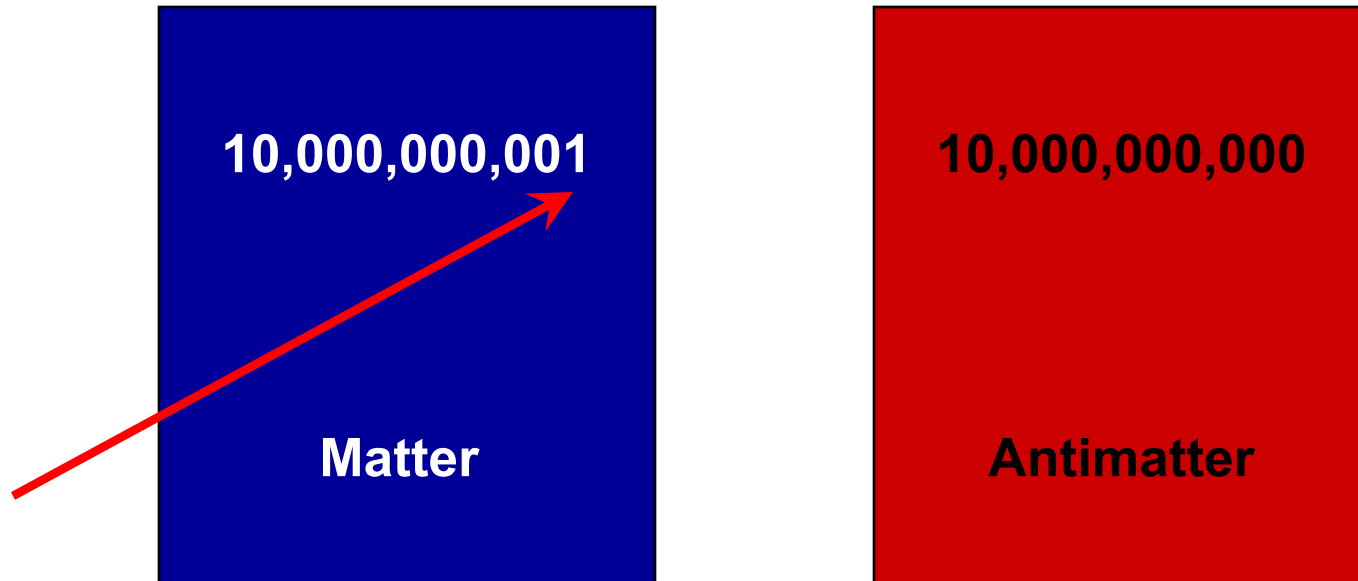
p

n

Chiaramente qualcosa di speciale e' avvenuto agli albori dell'Universo.....

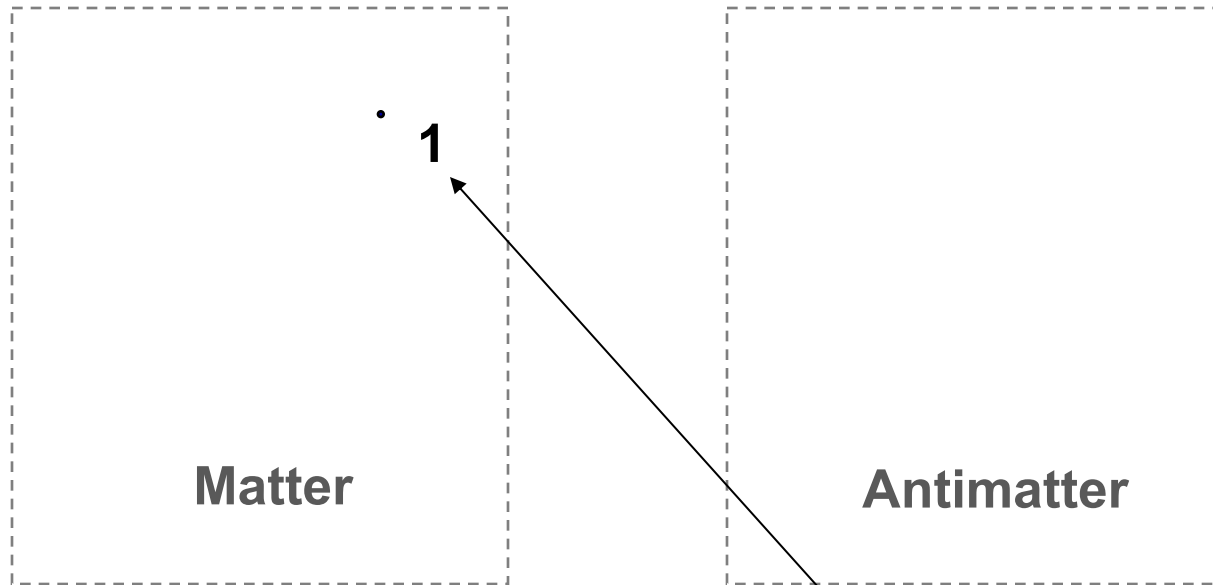
# La simmetria si rompe

Immediatamente dopo il Big Bang, materia e antimateria NON sono esattamente uguali



*La Grande Annichilazione !*

# La simmetria e' rotta alla Grande Annichilazione....



Tutta l'antimateria, e tutta la materia a parte  
una piccolissima quantita', sono sparite  
Quella piccolissima quantita'.... siamo **noi** !

Universo nasce con quantità  
uguali di materia e antimateria

Violazione di CP



(e violazione del numero  
barionico, e transizione  
di fase)

Universo contiene una minuscola quantità  
di materia in più della antimateria

Materia e antimateria annichiliscono :

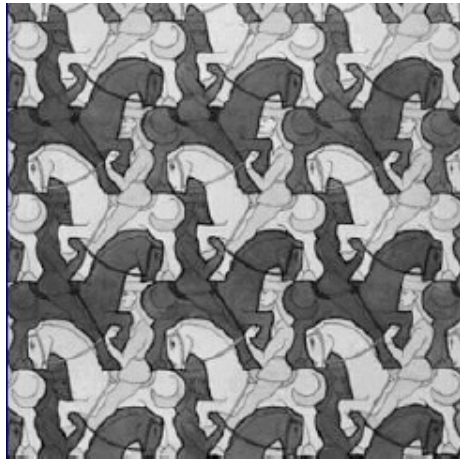


Universo contiene solo materia (e molti  
fotoni )

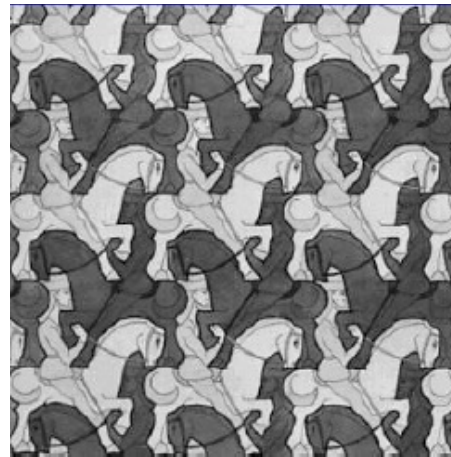
# Violazione di CP: una analogia ottica

P = parita' in uno specchio

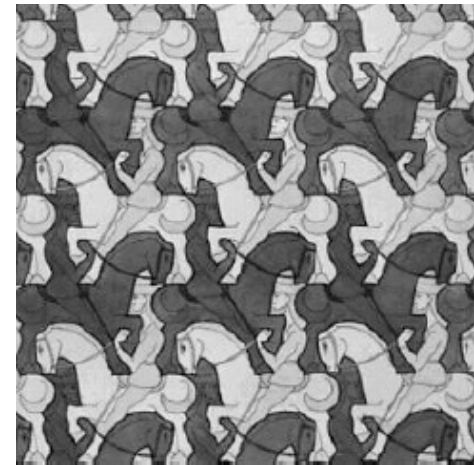
C = bianco - nero



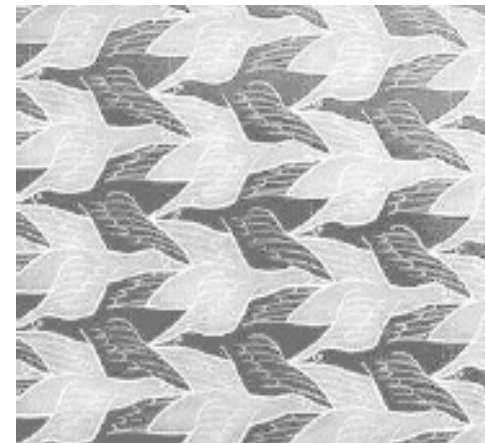
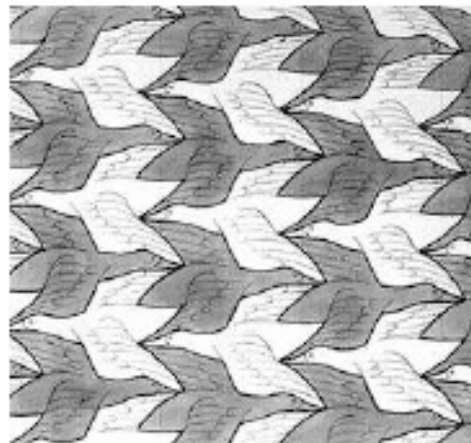
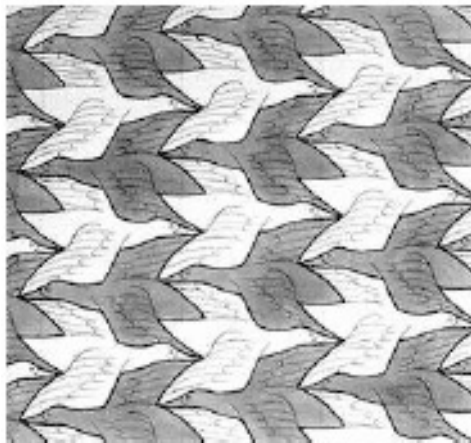
P



C

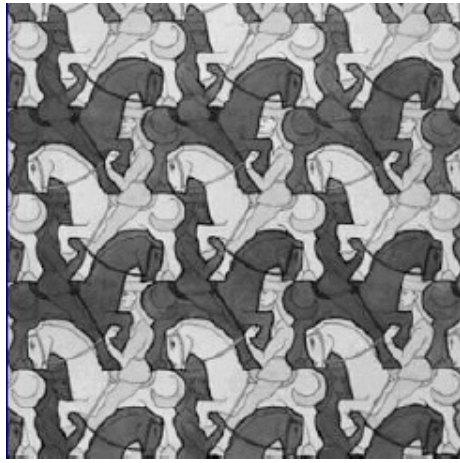


CPC

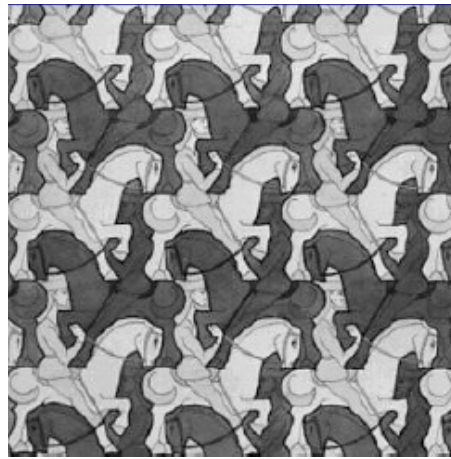


CPV

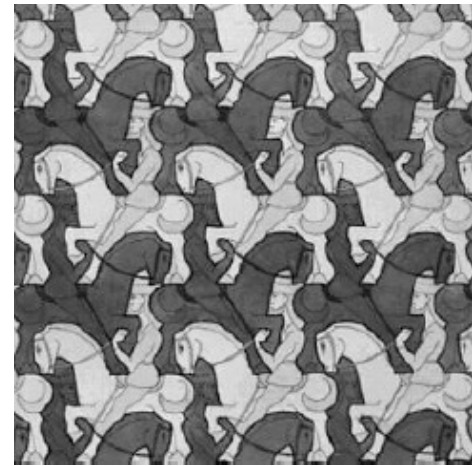
# Violazione di CP: una analogia ottica



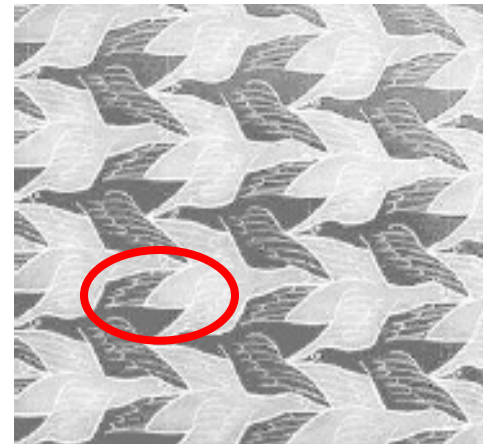
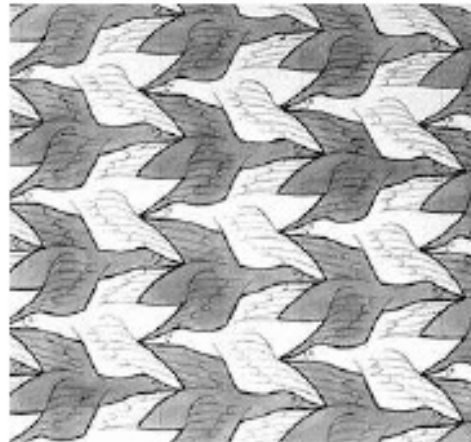
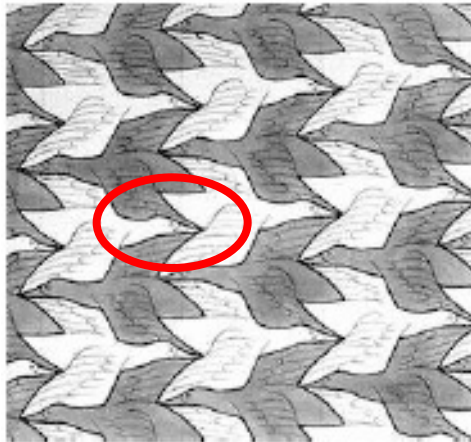
P



C



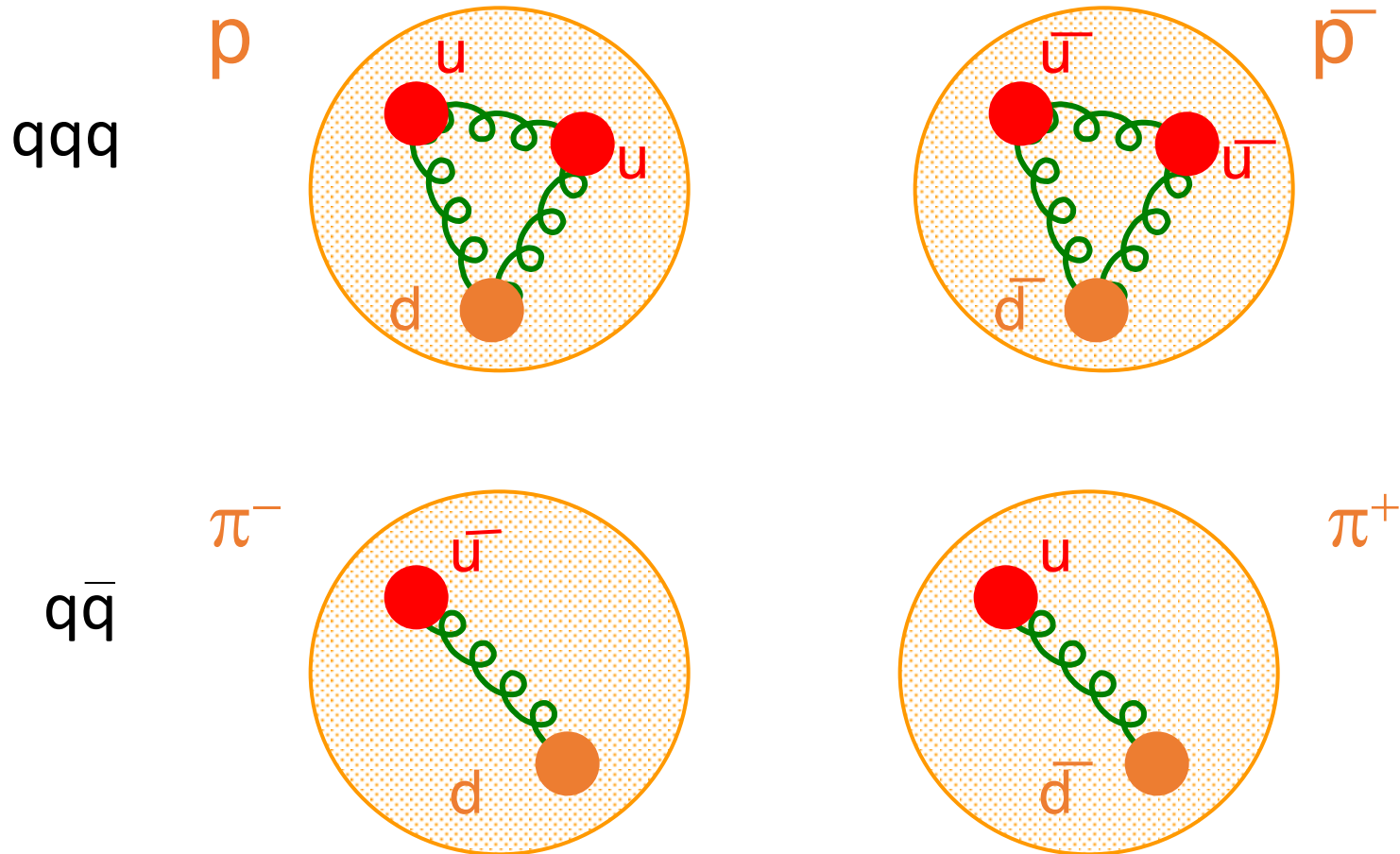
CPC



CPV



# “Adroni”: particelle contenenti quarks

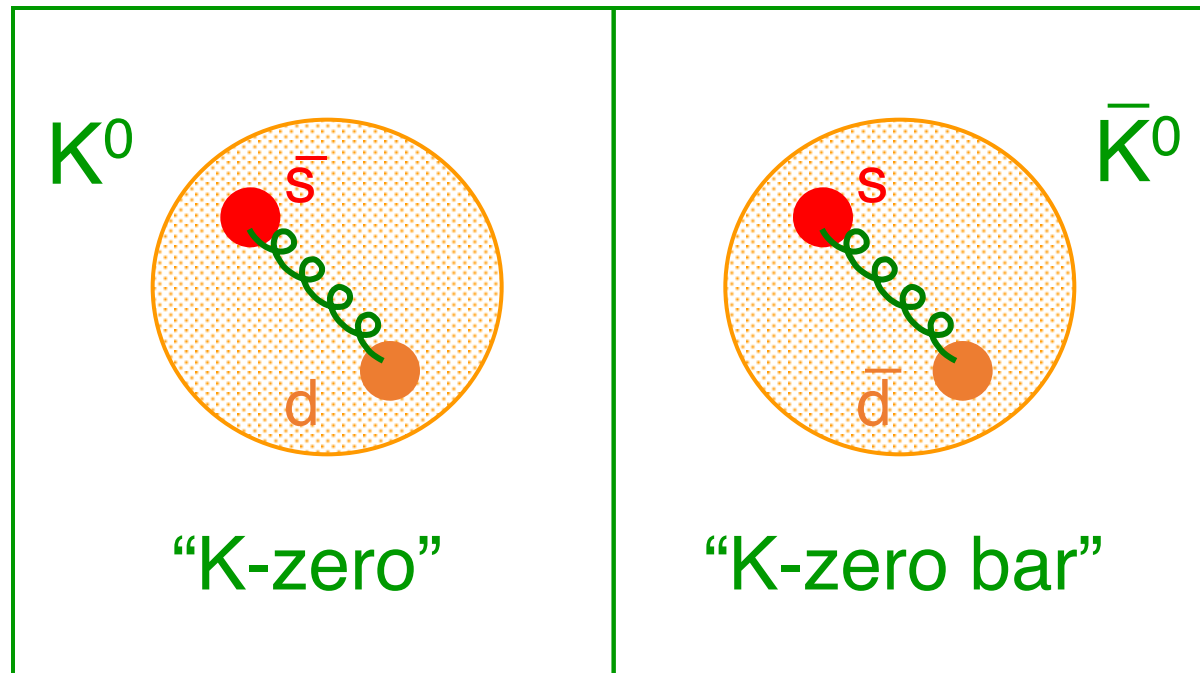


Transizioni di quarks – unico fenomeno in cui si osserva la violazione di CP

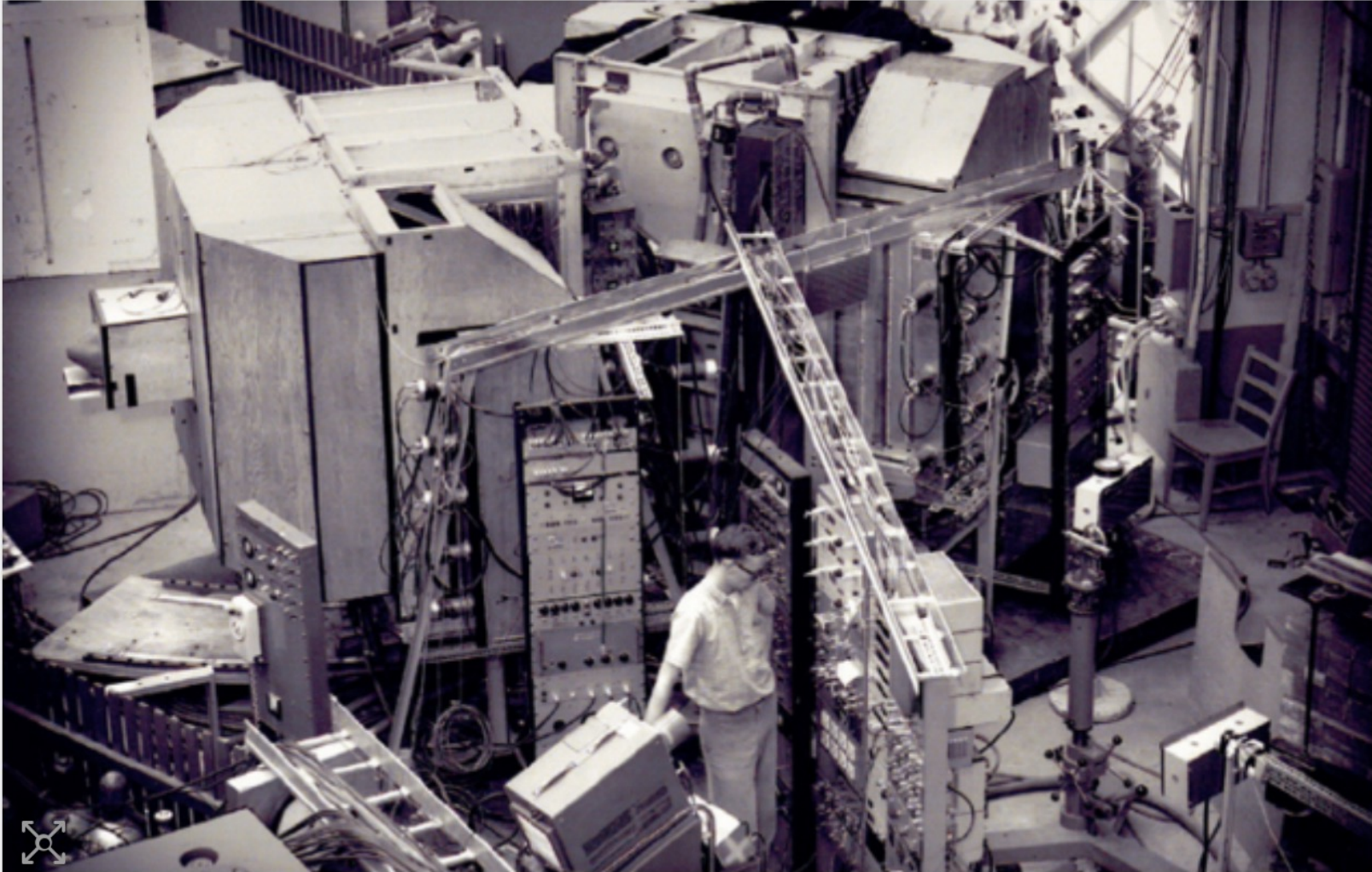
# Kaoni neutri

Particelle con zero carica elettrica, che contengono un quark **strano**

Prodotti in interazioni forti, decadono per mezzo di interazioni deboli



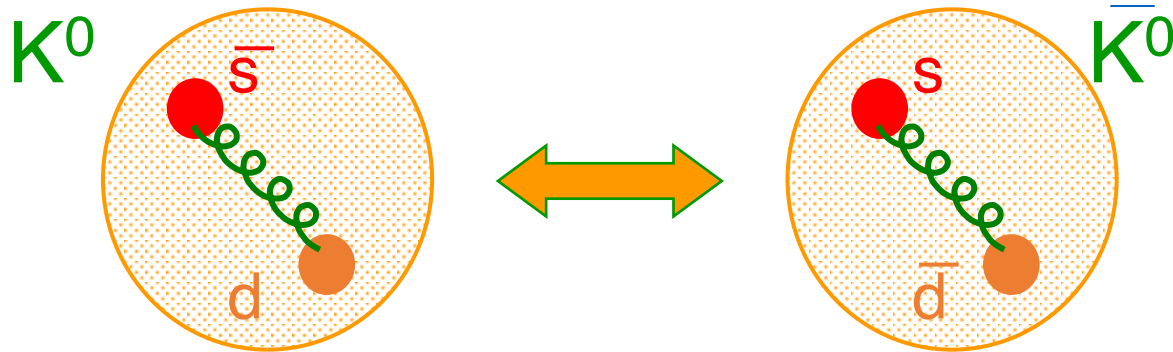
# Una scoperta sorprendente



The experiment that discovered CP violation at Brookhaven was set up in a neutral beamline, directed inside the ring of the Alternating Gradient Synchrotron. Visible here are the two spectrometer magnets positioned at  $22^\circ$  to the beam. Spark chambers tracked particles before and after the magnets.

Image credit: Brookhaven National Laboratory.

# Kaoni neutri



Le particelle che decadono sono “combinazioni”:

$K_S$  “K-short”

$$K_S \approx \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 + \bar{K}^0)$$

$$\tau_S = 0.9 \times 10^{-10} \text{ sec}$$

“K-long”  $K_L$

$$K_L \approx \frac{1}{\sqrt{2}} (K^0 - \bar{K}^0)$$

$$\tau_L = 5.2 \times 10^{-8} \text{ sec}$$

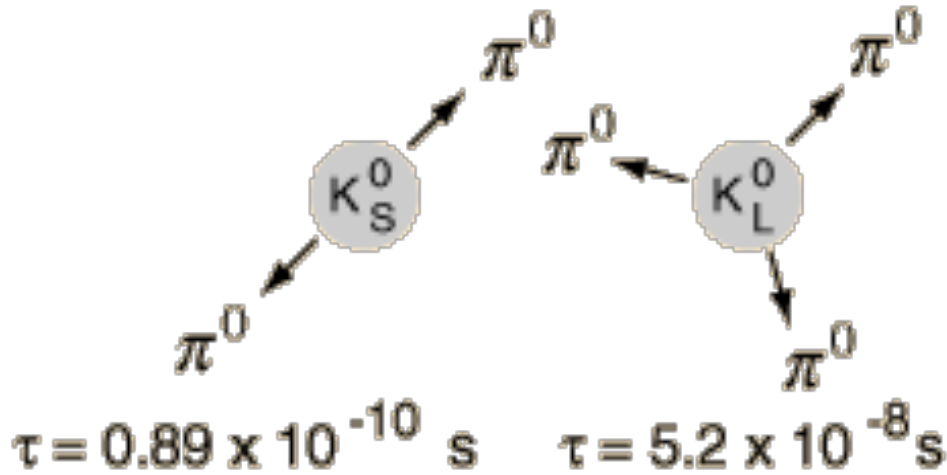
Si inizia con quantità uguali di  $K_S$  e  $K_L$

Si finisce con solo  $K_L$

# Una scoperta che sorprese il mondo

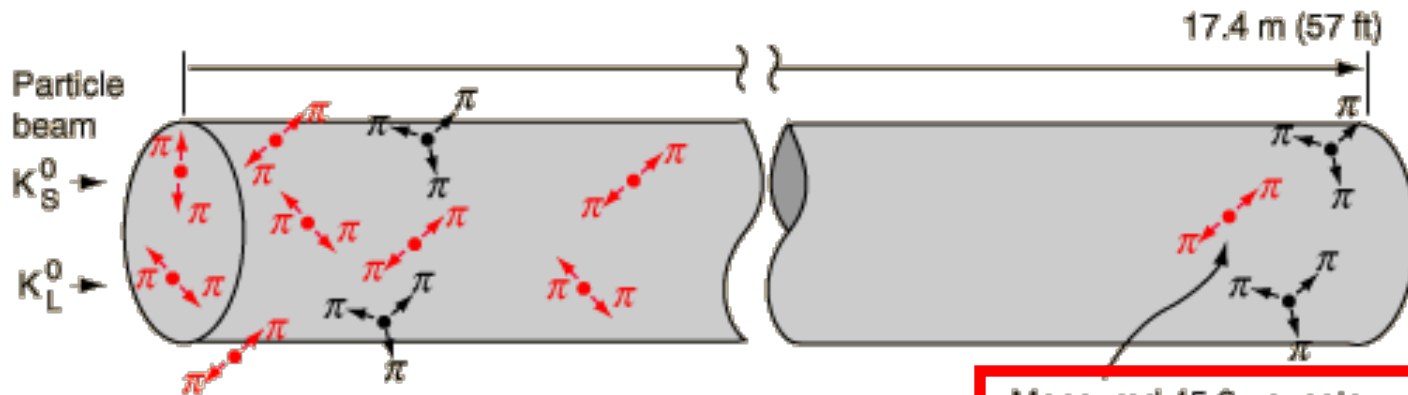
Fitch, Cronin, Turlay 1964

Assumendo invarianza di CP,  $K_L$  NON puo' decadere in 2 pioni.



$$K_S^0 = \frac{K^0 - \bar{K}^0}{\sqrt{2}} \rightarrow 2\pi$$

$$K_L^0 = \frac{K^0 + \bar{K}^0}{\sqrt{2}} \rightarrow 3\pi$$



Measured 45  $2\pi$  events out of 22,700, or about 1 in 500.

# Violazione di CP

Questa volta, non c'è scampo....

La scoperta della violazione di CP ci porta a concludere che le leggi della fisica permettono una distinzione **assoluta** tra destra e sinistra, tra materia e antimateria.

**E se incontrassi un alieno, saprei riconoscere se alieno o anti-alieno !**  
(senza rischio di annichilarmi....)

**Senza violazione di CP, non saremmo qui a discutere !**

(1300, Filosofo francese) Buridan e il suo paradosso:

posto tra 2 covoni di fieno assolutamente identici, un asino non ha motivo di preferire l'uno o l'altro, perciò non è capace di scegliere e muore di fame.



La storia implica la completa equivalenza o simmetria tra i covoni a destra e sinistra.

Se le alternative sono completamente equivalenti, allora l'asino non ha un motivo sufficiente per scegliere e la situazione non si sblocca.

Pierre Curie, 1894: Asimmetria è ciò che crea un fenomeno.

La rottura di una certa simmetria non implica che non esista simmetria, ma piuttosto che lo stato in cui la simmetria è rotta è caratterizzato da un livello più basso di simmetria.

# Rottura di simmetria

## Rottura esplicita di simmetria:

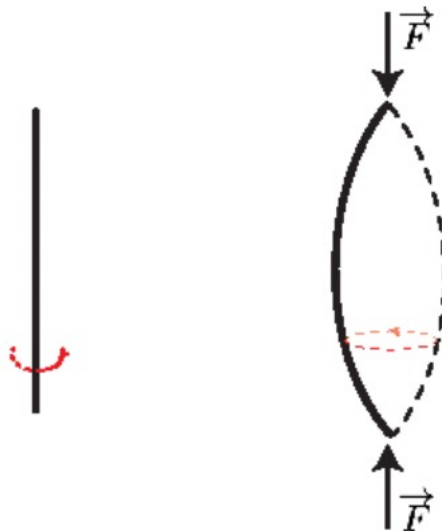
cio' che rompe la simmetria e' introdotto "ad-hoc", a mano, sulla base di risultati sperimentali (come P, CP)

## Rottura spontanea di simmetria:

avviene quando le soluzioni di un certo problema fisico non rispettano la simmetria, ma la simmetria stessa non e' rotta.

Il concetto e' nato nella fisica della materia condensata.

Basticino vertical lineare

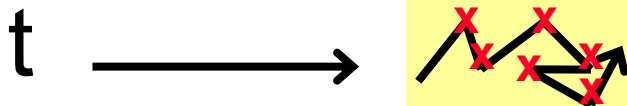


Esiste un numero infinito di stati di energia piu' bassa, tutti equivalenti (stato fondamentale)



# Il meccanismo di Higgs

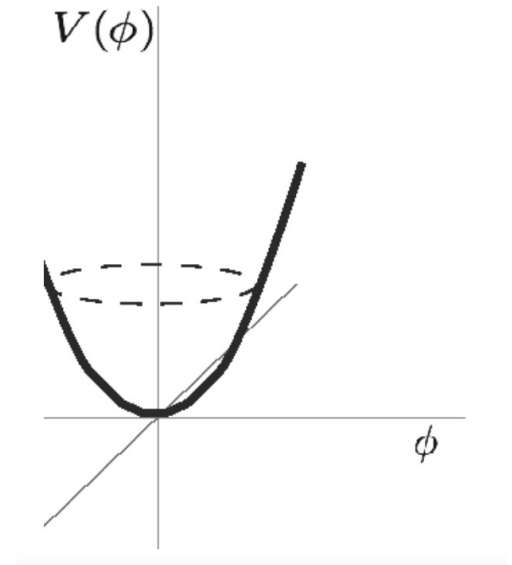
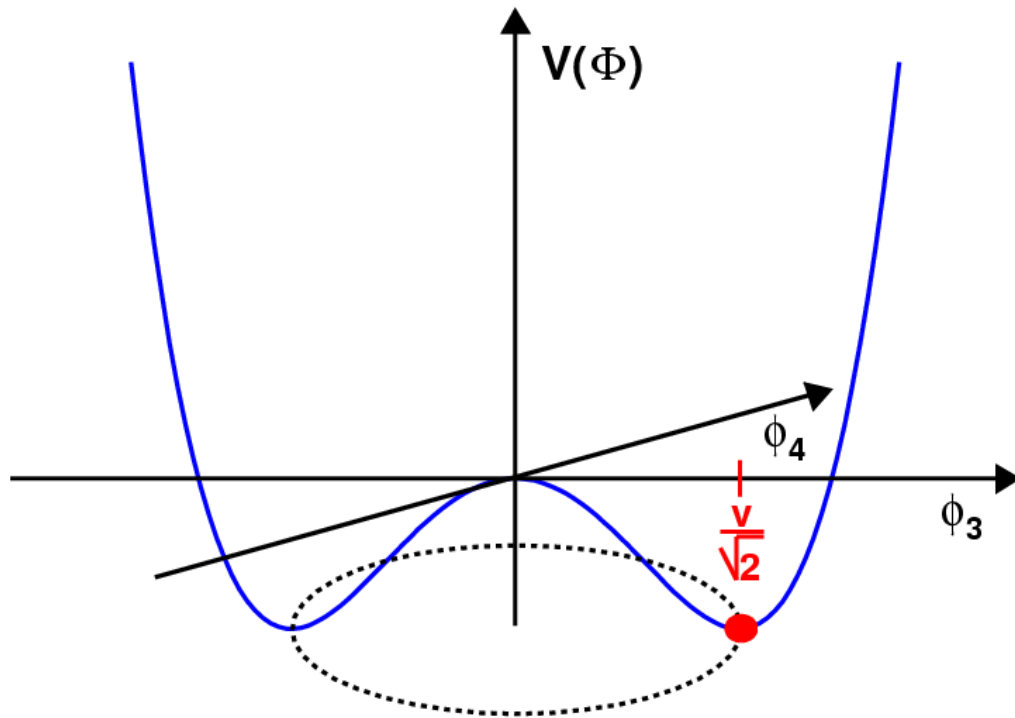
## Campo quantistico del bosone di Higgs



**Massa e' la misura della  
resistenze al movimento  
nel campo di Higgs**

Senza il meccanismo di Higgs, non ci sarebbero masse !  
Universo sarebbe molto diverso....

# Il cappello messicano

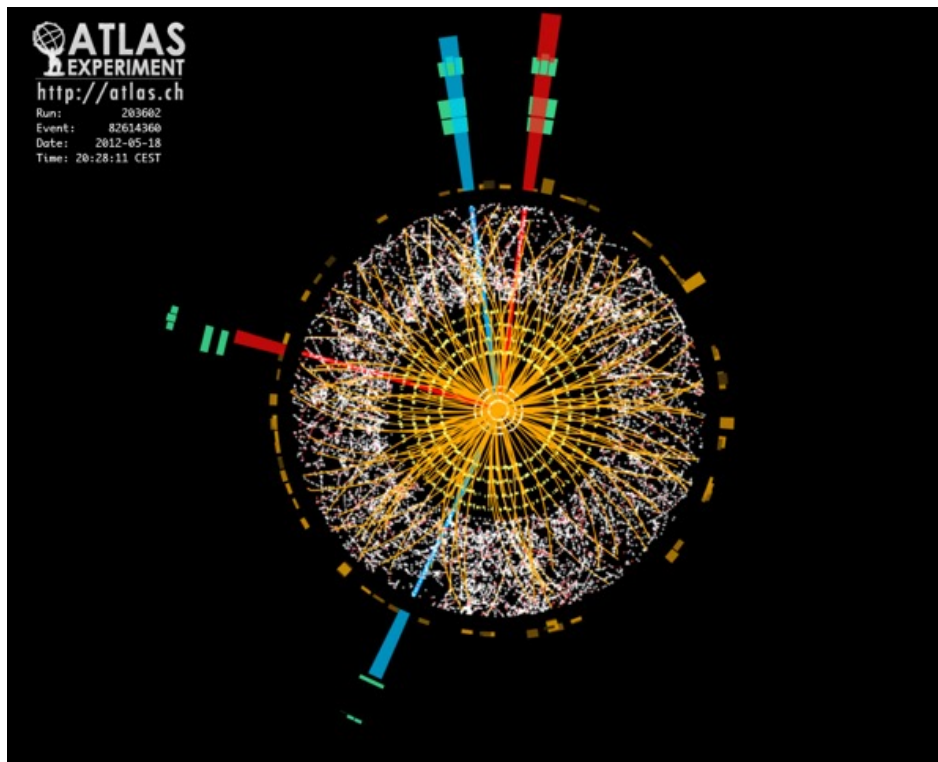


Una pallina puo' cadere in qualsiasi direzione, tutte ugualmente probabili. Quando cade, una direzione particolare viene scelta e la simmetria e' rotta

# La scoperta del bosone di Higgs a LHC

Scoperto nel 2012

Nobel prize nel 2014



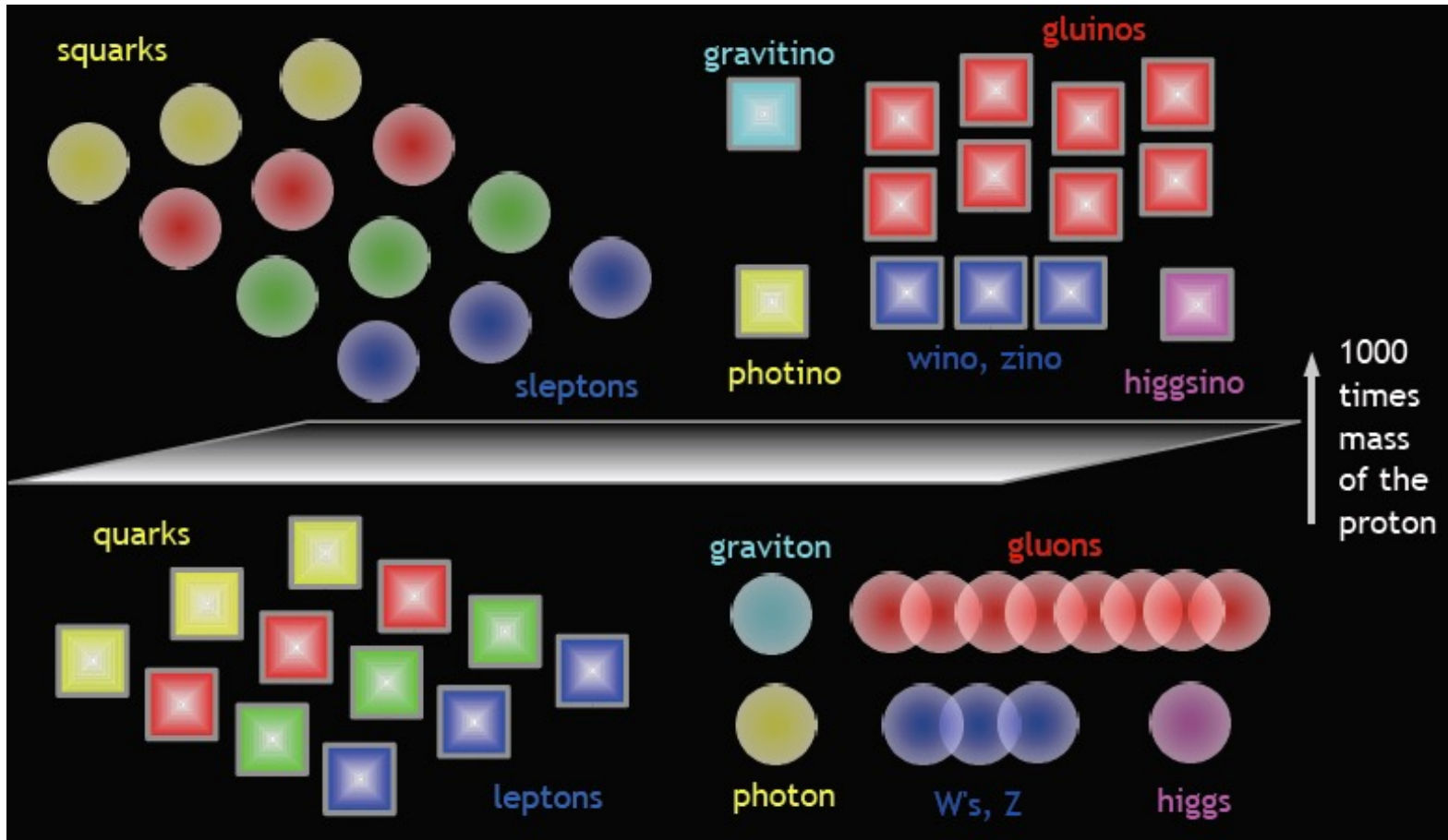
La nuova particella e' finalmente scoperta, circa mezzo secolo dopo essere predetta

Massa =  $\sim 125$  GeV  
Uhm... un po' piccola....

Higgs candidate  
in 4 electrons

# Il problema della massa di Higgs

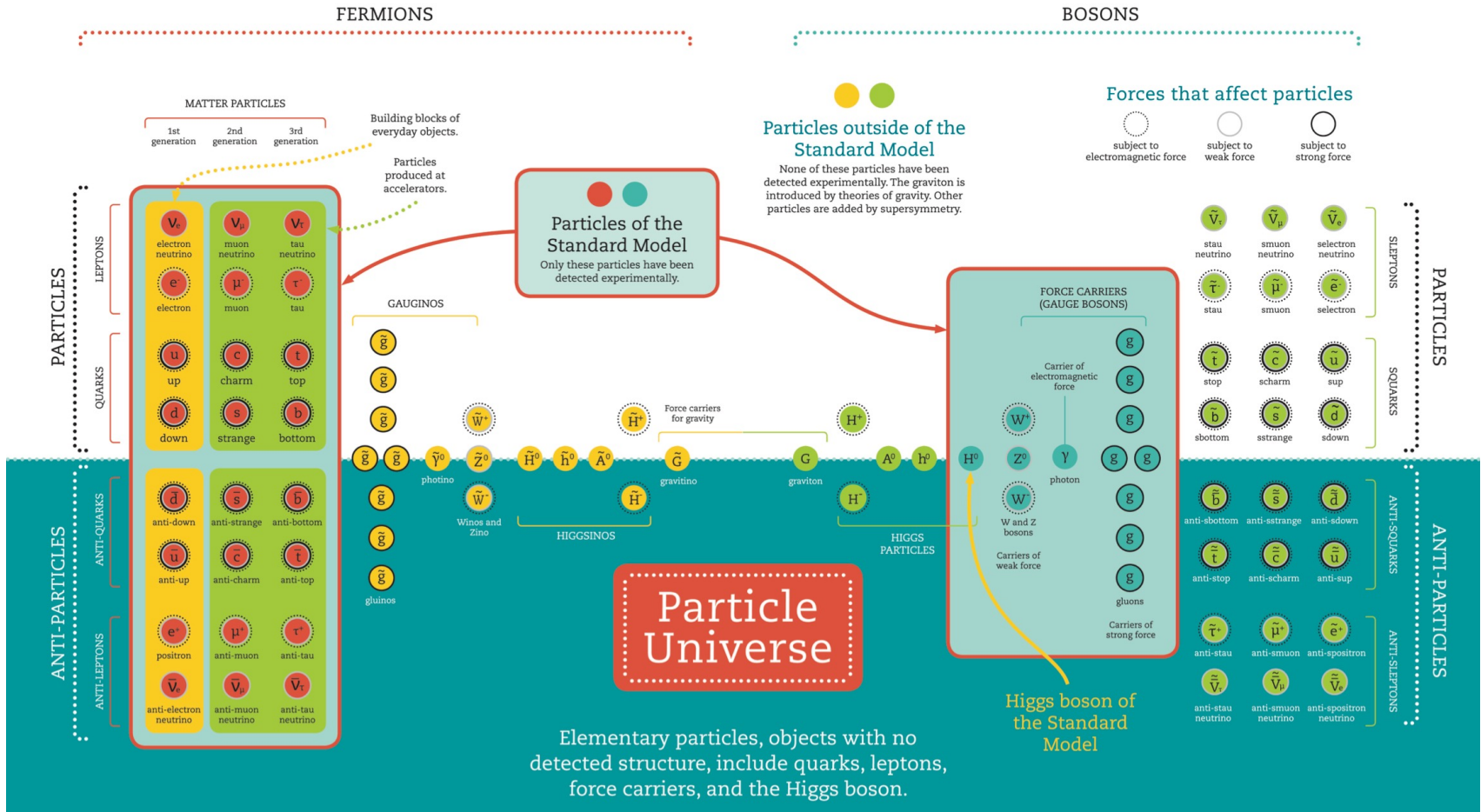
Perche' il bosone di Higgs e' leggero? Le sue interazioni con le particelle del Modello Standard lo appesantiscono



Particelle aggiuntive potrebbero produrre effetti di "cancellazione" e ridurre la massa

# Supersimmetria

Finora NON osservata !



**Particle Universe**  
Elementary particles, objects with no detected structure, include quarks, leptons, force carriers, and the Higgs boson.

Supersimmetria mette in relazione i mondi di fermioni e bosoni.

The superpartners sono piu' pesanti: la supersimmetria deve anch'essa essere rotta.

La rottura di simmetria e' essenziale  
per l'esistenza del mondo in cui  
viviamo !!