

*L'esperimento di M.me Wu  
sulla violazione della parità  
nelle interazioni deboli*

*D. Babusci & G. Venanzoni*

*INFN-LNF*

# Leggi di Conservazione

---

Immagine **Classica** → **ordine al di sotto del caos**: nonostante la natura accidentale e imprevedibile del mondo, leggi di natura sono semplici e ordinate

Visione **Quantistica** → **caos al di sotto dell'ordine**: ordine imposto dalle leggi di conservazione sovrapposto a caos più fondamentale provocato da eventi di produzione e creazione di particelle, principio d'indeterminazione, ...

Spostamento sorgente ordine: dalle interazioni e dall'attività delle particelle, ai vincoli delle leggi di conservazione



qualunque cosa che può accadere, compatibilmente con le leggi di conservazione, di fatto accade

# Leggi di Conservazione

---

cosa sono le leggi di conservazione ?

**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**

affermazione di una costanza nella natura  
durante una variazione

# Simmetria

---

Linguaggio corrente: simmetria ha 2 significati diversi

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

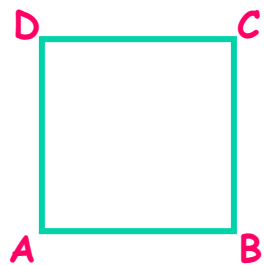
**Matematica:** interesse per le **trasformazioni** a cui può essere sottoposto un oggetto simmetrico



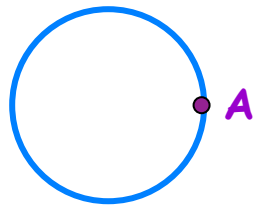
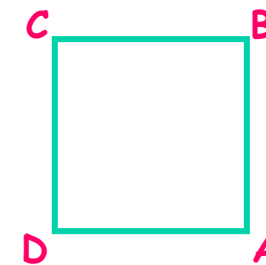
simmetria come origine di invarianza: quando un oggetto è sottoposto a una particolare trasformazione il suo aspetto rimane inalterato

# Simmetria

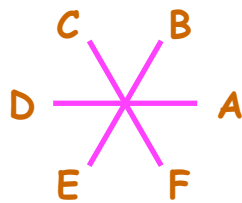
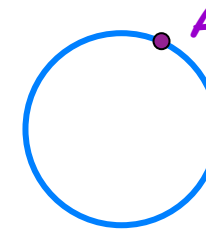
Esempio simmetrie geometriche



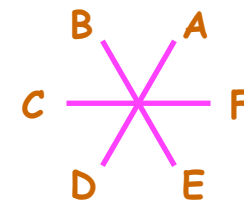
Rotazione  
di  $\pi/2$



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 **Nöther**  
(per trasformazioni continue) stabilisce la connessione  
**Simmetria** → **Invarianza** → **Legge di conservazione**

omogeneità spazio	traslazioni spaziali	impulso
omogeneità tempo	traslazioni temporali	energia
isotropia spazio	rotazioni spaziali	momento angolare



non osservabili

posizione assoluta
tempo assoluto
orientazione assoluta

# Simmetria

---

leggi della Fisica non dipendono da come osservatore sceglie origine e orientazione assi del sistema di riferimento spaziotemporale

NB

- non è vero il viceversa del t. di **Nöther**: ci sono casi in cui leggi di conservazione non corrispondono ad alcuna simmetria (teorie con soluzioni solitoniche)
- invarianza di Lorentz genera leggi di conservazione non immediatamente evidenti nell'esperienza quotidiana (esiste quantità non osservabile: la **velocità assoluta**)

# Simmetria

---

Meccanica Quantistica → l'uso dei principi di simmetria comincia a permeare il linguaggio della Fisica

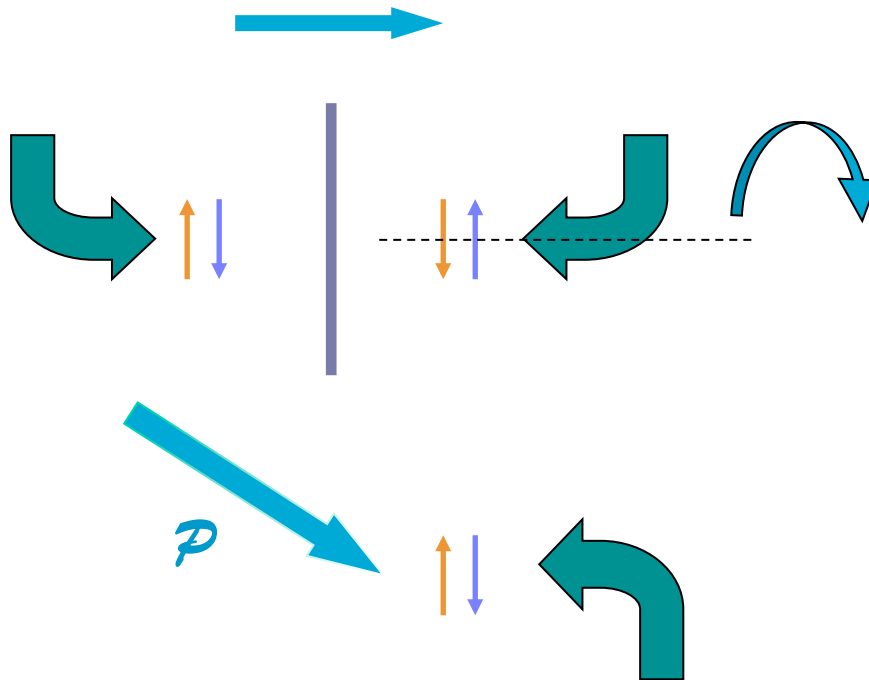
## Esempi

- ✓ struttura generale della **tavola periodica degli elementi** è (essenzialmente) diretta conseguenza dell'isotropia della legge di Coulomb;
- ✓ esistenza delle **antiparticelle** prevista teoricamente come conseguenza della simmetria delle leggi fisiche rispetto alle trasformazioni di Lorentz (e dalla natura quantistica della materia)



# Parità

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



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

# Parità

---

Principio di simmetria tra destra e sinistra antico come la nostra civiltà → violazioni osservate nella vita quotidiana: asimmetria accidentale dell'ambiente, o condizioni iniziali

Leggi della Fisica hanno sempre mostrato simmetria D/S  
(... fino al 1957)

NB

campo magnetico →  
regole della mano dx e sx



violazione della  
simmetria D/S?



MAGNETIC DISCUSSION

*Bruce Stambel*

# Parità

---

la risposta è un deciso NO

Il magnetismo è generato dal / rivelato tramite il moto di cariche elettriche.

Nella descrizione del moto non importa se usiamo un insieme di regole o quelle opposte, otteniamo lo stesso risultato finale → cambia soltanto la definizione del campo magnetico.

Magneti permanenti = moto orbitale degli elettroni atomici



accurata definizione dello “specchio” da utilizzare rimuove ogni possibile obiezione

# Parità

---

Trasformazione di parità è **discreta** → non vale teorema di **Nöther** → no legge di conservazione associata → scarsa utilità pratica della simmetria D/S in **Fisica Classica**

**Meccanica Quantistica**: evoluzione moto di una particella è regolata da funzione di stato  $\psi$  → distribuzione di probabilità delle variabili dinamiche determinata da  $|\psi|^2$



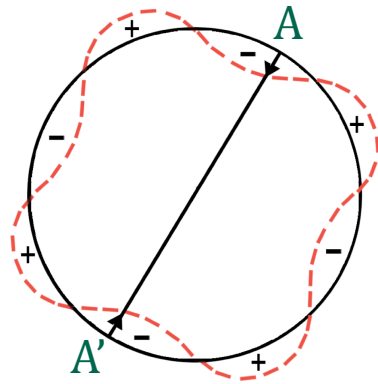
fisica non cambia per  $\psi \leftrightarrow -\psi$



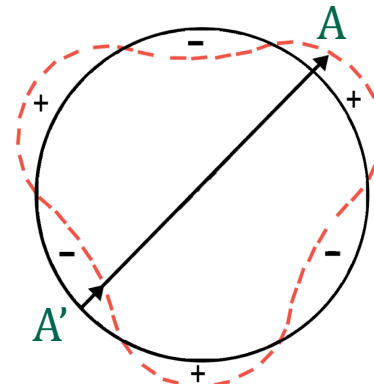
$\psi$  deve essere o simmetrica (**pari**) o antisimmetrica (**dispari**) sotto riflessione

# Parità

Esempio livelli atomici



$$\psi(A) = \psi(A')$$



$$\psi(A) = -\psi(A')$$

Al fluire del tempo  $\psi$  si modifica, ma se le forze che operano su essa sono invarianti per riflessione, la **parità** non cambia e rimane conservata per tutto il moto

# Parità

---

**Meccanica Quantistica:** scomparsa differenza tra simmetrie continue e discrete: anche simmetria D/S guida a legge di conservazione → nuovo numero quantico: **parità P**

→ un sistema quantistico, oltre a un momento angolare intrinseco (**spin**), possiede anche una parità intrinseca

**Esempio** fotone

eq. di Lorentz

$$\frac{d}{dt} \vec{v} = \frac{q}{m} \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

$$P: \quad \vec{v} \rightarrow -\vec{v} \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{B} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -\vec{E} \\ \vec{B} \end{pmatrix}$$

# Parità

---

eq. di  
Maxwell

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \vec{\nabla} \times \vec{A} \\ \vec{E} &= -\vec{\nabla}\phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} \phi \\ \vec{A} \end{pmatrix} \xrightarrow{P} \begin{pmatrix} \phi \\ -\vec{A} \end{pmatrix}$$

→ parità intrinseca del fotone = - 1

Sistema composto → oltre che da quelle intrinseche dei singoli componenti, parità determinata dalla somma aritmetica dei soli momenti angolari **orbitali**.

Momento angolare **totale** contiene anche spin singoli componenti → parità aggiunge **informazione** sul sistema

# Parità

---

NB

✓ simmetrie continue → n. quantici additivi

✓ simmetrie discrete → n. quantici moltiplicativi

1924 – **Laporte** studia transizioni tra livelli energetici di atomi complessi con assorbimento/emissione di un fotone  
→ parità del livello cambia

$$\Delta P_{\text{liv.}} = -1$$

$$P_{\gamma} = -1$$



parità dello stato iniziale =  
parità stato finale

1927 – **Wigner** dimostra che la regola di **Laporte** deriva dalla invarianza per riflessioni delle interazioni e.m.



# $\theta$ - $\tau$ puzzle

---

~ 1950: osservate 2 particelle di **stessa massa** e **vita media** che decadono (**debole**) in numero diverso di pioni:

$$\theta \rightarrow \pi\pi \qquad \tau \rightarrow \pi\pi\pi$$

Dalla considerazione della sola parità intrinseca dei pioni (= -1), risulta

$$P(\theta) = +1 \qquad P(\tau) = -1$$

Effetto del momento angolare orbitale dello stato finale  
→ misura di impulso e distribuzione angolare dei pioni



$\theta$  e  $\tau$  non sono la stessa particella!

# $\theta$ - $\tau$ puzzle

---

*Ciò non ci deve far saltare a conclusioni affrettate. Questo perché sperimentalmente ...  $\theta$  e  $\tau$  appaiono avere la stessa massa e vita media. Le masse sono note con un'accuratezza di una frazione del percento, e le vite medie con, diciamo, del 20%.*

Yang  
(1956)

*Poiché particelle con differenti valori per spin e parità, e che interagiscono forte con pioni e nucleoni, non sono previste avere masse e vite medie identiche, ci vediamo costretti a tenere aperta la questione circa il carattere conclusivo dell'inferenza che  $\theta$  e  $\tau$  non sono la stessa particella. Tra parentesi, mi permetto di aggiungere che l'inferenza sarebbe stata certamente da considerarsi conclusiva, e, in realtà, ben più fondata di tante altre nella Fisica, se non fosse stato per l'anomalia della degenerazione delle masse e delle vite medie.*



$\theta$  e  $\tau$  sono la stessa particella (il mesone K)  
e la legge di conservazione della parità è  
violata nelle interazioni deboli

# Violazione della Parità

---

... ma, per sradicare una credenza accettata occorre prima provare che la precedente evidenza in favore di essa è insufficiente → conclusioni dell'analisi di Lee & Yang (maggio 1956):

1. gli esperimenti precedenti eseguiti sulle interazioni deboli non avevano alcuna incidenza sulla questione della conservazione della parità;
2. gli esperimenti che coinvolgevano interazioni forti ed e.m. stabilivano conservazione parità con elevato grado d'accuratezza, ma non così elevato da consentire rivelazione degli effetti di una violazione nelle interazioni deboli

# Violazione della Parità

---

due circostanze alla base di questa sorprendente situazione:

1. la piccola massa del neutrino esclude la possibilità di ottenere indirettamente informazioni sulla conservazione della parità dall'analisi dello spettro di decadimento  $\beta$ ;
2. per lo studio diretto della conservazione della parità nel decadimento  $\beta$  la discussione delle sole parità nucleari (come fatto fino ad allora) non è sufficiente → necessario uno studio completo del processo di decadimento

# Violazione della Parità

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 104, NUMBER 1

OCTOBER 1, 1956

## Question of Parity Conservation in Weak Interactions\*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG, *Brookhaven National Laboratory, Upton, New York*

(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in  $\beta$  decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

RECENT experimental data indicate closely identical masses<sup>1</sup> and lifetimes<sup>2</sup> of the  $\theta^+$  ( $\equiv K_{\tau_2}^+$ ) and the  $\tau^+$  ( $\equiv K_{\tau_3}^+$ ) mesons. On the other hand, analyses<sup>3</sup> of the decay products of  $\tau^+$  strongly suggest on the grounds of angular momentum and parity conservation that the  $\tau^+$  and  $\theta^+$  are not the same particle. This poses a rather puzzling situation that has been extensively discussed.<sup>4</sup>

One way out of the difficulty is to assume that parity is not strictly conserved, so that  $\theta^+$  and  $\tau^+$  are two different decay modes of the same particle, which necessarily has a single mass value and a single lifetime. We wish to analyze this possibility in the present paper against the background of the existing experimental evidence of parity conservation. It will become clear that existing experiments do indicate parity conservation in strong and electromagnetic interactions to a high degree of accuracy, but that for the weak interactions (i.e., decay interactions for the mesons and hyperons, and various Fermi interactions) parity conservation is so far only an extrapolated hypothesis unsupported by experimental evidence. (One might

### PRESENT EXPERIMENTAL LIMIT ON PARITY NONCONSERVATION

If parity is not strictly conserved, all atomic and nuclear states become mixtures consisting mainly of the state they are usually assigned, together with small percentages of states possessing the opposite parity. The fractional weight of the latter will be called  $\mathfrak{F}^2$ . It is a quantity that characterizes the degree of violation of parity conservation.

The existence of parity selection rules which work well in atomic and nuclear physics is a clear indication that the degree of mixing,  $\mathfrak{F}^2$ , cannot be large. From such considerations one can impose the limit  $\mathfrak{F}^2 \lesssim (r/\lambda)^2$ , which for atomic spectroscopy is, in most cases,  $\sim 10^{-6}$ . In general a less accurate limit obtains for nuclear spectroscopy.

Parity nonconservation implies the existence of interactions which mix parities. The strength of such interactions compared to the usual interactions will in general be characterized by  $\mathfrak{F}$ , so that the mixing will be of the order  $\mathfrak{F}^2$ . The presence of such interactions would affect angular distributions in nuclear reactions.

# Violazione della Parità

---

La violazione in sé non è nulla di sconvolgente: simmetrie valide per una classe d'interazioni e "rotte" per interazioni più deboli erano già note (ad es., **isospin**), ma non avevano a che fare con lo **spaziotempo**

*Ciò che mi colpisce non è il fatto che "Dio sia solamente mancino", ma che, nonostante ciò, egli si dimostri simmetrico quando si esprime mediante interazioni forti ... non conosco alcuna buona risposta.*

Pauli a  
Weisskopf

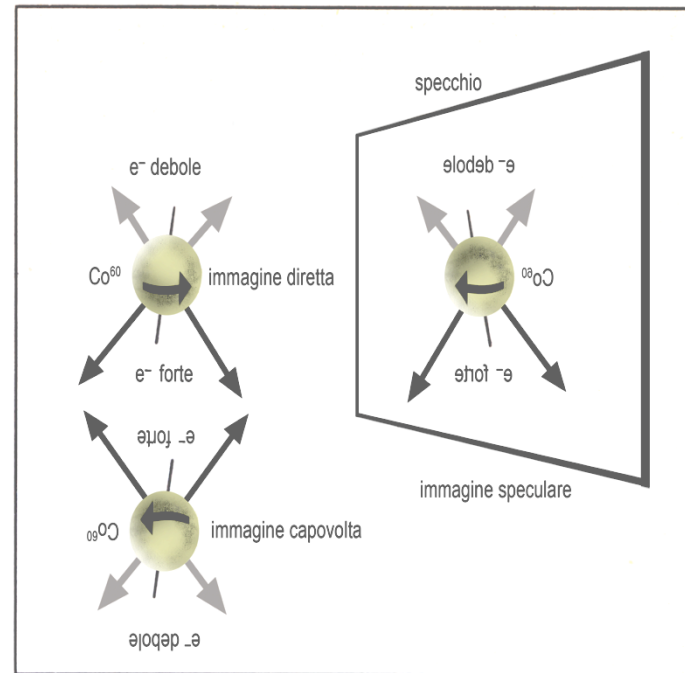
Nell'articolo **Lee & Yang** propongono anche un certo numero di test sperimentali della loro proposta teorica:

- decadimenti  $\beta$  nucleari;
- catena di decadimento del pione ( $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ );
- decadimenti di particelle strane

# Violazione della Parità

L'idea alla base dei diversi esperimenti è la stessa: si realizzano due configurazioni sperimentali che sono una l'immagine speculare dell'altra e se ne confrontano i risultati: se diversi, abbiamo la prova inequivocabile della rottura della simmetria D/S

schema concettuale  
esperimento per la  
verifica della violazione  
nel decadimento  $\beta$





The Nobel Prize in Physics 1957  
Chen Ning Yang, Tsung-Dao Lee

The Nobel Prize in Physics 1957

Chen Ning Yang

Tsung-Dao Lee



Chen Ning Yang    Tsung-Dao (T.D.)  
Lee

The Nobel Prize in Physics 1957 was awarded jointly to Chen Ning Yang and Tsung-Dao (T.D.) Lee *"for their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary particles"*

Photos: Copyright © The Nobel Foundation