

Lezione Fermi 24

Luciano Maiani, AA 14-15

Antimateria nell'Universo?

Sommario

I think that the discovery of antimatter was perhaps the biggest jump of all the big jumps in physics in our century.

— Werner Heisenberg

From 'Development of Concepts in the History of Quantum Theory', in Jagdish Mehra (ed.) *The Physicist's Concept of Nature* (1973), Vol. 1972, 271.

1. Il segno delle cariche
2. Una radice quadrata ha due segni
3. Il mare di Dirac? non esiste
4. Antimateria
5. Simmetrie specchio: Parita' e CP
6. Lo specchio CPT funziona!
7. Cosa abbiamo imparato

1. Il segno delle cariche

- E' noto... che l'ambra, strofinata con un panno di lana, diventa capace di attrarre dei piccoli pezzi di carta o di altra sostanza.
- Esistono *due tipi di elettrizzazione* distinti: quella del vetro, che chiameremo d'ora in poi *positiva*, e quella dell'ebanite, che chiameremo *negativa*.

Mario Ageno, *Elementi di Fisica*, Boringhieri, 1956

- elettroni negativi, protoni positivi
- in fisica classica il segno delle cariche elettriche e' solo una convenzione che evidentemente possiamo invertire a piacimento...

How would you like to live in Looking-glass House,
Kitty?

I wonder if they'd give you milk in there?

Perhaps Looking-glass milk isn't good to drink --



Nella Fisica Classica non c'è modo di mettere a
confronto i mondi ai due “lati dello specchio”

2. Una radice quadrata ha due segni: Relativita', energia negativa e mare di Dirac

Nella Relativita' Speciale, la relazione tra energia e quantita' di moto e':

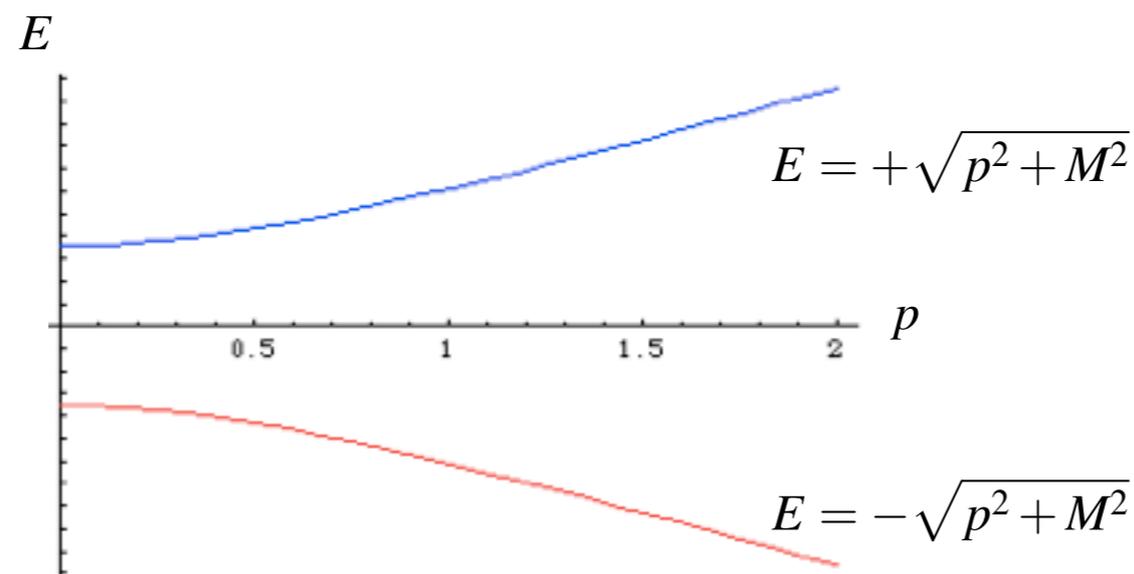
$$E^2 - p^2 = M^2$$

la radice ha, come e' noto, due determinazioni;

in fisica classica, una particella sul ramo positivo ci resta per sempre, poiche' l' energia puo' variare solo con continuita'

ma questo non e' vero in Meccanica Quantistica: un salto quantico puo' portare la particella ad energia negativa...

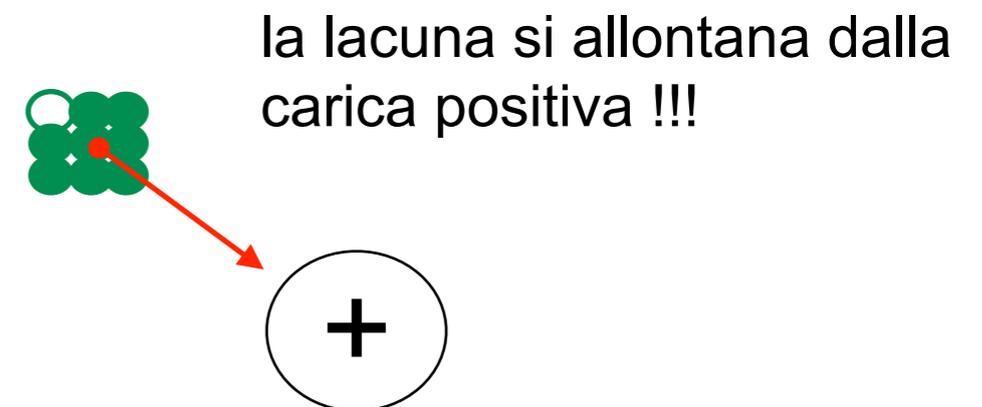
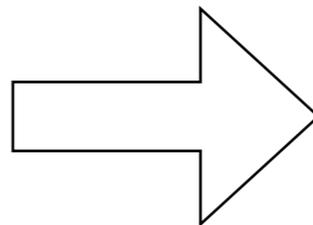
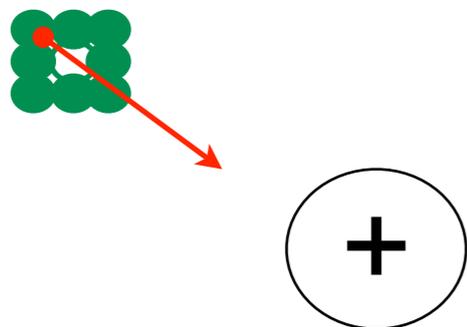
... dove, se *togliamo* energia la quantita' di moto *aumenta!!!*



Il mare di Dirac per gli elettroni

- Dirac: tutti i livelli ad energia negativa sono occupati;
- un elettrone ad energia negativa non può scendere in un livello già occupato: è stabile per il Principio di Esclusione di Pauli;
- un elettrone ad energia negativa, se assorbe energia, può salire in un livello ad energia positiva che sia vuoto, lasciando una “lacuna”;
- la “lacuna” si comporta come se avesse una carica positiva
- transizioni tra energia negativa e positiva: creazione di coppie, annichilazione $e^+ e^-$

mettiamo una carica
positiva nel mare di elettroni



- c'è una simmetria lacuna-elettrone che fa sì che abbiano la stessa massa
- a tutti gli effetti la lacuna è una “immagine rovesciata” dell' elettrone: è un “anti-elettrone”

lo stesso deve valere per i protoni...gli atomi...

Dirac (1929): ci sono stelle fatte di antimateria?

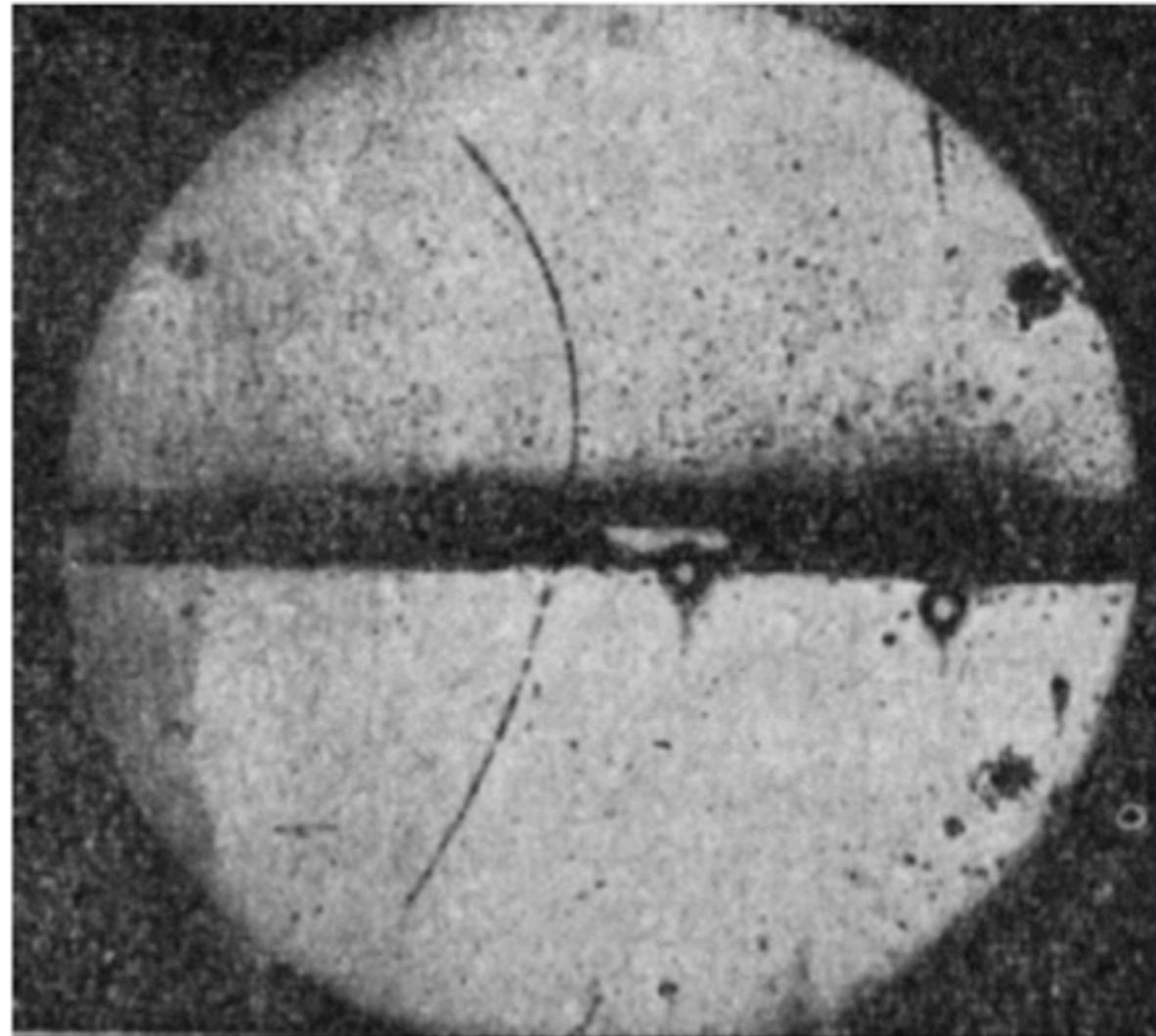


Figura 6.1: Foto di una camera a nebbia con una delle prime immagini di un positrone, C. D. Anderson, 1932. Il positrone si muove *dal basso verso l' alto*, come indicato dal fatto che la curvatura è inferiore nella parte alta della traiettoria, dovuto alla perdita di energia del positrone nell' attraversare la lastra di piombo, visibile in sezione a metà della camera. Da questa informazione si deduce che la carica della particella è *positiva*, mentre la massa è consistente con la massa di un elettrone.

Ma nell'Universo su grande scala?

If we accept the view of complete symmetry between positive and negative electric charge so far as concerns the fundamental laws of Nature, we must regard it rather as an accident that the Earth (and presumably the whole solar system), contains a preponderance of negative electrons and positive protons. It is quite possible that for some of the stars it is the other way about, these stars being built up mainly of positrons and negative protons. In fact, there may be half the stars of each kind. The two kinds of stars would both show exactly the same spectra, and there would be no way of distinguishing them by present astronomical methods. (P. A. M. Dirac, Nobel Lecture, 1933)

3. Il mare di Dirac? non esiste

In the mid '30s, the “Dirac sea” of filled, negative energy states was becoming a rather embarrassing object;

what we see as *vacuum* had to be a *plenum*, physically occupied by infinitely many electrons, protons, neutrons, neutrinos...

without any detectable property other than to give rise to holes, i.e. antiparticles...

.... and which is not there for bosons.

Majorana set up to eliminate this sort of “ether”;

Along the way, he made an unexpected discovery: the Majorana neutrino.

The Majorana article

TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

Il Nuovo Cimento, **14** (1937) 171.

Written the year before his tragic disappearance in a concise and elegant Italian, this article probably represents the best long-lasting contribution of Ettore Majorana to fundamental particle physics.

The article tackles the problem of formulating the Dirac theory without the cumbersome sea of negative energy states.

4. Antimateria

- Elettroni, protoni, neutroni, neutrini..sono i quanti di altrettanti campi che hanno sede nel vuoto.
- Per ogni particella che porta una carica conservata Q deve esistere un' **antiparticella** con uguale massa e spin e carica $-Q$
- antiprotone (E. Segrè e coll.), antineutrone (O. Piccioni e coll.).
- antineutrino = neutrino (Majorana) ? ancora non sappiamo.
- un sistema particella-antiparticella ha carica $Q_{\text{tot}}=Q+(-Q)=0$
- quindi si può trasformare in pura radiazione elettromagnetica o particelle neutre, o anche in particelle cariche, purchè sia $Q_{\text{tot}}=0$:

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma, \text{ etc.}$$

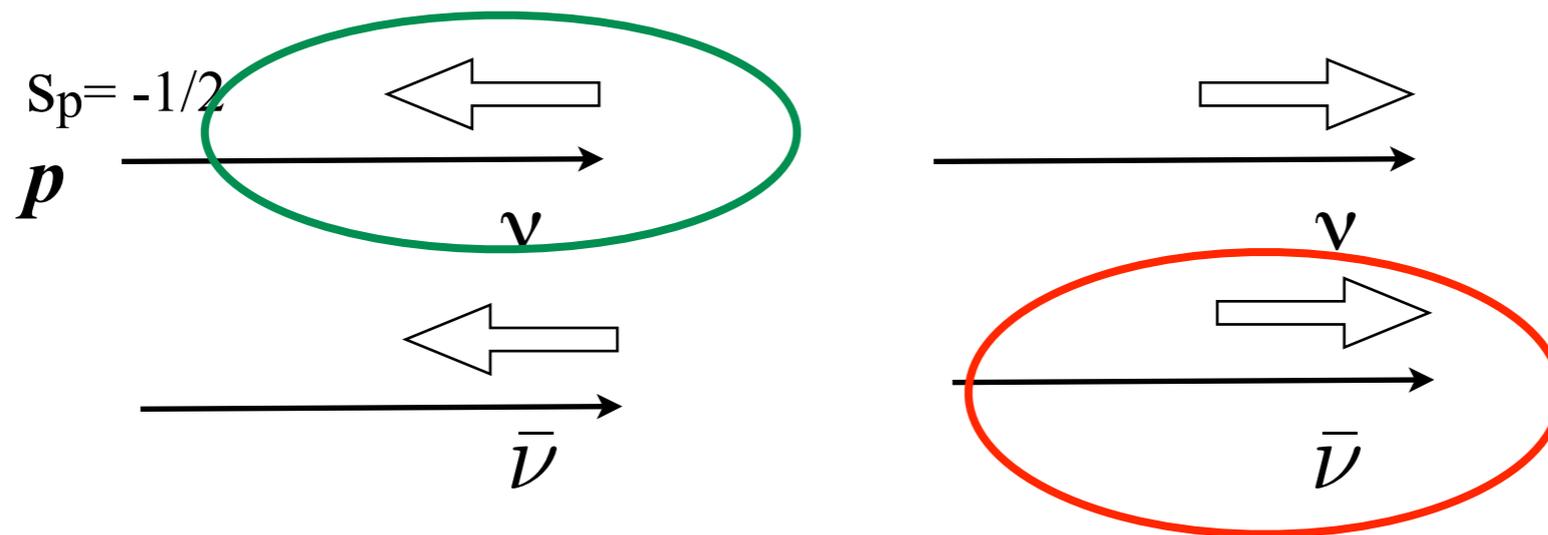
$$p + \bar{p} \rightarrow \pi^0 + \pi^0, \pi^+ + \pi^- + \pi^0, \text{ etc.}$$

- sulla Terra, una antiparticella si annichila rapidamente con la sua antiparticella (elettrone, protone, neutrone)
- *il nostro mondo è fatto di materia*
- *Ma fino a che punto materia e antimateria sono tra loro simmetriche?*

Decadimenti beta e spin del neutrino

La chiave sta nella proprietà degli stati quantistici di una particella che si chiama elicità

Elicita' = proiezione dello spin nella direzione del moto
per una particella di spin 1/2, ci sono 4 stati possibili:

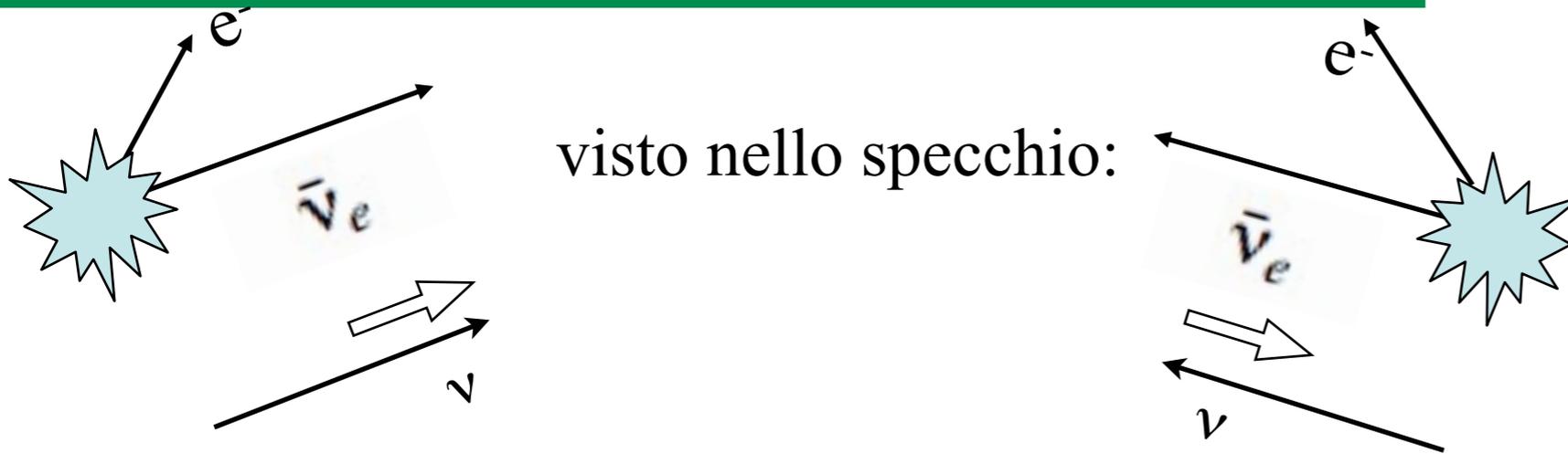


Esperimenti degli anni '50 hanno mostrato che le particelle neutre emesse nei due processi di Fermi hanno elicità' differente:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu} \quad \text{elicità' positiva}$$

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu \quad \text{elicità' negativa}$$

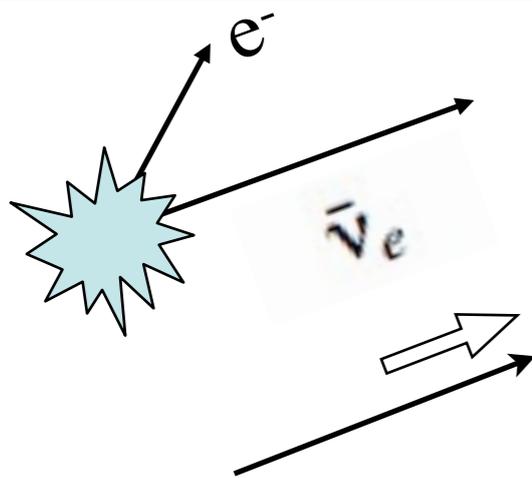
5. Simmetrie specchio: destra-sinistra?



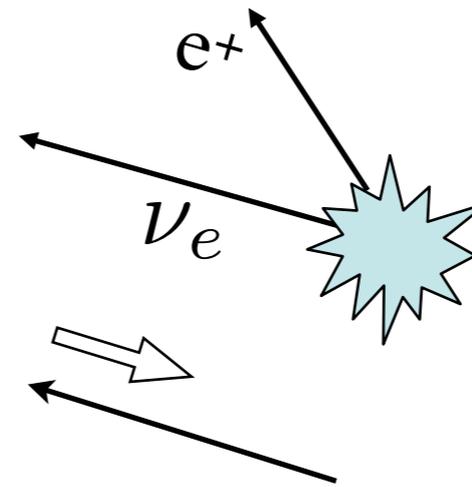
- nel mondo reale, la particella emessa insieme a e^- ha sempre elicità positiva !!!
- il decadimento beta riflesso nello specchio non è un decadimento possibile perché la particella neutra ha l'elicità sbagliata: la simmetria per riflessione è violata in modo massimo possibile
- ma diversi autori (Lee&Yang, Salam, Pontecorvo, Landau...) notarono subito che la situazione si poteva riparare, mettendo insieme due trasformazioni:
 - riflessione nello specchio
 - scambio particella-antiparticella
- questa simmetria si indica con $CP = (\text{Coniugazione di carica}) \times (\text{Parità})$

Simmetrie specchio: CP puo' funzionare ?

Alice through the Looking Glass



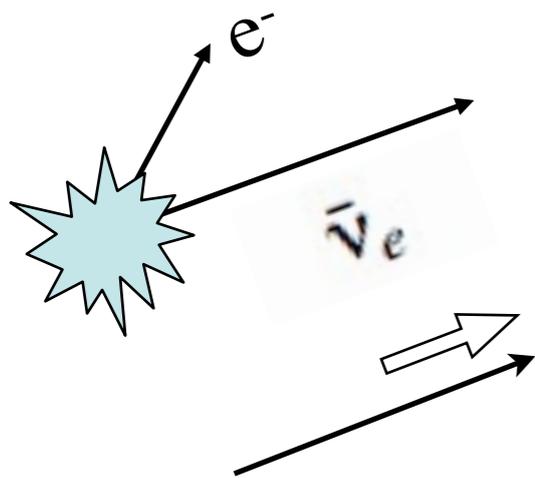
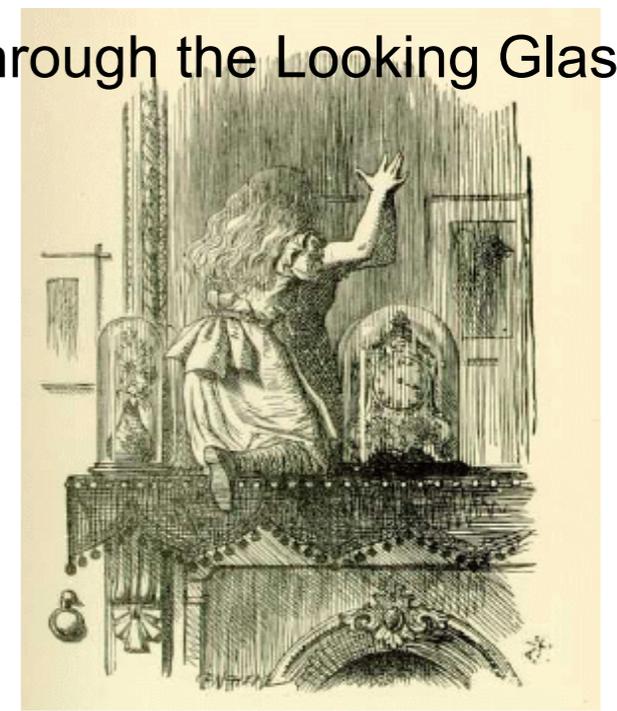
visto in uno specchio in cui cambiamo: destra-sinistra e particella-antiparticella



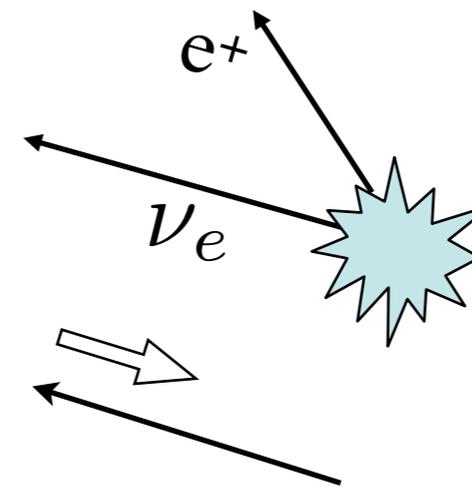
- adesso il processo nel nostro mondo e quello nello “specchio CP” sono entrambi possibili, la simmetria e' perfetta.
- La simmetria CP e' il candidato con cui rimpiazzare l'idea intuitiva che Dio non puo' essere mancino (W. Pauli)
- ... Ma la Natura non guarda i nostri pregiudizi: nel 1964, Fitch e Cronin scoprirono che nei decadimenti di certe particelle (mesoni K neutri) anche la simmetria CP e' violata !

Lo specchio CPT funziona!

Alice through the Looking Glass



visto in uno specchio in cui cambiamo:
destra-sinistra +
particella-antiparticella +
il verso del tempo ($t \rightarrow -t$)



- E' un Teorema della Meccanica Quantistica + Relativita' che lo specchio CPT deve funzionare sempre (Luders e Zumino, Pauli)
- La simmetria CPT e' il concetto con cui esprimere l'idea intuitiva che Dio non puo' essere mancino (W. Pauli)
- La simmetria fa alcune previsioni molto precise: le masse di particella e antiparticella sono esattamente uguali, i momenti magnetici sono opposti
- se sono particelle instabili, anche le loro vite medie sono uguali
- Gli esperimenti confermano (per ora) con precisione estrema

X	p	K^0	e	μ
$\frac{ m(X) - m(\bar{X}) }{m(X)}$	10^{-8}	10^{-18}	10^{-8}	
$\frac{ \mu(X) + \mu(\bar{X}) }{\mu(X)}$			10^{-12}	10^{-8}

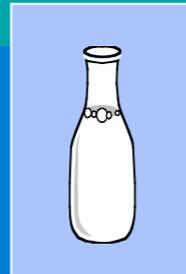
7. Cosa abbiamo imparato

What ALICE found in the looking glass



+

(



)Mirror

???

Not good

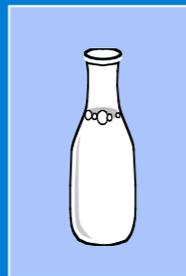
chemistry does not fit



)Mirror

+

(



)Mirror

???

Not good either

Parity Violation, 1956

For some time it was believed that:

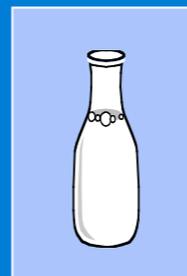


(Anti-

)Mirror

+

(Anti-



)Mirror

would work like in our world (CP symmetry, Salam, Landau...)

-
-
- Until it was discovered that K-mesons behave differently...

$K_L \longrightarrow$ (decay products) \neq (*anti*- decay products)_{Mirror}

(Cronin, Fitch et al. ,1964)

This may happen in two ways:

(i): $K_L \neq$ (*anti*- K_L)_{Mirror} parameter ϵ $|\epsilon| \approx 2 \cdot 10^{-3}$

(ii): $\longrightarrow \neq$ (*anti*- \longrightarrow)_{Mirror} parameter ϵ'

In (ii) the weak forces are responsible of asymmetry: direct CP violation
 ..this is what we see on Earth...and in the Galaxy:

But what about the Universe at large? Are there “antimatter islands” ?