

Simmetrie discrete in fisica

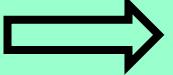
Seminari di Fisica

Dipartimento di Fisica
dell'Università' di Torino
27 gennaio 2015

Alessandro Bottino

Contenuto

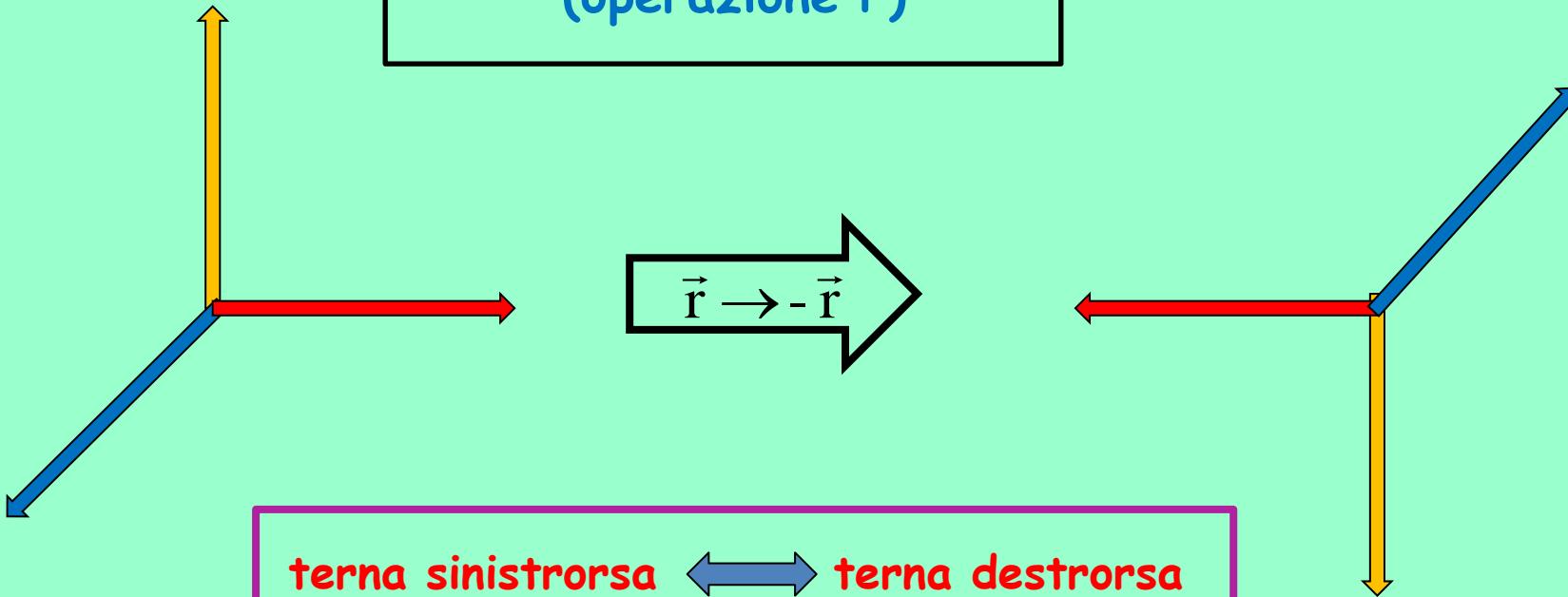
- Riflessione di spazio P , coniugazione di carica C , inversione di tempo T
- violazione di parità nell'interazione debole
- violazione di CP nel settore adronico
- violazioni di CP nella fisica del neutrino? - il neutrino è spinore di Dirac o di Majorana?
- violazione di CP nell'evoluzione dell'Universo (bariogenesi)

Invarianze della teoria  leggi di conservazione

trasformazioni continue nello spazio-tempo

- invarianza per **traslazioni spaziali**  conservazione del **momento**
- invarianza per **rotazioni**  conservazione del **momento angolare**
- invarianza per **traslazioni nel tempo**  conservazione dell'**energia**

Riflessione di spazio (operazione P)



- **vettori polari** (si trasformano come \vec{r}); per esempio il momento $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$
- **vettori assiali** (le loro componenti rimangono invariate); per esempio il momento angolare $\vec{l} \equiv \vec{r} \wedge \vec{p} \rightarrow \vec{l}$
- **scalari e pseudoscalari**

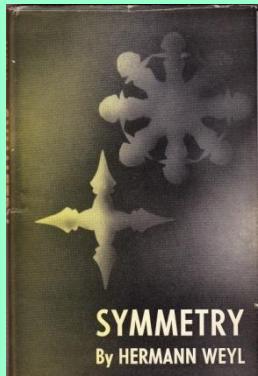
In meccanica quantistica:

- invarianza per P implica **conservazione di parità'**
- autostati di P sono rappresentati da funzioni d'onda **pari** o **dispari**
- stato di una particella di **momento angolare** ℓ ha parità' $(-1)^\ell$
- **parità' intrinseca**

Verifiche di conservazione di parità' in singole interazioni:

- **regole di selezione in decadimenti nucleari**
- misure di **valori medi di grandezze pseudoscalari** (asimmetrie in processi di decadimento)

Simmetria di spazio in natura e nell'arte



Hermann Weyl



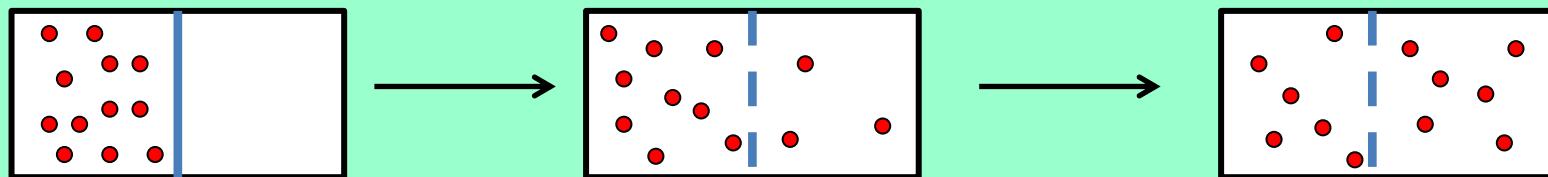
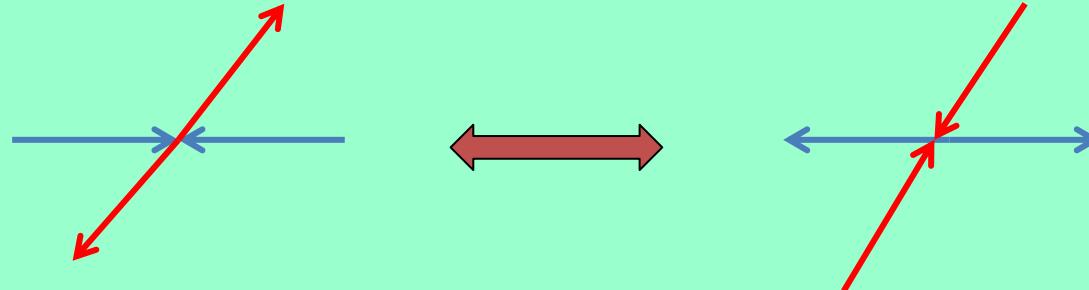
Inversione di tempo: $t \rightarrow -t$ (operazione T)

Implica: $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$, $\vec{l} \rightarrow -\vec{l}$, $\vec{s} \rightarrow -\vec{s}$

l'invarianza per T **non** implica conservazione di un numero quantico

l'operazione T implica scambio tra stato iniziale e stato finale

invarianza per T \longleftrightarrow reversibilità del processo



Sakurai: Invariance principles and elementary particles

Una **grandezza dispari** per **operazione T** è l'interazione di dipolo elettrico (per particelle di spin $\frac{1}{2}$) con un campo elettrico \vec{E}

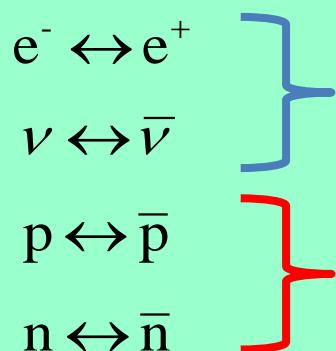
$$\vec{s} \cdot \vec{E} \xrightarrow{T} -\vec{s} \cdot \vec{E}$$

Esistono **limiti superiori molto forti** per i momenti di dipolo elettrico di elettrone, muone, neutrone, protone.

Coniugazione di carica (operazione C)

L'operazione C **cambia segno a tutti i numeri quantici additivi** di ogni particella: **carica elettrica, numero barionico, numero leptonico, stranezza,...**

Esempi:

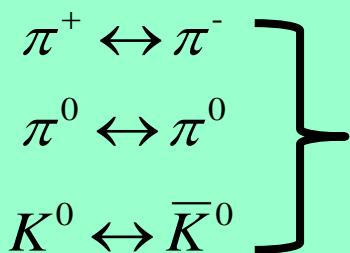


leptoni

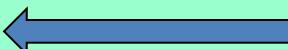
numero leptonico
cambia segno

barioni

numero barionico
cambia segno



mesoni

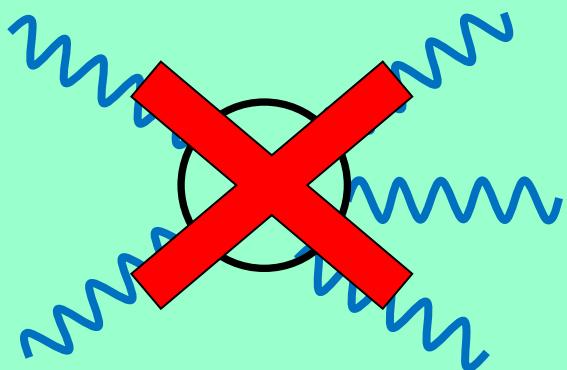


stranezza cambia segno

Nei processi dovuti ad interazioni invarianti per operazione C esistono regole di selezione.

Esempio: l'elettrodinamica è invariante per operazione C

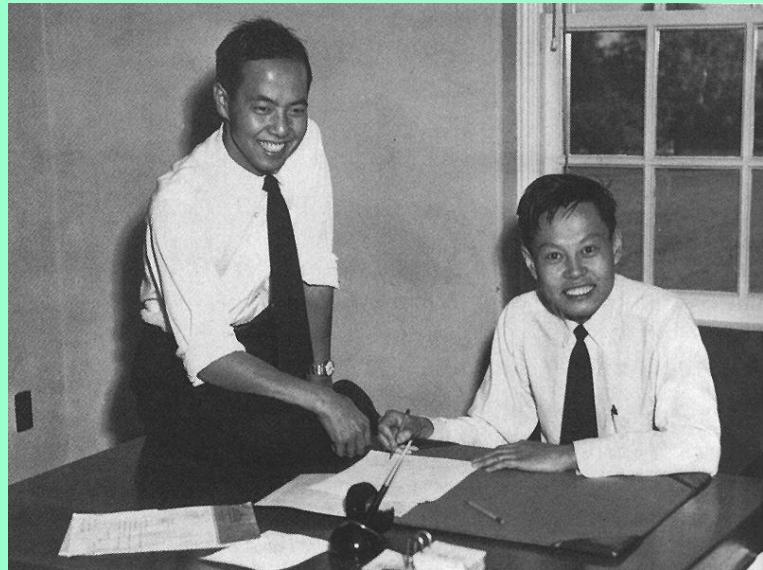
 non esistono processi con un numero dispari di
fotoni esterni - per esempio:



Gli anni 1956-1957:

T.D. Lee e C.N. Yang ipotizzano che l'interazione debole possa violare la parità e studiano quali processi possano analizzare queste proprietà

C.S. Wu e collaboratori realizzano sperimentalmente uno di questi processi e mostrano effetti di violazione di parità



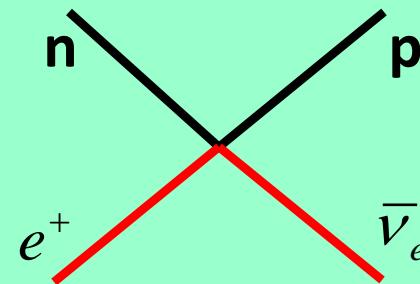
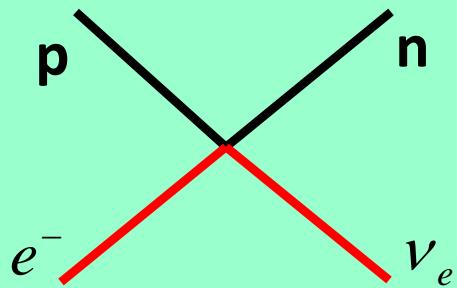
T.D. Lee C.N. Yang
Premi Nobel 1957



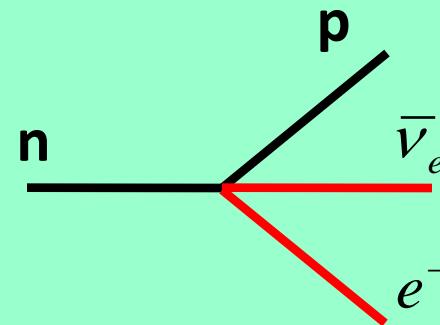
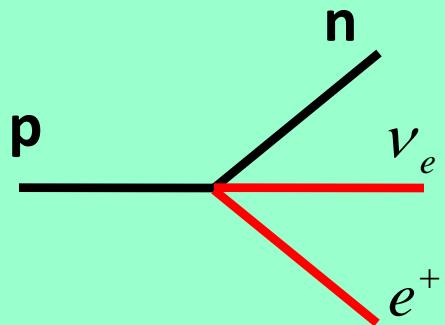
C.S. Wu

Processi deboli

scattering



decadimenti beta

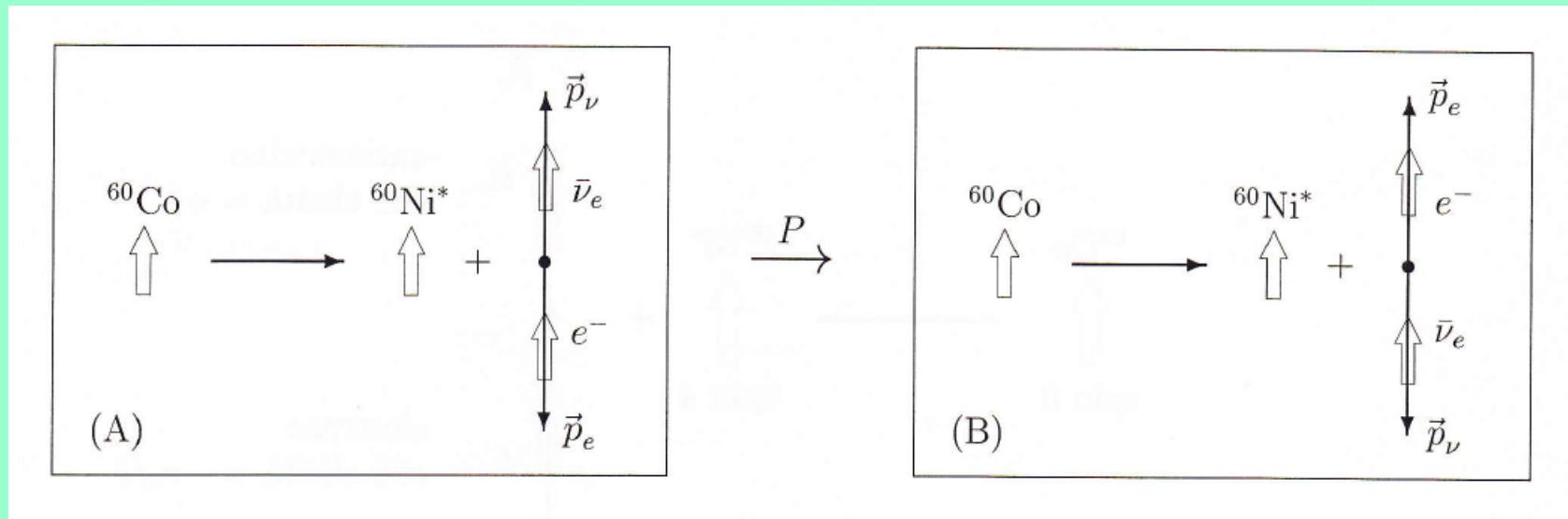


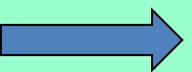
(solo per protoni entro nuclei)

Misura di **asimmetria nella distribuzione angolare dei prodotti del decadimento beta**

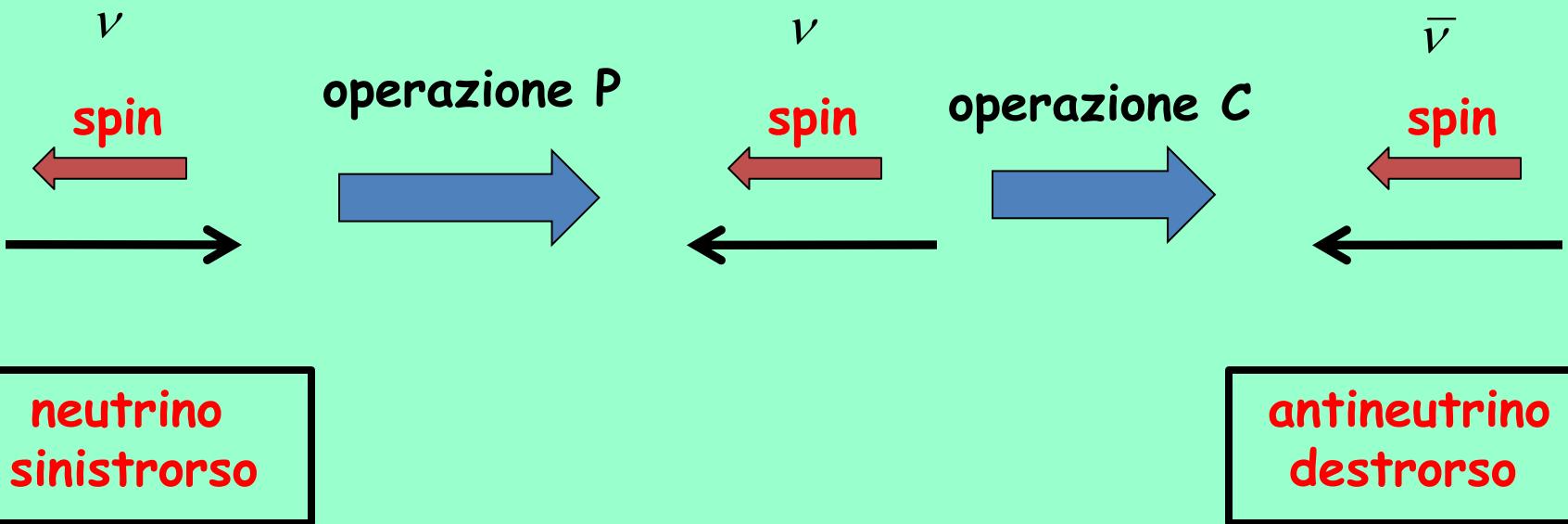


con nuclei polarizzati di Cobalto



il decadimento avviene secondo lo schema di sinistra non secondo
quello di destra  **violazione di parita' massima**

Elicita': proiezione dello spin lungo la direzione del moto



I mesoni K (pseudoscalari)

$$K^+, K^0 (S=+1) \leftrightarrow K^-, \bar{K}^0 (S=-1)$$

per coniugazione di carica: $C|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle, C|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$

per operazione CP: $CP|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle, CP|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle$

Se definiamo $|K_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}[|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle]$ e $|K_2\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}[|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle]$

si ha $CP|K_1\rangle = +|K_1\rangle, CP|K_2\rangle = -|K_2\rangle$

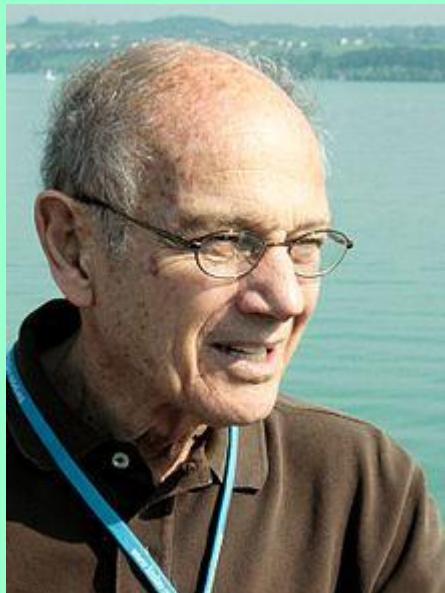
Se CP fosse conservata solo K_1 potrebbe decadere in 2 pioni:

$$K_1 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

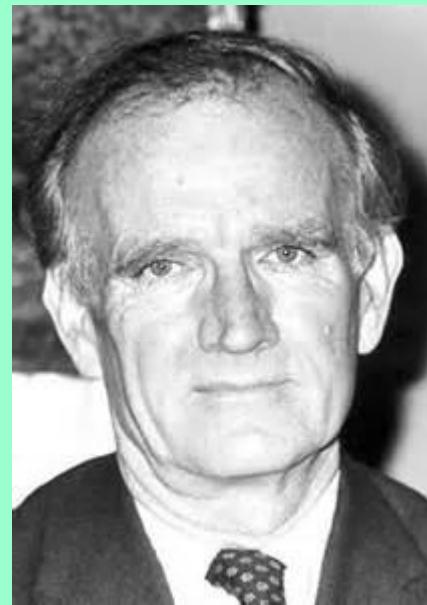
$$K_2 \not\rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

In effetti le vite medie di K_1 e di K_2 sono molto diverse; pero'

pero' ... venne trovato sperimentalmente che anche K_2 decade in 2 pioni e quindi in questi processi CP è violata (1964, J. Cronin e Val Fitch - premi Nobel per la Fisica nel 1980)



James Cronin



Val Fitch

Sotto condizioni molto generali si dimostra in teoria dei campi che esiste invarianza per l'operazione congiunta CPT

Questa invarianza viene **realizzata in modo diverso nelle varie interazioni** - implica che, se una delle 3 simmetrie e' violata, vi è anche violazione di almeno un'altra simmetria.

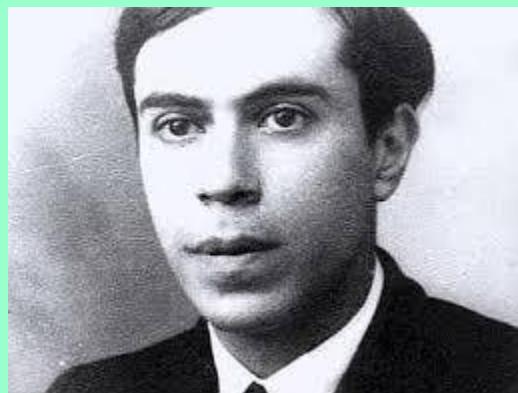
conservazioni e violazioni

	C	P	T	CPT
inter. forte	sì	sì	sì	sì
inter. el. magn.	sì	sì	sì	sì
inter. debole	no	no	sì	sì
$K^0 - \bar{K}^0$	no	no	no	sì

L'invarianza per CPT implica anche che particella e sua antiparticella abbiano la stessa massa

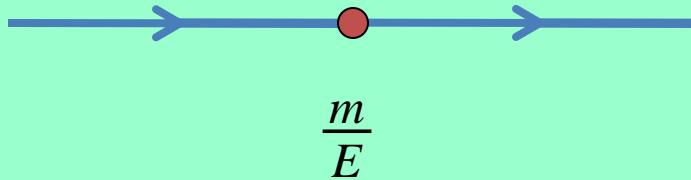
Torniamo a parlare di neutrino....

Neutrino di Majorana (1937)



Neutrino di Majorana (autoconiugato di carica) ?

Il neutrino ν puo' andare in antineutrino $\bar{\nu}$



tramite un termine di massa nella funzione **Lagrangiana**

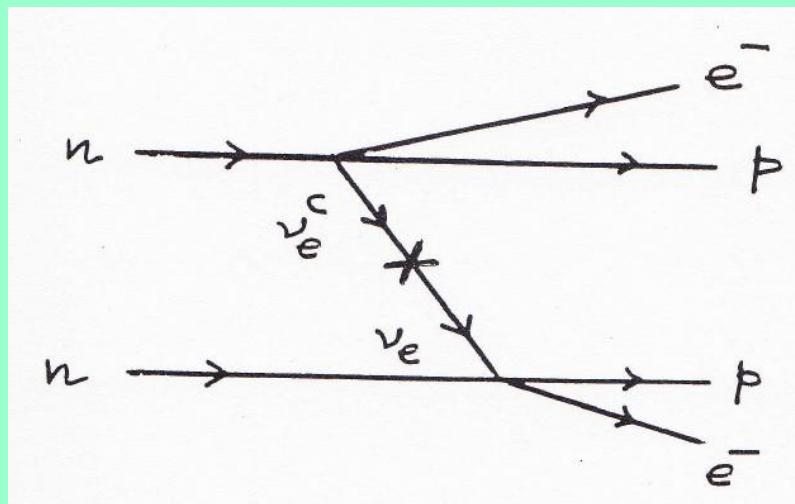
$$L = m \bar{\psi} \psi$$

L'ampiezza di probabilita' è proporzionale a $\frac{m}{E}$

(E = energia caratteristica del processo)

Dal momento che $\frac{m}{E} \ll 1$, la probabilità di trasformazione neutrino - antineutrino è molto piccola

Il processo può essere studiato come evento raro nei nuclei
(decadimento doppio beta senza neutrini)

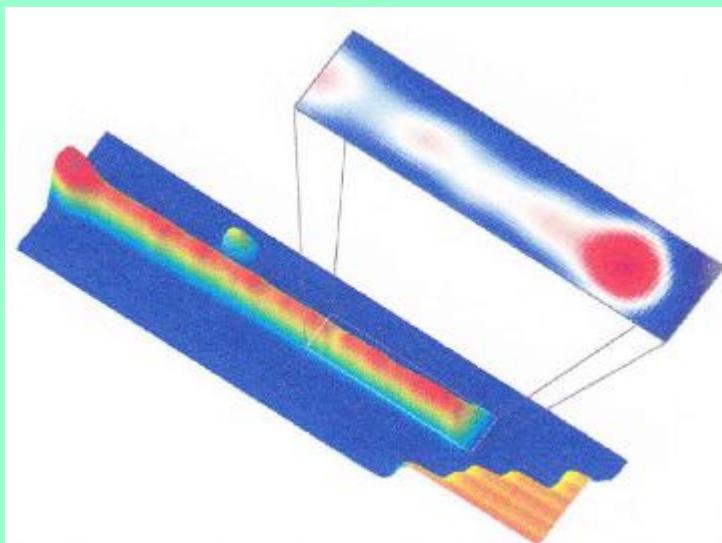


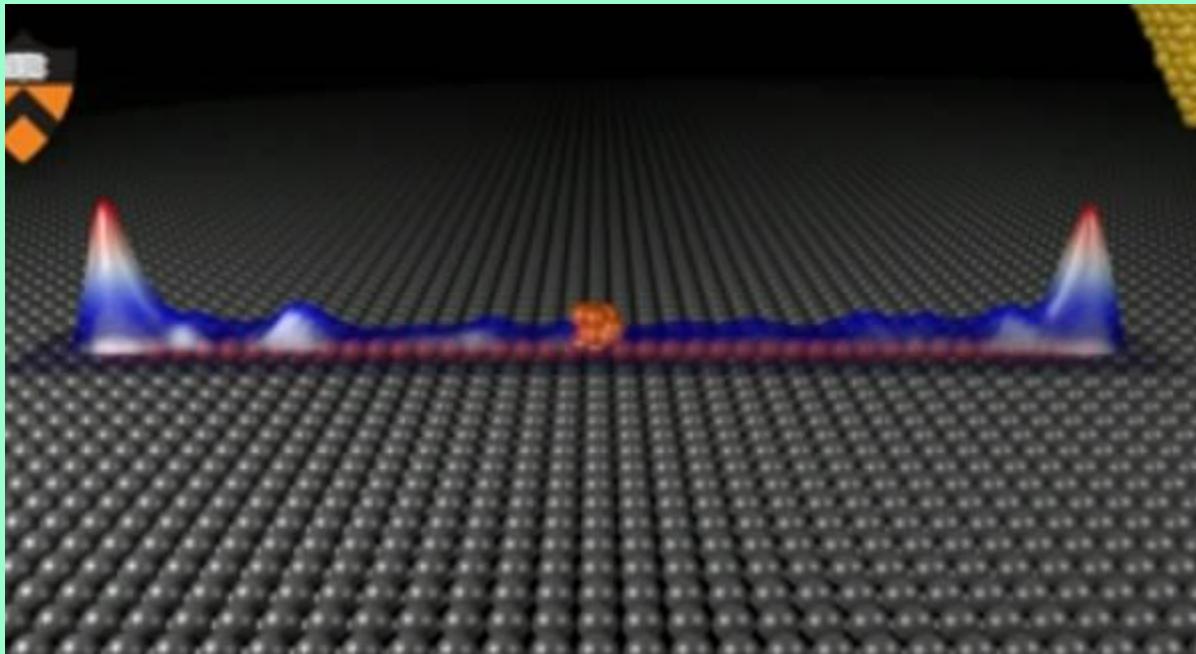
Esperimento di Ali Yazdani et al. (Science, October 2, 2014)
<http://arxiv.org/abs/1410.0682>

Su di una superficie di cristallo di piombo viene depositata una struttura lineare di ferro di dimensioni trasversali dell'ordine dell'atomo

Nel filo superconduttore si possono formare delle quasi-particelle di Majorana che vanno a collocarsi alle due estremità del filo

La presenza di queste particelle viene osservata con un microscopio di alta sensibilità





Attenzione a possibili spiegazioni alternative (rispetto a segnale di particella di Majorana) per le osservazioni di Ali Yazdani et al.

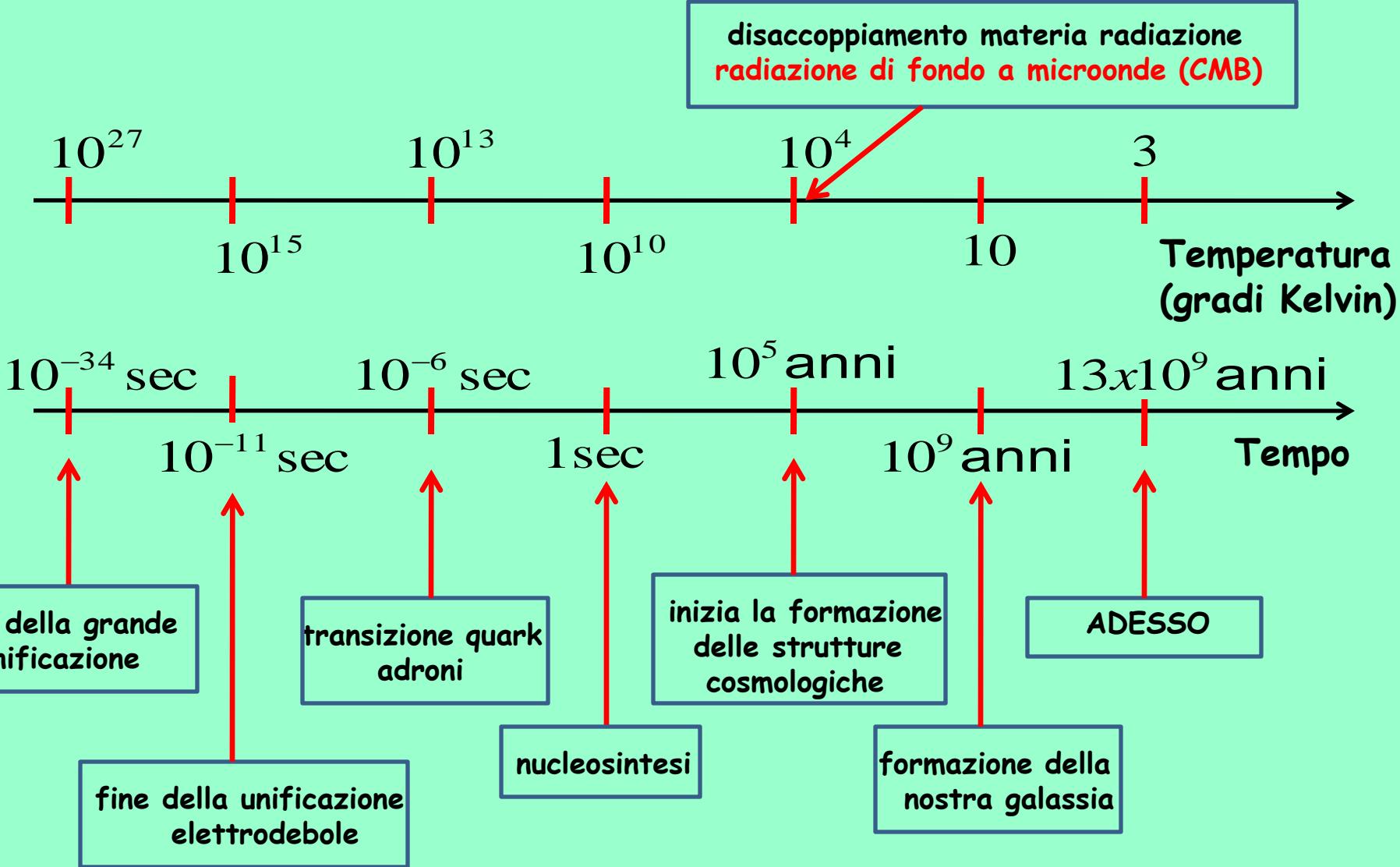
Come può evolvere un Universo inizialmente caratterizzato da uguali quantità di materia e di antimateria in un Universo (quello attuale) dominato dalla materia?

La soluzione proposta da Andrei Sakharov (1967) prevede violazioni di C e di CP che sbilanciano leggermente la quantità di materia rispetto a quella di antimateria:

$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q} \cong 3 \times 10^{-8}$$



BIG BANG



Conclusioni

- lo studio delle simmetrie discrete ha un ruolo cruciale in fisica
- la scoperta della violazione di parità nell'interazione debole e della violazione di CP nel settore adronico ha avuto un impatto enorme nell'evoluzione della fisica delle particelle
- violazioni di CP nella fisica del neutrino? - il neutrino è spinore di Dirac o di Majorana?
- Ruolo della violazione di CP nell'evoluzione dell'Universo: bariogenesi