

L'esperimento di M.me Wu (1956)

Graziano Venanzoni
LNF-INFN

INCONTRI DI FISICA 2012
INFN - LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI
12 Ottobre 2012



Wolfgang Pauli (1900 - 1958) und Chien-Shiung Wu (1913 - 1997)

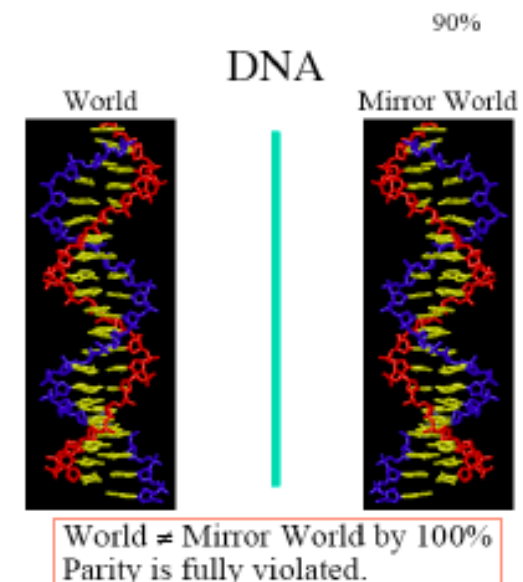
In che modo si puo' osservare la violazione dell'invarianza di parita' in un processo (o un decadimento)?

-Si puo' usare la seguente idea generale:

se una simmetria e` anche invarianza, uno **stato/sistema** inizialmente **simmetrico** (ossia che "non cambia" per quella trasformazione) rimane **simmetrico** nel tempo (diremo, usando il linguaggio dei fisici, che "la parita' si conserva").

Un modo alternativo di dirlo e' che non e' possibile distinguere quello che accade nel mondo reale con il processo allo specchio (naturalmente **non** tutti i sistemi sono invarianti per riflessione).

Ma attenzione, qui stiamo parlando di invarianza nell'**evoluzione** (dinamica) del processo



Un esempio fiisco di invarianza: un **masso** che cade e' invariante per riflessioni rispetto ad un piano verticale (ma non orizzontale).

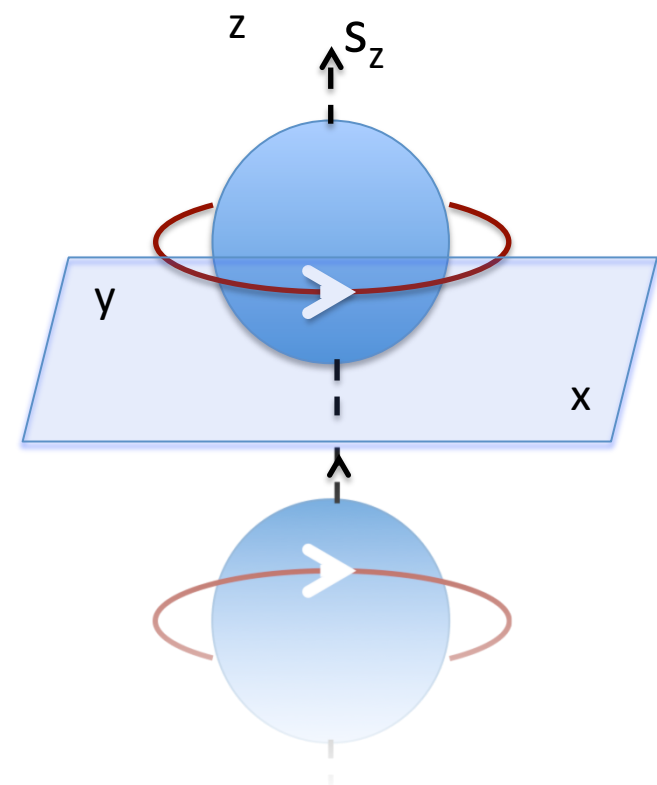
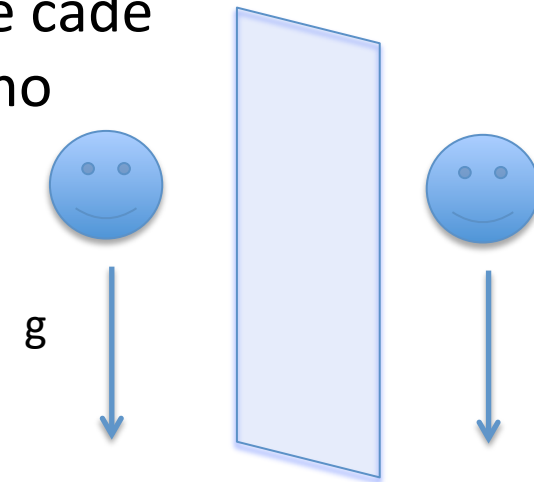
Analogamente un **nucleo** posto all'origine degli assi con spin **s** (momento angolare intrinseco) diretto lungo z e' simmetrico per **parita'** (=riflessione rispetto al piano (x,y))
 Infatti per parita' (coordinate e impulso):

$$x'=x, y'=y, z'=-z; p'_x=p_x, p'_y=p_y, p'_z=-p_z$$

spin:

$$s'_x=-s_x, s'_y=-s_y, s'_z=s_z$$

e la direzione di rotazione (dello spin) non cambia (punta sempre verso l'alto)



Quindi, volendo provare la violazione di parita' per la forza debole:

- 1) Scelta** di un processo (o decadimento) nella cui evoluzione entri in modo determinante un'interazione **debole**;
- 2) Costruzione** di uno stato iniziale **simmetrico** per **parita'**;
- 3) Evoluzione** del sistema e verifica se lo stato finale e' **simmetrico** per **parita'**.

Detto in altre parole: l'esperimento non dovra' mostrare nessuna differenza osservandolo allo specchio.

Vediamo ora come **M.me Wu** (nel 1956) strutturo' il suo esperimento rispetto ai passi di cui sopra:



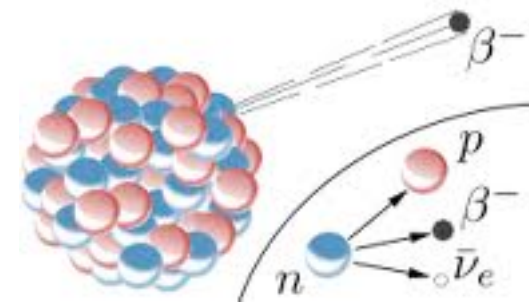
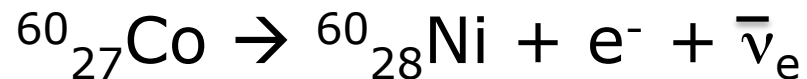
1) scelta di un processo (o decadimento) nella cui evoluzione entri in modo determinante un'interazione debole

La scelta ricade sul decadimento β del nucleo del ^{60}Co .

Il decadimento β descrive il processo di decadimento di cui e' responsabile la forza debole $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$.

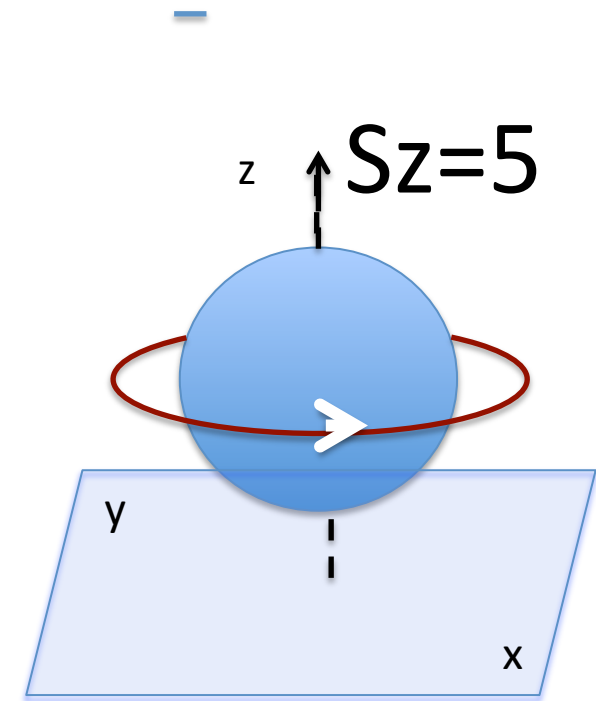
Un neutrone del nucleo del ^{60}Co ($Z=27$) si trasforma in un protone emettendo simultaneamente un elettrone (e) e un anti-neutrino ($\bar{\nu}_e$). Il nucleo cosi' trasformato e' diventato ^{60}Ni con un numero di protoni $Z=28$.

La reazione procede quindi in:



2) Costruzione di uno stato iniziale simmetrico per parita'

Il nucleo di ^{60}Co ha spin $S=5$. Senza addentrarci troppo nella M.Q. possiamo pensare al nucleo del ^{60}Co come una trottola che gira su se stessa e allo spin come un vettore diretto lungo l'asse di rotazione, con verso che segue la regola della mano destra. Se allineamo lo spin del ^{60}Co lungo l'asse z avremo uno stato simmetrico per riflessione spaziale (rispetto al piano x,y). Naturalmente nell'esperimento avremo piu' atomi e quindi dovremmo orientarli tutti e fare in modo che siano fermi nel piano di simmetria.

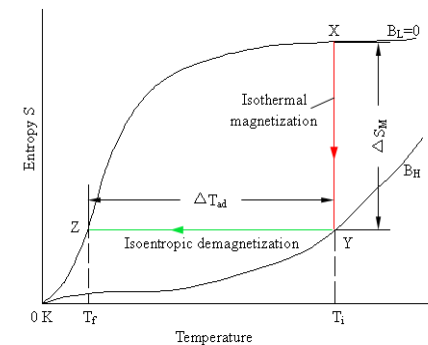
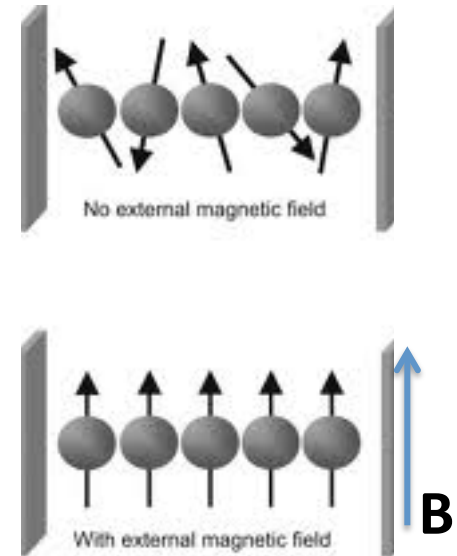


Come fece M.me Wu ad allinearare gli spin del ^{60}Co ?

Usando un campo magnetico (B). Infatti e' noto che in presenza di B, lo spin tende ad allinearsi lungo la direzione del campo stesso.

Ora pero' sorge una prima difficoltà sperimentale: per poter allineare gli spin dei nuclei occorre B estremamente alto ($\sim 10^6$ gauss), che non si puo' produrre in laboratorio (attraverso bobine o altro). In aggiunta, a temperatura ambiente l'agitazione termica ne distrugge la polarizzazione. *Allora come fare?*

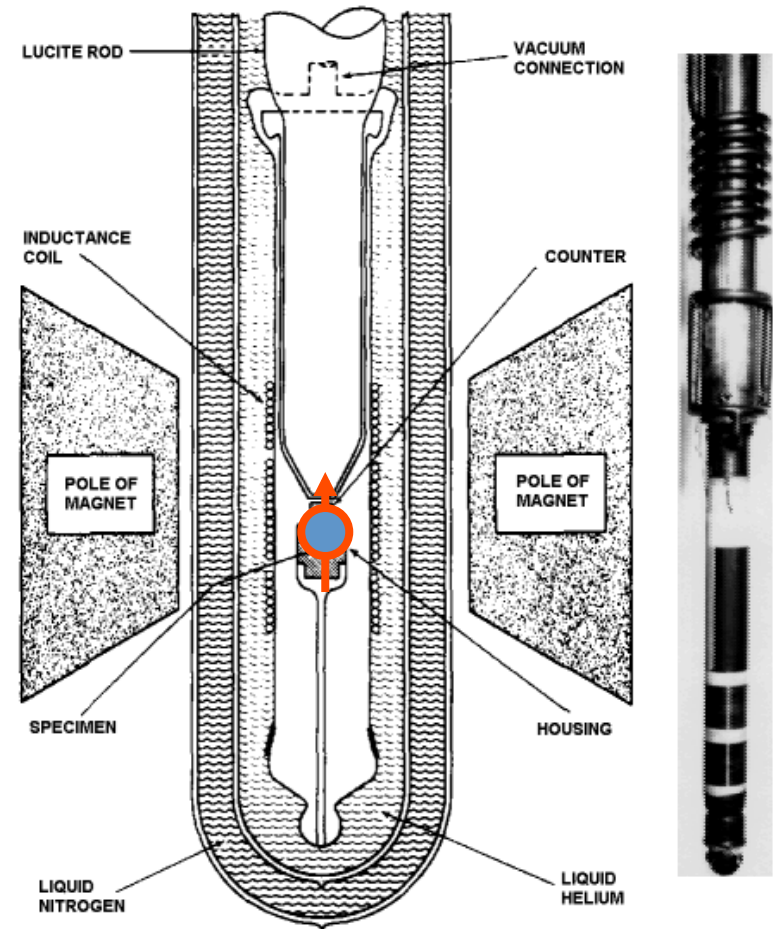
M.Me Wu sfrutto' il cosiddetto metodo della “**Demagnetizzazione Adiabatica**”, basata sul fatto che certi atomi (di un sale paramagnetico) posti in campo magnetico B e isolati, cedono calore (e quindi si raffreddano) fino a $T \sim 0.01$ °K al diminuire di B



Dopodichè, applicando un campo magnetico esterno, questi stessi atomi producono un forte campo magnetico locale che polarizza i nuclei del ^{60}Co posti a contatto con essi.

Quindi una pellicola fine di ^{60}Co veniva distesa su un cristallo "raffreddato" di nitrato di cerio e magnesio (CMN) e immerso in un campo magnetico esterno.

Per preservare più a lungo la polarizzazione occorre mettere il cristallo in un contenitore a forma di bottiglia (in cui veniva fatto il vuoto) e isolarlo termicamente.

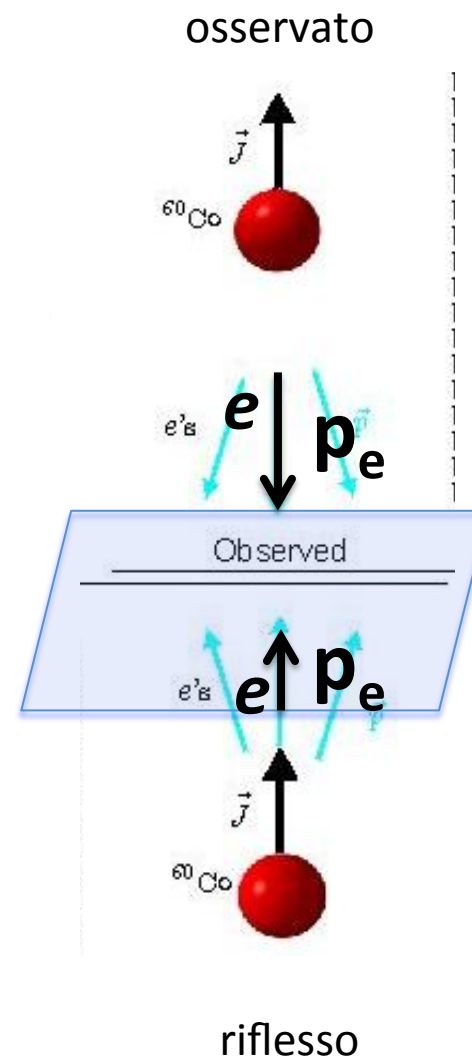


3) Evoluzione del sistema e verifica se lo stato finale e' simmetrico per parita'

Se lo stato finale prodotto nel decadimento β ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$ e' simmetrico per parita' significa (per esempio) che tanti elettroni vengono emessi in alto quanti in basso (la riflessione inverte la direzione degli impulsi).

Viceversa un valore **diverso da zero** dell'asimmetria Up-Down indica una chiara violazione della parita', ossia che il processo osservato e quello riflesso non avvengono identicamente in natura.

Naturalmente bisogna essere sicuri che il ${}^{60}\text{Co}$ rimanga polarizzato durante il tempo di misura.



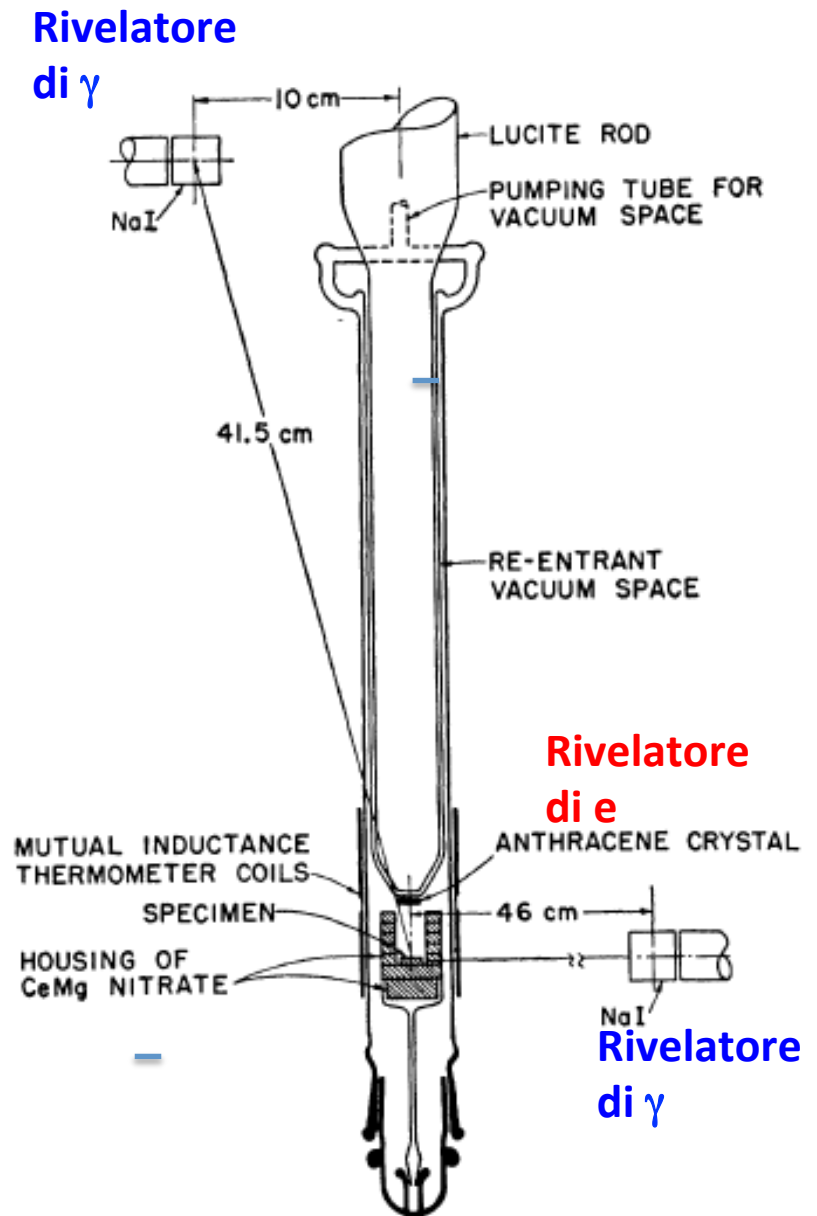
Tutto questo rendeva l'esperimento particolarmente complicato (per il 1956!).

- Il rivelatore di elettroni doveva essere posto all'interno del criostato (altrimenti gli elettroni sarebbero stati assorbiti dalle sue pareti).
- Il segnale prodotto (luce di scintillazione) doveva essere trasportato fuori ai fotomoltiplicatori (che non lavorano a temperature criogeniche) attraverso una guida di luce (in lucite).
- La sorgente di ^{60}Co doveva essere molto sottile per non assorbire gli elettroni emessi e polarizzata per un lungo periodo per avere un numero sufficiente di conteggi.



In soli 6 mesi ' M.me Wu e la sua equipe prepararono l'esperimento:

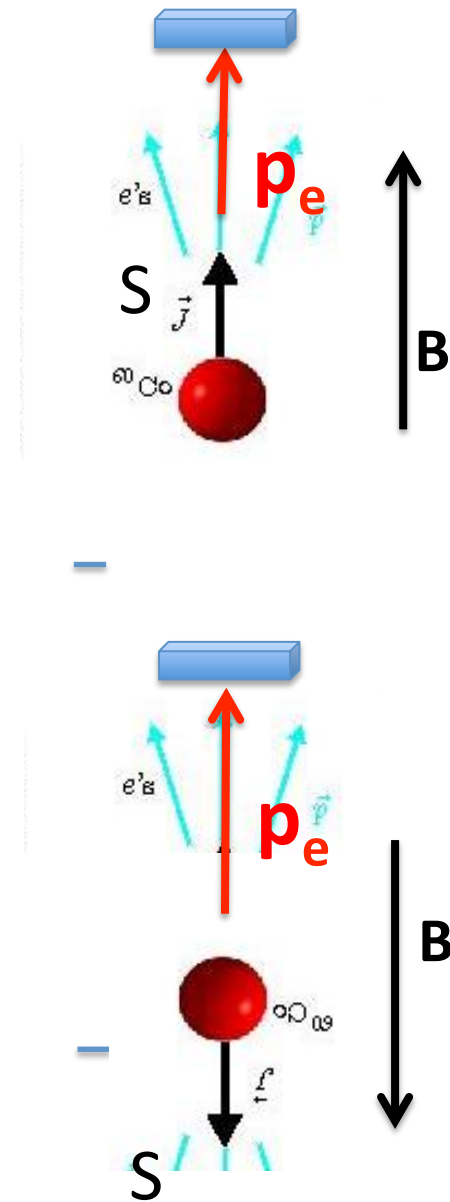
- Lo strato sottile di ^{60}Co (0.05 mm) era alloggiato su una "sedia" di CMN.
- La polarizzazione veniva misurata dall'anisotropia dei raggi γ emessi nel decadimento del ^{60}Co . Per questo vennero installati due rivelatori a scintillazione (NaI) posti l'uno nel piano equatoriale e l'altro sulla parte superiore del criostato.
- Gli elettroni venivano rivelati in un piccolo cristallo di antracene di 1cm di diametro e 1.5 di spessore posto 2cm sopra la sorgente



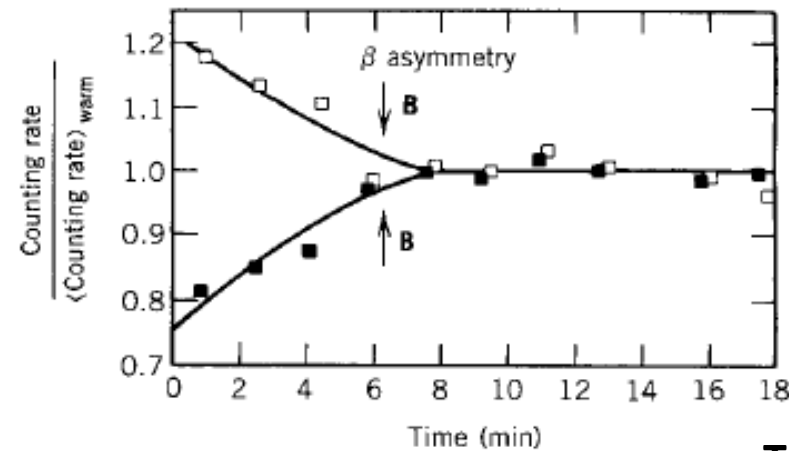
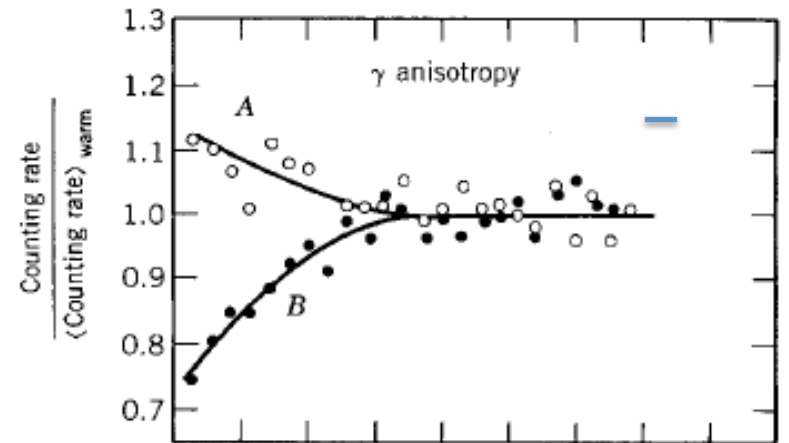
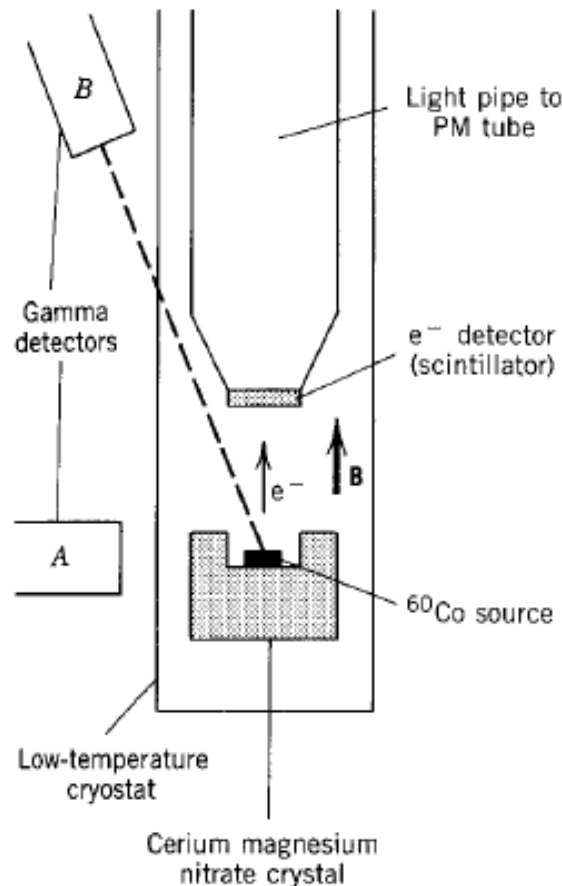
Invece di duplicare il rivelatore di elettroni (sopra e sotto la sorgente), si utilizzava una solo rivelatore (sopra la sorgente) e veniva invertita la direzione del campo magnetico. In questo modo lo spin del ^{60}Co veniva invertito e venivano contati gli elettroni emessi parallelamente o anti parallelamente alla direzione dello spin (= direzione di B).

Naturalmente questo e' del tutto equivalente alla riflessione spaziale (basta ruotare la figura con con campo magnetico diretto verso il basso di 180°)

Quale fu il risultato?



M.Me Wu trovo' (Dicembre '56) una chiara asimmetria nel conteggio di e^- (piu' elettroni venivano emessi in direzione opposta allo spin del nucleo), fortemente correlata al grado di polarizzazione della sorgente ^{60}Co (misurato dalla anisotropia dei conteggi γ)



Tempo (min)

Col passare del tempo la sorgente si riscalda e la polarizzazione scompare

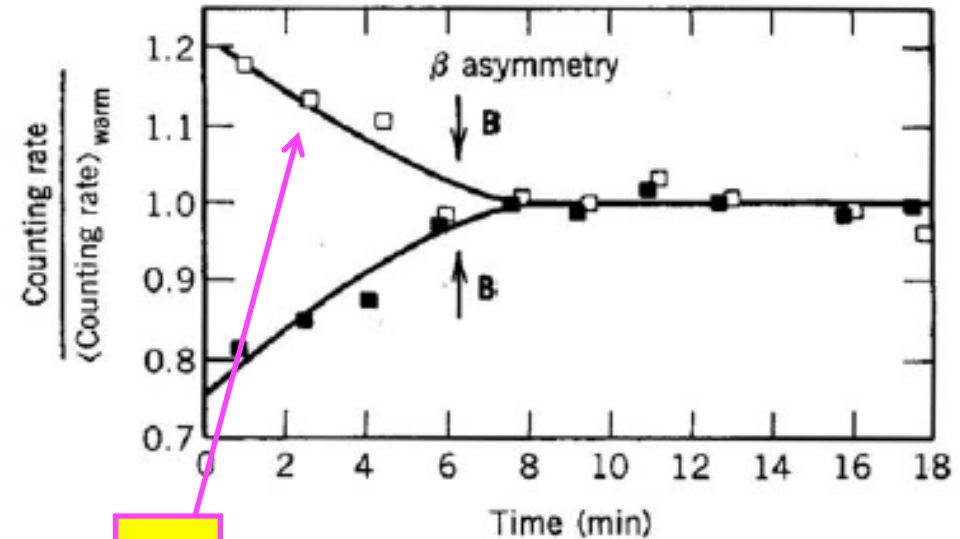
Naturalmente bisognava essere **sicuri** che si trattasse di un effetto “genuino” di **violazione di parita'** e quindi vennero fatti numerosi controlli:

- Si verifico' che il rivelatore di **e** era indipendente dalla temperatura e da effetti di campo magnetico;
- che gli **e** di “Back-scattering” dal CMT erano trascurabili;
- che la asimmetria di conteggio non era dovuta ad anisotropie del campo magnetico del CMT o al residuo campo di demagnetizzazione (per esempio misero il ^{60}Co sotto un cristallo di CMT e non videro nessuna asimmetria, invertirono la direzione del campo di demagnetizzazione, ecc...).

Insomma...questo esperimento per quanto svolto 50 anni fa aveva in se tutte le caratteristiche di un esperimento moderno di fisica delle particelle elementari: analisi dei dati, riproducibilita' del risultato, controllo degli effetti sistematici

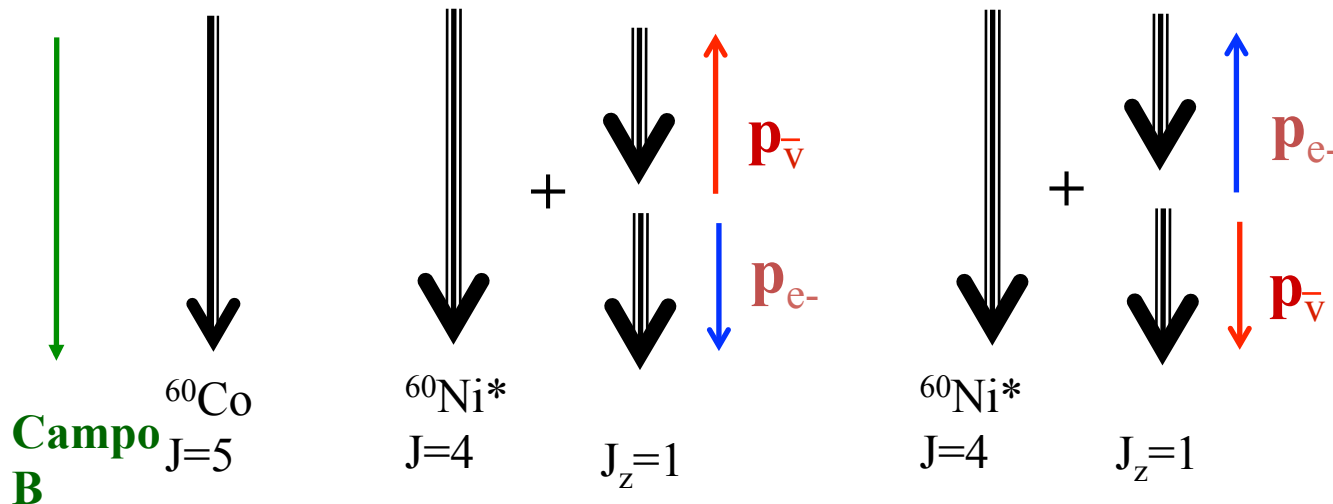
Cosa implicava che gli elettroni venissero emessi preferibilmente in direzione opposta allo spin del ^{60}Co ?

Che nell'interazione debole intervengono "preferibilmente":
elettroni con elicità **negativa**
 (spin e momento in versi opposti)
 e **antineutrini** con elicità **positiva**
 (spin e momento con lo stesso verso)



NO

SI



Successivamente è stato verificato che i neutrini hanno **solo** elicità negativa, mentre gli antineutrini **solo** positiva

Naturalmente il risultato di M.me Wu fu un colpo molto duro per la comunità scientifica. Esso aveva mostrato che esiste una classe di processi (governati dalla forza debole) per cui la parità è **massimamente violata** ed è possibile definire univocamente la sinistra rispetto alla destra (Come?). Subito dopo il risultato di Wu (come spesso capita) la violazione di parità fu confermata in altri 2 esperimenti (L. Lederman e V. Telegdi).

Venti anni dopo la formulazione di Fermi, la violazione della parità rappresentò il primo passo degno di nota nella comprensione della forza debole. Ci sarebbero voluti altri venti anni per includere questa forza in una descrizione unificata delle interazioni fondamentali: il Modello Standard.

Alcune reazioni all'esperimento di M.me Wu

- Lettera di Pauli a Weisskopf:
“ Ora passato il primo shock, comincio a rimettermi insieme [...]. Si, e' stato molto drammatico [...] Quel che mi da fastidio non e' il fatto che “Dio sia solo mancino”, ma che, nonostante questo, quando si esprime con maggior vigore si mostri con una simmetria destra-sinistra...Come puo' l'intensita' di un' interazione produrre e creare gruppi di simmetria, invarianze o leggi di conservazione?...Molte domande nessuna risposta!”
- Oppenheimer a Yang (dopo essere stato informato del risultato dell'esperimento di M.me Wu):
“Varcata la soglia”
- I. I. Rabi: “[...] una struttura teorica abbastanza completa e' stata distrutta alla base e non sappiamo con certezza come ne saranno ricomposti i pezzi”.
- Nell'autunno del 1957 Lee e Yang ricevono il premio Nobel

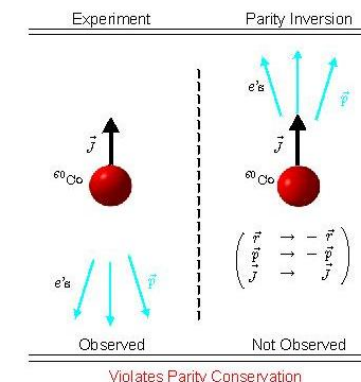
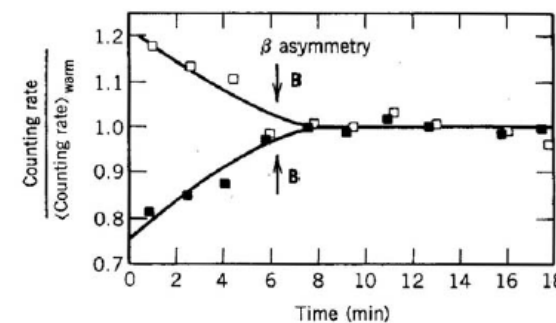
...ed alcuni effetti sociologici...

- **Valentine Telegdi** (il responsabile di uno degli altri due esperimenti che osservò la violazione di parità) si dimise dall'American Physics Society dopo che il suo articolo fu respinto e quindi pubblicato un paio di settimane dopo gli altri due;
- **Martin Block**, compagno di stanza di **Richard Feynman** alla conferenza di Rochester del 1956, che ipotizzò per primo che la parità non si conservasse (Feynman dopo avergli dato dello "stupido" privatamente, fece esplicitamente questa domanda alla fine dell'intervento di Yang, ricavandone una risposta confusa), ritenne di essere l'artefice (non riconosciuto) dell'intero processo;
- Il rapporto tra Lee e Yang non seppe resistere alla loro crescente fama: nel 1962 essi conclusero formalmente la loro collaborazione e da quel momento cercarono di evitarsi l'un l'altro.

Purtroppo la scoperta di M.me Wu non fu premiata con il premio Nobel.

Così come per altri casi (vedi premio Nobel mancato di Cabibbo di qualche anno fa), la comunità scientifica ritiene che questa sia stata un'ingiustizia e che anche lei avrebbe meritato questo massimo riconoscimento!

Nonostante questo, la sua fama legata principalmente a questo primo esperimento, la fa ricordare come una delle figure di maggior rilievo del panorama della fisica sperimentale del secolo scorso.



Riserva