

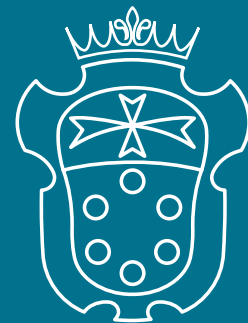
Dalla violazione di P ai neutrini di Weyl

$\tau - \theta$ puzzle, esperimenti di Wu e di GLW, nascita della teoria debole

Martino Barbieri

Introductory Experimental High Energy Physics
Presentazione di fine corso

Scuola Normale Superiore
a.a. 2023-2024



SCUOLA
NORMALE
SUPERIORE

1. Ambientazione: il $\tau - \theta$ puzzle
2. Parte prima: l'esperimento di Wu
3. Parte seconda: l'esperimento di GLW
4. Conclusione: la violazione di P

- 1. Ambientazione: il $\tau - \theta$ puzzle**
2. Parte prima: l'esperimento di Wu
3. Parte seconda: l'esperimento di GLW
4. Conclusione: la violazione di P

Anni '50

- Conservazione di P è un dato di fatto:
 - \Rightarrow verificata sperimentalmente per l'**interazione elettromagnetica**;
 - \Rightarrow verificata sperimentalmente per l'**interazione forte**.

Anni '50

- Conservazione di P è un dato di fatto:
 - \Rightarrow verificata sperimentalmente per l'**interazione elettromagnetica**;
 - \Rightarrow verificata sperimentalmente per l'**interazione forte**.
- Vengono scoperti due mesoni carichi:

$$\begin{aligned}\theta^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 \\ \tau^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \end{aligned} \quad [\eta_{\pi^i} = -1].$$

Anni '50

- Conservazione di P è un dato di fatto:
 - \Rightarrow verificata sperimentalmente per l'**interazione elettromagnetica**;
 - \Rightarrow verificata sperimentalmente per l'**interazione forte**.
- Vengono scoperti due mesoni carichi:

$$\begin{aligned}\theta^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 \\ \tau^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad [\eta_{\pi^i} = -1].\end{aligned}$$

- Non si misura una differenza tra la massa e il tempo di vita di τ^+ e θ^+ .

Anni '50

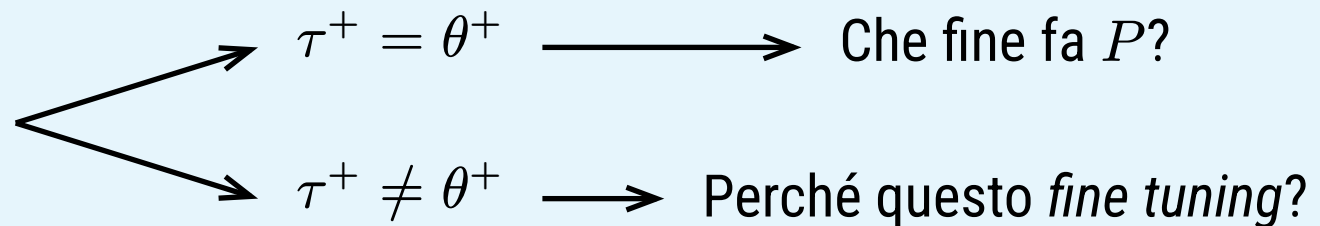
- Conservazione di P è un dato di fatto:
 - \Rightarrow verificata sperimentalmente per l'**interazione elettromagnetica**;
 - \Rightarrow verificata sperimentalmente per l'**interazione forte**.
- Vengono scoperti due mesoni carichi:

$$\begin{aligned} \theta^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^0 \\ \tau^+ &\rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \end{aligned} \quad [\eta_{\pi^i} = -1].$$

- Non si misura una differenza tra la massa e il tempo di vita di τ^+ e θ^+ .

$\tau - \theta$ puzzle

Due possibilità:



La review di Lee e Yang (1)

Come misurare se P violata da interazione debole?

- Stati (mixing)
- Interazioni (decadimenti)

La review di Lee e Yang (1)

Come misurare se P violata da interazione debole?

- Stati (mixing)
- Interazioni (decadimenti)

Mixing degli stati

Usando la lagrangiana di Fermi

$$\mathcal{L}_{\text{int}} \sim -\frac{G_F}{2} (\bar{p}n \bar{e}\nu + h.c.)$$

$$|\psi\rangle = |\psi^P\rangle + \mathcal{F}|\psi^{-P}\rangle$$

Da evidenze sperimentali (EDM n):

$$\mathcal{F} \lesssim 3 \cdot 10^{-7}$$

Stime dalla EFT:

$$\mathcal{F} \sim \underbrace{\mathcal{G}^2}_{\text{weak coupling}} \lesssim 10^{-12}$$

La review di Lee e Yang (1)

Come misurare se P violata da interazione debole?

- Stati (mixing)
- Interazioni (decadimenti)

Mixing degli stati

Usando la lagrangiana di Fermi

$$\mathcal{L}_{\text{int}} \sim -\frac{G_F}{2} (\bar{p}n \bar{e}\nu + h.c.)$$

$$|\psi\rangle = |\psi^P\rangle + \mathcal{F}|\psi^{-P}\rangle$$

Da evidenze sperimentali (EDM n):

$$\mathcal{F} \lesssim 3 \cdot 10^{-7}$$

Stime dalla EFT:

$$\mathcal{F} \sim \underbrace{\mathcal{G}^2}_{\text{weak coupling}} \lesssim 10^{-12}$$

Interazioni deboli

Gli scattering hanno sempre esibito distribuzioni simmetriche sotto P .

Basta per dire che P conservata?

La review di Lee e Yang (2)

Gli scattering hanno sempre esibito distribuzioni simmetriche sotto P . Basta per dire che P conservata?

No.

La review di Lee e Yang (2)

Gli scattering hanno sempre esibito distribuzioni simmetriche sotto P . Basta per dire che P conservata?

No.

Tutti gli esperimenti svolti hanno usato **fasci non polarizzati**.

Il più generale tra gli accoppiamenti minimali è

$$\begin{aligned}
 \mathcal{H}_{\text{int}} = & C_S \bar{p} \mathbf{1} n \quad \bar{e} \mathbf{1} \nu \quad + C'_S \bar{p} \mathbf{1} n \quad \bar{e} \mathbf{1} \gamma_5 \nu \quad + \\
 & + C_V \bar{p} \gamma_\mu n \quad \bar{e} \gamma^\mu \nu \quad + C'_V \bar{p} \gamma_\mu n \quad \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 \nu \quad + \\
 & + C_T \bar{p} \gamma_{\mu\nu} n \quad \bar{e} \gamma^{\mu\nu} \nu \quad + C'_T \bar{p} \gamma_{\mu\nu} n \quad \bar{e} \gamma^{\mu\nu} \gamma_5 \nu \quad + \\
 & + C_A \bar{p} \gamma_\mu \gamma_5 n \quad \bar{e} \gamma^\mu \nu \quad + C'_A \bar{p} \gamma_\mu \gamma_5 n \quad \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 \nu \quad + \\
 & + C_P \bar{p} \mathbf{1} \gamma_5 n \quad \bar{e} \mathbf{1} \nu \quad + C'_P \bar{p} \mathbf{1} \gamma_5 n \quad \bar{e} \mathbf{1} \gamma_5 \nu \quad + h.c.
 \end{aligned}$$

La review di Lee e Yang (2)

Gli scattering hanno sempre esibito distribuzioni simmetriche sotto P . Basta per dire che P conservata?

No.

Tutti gli esperimenti svolti hanno usato **fasci non polarizzati**.

Il più generale tra gli accoppiamenti minimali è

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{\text{int}} = & C_S \bar{p} \mathbb{1} n \quad \bar{e} \mathbb{1} \nu \quad + C'_S \bar{p} \mathbb{1} n \quad \bar{e} \mathbb{1} \gamma_5 \nu \quad + \\ & + C_V \bar{p} \gamma_\mu n \quad \bar{e} \gamma^\mu \nu \quad + C'_V \bar{p} \gamma_\mu n \quad \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 \nu \quad + \\ & + C_T \bar{p} \gamma_{\mu\nu} n \quad \bar{e} \gamma^{\mu\nu} \nu \quad + C'_T \bar{p} \gamma_{\mu\nu} n \quad \bar{e} \gamma^{\mu\nu} \gamma_5 \nu \quad + \\ & + C_A \bar{p} \gamma_\mu \gamma_5 n \quad \bar{e} \gamma^\mu \nu \quad + C'_A \bar{p} \gamma_\mu \gamma_5 n \quad \bar{e} \gamma^\mu \gamma_5 \nu \quad + \\ & + C_P \bar{p} \mathbb{1} \gamma_5 n \quad \bar{e} \mathbb{1} \nu \quad + C'_P \bar{p} \mathbb{1} \gamma_5 n \quad \bar{e} \mathbb{1} \gamma_5 \nu \quad + h.c. \end{aligned}$$

WLOG prendiamo il caso *à la* Fermi e troviamo il rate di $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{\text{int}} = & \frac{G_F}{2} [\bar{p}(\alpha + \alpha' \gamma_5) n \bar{e}(\beta + \beta' \gamma_5) \nu + h.c.] \\ \Rightarrow \text{traceology} \Rightarrow \mathcal{R}_{n \rightarrow p+e+\bar{\nu}} \propto & \text{tr}[(\alpha + \alpha' \gamma_5)^2] \text{tr}[(\beta + \beta' \gamma_5)^2] \\ & \propto (|\alpha|^2 + |\alpha'|^2) \times (|\beta|^2 + |\beta'|^2) \end{aligned}$$

La review di Lee e Yang (3)

Con fasci non polarizzati, lo scattering con interazione

$$\mathcal{H}_{\text{int}} = \frac{G_F}{2} [\bar{p}(\alpha + \alpha' \gamma_5)n \bar{e}(\beta + \beta' \gamma_5)\nu + h.c.]$$

La review di Lee e Yang (3)

Con fasci non polarizzati, lo scattering con interazione

$$\mathcal{H}_{\text{int}} = \frac{G_F}{2} [\bar{p}(\alpha + \alpha' \gamma_5)n \bar{e}(\beta + \beta' \gamma_5)\nu + h.c.]$$

è **indistinguibile** da quello generato da

$$\mathcal{H}'_{\text{int}} = \frac{G_F}{2} \sqrt{(|\alpha|^2 + |\alpha'|^2) \times (|\beta|^2 + |\beta'|^2)} [\bar{p}n \bar{e}\nu + h.c.]$$

La review di Lee e Yang (3)

Con fasci non polarizzati, lo scattering con interazione

$$\mathcal{H}_{\text{int}} = \frac{G_F}{2} [\bar{p}(\alpha + \alpha' \gamma_5) n \bar{e}(\beta + \beta' \gamma_5) \nu + h.c.]$$

è **indistinguibile** da quello generato da

$$\mathcal{H}'_{\text{int}} = \frac{G_F}{2} \sqrt{(|\alpha|^2 + |\alpha'|^2) \times (|\beta|^2 + |\beta'|^2)} [\bar{p} n \bar{e} \nu + h.c.]$$

Interpretazione fisica: *non ci sono misure di **pseudoscalari!***

Se usiamo fasci con polarizzazione a^μ in ingresso ($S \cdot p_{e,\text{out}}$):

$$\mathcal{R}'_{n \rightarrow p+e+\bar{\nu}} \propto \text{tr} \left[\frac{1 + \gamma_5 \not{a}}{2} (\alpha + \alpha' \gamma_5)^2 \right] \text{tr} [(\beta + \beta' \gamma_5)^2]$$

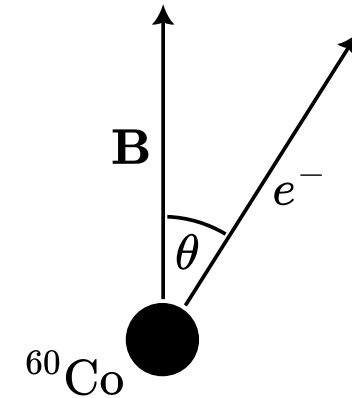
- $\mathcal{R}'_{n \rightarrow p+e+\bar{\nu}}$ distingue le due interazioni!
- Questo esperimento può essere fatto con...
 - ▶ ...decadimento di ^{60}Co !
 - ▶ ...decadimento di “mesoni” strani!

1. Ambientazione: il $\tau - \theta$ puzzle
2. **Parte prima:** **l'esperimento di Wu**
3. Parte seconda: l'esperimento di GLW
4. Conclusione: la violazione di P

Decadimento β e transizione isomerica:



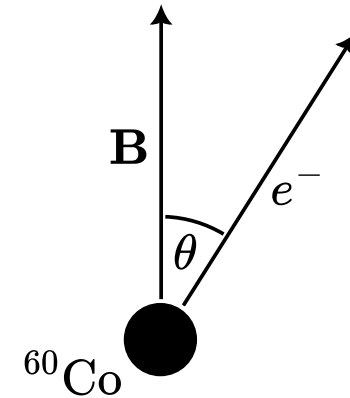
1. Polarizzazione del campione.
2. Misura della distribuzione $I_e(\theta)$ degli e^{-} prodotti.
3. Misura della distribuzione $I_\gamma(\theta)$ dei fotoni prodotti.



Decadimento β e transizione isomerica:



1. Polarizzazione del campione.
2. Misura della distribuzione $I_e(\theta)$ degli e^{-} prodotti.
3. Misura della distribuzione $I_\gamma(\theta)$ dei fotoni prodotti.



Risultati sperimentali

- γ prodotti in modo **simmetrico** sotto P , cioè sotto $\theta \rightarrow 180^\circ - \theta$.
 \Rightarrow utili come controllo della polarizzazione del ${}^{60}\text{Co}$.
- $I_{e(\theta)}$ **non simmetrica** sotto P !
 $\Rightarrow P$ violata.

Polarizzare il ^{60}Co — METODO DI ROSE-GORTER

Campione: $3 \left[0.5\% \text{ Co}, 99.5\% \text{ Mg}(\text{NO}_3)_2 \right] \cdot 2\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

⇒ Reazioni chimiche di decomposizione di NO_3 inibite.

⇒ Proprietà di conduzione adatte per il contatto col refrigeratore.

⇒ Polarizzabilità fortemente anisotropa → **asse con alta polarizzabilità.**

Polarizzare il ^{60}Co — METODO DI ROSE-GORTER

Campione: $3 \left[0.5\% \text{ Co}, 99.5\% \text{ Mg}(\text{NO}_3)_2 \right] \cdot 2\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

⇒ Reazioni chimiche di decomposizione di NO_3 inibite.

⇒ Proprietà di conduzione adatte per il contatto col refrigeratore.

⇒ Polarizzabilità fortemente anisotropa → **asse con alta polarizzabilità**.

Demagnetizzazione adiabatica

1. **Magnetizzazione isoterma** a 1 K con $H \sim 25 \text{ kØ}$ lungo l'asse con alto g -value.
2. **Demagnetizzazione adiabatica**. Per effetto magnetocalorico la temperatura del campione diminuisce (fino anche a 0.004 K!).

Polarizzare il ^{60}Co — METODO DI ROSE-GORTER

Campione: $3 \left[0.5\% \text{ Co}, 99.5\% \text{ Mg}(\text{NO}_3)_2 \right] \cdot 2\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$

⇒ Reazioni chimiche di decomposizione di NO_3 inibite.

⇒ Proprietà di conduzione adatte per il contatto col refrigeratore.

⇒ Polarizzabilità fortemente anisotropa → **asse con alta polarizzabilità**.

Demagnetizzazione adiabatica

1. **Magnetizzazione isoterma** a 1 K con $H \sim 25 \text{ kØ}$ lungo l'asse con alto g -value.
2. **Demagnetizzazione adiabatica**. Per effetto magnetocalorico la temperatura del campione diminuisce (fino anche a 0.004 K!).

Magnetizzazione del campione

Si può polarizzare il campione con H diretto lungo l'asse con **basso g -value**, surriscaldandolo di poco.

Rivelatori

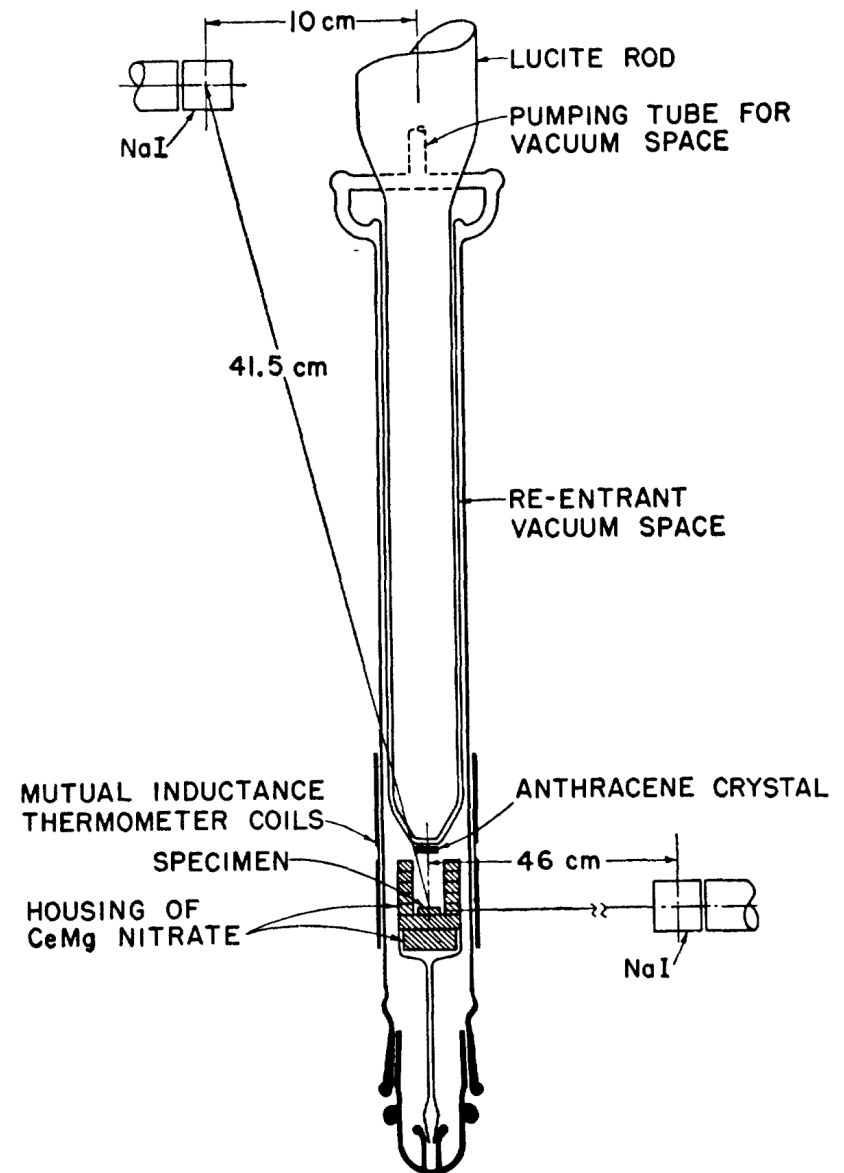
Scintillatori:

- Per le radiazioni β :
⇒ Cristallo di **antracene**, sopra il campione.
- Per le radiazioni γ :
⇒ Due scintillatori di **NaI**, in posizione polare e equatoriale.
- Fotomoltiplicatori 6292

Contatori:

- Per radiazioni β : 10-channels, pulse-height analyzer.
- Per radiazioni γ : contatori impostati sul photopeak (no Compton scattering).

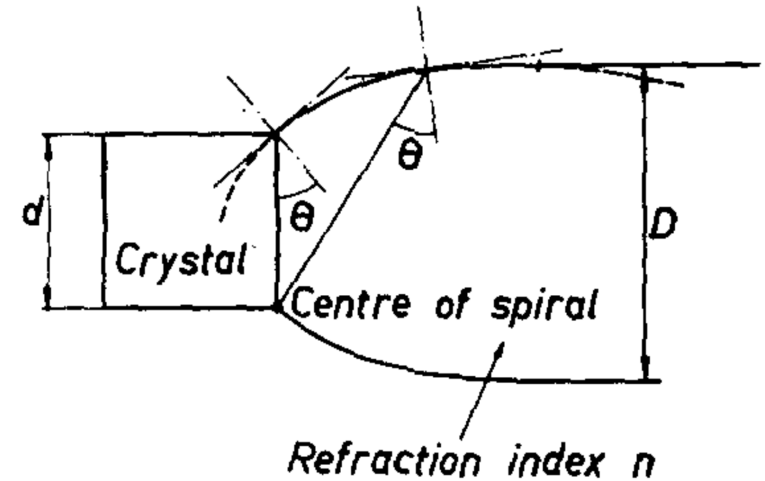
Tempo di acquisizione: ~ 1 min.



Difficoltà e test dell'apparato

Difficoltà

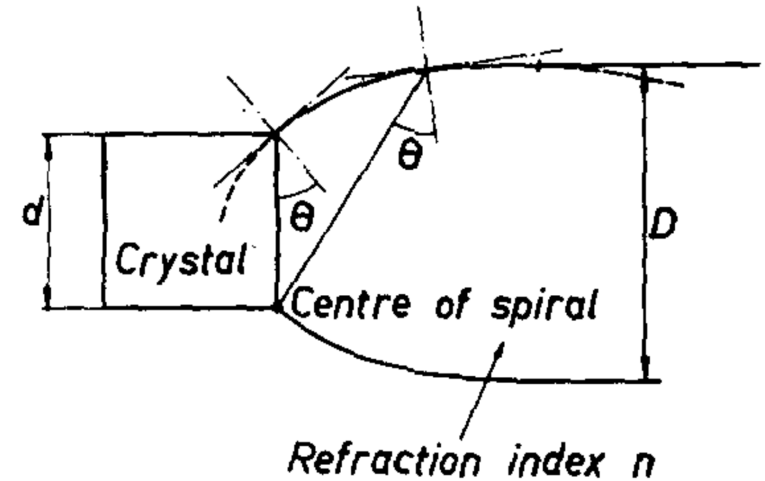
1. Il rivelatore β deve essere posizionato dentro il criostato a demagnetizzazione.
 ⇒ Glass window + Lucite pipe con testa a forma di spirale logaritmica.
2. Il campione radioattivo deve essere sottile.
 ⇒ Cristallo di Cerium Magnesium Nitrate + crescita di uno strato di Cobalto.



Difficoltà e test dell'apparato

Difficoltà

1. Il rivelatore β deve essere posizionato dentro il criostato a demagnetizzazione.
 ⇒ Glass window + Lucite pipe con testa a forma di spirale logaritmica.
2. Il campione radioattivo deve essere sottile.
 ⇒ Cristallo di Cerium Magnesium Nitrate + crescita di uno strato di Cobalto.

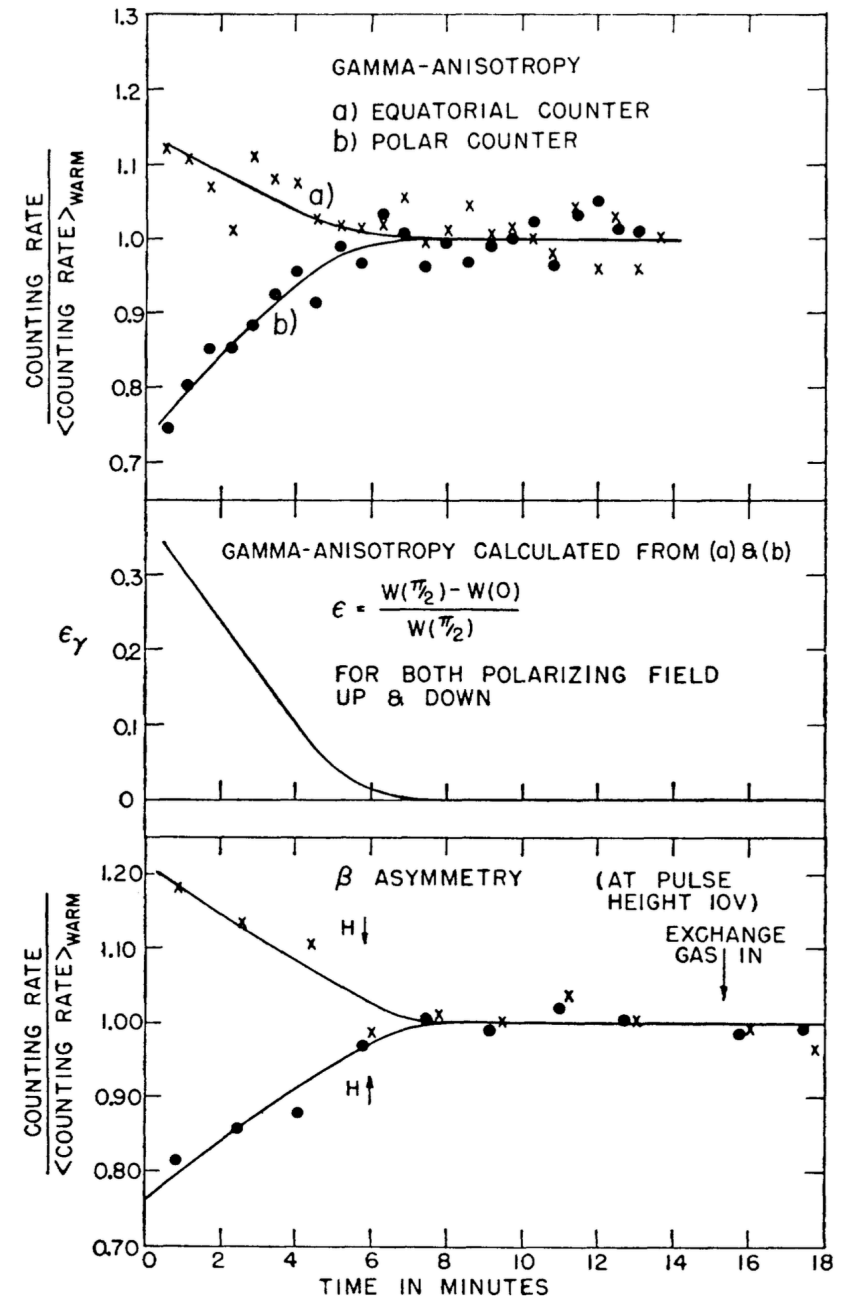


Test

- **Risoluzione** dei rivelatori: 17% (effettuato con ^{137}Cs).
- Effetti della **temperatura** e del **campo magnetico** sul rivelatore: non rilevanti.
- Il risultato non dipende dal **verso del campo di raffreddamento**.
- Il risultato non dipende da **magnetizzazione spuria** (test con CoCl_2).

Risultati dell'esperimento

- e^- prodotti maggiormente della direzione opposta alla polarizzazione del nucleo (l'interazione debole interagisce maggiormente con **particelle left-handed** o antiparticelle right-handed).
- γ prodotti in modo simmetrico sotto P .
- Tempi di termalizzazione compatibili** tra le due distribuzioni, di circa 6 min.
- $I_e(\theta) = I_0(1 + \alpha \cos \theta)$ con $\alpha \sim -0.7$.



1. Ambientazione: il $\tau - \theta$ puzzle
2. Parte prima: l'esperimento di Wu
3. **Parte seconda: l'esperimento di GLW**
4. Conclusione: la violazione di P

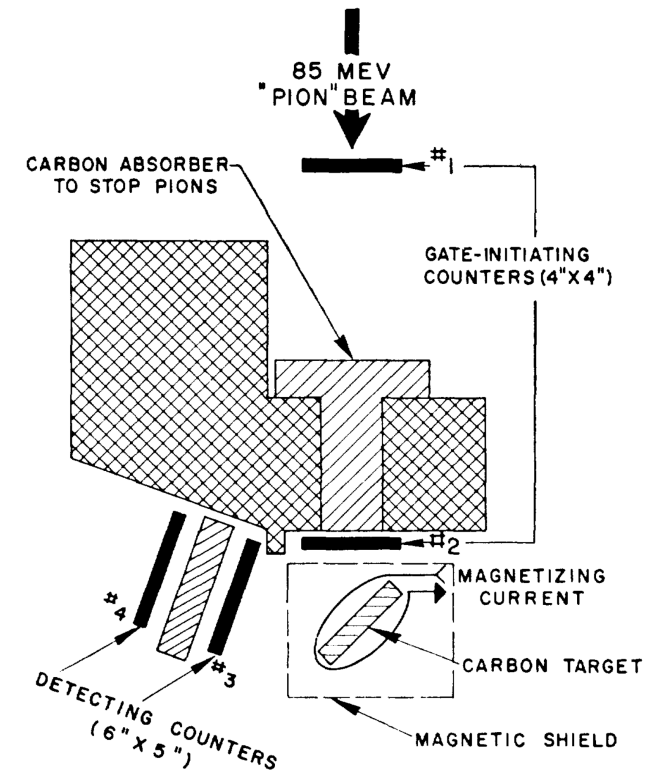
L'esperimento di Garwin–Lederman–Weinrich

Decadimento di un pione:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}_\mu$$

1. **Estrazione** π^+ (Nevis, ~ 400 MeV).
2. **Adsorber** di π^+ (passano solo μ^+).
3. **Precessione** del μ^+ .
4. Misurazione del **rate di decadimento** μ^+ (rivelatori a 100° dalla direzione del μ^+).



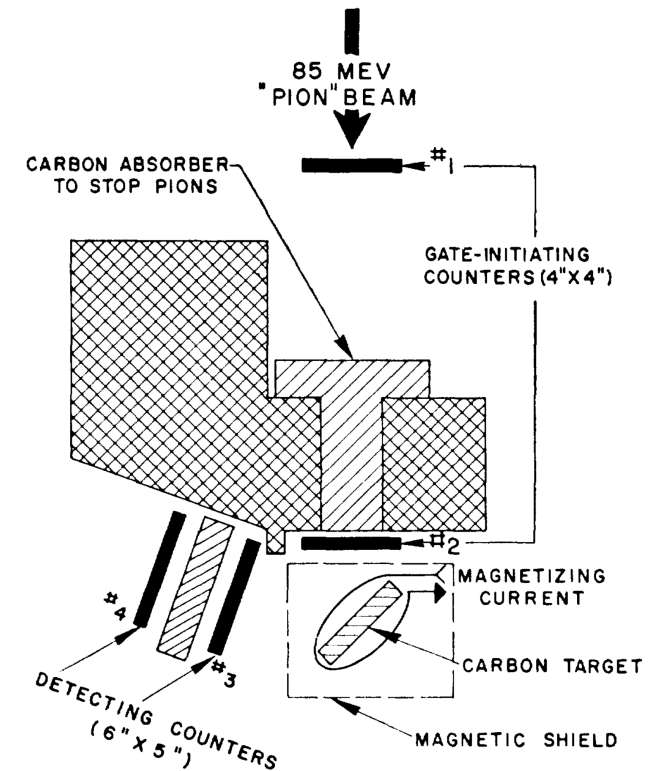
L'esperimento di Garwin–Lederman–Weinrich

Decadimento di un pione:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}_\mu$$

1. **Estrazione** π^+ (Nevis, ~ 400 MeV).
2. **Adsorber** di π^+ (passano solo μ^+).
3. **Precessione** del μ^+ .
4. Misurazione del **rate di decadimento** μ^+ (rivelatori a 100° dalla direzione del μ^+).

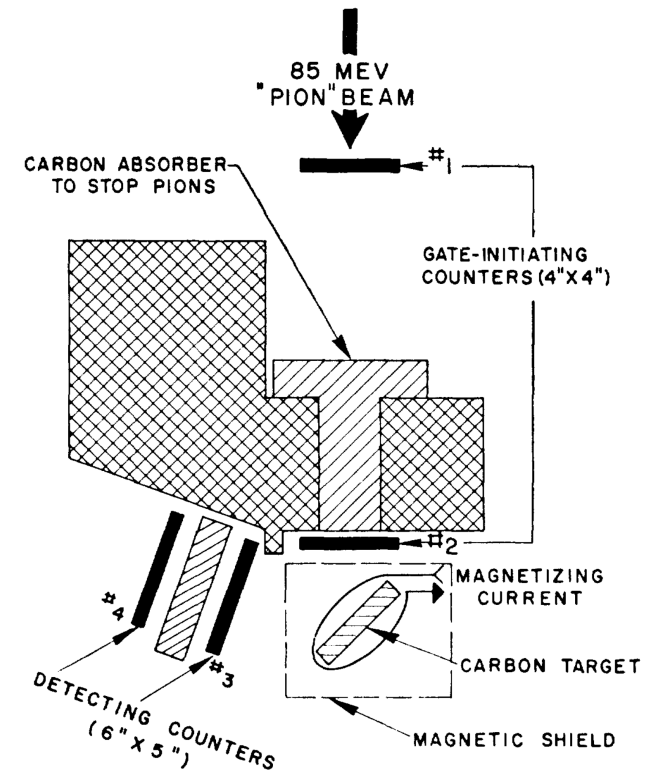


Risultati sperimentali

- tempo di vita medio del μ^+ ;
- fattore giromagnetico del μ^+ ;
- violazione di P .

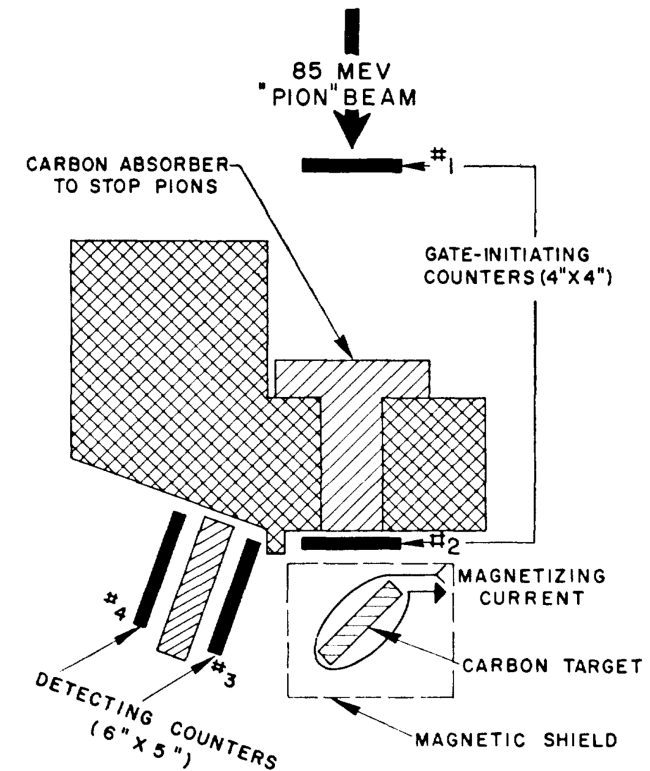
Rivelatori

- Estrazione: bump con campo magnetico
- 8 in di absorber di carbonio per far decadere i π^+ .
- Detector 1 e 2 indicano l'arrivo di un μ^+ .
- Detector 3 e 4 indicano l' e^+ e misurano da 0.75 a $2\mu s$ dopo l'arrivo del μ^+ nel target.
- Prima del decadimento, viene fatto precedere lo spin del μ^+ tramite B .



Rivelatori

- Estrazione: bump con campo magnetico
- 8 in di absorber di carbonio per far decadere i π^+ .
- Detector 1 e 2 indicano l'arrivo di un μ^+ .
- Detector 3 e 4 indicano l' e^+ e misurano da 0.75 a $2\mu s$ dopo l'arrivo del μ^+ nel target.
- Prima del decadimento, viene fatto precedere lo spin del μ^+ tramite B .



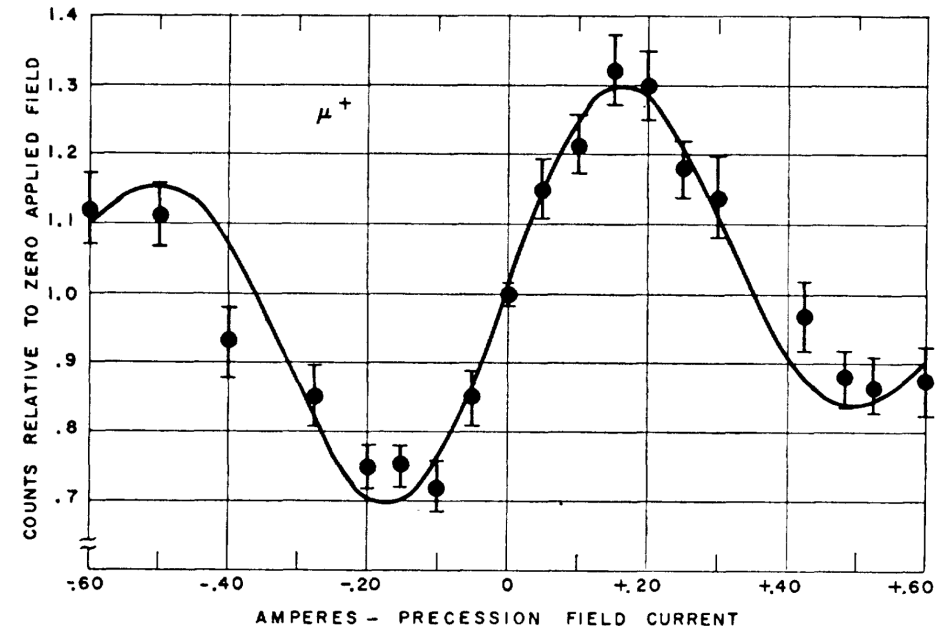
Controlli sperimentali

Molti controlli sistematici. Qualche esempio:

- riducendo l'absorber a $\ell_\pi \sim 5$ in, non viene misurata asimmetria;
- ruotando il rivelatore di e^+ la distribuzione $I_e(B, t)$ ruota compatibilmente con la distribuzione del decadimento di una particella di spin $\frac{1}{2}$.

Risultati – CONSEGUENZE DIRETTE E INDIRECTE

1. **Grossa asimmetria** angolare degli e^+
 \Rightarrow fascio di μ^+ polarizzato.
2. $I_e \sim 1 + \alpha \cos \theta$ con $\alpha = -\frac{1}{3} \pm 10\%$.
3. **P violata** da entrambi i decadimenti.
4. Teorema di Lee-Ohme-Yang
 \Rightarrow **nemmeno C conservata.**
5. $g_{\mu^+} = +2.00 \pm 0.10$
6. Probabilmente μ ha spin $\frac{1}{2}$.
7. L'asimmetria non dipende in modo forte dall'energia.
8. μ^- in carbonio mostrano un'asimmetria minore, di $a \sim \frac{1}{20}$.
9. $-g_{\mu^-}$ è compatibile con $+g_{\mu^+}$.
10. Si misurano grosse asimmetrie anche absorber in polietilene e calcio.
 Emulsioni nucleari danno circa la metà dell'asimmetria misurata nel carbonio.



1. Ambientazione: il $\tau - \theta$ puzzle
2. Parte prima: l'esperimento di Wu
3. Parte seconda: l'esperimento di GLW
4. **Conclusione: la violazione di P**

- P, C sono simmetrie di gravità, forza EM e forza forte, ma **non della forza debole**.
- Si scoprirà che le interazioni deboli **violano massimamente** P .
- Questo spingerà Yang e Lee a ipotizzare che i neutrini sono **fermioni di Weyl**.

$$\mathcal{L}_\nu = -i\bar{\nu}\not{\partial}\frac{1 - \gamma_5}{2}\nu$$

- Una decina di anni dopo, Glashow, Salam e Weinberg proporranno l'**unificazione elettrodebole**.
- La teoria elettrodebole, vista come teoria di gauge, darà luogo un enigma: la scrittura di un termine di massa gauge-invariante. Questo verrà risolto ipotizzando l'esistenza del **bosone di Higgs**.
- Glashow, Iliopoulos e Maiani estenderanno la teoria di Yang-Mills anche ai quark. Era nato il **Modello Standard**.

Bibliografia

- [1] E. Fermi, «Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta», *Ric. Sci.*, vol. 4, pp. 491–495, 1933.
H. H. N. K. H. D. C. J. E. Ambler M.A. Grace e H. Lemmer, «Nuclear polarization of cobalt 60 », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 44, fasc. 349, pp. 216–218, 1953, doi: 10.1080/14786440208520296.
- [2] T. D. Lee e C.-N. Yang, «Question of Parity Conservation in Weak Interactions», *Phys. Rev.*, vol. 104, pp. 254–258, 1956, doi: 10.1103/PhysRev.104.254.
- [3] P. A. Tove, «Scintillation Spectrometry Using Long Light Guides». [Online]. Disponibile su: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1715497>
- [4] C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, e R. P. Hudson, «Experimental Test of Parity Conservation in β Decay», *Phys. Rev.*, vol. 105, pp. 1413–1414, 1957, doi: 10.1103/PhysRev.105.1413.
R. L. Garwin, L. M. Lederman, e M. Weinrich, «Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: The Magnetic Moment of the Free Muon», *Phys. Rev.*, vol. 105, pp. 1415–1417, 1957, doi: 10.1103/PhysRev.105.1415.
- [5] T. D. Lee e C.-N. Yang, «Parity Nonconservation and a Two Component Theory of the Neutrino», *Phys. Rev.*, vol. 105, pp. 1671–1675, 1957, doi: 10.1103/PhysRev.105.1671.
- [6] R. C. Cohen e others, «Status of the Nevis Synchrocyclotron», p. A6, 1975.
- [7]
- [8]

Grazie per l'attenzione