

Paritássértés kísérletek, avagy hogyan töröljük el a tükörszimmetriát egyetlen hétvége alatt

Modern fizikai kísérletek szeminárium

Kincses Dániel

Eötvös Loránd Tudományegyetem



2016. február 9.



Szimmetriák, megmaradások

- Szeretjük a megmaradási törvényeket (matematikailag hasznosak, elegánsak)
- Szimmetria \rightarrow valaminek a megmaradása
- Tükörszimmetria (paritásmegmaradás)
 - A természet törvényei az alábbi transzformációra nézve invariánsak:

$$P : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$

- 1957 január - „Az anyag szimmetriái tökéletesek”

A $\tau - \theta$ rejtvény

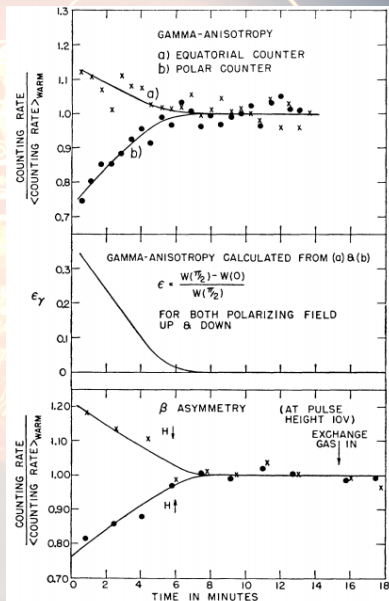
- $\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$
- $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$
- A két részecske tömege, élettartama azonos
- A két bomlásban a végállapotok paritása különböző
- Ha azonos részecskék \rightarrow sérül a paritás!
- (Későbbiekben kiderült, hogy tényleg azonos, K^+)
- Szükség van kísérletekre

A tükörszimmetria próbája

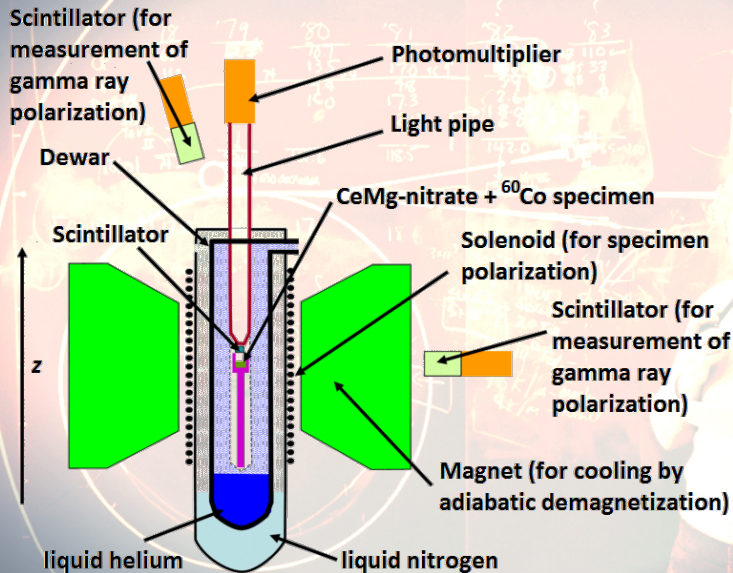
- Hogy vehetjük észre, ha mégis sérül a paritás?
 - Csavarjunk be egy jobb menetű csavart egy deszkába
 - Ha \nexists bal menetű csavar \rightarrow A tükörvilág megkülönböztethetővé válik
- Csavar forgatása: forgás + haladó mozgás
- Csavar a részecske világban: Müon
 - henger alakú részecske
 - hossz tengelye körül forog (merre?)
 - Gyenge kölcsönhatás \rightarrow e^- -ra bomlás irányt ad a hengernek
- 1956 - T. D. Lee, C. N. Yang
 - "Question of Parity Conservation in Weak Interactions"
(Phys.Rev.104, 254)
- elméletileg elképzelhető, hogy csak jobbmenetű müon van

A Wu kísérlet (PhysRev.105.1413)

- Chien Chiung Wu, Columbia egyetem
- radioaktív kobalt-60
- ${}^{60}\text{Co} \xrightarrow{\text{Gyenge kh.}} {}^{60}\text{Ni} + \bar{\nu}_e + e^- \xrightarrow{\text{EM kh.}} {}^{60}\text{Ni} + \bar{\nu}_e + e^- + 2\gamma$
- EM. kh. paritás őrző
- Erős mágneses tér + nagyon alacsony hőmérséklet
→ azonos irányú magspinek
- γ sugarak → polarizáció mértéke
- e^- -ok preferálnak egy irányt!
(magspinnel ellentétes irányt)



A Wu kísérlet



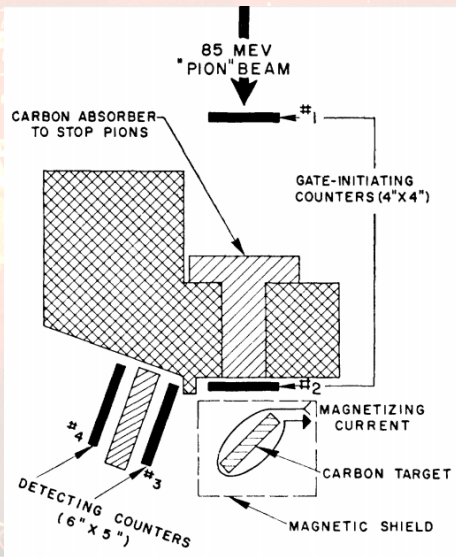
A Lederman-Garwin kísérlet (PhysRev.105.1415)

- Lederman a pion bomlásaival foglalkozott
- 400 MeV-es Nevis gyorsító (akkor a világ legerősebb ciklotronja)
- Gyorsított protonokkal pionnyalábot termeltek
- $\pi \rightarrow \mu + \nu$
- A müonok a pionnyaláb irányában repülnek tovább
- Paritássértés \rightarrow nem egyenlő arányú jobb és balmenetes müon
- Nagy aszimmetria statisztikusan kimutatható
- Müonok elbomlanak elektronra és neutrínóra
- Paritássértés \rightarrow Az egyik irányban több elektron lép ki

Mi történik a kísérlet során?

- 1 A 400 MeV-es protonnyaláb grafitba ütközik, pionokat kelt
- 2 Mágnesek kiterelik a pionokat
- 3 A pionnyaláb folyamatosan müonokra és neutrínókra bomlik
- 4 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
- 5 A müonok a pion nyaláb irányában továbbrepülnek
- 6 Egy vastag szűrő lelassítja a müonokat és elnyeli a pionokat
- 7 A müonok megállnak a targetben lévő grafitrácásban
- 8 $\mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu$

A kísérleti elrendezés



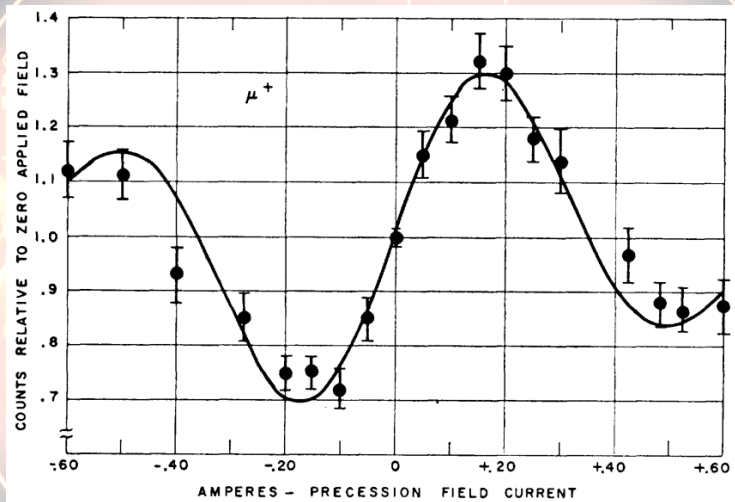
Mit kell mérni?

- Azért kellenek μ^+ -ok, mert a μ^- -ok befogódhatnak az e^- -ok helyére
- Lassulás során rugalmas ütközések $\rightarrow \mu$ forgásiránya nem változik
- A mágneses térben való szabad repülés alatt sem változik
- Azt kell megmérni, hogy a nyalábirányhoz képest mennyi e^+ megy előre/hátra
- Részletesebben: $I(\theta)$
- Pozitronokat elkapó számláló - "teleszkóp"
- A teleszkóp átforgatása bonyolult
- Ötlet: ne a teleszkópot forgassuk, hanem a müonokat

Hogy kell elforgatni a müonokat?

- \forall töltött forgó részecske egy mágnes, külső térben elfordul
- Müon spin precesszió sebessége a térerősségtől függ
- μ átlagos felezési ideje $1.5 \mu\text{s}$
- Ideális forgatási idő: $45^\circ / \mu\text{s}$
- Ehhez elég párszáz menetes réztekercs néhány amper árammal
- Kül. szögek helyett a forgó müonok kül. forgási fázisaiban mértek (az áramerősséget változtatva)

Az eredmény



$$I(\theta) = 1 - \frac{1}{3} \cos(\theta)$$

Egyéb eredmények, szisztematikus tesztek

- Pionokat megállító fal vékonyítása
 - Pionok is a grafit targetben állnak meg
 - Izotropikusan emittálják a müonokat
 - A beütésszám nem változik az áramerősséggel
- A giromágneses tényező mérése
 - A precesszió mértéke a mágn. mom. és a spin arányától függ
 - A giromágneses faktor mért értéke $g = +2.0 \pm 0.1$
- A detektor (teleszkóp) elforgatása
 - A teleszkópot $\theta=100^\circ$ -ról $\theta=65^\circ$ -hoz állították
 - Hasonló görbét kaptak, jobbra eltolva $\theta=37^\circ$ -al

Telegdi Bálint kísérlete (PhysRev.106.1290)

- Telegdi Bálint és Jerome Friedman, Chicagói egyetem
- Szintén müon bomlás kísérlet, emulziós detektálással
- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$
- Hamarabb kezdték mint Ledermanék, de később lett kész a cikk
- Eredmény: $I(\theta) = 1 + a \cdot \cos(\theta)$, $a = -0.174 \pm 0.038$

A CP-sértés

- A $\tau - \theta$ rejtély megoldása - Kaonok: K^+ , K^- , K^0 , \bar{K}^0
- $CPK^0 = \bar{K}^0 \rightarrow K^0$ nem CP sajátállapot
- $K_1^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \bar{K}^0)$, $K_2^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \bar{K}^0)$
- K_1^0 CP -pozitív, K_2^0 CP -negatív sajátállapot
- Kaon gyenge bomlása pionokat eredményez, ami CP -negatív
- K_1^0 kettő, K_2^0 három pionra tud bomlani
- K_2^0 élettartama majdnem három nagyságrenddel hosszabb
- Semleges kaonokat keltve, és elég ideig várva csak K_2^0 marad meg
- 1964 - Cronin és Fitch kimutatták, hogy K_2^0 is tud 2 pionra bomlani
- A gyenge-kh. kis mértékben, de a CP szimmetriát is sérti!

A kísérletek következményei

- A gyenge kölcsönhatásban sérül a paritás
- Szintén sérül a töltéskonjugálás-invariancia (C-paritás)
- A CP szimmetria a Wu- és Lederman- kísérletekben nem sérül
- Cronin és Fitch (PhysRevLett.13.138) - kis mértékben a CP is sérül!
- A Lederman-kísérlet alapjául szolgált a μ SR szilárdtestfizikai-kémiai vizsgálati módszernek
- A neutrínók balkezesek, az antineutrínók jobbkezesek
- Nagy előrelépések a gyenge kölcsönhatás megértésében!