

P 対称性の破れ

五十部、井上、加藤、佐藤
平成 16 年 6 月 29 日

1 実験動機

自然は対称を好むということがよく言われるが、かつては CPT それぞれ単独で保存則が成立しているとされていた。しかしこの 50 年間で、それらは成り立っていないことが確認されてきた。パリティの場合、弱い相互作用の反応に関して様々な証拠が挙げられている。我々の目標は、自分たちでこの事実を確認することである。その方法として、ベータ崩壊における放出電子 (or 陽電子) のヘリシティが偏っていることを検出する。

2 実験装置

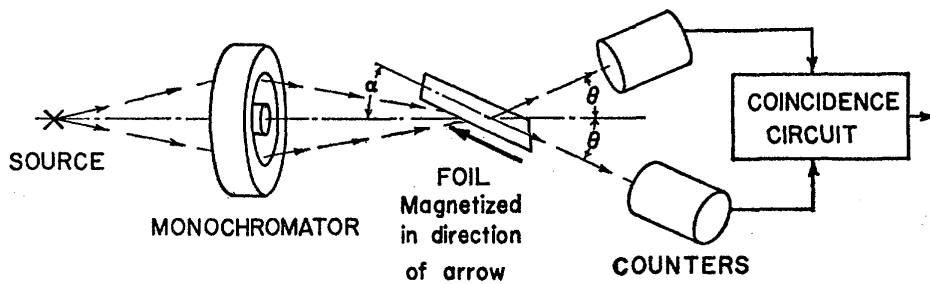


FIG. 1. Basic arrangement for the measurement of electron and positron helicity by means of Møller and Bhabha scattering.

3 実験原理

ベータ崩壊で放出された電子が特定方向のスピンのもっていたとする。パリティ変換を行うと、運動量は反転するがスピンは反転しない。つまり放出電子の集団が、全体としてスピンをもっているならばパリティ対称性は破れていることになる。

本実験では放出電子のスピン分析のために、電子-電子散乱 (Møller 散乱) もしくは陽電子-電子散乱 (Bhabha 散乱) を用いる。この 2 つの散乱は入射電子と標的電子のスピン方向が平行か反平行かによって微分断面積が変わるという性質を持つ。

標的には、電子偏極をコントロールしやすい鉄の薄膜などを用いる。薄膜は厚さ方向に偏極するのが難しいので、図のようにセットする。

電子-電子散乱の場合は散乱角によって様々なエネルギーを持ちうるが、散乱後の 2 粒子のエネルギーが等しい場合のみをカウントすることにする。この時 2 粒子の散乱角と速度は等しくなり、同時に検出器に入る。鉄原子核による Mott 散乱の場合、2 粒子の質量差が大きいので、電子はほとんどエネルギーを失わない。以上のことから散乱後の 2 粒子のエネルギーが等しく、同時に検出器に入ったものをカウントすれば、それは電

子による散乱であることになる。このうち、Møller 散乱以外のものはできるだけ減らさなければならない。

4 線源の強さ

4.1 Møller 散乱

標的の磁場を反転させる前後で、同数の粒子が標的に入った場合の検出個数の比を求める。

標的に鉄を用いる場合、鉄の電子は 26 個あるが、そのうち偏極できるのは 2 電子だけである。そのため鉄の偏極率は $f = \frac{2}{26}$ ビームか標的のいずれかが無偏極である時の微分断面積を $\frac{1}{2}(\frac{d\sigma_p}{d\Omega} + \frac{d\sigma_a}{d\Omega})$ とすると、

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Pf \cos \alpha \times \frac{d\sigma_p}{d\Omega} + (1 - Pf \cos \alpha) \times \frac{1}{2}(\frac{d\sigma_p}{d\Omega} + \frac{d\sigma_a}{d\Omega})}{Pf \cos \alpha \times \frac{d\sigma_a}{d\Omega} + (1 - Pf \cos \alpha) \times \frac{1}{2}(\frac{d\sigma_p}{d\Omega} + \frac{d\sigma_a}{d\Omega})} \quad (1)$$

仮に $\alpha = 30^\circ$ 、 $p = \frac{\sqrt{3}}{2}$ 、 $\gamma = 2$ と見積もると、 $\frac{d\sigma_p}{d\sigma_a} = \frac{1}{20}$ となり

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{345}{383} \quad (2)$$

検出個数が $N_1 = 345r$ 個、 $N_2 = 383r$ 個だったとする。もしパリティが破れていなければ期待値が等しくなる。その値を N 個とすれば、 $N_1 = 345r$ 個、 $N_2 = 383r$ 個となる確率は、

$$p(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} e^{-(N_1-N)^2/2N} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} e^{-(N_2-N)^2/2N} \quad (3)$$

これを $N_1 < N < N_2$ の領域で積分すると、

$$\int_{N_2}^{N_1} p(N) dN < \frac{1}{2\pi N_1} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{-(N_1-N)^2 - (N_2-N)^2}{2N_2}} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{2N_1} \sqrt{\frac{N_2}{\pi}} \exp\left(-\frac{(N_1 - N_2)^2}{2N_2}\right) \quad (5)$$

このことから計算すると、99%の確率で検出個数に有意な差があることを示すには、式(5) < 0.01 となればいいので、計算すると、

$$r > 0.458 \quad (6)$$

つまり $N_1 > 158$ 個、 $N_2 > 175$ 個検出されることが必要である。実際には他の効果による散乱が上乗せされている可能性があるので、それぞれ $N > 250$ 程度と見積もる。

次に、そのために必要な線源の強度を計算する。

重心系で議論する。2 粒子が等しいエネルギーを持つ場合、スピンの平行時の微分散乱断面積 $\frac{d\sigma_p}{d\Omega}$ 、反平行時の微分断面積を $\frac{d\sigma_a}{d\Omega}$ とすると、

$$d\sigma_p = \frac{e^4 d\bar{\Omega}}{m^2(\gamma - 1)^2(\gamma + 1)} [\gamma^2 - 2\gamma + 1] \quad (7)$$

$$d\sigma_a = \frac{e^4 d\bar{\Omega}}{m^2(\gamma - 1)^2(\gamma + 1)} [8\gamma^2 - 8\gamma + 4] \quad (8)$$

$\gamma = 2$ の場合を評価すると、実験室系では

$$\frac{d\sigma_p}{d\Omega} = 85.2\text{mb} \quad (9)$$

$$\frac{d\sigma_a}{d\Omega} = 1703\text{mb} \quad (10)$$

になる。

検出粒子数 N は、入射粒子数 N_{in} 標的密度 n_t を用いて

$$N \simeq N_{in} \times \frac{1}{2} \left(\frac{d\sigma_p}{d\Omega} + \frac{d\sigma_a}{d\Omega} \right) \times \Delta\Omega \times n_t \quad (11)$$

標的の厚さを $d \text{ mg/cm}^2$ とすると、中性子と陽子は同数と考えて、

$$n_t = 6.02 \times 10^{23} \times \frac{d \times 10^{-3}}{2} \times 10^{-27} \times \frac{1}{\sin \alpha} = 6d \times 10^{-7} \text{ mb}^{-1} \quad (12)$$

検出器の面積は scm^3 、標的の中心からの距離を rcm とする。

$$\Delta\Omega = \frac{s}{r^2} \text{ strad} \quad (13)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d\sigma_p}{d\Omega} + \frac{d\sigma_a}{d\Omega} \right) = 894\text{mb} \quad (14)$$

これらを代入すると、

$$N \simeq N_{in} \times 5.36d \frac{s}{r^2} \times 10^{-4} \quad (15)$$

t 秒後に線源を飛び出す電子数を $f(t)$ 個/秒、そのうち標的に届く割合を R とすると、観測時間を t 秒として、

$$N_{in} = R \int f(t) dt = fRt \quad (16)$$

$$N \simeq 5.36fRd \frac{s}{r^2} t \times 10^{-4} \quad (17)$$

$d = 3.6\text{mg/cm}^2$ 、 $s = 20\text{cm}^2$ 、 $r = 10\text{cm}$ とおくと、

$$N \simeq 3.86fRt \times 10^{-4} \quad (18)$$

検出数の合計が、 $N = 500$ 程度になるには、

$$fRt \simeq 1.3 \times 10^6 \quad (19)$$

レンズの性能によって R の値は決まるが、現時点では 10^{-3} と見積もる。

$$ft \simeq 1.3 \times 10^9 \quad (20)$$

1 日は 8.64×10^4 秒なので、もし 1 日かけて測定するとすれば、

$$f \simeq 1.5 \times 10^4 \quad (21)$$

これは 1 Ci が $3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ なので、 $0.5\mu\text{Ci}$ の線源に対応する。

4.2 BhaBha 散乱

以下の計算は微分断面積とその比が異なるだけで、Møller 散乱と同じである。仮に $p = \frac{\sqrt{3}}{2}$ 、 $\gamma = 2$ と見積もると、 $\frac{d\sigma_p}{d\sigma_a} = \frac{1}{8}$ となり

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{149}{163} \quad (22)$$

その結果 $N_1 > 190$ 個、 $N_2 > 207$ 個検出されることが必要である。

5 実験器具について

5.1 レンズ

線源から出るベータ線の量が少ないので、標的に収束させる装置が必要である。また、標的にかける磁場を反転させた時に、電子軌道の対称性が壊されないことが必要である。本実験の最大の難関であると思われる。

スピンの方向を変えずに方向のみを変える、高エネルギーの粒子を効率よく集めるなどの性質が必要である。

5.2 coincidence circuit

同時に検出されたことを確認するための装置で、どれだけの時間分解能が必要かは検討が必要である。

5.3 線源

電子と陽電子、いずれを用いるにしても単一の反応しか起きず、しかも強い線源が作れることが要求される。

陽電子を用いる場合、例えば



ならば他の反応が生じない。

5.4 検出器

シンチレーションカウンタを使うが、配置や個数を検討する必要がある。電子の制動輻射や陽電子の対消滅によるガンマ線に反応しないものを用いる。

5.5 標的

$3.6\text{mg}/\text{cm}^2$ の鉄標的の場合、密度は $7.86\text{g}/\text{cm}^3$ なので、厚さは $4.7\mu\text{m}$ となる。検出器や電子の軌道に影響を与えないように磁化でき、枠による散乱が最小限になるよう設計する。