

ニュートリノのヘリシティ測定

植田 大樂

平成 15 年 7 月 4 日

1 概要

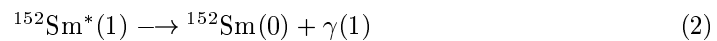
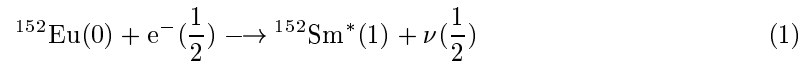
Goldhaber の実験によって、ニュートリノのヘリシティを測る事ができる。ヘリシティとは、運動量 \vec{p} 、スピン $\vec{\sigma}$ を持つ量子に対して

$$\frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{|\vec{\sigma}| |\vec{p}|}$$

で定義されるものである。

2 Goldhaber の実験

ニュートリノのヘリシティは、Goldhaber の実験によって大変うまく決定された。この実験の原理を以下に示す。(図 1 参照)



(1) の反応で、 $^{152}\text{Sm}^*$ と ν のスピンの向きは逆向きであり、 $^{152}\text{Sm}^*$ と ν の運動量の向きも逆向きであるから $^{152}\text{Sm}^*$ と ν のヘリシティは等しい。

さらに、(2) の反応で、 $^{152}\text{Sm}^*$ と γ のスピンの向きが等しいので、 $^{152}\text{Sm}^*$ の運動方向の前方に放出された γ と $^{152}\text{Sm}^*$ のヘリシティは等しい。したがって、 $^{152}\text{Sm}^*$ の前方に放出された γ のヘリシティを測定することによって、 ν のヘリシティを知ることができる。

実験装置の配置を図 2 に示してある。

前方に放出された γ を選択的に拾うために、 Sm_2O_3 で共鳴散乱させる。また、電子と γ のコンプトン散乱の断面積がスピンの向きによって異なることから、鉄の磁場を反転させて γ の計数率を比べることで、 γ のヘリシティが決まる。

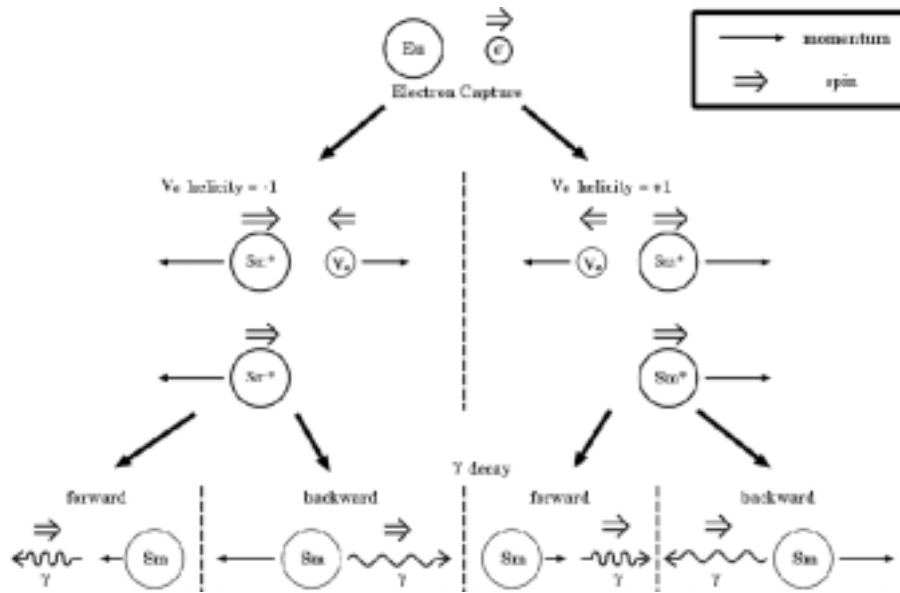


図 1: ヘリシティの関係

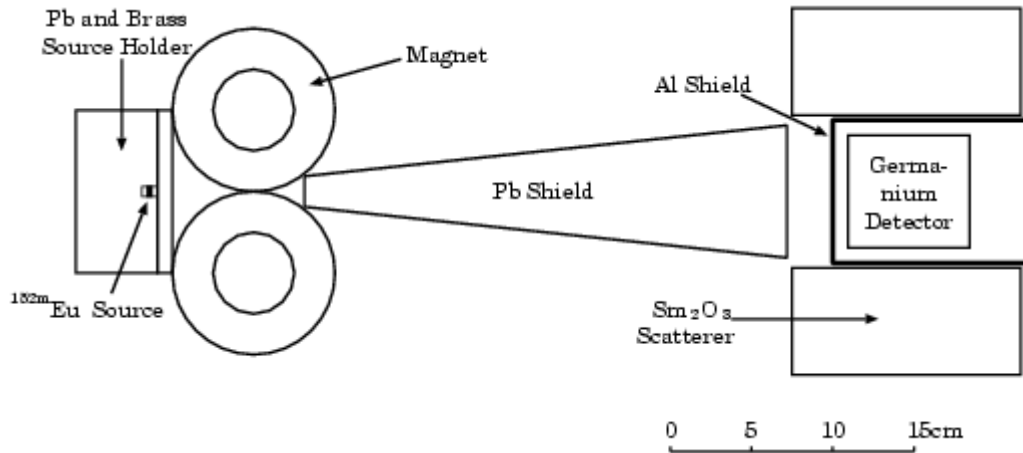


図 2: 実験装置

3 ニュートリノの質量

ニュートリノが質量を持った場合、左巻きニュートリノに対する右巻きニュートリノの割合は、ディラック方程式より

$$\left(\frac{m_\nu}{E_\nu + p_\nu c}\right)^2$$

となる。この実験では $E_\nu = 850\text{KeV}$ であり、また別の実験から $m_\nu < 7\text{eV}$ であるので、右巻きの含まれる割合は 10^{-10} となるので、もしこの実験でニュートリノの質量を測りたいのならば、 10^{-11}

のオーダーでヘリシティを図らなければならない。したがって、 10^{22} のカウント数があればよいことになる。

4 実験時間の検討とカウント数の見積もり

今回の実験では、一回当たり 10(g) の Eu_2O_3 が使用できる。Eu の同位体で ^{151}Eu の占める割合は 47.8% で、 Eu_2O_3 の分子量は 351.93 であるから、 Eu_2O_3 10(g) 中に含まれる ^{152}Eu の数は、

$$10 \times \frac{1}{351.93} \times 6.02 \times 10^{23} \times 0.478 \times 2 = 1.64 \times 10^{22} (\text{個})$$

である。

次に、熱中性子線を照射して ^{152}Eu ができる過程を考える。



(3) の散乱断面積は 3300(b) で、この実験で使用できる熱中性子線のフラックスは $2.0 \times 10^{13} (\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$ である。照射開始から時間 $t(\text{sec})$ たった時の ^{151}Eu の数を $M(t)$ (個) とすると、

$$\dot{M}(t) = -2.0 \times 10^{13} \times 3300 \times 10^{-24} \times M(t)$$

よって

$$M(t) = 1.64 \times 10^{22} \times \exp(-6.6 \times 10^{-8}t)$$

となる。時刻 t での ^{152}Eu の数を $N(t)$ (個) とすると、 ^{152}Eu の寿命は $\tau=13.38(\text{h})$ であるから、

$$\begin{aligned} \dot{N}(t) &= -\frac{1}{\tau}N(t) - \dot{M}(t) \\ &= -(13.38 \times 3600)^{-1} \times N(t) + 1.08 \times 10^{15} \times \exp(-6.6 \times 10^{-8}t) \end{aligned}$$

となる。計算の結果、 $N(t)$ が最大となるのは照射開始から約 3 日後となる。今回の実験では、照射時間は最大 1 時間までであるから、1 時間照射することにする。

照射後の ^{152}Eu の数 $N(3600)$ は 3.7×10^{18} (個) であるから、計測時間を $\tau=13.38(\text{h})$ とすると、その間に放出される γ は、

$$3.7 \times 10^{18} \times (1 - e^{-1}) = 2.4 \times 10^{18} (\text{個})$$

である。

次に、放出された γ が検出器に到達する確率を考える。

図 1 で、 γ が通過する鉄の厚さは約 2(cm) で、鉛の厚さは 35(cm) である。散乱体は半径 10.5(cm)、幅 7(cm)、高さ 14(cm) である。鉄の平均自由行程は約 2(cm)、散乱体の平均自由行程は約 14(cm) であり、散乱体から見た検出器の立体角は、平均すると 0.91 程度であるから、 γ が検出器に到達する確率は大体次のようなものになる。

$$e \times (1 - e^{-1}) \times \frac{\pi(10.5^2 - 3.5^2)}{4\pi(35^2 + 7^2)} \times \frac{0.91}{4\pi} = 3.2 \times 10^{-4}$$

したがって、熱中性子線を 1 時間照射して、14 時間程度計測すると、

$$2.4 \times 10^{18} \times 3.2 \times 10^{-4} = 7.7 \times 10^{14} (\text{回})$$

のカウント数が得られる。

つまり、この実験によってニュートリノの質量の有無を決定することはできないが、ヘリシティ測定の精度をよくすることはできるはずである。

5 その他に考えられる精度の向上

精度の向上、もしくは E_ν を減らすことによって、ニュートリノの質量を測ることができるかもしれない。方法としては

- ^{152}Eu の代わりになる物質を探す。
- ガンマ線の偏極を見ることができる代替のものを探す。

がある。