

メラー散乱を用いた  $\beta$ 崩壊における Parity 対称  
性の破れの検証

2009 年度課題研究 P2 メラー班

2010 年 4 月 6 日

## 概要

弱い相互作用ではパリティが破れていると考えられている。ベータ崩壊で放出される電子のスピンの運動方向とは逆向きに偏っているのだ。今回の我々の実験では、メラー散乱(電子電子散乱)を用いて、ベータ崩壊におけるパリティの破れを観測した。メラー散乱は衝突電子のスピンの向きが互いに反平行のときに、平行のときよりも散乱断面積が大きくなる。そこで、ベータ崩壊によりSr線源から出た電子(運動方向に偏極)を、磁化させてスピンの向きを入射電子の運動方向に対して反並行または平行に偏極させたターゲット(Ni箔)にぶつけ、散乱電子の個数の違い(アシンメトリー)を観測した。今回の実験では、1000keVの電子においてアシンメトリー  $0.0210 \pm 0.0088$ (理論値 0.01398)を得た。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>Theory</b>	<b>3</b>
1.1	V-A 理論 . . . . .	3
1.2	Møller 散乱 . . . . .	5
<b>第 2 章</b>	<b>実験装置</b>	<b>10</b>
2.1	装置の概要 . . . . .	10
2.2	Spectrometer の構造 . . . . .	11
2.3	線源 . . . . .	11
2.4	target と target holder . . . . .	12
2.5	Ditector . . . . .	12
<b>第 3 章</b>	<b>予備実験およびシミュレーション</b>	<b>14</b>
3.1	検出器 . . . . .	14
3.2	スペクトロメーター . . . . .	14
3.3	Møller 散乱 . . . . .	16
<b>第 4 章</b>	<b>本実験</b>	<b>19</b>
4.1	本実験の目標 . . . . .	19
4.2	本実験のセットアップ . . . . .	19
4.3	結果・解析 . . . . .	19
4.4	アシンメトリー . . . . .	22
4.5	考察 . . . . .	22
4.6	反省と課題 . . . . .	24
<b>第 5 章</b>	<b>謝辞</b>	<b>25</b>
付録 A	理論 Part の補足	27
付録 B	軌道計算のプログラム	29
付録 C	DAQ のソースコード	44

# 第1章 Theory

## 1.1 V-A理論

$\beta$ 崩壊 ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ) は弱い相互作用により引き起こされる反応であり、Parity 対称性を破ることが知られている。1958年 Feynmann, Gell-Mann により  $\beta$ 崩壊の不変散乱振幅の形として、次の形のものが考え出された。

$$\mathcal{M} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} (\bar{u}_p \gamma_\mu (1 - \gamma^5) u_n) (\bar{u}_{\bar{\nu}} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) u_e) \quad (1.1)$$

これは vector 型 ( $\bar{u}\gamma^\mu u$ ) と axial vector 型 ( $\bar{u}\gamma^\mu\gamma^5 u$ ) が同じ強さで逆向きに混じっているため V-A 型と呼ばれる。<sup>1</sup>  $\beta$ 崩壊の確率は  $|\mathcal{M}|^2$  に比例するので以下、これを計算する。

$$\begin{aligned} |\mathcal{M}|^2 &= \frac{G_F^2}{2} \{ \bar{u}_p \gamma^\mu (1 - \gamma^5) u_n \} \{ \bar{u}_p \gamma^\nu (1 - \gamma^5) u_n \}^* \{ \bar{u}_{\bar{\nu}} \gamma_\mu (1 - \gamma^5) u_e \} \{ \bar{u}_{\bar{\nu}} \gamma_\nu (1 - \gamma^5) u_e \}^* \\ &= \frac{G_F^2}{2} \{ \bar{u}_p \gamma^\mu (1 - \gamma^5) u_n \} \{ \bar{u}_n (1 + \gamma^5) \gamma^\nu u_p \} \{ \bar{u}_{\bar{\nu}} \gamma_\mu (1 - \gamma^5) u_e \} \{ \bar{u}_e (1 + \gamma^5) \gamma_\nu u_{\bar{\nu}} \} \end{aligned} \quad (1.2)$$

始状態の中性子についてはスピンの平均、終状態の陽子、反ニュートリノについてはスピンの和をとる。スピン和の公式は feynman slash を使って

$$\sum_{spins} (\bar{u}u) = \not{p} + m \quad (1.3)$$

と、書ける。終状態の電子は偏極しており、射影演算子を使って、

$$\bar{u}_e u_e = (\not{p}_e + m) \frac{1 + \gamma^5 s \not{a}}{2} = (\not{p}_e + m) \frac{1 + \gamma^5 s a_\mu \gamma^\mu}{2} \quad (1.4)$$

ここで、 $a^\mu$  は4元偏極ベクトル、 $s = \pm 1$ 。よって、 $|\mathcal{M}|^2$  は、

$$\begin{aligned} |\mathcal{M}|^2 &= \frac{G_F^2}{4} tr[(\not{p}_p + m_p) \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (\not{p}_n + m_n) (1 + \gamma^5) \gamma^\nu] \\ &\quad tr[(\not{p}_{\bar{\nu}} + m_{\bar{\nu}}) \gamma_\mu (1 - \gamma^5) (\not{p}_e + m_e) (1 + \gamma^5 s \not{a}) (1 + \gamma^5) \gamma_\nu] \end{aligned} \quad (1.5)$$

<sup>1</sup>実際には hadron の項は  $\bar{u}_p \gamma_\mu (1 - 1.26\gamma^5) u_n$  となる。

はじめ原子が静止している系で考えると、陽子や中性子の運動エネルギーは質量に比べてずっと小さく無視できる。またニュートリノの質量は非常に小さくこれも無視できる。つまり、

$$\not{p}_n + m_n = p_{n0}(\gamma^0 - \frac{p_{ni}}{p_{n0}}\gamma^i) + m_n \simeq m_n(\gamma^0 + 1) \quad (1.6)$$

$$\not{p}_p + m_p \simeq m_p(\gamma^0 + 1) \quad (1.7)$$

$$\not{p}_{\bar{\nu}} + m_{\bar{\nu}} \simeq \not{p}_{\bar{\nu}} \quad (1.8)$$

よって、

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{G_F^2 m_p m_n}{4} \text{tr}[(\gamma^0 + 1)\gamma^\mu(1 - \gamma^5)(\gamma^0 + 1)(1 + \gamma^5)\gamma^\nu] \times \text{tr}[p_{\bar{\nu}}^\alpha \gamma_\alpha \gamma_\mu (1 - \gamma^5)(p_e^\beta \gamma_\beta + m_e)(1 + \gamma^5 s a^\delta \gamma_\delta)(1 + \gamma^5)\gamma_\nu] \quad (1.9)$$

ここから trace の計算をする。まず前半は、

$$\begin{aligned} & \text{tr}[(\gamma^0 + 1)\gamma^\mu(1 - \gamma^5)(\gamma^0 + 1)(1 + \gamma^5)\gamma^\nu] \\ &= \text{tr}[(\gamma^0 + 1)\gamma^\mu\{(\gamma^0 + 1) + (\gamma^0 - 1)\gamma^5\}(1 + \gamma^5)\gamma^\nu] \\ &= 2\text{tr}[(\gamma^0 + 1)\gamma^\mu\gamma^0(1 + \gamma^5)\gamma^\nu] = 8(2g^{0\mu}g^{0\nu} - g^{\mu\nu}) \end{aligned} \quad (1.10)$$

後半は、

$$\begin{aligned} & \text{tr}[p_{\bar{\nu}}^\alpha \gamma_\alpha \gamma_\mu (1 - \gamma^5)(p_e^\beta \gamma_\beta + m_e)(1 + \gamma^5 s a^\delta \gamma_\delta)(1 + \gamma^5)\gamma_\nu] \\ &= \text{tr}[p_{\bar{\nu}}^\alpha \gamma_\alpha \gamma_\mu (p_e^\beta \gamma_\beta + m_e)(1 + \gamma^5 s a^\delta \gamma_\delta)(1 + \gamma^5)(1 + \gamma^5)\gamma_\nu] \\ &= 2\text{tr}[p_{\bar{\nu}}^\alpha \gamma_\alpha \gamma_\mu (p_e^\beta \gamma_\beta + m_e)(1 - s a^\delta \gamma_\delta \gamma^5)(1 + \gamma^5)\gamma_\nu] \\ &= 2\text{tr}[p_{\bar{\nu}}^\alpha \gamma_\alpha \gamma_\mu (p_e^\beta \gamma_\beta + m_e)(1 - s a^\delta \gamma_\delta)(1 + \gamma^5)\gamma_\nu] \\ &= 8p_{\bar{\nu}}^\alpha p_e^\beta (g_{\alpha\mu}g_{\beta\nu} - g_{\alpha\beta}g_{\mu\nu} + g_{\alpha\nu}g_{\mu\beta}) - 8p_{\bar{\nu}}^\alpha m_e s a^\delta (g_{\alpha\mu}g_{\delta\nu} - g_{\alpha\delta}g_{\mu\nu} + g_{\alpha\nu}g_{\mu\delta}) \\ & \quad + 8ip_{\bar{\nu}}^\alpha p_e^\beta \epsilon_{\alpha\mu\beta\nu} - 8ip_{\bar{\nu}}^\alpha m_e s a^\delta \epsilon_{\alpha\mu\delta\nu} \end{aligned} \quad (1.11)$$

結局、

$$\begin{aligned} |\mathcal{M}|^2 &= 16G_F^2 m_p m_n (2g^{0\mu}g^{0\nu} - g^{\mu\nu}) \times \{p_{\bar{\nu}}^\alpha p_e^\beta (g_{\alpha\mu}g_{\beta\nu} - g_{\alpha\beta}g_{\mu\nu} + g_{\alpha\nu}g_{\mu\beta}) \\ & \quad - p_{\bar{\nu}}^\alpha m_e s a^\delta (g_{\alpha\mu}g_{\delta\nu} - g_{\alpha\delta}g_{\mu\nu} + g_{\alpha\nu}g_{\mu\delta}) + ip_{\bar{\nu}}^\alpha p_e^\beta \epsilon_{\alpha\mu\beta\nu} - ip_{\bar{\nu}}^\alpha m_e s a^\delta \epsilon_{\alpha\mu\delta\nu}\} \\ &= 16G_F^2 m_p m_n (2g^{0\mu}g^{0\nu} - g^{\mu\nu}) \{(p_{\bar{\nu}\mu} p_{e\nu} + p_{\bar{\nu}\nu} p_{e\mu} - g_{\mu\nu} p_{\bar{\nu}} \cdot p_e) \\ & \quad - m_e s (p_{\bar{\nu}\mu} a_\nu + p_{\bar{\nu}\nu} a_\mu - g_{\mu\nu} p_{\bar{\nu}} \cdot a)\} \\ &= 64G_F^2 m_p m_n p_{\bar{\nu}0} p_{e0} (1 - m_e s \frac{a_0}{p_{e0}}) \end{aligned} \quad (1.12)$$

偏極ベクトル  $a^\mu$  は空間部分が  $\mathbf{p}_e$  に並行なものをとると

$$a = \left( \frac{|\mathbf{p}_e|}{m}, \frac{p_e^0}{m} \frac{\mathbf{p}_e}{|\mathbf{p}_e|} \right) \quad (1.13)$$

$\beta$ 崩壊の確率  $P(s)$  は  $|\mathcal{M}|^2$  に比例する。つまり、

$$P(s) \propto 1 - m_e s \frac{a_0}{p_{e0}} = 1 - s \frac{|\mathbf{p}_e|}{p_{e0}} = 1 - s\beta \quad (1.14)$$

よって偏極度は、

$$\frac{P(+1) - P(-1)}{P(+1) + P(-1)} = -\beta \quad (1.15)$$

## 1.2 Møller 散乱

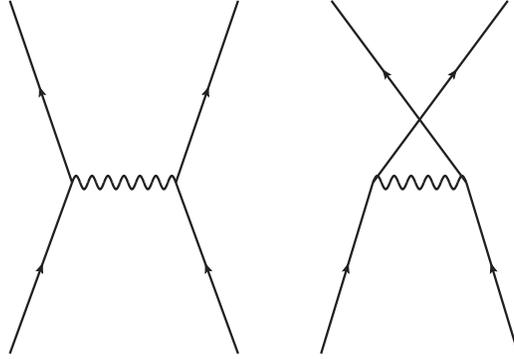


図 1.1: Møller 散乱の Feynman diagram

メラー散乱とは電子同士の散乱である ( $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$ )。fermion の同種粒子の散乱のため、この不変散乱振幅を最低次の近似で書くと

$$i\mathcal{M} = \bar{u}_3(-ie\gamma^\mu)u_1 \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p_3 - p_1)^2} \bar{u}_4(-ie\gamma^\nu)u_2 - \bar{u}_4(-ie\gamma^\mu)u_1 \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p_4 - p_1)^2} \bar{u}_3(-ie\gamma^\nu)u_2 \quad (1.16)$$

よって

$$\frac{|\mathcal{M}|^2}{e^4} = \left( \frac{1}{(p_3 - p_1)^2} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1) (\bar{u}_4 \gamma_\mu u_2) - \frac{1}{(p_4 - p_1)^2} (\bar{u}_4 \gamma^\mu u_1) (\bar{u}_3 \gamma_\mu u_2) \right) \left( \frac{1}{(p_3 - p_1)^2} (\bar{u}_1 \gamma^\mu u_3) (\bar{u}_2 \gamma_\mu u_4) - \frac{1}{(p_4 - p_1)^2} (\bar{u}_1 \gamma^\mu u_4) (\bar{u}_2 \gamma_\mu u_3) \right) \quad (1.17)$$

これを展開すると

$$\begin{aligned} \frac{|\mathcal{M}|^2}{e^4} &= \frac{1}{(p_3 - p_1)^4} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1 \bar{u}_1 \gamma^\nu u_3) (\bar{u}_4 \gamma_\mu u_2 \bar{u}_2 \gamma_\nu u_4) \\ &\quad + (\text{上の行で } p_3 \text{ と } p_4 \text{ を入れ替える}) \\ &\quad - \frac{1}{(p_3 - p_1)^2 (p_4 - p_1)^2} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1 \bar{u}_1 \gamma^\nu u_4 \bar{u}_4 \gamma_\mu u_2 \bar{u}_2 \gamma_\nu u_3) \\ &\quad - (\text{上の行で } p_3 \text{ と } p_4 \text{ を入れ替える}) \end{aligned} \quad (1.18)$$

始状態の電子は偏極している。終状態についてはスピンの和をとる。上式の1行目は

$$\begin{aligned}
2 \sum_{spins} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1 \bar{u}_1 \gamma^\nu u_3) &= \text{tr}((\not{p}_3 + m) \gamma^\mu (\not{p}_1 + m) (1 + s_1 \gamma^5 \not{d}_1 \gamma^\nu)) \\
&= \text{tr}((p_{3\rho} \gamma^\rho + m) \gamma^\mu (p_{1\sigma} \gamma^\sigma + m) (1 + s_1 \gamma^5 a_{1\alpha} \gamma^\alpha) \gamma^\nu) \\
&= 4p_{3\rho} p_{1\sigma} \text{tr}(g^{\rho\mu} g^{\sigma\nu} - g^{\rho\sigma} g^{\mu\nu} + g^{\rho\nu} g^{\mu\sigma}) + 4m^2 g^{\mu\nu} \\
&\quad - 4s_1 m i (p_{3\rho} a_{1\alpha} \epsilon^{\rho\mu\alpha\nu} + p_{1\sigma} a_{1\alpha} \epsilon^{\mu\sigma\alpha\nu}) \\
&= 4[p_3^\mu p_1^\nu + p_3^\nu p_1^\mu + (m^2 - p_3 \cdot p_1) g^{\mu\nu} - s_1 m i (p_1 - p_3)_\rho a_{1\alpha} \epsilon^{\rho\alpha\mu\nu}]
\end{aligned} \tag{1.19}$$

また同様にして

$$\sum_{spins} (\bar{u}_4 \gamma_\mu u_2 \bar{u}_2 \gamma_\nu u_4) = 2[p_{4\mu} p_{2\nu} + p_{4\nu} p_{2\mu} + (m^2 - p_4 \cdot p_2) g_{\mu\nu} - s_2 m i (p_2 - p_4)^\sigma a_2^\beta \epsilon_{\sigma\beta\mu\nu}] \tag{1.20}$$

$|\mathcal{M}|^2$  は実数であり虚部の項は最終的に消えることを使うと

$$\begin{aligned}
& \text{Re} \left[ \sum_{spins} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1 \bar{u}_1 \gamma^\nu u_3) (\bar{u}_4 \gamma_\mu u_2 \bar{u}_2 \gamma_\nu u_4) \right] \\
&= \text{Re} \left[ 4 \{ p_3^\mu p_1^\nu + p_3^\nu p_1^\mu + (m^2 - p_3 \cdot p_1) g^{\mu\nu} - s_1 m i (p_1 - p_3)_\rho a_{1\alpha} \epsilon^{\rho\alpha\mu\nu} \} \times \right. \\
&\quad \left. \{ p_{4\mu} p_{2\nu} + p_{4\nu} p_{2\mu} + (m^2 - p_4 \cdot p_2) g_{\mu\nu} - s_2 m i (p_2 - p_4)^\sigma a_2^\beta \epsilon_{\sigma\beta\mu\nu} \} \right] \\
&= 4 \{ p_3^\mu p_1^\nu + p_3^\nu p_1^\mu + (m^2 - p_3 \cdot p_1) g^{\mu\nu} \} \{ p_{4\mu} p_{2\nu} + p_{4\nu} p_{2\mu} + (m^2 - p_4 \cdot p_2) g_{\mu\nu} \} \\
&\quad - 4s_1 s_2 m^2 (p_1 - p_3)_\rho a_{1\alpha} \epsilon^{\rho\alpha\mu\nu} (p_2 - p_4)^\sigma a_2^\beta \epsilon_{\sigma\beta\mu\nu} \\
&= 4 \{ 2(p_3 \cdot p_4) (p_1 \cdot p_2) + 2(p_3 \cdot p_2) (p_4 \cdot p_1) \\
&\quad + 2(p_3 \cdot p_1) (m^2 - p_4 \cdot p_2) + 2(p_4 \cdot p_2) (m^2 - p_3 \cdot p_1) \\
&\quad + 4(m^2 - p_3 \cdot p_1) (m^2 - p_4 \cdot p_2) \} \\
&\quad + 8s_1 s_2 m^2 (p_1 - p_3)_\rho a_{1\alpha} (p_2 - p_4)^\sigma a_2^\beta (\delta_\sigma^\rho \delta_\beta^\alpha - \delta_\beta^\rho \delta_\sigma^\alpha)
\end{aligned} \tag{1.21}$$

ここで4元運動量保存より  $p_1 + p_2 = p_3 + p_4$ 。これと  $p^2 = m^2$  より  $p_1 \cdot p_2 = p_3 \cdot p_4$ ,  $p_1 \cdot p_3 = p_2 \cdot p_4$ ,  $p_1 \cdot p_4 = p_2 \cdot p_3$ 。また、 $p_1 \cdot a_1 = 0$ ,  $p_2 \cdot a_2 = 0$ 。よって、

$$\begin{aligned}
& \text{Re} \left[ \sum_{spins} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1 \bar{u}_1 \gamma^\nu u_3) (\bar{u}_4 \gamma_\mu u_2 \bar{u}_2 \gamma_\nu u_4) \right] \\
&= 4 \{ 2(p_1 \cdot p_2)^2 + 2(p_1 \cdot p_4)^2 + 4(p_3 \cdot p_1) (m^2 - p_3 \cdot p_1) + 4(m^2 - p_3 \cdot p_1)^2 \} \\
&\quad - 8s_1 s_2 m^2 (p_1 - p_3)^2 (a_1 \cdot a_2) - 8s_1 s_2 m^2 \{ (p_1 - p_3) \cdot a_2 \} \{ (p_2 - p_4) \cdot a_1 \} \\
&= 8 \{ (p_1 \cdot p_2)^2 + (p_1 \cdot p_4)^2 + 2m^2 (m^2 - p_3 \cdot p_1) \} \\
&\quad - 8s_1 s_2 m^2 (2m^2 - 2p_1 \cdot p_3) (a_1 \cdot a_2) - 8s_1 s_2 m^2 (p_4 \cdot a_2) (p_3 \cdot a_1)
\end{aligned} \tag{1.22}$$

次に式 (18) の 3 行目の計算をする。

$$\begin{aligned}
& 4 \sum_{spins} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1 \bar{u}_1 \gamma^\nu u_4 \bar{u}_4 \gamma_\mu u_2 \bar{u}_2 \gamma_\nu u_3) \\
&= tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) (1 + s_2 \gamma^5 \not{d}_2) \gamma_\nu (\not{p}_3 + m) \gamma^\mu (\not{p}_1 + m) (1 + s_1 \gamma^5 \not{d}_1) \gamma^\nu] \\
&= tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) \gamma_\nu (\not{p}_3 + m) \gamma^\mu (\not{p}_1 + m) \gamma^\nu] \\
&\quad + (s_1 \text{の 1 次の項}) + (s_2 \text{の 1 次の項}) \\
&\quad + s_1 s_2 tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) \gamma^5 \not{d}_2 \gamma_\nu (\not{p}_3 + m) \gamma^\mu (\not{p}_1 + m) \gamma^5 \not{d}_1 \gamma^\nu]
\end{aligned} \tag{1.23}$$

$(s_1 \text{の 1 次の項}) + (s_2 \text{の 1 次の項})$  は trace の中に  $\gamma^5$  がかかっており純虚数となるが  $|\mathcal{M}|^2$  は実数なので結局この 2 つの項は 0 となる。よって、

$$\begin{aligned}
& 4 \sum_{spins} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1 \bar{u}_1 \gamma^\nu u_4 \bar{u}_4 \gamma_\mu u_2 \bar{u}_2 \gamma_\nu u_3) \\
&= tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) \gamma_\nu (\not{p}_3 + m) \gamma^\mu (\not{p}_1 + m) \gamma^\nu] \\
&\quad + s_1 s_2 tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) \gamma^5 \not{d}_2 \gamma_\nu (\not{p}_3 + m) \gamma^\mu (\not{p}_1 + m) \gamma^5 \not{d}_1 \gamma^\nu] \\
&= tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) \gamma_\nu (\not{p}_3 \gamma^\mu \not{p}_1 + m \gamma^\mu \not{p}_1 + m \not{p}_3 \gamma^\mu + m^2 \gamma^\mu) \gamma^\nu] \\
&\quad - s_1 s_2 tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) \not{d}_2 \gamma_\nu (\not{p}_3 - m) \gamma^\mu (\not{p}_1 - m) \gamma^5 \not{d}_1 \gamma^\nu] \\
&= tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) (-2 \not{p}_1 \gamma^\mu \not{p}_3 + 4m(p_1 + p_3)^\mu - 2m^2 \gamma^\mu)] \\
&\quad - s_1 s_2 tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) \not{d}_2 \gamma_\nu (\not{p}_3 \gamma^\mu \not{p}_1 - m \gamma^\mu \not{p}_1 - m \not{p}_3 \gamma^\mu + m^2 \gamma^\mu) \not{d}_1 \gamma^\nu] \\
&= tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (-2 \not{p}_2 \not{p}_1 \gamma^\mu \not{p}_3 - 2m \not{p}_1 \gamma^\mu \not{p}_3 + 4m(p_1 + p_3)^\mu (\not{p}_2 + m) - 2m^2 \not{p}_2 \gamma^\mu - 2m^3 \gamma^\mu)] \\
&\quad - s_1 s_2 tr[(\not{p}_4 + m) \gamma_\mu (\not{p}_2 + m) \not{d}_2 (2\gamma^\mu \not{p}_1 \not{d}_1 \not{p}_3 + 2\not{p}_3 \not{d}_1 \not{p}_1 \gamma^\mu \\
&\quad + 2m \not{d}_1 \not{p}_1 \gamma^\mu + 2m \not{d}_1 \gamma^\mu \not{p}_3 + 4m^2 a_1^\mu)] \\
&= tr[(\not{p}_4 + m) (-8(p_2 \cdot p_1) \not{p}_3 + 4m \not{p}_1 \not{p}_3 + 4m(\not{p}_1 + \not{p}_3)(\not{p}_2 + m) + 4m^2 \not{p}_2 - 8m^3)] \\
&\quad - 4s_1 s_2 tr[(\not{p}_4 + m) (-m \not{d}_2 \not{p}_1 \not{d}_1 \not{p}_3 + \not{d}_2 \not{p}_3 \not{d}_1 \not{p}_1 \not{p}_2 - \not{p}_2 \not{p}_3 \not{d}_1 \not{p}_1 \not{d}_2 - \not{p}_2 \not{d}_2 \not{p}_1 \not{d}_1 \not{p}_3 \\
&\quad + m \not{p}_3 \not{d}_1 \not{p}_1 \not{d}_2 + m \not{d}_2 \not{p}_1 \not{d}_1 \not{p}_3 + m \not{d}_2 \not{d}_1 \not{p}_1 \not{p}_2 + m \not{p}_2 \not{p}_1 \not{d}_1 \not{d}_2 \\
&\quad - m^2 \not{p}_1 \not{d}_1 \not{d}_2 - m \not{d}_1 \not{d}_2 \not{p}_2 \not{p}_3 + 4m^2 (a_2 \cdot a_1) \not{p}_3 + 2m^2 \not{d}_1 (\not{p}_2 + m) \not{d}_2)] \\
&= -32(p_2 \cdot p_1)(p_4 \cdot p_3) + 16m^2(p_1 \cdot p_3) + 16m^2(p_1 + p_3) \cdot (p_2 + p_4) + 16m^2(p_2 \cdot p_4) - 8m^4 \\
&\quad + (s_1 s_2 \text{の項})(長いので省略)
\end{aligned} \tag{1.24}$$

これを前と同様に整理すると

$$\begin{aligned}
& \sum_{spins} (\bar{u}_3 \gamma^\mu u_1 \bar{u}_1 \gamma^\nu u_4 \bar{u}_4 \gamma_\mu u_2 \bar{u}_2 \gamma_\nu u_3) \\
&= 8(p_1 \cdot p_2)(2m^2 - p_1 \cdot p_2) \\
&\quad + 4s_1 s_2 [(a_1 \cdot a_2)(m^4 - 2m^2(p_1 \cdot p_2) - (p_1 \cdot p_3)^2 - (p_1 \cdot p_4)^2 + (p_1 \cdot p_2)^2) \\
&\quad + (p_1 \cdot p_4)((p_4 \cdot a_1)(p_1 \cdot a_2) + (p_2 \cdot a_1)(p_3 \cdot a_2)) \\
&\quad + (p_1 \cdot p_3)((p_2 \cdot a_1)(p_4 \cdot a_2) + (p_3 \cdot a_1)(p_1 \cdot a_2)) \\
&\quad - (p_1 \cdot p_2)((p_2 \cdot a_1)(p_1 \cdot a_2) + (p_3 \cdot a_1)(p_4 \cdot a_2) + (p_4 \cdot a_1)(p_3 \cdot a_2))]
\end{aligned} \tag{1.25}$$

今、重心系で90度散乱する場合を考える。(本実験では90度散乱したときの電子を主に観測できるような設計になっている。)この時重心系の電子の速度を $\beta$ 、Lorentz factorを $\gamma$ とおくと

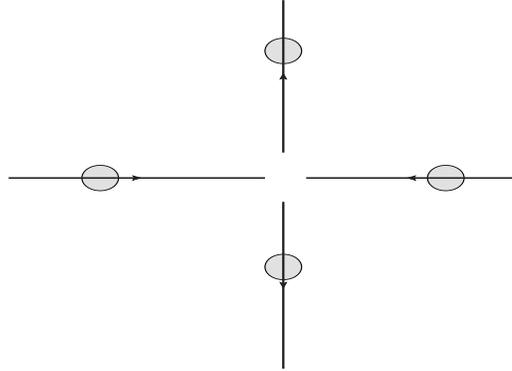


図 1.2: 重心系の90°散乱

$$\begin{aligned}
p_1 &= (\gamma m, \gamma \beta m, 0, 0) \\
p_2 &= (\gamma m, -\gamma \beta m, 0, 0) \\
p_3 &= (\gamma m, 0, \gamma \beta m, 0) \\
p_4 &= (\gamma m, 0, -\gamma \beta m, 0) \\
a_1 &= (\gamma \beta \cos \theta, \gamma \cos \theta, \sin \theta, 0) \\
a_2 &= (\gamma \beta, -\gamma, 0, 0)
\end{aligned} \tag{1.26}$$

ここで、 $\theta$ は磁化の向き（本実験では $\theta$ は30度または210度）。内積は

$$\begin{aligned}
p_1 \cdot p_2 &= m^2 \gamma^2 (1 + \beta^2) \\
p_1 \cdot p_3 &= p_1 \cdot p_4 = p_2 \cdot p_3 = p_2 \cdot p_4 = m^2 \gamma^2 \\
p_1 \cdot a_1 &= p_2 \cdot a_2 = 0 \\
p_1 \cdot a_2 &= 2m\gamma^2 \beta \\
p_2 \cdot a_1 &= 2m\gamma^2 \beta \cos \theta \\
p_3 \cdot a_1 &= m\gamma^2 \beta \cos \theta - m\gamma \beta \sin \theta \\
p_4 \cdot a_1 &= m\gamma^2 \beta \cos \theta + m\gamma \beta \sin \theta \\
p_3 \cdot a_2 &= p_4 \cdot a_2 = m\gamma^2 \beta
\end{aligned} \tag{1.27}$$

これらを $|\mathcal{M}|^2$ に代入すると

$$\sum_{spins} |\mathcal{M}|^2 = \frac{4e^4}{\beta^4} [(6\beta^4 + 2\beta^2 + 1) + s_1 s_2 \cos \theta (4\beta^4 + 2\beta^2 + 1)] \tag{1.28}$$

よって、 $\alpha$ を微細構造定数として重心系の微分散乱断面積は

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{CM} = \sum_{spins} |\mathcal{M}|^2 \frac{1}{64\pi^2 E_{CM}^2} = \frac{\alpha^2}{\gamma^2 \beta^4 m^2} [(6\beta^4 + 2\beta^2 + 1) + s_1 s_2 \cos \theta (4\beta^4 + 2\beta^2 + 1)] \tag{1.29}$$

## 第2章 実験装置

### 2.1 装置の概要

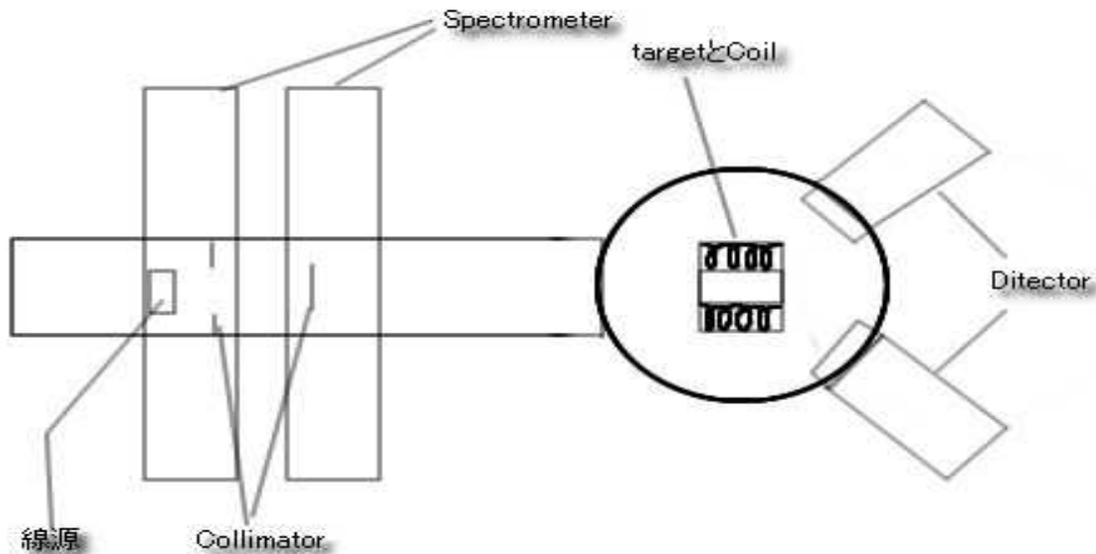


図 2.1: 装置の概要

実験は図 2.1 のような装置で行った。線源から  $\beta$  線を飛ばし Spectrometer (詳しくは後述) と Collimator によって  $\beta$  線のエネルギーを収束、選択をした。そして右の Chamber 内の周りの Coil で磁化させた target に当て、散乱してきた 2 個の電子を Chamber に取り付けた Detector で検出した。Detector は、重心系で  $90^\circ$  散乱したものが入射する角度にセットしてある。エネルギーを収束する理由は möller 散乱の散乱断面積が小さいのでより Acceptance を稼ぐため、また選択する理由は観測した 2 個の電子のエネルギーの和が入射電子のエネルギーと等しいことによ

てそれらの電子が møller 散乱したと判断するので入射電子のエネルギーの値が必要なためである。target を磁化させることで target の電子を偏極させるが、なるべく条件を等しくするために流す電流は一定時間ごとに向きを反転させた。実際の装置の画像は図 2.2。



図 2.2: 装置

## 2.2 Spectrometer の構造

Spectrometer は 2002 年度 P2 の同様の実験に使用した Spectrometer を使用した。これは二つのギャップ型ソレノイドからなる。図 2.3 のような構造で Coil の巻き数は 280 巻、電磁石に電流を流し隙間から漏れる磁場によって  $\beta$  線の軌道を曲げる。ソレノイドを二つ使う理由は一つ目のソレノイドの磁場が弱い中心を通った曲げきれなかった  $\beta$  線を二つ目のソレノイドで曲げより Acceptance を稼ぐためである。

## 2.3 線源

本実験では  $\beta$  線源に Sr を使用した。Sr の崩壊様式は



であり、長寿命の Sr と短寿命の Y の放射平衡となっている。

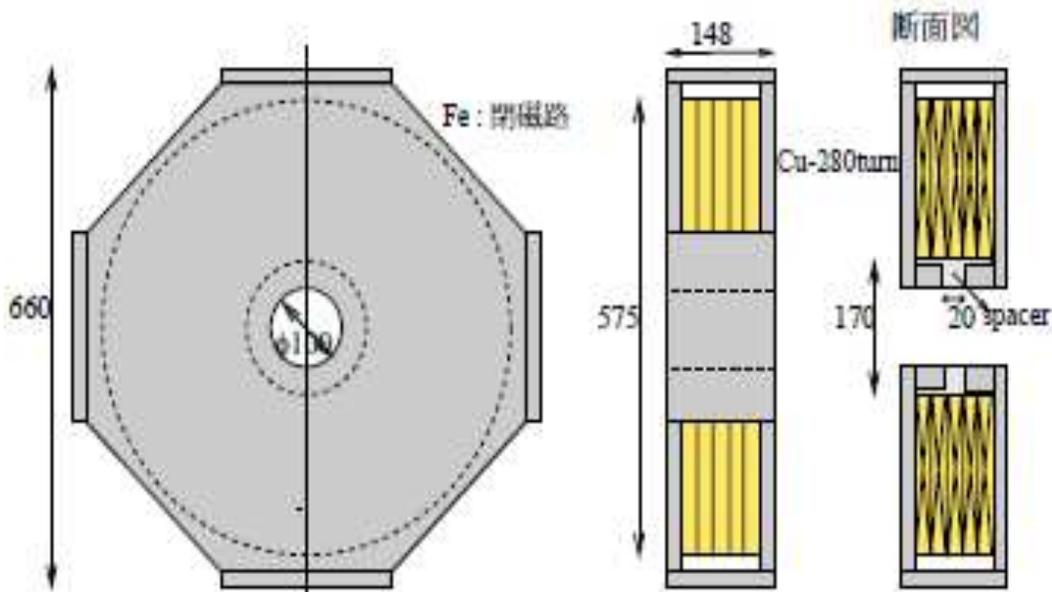


図 2.3: Spectrometer の構造

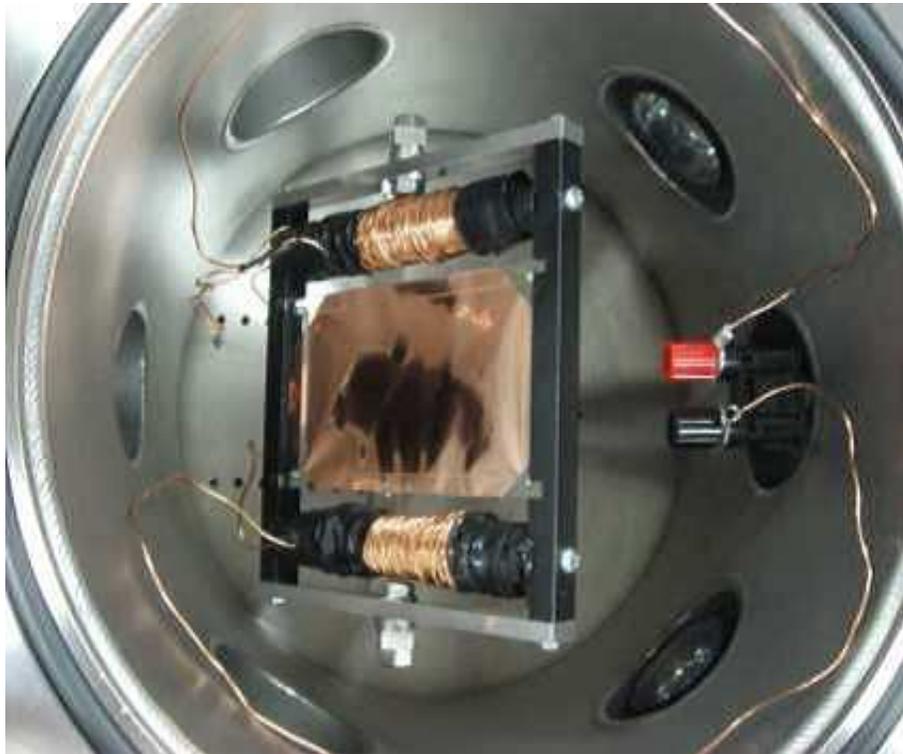
(出所) [http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/takeo\\_mt.pdf](http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/takeo_mt.pdf)

## 2.4 target と target holder

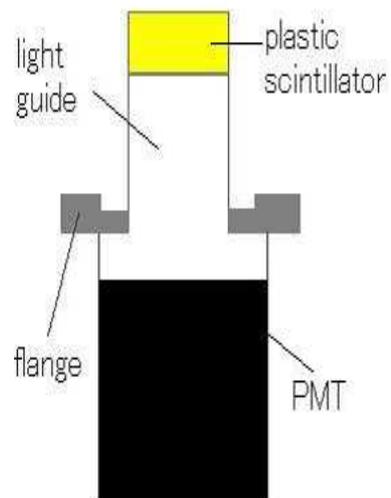
図 2.4 は target holder を Chamber 内に設置した写真である (写真の target は銅)。周りの Coil (300 巻) に電流を流し target を磁化させた。target は磁束が通るように target の端を設置する枠 (Fe 製) に接触させた。また target は入射する  $\beta$  線に対して 30 度傾けて設置した。

## 2.5 Ditector

図 2.5 は Ditector の断面図である。先端の scintillator から出る光を light guide で PMT に導く。scintillator と light guide の周りにアルミのマイラーを巻いた。scintillatoir と light guide はチェンバー内、PMT はチェンバーの外になるようにフランジにとりつけた。各々はオプティカルセメントで接着してある。



☒ 2.4: target holder



☒ 2.5: Ditector

# 第3章 予備実験およびシミュレーション

## 3.1 検出器

ADCを通じてPMTから得られるCs線源からの $\beta$ 線のスペクトルおよびペDESTALは図3.1・図3.2のようになった。

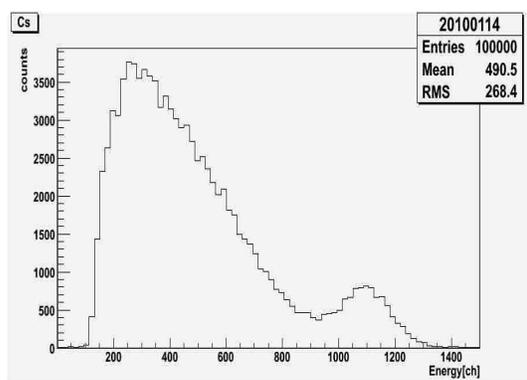


図 3.1: Cs  $\beta$ 線スペクトル

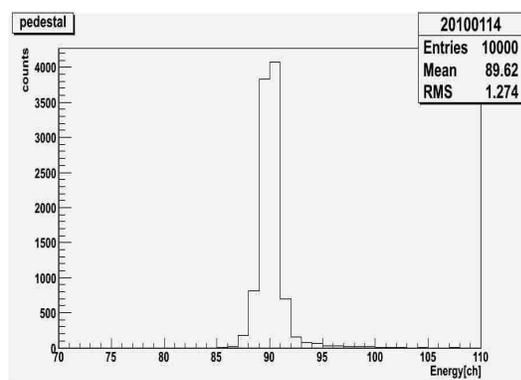


図 3.2: ペDESTAL

今回の実験ではこのCsの625keVコンバージョンラインの値とペDESTALの値から検出器のキャリブレーションを行うこととした。

## 3.2 スペクトロメーター

Poissonと呼ばれる磁場シミュレーションソフトを用いて、スペクトロメーターによる磁場のシミュレーションを行った。磁石にそれぞれ12Aと40Aを流した場合のシミュレーションでは磁力線の分布は図3.3のようになった。

このシミュレーションの磁場の値と、ガウスメーターで測定した磁場の値を比較したのが図3.4および図3.5である。図3.4は電流値を変えたときの磁石中心での磁場の値、図3.5は20Aの電流を流したときの、磁場のr依存を示したものである。

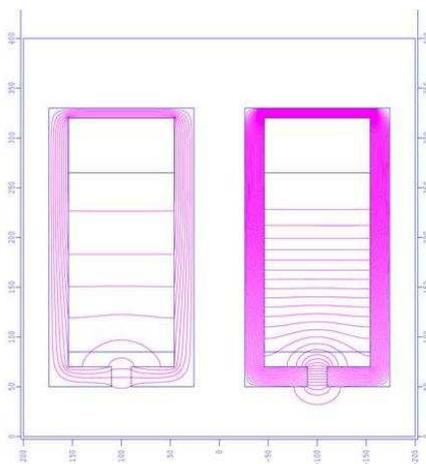


図 3.3: 12A-40A での磁力線シミュレーション

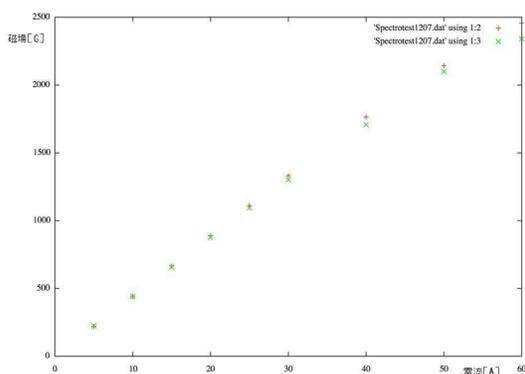


図 3.4: 磁石中心での磁場  
+ : シミュレーション値 × : 測定値

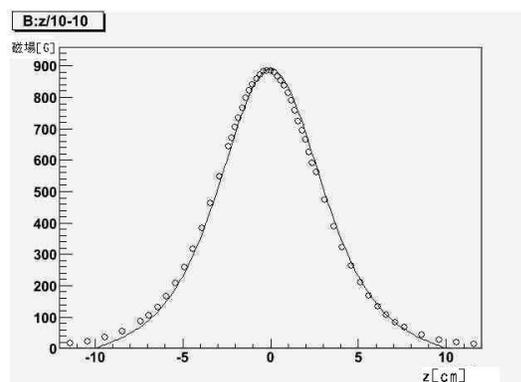


図 3.5: 磁場の r 依存  
+ : シミュレーション値 ○ : 測定値

図 3.4 で電流値を大きくしたとき、鉄が飽和磁化に近づき、透磁率が変化することがシミュレーションでは考慮に入っていないことの他は、シミュレーション値は実測値をよく再現していることが分かる。

この Poisson によるシミュレーションのデータを用いて C プログラムにより線源から出た電子の軌道をシミュレーションを行った。プログラムについては付録 B 参照。図 3.6 は磁石に 12A-40A の電流を流したときの運動エネルギー 1150keV の電子の軌道シミュレーションである。シミュレーションでは  $1150 \pm 10 [keV]$  程度の電子が収束した。線源は  $z = -0.14 [m]$ 、コリメーターはそれぞれ  $z = -0.09 \sim -0.08 [m]$ 、 $z = 0.00 \sim 0.01 [m]$  に設置してある。

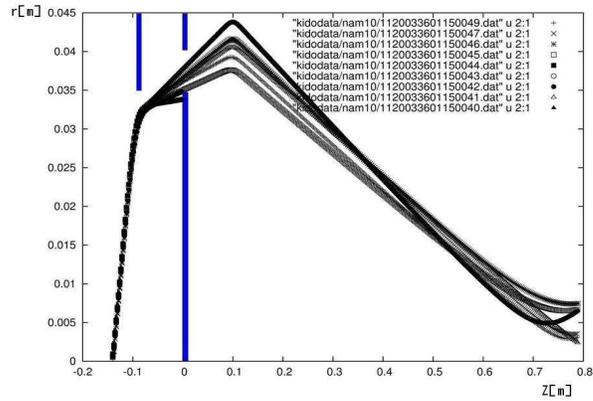


図 3.6: 12A-40A での 1150keV 電子の軌道シミュレーション

図 3.6 のセットアップで、PMTによりエネルギースペクトルを測定したものが図 3.7 である。検出器は  $z = 0.8[m]$  の位置に設置した。

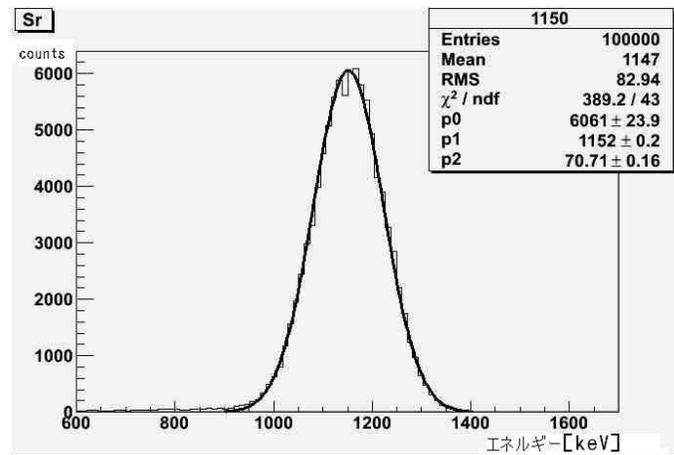


図 3.7: 図 3.6 のセットアップでのエネルギースペクトル

gaussian でフィットしたところ、収束エネルギーは  $1152 \pm 70[keV]$  となり、シミュレーションは良い精度で行われていることが確認できた。

### 3.3 Møller 散乱

予備実験として、アルミホイル ( $12\mu m$ ) で Møller 散乱の測定確認を行った。回路のセットアップは図 4.2 である。

シミュレーションにより求めた 1000keV の電子が収束するセットアップで実験を行った。ただし、チェンバーの設計の都合で、PMTが収束位置にセットできず、実際に 1000keV で収束しているかの確認はできていない。測定により得られたエネルギー分布は図 3.8 である。

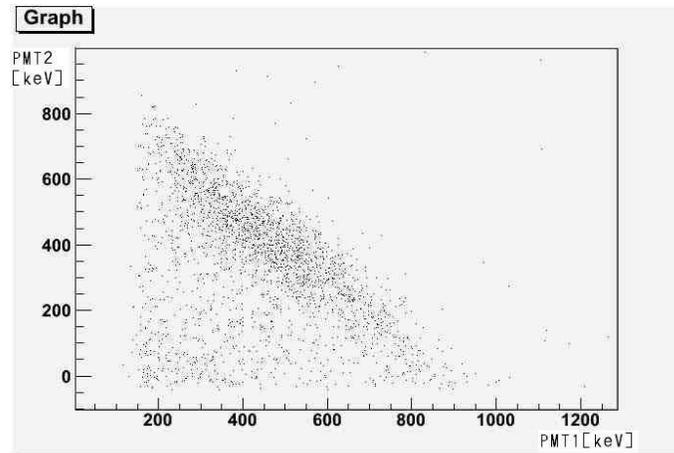


図 3.8: Møller 散乱確認

500keV-500keV のあたりに分布が集中し、Møller 散乱が確認できる。

2つの PMT のエネルギーの合計値の分布を示したものが図 3.9 である。

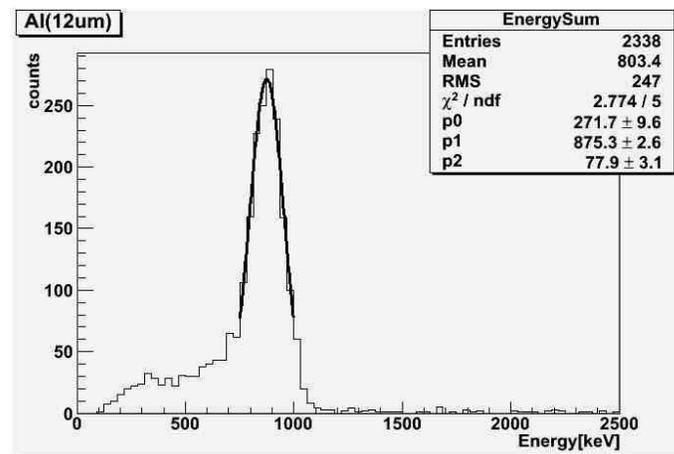


図 3.9: 2つの PMT のエネルギー合計値

ピーク値を gaussian でフィットすると  $857 \pm 78[\text{keV}]$  となった。シミュレーション値とは約 150keV のずれが生じている。理由として

1. 収束エネルギーがそもそもずれている

## 2. エネルギー損失による影響

の2つが考えられる。1については、確かめる術がないので、これ以上議論ができない。2について、 $12\mu\text{m}$ のAlでは、エネルギー損失は多く見積もっても30keV程度であるので、この大きなエネルギーの差は説明がつかない。しかし入射電子のエネルギーを測定している過去の実験も、同様に入射エネルギーよりも測定合計値の方が100keV以上エネルギーが小さいので、ターゲットにより電子のエネルギーが減衰しているのは間違いないだろうと考えられる。今回は入射エネルギーを測定することができないので、諸々の計算ではこの合計のピーク値を用いることとした。

# 第4章 本実験

## 4.1 本実験の目標

Møller 散乱をおこす2つの電子が Parallel のときか、Anti-parallel のときかで、散乱断面積が異なる。散乱断面積は Anti-parallel の方が大きいので、実際の観測では Anti-parallel のときの方が Møller 散乱する個数が多くなり、観測される Møller 散乱の個数も多くなると考えられる。実験で用いるターゲットには、スピン偏極しやすい Ni とスピン偏極しにくい Cu を用いた。Ni がスピン偏極するような電流をターゲット用電磁石に流すことで、Møller 散乱のアシンメトリーを観測できると予想される。また同じ電流を Cu の時に流せば、Cu はほとんどスピン偏極しないので、アシンメトリーは小さすぎて見えないと予想される。

## 4.2 本実験のセットアップ

スペクトロメーターの2つの電磁石に流す電流を 36[A] と 12[A] にし、ターゲット位置に 1000[keV] の電子を収束させる。用いたターゲットは Ni と Cu で、厚さはどちらも 5[ $\mu\text{m}$ ] である。ターゲット用の電磁石には 1.2[A] の電流を交互に向きを変えながら流す。電流の向きを反転させるには、RELAY-MPX(リレーマルチプレクサー)を用いた。これは図 4.1 のような CAMAC モジュールであり、表示されているアドレスに入力されている信号を IN から出力する装置である。2つの電源装置を用い、その1つは +1.2[A] を流すようにしてあり、もう1つは -1.2[A] を流すようにしてある。これの2つの電源装置の output を RELAY-MPX のアドレスに入れ、プログラムで操作し、60[s] ごとに接続するアドレスを入れ替える。これによって交互に電流の向きを反転させることができる。それに合わせて書き込むファイルも変えて、Parallel と Anti-parallel の時で別のファイルを作った。Møller 散乱した2つの電子はそれぞれ別の PMT で観測し、2つに同時に信号が出たときのみ ADC で書き込むように回路を組んだ。回路図は図 4.2 である。

## 4.3 結果・解析

実験により得られたデータは図 4.3 である。これは Ni の Anti-parallel のデータである。この図で濃くなっている帯が見て取れる。これは  $\text{PMT1} + \text{PMT2} = \text{Const.}$



图 4.1: RELAY-MPX

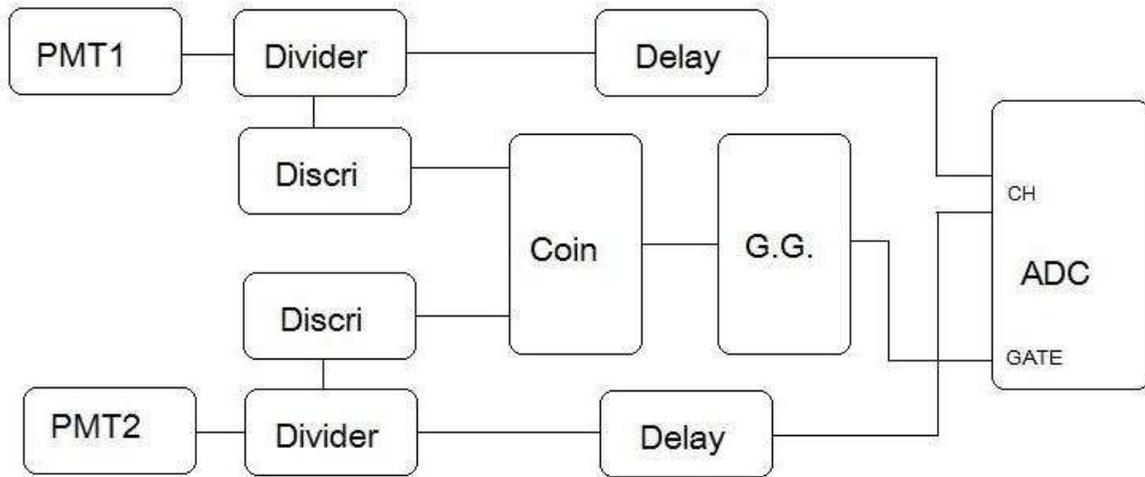


图 4.2: DAQ回路

となる帯であり、Møller 散乱を観測していることを示している。ここで、Møller 散乱のみを取り出すために、入射電子のエネルギー付近で cut する必要がある。

しかし 1000[keV] はシミュレーションによる結果であって、残念ながら装置の問題で実際に観測することができなかつたため、Coincidence をとった PMT1 と PMT2 のエネルギーを足し合わせて、入射粒子のエネルギーを推測した。足し合わせたエネルギーの分布を Gauss 分布で近似してそのピーク位置から入射粒子のエネルギーを求めた。図 4.4 は Ni の場合であり、Fitting によりピーク位置は 935[keV] と求めた。よって  $935[\text{keV}] \pm 2\sigma$  で cut し、Møller 散乱を取り出す。また、両 PMT とも 200[keV] を threshold とし、200[keV] 以下は cut した。Cu についても同様に解析をした。

cut したデータを図 4.5 に示し、Møller 散乱をした電子の個数を表 4.1 に示す。

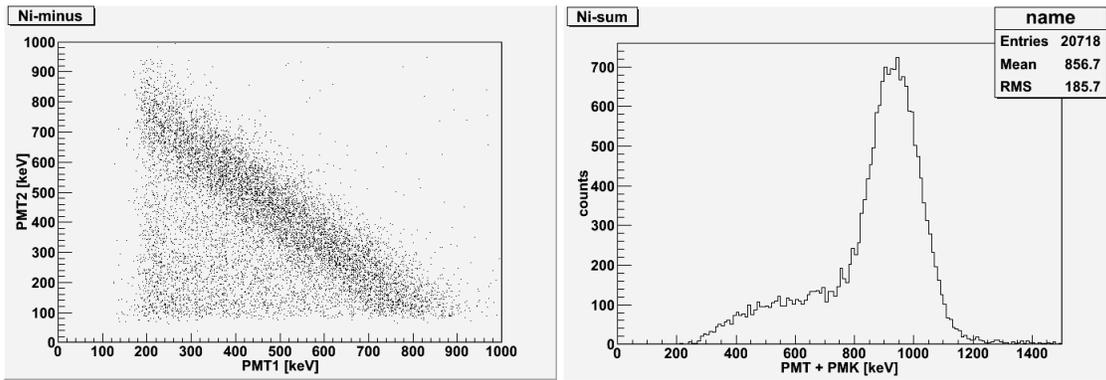
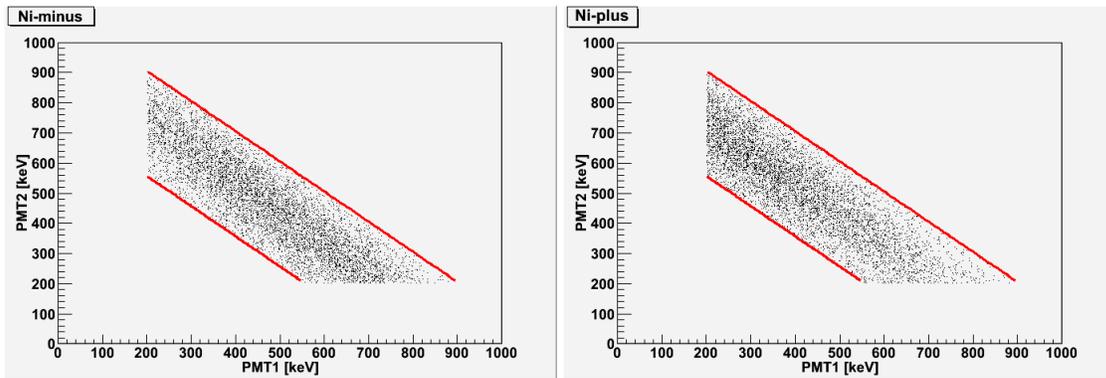


図 4.3: 得られたデータ (Ni の Anti-parallel)      図 4.4: Ni の時の 2 つの PMT のエネルギーの和



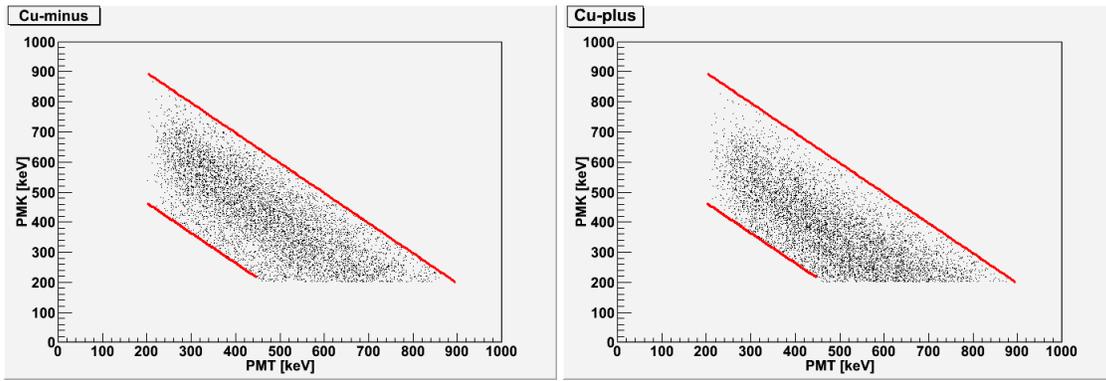


図 4.5: 上段が Ni で下段が Cu、左側が Anti-parallel で右側が Parallel

表 4.1: Anti-parallel と Parallel の個数の差

	Anti-parallel	Parallel	Anti-parallel と parallel の差
Ni	6652 個	6379 個	273 個
Cu	6436 個	6405 個	31 個

## 4.4 アシンメトリー

スピンの Parallel の時のカウント数を  $C_P$ 、Anti-parallel の時のカウント数を  $C_A$  とすると、アシンメトリー (非対称度) は

$$A = \frac{C_A - C_P}{C_A + C_P} \quad (4.1)$$

のように書ける。また、誤差伝播の式により統計誤差をつけて求めると

$$A_{Ni} = 0.0210 \pm 0.0088 \quad (4.2)$$

$$A_{Cu} = 0.0059 \pm 0.0090 \quad (4.3)$$

となる。したがって Ni ではアシンメトリーが見えているが、Cu では見えていないことがわかる。

Ni の場合について理論的に計算すると、935[keV] で

$$A_{Ni-theo} = 0.01398 \quad (4.4)$$

と求まる。以上より、Ni では統計誤差の範囲内でアシンメトリーが見えているが、実際には様々な要因を考慮しなければならない。

## 4.5 考察

考慮すべき要因として考えられるのは、まず Beam の入射エネルギーの影響である。今回シミュレーションでは 1000[keV] の電子が入射している予定であった

が、実際に入射している電子のエネルギーは 1000[keV] よりも小さかった。しかしエネルギーが 100[keV] ずれても、同じエネルギーを持って散乱される Møller 散乱を起こす散乱角は、ほとんど変化しない。したがって、1000[keV] のセッティングでも PMT には入ることができるので、アシンメトリーへの影響は小さいと考えられる。

次に考えられるのは漏れ磁場の影響である。散乱電子の軌道上で最大で 40[Gauss] の漏れ磁場があった。この漏れ磁場によって、電子の起動はおおよそ 1[cm] 程度曲がってしまう。そのため散乱後エネルギーが対称でない散乱の電子も多く観測できてしまっていた。

Ni と Cu の測定データを見ると、片側に高エネルギーの電子がよっているのがわかる。これも漏れ磁場の影響と考えられる。スピンの場合を例にとって考えてみる。スピンの場合、散乱された電子は漏れ磁場の影響により PMT2 の方向に曲げられる。また散乱されて高エネルギーを持った電子は小さな散乱角で散乱され、低エネルギーを持った電子は大きな散乱角で散乱される。したがってこの場合 PMT2 に高エネルギーの電子が入りやすくなり、PMT1 の方向には入りにくくなると考えられる。スピンの場合、Anti-parallel の時は漏れ磁場の向きが逆になるので、PMT1 に高エネルギーの電子が入りやすくなり、PMT2 に低エネルギーの電子が入りやすくなる。しかし Anti-parallel の方はそれが顕著にでていない。実際に漏れ磁場を計測してみると、Parallel の時と Anti-Parallel の時で 10% 程度差が出て、Parallel の方が漏れ磁場が大きいことが分かった。そのため Parallel の方が顕著にその影響が出ていると考えられる。

今回は時間がなくてできなかったが、これを確かめるために、ターゲット用電磁石の電流値を変えて分布がどうなるか、ターゲットの角度を  $30^\circ$  から  $150^\circ$  にしてどうなるか、ターゲットの装置を反転させたら高エネルギーの分布が逆側によるかなどを試すことによって、上であげたように漏れ磁場の影響で片側によっているということが検証できると思われる。

また実際には漏れ磁場を考慮して、測定データに更なる cut をしなくてはならない。 $A_{Ni-theo}$  は重心系で  $90^\circ$  散乱をしたと仮定したものであり、 $90^\circ$  付近でデータを cut しなければならない。その cut は漏れ磁場の影響を考慮して cut しなければならない。しかしながら、今回は漏れ磁場の影響をを検証することができなかったため cut を施せなかった。実際に Møller 散乱の断面積を計算すると、 $90^\circ$  散乱からずれるにしたがって散乱断面積は小さくなる。したがって今回の場合アシンメトリーの実験値は理論値よりも小さくならなくてはならないのだが、逆に大きくなってしまっている。実はこれを説明できる結論にはいたっていないが、まず 200[keV] での threshold をかけたことにより Møller 散乱をしているデータが切り捨てられている可能性があるということである。漏れ磁場がなければ基本的に同エネルギー周辺にデータが集まるので、端の方での cut はほとんど問題はないが、今回は漏れ磁場が大きかったため、片側に寄ってしまい、多くのデータを切り捨てている可能性があるからである。また今回は圧倒的にデータ数が足りなかった

のも影響していると思われる。時間があればもっとデータをとっておきたかったところである。

## 4.6 反省と課題

今回磁性体のターゲットとして  $5[\mu\text{m}]$  の Ni を用いた。基本的にこの実験では、磁性体のターゲットとしては偏極率の大きいターゲットを用いた方がアシンメトリーが大きくなり見えやすくなる。したがって本来であれば Fe のようにスピン偏極率が大きい物質をターゲットとして用いるべきであった。多重散乱の影響を減らすために  $5[\mu\text{m}]$  のターゲットを探した結果、求めている大きさの Fe は見つからなかったため Ni を用いた。もし、同じ厚さで Fe があればそちらを用いるべきである。

そして今回ターゲット用電磁石には  $1.2[\text{A}]$  を流した。この電流値は、本来ターゲット (Ni) の偏極率を測定してから決めるべきであった。しかし今回は途中まで装置を作ったが時間切れで中断して本実験に入らざるを得なかった。そのため過去の実験で鉄が飽和する電流値として  $1.2[\text{A}]$  を用いた。アシンメトリーは見えているものの、漏れ磁場の影響により確実に信頼できるデータではないので、やはり Ni の偏極率を求めて流す電流値を決めることが必要だと思われる。

ここで、ターゲットの偏極率の測定原理を簡単に説明しておく。<sup>1</sup>図のようにターゲットに Pick-up コイルを巻きつける。電磁石に正負が交互に入れ替わる矩形波を入力すると、ターゲットを通る磁場  $B_{\text{target}}$  が時間変化する。すると電磁誘導により、ターゲットに誘導起電力  $V_{\text{target}}$  が発生する。

$$V_{\text{target}} \propto \frac{dB_{\text{target}}}{dt} \quad (4.5)$$

それを Pick-up コイルで拾って、積分することにより、ターゲットにおける磁場  $B_{\text{target}}$  が分かるというものである。これによりターゲットの偏極率を測定できる。

今後の課題としてあげられることは、他のエネルギーでも同様の測定をすることである。他のエネルギーでも測定を行ってアシンメトリーが見えるか、またそれから求めた入射電子の偏極率が  $-\beta$  にのっているかを確認する必要がある。そのためには Beam の収束エネルギーが測定できなければならない。より高真空を引けるポンプを用いることによって、小型の PMT でのエネルギー測定が可能になる。また、漏れ磁場の影響を測定し、それを考慮したときのアシンメトリーを求めることも必要である。

---

<sup>1</sup>詳しい説明は [1] 参照

## 第5章 謝辞

1年間に渡って理論のゼミでお世話になりました畑先生、ありがとうございました。理論に弱い私達を根気よくご指導してくださいました。もう2度とP2でPeskinを使うことはないでしょう。

いつも鋭いアドバイスをいただきました、笹尾先生、ありがとうございました。時に厳しい先生の言葉で毎日頑張ることができました。すき焼き食べられなくて残念です。

お忙しい中日々実験に付き合ってくださいました南條先生、ありがとうございました。3月中に実験を終わらすことができとても嬉しいです。必要な実験器具を揃えるのが大変でした。

TAとしてたくさんアドバイスをいただきました森井さん、ありがとうございました。何でも親切に教えていただいて、実験が進めやすかったです。趣味つきとめてください。

収束エネルギーが確かめられなかったこと、1種類のエネルギーでしか本実験ができなかったこと、ターゲットの磁化率が測定できなかったこと、など色々悔いは残っていますが4年振り(?)にP2としてレポート提出までこぎつけられたことを嬉しく思います。

1年間どうもありがとうございました。

## 関連図書

- [1]  $\beta$  崩壊における Parity の破れ, 課題研究 P2, 2002 年
- [2] Michael E.Peskin, Daniel V.Schroeder. *An Introduction to Quantum Field Theory*

# 付録A 理論Partの補足

理論Partで使っている $\gamma$ 行列の公式

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = g^{\mu\nu} \quad (\text{A.1})$$

$$\gamma^5 \equiv i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 \quad (\text{A.2})$$

$$\{\gamma^\mu, \gamma^5\} = 0, \quad (\gamma^5)^2 = 1(\text{単位行列}), \quad (\gamma^5)^\dagger = \gamma^5 \quad (\text{A.3})$$

$\gamma$ 行列の trace 公式

$$tr(1(\text{単位行列})) = 4 \quad (\text{A.4})$$

$$tr(\text{奇数個の}\gamma) = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$tr(\gamma^\mu\gamma^\nu) = 4g^{\mu\nu} \quad (\text{A.6})$$

$$tr(\gamma^\mu\gamma^\nu\gamma^\rho\gamma^\sigma) = 4(g^{\mu\nu}g^{\rho\sigma} - g^{\mu\rho}g^{\nu\sigma} + g^{\mu\sigma}g^{\nu\rho}) \quad (\text{A.7})$$

$$\begin{aligned} tr(\gamma^a\gamma^b\gamma^c\gamma^d\gamma^e\gamma^f) &= 4g^{ab}(g^{cd}g^{ef} - g^{ce}g^{df} + g^{cf}g^{de}) \\ &\quad - 4g^{ac}(g^{bd}g^{ef} - g^{be}g^{df} + g^{bf}g^{de}) \\ &\quad + 4g^{ad}(g^{bc}g^{ef} - g^{be}g^{cf} + g^{bf}g^{ce}) \\ &\quad - 4g^{ae}(g^{bc}g^{df} - g^{bd}g^{cf} + g^{bf}g^{cd}) \\ &\quad + 4g^{af}(g^{bc}g^{de} - g^{bd}g^{ce} + g^{be}g^{cd}) \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

$$tr(\gamma^5) = 0 \quad (\text{A.9})$$

$$tr(\gamma^\mu\gamma^\nu\gamma^5) = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$tr(\gamma^\mu\gamma^\nu\gamma^\rho\gamma^\sigma\gamma^5) = -4i\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \quad (\text{A.11})$$

一般の行列  $A_1, A_2, \dots, A_n$  に対して

$$tr(A_1A_2\cdots A_{n-1}A_n) = tr(A_nA_1A_2\cdots A_{n-1}) \quad (\text{A.12})$$

縮約の公式

$$\epsilon^{\alpha\beta\mu\nu}\epsilon_{\alpha\beta\rho\sigma} = -2(\delta_\rho^\mu\delta_\sigma^\nu - \delta_\sigma^\mu\delta_\rho^\nu) \quad (\text{A.13})$$

$$\gamma_\mu\gamma^\mu = 4 \quad (\text{A.14})$$

$$\gamma_\mu\gamma^a\gamma^\mu = -2\gamma^a \quad (\text{A.15})$$

$$\gamma_\mu\gamma^a\gamma^b\gamma^\mu = 4g^{ab} \quad (\text{A.16})$$

$$\gamma_\mu \gamma^a \gamma^b \gamma^c \gamma^\mu = -2\gamma^c \gamma^b \gamma^a \quad (\text{A.17})$$

$$\gamma_\mu \gamma^a \gamma^b \gamma^c \gamma^d \gamma^\mu = 2\gamma^b \gamma^c \gamma^d \gamma^a + 2\gamma^a \gamma^d \gamma^c \gamma^b \quad (\text{A.18})$$

$$\gamma_\mu \gamma^a \gamma^b \gamma^c \gamma^d \gamma^e \gamma^\mu = 2\gamma^b \gamma^c \gamma^d \gamma^e \gamma^a - 2\gamma^a \gamma^c \gamma^d \gamma^e \gamma^b - 2\gamma^a \gamma^b \gamma^e \gamma^d \gamma^c \quad (\text{A.19})$$

Dirac 方程式は

$$(\not{\partial} - m)\psi(x) = 0 \quad (\text{A.20})$$

この正振動数解は  $\psi(x) = u(p)e^{-ip \cdot x}$  ( $p^2 = m^2, p^0 > 0$ ) とおくと

$$(\not{p} - m)u(p) = 0 \quad (\text{A.21})$$

## 付録B 軌道計算のプログラム

本実験で使用した軌道計算のCのソースコードをここに載せる。<sup>1</sup>

```
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <time.h>

#define ME 510.998902 /* energy of electron [keV] */
#define C 2.99792458*pow(10,8) /* light velocity /10_8[m/s] */
#define z0 -0.14 /* initial position of z [m] */
#define t0 0 /* initial time [s] */
#define MU (1.256637061*pow(10,-6)) /* vacuum permeability [H/m] */
#define PI 3.14159265 //the circular constant
#define NLOOP 20 // number of electron decayed
#define RMAX 0.001 // radius of source [m]

double ransu(void); //generate random numbers
//for Runge-Kutta calculation ---->
double f1(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5,double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma);
double f2(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5,double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma);
double f3(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5,double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma);
double f4(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5,double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma);
double f5(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5,double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma);
```

---

<sup>1</sup>2003年P2メンバーの中島さんにプログラムのサンプルを頂きました。ありがとうございます。

```

double f6(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5,double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma);
// <----
int jibayomi(char *readdata);// read the data of Poisson
int jiba(double w1,double w2,double *w3,double *w4);
// calculate magnetic field in arbitrary point
double keisan(double T0,double phi0,double theta0,
double x0,double y0, char *readfile);
//Runge-Kutta calculation of electron orbit
char b0='0',b1='0',b2='0',b3='0'; //writing parameters
char kine[10];
double hBr[1030][1030] , hBz[1030][1030];
double gx,gy,gz,gvx,gvy,gvz; /* for profile */
double gap0x ,gap0y ,gapcoli1x ,gapcoli1y ,gapcoli2x,gapcoli2y;
/* gap parameters */
int goal;

int main(int argc, char *argv[])
{
    FILE *fb;
    double T0,TC,phi0,theta0,x0,y0,r0,rtheta0,phil,phiu,theta;
    char readfile[30];
    char readdata[30];
    char bunpufile[30];
    int n;

    if(argc != 5){
        fprintf(stderr, "input kinetic energy[keV], minimum polar angle[rad],\n
maximum polar angle[rad] and filename of Poisson\n");
        exit(0);
    }

    if(!atof(argv[1])){
        fprintf(stderr, "input kinetic energy[keV]\n");
        exit(0);
    }
    else{
        TC=atof(argv[1]);
        strcpy(kine,argv[1]);

```

```

}

if(!atof(argv[2])){
    fprintf(stderr, "input minimum polar angle[rad]\n");
    exit(0);
}
else phil=atof(argv[2]);

if(!atof(argv[3])){
    fprintf(stderr, "input maximum polar angle[rad]\n");
    exit(0);
}
else phiu=atof(argv[3]);

strcpy(readfile,argv[4]);
strcpy(readdata,readfile);

jibayomi(readfile);

gap0x =0.0,gap0y =0.0;// gap of source
gapcoli1x =0.0,gapcoli1y =0.0;// gap of collimator1
gapcoli2x=0.0,gapcoli2y=0.0;// gap of collimator2

//*****
// Please make a new folder "kidodata" before you execute this program.
//*****

strcpy(bunpufile, "./kidodata/");
strcat(bunpufile, strtok(readdata, "."));
strcat(bunpufile, "_");
strcat(bunpufile, kine);
strcat(bunpufile, ".dat");

if((fb=fopen(bunpufile,"w"))==NULL){
    printf("bunpufile open error!\n");
    exit(1);
}

n=0;

```

```

srand((unsigned int)time(NULL)); // call random number

while(n < NLOOP){

// initial parameters
// 0< ransu() <1
  T0=0.02*TC*ransu()+0.99*TC;
// T0=TC;
  phi0=(phiu-phil)*ransu()+phil;
  theta0=2*PI*ransu();
  x0=2*RMAX*(ransu()-0.5);
  y0=2*RMAX*(ransu()-0.5);
  r0=hypot(x0,y0);

  if(r0 <= RMAX){

    theta=keisan(T0,phi0,theta0,x0,y0,readfile);

    n++;

    if(goal){
fprintf(fb,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf\n",
        gx,gy,gz,gvx,gvz,phi0,T0,r0);
    }

  }

}

fprintf(stderr,"finish!\n");

fclose(fb);
return 0;
}

// generate random numbers(0<rand<1)
double ransu(void){

  double dRand;
  int iRand;

```

```

    iRand=rand();
    dRand=(double)iRand/RAND_MAX;

return dRand;
}

double f1(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5,double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma){
    return x4;
}

double f2(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5, double x6,
double Bx ,double By,double Bz,double gamma){
    return x5;
}

double f3(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5, double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma){
    return x6;
}

//relativistic equation of motion
//gamma*m*(acceleration vector)=e*(velocity vector)
//          *(( <-- outer product))(magnetic field vector)
// e/m=1.758819617*pow(10,11)

double f4(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5, double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma){
    return (-1.758819617 * pow(10,11) / gamma) * ( x5 * Bz - x6 * By);
}

double f5(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5, double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma){
    return (-1.758819617 * pow(10,11) / gamma) * ( x6 * Bx - x4 * Bz);
}

double f6(double x1,double x2,double x3, double x4,double x5, double x6,
double Bx,double By,double Bz,double gamma){

```

```

    return (-1.758819617 * pow(10,11) / gamma) * ( x4 * By - x5 * Bx);
}

double kutta(double y1,double y2,double y3,double y4){
    return (y1+2*y2+2*y3+y4)/6;
}

// read the data of Poisson
int jibayomi(char *readdata){

    FILE *fpr1;
    int status;
    int ir,iz;
    double a1,a2,a3,a4;
    double gomi;

    if((fpr1=fopen(readdata,"r"))==NULL){
        printf("read file open error!\n");
        exit(1);
    }

    while(1){
        status=fscanf(fpr1,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf",
        &a1,&a2,&a3,&a4,&gomi,&gomi,&gomi,&gomi,&gomi);

        //a1:R(mm) a2:Z(mm) a3:Br(G) a4:Bz(G)
        // ir,iz are natural number

        if(status==EOF)break;
        else{

            a1=a1;
            ir=(int)a1;

            a2=a2;
            a2=a2+350; //make a2>0

            iz=(int)a2;

```

```

        hBr[ir][iz]= a3;
        hBz[ir][iz]= a4;

    }
}

fclose(fpr1);

return 0;
}

int jiba(double w1,double w2,double *w3,double *w4){

    int r_low,r_upp,z_low,z_upp;
    double phy_r,phy_z;

    phy_r=w1*1000;
    w2=w2+0.35; //make w2>0
    phy_z=w2*1000;

    r_low=(int)(phy_r);
    z_low=(int)(phy_z);

    r_upp=r_low+1;
    z_upp=z_low+1;

    if(r_upp>=50 || z_upp>=1250){
        return EOF;
    }

    else{
*w3=(hBr[r_low][z_low]*(r_upp-phy_r)*(z_upp-phy_z)
      +hBr[r_low][z_upp]*(r_upp-phy_r)*(phy_z-z_low)
      +hBr[r_upp][z_low]*(phy_r-r_low)*(z_upp-phy_z)
      +hBr[r_upp][z_upp]*(phy_r-r_low)*(phy_z-z_low))*pow(10,-4);

*w4=(hBz[r_low][z_low]*(r_upp-phy_r)*(z_upp-phy_z)
      +hBz[r_low][z_upp]*(r_upp-phy_r)*(phy_z-z_low)

```

```

+hBz[r_upp][z_low]*(phy_r-r_low)*(z_upp-phy_z)
+hBz[r_upp][z_upp]*(phy_r-r_low)*(phy_z-z_low))*pow(10,-4);

return 0;
}
}

double keisan(double T0,double phi0,double theta0,
              double x0,double y0, char *readfile){

FILE *fpw2;

char readdata[30];

int i;
int mag;
int length;

double t,dt,tmax;/* time [s] */
double vx0,vy0,vz0; /* initial velocity [m/s] */
double v0,E0,gamma; /* kinetic energy of electron[keV]*/
double Bx,By,Bz,Br; /*[T]*/
double z1,zc1,zc2,zc3;
double thetamin=0;
double c1,c2,c3,c4,c5,c6;
double d1,d2,d3,d4,d5,d6;
double r,z,x,y,vz,vx,vy;
double k[4][6];

char outfile[50]="";
char plus[10]="";
char dat []=".dat";

strcpy(readdata,readfile);

length=strlen(plus);

dt=pow(10,-11);
tmax=5*pow(10,-9);

```

```

E0=T0+ME; // total energy of electron
v0=C*sqrt(1-pow(ME,2)*pow(E0,-2)); //velocity of electron[m/s]
gamma=E0/ME; // Lorentz factor

vx0=v0*sin(phi0)*cos(theta0);
vy0=v0*sin(phi0)*sin(theta0);
vz0=v0*cos(phi0);

z=z0;
vx=vx0;
vy=vy0;
vz=vz0;
x=x0+gap0x ;
y=y0+gap0y ;
r=hypot(x,y);

// writing outputs ----->
plus[length]=b0;
plus[length+1]=b1;
plus[length+2]=b2;
plus[length+3]=b3;
strcat(plus,"");

//*****
// Please make a new folder "testdata2" in "C:\\root"
// before you execute this program.
//*****

strcpy(outfile, "C:\\root/testdata2/");
// strcat(outfile, strtok(readdata, "."));
// strcat(outfile, "_");
// strcat(outfile, kine);
// strcat(outfile, "_");
strcat(outfile, plus);
strcat(outfile, dat);

if((fpw2=fopen(outfile,"w"))==NULL){
    printf("file2 open error!\n");
}

```

```

    exit(1);
}

if(b1 =='9' && b2 =='9' && b3=='9'){
    b1='0';
    b2='0';
    b3='0';
    b0++;
}
else if(b2 == '9' && b3 =='9'){
    b2='0';
    b3='0';
    b1++;
}
else if(b3 =='9'){
    b3='0';
    b2++;
}

else b3++;

// <-----

z1=0;
zc1=-0.07; // place of collimator1
zc2=0.0; // place of collimator2
zc3=0.50; // entrance of chamber
goal=0;

for(t=0;t<tmax;t=t+dt){

    if( (z-z0) >= z1){
        fprintf(stderr,"*");
        z1=z1+0.05;
    }

    //walls and collimators

```

```

if( z<-0.16 ){
    fprintf(stderr,"back wall\n");
    break;
}

if( r>0.045 ){
    fprintf(stderr,"side wall\n");
    break;
}

/* if( 0.035<hypot(x-gapcoli1x ,y-gapcoli1y )
&& hypot(x-gapcoli1x ,y-gapcoli1y )<0.045
    && zc1<z && z<zc1+0.01){
    fprintf(stderr,"colilout\n");
    break;
} */

/* if( hypot(x-gapcoli1x ,y-gapcoli1y )<0.03 && zc1<z && z<zc1+0.01){
    fprintf(stderr,"colilin\n");
    break;
}*/

/* if( 0.04<hypot(x-gapcoli2x,y-gapcoli2y)
    && hypot(x-gapcoli2x,y-gapcoli2y)<0.045
    && zc2<z && z<zc2+0.01){
    fprintf(stderr,"coli2out\n");
    break;
}

if( hypot(x-gapcoli2x,y-gapcoli2y)<0.035 && zc2<z && z<zc2+0.01){
    fprintf(stderr,"coli2in\n");
    break;
} */

/* if( x-gapcoli2x>-0.0025 && x-gapcoli2x<0.0025 && 0<z && z<0.005){
    fprintf(stderr,"bar\n");
    break;
} */

/* if( x-gapcoli2x>-0.0015 && x-gapcoli2x<0.0015 &&
-0.0045<y-gapcoli2y && y-gapcoli2y<-0.0042){

```

```

        fprintf(stderr,"bar2\n");
        break;
} */

/* if( r>0.02 && zc3<z && z<zc3+0.04){
    fprintf(stderr,"chamber\n");
    break;
}*/

// Runge-Kutta calculation ----->
else{

    fprintf(fpw2,"%7.5lf %7.5lf\n",z,r);

    mag=jiba(r,z,&Br,&Bz);

    if(mag==EOF)break;

    if(r==0){
Bx=0;
By=0;
    }
    else{
Bx=Br*x/r;
By=Br*y/r;
    }

    k[0][0]=dt*f1(x,y,z,vx,vy,vz,Bx,By,Bz,gamma);
    k[0][1]=dt*f2(x,y,z,vx,vy,vz,Bx,By,Bz,gamma);
    k[0][2]=dt*f3(x,y,z,vx,vy,vz,Bx,By,Bz,gamma);
    k[0][3]=dt*f4(x,y,z,vx,vy,vz,Bx,By,Bz,gamma);
    k[0][4]=dt*f5(x,y,z,vx,vy,vz,Bx,By,Bz,gamma);
    k[0][5]=dt*f6(x,y,z,vx,vy,vz,Bx,By,Bz,gamma);

    d1=x+k[0][0]/2;
    d2=y+k[0][1]/2;
    c1=hypot(d1,d2);
    c2=z+k[0][2]/2;
    mag=jiba(c1,c2,&Br,&Bz);

```

```

        if(mag==EOF)break;
        if(c1==0){
Bx=0;
By=0;
    }
    else{
Bx=Br*d1/c1;
By=Br*d2/c1;
    }

    k[1][0]=dt*f1(x+k[0][0]/2,y+k[0][1]/2,z+k[0][2]/2,
vx+k[0][3]/2,vy+k[0][4]/2,vz+k[0][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[1][1]=dt*f2(x+k[0][0]/2,y+k[0][1]/2,z+k[0][2]/2,
vx+k[0][3]/2,vy+k[0][4]/2,vz+k[0][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[1][2]=dt*f3(x+k[0][0]/2,y+k[0][1]/2,z+k[0][2]/2,
vx+k[0][3]/2,vy+k[0][4]/2,vz+k[0][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[1][3]=dt*f4(x+k[0][0]/2,y+k[0][1]/2,z+k[0][2]/2,
vx+k[0][3]/2,vy+k[0][4]/2,vz+k[0][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[1][4]=dt*f5(x+k[0][0]/2,y+k[0][1]/2,z+k[0][2]/2,
vx+k[0][3]/2,vy+k[0][4]/2,vz+k[0][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[1][5]=dt*f6(x+k[0][0]/2,y+k[0][1]/2,z+k[0][2]/2,
vx+k[0][3]/2,vy+k[0][4]/2,vz+k[0][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);

    d3=x+k[1][0]/2;
    d4=y+k[1][1]/2;
    c3=hypot(d3,d4);
    c4=z+k[1][2]/2;
    mag=jiba(c3,c4,&Br,&Bz);

    if(mag==EOF)break;
    if(c3==0){
Bx=0;
By=0;
    }
    else{
Bx=Br*d3/c3;
By=Br*d4/c3;
    }

```

```

    k[2][0]=dt*f1(x+k[1][0]/2,y+k[1][1]/2,z+k[1][2]/2,
vx+k[1][3]/2,vy+k[1][4]/2,vz+k[1][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[2][1]=dt*f2(x+k[1][0]/2,y+k[1][1]/2,z+k[1][2]/2,
vx+k[1][3]/2,vy+k[1][4]/2,vz+k[1][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[2][2]=dt*f3(x+k[1][0]/2,y+k[1][1]/2,z+k[1][2]/2,
vx+k[1][3]/2,vy+k[1][4]/2,vz+k[1][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[2][3]=dt*f4(x+k[1][0]/2,y+k[1][1]/2,z+k[1][2]/2,
vx+k[1][3]/2,vy+k[1][4]/2,vz+k[1][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[2][4]=dt*f5(x+k[1][0]/2,y+k[1][1]/2,z+k[1][2]/2,
vx+k[1][3]/2,vy+k[1][4]/2,vz+k[1][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);
    k[2][5]=dt*f6(x+k[1][0]/2,y+k[1][1]/2,z+k[1][2]/2,
vx+k[1][3]/2,vy+k[1][4]/2,vz+k[1][5]/2,Bx,By,Bz,gamma);

```

```

d5=x+k[2][0];
d6=y+k[2][1];
c5=hypot(d5,d6);
c6=z+k[2][2];
mag=jiba(c5,c6,&Br,&Bz);

```

```

    if(mag==EOF)break;
    if(c5==0){
Bx=0;
By=0;
    }
    else{
Bx=Br*d5/c5;
By=Br*d6/c5;
    }

```

```

    k[3][0]=dt*f1(x+k[2][0],y+k[2][1],z+k[2][2],
vx+k[2][3],vy+k[2][4],vz+k[2][5],Bx,By,Bz,gamma);
    k[3][1]=dt*f2(x+k[2][0],y+k[2][1],z+k[2][2],
vx+k[2][3],vy+k[2][4],vz+k[2][5],Bx,By,Bz,gamma);
    k[3][2]=dt*f3(x+k[2][0],y+k[2][1],z+k[2][2],
vx+k[2][3],vy+k[2][4],vz+k[2][5],Bx,By,Bz,gamma);
    k[3][3]=dt*f4(x+k[2][0],y+k[2][1],z+k[2][2],
vx+k[2][3],vy+k[2][4],vz+k[2][5],Bx,By,Bz,gamma);
    k[3][4]=dt*f5(x+k[2][0],y+k[2][1],z+k[2][2],

```

```

vx+k[2][3],vy+k[2][4],vz+k[2][5],Bx,By,Bz,gamma);
    k[3][5]=dt*f6(x+k[2][0],y+k[2][1],z+k[2][2],
vx+k[2][3],vy+k[2][4],vz+k[2][5],Bx,By,Bz,gamma);

    x = x +kutta(k[0][0],k[1][0],k[2][0],k[3][0]);
    y = y +kutta(k[0][1],k[1][1],k[2][1],k[3][1]);
    z = z +kutta(k[0][2],k[1][2],k[2][2],k[3][2]);
    vx = vx +kutta(k[0][3],k[1][3],k[2][3],k[3][3]);
    vy = vy +kutta(k[0][4],k[1][4],k[2][4],k[3][4]);
    vz = vz +kutta(k[0][5],k[1][5],k[2][5],k[3][5]);
    r = hypot(x,y);

if(z>=0.7 && !goal){
fprintf(stderr,"good\n");
goal=1;
gx=x;
gy=y;
gz=z;
gvx=vx;
gvy=vy;
gvz=vz;
break;

// <-----
}
}
}

fclose(fpw2);

return thetamin;
}

```

## 付録C DAQのソースコード

本実験で使用した RelayMultiplexer を使った電源制御プログラムを載せる。

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include <ctime>
#include <unistd.h>
extern "C" {
#include "/usr/local/include/camlib.h"
}
using namespace std;

#define FILENAME_PLUS "0324SrNi_plus.dat"
#define FILENAME_MINUS "0324SrNi_minus.dat"
#define NEVENT 100000

#define ON_TIME 60
// #define ON_TIME 1
#define WAIT_TIME 100 // [us]
// Station Number
#define ADC 16
#define RELAYMPX 9

#define A_t 10
#define A_k 15
// RelayMPX Address
#define REF1 0
#define REF2 3

#define PLUS 1
#define MINUS -1
```

```

static int flag = REF1;
static time_t now, start;

void magnetize(int sign);

int main()
{

    //-----
    // 1. Initialization.
    //-----

    if(COPEN()) {
        cerr << "Camac : not opened." << endl;
        return 1;
    }
    cerr << "Camac : opened." << endl;

    //-----

    if(CSETCR(0)) {
        cerr << "Camac : no crate #0." << endl;
        return 1;
    }
    cerr << "Camac : crate #0." << endl;

    //-----

    if(CGENZ()) {
        cerr << "Camac : not initialized." << endl;
        return 1;
    }
    cerr << "Camac : initialized." << endl;

    //-----

    if(CGENC()) {
        cerr << "Camac : not cleared." << endl;
        return 1;
    }

```

```

}
cerr << "Camac : cleared." << endl;

//-----

if(CREMI()) {
    cerr << "Camac : inhibit is not cleared." << endl;
    return 1;
}
cerr << "Camac : inhibit is cleared." << endl;

int N,A,F;
int ref,ref_t, ref_k, q, x;
int i = 0, count = 0;
ofstream fout_plus(FILENAME_PLUS);
ofstream fout_minus(FILENAME_MINUS);

if(!fout_plus) {
    cerr << "file_pulse cannot be opened." << endl;
    exit(1);
}
if(!fout_minus) {
    cerr << "file_minus cannot be opened." << endl;
    exit(1);
}

N=ADC; A=0; F=9;
CAMAC(NAF(N,A,F), &ref, &q, &x);

time(&start);

while(count < NEVENT) {

    time(&now);

    magnetize(PLUS);

    N=ADC; A=0; F=8;
    CAMAC(NAF(N,A,F), &ref, &q, &x);
}

```

```

if (q == 1 && flag == REF1) {
    count++;

    N=ADC; A=A_t; F=0;
    CAMAC(NAF(N,A,F), &ref_t, &q, &x);

    N=ADC; A=A_k; F=0;
    CAMAC(NAF(N,A,F), &ref_k, &q, &x);

    fout_plus << ref_t << " " << ref_k << endl;

    N=ADC; A=0; F=9;
    CAMAC(NAF(N,A,F), &ref, &q, &x);
}

magnetize(MINUS);

N=ADC; A=0; F=8;
CAMAC(NAF(N,A,F), &ref, &q, &x);
if (q == 1 && flag == REF2) {
    count++;

    N=ADC; A=A_t; F=0;
    CAMAC(NAF(N,A,F), &ref_t, &q, &x);

    N=ADC; A=A_k; F=0;
    CAMAC(NAF(N,A,F), &ref_k, &q, &x);

    fout_minus << ref_t << " " << ref_k << endl;

    N=ADC; A=0; F=9;
    CAMAC(NAF(N,A,F), &ref, &q, &x);
}
}
fout_plus.close();
fout_minus.close();

//-----
// 3. Termination.

```

```

//-----
if(CCLOSE()) {
    cerr << "Camac : not closed." << endl;
    return 1;
}

return 0;
}

void magnetize(int sign)
{
    int N, A, F;
    int ref;
    int q, x;

    if(sign == PLUS) {
        if(difftime(now, start) >= ON_TIME && flag == REF2) {
            ref = REF1;
            N=RELAYMPX; A=0; F=16;
            CAMAC(NAF(N,A,F), &ref, &q, &x);
            usleep(WAIT_TIME);
            flag = REF1;
            time(&start);
        }
    }
    else if(sign == MINUS){
        if(difftime(now, start) >= ON_TIME && flag == REF1) {
            ref = REF2;
            N=RELAYMPX; A=0; F=16;
            CAMAC(NAF(N,A,F), &ref, &q, &x);
            usleep(WAIT_TIME);
            flag = REF2;
            time(&start);
        }
    }
}

```