

# 2011 年度課題研究 P3 実験 ～パリティの破れの検証実験～

河合俊、筒井翔一朗、土居孝寛、中塚徳継、前田一弥、藤林翔

2012 年 4 月 5 日

## 概要

普段我々が住んでいる世界では、右や左というのは恣意的なものではなく、鏡写しの世界でも物理法則は全く同じに見える。つまりパリティが保存しているように見える。通常、人間の目で直接観測できるのは、パリティが保存される重力相互作用と電磁相互作用のみであるため、長い間全ての物理法則においてパリティが保存されていると思われていた。しかしながら、弱い相互作用はパリティを破ることが明らかになっている。これは、Yang と Lee が予測 [1] し、Wu らによって検証 [2] されて以来様々な実験によって確かめられている。Wu の実験は、弱い相互作用で起こる  $\beta$  崩壊を観測する実験であった。磁場をかけてスピンをそろえた  $^{60}\text{Co}$  が  $\beta$  崩壊して放出する電子の出る方向が調べられた。もしパリティが保存されていれば、スピンの同じ方向と逆方向に等確率で出るはずだが、実験結果は電子はスピンと逆方向に多く放出されており、パリティが保存していないことが分かった。本実験では、S.S Hanna と R.S. Preston の手法 [3] を参考にし、 $\beta^+$  崩壊に由来するパリティの破れを検証する。崩壊原子核として、京都大学タンデム加速器において中性子ビームを当て生成した  $^{64}\text{Cu}$  を用いる。 $^{64}\text{Cu}$  の  $\beta^+$  崩壊で生じた陽電子を磁場をかけた強磁性体パーマロイ (Fe-Ni 合金) に入射させ、金属中の電子と対消滅させる。singlet で対消滅したときに出る  $2\gamma$  を数える。磁性体にかかる磁場の向きを反転させることで陽電子とパーマロイ中の電子の相対的なスピンの向きが逆転する。パリティの破れによって  $\beta^+$  線のヘリシティが偏っておれば、singlet を組む確率が変わるので、 $2\gamma$  のカウント数に差が現れるはずである。実際磁場反転することはパリティ変換したことに対応する。磁場の向きを陽電子の進行方向に揃えたときと逆にしたときの  $2\gamma$  のカウント数を測定し、そこに有意な差が現れていればパリティの破れが検証できたことになる。

今回の実験によって得られた全データのカウント数は 85962 カウントを得、最終的な磁場方向反転による非対称度は  $0.0648 \pm 0.0312$  となり、98.1% の信頼度 ( $2\sigma$ ) で  $\beta^+$  崩壊によるパリティの破れを結論付けた。

## 目次

1	理論	1
1.1	弱い相互作用	1
1.2	ポジトロニウム	6
2	実験のセットアップ	7
2.1	実験全体の設計	7
2.2	$\beta^+$ 線源の選定	9
2.3	磁石の設計	12
2.4	シミュレーション	13
2.5	ヒステリシス	13
2.6	発熱コントロール	14
2.7	製作	14
2.8	発熱対策	14
2.9	検出器の磁場対策	16
3	実験方法	17
3.1	回路図	17
3.2	DAQ	18
3.3	実験の手順	18
3.4	使用したモジュール	18
3.5	取得したデータ	21
3.6	実験のスケジュール	22
3.7	使用したデータについて	24
4	検出器の性能評価	25
4.1	検出効率	25
4.2	実験手順	25
4.3	Dead Time 補正	26
4.4	データ	27
4.5	解析	27
5	解析	29
5.1	キャリブレーション	29
5.2	Decay 補正	33
5.3	Ge 検出器のデータに基づく解析	36
5.4	511keV 以外のイベントも含んだときの非対称度	38
5.5	非対称度のエネルギーカット条件依存性	39
5.6	NaI 検出器のデータに基づく解析	40

5.7	Coin3 事象を用いた解析	43
5.8	データの扱いに関する詳細	43
<b>6</b>	<b>考察</b>	<b>47</b>
6.1	鉛の遮蔽度	47
6.2	作った磁場の安定性	48
6.3	ジオメトリの信頼度	48
6.4	改善すべき点	48
付録 A	相互作用の形	51
付録 B	パリティ変換	53
付録 C	本実験のパリティ変換	56
付録 D	核種とその性質	57
付録 E	DAQ	61
付録 F	非対称度に影響する要素	75
F.1	陽電子への磁場の影響	75
F.2	物質との相互作用による陽電子のスピンフリップ	78
F.3	物質中のポジトロニウムの反応	79
付録 G	シミュレーション	81
G.1	シミュレーションの手順	81
G.2	シミュレーションの結果	82
G.3	シミュレーションで考慮していないこととその影響	84
G.4	スピン交換反応の影響	85
G.5	シミュレーションのソースコード	86

# 1 理論

## 1.1 弱い相互作用

### 1.1.1 弱い相互作用の歴史

弱い相互作用は、最初  $\beta$  崩壊で発見された。

1896年、Henri Becquerel がウランを写真フィルムに触れさせておくと何かの跡がつく事を発見した。

その数年後、Becquerel, Kaufmann, Rutherford が、ウランから  $\beta$  線 (電子) が出ている事を発見した。

1910年頃、原子の構造が確立し、1932年に Chadwick が中性子を発見した。

1931年、Pauli はニュートリノ仮説を発表した。

1935年、Fermi がニュートリノ仮説を取り入れて、最初の  $\beta$  崩壊の理論を発表した。(4-Fermi 相互作用)

1956年、Yang と Lee がパリティ非保存項の導入をした。

1957年、Wu, Ambler, Hayward, Hoppes, Hudson らが偏極した  $^{60}\text{Co}$  の  $\beta$  崩壊を用いてパリティの破れを証明した。

1958年頃、パリティ非保存を考慮に入れた弱い相互作用の理論 (V-A 理論) が作られた。

1967年、Glashow, Salam, Weinberg らが電磁相互作用と弱い相互作用を統一を統一した。(GSW 理論、電弱統一理論)

参考文献、[4][5]

### 1.1.2 4-Fermi 相互作用

1935年に Fermi が発表した弱い相互作用の理論は、相互作用ラグランジアン

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{4\text{Fermi}} = -G_{\beta}(\bar{\psi}_e\gamma_{\mu}\psi_{\nu})(\bar{\psi}_p\gamma^{\mu}\psi_n) + \text{h.c.} \quad (1.1)$$

で説明される。(  $G_{\beta}$  : フェルミ結合定数、  $\psi$  : ディラックスピノル、  $\text{h.c.}$  エルミート共役 (以下省略する) )

ここで

$$j_{\text{h}}^{\mu} = \bar{\psi}_p\gamma^{\mu}\psi_n, j_{\text{l}}^{\mu} = \bar{\psi}_e\gamma^{\mu}\psi_{\nu}$$

とおくと、

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{4\text{Fermi}} = -G_{\beta}j_{\text{h}}^{\mu}j_{\text{l}\mu} \quad (1.2)$$

の形にできて、カレントの積の形であるから、カレント-カレント相互作用とも呼ばれる。(h:ハドロン、l:レプトン)

### 1.1.3 ヘリシティとカイラリティ

運動量  $p$  を持つ粒子のヘリシティ  $\lambda$  はヘリシティ演算子  $\hat{\Lambda}$

$$\hat{\Lambda} = \frac{\hat{\Sigma} \cdot p}{p} \quad (1.3)$$

$$\hat{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma & 0 \\ 0 & \sigma \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

の固有値で決定される。任意のスピンル  $u$  はヘリシティ射影演算子  $\hat{P}_{\pm}$

$$\hat{P}_{\pm} = \frac{1 \pm \hat{\Lambda}}{2} \quad (1.5)$$

で正負のヘリシティを持ったスピノルに分離される。

$$u = u^+ + u^- \quad (1.6)$$

$$\hat{\Lambda}u^{\pm} = \pm u^{\pm} \quad (1.7)$$

$$\hat{P}_{\pm}u = u^{\pm} \quad (1.8)$$

$$(\hat{P}_{\pm})^2 = \hat{P}_{\pm} \quad (1.9)$$

$$\hat{P}_+\hat{P}_- = \hat{P}_-\hat{P}_+ = 0 \quad (1.10)$$

しかし、 $\hat{P}_{\pm}$  はローレンツ不変でない。理論は相対論的でなければならないので、これは問題である。Dirac 方程式

$$(\alpha \cdot p + \beta m_0)u = Eu \quad (1.11)$$

と  $\alpha = \gamma_5 \hat{\Sigma} = \hat{\Sigma} \gamma_5$  を用いて

$$\hat{P}_{\pm}u = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{\hat{\Sigma} \cdot p}{p}\right)u \quad (1.12)$$

$$= \frac{1}{2} \left(1 \pm \gamma_5 \frac{E - \beta m_0}{p}\right)u \quad (1.13)$$

$$\approx \frac{1}{2} (1 \pm \gamma_5) \quad (\text{if } E \approx p \gg m_0) \quad (1.14)$$

とできる。よってローレンツ不変なカイラリティを表す射影演算子  $\hat{P}'_{\pm}$ ,

$$\hat{P}'_{\pm} \equiv \frac{1}{2} (1 \pm \gamma_5) \quad (1.15)$$

を定義できる。上の議論から、質量が 0 ならば、 $\hat{P}_{\pm} \rightarrow \hat{P}'_{\pm}$  の置き換えは完全に正しいが、質量を持つ粒子に対しては正しくない事に注意。質量が小さい時は近似になる。Goldhaber らの実験により、 $\beta$  崩壊で放出されるニュートリノのヘリシティが  $-1$  である事が示された。この事から、弱い相互作用に関与するのが負のカイラリティ成分のみである事が示唆された。

#### 1.1.4 V-A 理論

1957 年に弱い相互作用におけるパリティ非保存が実験的に証明されたので、4-Fermi 相互作用にパリティ非保存を取り入れて一般化し、V-A 理論が完成した。ここではその過程を簡単に説明する。

ラグランジアン of ローレンツ不変性から、最も一般的な 4-Fermi 相互作用は

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = G_{\beta} \sum_i (C_i \bar{\psi}_p \Gamma_i \psi_n + C'_i \bar{\psi}_p \Gamma_i \gamma_5 \psi_n) (\bar{\psi}_e \Gamma_i \psi_{\nu}) \quad (1.16)$$

$$\Gamma_i = 1 \quad (\text{Scalar, S}), \quad (1.17)$$

$$\gamma^\mu \quad (\text{Vector, V}), \quad (1.18)$$

$$\sigma^{\mu\nu} \equiv \frac{i}{2}[\gamma^\mu, \gamma^\nu] \quad (\text{Tensor, T}), \quad (1.19)$$

$$\gamma^\mu \gamma_5 \quad (\text{Axial Vector, A}), \quad (1.20)$$

$$\gamma_5 \quad (\text{Pseudoscalar, P}) \quad (1.21)$$

の形に書ける。 $C'_i$ の項がパリティ非保存項である。

更に、Wu らの実験や Goldhaber らの実験により、粒子は負のカイラリティ成分、反粒子は正のカイラリティ成分しか弱い相互作用に関与しないことがわかっていたので、ラグランジアンをカイラリティの射影演算子  $\hat{P}'_-$  を用いて

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = G_\beta \sum_i (C_i \overline{\hat{P}'_- \psi_p} \Gamma_i \hat{P}'_- \psi_n + C'_i \overline{\hat{P}'_- \psi_p} \Gamma_i \gamma_5 \hat{P}'_- \psi_n) (\overline{\hat{P}'_- \psi_e} \Gamma_i \hat{P}'_- \psi_\nu) \quad (1.22)$$

に置き換える。計算すると、

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = G_\beta \sum_i (\overline{\psi_p} \Gamma'_i (C_i + C'_i \gamma_5) \psi_n) (\overline{\psi_e} \Gamma'_i \psi_\nu) \quad (1.23)$$

$$\Gamma'_i \equiv \hat{P}'_+ \Gamma_i \hat{P}'_- \quad (1.24)$$

$\Gamma'_i$  を計算すると、表 1 のようになる。

表 1  $\Gamma_i$  と  $\Gamma'_i$

	$\Gamma_i$	$\Gamma'_i$
S	1	0
V	$\gamma^\mu$	$\frac{1}{2}\gamma^\mu(1 - \gamma_5)$
T	$\sigma^{\mu\nu}$	0
A	$\gamma^\mu \gamma_5$	$-\frac{1}{2}\gamma^\mu(1 - \gamma_5)$
P	$\gamma_5$	0

表 1 より、 $\Gamma_i$  として V, A のみを考えればよい事がわかる。どちらの場合でも  $\Gamma'_i$  は係数を除き V-A の形になっている。この時、ラグランジアンは

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \frac{G}{\sqrt{2}} (\overline{\psi_p} \gamma_\mu (C_V + C_A \gamma_5) \psi_n) (\overline{\psi_e} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_\nu) \quad (1.25)$$

となる。定数  $G, C_V, C_A$  及び式 (1.1) の  $G_\beta$  との関係は、

$$G_\beta = G C_V \quad (1.26)$$

$$\frac{C_A}{C_V} = -1.255 \pm 0.006 \quad (\text{実験値}) \quad (1.27)$$

である。

式 (1.25) のラグランジアンでは、レプトン部分のカレントは完全に V-A の形になっているが、ハドロン部分のカレントはそれから少しずれている。これは強い相互作用による補正と考えられる。

### 1.1.5 原子核の $\beta$ 崩壊

$\beta^-$ 崩壊は中性子が陽子と電子と反ニュートリノ、 $\beta^+$ 崩壊は陽子が中性子と陽電子とニュートリノに崩壊する現象として説明される。

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.28)$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (1.29)$$

ここでは原子核の $\beta^-$ 崩壊について述べる。 $(\beta^+$ 崩壊については、相互作用ラグランジアン of h.c. を取って $\beta^-$ 崩壊と同様の議論を行えばよい。)

ここでは以下の3つを仮定する。

1.  $\beta$ 崩壊の際、原子核は反跳を受けるが、この効果は無視できる。
2. 電子、ニュートリノの波動関数 $\psi_e(x), \psi_\nu(x)$ は原子核の体積中で實際上ほぼ一定である。
3. 原子核での核子の運動は非相対論的に記述できる。
3. の仮定により核子の波動関数は Dirac 表示で

$$\psi_N(x) = \psi_N(\mathbf{x}) \exp(-iE_N t) \quad (1.30)$$

$$\psi_N(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \chi(\mathbf{x}) \\ -\frac{i}{2M_N} \boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla \chi(\mathbf{x}) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \chi(\mathbf{x}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.31)$$

と書けるから、核子の作るカレントは

$$J_N^\mu(x) = \bar{\psi}_p \gamma_\mu (1 - C'_A \gamma_5) \psi_n = \chi_p^\dagger (\delta^{\mu 0} - \delta^{\mu k} C'_A \sigma^k) \chi \exp(i(E_p - E_n)t) \quad (1.32)$$

$$C'_A = 1.255 \quad (1.33)$$

また、原子核は $Z$ 個の陽子、 $A - Z$ 個の中性子から成っているので、原子核の波動関数は個々の核子の波動関数のスレーター行列式で与えられる。

$$\chi(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_A) = \mathcal{A}[\chi_{p_1}(\mathbf{x}_1) \chi_{p_2}(\mathbf{x}_2) \cdots \chi_{p_Z}(\mathbf{x}_Z) \chi_{n_1}(\mathbf{x}_{Z+1}) \cdots \chi_{p_{A-Z}}(\mathbf{x}_A)] \quad (1.34)$$

レプトンの作るカレントは、

$$J_\mu^l(x) = \bar{\psi}_e(x) \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_\nu(x) \quad (1.35)$$

と書く。

以上より、原子核の $\beta$ 崩壊の最低次の遷移行列要素は

$$S_{fi} = \frac{G}{\sqrt{2}} \cos \theta_C 2\pi \delta(E_e + E_\nu - \Delta E_{fi}) [\langle f | \hat{T}_+ | i \rangle J_l^0(0) + C'_A \langle f | \boldsymbol{\sigma} \hat{T}_+ | i \rangle \cdot \mathbf{j}_l(0)] \quad (1.36)$$

$$\theta_C : \text{cabibbo 角 } (\cos \theta_C = 0.975)$$

$$\Delta E_{fi} \equiv E_n - E_p - E_e - E_\nu$$

$$\langle f | \hat{T}_+ | i \rangle = \sum_{k=1}^A \int d^3 x_1 \cdots d^3 x_A \chi_A^\dagger(\mathbf{x}_1 \cdots \mathbf{x}_A) \hat{T}_+^k \chi_i(\mathbf{x}_1 \cdots \mathbf{x}_A)$$

$\hat{T}_+^k$  :  $k$ 番目の核子にはたらくアイソスピン昇演算子

$\chi_i, \chi_f$  : 始状態、終状態の原子核の波動関数



$$\langle f | \sigma \hat{T}_+ | i \rangle = \sum_{k=1}^A \int d^3 x_1 \cdots d^3 x_A \chi_f^\dagger(\mathbf{x}_1 \cdots \mathbf{x}_A) \sigma(k) \hat{T}_+^k \chi_i(\mathbf{x}_1 \cdots \mathbf{x}_A)$$

( $j_l^0(0)$  や  $j_l(0)$  はレプトンの波動関数が原子核内で定数とみなせることから、積分の外に出している。)

式 (1.36) の  $j_l^0(0)$  の計算では、原子核のクーロン場による電子波動関数の歪みを考えることが重要である。この効果は、電荷  $Ze$  の点状の原子核が作るポテンシャル中での連続状態の Dirac 方程式を解くことで決定できる。

結果は、原子核付近での確率密度が増加する。すなわち、

$$\frac{|\psi_{e,Z}(r)|^2}{|\psi_{e,Z=0}(r)|^2} = 2(1+\gamma)(2pr)^{-2(1-\gamma)} \exp(\pi Z \alpha E_e/p) \frac{|\Gamma(\gamma - iZ\alpha E_e/p)|^2}{\Gamma(2\gamma+1)^2} \quad (1.37)$$

$$p = (E_e^2 - m_e^2)^{1/2}, \gamma = (1 - Z^2 \alpha^2)^{1/2} \quad (1.38)$$

の因子だけ増加する。式 (1.37) はよい近似で

$$F(E, Z) \equiv \frac{|\psi_{e,Z}(R)|^2}{|\psi_{e,Z=0}(R)|^2} \quad (1.39)$$

とできる。 $F(E, Z)$  は Fermi 関数と呼ばれる。 $R$  は原子核半径。

クーロン場の補正を含めた単位時間当たりの崩壊確率は

$$dW = \frac{\delta(E_e + E_\nu - \Delta E_{\bar{n}})}{(2\pi)^5 2E_e 2E_\nu} F(E_e, Z) |A_{\bar{n}}^0|^2 d^3 p d^3 k \quad (1.40)$$

$$A_{\bar{n}}^0 = \frac{G}{\sqrt{2}} \cos \theta_C [\langle f | \hat{T}_+ | i \rangle \bar{u}_e(\mathbf{p}, s) \gamma_0 (1 - \gamma_5) v_\nu(\mathbf{k}, t) + C_A' \langle f | \sigma \hat{T}_+ | i \rangle \cdot \bar{u}_e(\mathbf{p}, s) \gamma_0 (1 - \gamma_5) v_\nu(\mathbf{k}, t)] \quad (1.41)$$

$u_e, v_\nu$  は自由 Dirac 粒子のスピンル。

電子の偏極率は

$$P_\pm \equiv u_e^\dagger(\lambda = \pm 1) \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) u_e(\lambda = \pm 1) \quad (1.42)$$

$$= \frac{E_e \mp p}{E_e + p} \quad (1.43)$$

なので、

$$P \equiv \frac{P_+ - P_-}{P_+ + P_-} = -\frac{v}{c} \quad (1.44)$$

$\beta^+$  崩壊の時の陽電子の偏極率は  $P = \frac{v}{c}$  である。ただし  $v$  は電子の速度である。

終状態でのスピン和をとり、レプトンの放出方向、ニュートリノの運動量についても積分を行うと、この近似で記述される  $\beta$  崩壊の電子のエネルギースペクトルは、

$$\frac{dW}{dE} = \frac{(G \cos \theta_C)^2}{2\pi^3} a F(E_e, Z) E_e (E_e^2 - m_e^2)^{1/2} (\Delta E_{\bar{n}} - E_e)^2 \theta(\Delta E_{\bar{n}} - E_e) \quad (1.45)$$

$$a \equiv |\langle f | \hat{T}_+ | i \rangle|^2 + C_A'^2 |\langle f | \sigma \hat{T}_+ | i \rangle|^2 \quad (1.46)$$

## 1.2 ポジトロニウム

### 1.2.1 ポジトロニウム

ポジトロニウムは電子と陽電子が電磁相互作用で束縛された2粒子系である。電子と陽電子はともにスピン1/2であり、その基底状態の合成スピンは1か0である。合成スピン0の時はパラポジトロニウム、合成スピン1の時はオルソポジトロニウムと呼ばれ、2種類に分類される。

### 1.2.2 ポジトロニウムの崩壊

パラポジトロニウムはスピン0なので角運動量の保存から偶数個の光子に崩壊し、オルソポジトロニウムはスピン1なので、角運動量の保存から奇数個の光子に崩壊する。光子数が1増加すると崩壊率は $\alpha \approx \frac{1}{137}$ のオーダーで減少するため、パラポジトロニウムの多くは $2\gamma$ 崩壊、オルソポジトロニウムの多くは $3\gamma$ 崩壊をする。 $2\gamma$ 崩壊では、エネルギー・運動量保存から、ポジトロニウムの重心系から見て $\gamma$ 線は反対方向に511keVのエネルギーを持って放出される。 $3\gamma$ 崩壊では、3体崩壊なので、 $\gamma$ 線のエネルギーは511keV以下の連続分布で放出される。また、真空中での $2\gamma$ 崩壊の寿命の理論値は125[ps]、 $3\gamma$ 崩壊の寿命の理論値は142[ns]である。以上をまとめると表2のようになる。

表2 パラポジトロニウムとオルソポジトロニウム

	パラポジトロニウム	オルソポジトロニウム
合成スピン	0	1
崩壊時の $\gamma$ 線の個数	偶数 (2以上)	奇数 (3以上)
主な崩壊とその寿命	$2\gamma, 125[\text{ps}]$	$3\gamma, 142[\text{ns}]$

## 2 実験のセットアップ

### 2.1 実験全体の設計

パリティの破れを検証するには、 $\beta^+$  線のスピン偏極を捕まえる必要がある。そのために、ポジトロニウムの  $2\gamma$  崩壊を用いることにした。 $\beta^+$  線は物質中で  $e^-$  とポジトロニウムを作り、対消滅する。対消滅では、スピン  $\uparrow\uparrow$ (合成スピン 1) か  $\uparrow\downarrow$ (合成スピン 0) かに応じて、それぞれ  $2\gamma$ 、 $3\gamma$  に崩壊する。このとき、 $2\gamma$  は互いに  $180$  度に出るため、 $180$  度に配置した検出器でコインシデンスをとれば、 $2\gamma$  崩壊だけを選んで捕まえることができる。そこで、 $\beta^+$  線を、 $\beta^+$  線のヘリシティと平行 ( $\uparrow\uparrow$  ポジトロニウムが出来やすいはず)、反平行 ( $\uparrow\downarrow$  ポジトロニウムが出来やすいはず) に磁化させた磁性体中に入射させ、 $2\gamma$  崩壊の数だけを数えれば、 $\beta^+$  線のヘリシティが見えるはずである。この原理に基づいて、図 1、図 2 のようなセットアップを考案した。

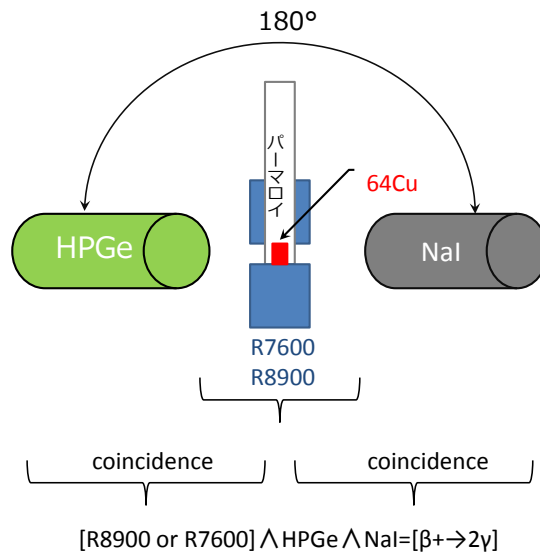


図 1 実験セットアップの概念図

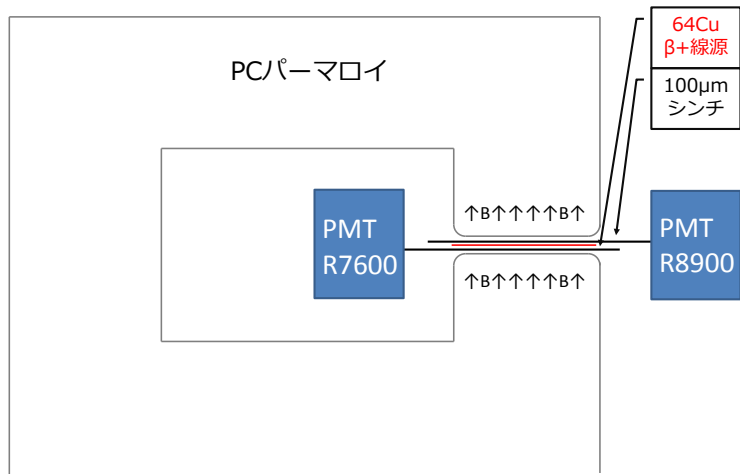


図2 実験セットアップのうち、トロイダルコイル部分

捕まえたイベントは、 $\beta^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$  のイベントなので、図3のように検出器を鳴らす。

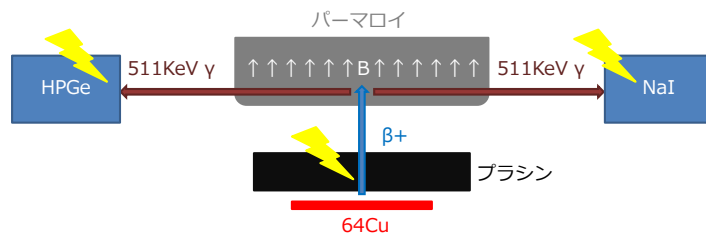


図3 捕まえたイベント

うまくいけば、磁場の向きに応じて図4のように $\uparrow\downarrow$  ポジトロニウムのカウント数に差ができるはずである。

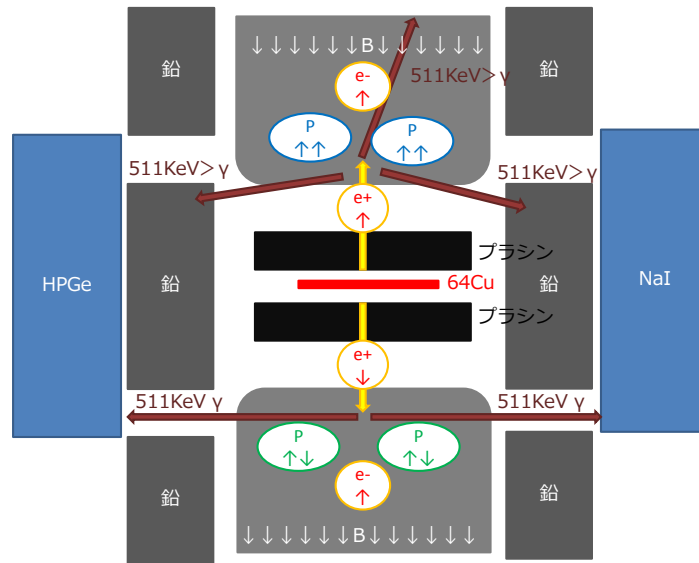


図4 生じる非対称度

## 2.2 $\beta^+$ 線源の選定

不安定核生成法として、熱中性子源を用いることにした。熱中性子を吸収して、 $\beta^+$ 崩壊を起こす原子核は極めて限られている。熱中性子の吸収断面積の大きさを JENDL[6] のデータをもとに調べ、Cu が唯一の選択肢であるという結論に達した。普通の Cu は同位体として、69 %  $^{63}\text{Cu}$ 、31 %  $^{65}\text{Cu}$  を含む。それぞれの熱中性子吸収断面積は、以下のとおりである。

$$\sigma(^{63}\text{Cu} + n \rightarrow ^{64}\text{Cu}) = 4.4[\text{barns}]$$

$$\sigma(^{65}\text{Cu} + n \rightarrow ^{66}\text{Cu}) = 2.2[\text{barns}]$$

それぞれの崩壊定数は、

$$\lambda(^{64}\text{Cu} \rightarrow ^{63}\text{Cu}) = 1.5 \times 10^{-5}[\text{s}^{-1}]$$

$$\lambda(^{66}\text{Cu} \rightarrow ^{65}\text{Cu}) = 2.3 \times 10^{-3}[\text{s}^{-1}]$$

である。 $^{64}\text{Cu}$ 、 $^{66}\text{Cu}$  それぞれの崩壊準位図 [7] を図 5、図 6 に示した。 $^{63}\text{Cu}$  の半減期が短いこともあり、バックグラウンドとなる崩壊は少ないことが分かる。

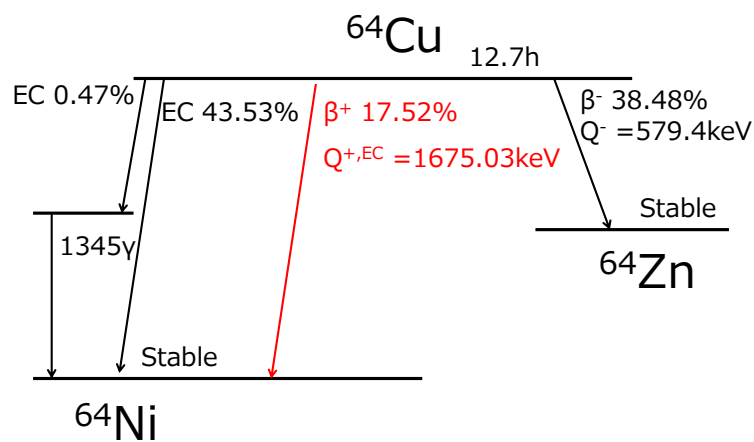


図5  $^{64}\text{Cu}$  の準位図

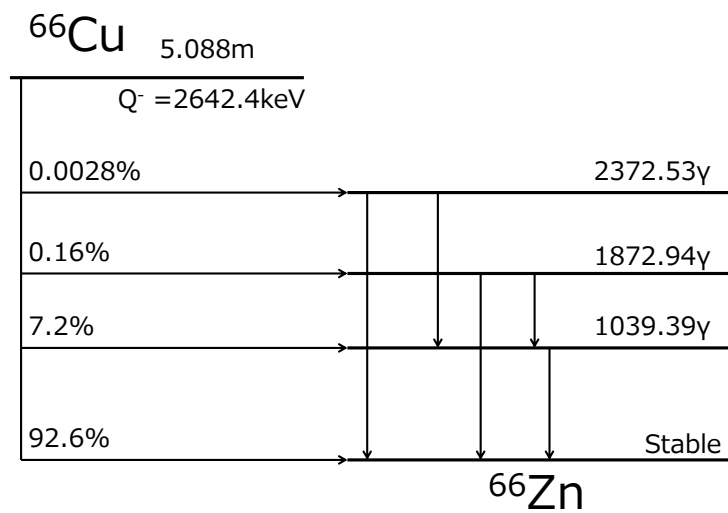
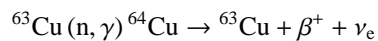


図6  $^{66}\text{Cu}$  の準位図

今回必要な  $^{63}\text{Cu}$  の熱中性子吸収反応は、以下の式で表される。



上の核反応は、以下の微分方程式に従う。

$\lambda_a = F\sigma(^{63}\text{Cu} + \text{n} \rightarrow ^{64}\text{Cu})$ ,  $\lambda_b = \lambda(^{64}\text{Cu} \rightarrow ^{63}\text{Cu})$  とおくと、

$$\frac{dN_a}{dt} = -\lambda_a N_a$$

$$\frac{dN_b}{dt} = -\lambda_b N_b + \lambda_a N_a$$

これから、 $^{64}\text{Cu}$  の量が最大となる中性子照射時間  $t = t_{\max}$  は、

$$t_{\max} = \frac{\log\left(\frac{\lambda_b}{\lambda_a}\right)}{\lambda_b - \lambda_a}$$

で与えられる。今回使う中性子源の中性子フラックスの概算値  $3.7 \times 10^6$  を代入して、 $\lambda_a = 1.6 \times 10^{-17}$  を使い、

$$t_{\max} = 1.8 \times 10^6 [\text{sec}] = 21 [\text{days}]$$

となる。

### 2.2.1 中性子フラックスの概算

中性子源からの中性子フラックスを測る予備実験を行った。 $^{66}\text{Cu}$  の  $1.04\text{MeV}$  の  $\gamma$  ピークの個数は、線源を用いた HPGe 検出器の検出効率を用いて、

$$\text{ピークの個数} = N_{\text{int}} - \int_0^T \frac{1}{\tau_2} (t + t_0) dt \times R \times \text{eff}$$

$$t_0 = \text{照射終了から測定開始までの時間} = 653 \text{ sec}, \tau_2 = \frac{\tau}{\ln 2}, \text{eff} = 6.383 \times 10^{-3}, R = 0.072 = 1.04\text{MeV}\gamma\text{分岐比}$$

とあらわされる。これから、照射終了直後の  $^{66}\text{Cu}$  の個数  $N(t_0)$  は、

$$N(t_0) = \frac{N_{\text{int}}}{0.072(1 - \exp(-\frac{T}{\tau_2}))}$$

$$T = \text{測定時間} = 67.57 [\text{sec}]$$

ともとまる。この値から、中性子フラックス  $f$  が、

$$f = \frac{N(0)}{\tau \sigma N_{\text{int}}} = 3.7 \times 10^6 [/\text{cm}^2\text{s}]$$

と得られる。この値を用いると、本番の  $5\text{cm} \times 1\text{cm} \times 0.1\text{mm Cu}$  ターゲット銅板に 15 時間照射した直後の  $^{64}\text{Cu}$  の放射能は、

$$B = N_0 f \sigma (1 - \exp(-\lambda t))$$

$$N_0 = \text{ターゲット中の}^{63}\text{Cu}\text{の個数} = 2.7 \times 10^{23}, \lambda = \frac{1}{\tau} = 0.054 [\text{h}^{-1}]$$

から、

$$B_{64} = 3.9 \times 10^6 [\text{Bq}]$$

と得られる。欲しい  $\beta^-$  はこのうちの 17 % である。また、同じくターゲット銅板に 15 時間照射した直後の  $^{66}\text{Cu}$  の放射能は、

$$B_{66} = 1.1 \times 10^6 [\text{Bq}]$$

## 2.3 磁石の設計

### 2.3.1 スピン偏極率

$\beta^+$  線のターゲット用に、磁化した物質を用意する必要がある。磁化した物質として、永久磁石と電磁石の2つの選択肢がある。本実験では測定の度に極性を反転させる必要があり、永久磁石では実験の配置を動かして手で磁石の向きを変えることになる。その際に配置の微妙な差のせいでカウント数が変わる可能性を排除するのが難しいので、電磁石を選択した。電磁石の設計の要点は、発熱量を抑えつつ、高い磁束密度を得る点にある。そのために、透磁率の非常に高いPC パーマロイを用いることにした。パーマロイ中の電子のスピン偏極率と、磁束密度には以下のような関係がある。ここで、パーマロイの透磁率が非常に大きく、

$$M[\text{パーマロイの磁化}] = B[\text{磁束密度}]$$

とみなせることと、Fe、Ni の合金であるパーマロイの磁化は電子のスピンに由来することをを用いた。

$$B = \mu_0 \mu_s NP$$

$\mu_0$ : 真空の透磁率、 $\mu_s$ : 電子の磁気モーメント =  $1.8569 \times 10^{-23}$  [J/T]、 $N$ : PC パーマロイの電子密度、 $P$ : スピン偏極率

PC パーマロイの組成は、78 % Ni、22 % Fe であることから、

$$N = 6.02 \times 10^{23} \times \left( \frac{28}{58.69[\text{g/mol}]} \times 0.78 + \frac{26}{55.85[\text{g/mol}]} \times 0.22 \right) \times 8.25[\text{g/cm}^3] = 2.256 \times 10^{30}[\text{m}^{-3}]$$

$$P = 1.85 \times M$$

となる。PC パーマロイの飽和磁化付近 0.7[T] でのスピン偏極率は、 $P = 1.30$  % となる。

### 2.3.2 実効スピン偏極率

文献 [8] によると、パーマロイ中でポジトロニウムの生成するのは主に (80 % 以上) 3d 不対電子であることが示唆されている。さらに、文献 [9] から、パーマロイの磁化の大部分を 3d 電子の不対電子 (Fe では 4 個、Ni では 2 個) が担っていることを考慮する。これからポジトロニウムを作る電子 (3d 電子) のスピン偏極率は、

$$N = 6.02 \times 10^{23} \times \left( \frac{2}{58.69[\text{g/mol}]} \times 0.78 + \frac{4}{55.85[\text{g/mol}]} \times 0.22 \right) \times 8.25[\text{g/cm}^3] = 2.256 \times 10^{30}[\text{m}^{-3}]$$

$$P = 20.38 \times M$$

となり、飽和磁化付近 0.7[T] でのスピン偏極率は、 $P = 14.3$  % となる。

### 2.3.3 Yield の見積もり

上で予想される実効スピン偏極率と、 $\beta^+$  線のスピン偏極率を用いて、Yield を見積もる。磁石の実効スピン偏極率=14 %と、 $\beta^+$  線のスピン偏極率=80 %から、 $\uparrow\downarrow$  ポジトロニウムの yield 比は

$$\text{スピン}\uparrow\text{磁場}\uparrow : \text{スピン}\uparrow\text{磁場}\downarrow = 0.89 : 0.89 + 0.11$$

$$0.89 = \text{磁場によらず一定の割合}$$



と見積もった。ここでは、偏極しきれなかったスピンにより、磁場の向きによらず出来る  $\uparrow\downarrow$  ポジトロニウムを (磁場によらず一定) と表現した。さて、これから生じると予想されるアシンメトリー  $A$  は、

$$A = \frac{\uparrow\uparrow - \uparrow\downarrow}{\uparrow\uparrow + \uparrow\downarrow} = \frac{0.11}{1} = 11 \%$$

と予想される。この非対称度を見分けるには、最低 1000 イベント以上あればよいものと考えられる。

## 2.4 シミュレーション

次に、電子の入射面で極力磁力線が並行かつ一様に分布するように、磁場の数値解析ソフト **FEMM** を用いて 2 次元の数値シミュレーションを行った。2 次元で行ったのは、3 次元の磁場解析ができるアクセスしやすいソフトがなかったためである。実際の 3 次元の磁束密度はピックアップコイルを用いて測ることにした。2 次元のシミュレーションから、磁束の一様性を高めるためにいくつかの工夫をすることにした。

1.  $\gamma$  線入射ギャップの角を取る。
2. 磁場に強い PMT(R7600) をギャップの内側部分に置くために、長さを 15cm に設定。
3. ギャップに近い部分のコイルの巻き数を多くする。

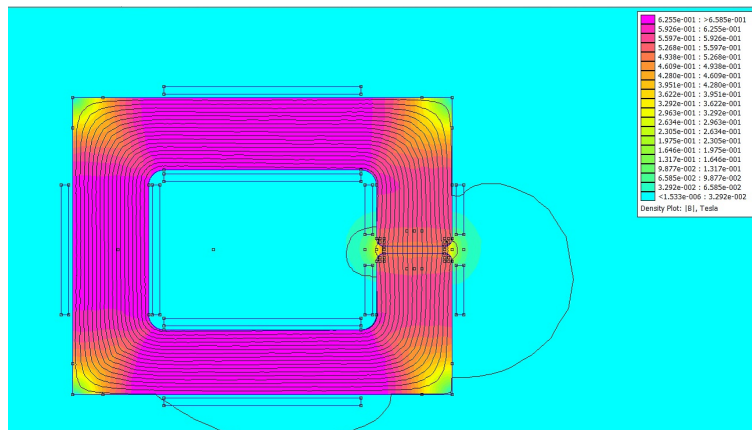


図 7 2 次元でのシミュレーション結果から、ギャップ付近での磁場の一様性を高めるいくつかの工夫を行った。

## 2.5 ヒステリシス

電流の反転に対して大きさが変わらない磁束密度を得るための大きな障害となるのが、ヒステリシスである。ヒステリシスの影響で、コイルに流している電流の極性を反転しただけでは、同じ磁束密度が得られない。設計段階では、以下の 2 つの対処法を考えた。

1. 実際に磁束密度の変化を測定し、電流を反転するたびに大きさを調整する。
2. ヒステリシスがなくなる飽和磁化付近まで磁場をかける。

どちらの解決策をとるかは、磁石を作ってから発熱の具合を考慮して決める事にした。

## 2.6 発熱コントロール

2次元のシミュレーションをもとに、5A×600turn あれば、飽和磁化に近い磁束密度を出すのに十分であるという結論に達した。発熱量を評価するために、パーマロイに巻くエナメル線の抵抗を以下のように測定した。エナメル線には巻きやすさ(太いと悪化)と抵抗率(細いと悪化)の兼ね合いから、直径1mmのものを選択した。

1. エナメル線はボビンに巻かれた状態で届いたので、まず両端の抵抗を測定した。
2. 次にエナメル線を1m切りだし、(全エナメル線の重さ)/(1mの重さ)から、全エナメル線の長さを割り出した。
3. 抵抗率  $[\Omega/m] = (\text{全抵抗}) / (\text{全長さ}) = 0.03[\Omega/m]$  を得た。

この抵抗率の値から、5A×600turnの全発熱量は50W程度という値を得た。コイル自体が大きく放熱面積が十分稼げることから、空冷で十分冷やせると判断し実際にコイルに電流を流して発熱を見ながら対処することにした。

## 2.7 製作

以上の工夫をもとに、図8のような設計のコイルを製作した。

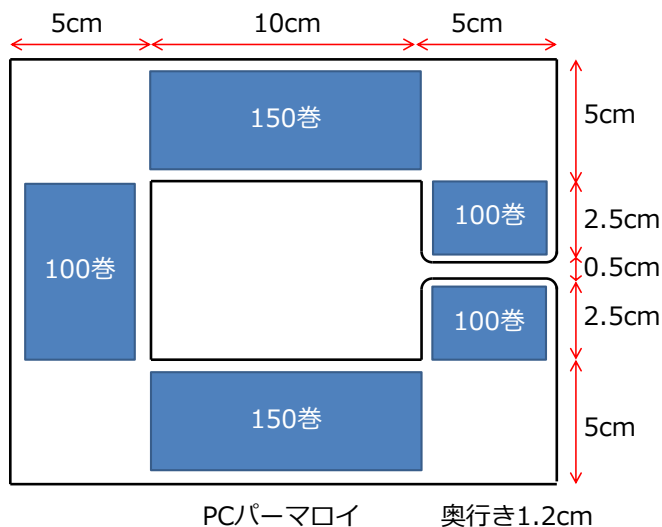


図8 コイルの設計図

巻く作業は2人がかりで行った。芯に高透磁率のパーマロイを用いているため磁束密度は巻き方に依存せず、巻き数のみに依存するが、放熱面積を稼ぐためにエナメル線が互いに重ならないように丁寧に巻いた。

## 2.8 発熱対策

実際にコイルを巻いてみると、一か所だけ発熱が激しく冷却が必要と思われる場所が出来た。原因は、発熱しやすいエナメル線の折り曲げ部に固定用のビニールテープを巻いたことだと考えられる。対策として、放熱

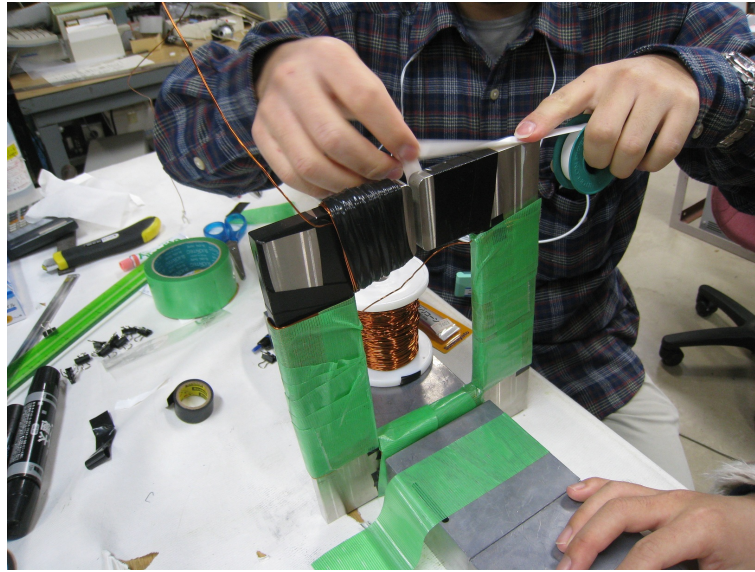


図9 コイル巻きの様子。エナメル線の絶縁被覆が傷付かないように、角にはビニールテープを巻き、巻き終わった部分には養生テープを巻いて保護した。

用に熱伝導率の高い銅を張り付け、コイルとの隙間を CPU グリス (熱伝導率の高いグリス) で埋め、さらに扇風機でアクティブに冷却することにした。この対策により、長時間電流を流しても、室温 16 °C の環境下で 25 °C 程度の熱平衡状態に持ち込むことに成功した。本番の実験では 12 時間程度電流を流したまま測定するため、発熱の激しい部分に温度計をはさんで温度もモニタリングすることにした。

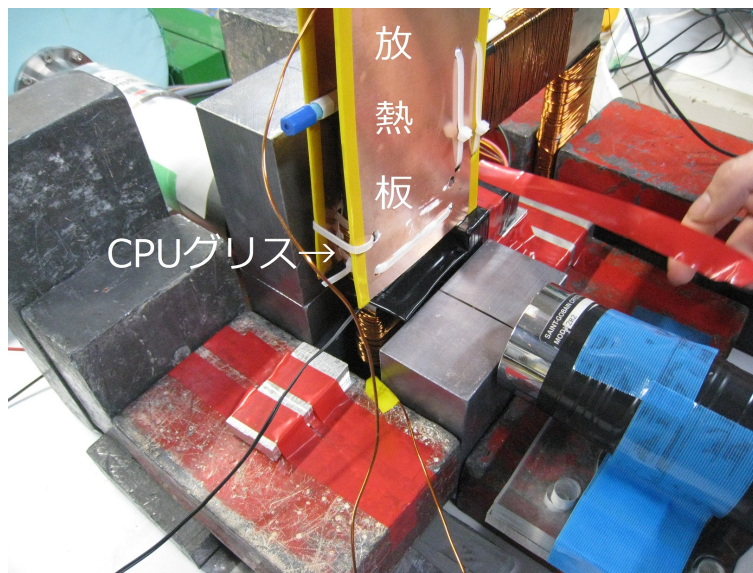


図10 発熱対策。放熱用の銅板を CPU グリスで貼り付け、扇風機で風を送って冷却した。

## 2.9 検出器の磁場対策

今回の実験では、HPGe、NaI+PMT(普通のフォトマル)、プラスチックシンチレーター +R8900(磁場に弱いメタルパッケージ PMT)、プラスチックシンチレーター +R7600(磁場に強いメタルパッケージ PMT) の4つの検出器を用いることにした。このうち、R7600 以外の PMT は磁場に非常に弱く、地磁気レベルからすぐにゲインが下がってしまう。ただし、今回はトロイダルコイルの磁場を一様に保つために、磁性体を近づけたくないので、PMT に磁気シールドを巻くことはできない。そこで、ゲインをギリギリまで上げ、必要ならフォトマルアンプを使うことで対処することにした。(実際にデータを取ると、磁場の向きに対してゲインが大きく変動してしまっていることが分かり、解析段階で処理することになった。)

### 3 実験方法

#### 3.1 回路図

図 11 は本実験の回路図である。シンチレータは、R7600 と R8900 を区別しやすくするためにそれぞれ”ATERUI”、”MARO”と呼称することにする。

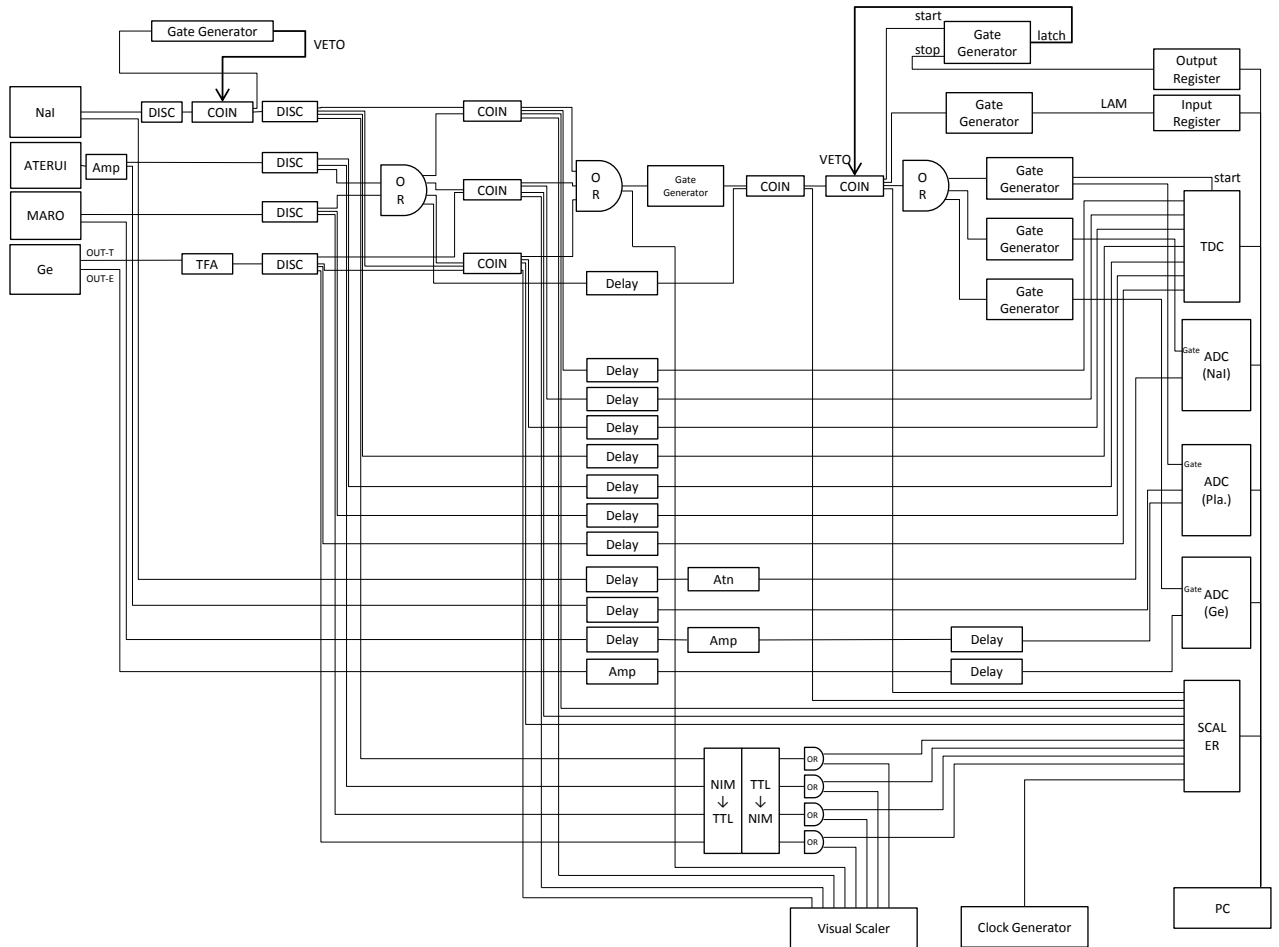


図 11 回路図

### 3.2 DAQ

図 12 は今回のデータ取得のフローチャートである。DAQ のプログラムは付録に掲載した。

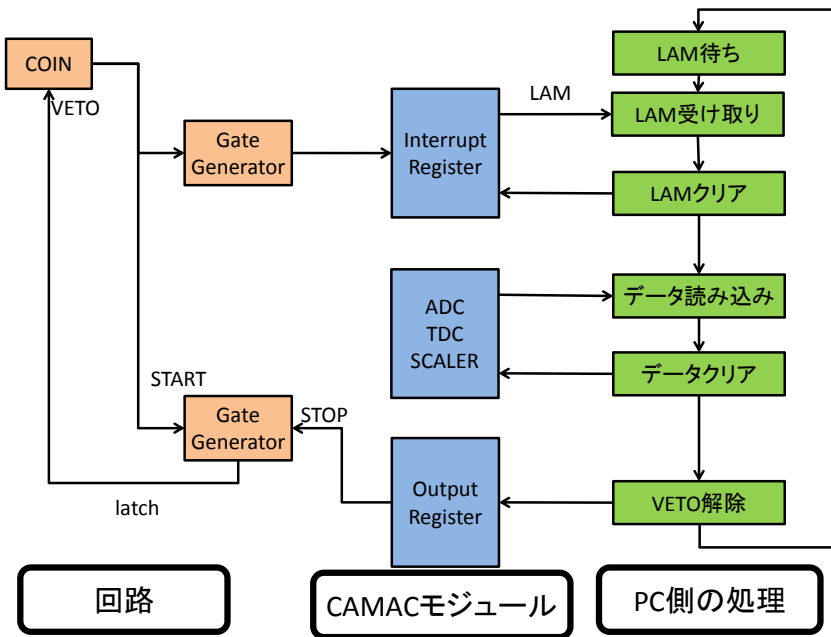


図 12 フローチャート

### 3.3 実験の手順

ATERUI と MARO の OR と NaI 検出器、Ge 検出器それぞれとのコインシデンスをとり（以後、NaI とのコインシデンスアウトを Coin1、Ge とのコインシデンスアウトを Coin2、NaI と Ge 両方とのトリプルコインシデンスアウトを Coin3 と呼称する）、Coin1~Coin3 の OR でトリガーを掛ける。その時に取得するデータは後述する。

### 3.4 使用したモジュール

今回の実験で使用したモジュールを表 3 と表 4 に記す。

表 3 回路

モジュール	型
Amplifier	TENNELEC TC245
Octal Pulse Amplifier	-
Timing Filter Amplifier	ORTEC 474
Dual Variable Attenuator	海津製作所 N0320-628
NIM 200MHz Clock Generator	-
Coincidence Unit	LeCroy 465
Triple 4-FOLD 1-VETO Coincidence	470
16CH 100ns Delay/BNC タイプ	-
16CH 105ns Fixed Delay	HOHSHIN 003
50ns Delay	-
50ns Delay	-
50ns Delay	-
50ns Delay	-
Delay Amplifier	ORTEC 427A
Dual Variable Delay	-
Dual Variable Delay	海津製作所
Octal Discriminator	LeCroy 4608C
Logic Fan-In/Fan-Out	LeCroy 429A
Quad Logic Fan In/Fan Out	-
Dual Gate Generator	Fuji Diamond TKY0243
Dual Gate Generator	LeCroy 222
Dual Gate Generator	1500
Level Adapter	-
8CH Visual Scaler	Technoland corp. N-OR 425
Quad High Voltage Power Supply	林栄精機 RPH-030
5kV Bias Supply	TENNELEC TC950A

表 4 CAMAC

モジュール	型
Create Controller	TOYO CC/7700
Interrupt Register	Technoland corp. C-TS 209
Output Register	HOHSHIN C004
TDC	LeCroy 2228A
ADC	LeCroy 2249A
16CH ADC	豊伸電子 C009
Quad 8K ADC	ORTEC AD413A
CAMAC Scaler	LeCroy 2551



### 3.5 取得したデータ

実験の際に取得したデータを記す。

#### < ADC >

ゲートが開いている間に読み取ったエネルギーに対応する値を返す。取得したデータは

- ・ NaI 検出器
- ・ Ge 検出器
- ・ 2つのプラスチックシンチレータ

の計4つである。検出器によって必要なゲートの広さが異なるため、それぞれ異なるADCモジュールを使用した。

#### < TDC >

コモンスタートに信号を受けてから、ストップの各信号を受けるまでの相対時間に対応する値を返す。取得するデータは

- ・ 各検出器のディスクリミネータアウト4つ
- ・ Coin1～Coin3の3つ

の計7つである。

#### < CAMAC SCALER >

測定開始からの信号を受けた回数を返す。取得したデータは

- ・ 各検出器のディスクリミネータアウト4つ
- ・ Coin1～Coin3の3つ
- ・ Coin1～Coin3のORアウト
- ・ ゲートジェネレータ直後のコインシデンスアウト  
(ゲートを開く信号の回数の記録用)
- ・ VETO用のコインシデンスアウト  
(ゲートが開いた回数の記録用)
- ・ クロックジェネレータから10Hzの信号  
(時間の監視のため)

計11個である。

以上がCAMACモジュールからのデータである。この他に測定開始からのデータの番号とデータを取得した時刻をUNIX時刻で記録した。データファイルには計24個のデータが書き込まれることになる。

### 3.6 実験のスケジュール

表 5 と表 6 に実験の日程を記す。

表 5 実験の日程

時刻		Run Num.	電流
2012/2/15			
18:00	ビーム照明開始		
2012/2/16			
10:45	ビームストップ		
12:05-14:30	Au で検出器・その他の機器のテスト	001-027	
14:33-15:33	本実験	028	+6.5A
15:48-16:48	本実験		-6.5A
16:52-17:21	本実験 ADC の低エネルギー側に 奇妙なピークが見えていたために計測中断 (後に解析用のマクロのミスであることが判明)	030	+6.5A
17:27-17:32	奇妙なピークの原因究明のための計測 その後マクロのミスが発覚 モジュールの不具合が起り計測再開できず	031	0A
18:00	次の線源の作成ビーム照明開始 モジュールの差し替え データ収集用の PC の交換等		
23:22-23:23	スケーラーの不具合で計測中止	032	+6.5A
記録なし	磁場掛け忘れ	033	0A
記録なし	スケーラーの不具合で計測中止	034	記録なし
2012/2/17			
1:12-1:17	ADC の不具合で計測中止  モジュールの差し替え等	034  (上書き)	記録なし

表 6 実験の日程 (続き)

時刻		Run Num.	電流
2:06-2:14	テストラン	035	記録なし
2:19-4:20	本実験	036	+6.5A
4:24-6:24	本実験	037	-6.5A
	NaI のゲインの変化あり		
6:32-8:32	本実験	038	+6.5A
8:39-9:36	本実験	039	-6.5A
9:15	ビームストップ		
9:35	線源を取り換え		
9:40-9:42	本実験	040	記録なし
	データ収集系の不具合で計測中止		
9:48-10:48	本実験	041	-6.5A
10:51-11:51	本実験	042	+6.5A
11:54-12:54	本実験	043	-6.6A
12:57-13:57	本実験	044	+6.6A
14:03-15:03	本実験	045	-6.7A
15:07-16:07	本実験	046	+6.7A
16:10-17:10	本実験	047	-6.8A
17:13-18:13	本実験	048	+6.8A
18:16-19:16	本実験	049	-6.9A
19:19-20:19	本実験	050	+6.9A
21:07-22:07	磁場なしのデータ	051	0A
2012/2/18			
0:07-3:07	磁場なしのデータ	052	0A
3:07-6:07	磁場なしのデータ	053	0A
6:18-9:18	磁場なしのデータ	054	0A
10:00-10:30	線源を Au に変えて同じ条件で計測	055	0A
10:38-11:08	キャリブレーション用に Cu と Au を同時に計測	056	0A
11:26-11:56	線源 Au のみ磁場なし鉛で遮蔽したデータ	057	0A
11:59-12:30	線源 Au のみ磁場なし鉛で遮蔽したデータ	058	0A
12:31-12:41	線源 Au のみ磁場なし遮蔽せず	059	0A
12:44-12:54	線源 Co のみ磁場なし遮蔽せず	060	0A
12:55-13:05	線源 Co のみ磁場あり遮蔽せず	061	-6.5A
13:07-13:17	線源 Co のみ磁場あり遮蔽せず	062	+6.5A
13:18-13:28	線源 Au のみ磁場あり遮蔽せず	063	+6.5A
13:29-13:39	線源 Au のみ磁場あり遮蔽せず	064	-6.5A

### 3.7 使用したデータについて

今回の実験では、途中でモジュールの不具合等が起こったので、解析では最も安定してデータが取得できたランナンバー 041 から 050 までのデータを使用した。

## 4 検出器の性能評価

この節では、ゲルマニウム検出器の性能評価を行う。

### 4.1 検出効率

検出効率とは

$$(\text{検出効率}) = \frac{(\text{あるエネルギーの単位時間あたりの検出数})}{(\text{試料の放射能})} \quad (4.1)$$

であり、検出器に入った個数のうちの検出された個数ではない。 $\gamma$ 線のエネルギーや試料の形状、試料から見た検出器の立体角も含めた”検出効率”ということになる。これを評価するには、 $\gamma$ 線のエネルギーと放射能が分かっている線源を検出器からある距離だけ離して計測し、各エネルギーに対応するイベント数を数えて単位時間あたりの検出数を出し、試料の放射能 [Bq] で割れば良い。

### 4.2 実験手順

図 13 は評価のための実験のジオメトリである。 $d$  はゲルマニウム検出器の先端から線源を固定する板までの距離である。線源には  $^{60}\text{Co}$ (1173keV、1132keV) と  $^{133}\text{Ba}$ (276keV、303keV、356keV、384keV) を用いた。

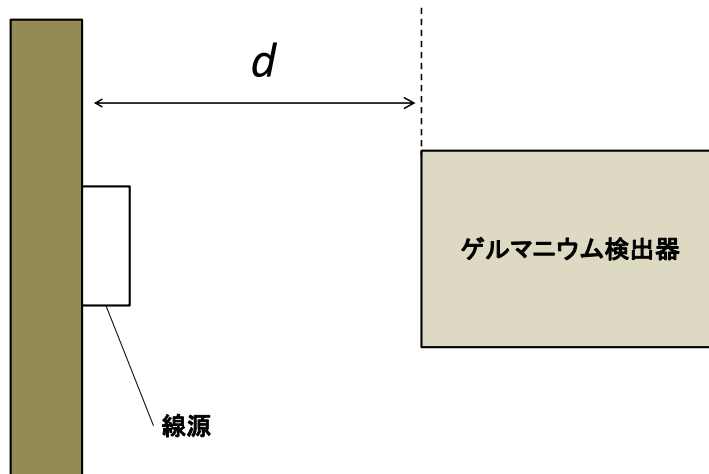


図 13 性能評価実験のジオメトリ

これらを板に貼り付けて数 10 秒計測し、各エネルギーのピークをガウシアン +1 次関数でフィットして計数 ( $C$ ) を求めて測定時間 ( $T$ [s]) で割る。更に各線源の放射能 ( $B$ [Bq]) と各エネルギーへの崩壊率 ( $P$ ) で割って (こうすることで、単位時間あたりにそのエネルギーの  $\gamma$  線が線源から出る個数で割ることになる)、検出効率を求めることが出来る。

$$\text{Eff}(E, d) = \frac{C}{TBP} \quad (4.2)$$

### 4.3 Dead Time 補正

Dead Time  $\tau$  とは、検出器やデータ収集系が 1 つの信号を処理するために要する時間である。Dead Time 中は一時的に他の信号を読み取れなくなるので、カウントレートが高い実験においてこの補正は重要である。ここでは簡単な場合に Dead Time 補正の方法を記述する。

真のカウントレートを  $m$ 、検出器が時間  $T$  中に実際に受け取った信号数を  $C$  とする。全 Dead Time は  $C\tau$  となるので、この時間中に受け取るはずだった信号は  $mC\tau$  個であると考えられる。よって時間  $T$  で受け取る信号について

$$mT = C + mC\tau \quad (4.3)$$

という等式が成り立つ。これを解いて、カウントレートは

$$m = \frac{C/T}{1 - (C/T)\tau} \quad (4.4)$$

である。この式は実験で得られたカウントレート  $C/T$  から真のカウントレートを導く式となる。今回は計測にかかった実時間  $T_{\text{real}}$  と、実際にデータ収集系が機能していた時間  $T_{\text{live}}$  を測ることが出来たので  $\tau = (T_{\text{real}} - T_{\text{live}})/C$  である。よって補正後の検出効率は式 (4.2) において  $C/T$  を

$$\frac{C/T_{\text{real}}}{1 - (C/T_{\text{real}}) \frac{T_{\text{real}} - T_{\text{live}}}{C}} = \frac{C}{T_{\text{live}}} \quad (4.5)$$

と置き換えることで得られる（実際に検出器が動いていた時間  $T_{\text{live}}$  で信号数  $C$  を割ると真のカウントレートが得られるのは当たり前である）。

## 4.4 データ

表 7、表 8 が得られたデータである。

表 7 データ

Atom	$d$ [mm]	$E$ [keV]	$C$	$T_{\text{live}}$	$B$ [kBq]	$P$	Efficiency
$^{133}\text{Ba}$	70	276.398	$11721 \pm 130$	264.36	197.52	0.07164	$(3.133 \pm 0.035) \times 10^{-3}$
	70	302.653	$28310 \pm 190$	264.36	197.52	0.1833	$(2.957 \pm 0.020) \times 10^{-3}$
	70	356.017	$79864 \pm 300$	264.36	197.52	0.6205	$(2.464 \pm 0.009) \times 10^{-3}$
	70	383.851	$10027 \pm 130$	264.36	197.52	0.0894	$(2.148 \pm 0.028) \times 10^{-3}$
$^{60}\text{Co}$	70	1173.237	$1907 \pm 45$	62.12	24.63	0.999	$(1.247 \pm 0.029) \times 10^{-3}$
	70	1332.501	$1675 \pm 41$	62.12	24.63	0.99982	$(1.094 \pm 0.027) \times 10^{-3}$
$^{133}\text{Ba}$	120	276.398	$3668 \pm 67$	143.92	197.52	0.07164	$(1.801 \pm 0.033) \times 10^{-3}$
	120	302.653	$8784 \pm 98$	143.92	197.52	0.1833	$(1.686 \pm 0.019) \times 10^{-3}$
	120	356.017	$25154 \pm 170$	143.92	197.52	0.6205	$(1.426 \pm 0.009) \times 10^{-3}$
	120	383.851	$3409 \pm 65$	143.92	197.52	0.0894	$(1.342 \pm 0.025) \times 10^{-3}$
$^{60}\text{Co}$	120	1173.237	$1586 \pm 41$	125	24.63	0.999	$(5.16 \pm 0.13) \times 10^{-4}$
	120	1332.501	$1380 \pm 38$	125	24.63	0.99982	$(4.48 \pm 0.12) \times 10^{-4}$

表 8 キャリブレーション

Atom	$E$ [keV]	Channel
$^{133}\text{Ba}$	276.398	$857.098 \pm 0.016$
	302.653	$940.387 \pm 0.011$
	356.017	$1107.74 \pm 0.01$
	383.851	$1195.39 \pm 0.02$
$^{60}\text{Co}$	1173.237	$3686.29 \pm 0.05$
	1332.501	$4188.12 \pm 0.06$

## 4.5 解析

### 4.5.1 キャリブレーション

まずは線型でキャリブレーションを行い、チャンネルとエネルギーとの間に

$$E[\text{keV}] = (0.317063 \pm 0.000003) \times \text{Channel} + (4.7108 \pm 0.0047) \quad (4.6)$$

の関係があることを確かめた。図 14 がその図である。

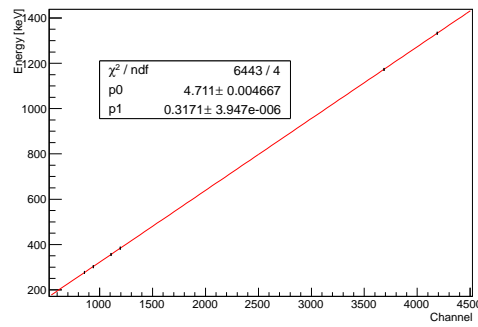


図 14 キャリブレーション

#### 4.5.2 検出効率

式 (4.2) に従って得られた検出効率は表 7 に記した。図 15 がその図である。ここから  $aE^b$  という関数でフィッティングし、エネルギーと検出効率との間に

$$\text{Eff}_{d=70\text{mm}}(E) = (0.138 \pm 0.012) \times E^{-0.683 \pm 0.014} \quad (4.7)$$

$$\text{Eff}_{d=120\text{mm}}(E) = (0.262 \pm 0.023) \times E^{-0.886 \pm 0.015} \quad (4.8)$$

の関係を付けた。今回の実験では、 $E = 511\text{keV}$  の検出効率が重要である。試料から見た検出器の立体角が異なるのでこのままでは使えないが、目安として  $10^{-3}$  程度であると考えられる。

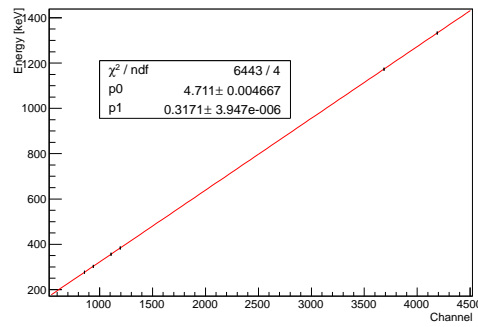


図 15 検出効率。  $d = 70\text{mm}$  は赤色で、 $d = 120\text{mm}$  は青色で描いた。



## 5 解析

### 5.1 キャリブレーション

#### 5.1.1 Ge ピークの同定

線源が  $^{64}\text{Cu}$  単独の場合、ピークのエネルギーは  $511\text{keV}$  であると期待される。 $^{64}\text{Cu}$  のピークは、ADC のチャンネルにして 1960 付近にたつ。これが確かに  $511\text{keV}$  であることを確認するために、比較線源として  $^{198}\text{Au}$  を用いる。図 16 は、 $^{64}\text{Cu}$  と  $^{198}\text{Au}$  を同時に Ge 検出器で測定して得られた ADC のヒストグラムである。(run 番号 56)

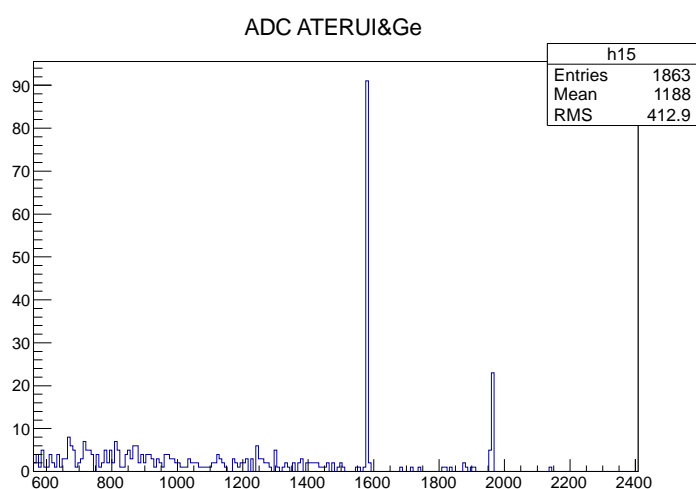


図 16 Cu-Au

$^{198}\text{Au}$  は  $411\text{keV}$  の  $\gamma$  線を出すので、1600 チャンネル付近のピークがそれに対応する。それよりもエネルギーの高いピークは  $^{64}\text{Cu}$  由来としか考えられないので、1960 付近が  $511\text{keV}$  に対応することが確かめられる。

一応、 $^{198}\text{Au}$ 、 $^{64}\text{Cu}$  に加え、 $^{60}\text{Co}$  のピークのエネルギーを既知として、Ge 検出器のキャリブレーションを行った結果を図 17 に示す。

チャンネル数とエネルギー（単位 keV）との関係は、

$$\text{energy} = (0.50744 \pm 0.00005) \times \text{channel} - (454.253 \pm 0.121)$$

である。尚、用いたデータは 51 番、59 番、及び 60 番である。

#### 5.1.2 ATERUI のキャリブレーション

ATERUI の ADC も同様にキャリブレーションを行った。ATERUI の ADC の概形は以下の図のとおりである。

この図において、一番左のピーク（ペDESTAL。検出するエネルギーの最低値、粒子が入射しないとこの値をとる）、山の始まり（低エネルギー側）、山の終わり（高エネルギー側）に対応するエネルギーを考察することにより、チャンネル数とエネルギーの対応関係を求める。なお、キャリブレーションの関数は 1 次関数と仮定

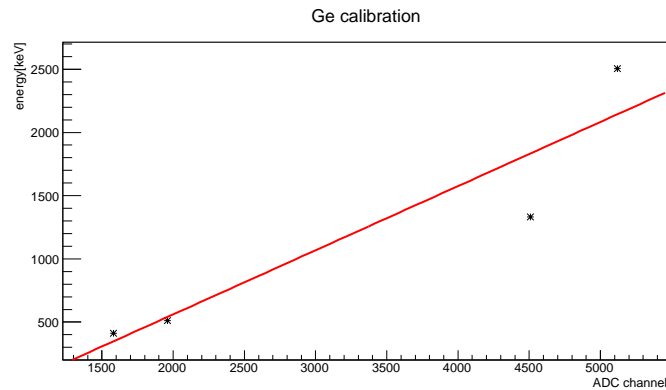


図 17 Cu-Au

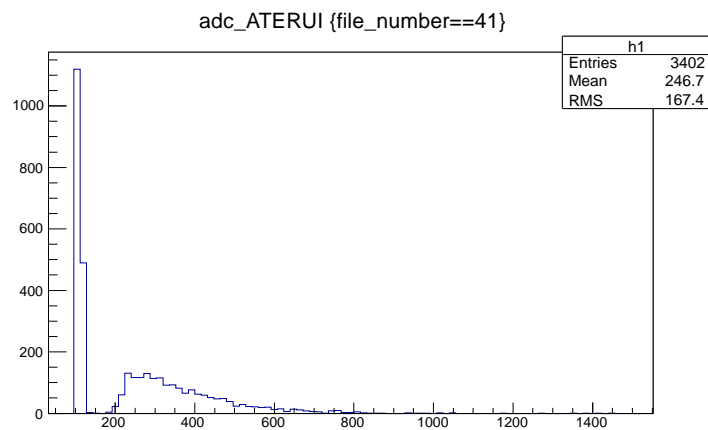


図 18 AD (ATERUI) の例

する。

まずペDESTALに対応するエネルギーは0である。

次に山の始まりについて、線源からでた陽電子が落とすエネルギーが最も小さいのは、陽電子の運動エネルギーがQ値をもち、シンチレータの面に垂直にシンチレータを突き抜けるときである。このときのエネルギーは、NISTのサイト\*1を参照して得ることができる。

山の終わりについては、e<sup>+</sup>のエネルギーの全てがQ値となり、そのエネルギーの全てをATERUI中で落とすときであるので、Q値がそのまま対応するエネルギーとなる。

なお、山の終わりについてはバラツキがおおきく、正確にキャリブレーションをするのが困難であるが、目分量で誤差をつけてキャリブレーションを行った。

キャリブレーションの結果、チャンネル数とエネルギー（単位 keV）との関係は、

$$\text{energy} = (1.02832 \pm 0.0688287) \times \text{channel} - (109.834 \pm 10.0852)$$

\*1 <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>

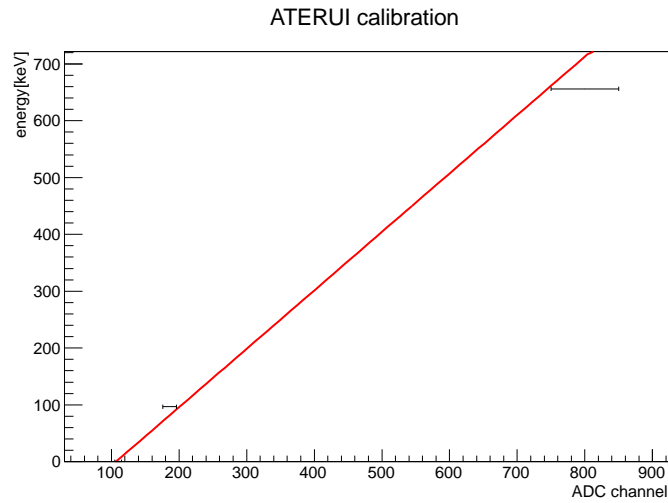


図 19 ATERUI のキャリブレーション

である。なお、用いたデータは 41 番～50 番である。

### 5.1.3 NaI のキャリブレーション

NaI 検出器のチャンネル数とエネルギー値の対応をつける。

Ge 検出器と同様の事を行えばよいはずであるが、実験方法の誤りで一部できなかった。データ 60 番は、 $^{60}\text{Co}$  線源から出る  $\gamma$  線をキャリブレーションに用いるために取ったデータである。しかし、Ge 検出器の検出部分の前の鉛は取り除いたが、NaI 検出器の検出部分の前に鉛を置いてデータを取ってしまった。よって NaI のキャリブレーションにデータ 60 番は使えなかった。(図 20)

図 21 はデータ 51 番のヒストグラムである。右側のピークが 511keV のピークであると考えられる。この

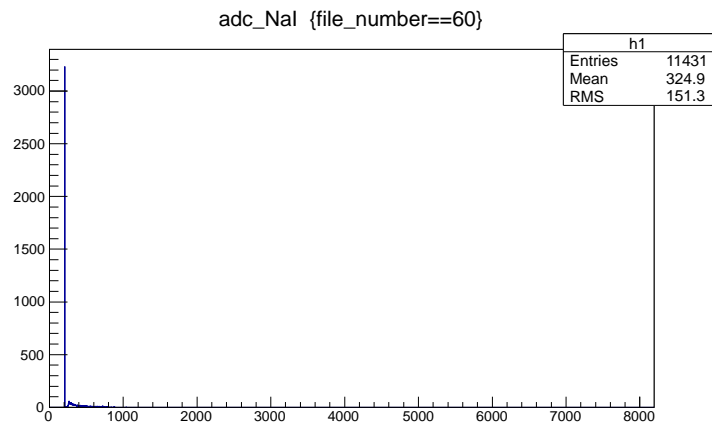


図 20 ADC-NaI-Co

ピークをガウス関数でフィットすると、このピークの中心値は

$$4.171 \times 10^2 \pm 0.6 \text{ channel}$$

であった。

図 22 はデータ 59 番のヒストグラムである。右側のピークが 411keV のピークであると考えられる。このピークをガウス関数でフィットすると、このピークを中心値は

$$3.735 \times 10^2 \pm 0.2 \text{ channel}$$

であった。

また、図 22 より、NaI 検出器のペDESTALは 208 チャンネルであるとわかる。

以上より、チャンネル数とエネルギー値の対応を 1 次関数でフィットした。結果は

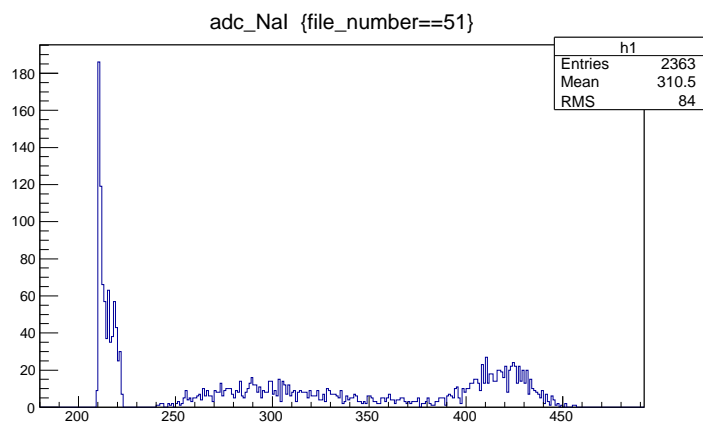


図 21 ADC-NaI-Cu

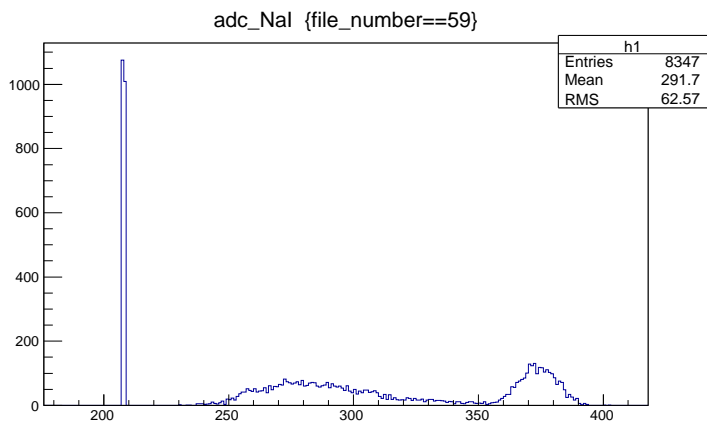


図 22 ADC-NaI-Au

$$\text{energy} = (2.295 \pm 0.032) \times \text{channel} - (-4.46 \times 10^2 \pm 12)$$

である。(図 23)

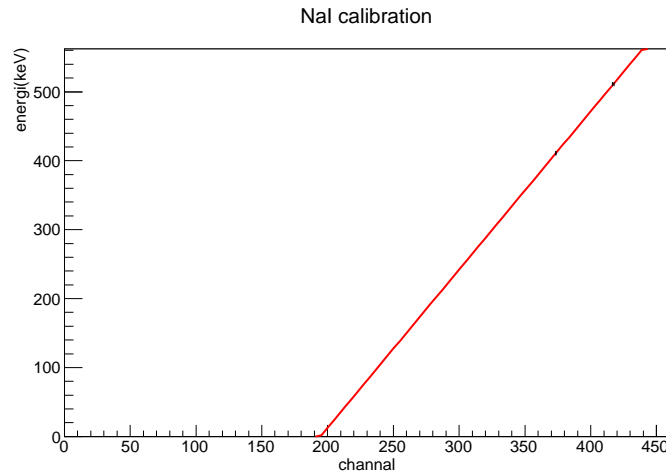


図 23 NaI キャリブレーション

## 5.2 Decay 補正

### 5.2.1 補正の仕方

今回線源として用いた  $^{64}\text{Cu}$  は半減期  $\tau = 12.7\text{h}$  で崩壊していくため、時間がたつにつれて得られるカウント数は減っていくことが予想される。

したがって、非対称度を求める際には、カウント数に崩壊の補正をかけるが必要になる。なお銅箔に中性子ビームを照射する際に同時に  $^{66}\text{Cu}$  も生成され、この同位体は  $\beta$  線や  $\gamma$  線を放出するが、こちらは半減期が 5.088 分なので、run041～run050 についてデータ収集を始めるころには、ほとんど検出器に影響を及ぼさないほど崩壊していると考えてよい。

次に、実際どのように崩壊の効果を加味したかを述べる。

まず run040～run051 の各データについて、それぞれの開始 0～10 分と 30～40 分において、ATERUI と Ge が同時に検出したイベント数を数えた。

補正に際して ATERUI と Ge の検出器を用いた理由は、磁場補正の節で述べるが、この二つの検出器のみが磁場の影響を受けていないと考えられるためである。

それから、各時間における得られた値を、関数  $f(t) = c \exp(-\frac{t}{\tau})$  によってフィッティングした。

本来ここにバックグラウンドの寄与である定数項を付け加える必要があるが、今回の実験ではバックグラウンドは十分小さいと思われるので無視してよいと考えた。

Decay correction  $c \cdot \exp(-t/\tau)$

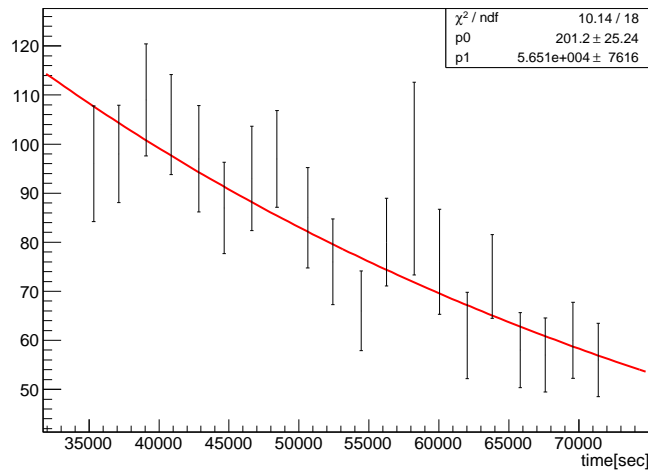


図 24 Decay 補正

フィッティングの結果、 $\tau = 56510 \pm 7612$  という値が得られた。なお、今回の実験においては各イベント数の比ができれば十分なので、定数係数である  $c$  は 1 として構わない。フィッティング関数をみると、 $\tau$  の値が、誤差の範囲で文献値 12.7 時間とおおよそ一致していることがわかる。

この得られたフィッティング関数を、各 run の開始時間から終了時間の範囲で定積分することで、各 run のイベント数に対する decay 補正係数  $A_{41} \sim A_{51}$  を求めることができ、この係数で各 run の着目しているイベント数を割ることで補正をすることができる。すなわち、時間がたつにつれて 1 カウントあたりの重みを増やす、という考え方である (図 25)。以下、各 run の注目しているイベント数をそれぞれ  $S_{41} \sim S_{51}$  と表すことにする。decay 補正の具体例を挙げると、run043 のイベント数を decay 補正した値は、

$$\frac{S_{43}}{A_{43}} = \frac{S_{43}}{\int_{t_{43i}}^{t_{43f}} f(t) dt} = \frac{S_{43}}{\tau(\exp(-\frac{t_{43i}}{\tau}) - \exp(-\frac{t_{43f}}{\tau}))} \quad (5.1)$$

となる ( $t_{43i}, t_{43f}$  はそれぞれ、run043 の開始時刻と終了時刻)。

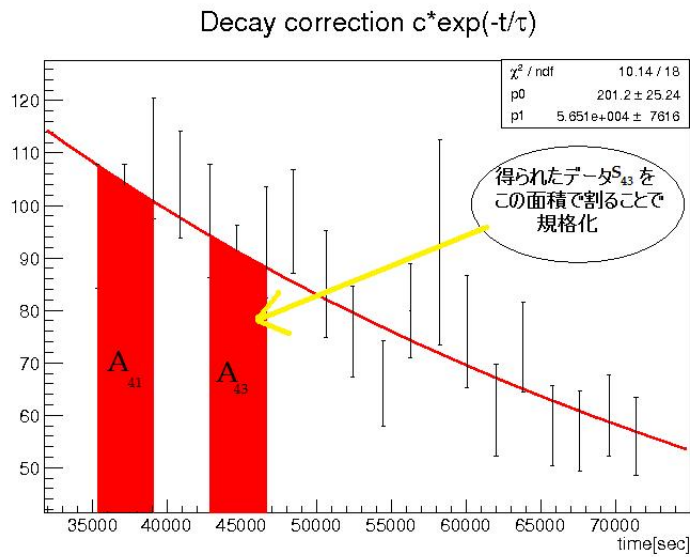


図 25 Decay 補正の考え方

decay 補正係数を用いると、非対称度は以下の式によって求めることができる。

$$Asymmetry = \frac{\left(\frac{S_{42}}{A_{42}} + \frac{S_{44}}{A_{44}} + \frac{S_{46}}{A_{46}} + \frac{S_{48}}{A_{48}} + \frac{S_{50}}{A_{50}}\right) - \left(\frac{S_{41}}{A_{41}} + \frac{S_{43}}{A_{43}} + \frac{S_{45}}{A_{45}} + \frac{S_{47}}{A_{47}} + \frac{S_{49}}{A_{49}}\right)}{\left(\frac{S_{42}}{A_{42}} + \frac{S_{44}}{A_{44}} + \frac{S_{46}}{A_{46}} + \frac{S_{48}}{A_{48}} + \frac{S_{50}}{A_{50}}\right) + \left(\frac{S_{41}}{A_{41}} + \frac{S_{43}}{A_{43}} + \frac{S_{45}}{A_{45}} + \frac{S_{47}}{A_{47}} + \frac{S_{49}}{A_{49}}\right)} \quad (5.2)$$

補正係数  $A_{41} \sim A_{50}$  の値を具体的に示しておく。

表 9 Decay 補正係数の値

係数	値
$A_{41}$	1866
$A_{42}$	1747
$A_{43}$	1634
$A_{44}$	1528
$A_{45}$	1424
$A_{46}$	1331
$A_{47}$	1244
$A_{48}$	1164
$A_{49}$	1089
$A_{50}$	1018

### 5.2.2 誤差の評価

上で記述した非対称度の式において、各  $S$  およびフィッティング関数の  $\tau$  について誤差がつくので、それらの伝播を考えて最終的な誤差とする必要がある。

$S_{41} \sim S_{50}$  の誤差を  $\sigma_{S_{41}} \sim \sigma_{S_{50}}$ 、 $\tau$  の誤差を  $\sigma_\tau$  とすると Asymmetry の誤差  $\sigma_{Asy}$  は

$$\sigma_{(Asy)} = \sqrt{\sum_{k=41}^{50} \left( \frac{\partial(Asy)}{\partial S_k} \right)^2 (\sigma_{S_k})^2 + \left( \frac{\partial(Asy)}{\partial \tau} \right)^2 (\sigma_\tau)^2} \quad (5.3)$$

となる。

### 5.3 Ge 検出器のデータに基づく解析

まずは今回使用する検出器の中で、磁場の影響がほとんどないために最も信頼できると考えられる ATERUI と Ge を用いて非対称度の評価を行った。

以下の図より、Ge 検出器は磁場の上下によって大きな影響は受けていないことがわかる。

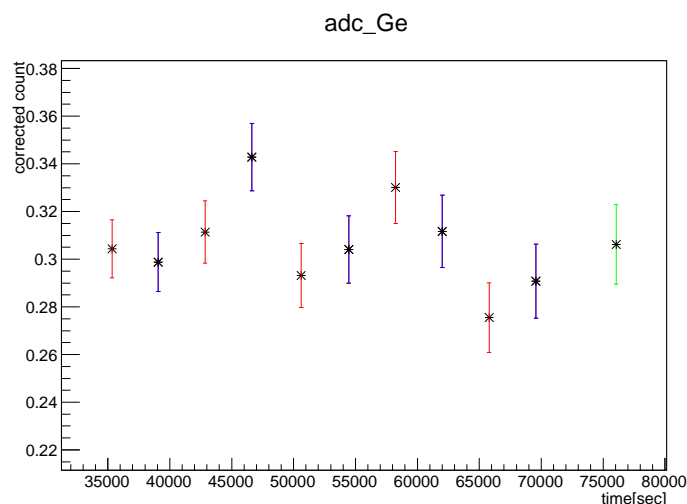


図 26 Ge 検出器の磁場による変化

カット条件は TDC (ATERUI) <2100  $\wedge$  TDC (Ge) <2100 とした。

今回着目するイベントは 511keV 付近のものである。キャリブレーションにより 511keV に対応するチャンネル数は目星がついているので、そのあたりで突出しているピークの山を gaussian でフィッティングし、そのうえで gaussian で囲まれる面積をイベント数とした。面積の誤差は、root のフィッティング機能によって得られる、面積をパラメータとしたときの誤差の値を用いた。

run041~run050 のピーク面積は以下の通り。



表 10 gaussian の面積

run number	面積 ± 誤差
041	205 ± 14.4
042	208 ± 15.0
043	179 ± 13.4
044	182 ± 14.0
045	138 ± 12.7
046	123 ± 11.1
047	142 ± 12.0
048	140 ± 12.1
049	89.0 ± 9.72
050	111 ± 11.9

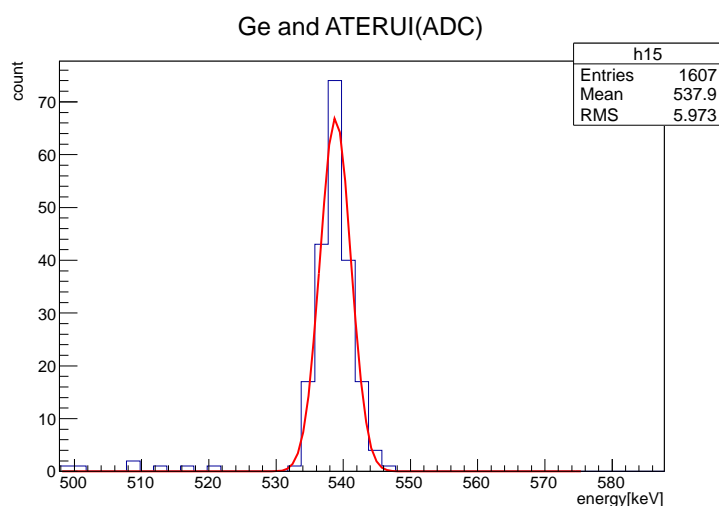


図 27 gaussian でのフィッティングの例

Decay 補正を施し、誤差を評価した最終的な非対称度の値は

$$\text{Asymmetry} = 0.0445 \pm 0.0266 \quad (5.4)$$

となった。この結果によって、95.3% の信頼率 ( $\cong 2\sigma$ ) で非対称度が見えると結論することができる。

### 5.3.1 ATERUI、Ge のカット条件について

今回非対称度を求めるときに、Ge と ATERUI の両方が反応したイベントを抜き出す条件として、TDC (ATERUI) <2100  $\wedge$  TDC (Ge) <2100 というカットをかけた。これは、両者の TDC においてオーバーフロー (GATE の時間内に粒子が検出されないこと) ではないものを抜き出すことに相当するが (詳しくは後述)、一方でこれと同値なものとして、ADC がペDESTALでないというカット条件をかけても理論上結果は変わら

ないはずである。

実際のところは、何らかの理由 (おそらくは検出器の不調) でそれらのカット条件においてイベント数に差がでてしまっているが、イベント数が大体 100 以上なのに対して、その差は 2,3 イベント程度である。

したがって今回は両者のカット条件は同一のものとみなし、解析にあたっては適宜有用なほうのカット条件を用いることにした。なお、TDC によるカット条件に関しては 5.5 節で詳しく議論する。

#### 5.4 511keV 以外のイベントも含んだときの非対称度

今回の実験は、ポジトロニウムが  $2\gamma$  崩壊したときのイベント数を磁場の上下で比較することにより非対称度をみるのが目的であったが、仮に  $3\gamma$  崩壊したイベントも含めて比較すれば非対称度の度合いは小さくなるはずである。

そのことを確かめるために、ATERUI に入ったエネルギーが 511keV 付近以外の、ペDESTALを除く全領域のイベントも数えたうえで、磁場の上下反転での非対称度を計算してみた。このとき、511keV のときと同様に decay 補正を行った。なお、このとき各 S は gaussian でフィッティングした面積ではなく、単純にカウント数に decay 補正を施して足し合わせたものを用いた。

なお今回誤差について、通常の統計誤差の手法に倣い  $\sqrt{S}$  としたものに加え、結果は以下の通りであった。

表 11 count 数

run number	count 数 ± 誤差
041	631 ± 14.4
042	585 ± 15.0
043	576 ± 13.4
044	599 ± 14.0
045	481 ± 12.7
046	468 ± 11.1
047	484 ± 12.0
048	433 ± 12.1
049	361 ± 9.72
050	356 ± 11.9

$$\text{Asymmetry} = 0.0144 \pm 0.0151 \quad (5.5)$$

この結果を受けて、誤差の範囲内で非対称度が見えないと言ってよいだろう。

## 5.5 非対称度のエネルギーカット条件依存性

シンチレータ中で  $e^+$  が落とすエネルギーはおおよそ Bethe-Bloch の式に従う。Bethe-Bloch の式<sup>\*2</sup>[10] を示すと以下の通り。

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z z^2}{A \beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (5.6)$$

またこの式に基づいて、0.5mm のプラスチックシンチレータ中で  $e^+$  が落とすエネルギーを図示すると、以下の図のようになる。

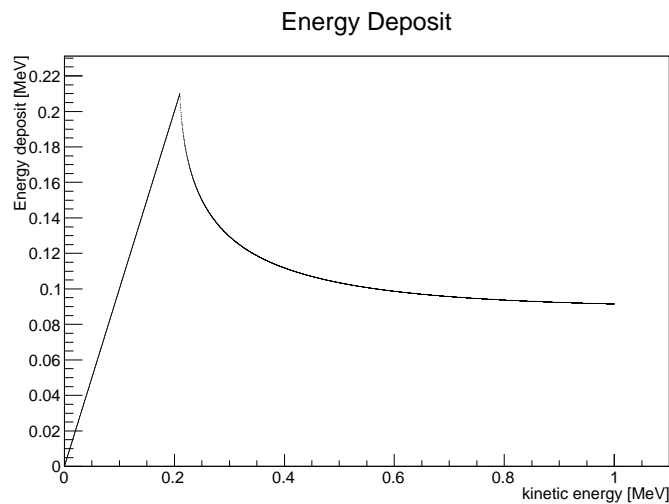


図 28 energy deposit

0.2MeV あたりのとがっているところ以降が、 $e^+$  がシンチレータを突き抜ける場合である。

この図をみれば、 $e^+$  の速度が大きくなるほど落とすエネルギーが小さくなることがわかる。そして、 $e^+$  の速度が大きいかいほうが偏極率の期待値は大きくなることがわかっているので(第1章参照)、ADC (ATERUI) で得られるエネルギーが低いイベントを選び出すと、より非対称度が大きくなるはずである。それを確かめるべく、ADC (ATERUI) の数か所でカットをかけて非対称度を導出することを試みる。

<sup>\*2</sup> 本来この式は陽電子のような軽い荷電粒子に対してそのまま適用することはできないが、 $\beta$  依存性は概ね正しいので、参考のため掲載した。

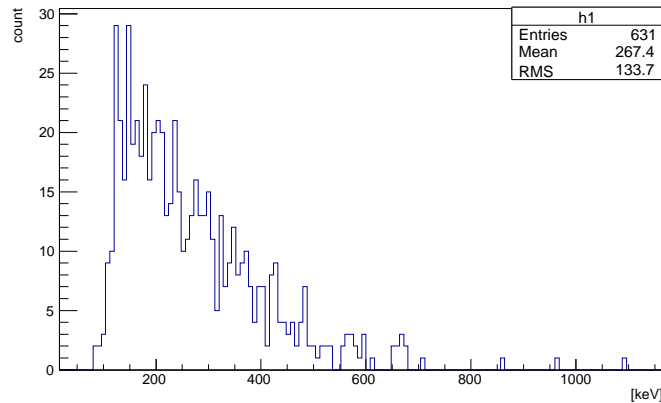


図 29 ADC (ATERUI) の例

ADC (ATERUI) <700,600,500,400,300  $\wedge$  TDC (ATERUI) <2100  $\wedge$  TDC (Ge) <2100 の条件の条件で ADC (Ge) の 511keV のピークの面積を用いて、Decay 補正をかけて非対称度を評価した。

結果は以下の通りとなった。

表 12 非対称度

ADC (ATERUI) <	非対称度 $\pm$ error	信頼率 [%]
700	0.0541 $\pm$ 0.0281	97.3
600	0.0603 $\pm$ 0.0290	98.1
500	0.0648 $\pm$ 0.0312	98.1
400	0.0644 $\pm$ 0.0378	95.6
300	0.1115 $\pm$ 0.1113	84.2

これらの結果から、エネルギーの低い領域でカットをかけたもののほうが、より大きな非対称度を見出すことができたといえるだろう。

## 5.6 NaI 検出器のデータに基づく解析

この節では、NaI 検出器のデータを解析する。NaI は磁場の影響を強く受けていることが懸念されるので、その分の効果を補正する必要がある可能性がある。

### 5.6.1 磁場の効果による補正

まず、NaI 検出器がどのように磁場の影響を受けているかを評価するため、校正用線源  $^{198}\text{Au}$  を使用して時の ADC ヒストグラムを見る。(図 30) それぞれ赤が磁場なし、青が下向きの磁場、緑が上向きの磁場を印加したときのものである。これを見ると、磁場を印加した場合の方が、印加していない場合に比べてエネルギーが

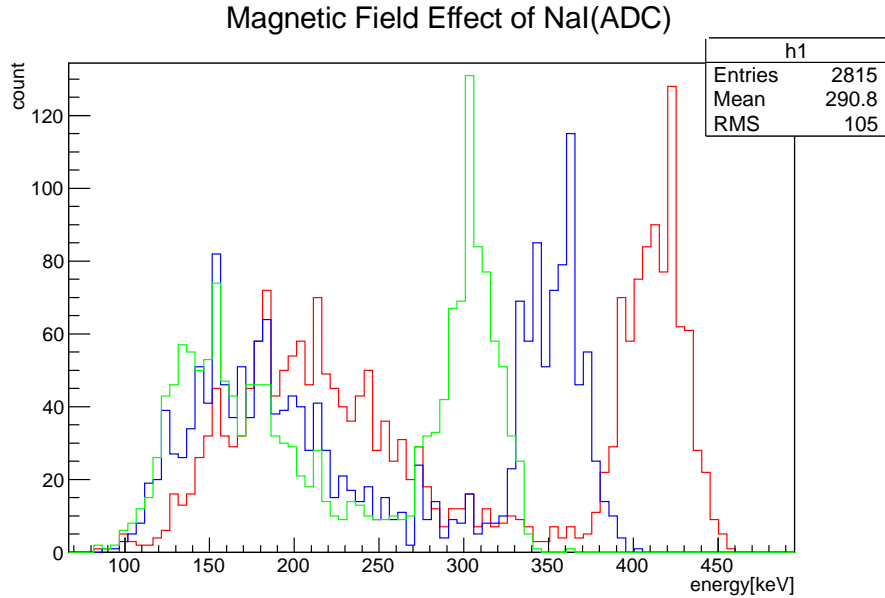


図 30 磁場による影響

それぞれ赤が磁場なし、青が下向きの磁場、緑が上向きの磁場を印加したときのヒストグラム

低く見積もられていることが分かる。これは光電子増倍管の増幅率が磁場の影響で下がってしまったことに起因すると考えられる。更に重要なことには、エネルギーが磁場の向きにも依存してしまっていることが挙げられる。しかしながら、以上で述べたことは非対称度の評価には直接影響しない。なぜならば、仮に  $^{64}\text{Cu}$  由来の  $511\text{keV}$  ピークが期待される位置よりも低エネルギー側にシフトしていたとしても、少なくともそのピークが  $2\gamma$  由来のものであると同定することは可能だからである。(この実験ではそもそも  $2\gamma$  由来のピーク以外は観測されないし、仮にあったとしてもピークがどの程度シフトしているかは  $^{198}\text{Au}$  のデータから推測できる)ところが、もしピークの面積に磁場依存がある場合は、どの程度の依存度があるかを正確に見積る必要がある。そこで、図 30 の磁場が印加されている場合のピークに対してフィッティングを行い、その面積を評価した。磁場が上向きの時の面積を  $\epsilon_{\uparrow}$ 、下向きの時の面積を  $\epsilon_{\downarrow}$  とし、その比を計算した結果次のようになった。

$$r = \frac{\epsilon_{\downarrow}}{\epsilon_{\uparrow}} = 0.995 \pm 0.003 \quad (5.7)$$

誤差の範囲内で 1 からずれていることが分かった。従って、非対称度の評価式は次のように変更されなくてはならない。

$$\text{Asymmetry} = \frac{\left(\frac{S_{42}}{A_{42}} + \frac{S_{44}}{A_{44}} + \frac{S_{46}}{A_{46}} + \frac{S_{48}}{A_{48}} + \frac{S_{50}}{A_{50}}\right) - r \left(\frac{S_{41}}{A_{41}} + \frac{S_{43}}{A_{43}} + \frac{S_{45}}{A_{45}} + \frac{S_{47}}{A_{47}} + \frac{S_{49}}{A_{49}}\right)}{\left(\frac{S_{42}}{A_{42}} + \frac{S_{44}}{A_{44}} + \frac{S_{46}}{A_{46}} + \frac{S_{48}}{A_{48}} + \frac{S_{50}}{A_{50}}\right) + r \left(\frac{S_{41}}{A_{41}} + \frac{S_{43}}{A_{43}} + \frac{S_{45}}{A_{45}} + \frac{S_{47}}{A_{47}} + \frac{S_{49}}{A_{49}}\right)} \quad (5.8)$$

尚、 $r$  に起因する誤差は他の誤差に比べて十分小さいので無視することができる。

### 5.6.2 フィットの方法

NaI の ADC ヒストグラムは、コンプトン散乱による山と  $511\text{keV}$  の光電ピークが重なっているので、パラメータを増やしてガウス関数 + 3 次関数をフィット関数として用いた。またフィットする範囲によって結果が

変わってくるので、フィット範囲を様々に変えたもののうち、 $\chi^2/\text{ndf}$  の値が 1 に近いものを妥当なフィットとみなすことにした。

### 5.6.3 非対称度の評価

$^{64}\text{Cu}$  を使用した場合のデータについても、同様にピークの面積を評価した。—と表記されているのは、

run number	面積 ± 誤差
41	754.388 ± 27.466
42	583.479 ± 24.155
43	478.337 ± 21.871
44	539.913 ± 23.236
45	503.318 ± 22.435
46	514.425 ± 22.681
47	434.191 ± 20.837
48	— ± —
49	370.842 ± 19.257
50	— ± —

表 13 run 毎の 511keV ピークの面積

フィッティングが上手く出来なかったため\*3、信頼出来る値が得られなかったことを示す。図 31 は decay 補

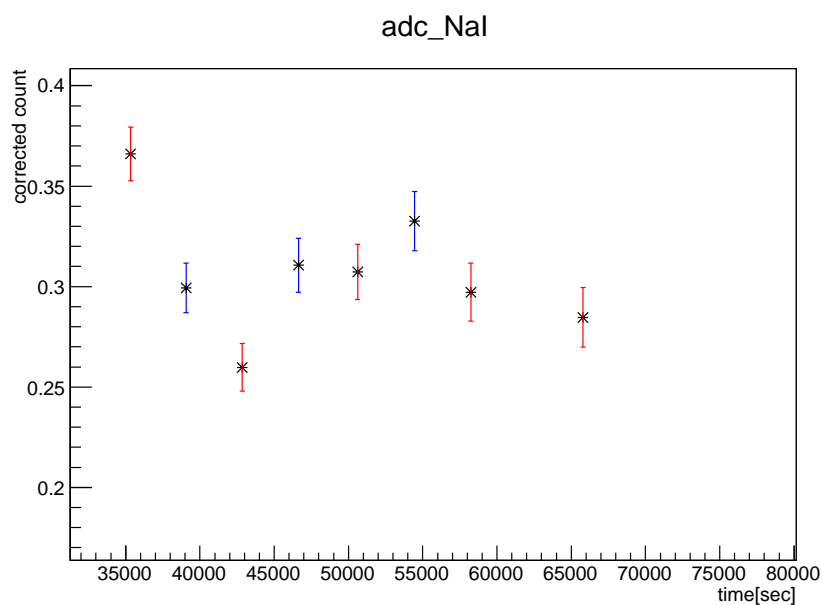


図 31 各 run の結果 (各種補正済み)

\*3 フィット関数の関数形、フィット範囲、bin 幅等々を変えても上手く行かなかった

正をかけた後の各 run のピークの面積をプロットしたものである。今回は、run41-46 のデータを用いて非対称度を計算した。<sup>\*4</sup>結果は、

$$\text{Asymmetry} = 0.013 \pm 0.018 \quad (5.9)$$

であり、正の非対称度がある傾向は確認できたが、信頼度は 76% に留まった。

## 5.7 Coin3 事象を用いた解析

第 3 章で述べたように、本実験ではトリガー信号として 3 種類のものを用意した。すなわち、プラスチックシンチレータと NaI のコインシデンス (Coin1)、プラスチックシンチレータと Ge のコインシデンス (Coin2)、プラスチックシンチレータ、NaI、Ge のコインシデンス (Coin3) である。Coin3 トリガーは、 $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$  事象を最も正確に選別していることが期待されるので、本来ならばこの Coin3 事象のみを用いて非対称度を評価すべきなのであるが、実験期間中に十分な統計が溜められなかったため、解析することが出来なかった。<sup>\*5</sup>以下に各 run 毎の Coin3 事象のカウント数を示す。

表 14 Coin3 事象のカウント数

run number	カウント数
41	6
42	1
43	2
44	3
45	3
46	1
47	3
48	2
49	4
50	1

## 5.8 データの扱いに関する詳細

### 5.8.1 カット条件について

これまでの解析で、「ATERUI の TDC チャンネルが 2100 以下」のようなカット条件をしばしば用いた。この条件の意味と正当性について詳しく述べる。

この実験では、ATERUI と MARO という 2 つのプラスチックシンチレータを用いており、これらの OR 信号を元に ADC のゲート信号や、TDC のスタート信号を作っているのであった。そのため、何の条件も課されていない Ge や NaI の ADC ヒストグラムの中には、ATERUI を通過した陽電子由来の  $\gamma$  線と、MARO を通過した陽電子由来の  $\gamma$  線の情報が混在していることになる。これはすなわち、パリティの異なる情報が混ざっ

<sup>\*4</sup> run41-46 のデータを用いて計算した

<sup>\*5</sup> 実験前に行われた簡易モンテカルロ計算でもこの傾向は示唆されていた。そのため Coin1、Coin2 のような条件のゆるいトリガーを用意することが重要であった。

ているということを意味するので、むしろ何のカット条件もかけていないヒストグラムは解析の役には立たないことになる。

そこで、ATERUI 由来と MARO 由来の  $\gamma$  線を分離するためのカット条件が必要になる。これには ATERUI と MARO の TDC のデータを見るのが良い。図 32(a)、32(b) は、41 番から 50 番までの TDC のデータをまとめたものである。

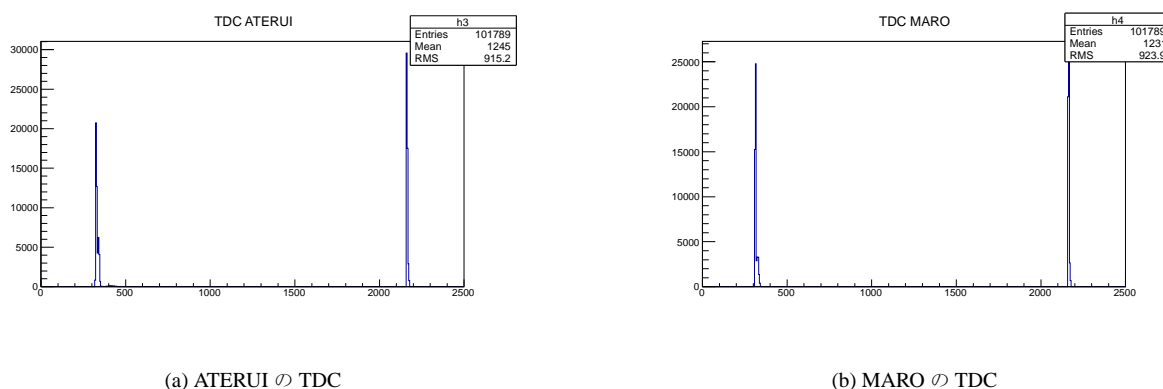


図 32 プラスチックシンチレータの TDC

これらの 2 つの図は共通して、2 つのピークを持っている。(チャンネル 0 に高さ 33 のピークもあるが、縮尺の関係で見えていない。これは、DAQ 系の誤作動などに起因するものであろう) 1 つ目のピークは TDC のスタート信号の入力直後に TDC を鳴らしたイベントによるものである。2 つ目のピークは 2160-2170 チャンネルの付近に立っている。使用している TDC の最大チャンネル数は 2048 であるので、このピークは「オーバーフロー」を表している。オーバーフローは、TDC にスタート信号が入った後に、何の入力もなかった場合に起きる現象である。従って、例えば ATERUI を陽電子が通過した場合は、(偶発的な入力が無い限り) MARO がオーバーフローを起こす。

ところで、以上の議論から、「ATERUI がオーバーフローしていないデータは、ATERUI を通過した陽電子由来である」、と直ちに結論できる訳ではないことに注意しておく。個々の TDC を見ているだけでは、すべてのデータが正常にとれているか (つまり、アクシデンタルなデータが混じっていないか) どうか判断できないためである。そこで、ATERUI と MARO の TDC の相関を見てみることにする。図 33 にそれを示す。

図の左上と右下にある黒く密集した部分は、片方がオーバーフローし、もう片方が時刻 0 付近であるような点である。また、少量ながらどちらもオーバーフローしていない領域にも点が散在している。これは、Coin3 でスタート信号がかかった場合に対応する。理想的な計測では、データ点の存在しうる領域はこれで尽きているが、図 33 の右上部分にもある程度の点が存在する。これは、どちらのプラスチックシンチレータもオーバーフローしたことを意味しているが、回路の設計上そのようなことは起こり得ないので、DAQ の不具合によるアクシデンタルなイベントと考えざるを得ない。図 34 はその部分を拡大したものである。

これによれば、アクシデンタルなイベントの総数は 926 であり、全体の 1% 未満に留まることが分かる。

従って、アクシデンタルなイベントは無視してよく、MARO がオーバーフローしているならば、必ず ATERUI はオーバーフローしていないと考えてよいことになる。先にも述べたように、オーバーフローは 2160-2170 チャンネルの付近に集中しているので、「ATERUI の TDC チャンネルが 2100 以下」という条件な



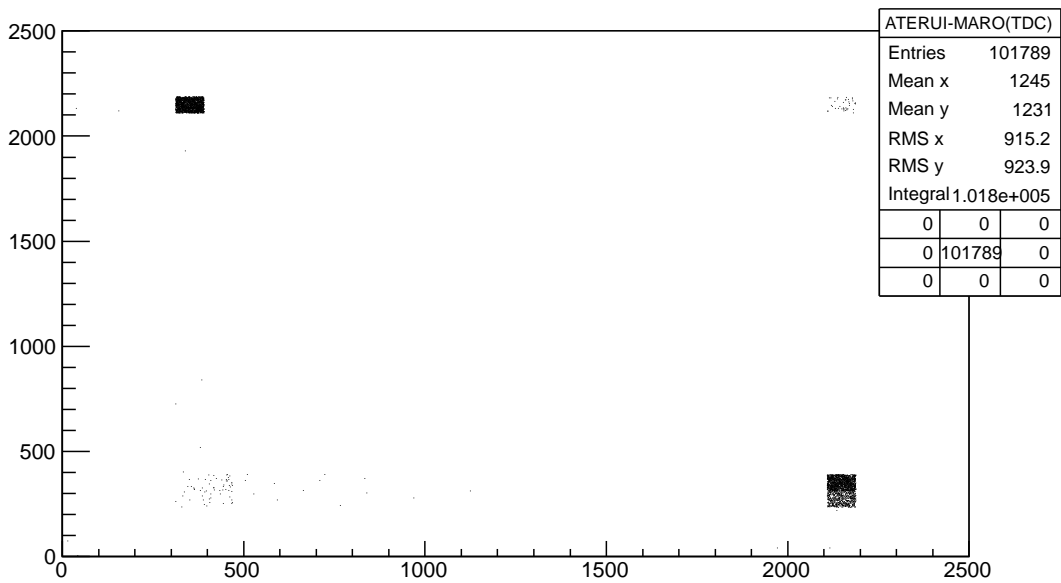


図 33 ATERUI-MARO 相関

横軸が ATERUI の TDC、縦軸が MARO の TDC

いし「MARO のチャンネルが 2100 以上」という条件は、そのイベントが ATERUI を通過した陽電子由来であることを意味する。

### 5.8.2 NaI のペDESTALについて

NaI の ADC について、そのエネルギーの原点であるペDESTALが時間と共に変動していないかどうかを念のため確認した。図 35 は、run041-051 の ADC を重ねて表示したものである。

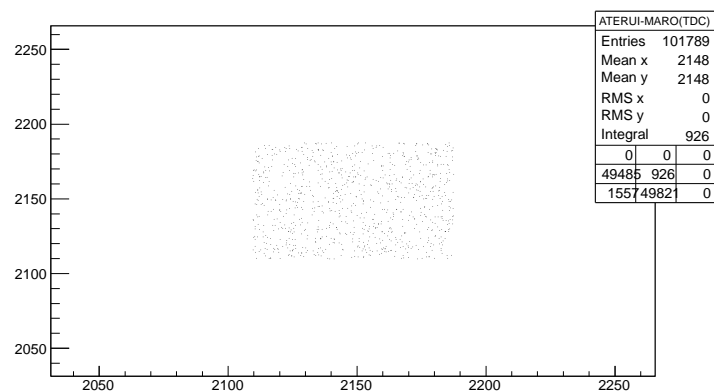


図 34 ATERUI-MARO 相関

図 33 のオーバーフロー部分を拡大したもの。

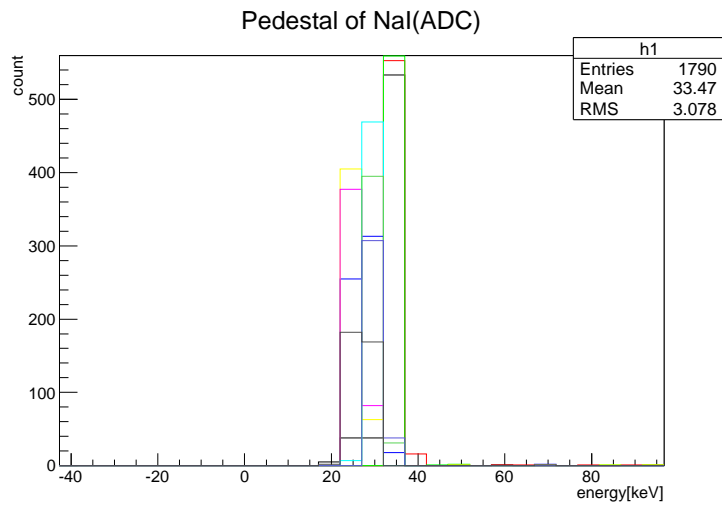


図 35 NaI のペDESTAL変動の様子

表 15 NaI のペDESTAL変動の様子

run number	ペDESTALの位置 [keV]
41	35
42	36
43	44
44	26
45	26
46	25
47	27
48	30
49	30
50	26
51	36

ペDESTAL変動は最大で 10 数 keV 程度あることが分かった。0keV を中心に揺らいでいないのは、NaI のキャリブレーションに run059 のペDESTALを用いていることや、キャリブレーションの精度そのものがあまり良くないことが原因である。しかしながら、非対称度の評価には大きな影響はないと考えられる。

## 6 考察

### 6.1 鉛の遮蔽度

#### 6.1.1 $^{198}\text{Au}$ による鉛の遮蔽度の測定

パーマロイ中以外の場所で対消滅が起きてきた  $\gamma$  線は排除しなければならない。そのため、遮蔽用の鉛ブロックの設計と配置に気を使った。

鉛の遮蔽度を確かめるために本実験と同じセットアップで  $^{64}\text{Cu}$  を  $^{198}\text{Au}$  に変えて測定を行った。 $^{198}\text{Au}$  は  $\beta^-$  崩壊した後、411keV の  $\gamma$  線を出す。各 run30 分間測定し、ATERUI と Ge 検出器でコインシデンスをとった Ge 検出器 ADC の 411keV の  $\gamma$  線のカウント数を数えた。

結果は表 16 のようになった。

表 16 Au を使った遮蔽の評価

run	線源	遮蔽	count411keV
55	Au	元セットアップ	45
57	Au	穴あき鉛の代わりに完全な鉛ブロック	0
58	Au	穴あき鉛を逆さまに配置	0
59	Au	鉛なし	675

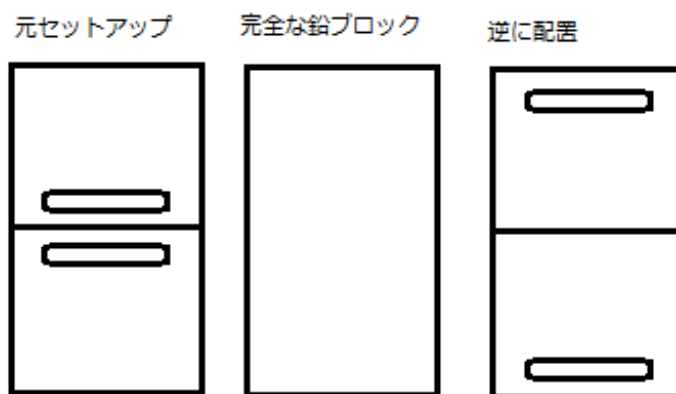


図 36 鉛の配置

Au は  $\beta^+$  崩壊ではないので、パーマロイ中で対消滅し、そこから  $\gamma$  線が出ることはない。よって run55 は Au から出た  $\gamma$  線が直接スリットを通過して Ge 検出器に入ってしまったと考えられる。本来シンチレータと Ge でコインシデンスをとった 411keV  $\gamma$  線は来てほしくないが、鉛なしに比べ、6.67 % 検出された。穴なしの場合完全に遮蔽されていた。

### 6.1.2 本実験への影響

我々の実験では、陽電子が偏極したパーマロイ中で対消滅し  $2\gamma$  に崩壊した際に出る  $\gamma$  線を数えたいので、パーマロイ中以外で対消滅し発生した  $\gamma$  線は取り除かなければならない。パーマロイ中以外で対消滅する場所としては、崩壊原子核 Cu 中、プラスチックシンチレータ内、空気中などが考えられる。このうち Cu 中での対消滅に関しては  $\beta$  線がシンチレータまで到達していないので、シンチレータとコインシデンスを取ることによってほぼ取り除くことができる。プラスチックシンチレータ内、空気中での対消滅による  $\gamma$  線がどのくらい Ge 検出器に入るのかに関しては本実験と同じセットアップからパーマロイのみを取り除いた実験を行い、パーマロイ中以外の場所での対消滅による  $\gamma$  線カウント数をバックグラウンドとして測定しておくべきであった。また、鉛なし、パーマロイなしの実験も行っておれば、それと比べることでパーマロイ中以外の場所での対消滅による  $\gamma$  線を遮蔽によってどのくらい取り除けているか評価することができた。我々は残念ながら今回は時間の都合でこれらの実験を行うことができなかった。

## 6.2 作った磁場の安定性

パーマロイにコイルを巻いて作った一様磁場の確認を各 run の最初と最後に行った。磁場発生用コイルとは別に磁場測定用コイルを巻き、生じた誘導起電力をオシロスコープのスクリーンショットを取って確認した。しかし、本実験ではコイルの発熱によって磁場が不安定になっていた可能性があるので最初と最後だけでなく、コイルに流れる電流を常にモニタリングできるよう電流計をはさむなど工夫していればよかった。ここでは本実験に対する影響を概算する。

上述の通り磁場の安定性は結局電流の安定性である。幸い我々はコイルの発熱する部分の温度を、電流を流している間は測定していた。結果は、16 度から 25 度程度の幅で動いていた。コイルの温度変化によりコイルの抵抗値が変化するので、定電圧であると仮定すると電流値が変化する。よって、温度変化による抵抗値変化を見ればよい。温度  $\theta(^{\circ}\text{C})$ 、温度  $\theta$  での抵抗値  $R_{\theta}$ 、温度  $0^{\circ}\text{C}$  での抵抗値  $R_0$ 、熱抵抗係数  $\alpha = 0.004(/^{\circ}\text{C})$  を用いて、

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta) \quad (6.1)$$

の関係があるので、温度変化  $9^{\circ}\text{C}$  で抵抗値 3.6% 変化する。これは、本実験に対する影響は小さいと結論できる。

## 6.3 ジオメトリーの信頼度

run41 から run54 まではセットアップには一切触れることはなく、電流の向きを変えることによって磁場を反転しているので、各 run は全く同じジオメトリーと考えられ、非対称度には影響しない。

## 6.4 改善すべき点

- 光電子増倍管は磁場に弱い

本実験で使用したシンチレータ MARO と NaI 検出器は磁場反転によって大きくゲインが変動してしまった。このように磁場をかけて実験を行う際は、光電子増倍管は極力磁場に近づけず、磁気シールドを巻くなど気をつけるべきである。しかし、本実験ではトロイダルコイルの磁場を一様に保つために、磁性体を近づけたくないので、磁気シールドを巻くことはできなかった。

- 作った磁場のモニタリング

トロイダルコイルで作った磁場のモニタリング用の電流計があれば、磁場の安定性がさらに確認できた。

- $^{64}\text{Cu}$  でバックグラウンドの測定 (鉛、パーマロイの有無)

今回  $^{198}\text{Au}$  の鉛あり、鉛なしを測定し鉛の遮蔽度を調べたが、 $^{198}\text{Au}$  が出すのは  $\beta^-$  線であるので、 $\beta^+$  線の対消滅による影響を見ることはできなかった。本実験で使った  $^{64}\text{Cu}$  を用いて鉛あり、パーマロイなしの測定を行っておれば、それをバックグラウンドとして引くことでさらに精度の高い実験を行うことができた。また、 $^{64}\text{Cu}$  を用いて鉛なしの実験なども行っておけば、 $^{64}\text{Cu}$  での遮蔽の効果を直接確かめることができた。

- 180 度方向に出る  $2\gamma$  崩壊の検出

我々の当初の目的は 180 度方向に出る  $2\gamma$  崩壊によって放出される  $\gamma$  線を真逆に配置した Ge 検出器と NaI 検出器で検出するというものであった。実際にはシンチレータ、Ge 検出器、NaI 検出器の Coin3 のカウント数の差を測定する。しかし、今回十分に統計がたまらず、NaI 検出器のゲインが磁場によって大きく変動してしまったこともあり Coin3 によって非対称度を見ることはできなかった。実験の設計を行う際にどのくらい統計がたまるか十分に予測できておればこのような事態は回避できたのではないかと考えられる。代わりに片方に入った 511keV の  $\gamma$  線を数えることによって非対称度が有意に存在することを確認することができた。このように万が一の場合に備えて、様々な解析方法でパリティの破れを検証できるようにしておくことは大切だと感じた。

最後に結論として、本実験によって得られた非対称度の最良の値を再度示しておく。

$$\text{Asymmetry} = 0.0648 \pm 0.0312 \quad (6.2)$$

信頼度は 98.1% で、 $2\sigma$  に相当する。パリティの破れは見えた。

## 謝辞

本実験を通してのみならず、1年間の課題研究 P3 の活動を通して、様々な人のお世話になりました。菅沼先生には、弱い相互作用の理論ゼミや格子 QCD のゼミで丁寧に指導して頂いたばかりでなく、関連するトピックについても幅広く教えて下さり、大変勉強になりました。TRA の上田さんには、私たちの些細な質問にも真摯に答えて下さり、理論面の理解が深まりました。実験全般に関しては藤岡先生に指導していただきました。多忙な中、物品の発注やスケジュールの調整などにも労力を割いていただき、頭の下がる思いです。タンデム加速器の広瀬さんには、学生の勝手な実験スケジュールに対応していただきました。素晴らしい設備を提供していただき、感謝の言葉もありません。川畑先生には、急なお願いにも関わらず工作を手伝っていただきました。TRA の時安さんには、モジュールの使い方、プログラミングからデータの解析方法に至るあらゆる実験ノウハウを教えて下さりました。最後になりましたが、原子核理論研究室の飯田さん、入谷さん、権業さんには格子 QCD 計算のプログラムソースを提供して頂きました。

皆様の協力と応援無しに本レポートを完成させることは決してできませんでした。ありがとうございました。

## 付録 A 相互作用の形

$(\bar{\psi}_e \Gamma_i \psi_\nu)(\bar{\psi}_p \Gamma_i \psi_n) \equiv \chi$  がローレンツスカラーとする。この時、 $\Gamma_i$  として可能なのは  $(1, \gamma^\mu, \sigma^{\mu\nu}, \gamma^\mu \gamma_5, \gamma_5)$  の 5 種類のみであること、つまり式 (1.21) を証明する。

$\bar{\psi} \Gamma_i \psi$  がローレンツ変換で良い変換性を示せば、 $\chi$  がローレンツ変換になることは容易に示せる。ローレンツ変換によって、変数  $x$  と Dirac スピノル  $\psi(x)$  は

$$x^\nu \rightarrow x'^\nu = a^\nu_\mu x^\mu \quad (\text{付録 A.1})$$

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x') = S(a)\psi(x) \quad , \quad S(a) = \exp\left[-\frac{i}{4}\sigma_{\mu\nu}(a^{\mu\nu} - g^{\mu\nu})\right] \quad (\text{付録 A.2})$$

の変換をする。 $S(a)$  は

$$S^{-1}(a)\gamma^\nu S(a) = a^\nu_\mu \gamma^\mu \quad (\text{付録 A.3})$$

$$S^{-1}(a) = \gamma_0 S^\dagger(a) \gamma_0 \quad (\text{付録 A.4})$$

の性質がある。

まず、 $\Gamma_i = (1, \gamma^\mu, \sigma^{\mu\nu})$  の時を考える。

$$\overline{\psi(x)} 1 \psi(x) \rightarrow \overline{\psi'(x')} 1 \psi'(x') = \overline{S(a)\psi(x)} S(a)\psi(x) \quad (\text{付録 A.5})$$

$$= \psi^\dagger(x) S^\dagger(a) \gamma_0 S(a) \psi(x) \quad (\text{付録 A.6})$$

$$= \psi^\dagger(x) \gamma_0 \gamma_0 S^\dagger(a) \gamma_0 S(a) \psi(x) \quad (\text{付録 A.7})$$

$$= \overline{\psi(x)} S^{-1}(a) S(a) \psi(x) \quad (\text{式 (付録 A.4)}) \quad (\text{付録 A.8})$$

$$= \overline{\psi(x)} \psi(x) \quad (\text{付録 A.9})$$

以下簡単のため

$$\psi = \psi(x) \quad , \quad \psi' = \psi'(x') \quad , \quad S = S(a)$$

の略記を用いる。

$$\bar{\psi} \gamma^\mu \psi \rightarrow \bar{\psi}' \gamma^\mu \psi' = \psi^\dagger S^\dagger \gamma_0 \gamma^\mu S \psi \quad (\text{付録 A.10})$$

$$= \bar{\psi} S^{-1} \gamma^\mu S \psi \quad (\text{付録 A.11})$$

$$= a^\mu_\nu \bar{\psi} \gamma^\nu \psi \quad (\text{式 (付録 A.3)}) \quad (\text{付録 A.12})$$

$$\bar{\psi} \sigma^{\mu\nu} \psi \rightarrow \bar{\psi}' \sigma^{\mu\nu} \psi' = \frac{i}{2} \psi^\dagger S^\dagger \gamma_0 (\gamma^\mu \gamma^\nu - \gamma^\nu \gamma^\mu) S \psi \quad (\text{付録 A.13})$$

$$= \frac{i}{2} \bar{\psi} S^{-1} (\gamma^\mu \gamma^\nu - \gamma^\nu \gamma^\mu) S \psi \quad (\text{付録 A.14})$$

$$= \frac{i}{2} \bar{\psi} S^{-1} (\gamma^\mu S S^{-1} \gamma^\nu - \gamma^\nu S S^{-1} \gamma^\mu) S \psi \quad (\text{付録 A.15})$$

$$= \frac{i}{2} \bar{\psi} (a^\mu_\alpha \gamma^\alpha a^\nu_\beta \gamma^\beta - a^\nu_\beta \gamma^\beta a^\mu_\alpha \gamma^\alpha) \psi \quad (\text{付録 A.16})$$

$$= a^\mu_\alpha a^\nu_\beta \bar{\psi} \sigma^{\alpha\beta} \psi \quad (\text{付録 A.17})$$

以上より、 $\bar{\psi} \Gamma_i \psi$  は、 $\Gamma_i = 1$  の時スカラー、 $\Gamma_i = \gamma^\mu$  の時ベクトル、 $\Gamma_i = \sigma^{\mu\nu}$  の時テンソルとして変換する。

$\Gamma_i = \gamma^\mu \gamma_5, \gamma_5$  の時は次の 2 つの場合を考える。

ローレンツ変換  $S$  が本義ローレンツ変換 (proper Lorentz transformation)  $S_1$  の時と、空間反転  $S_p$  の時とで場合分けをする。

(1)  $S = S_1$  の時、

$\{\gamma^\mu, \gamma_5\} = 0$  より、 $[S_1, \gamma_5] = 0$  なので、

$$\bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \rightarrow \bar{\psi}' \gamma^\mu \gamma_5 \psi' = \psi^\dagger S_1^\dagger \gamma_0 \gamma^\mu \gamma_5 S_1 \psi \quad (\text{付録 A.18})$$

$$= \bar{\psi} S_1^{-1} \gamma^\mu S_1 \gamma_5 \psi \quad (\text{付録 A.19})$$

$$= \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \quad (\text{付録 A.20})$$

$$\bar{\psi} \gamma_5 \psi \rightarrow \bar{\psi}' \gamma_5 \psi' = \bar{\psi} S_1^{-1} S_1 \gamma_5 \psi \quad (\text{付録 A.21})$$

$$= \bar{\psi} \gamma_5 \psi \quad (\text{付録 A.22})$$

(2)  $S = S_p = \gamma_0$  の時、

$\{S_p, \gamma_5\} = \{\gamma_0, \gamma_5\} = 0$  より、

$$\bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \rightarrow \bar{\psi}' \gamma^\mu \gamma_5 \psi' = -\bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \quad (\text{付録 A.23})$$

$$\bar{\psi} \gamma_5 \psi \rightarrow \bar{\psi}' \gamma_5 \psi' = -\bar{\psi} \gamma_5 \psi \quad (\text{付録 A.24})$$

$S = S_1$  の時  $\det(a) = +1$ 、 $S = S_p$  の時  $\det(a) = -1$  なので、(1)、(2) をまとめて

$$\bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \rightarrow \bar{\psi}' \gamma^\mu \gamma_5 \psi' = \det(a) \bar{\psi} \gamma^\mu \gamma_5 \psi \quad (\text{付録 A.25})$$

$$\bar{\psi} \gamma_5 \psi \rightarrow \bar{\psi}' \gamma_5 \psi' = \det(a) \bar{\psi} \gamma_5 \psi \quad (\text{付録 A.26})$$

と書ける。以上より、 $\bar{\psi} \Gamma_i \psi$  は、 $\Gamma_i = \gamma^\mu \gamma_5$  の時軸性ベクトル、 $\Gamma_i = \gamma_5$  の時擬スカラーとして変換する。

$\Gamma_i = 1, \gamma^\mu, \sigma^{\mu\nu}, \gamma^\mu \gamma_5, \gamma_5$  の計 16 個の行列は全て線形独立で、 $(4 \times 4)$  行列のベクトル空間の基底になっている。

よって、 $\chi$  がローレンツスカラーのとき、 $\Gamma_i$  として可能なのは  $1, \gamma^\mu, \sigma^{\mu\nu}, \gamma^\mu \gamma_5, \gamma_5$  のみである。



## 付録 B パリティ変換

パリティ変換  $\mathcal{P} : (t, \mathbf{x}) \rightarrow (t, -\mathbf{x})$  によって、

$$\text{ベクトル場 : } A_\mu(x) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix} A(x) = g_\mu^\nu A_\nu(x)$$

スピノル場 :  $\psi(x) \rightarrow \gamma_0 \psi(x)$

の変換をする。

$$\psi(x) = \int \frac{d^3 p}{\sqrt{(2\pi)^3 2p_0}} \sum_{s=\pm 1} [b(\mathbf{p}, s) u(\mathbf{p}, s) e^{-ipx} + d^\dagger(\mathbf{p}, s) v(\mathbf{p}, s) e^{ipx}] \quad (\text{付録 B.1})$$

を展開した時、Dirac 方程式は

$$(\gamma^\mu p_\mu - m) u(\mathbf{p}, s) = 0 \quad (\text{付録 B.2})$$

等の形にもできる。

(i) 式 (付録 B.2) に左から  $\gamma_0$  をかけて、

$$\gamma_0(\gamma_0 p_0 - \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{p} - m) u(\mathbf{p}, s) = 0 \quad (\text{付録 B.3})$$

$$(\gamma_0 p_0 + \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{p} - m) \gamma_0 u(\mathbf{p}, s) = 0 \quad (\text{付録 B.4})$$

$\mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$  の置き換えで

$$(\gamma^\mu p_\mu - m) \gamma_0 u(-\mathbf{p}, s) = 0 \quad (\text{付録 B.5})$$

となり、 $\gamma_0 u(-\mathbf{p}, s)$  も式 (付録 B.2) と同じ方程式を満たす。

(ii) また、 $u(\mathbf{p}, s)$  はヘリシティ演算子の固有状態であり、

$$\hat{\Lambda} u(\mathbf{p}, s) = s u(\mathbf{p}, s) \quad (\text{付録 B.6})$$

$$\hat{\Lambda} \equiv \frac{\hat{\boldsymbol{\Sigma}} \cdot \mathbf{p}}{p} \quad (\text{付録 B.7})$$

であり、式 (付録 B.6) に左から  $\gamma_0$  をかけると、

$$\gamma_0 \hat{\Lambda} u(\mathbf{p}, s) = s \gamma_0 u(\mathbf{p}, s) \quad (\text{付録 B.8})$$

$$\hat{\Lambda} \gamma_0 u(\mathbf{p}, s) = s \gamma_0 u(\mathbf{p}, s) \quad ([\hat{\Lambda}, \gamma_0] = 0) \quad (\text{付録 B.9})$$

$\mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$  の置き換えで  $\hat{\Lambda} \rightarrow -\hat{\Lambda}$  となるので、

$$\hat{\Lambda} \gamma_0 u(-\mathbf{p}, s) = -s \gamma_0 u(-\mathbf{p}, s) \quad (\text{付録 B.10})$$

よって、 $\gamma_0 u(-\mathbf{p}, s)$  のヘリシティの固有値は  $-s$  である。

(i),(ii) より、位相因子  $e^{i\eta}$  を用いて

$$\gamma_0 u(\mathbf{p}, s) = e^{i\eta} u(-\mathbf{p}, -s) \quad (\text{付録 B.11})$$

と書けることがわかる。通常、 $e^{i\eta} = 1$  として、

$$\gamma_0 u(\mathbf{p}, s) = u(-\mathbf{p}, -s) \quad (\text{付録 B.12})$$

とする。負エネルギー解  $v(\mathbf{p}, s)$  に対しては、

$$\gamma_0 v(\mathbf{p}, s) = -v(-\mathbf{p}, -s) \quad (\text{付録 B.13})$$

式 (付録 B.12), 式 (付録 B.13) は  $u(\mathbf{p}, s), v(\mathbf{p}, s)$  のパリティ変換則を与える。

つまり、パリティ変換によって、Dirac 粒子の運動量、ヘリシティが反対になる。古典的には、パリティ変換によってスピンの向きが変わらないと言える。[11]

以下では様々なラグランジアンのパリティ変換に対する振舞いを見る。

#### ●4-Fermi 相互作用

式 (1.1) の 4-Fermi 相互作用ラグランジアン

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{4\text{Fermi}} = -G_\beta (\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_\nu) (\bar{\psi}_p \gamma^\mu \psi_n) \quad (\text{付録 B.14})$$

はパリティを保存する。

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{4\text{Fermi}} \rightarrow \mathcal{L}_{\text{int}}^{4\text{Fermi}'} = -G_\beta (\bar{\gamma}_0 \bar{\psi}_e \gamma_\mu \gamma_0 \psi_\nu) (\bar{\gamma}_0 \bar{\psi}_p \gamma^\mu \gamma_0 \psi_n) \quad (\text{付録 B.15})$$

$$= -G_\beta (\bar{\psi}_e \gamma_0 \gamma_\mu \gamma_0 \psi_\nu) (\bar{\psi}_p \gamma_0 \gamma^\mu \gamma_0 \psi_n) \quad (\text{付録 B.16})$$

$$= -G_\beta (\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_\nu) (\bar{\psi}_p \gamma^\mu \psi_n) \quad (\text{付録 B.17})$$

#### ●V-A 理論

式 (1.25) の V-A 理論の相互作用ラグランジアン

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{V-A} = \frac{G}{\sqrt{2}} (\bar{\psi}_p \gamma_\mu (C_V + C_A \gamma_5) \psi_n) (\bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \psi_\nu) \quad (\text{付録 B.18})$$

はパリティを保存しない。

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{V-A} \rightarrow \mathcal{L}_{\text{int}}^{V-A'} = \frac{G}{\sqrt{2}} (\bar{\psi}_p \gamma_0 \gamma_\mu (C_V + C_A \gamma_5) \gamma_0 \psi_n) (\bar{\psi}_e \gamma_0 \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \gamma_0 \psi_\nu) \quad (\text{付録 B.19})$$

$$= \frac{G}{\sqrt{2}} (\bar{\psi}_p \gamma_\mu (C_V - C_A \gamma_5) \psi_n) (\bar{\psi}_e \gamma^\mu (1 + \gamma_5) \psi_\nu) \quad (\text{付録 B.20})$$

$$\neq \mathcal{L}_{\text{int}}^{V-A} \quad (\text{付録 B.21})$$

#### ●QED

QED のラグランジアン

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m) \psi \quad (\text{付録 B.22})$$

のパリティを保存する。

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \rightarrow g_\mu^\alpha \partial_\alpha g_\nu^\beta A_\beta - g_\nu^\beta \partial_\beta g_\mu^\alpha A_\alpha \quad (\text{付録 B.23})$$

$$= g_\mu^\alpha g_\nu^\beta (\partial_\alpha A_\beta - \partial_\beta A_\alpha) \quad (\text{付録 B.24})$$

$$= g_\mu^\alpha g_\nu^\beta F_{\alpha\beta} \quad (\text{付録 B.25})$$

$$F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \rightarrow F_{\mu\nu}'F^{\mu\nu'} = g_{\mu}^{\alpha}g_{\nu}^{\beta}F_{\alpha\beta}g_{\gamma}^{\mu}g_{\delta}^{\nu}F^{\gamma\delta} \quad (\text{付録 B.26})$$

$$= g_{\mu}^{\alpha}g_{\gamma}^{\mu}g_{\nu}^{\beta}g_{\delta}^{\nu}F_{\alpha\beta}F^{\gamma\delta} \quad (\text{付録 B.27})$$

$$= \delta_{\gamma}^{\alpha}\delta_{\delta}^{\beta}F_{\alpha\beta}F^{\gamma\delta} \quad (\text{付録 B.28})$$

$$= F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \quad (\text{付録 B.29})$$

$$\bar{\psi}(i\gamma^{\mu}D_{\mu} - m)\psi \rightarrow \bar{\psi}\gamma_0(i\gamma^{\mu}g_{\mu}^{\alpha}D_{\alpha} - m)\gamma_0\psi = \bar{\psi}(i\gamma_0\gamma^{\mu}\gamma_0g_{\mu}^{\alpha}D_{\alpha} - m)\psi \quad (\text{付録 B.30})$$

$$= \bar{\psi}(i\gamma^{\mu}D_{\mu} - m)\psi \quad (\text{付録 B.31})$$

## 付録 C 本実験のパリティ変換

本実験で、磁場反転が系のパリティ変換になっていることをここで説明する。図付録 C に 3 つの系を示している。1 番の系は元々の系である。 $\beta^+$  線源と、強磁性体、そして強磁性体を挟んで 180 度の方向に検出器 A,B が置かれている系である。

2 番の系は、1 番の系を  $\beta^+$  線源の中心を原点としてパリティ変換した系にあっている。磁場は軸性ベクトルなので、パリティ変換で向きは変わらない。

3 番の系は、2 番の系を 180 度見方を変えたものである。よって 2 番と 3 番の系は同じ系である。

よって、3 番の系は 1 番の系をパリティ変換した系であり、磁場を反転させる事はパリティ変換する事に対応している。

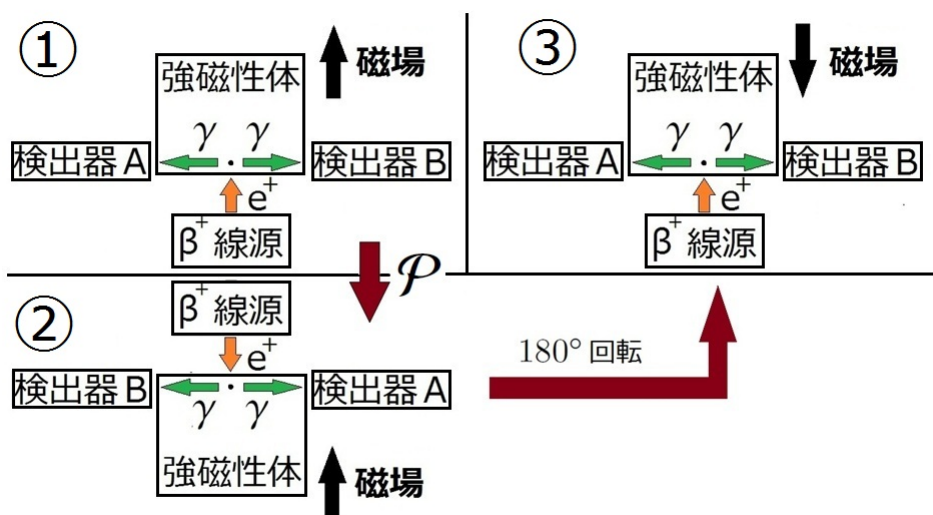


図 37 本実験におけるパリティ変換

## 付録 D 核種とその性質

今回の実験に使用する線源を選定するため、原子番号 3 番から 80 番までの核種の性質について調べた。断面積以外の情報は [7] に拠った。対象の原子核 (X) の原子番号を Z、質量数を A とする。 $J_{(\text{before})}^P$  は、X に中性子を 1 つ吸収させてできた核 (Y) のスピンとパリティである。 $J_{(\text{after})}^P$  は Y が  $\beta$  崩壊ないし電子捕獲 (EC) した直後の核 (Z) のスピンとパリティである。ただし、Y は基底状態のみを考えた。Y の崩壊先の状態が複数ある場合は、最も遷移する確率の高い状態について考えた。 $\sigma_{\text{abs}}$  は、X の中性子吸収断面積である。断面積の値は [6] に拠った。寿命は Y の寿命を表し、単位はそれぞれ ms=ミリ秒、s=秒、m=分、h=時間、d=日、y=年である。放射能は、1cm×1cm×1mm の試料に  $10^4\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$  の中性子ビームを 1 時間当てた直後の値である。ただし、単体として存在しないもの、扱いやすい化合物がないもの、断面積が不明なものについては算出していない。

適度な寿命を持ち、大きな放射能を持ちうる親核 X のうち、 $\beta^+$  崩壊を起こすものの候補としては  $^{63}\text{Cu}$  が最適であることが分かる。<sup>\*6</sup>

---

<sup>\*6</sup> 化学的安定性、常温で個体であること、入手のしやすさなども重要な選定条件である。

元素記号	Z	A	存在比	J <sup>P</sup> <sub>(before)</sub>	J <sup>P</sup> <sub>(after)</sub>	崩壊様式	Q 値 [keV]	$\sigma_{\text{abs}}$ [b]	寿命	放射能 [Bq]
Li	3	6	0.075	3/2-		stable		0.03851	stable	-
B	5	11	0.801	1+	0+	$\beta^-$	13368.9	0.508	20.2ms	46.319
N	7	14	0.996	1/2-		stable		0.075	stable	-
N	7	15	0.003	2-	3-	$\beta^-$	10419	$2.4 \times 10^5$	7.13s	-
F	9	19	1	2+	2+	$\beta^-$	7024.53	0.009576	11.0s	-
Na	11	23	1	4+	4+	$\beta^-$	5515.79	0.5317	15.0h	0.871
Al	13	27	1	3+	0+	$\beta^-$	4642.25	0.2288	2.24m	137.636
P	15	31	1	1+	0+	$\beta^-$	1710.6	0.1663	14.3d	0.017
S	16	36	0.02	7/2-	7/2-	$\beta^-$	4865.3	0.1526	5.05m	0.102
Cl	17	35	0.7576	2+	0+	$\beta^-$	708.6	43.62	$3 \times 10^5$ y	-
Cl	17	35	0.7576	2+	0+	EC	1142.07	43.62	$3 \times 10^5$ y	-
Cl	17	37	0.2424	2-	0+	$\beta^-$	4916.8	0.4332	37.2m	-
K	19	39	0.9325	4-	0+	$\beta^-$	1311.09	2.099	$1 \times 10^9$ y	-
K	19	39	0.9325	4-	0+	EC	1504.9	2.099	$1 \times 10^9$ y	-
K	19	40	0.000117	3/2-		stable		30.02	stable	-
K	19	41	0.0673	2-	0+	$\beta^-$	3525.4	1.46	12.4h	0.097
Sc	21	45	1	4+	4+	$\beta^-$	2366.7	27.16	83.8d	0.539
Ti	22	50	5.4	3/2-	5/2-	$\beta^-$	2470.7	0.179	5.76m	52.439
V	23	51	0.9975	3+	2+	$\beta^-$	3975.6	4.921	3.75 m	347.651
Mn	25	55	1	3+	2+	$\beta^-$	3695.4	13.29	2.58h	337.156
Fe	26	54	5.8	3/2-	5/2-	EC	231.6	2.253	2.73y	0.048
Co	27	59	1	5+	4+	$\beta^-$	2823.9	37.23	5.27y	0.073
Ni	28	64	0.926	5/2-	3/2-	$\beta^-$	2136.7	1.481	2.52h	37.673
Cu	29	63	0.6915	1+	0+	$\beta^-$	578.8	4.51	12.7h	20.173
Cu	29	63	0.6915	1+	0+	EC	1675.1	4.51	12.7h	20.173
Cu	29	65	0.3085	1+	0+	$\beta^-$	2642.4	2.17	5.089m	55.428
Ga	31	69	0.601	1+	0+	$\beta^-$	1656	2.202	21.1m	64.244
Ga	31	69	0.601	1+	0+	EC	654.7	2.202	21.1m	64.244
Ga	31	71	0.3989	3-	2-	$\beta^-$	4001.1	3.713	14.1h	5.081
Ge	32	70	21.23	1/2-	3/2-	EC	229.4	3.054	11.4d	11.991
Ge	32	74	35.94	7/2+	5/2+	$\beta^-$	1176.6	0.5193	47.7s	897.323
Ge	32	76	7.44	1/2-	3/2-	$\beta^-$	2702	0.1547	52.9s	53.881
As	33	75	1	2-	0+	$\beta^-$	2962	4.156	26.3h	7.122
Se	34	80	49.61	1/2-	3/2-	$\beta^-$	1585	0.6105	18.5m	985.905
Br	35	79	0.5069	1+	0+	$\beta^-$	2004	11.01	17.7m	127.525
Br	35	79	0.5069	1+	0+	EC	1870.6	11.01	17.7m	127.525
Br	35	81	0.4931	2-	4-	$\beta^-$	3092.6	2.358	6.13 m	26.811
Rb	37	85	0.7217	2-	0+	$\beta^-$	1774.7	0.48	18.6d	0.008
Rb	37	85	0.7217	2-	0+	EC	517	0.48	18.6d	0.008
Rb	37	87	0.2783	2-	0+	$\beta^-$	5316	0.12	17.8m	0.342
Y	39	89	1	2-	0+	$\beta^-$	2282	1.284	64.1h	5.610

元素記号	Z	A	存在比	$J^P_{(\text{before})}$	$J^P_{(\text{after})}$	崩壊様式	Q 値 [keV]	$\sigma_{\text{abs}}[\text{b}]$	寿命	放射能 [Bq]
Zr	40	94	17.38	5/2+	7/2+	$\beta^-$	1124.5	0.01066	64.0d	0.005
Zr	40	96	2.8	1/2+	1/2-	$\beta^-$	2658.1	0.02033	16.9h	0.134
Nb	41	93	1	6+	4+	$\beta^-$	2045.1	1.143	$2 \times 10^4 \text{y}$	63.403
Ru	44	102	31.6	3/2+	5/2+	$\beta^-$	763.3	1.476	39.2d	3.635
Ru	44	104	18.7	3/2+	5/2+	$\beta^-$	1917	0.4694	4.44h	127.569
Rh	45	103	1	1+	0+	$\beta^-$	2441	136.3	42.3s	9886.143
Pd	46	102	1.02	5/2+	7/2+	EC	543.1	1.819	17.0d	0.322
Pd	46	108	26.46	5/2+	7/2+	$\beta^-$	1115.9	8.057	13.7h	1005.629
Pd	46	110	11.72	5/2+	7/2+	$\beta^-$	2190	0.2255	23.4m	160.509
Ag	47	107	0.51839	1+	0+	$\beta^-$	1649	37.59	2.37m	1150.051
Ag	47	107	0.51839	1+	0+	EC	1918	37.59	2.37m	1150.051
Ag	47	109	0.48161	1+	0+	$\beta^-$	2892.1	90.76	24.6s	2532.418
Ag	47	109	0.48161	1+	0+	EC	893	90.76	24.6s	2532.418
In	49	113	0.0429	1+	0+	$\beta^-$	1988.7	12.24	71.0s	20.449
In	49	113	0.0429	1+	0+	EC	1453	12.24	71.0s	20.449
In	49	115	0.9571	1+	0+	$\beta^-$	3274	205.1	14.1s	7511.713
Sn	50	120	32.58	3/2+	5/2+	$\beta^-$	388.1	0.1431	27.1h	6.250
Sn	50	122	4.68	11/2-	7/2+	$\beta^-$	1404	0.1394	129d	0.008
Sn	50	124	5.79	11/2-	7/2+	$\beta^-$	2364	0.1356	9.64d	0.121
Sb	51	121	0.5721	2-	2+	$\beta^-$	1978.6	6.017	2.70d	1.932
Sb	51	121	0.5721	2-	0+	EC	1620	6.017	2.70d	1.932
Sb	51	123	0.4279	3-	3-	$\beta^-$	2905.4	4.191	60.2d	0.045
Te	52	120	0.09	1/2+	1/2+	EC	1036	2.342	16.8d	0.016
Te	52	126	18.84	3/2+	5/2+	$\beta^-$	698	0.4402	9.35h	25.079
Te	52	128	31.74	3/2+	5/2+	$\beta^-$	1498	0.1862	69.6m	100.200
Te	52	130	34.08	2/3+	5/2+	$\beta^-$	2233	0.1863	25.0m	166.820
I	53	127	1	1+	0+	$\beta^-$	2118	6.406	25.0m	136.217
I	53	127	1	1+	0+	EC	1251	6.406	25.0m	136.217
Cs	55	133	1	4+	4+	$\beta^-$	2058.7	28.99	2.06y	0.087
La	57	138	0.0009	7/2+		stable		57.21	stable	-
La	57	139	0.9991	3-	3+	$\beta^-$	3761.9	8.94	1.68d	5.846
Ce	58	138	0.251	3/2+	5/2+	EC	278	N/A	138d	-
Ce	58	142	11.114	3/2-	3/2+	$\beta^-$	1461.6	0.9617	33.039h	9.146
Pr	59	141	1	2-	0+	$\beta^-$	2162.3	11.48	19.12 h	16.909
Sm	62	152	26.75	3/2+	3/2+	$\beta^-$	808.4	206.7	46.27h	3520.877
Sm	62	154	22.75	3/2-	5/2-	$\beta^-$	1627.1	8.395	22.3m	5233.419
Eu	63	151	0.4781	3-	2-	EC	1874.1	8261	13.5y	0.701
Eu	63	151	0.4781	3-	0+	$\beta^-$	1818.2	8261	13.5y	0.701
Eu	63	153	0.5219	3-	2-	$\beta^-$	1968.5	308.7	8.593y	0.044

元素記号	Z	A	存在比	$J^P_{(\text{before})}$	$J^P_{(\text{after})}$	崩壊様式	Q 値 [keV]	$\sigma_{\text{abs}}[\text{b}]$	寿命	放射能 [Bq]
Gd	64	152	0.2	3/2-	3/2+	EC	484.8	734	241.6d	0.742
Gd	64	158	24.84	3/2-	3/2+	$\beta^-$	970.6	2.203	18.479h	81.276
Gd	64	160	21.86	5/2-	7/2-	$\beta^-$	1955.6	0.7857	3.66m	478.206
Tb	65	159	1	3-	2-	$\beta^-$	1835.3	23.18	72.3 d	0.416
Dy	66	164	0.283	7/2+	7/2-	$\beta^-$	1286.2	2620	2.334h	8099.861
Ho	67	165	1	0-	0+	$\beta^-$	1854.5	N/A	26.83h	-
Er	68	168	26.978	1/2-	1/2+	$\beta^-$	351.2	2.731	9.4d	10.586
Er	68	170	14.91	5/2-	7/2-	$\beta^-$	1490.5	8.862	7.516h	528.463
Tm	69	169	1	1-	0+	$\beta^-$	968	105.6	128.6d	1.136
Yb	70	168	0.13	7/2+	7/2-	EC	909	2441	32.026d	10.201
Yb	70	174	31.83	7/2-	7/2+	$\beta^-$	470	63.19	4.185d	475.680
Yb	70	176	12.76	9/2+	7/2+	$\beta^-$	1399.2	2.824	1.911h	346.498
Lu	71	175	0.9741	7-	6+	$\beta^-$	1191.7	N/A	$3.78 \times 10^{10}\text{y}$	-
Lu	71	175	0.9741	1-	2+	$\beta^-$	1191.7	N/A	3.635h	-
Ta	73	181	0.99988	3-	2-	$\beta^-$	1813.6	20.75	114.43d	0.419
W	74	186	28.43	3/2-	5/2-	$\beta^-$	1311.2	38.17	23.72h	2791.105
Os	76	184	0.02	1/2-	1/2+	EC	1012.8	3003	93.6d	1.976
Os	76	190	26.26	9/2-	11/2-	$\beta^-$	313.7	12.96	15.4d	65.817
Os	76	192	40.78	3/2-	3/2+	$\beta^-$	1140.6	3.119	30.5h	290.586
Ir	77	191	0.373	4+	4+	$\beta^-$	1459.7	N/A	73.831d	-
Ir	77	191	0.373	4+	3+	EC	1046.2	N/A	73.831d	-
Ir	77	193	0.627	1-	0+	$\beta^-$	2246.9	N/A	19.15h	-
Au	79	197	1	2-	2+	$\beta^-$	1372.4	99.2	2.695d	89.759
Hg	80	204	6.87	1/2-	1/2+	$\beta^-$	1531	0.4789	5.2m	3029.132



## 付録 E DAQ

### プログラムの概要

ここでは、DAQによるデータ収集で用いたプログラムについて解説する。処理の大まかな流れは Output Register から信号を出し、veto をはずす ⇒ Interrupt Register を LAM 待ちにする ⇒ Interrupt Register が LAM を受け付けないようにする ⇒ データを取る ⇒ veto をはずす の繰り返しである。実際のソースコードを以下に示す。使用した言語は C++ である。

ソースコード 1 hon\_experiment\_daq.cc

```
1  ////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
2  ///      This is a Program for P3 Experiment      ///
3  ///                                     2012.2.16 - 2.18      ///
4  ///  Gate: Integrated Trigger      ///
5  ///  ADC: ATERUI, MARO, Ge, NaI      ///
6  ///  TDC: ATERUI, MARO, Ge, NaI, coin1, coin2, coin3      ///
7  ///  SCALER: ATERUI, MARO, Ge, NaI, coin1, coin2, coin3,      ///
8  ///          coinall(trigger), non-veto trigger,      ///
9  ///          veto trigger, clock      ///
10 ///      ///
11 ///                                     latest update: 2012.02.18      ///
12 ///      ///
13  ////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
14
15 #include <cstdio>
16 #include <cstdlib>
17 #include <iostream>
18 #include <ctime>
19 #include "camlib.h"
20 #include <sys/time.h>
21 using namespace std;
22
23 //CAMAC
24 //N : Station Number
25 #define ADC1 3 //NaI
26 #define ADC2 5 //MARO & ATERUI
27 #define ADC3 7 //Ge
28 #define TDC 8
29 #define IR 10 //interrupt register
30 #define OR 2 //output register
31 #define SCALER 9
32
33 //A : Address
34 #define ADC_NaI 6
```

```

35 #define ADC_Ge 0
36 #define ADC_ATERUI 4
37 #define ADC_MARO 5
38 #define TDC_NaI 1
39 #define TDC_Ge 4
40 #define TDC_ATERUI 2 //scintilator #R7600
41 #define TDC_MARO 3 //scintilator #R8900
42 #define TDC_coin1 5 //NaI & scintilators
43 #define TDC_coin2 6 //Ge & scintilators
44 #define TDC_coin3 7 //NaI & Ge & scintilators
45 #define SCA_coin1 0
46 #define SCA_coin2 1
47 #define SCA_coin3 2
48 #define SCA_all 3
49 #define SCA_Nonveto 6
50 #define SCA_Veto 7
51 #define SCA_NaI 10
52 #define SCA_ATERUI 11
53 #define SCA_MARO 12
54 #define SCA_Ge 13
55
56 //RUN TIME
57 #define RUN_TIME 3600
58
59
60 int main(int argc, char* argv[]){
61
62     int n=5;
63     int a=8;
64     int f=2;
65     int naf=0;
66     int result=0;
67     int q=0;
68     int x=0;
69     int data=0;
70     int DAN, DAG, DAA, DAM, DTN, DTG, DTA, DTM,
71         Dcoin1, Dcoin2, Dcoin3,
72         DScoin1, DScoin2, DScoin3, DSall, DSpile,
73         DSN, DSA, DSM, DSG, DSclock, nonveto, veto;
74     int dataG=0;
75     int i=0;
76     long int dead=0;
77
78     if(argc != 2){
79         std::cerr << "./usage: ./2012_0212_3ADC <file name>" <<std::endl;

```

```

80         return 1;
81     }
82
83
84     char* filename = argv[1];
85
86     FILE* fdata;
87     fdata=fopen(filename,"w+");
88
89     fprintf(fdata,"");
90
91     struct timeval tvini, tv, tvdead;
92
93
94     //INITIALIZE
95
96     result = COPEN();
97     result = CGENZ();
98     result = CELAM(0xffff);
99
100
101     //interrupt register enable
102     n=IR;
103     a=0;
104     f=26;
105     naf=NAF(n,a,f);
106     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
107     printf("%d\n",result);
108
109
110     //clear interrupt register
111     n=IR;
112     a=0;
113     f=9;
114     naf=NAF(n,a,f);
115     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
116     naf=NAF(n,a,f);
117     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
118
119
120     //clear ADC data
121     n=ADC1;
122     a=0;
123     f=9;
124     naf=NAF(n,a,f);

```

```

125     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
126
127     n=ADC2;
128     a=0;
129     f=9;
130     naf=NAF(n,a,f);
131     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
132
133
134     //set
135     //set Ge register1
136     n=ADC3;
137     a=0;
138     f=16;
139     dataG = 0xB300;
140     naf=NAF(n,a,f);
141     result=CAMAC(naf,&dataG,&q,&x);
142
143
144     //set Ge register2
145     n=ADC3;
146     a=1;
147     f=16;
148     dataG = 0x0010;
149     naf=NAF(n,a,f);
150     result=CAMAC(naf,&dataG,&q,&x);
151
152
153     //scaler reset
154     n=SCALER;
155     a=9;
156     naf=NAF(n,a,f);
157     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
158
159
160
161 //DATA TAKING START!
162
163     //initial veto signal
164     n=OR;
165     a=0;
166     f=16;
167     data=0xFFFF;
168     naf=NAF(n,a,f);
169     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);

```

```

170
171
172     //get start time of experiment
173     gettimeofday(&tvini, NULL);
174
175
176 // for(int i=0; i< 10000; i++){
177
178     while(tvini.tv_sec+RUN_TIME>tv.tv_sec){
179
180         //wait LAM from interrupt register
181         CWLAM(1000);
182
183
184         //signal number incliment
185         i++;
186
187
188         //get elapsed time
189         gettimeofday(&tv, NULL);
190 //     if(i%10==0)printf("time=%d\n",tv.tv_sec-tvini.tv_sec);
191
192
193         //disable interrupt register
194         n=IR;
195         a=0;
196         f=24;
197         naf=NAF(n,a,f);
198         result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
199
200
201         //clear interrupt register
202         n=IR;
203         a=0;
204         f=9;
205         naf=NAF(n,a,f);
206         result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
207 //     if(i%1==0)printf("%dth signal\n",i);
208
209
210         //clear scaler?
211         n=SCALER;
212         a=SCA_NaI;
213         f=0;
214         naf=NAF(n,a,f);

```

```

215     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
216     DSN=data;
217
218     n=SCALER;
219     a=SCA_ATERUI;
220     f=0;
221     naf=NAF(n,a,f);
222     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
223     DSA=data;
224
225
226
227 //START READING
228
229     //read(TDC_NaI)
230     n=TDC;
231     a=TDC_NaI;
232     f=0;
233     naf=NAF(n,a,f);
234     result=CAMAC(naf,&DTN,&q,&x);
235 //     fprintf(fdata,"%d ",data);
236 //     if(i%10==0)printf("TDC_NaI = %d\n",DTN);
237
238
239     //read(TDC_Ge)
240     n=TDC;
241     a=TDC_Ge;
242     f=0;
243     naf=NAF(n,a,f);
244     result=CAMAC(naf,&DTG,&q,&x);
245 //     fprintf(fdata,"%d ",data);
246 //     if(i%10==0)printf(" : TDC_Ge = %d",data);
247
248
249     //read(TDC_ATERUI)
250     n=TDC;
251     a=TDC_ATERUI;
252     f=0;
253     naf=NAF(n,a,f);
254     result=CAMAC(naf,&DTA,&q,&x);
255 //     fprintf(fdata,"%d ",data);
256 //     if(i%10==0)printf(" : TDC_ATERUI = %d",data);
257
258
259     //read(TDC_MARO)

```

```

260     n=TDC;
261     a=TDC_MARO;
262     f=0;
263     naf=NAF(n,a,f);
264     result=CAMAC(naf,&DTM,&q,&x);
265     // fprintf(fdata,"%d ",data);
266     // if(i%10==0)printf(" : TDC_MARO = %d \n",data);
267
268
269     //read(TDC_NaI and CSI coin)
270     n=TDC;
271     a=TDC_coin1;
272     f=0;
273     naf=NAF(n,a,f);
274     result=CAMAC(naf,&Dcoin1,&q,&x);
275     // fprintf(fdata,"%d ",data);
276     // if(i%10==0)printf(" : TDC_coin1 = %d \n",data);
277
278
279     //read(TDC_Ge and CSI coin)
280     n=TDC;
281     a=TDC_coin2;
282     f=0;
283     naf=NAF(n,a,f);
284     result=CAMAC(naf,&Dcoin2,&q,&x);
285     // fprintf(fdata,"%d ",data);n
286     // if(i%10==0)printf(" : TDC_coin2 = %d \n",data);
287
288
289     //read(TDC_triple coin)
290     n=TDC;
291     a=TDC_coin3;
292     f=0;
293     naf=NAF(n,a,f);
294     result=CAMAC(naf,&Dcoin3,&q,&x);
295     // fprintf(fdata,"%d ",data);
296     // if(i%10==0)printf(" : TDC_coin3 = %d \n",data);
297
298
299     //read(ADC_NaI)
300     n=ADC1;
301     a=ADC_NaI;
302     f=2;
303     naf=NAF(n,a,f);
304     result=CAMAC(naf,&DAN,&q,&x);

```

```

305 //      fprintf(fdata, "%d ", data);
306 //      if(i%10==0)printf("ADC_NaI = %d", data);
307
308
309      //read(ADC_Ge)
310      n=ADC3;
311      a=ADC_Ge;
312      f=2;
313      naf=NAF(n, a, f);
314      result=CAMAC(naf, &DAG, &q, &x);
315 //      fprintf(fdata, "%d ", dataG);
316 //      if(i%10==0)printf(" : ADC_Ge = %d", dataG);
317
318
319      //read(ADC_ATERUI)
320      n=ADC2;
321      a=ADC_ATERUI;
322      f=2;
323      naf=NAF(n, a, f);
324      result=CAMAC(naf, &DAA, &q, &x);
325 //      fprintf(fdata, "%d ", data);
326 //      if(i%10==0)printf(" : ADC_ATERUI = %d", data);
327
328
329      //read(ADC_MARO)
330      n=ADC2;
331      a=ADC_MARO;
332      f=2;
333      naf=NAF(n, a, f);
334      result=CAMAC(naf, &DAM, &q, &x);
335 //      fprintf(fdata, "%d\n", data);
336 //      if(i%10==0)printf(" : ADC_MARO = %d\n", data);
337
338
339      //read(scaler_coins)
340      n=SCALER;
341      a=SCA_coin1;
342      f=0;
343      naf=NAF(n, a, f);
344      result=CAMAC(naf, &data, &q, &x);
345      DScoin1=data;
346
347      n=SCALER;
348      a=SCA_coin2;
349      f=0;

```



```

350     naf=NAF(n,a,f);
351     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
352     DScoin2=data;
353
354     n=SCALER;
355     a=SCA_coin3;
356     f=0;
357     naf=NAF(n,a,f);
358     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
359     DScoin3=data;
360
361
362     //read(scaler_trigger signal)
363     n=SCALER;
364     a=SCA_all;
365     f=0;
366     naf=NAF(n,a,f);
367     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
368     DSall=data;
369
370
371     //read(scaler_clock)
372     n=SCALER;
373     a=5;
374     f=0;
375     naf=NAF(n,a,f);
376     result=CAMAC(naf,&DSclock,&q,&x);
377
378
379     //read(scaler_detectors)
380     n=SCALER;
381     a=SCA_NaI;
382     f=0;
383     naf=NAF(n,a,f);
384     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
385     DSN=data;
386
387     n=SCALER;
388     a=SCA_ATERUI;
389     f=0;
390     naf=NAF(n,a,f);
391     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
392     DSA=data;
393
394     n=SCALER;

```

```

395     a=SCA_MARO;
396     f=0;
397     naf=NAF(n,a,f);
398     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
399     DSM=data;
400
401     n=SCALER;
402     a=SCA_Ge;
403     f=0;
404     naf=NAF(n,a,f);
405     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
406     DSG=data;
407
408
409     //read(scaler_veto and non-veto)
410     n=SCALER;
411     a=SCA_Nonveto;
412     f=0;
413     naf=NAF(n,a,f);
414     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
415     nonveto=data;
416
417     n=SCALER;
418     a=SCA_Veto;
419     f=0;
420     naf=NAF(n,a,f);
421     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
422     veto=data;
423
424
425
426 //FINISH READING
427
428     //clear ADC,TDC.IR
429     n=ADC1;
430     a=0;
431     f=9;
432     naf=NAF(n,a,f);
433     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
434
435     n=ADC2;
436     a=0;
437     f=9;
438     naf=NAF(n,a,f);
439     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);

```

```

440
441     n=ADC3;
442     a=0;
443     f=9;
444     naf=NAF(n,a,f);
445     result=CAMAC(naf,&dataG,&q,&x);
446     dataG=0xf300;
447
448     n=TDC;
449     a=0;////////////////////?
450     f=9;
451     naf=NAF(n,a,f);
452     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
453
454     n=IR;
455     a=0;
456     f=26;
457     naf=NAF(n,a,f);
458     result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
459
460
461     //monitor signal No.,time and coin3
462     if(i%10==0)printf("%d th signal  time:%d  coin3:%d\n",i,tv.tv_sec-tvini.
        tv_sec,DScoin3);
463
464
465     //write all data
466     fprintf(fdata,"%d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d %d
        %d %d %d %d\n",
467     i,tv.tv_sec,DTN,DTG,DTA,
468     DTM,Dcoin1,Dcoin2,Dcoin3,DAN,
469     DAG,DAA,DAM,DScoin1,DScoin2,
470     DScoin3,DSall,DSN,DSA,DSM,
471     DSG,DSclock,nonveto,veto);
472
473
474     //get dead time
475     gettimeofday(&tvdead, NULL);
476     dead += tvdead.tv_usec - tv.tv_usec;
477
478
479     //signal output register
480     data=0xFFFF; //signal from all address
481     n=OR;
482     a=0;

```

```

483         f=16;
484         naf=NAF(n,a,f);
485         result=CAMAC(naf,&data,&q,&x);
486
487
488     }
489
490
491     fclose(fdata);
492
493
494     //WRITE RUN TIME AND DEAD TIME
495
496     char str[256];
497     sprintf(str,"about_%s.txt",filename);
498     fdata=fopen(str,"w");
499
500     int buf,sec,min,hour;
501
502     buf = tv.tv_sec - tvini.tv_sec;
503     hour=buf/3600;
504     buf=buf-3600*hour;
505     min=buf/60;
506     buf=buf-60*min;
507     sec=buf;
508
509     printf("total run time is:%dh%dm%ds\n",hour,min,sec);
510     printf("dead time is:%d usec\n",dead);
511
512     fprintf(fdata,"total run time is:%dh%dm%ds\n",hour,min,sec);
513     fprintf(fdata,"dead time is:%d usec\n",dead);
514
515
516     CCLOSE();
517
518
519 }

```

## ソースコードの解説

15-20 行目:種々のライブラリをインクルードする。CAMAC 関数などを使うのに必要。

25-57 行目:モジュールのアドレスやステーションなどを定義しておく。このようにすることで、モジュールを差し替えたりしても、プログラムの書き換えはこの部分だけで済み、間違いが起こりにくい。

60 行目 :プログラムの本体。端末で実行する際は、書き出し用のファイル名を指定して使う。

62-72 行目:変数の定義

78-81 行目:コマンドラインからの入力の間違っている場合、プログラムを終了する。

84-89 行目:書き出し用のファイルを開く。

これ以降で、モジュールの初期化処理をする。

120-157 行目:各モジュールをクリアする。(内部で記憶している値などをリセットする。)ただし Ge は、データの取得方式等に関する設定を行っている。<sup>\*7</sup>

163-169 行目:Output Register から最初の NIM 信号を出力する。これにより veto が外れ、データの取得が始まる。

173 行目 :データ取得開始時刻を取得する。gettimeofday() はコンピュータ内で使用されている UNIX 時間を取得する関数である。

178 行目 :指定した時間の間データを取り続けるためのループ。tv\_sec は構造体のデータメンバで、具体的な UNIX 時間の秒数を格納している。

181 行目 :Interrupt Register からの LAM を待つ。LAM を受け取ると、処理が進む。

194-198 行目:Interrupt Register が LAM を受け付けないようにする。

202-206 行目:念のためクリアしておく。

ここから、各 ADC、TDC、スケーラーからのデータ読み込みが始まる。コード自体は長いが、各モジュールの各チャンネルに対して同じ操作を繰り返しているだけである。

229-296 行目:TDC の読み込み。

300-366 行目:ADC の読み込み。

340-422 行目:スケーラーの読み込み。

読み込みが終わったら、すべてのモジュールをクリアしておく。

429-446 行目:ADC のクリア。

448-452 行目:TDC のクリア。

340-422 行目:スケーラーの読み込み。

454-458 行目:Interrupt Register を LAM 受付状態にしておく。

462 行目 :イベント数と経過時間を端末に出力させる。

466-471 行目:読み込んだデータをファイルに書き出す。

475-476 行目:LAM を受け取ってから、データの書き出しが終わるまでにかかった時間 (dead time) を計算し、変数 dead に加算する。

480-485 行目:Output Register から NIM 信号を出力する。これにより veto が外れ、再度データの取得が始まる。

---

<sup>\*7</sup> モジュールのメーカーのホームページに仕様書が公開されている。

以上がループの内容である。指定した時間が経過し、ループを抜けたら、計測時間と積算の **dead time** を別ファイルに書き出して、このプログラムは終了する。

## NAF について

CAMAC 関数は NAF と呼ばれる 3 つの値を指定することで、特定のモジュールに特定の動作を行うように命令することができる。NAF とは、Station Number(N)、Address(A)、Function(F) の略称である。N は、モジュールがクレートの何番目のコネクタに接続されているかを表す。(通常、クレート正面から見て左が 1 番である) A は、モジュールのどのピンを使用するかを表す番号である。(通常、上のピンが 0 か 1 番となっている) 最後の F は、モジュールの動作を指定するものである。何番がどの機能に対応するかは、一般にはモジュールによって異なるので、仕様書を確認しなければならないが、多くのモジュールは共通して表 17 のような使い方をする。

表 17 Function の例

F	機能
2	read(データの読み込み)
9	clear(値のリセット)
24	LAM disable (LAM を受け付けないようにする)
26	LAM enable(LAM を受け付け可能にする)

## 付録 F 非対称度に影響する要素

### F.1 陽電子への磁場の影響

スピンの部分のみ考えると、Hamiltonian は

$$H = \mu_B \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B} \quad (\text{付録 F.1})$$

ここで、 $\mu_B = 5.7883 \times 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{T}^{-1}$  はボーア磁子である。

いま、スピンの量子化軸を  $z$  方向に取り、磁場が  $z$  方向を向いているとする。

$$H = \mu_B B \sigma_z \quad (\text{付録 F.2})$$

スピンの上下でのエネルギーの違いは

$$\Delta E = \mu_B B \times 2 = 1.15766 \times 10^{-4} \left( \frac{B}{1\text{T}} \right) \text{eV} \approx 2.8 \times 10^{10} \left( \frac{B}{1\text{T}} \right) \text{Hz} \quad (\text{付録 F.3})$$

即ち、1T の磁場がかかると  $1.15766 \times 10^{-4} \text{eV}$  の準位のずれが発生する。光の波長で表すと、約 100m の赤外線である。よって、電子のスピンの情報が保存されるか否かは金属中に赤外線が透過するかどうかと関係するということが分かる。電磁波の導体への侵入長は

$$\delta \approx \sqrt{2/\varepsilon\mu_0\omega} \quad (\text{付録 F.4})$$

である。

ここまでは磁場が  $z$  軸に平行な場合のみを考えてきたが、今度は  $x$  軸方向にも磁場が存在するとして、その影響を考えてみる。 $\mathbf{B} = (B_x, 0, B_z)$  とすると、Hamiltonian は

$$H = \mu_B (B_z \sigma_z + B_x \sigma_x) \quad (\text{付録 F.5})$$

$$= \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & -\alpha \end{pmatrix} \quad (\text{付録 F.6})$$

と書ける。この固有値は  $E = \pm\lambda = \pm\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$  であり、固有ベクトルは  $E = +\lambda$  のとき  $|u\rangle = \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda+\alpha)}}\{(\alpha + \lambda)|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle\}$ 、 $E = -\lambda$  のとき  $|v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda+\alpha)}}\{-\beta|\uparrow\rangle + (\alpha + \lambda)|\downarrow\rangle\}$  である。

時刻  $t$  での状態を  $|\psi(t)\rangle = a(t)|u\rangle + b(t)|v\rangle$  と書く。 $t = 0$  でスピン上向きの状態であるときに、時刻  $t$  で上向きである確率  $P_\uparrow(t)$  を求めたい。まず基底を変換して、

$$|\psi(t)\rangle = \frac{a(t)}{\sqrt{2\lambda(\lambda+\alpha)}}\{(\alpha + \lambda)|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle\} + \frac{b(t)}{\sqrt{2\lambda(\lambda+\alpha)}}\{-\beta|\uparrow\rangle + (\alpha + \lambda)|\downarrow\rangle\} \quad (\text{付録 F.7})$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda+\alpha)}}\{(a(t)(\alpha + \lambda) - b(t)\beta)|\uparrow\rangle + (a(t)\beta + b(t)(\alpha + \lambda))|\downarrow\rangle\} \quad (\text{付録 F.8})$$

$a(t), b(t)$  は

$$i\hbar\dot{a}(t) = \lambda a(t) \quad (\text{付録 F.9})$$

$$i\hbar\dot{b}(t) = -\lambda b(t) \quad (\text{付録 F.10})$$

の方程式を満たすので、 $a(t) = a_0 e^{-i\lambda t/\hbar}$ 、 $b(t) = b_0 e^{i\lambda t/\hbar}$  と解くことが出来る。初期条件は、 $t = 0$  において

$$a_0(\alpha + \lambda) - b_0\beta = \sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} \quad (\text{付録 F.11})$$

$$a_0\beta + b_0(\alpha + \lambda) = 0 \quad (\text{付録 F.12})$$

であるので、これを解いて

$$a_0 = \sqrt{\frac{\lambda + \alpha}{2\lambda}} \quad (\text{付録 F.13})$$

$$b_0 = -\frac{\beta}{\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)}} \quad (\text{付録 F.14})$$

を得る。よって、時刻  $t$  での  $|\uparrow\rangle$  の係数は

$$\frac{a(t)(\alpha + \lambda) - b(t)\beta}{\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)}} = \frac{\lambda + \alpha}{2\lambda} \cdot e^{-i\lambda t/\hbar} + \frac{\beta^2}{2\lambda(\lambda + \alpha)} \cdot e^{i\lambda t/\hbar} \quad (\text{付録 F.15})$$

$$= \cos(\omega_B t) - i \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \sin(\omega_B t) \quad (\text{付録 F.16})$$

$$= \cos(\omega_B t) - i \frac{B_z}{\sqrt{B_z^2 + B_x^2}} \sin(\omega_B t) \quad (\text{付録 F.17})$$

ここで、 $\omega_B = \lambda/\hbar = (\mu_B/\hbar) \sqrt{B_z^2 + B_x^2}$  である。よって、時刻  $t$  でスピン上向きの確率は

$$P_{\uparrow}(t) = \left| \cos(\omega_B t) - i \frac{B_z}{\sqrt{B_z^2 + B_x^2}} \sin(\omega_B t) \right|^2 \quad (\text{付録 F.18})$$

$$= \cos^2(\omega_B t) + \frac{B_z^2}{B_z^2 + B_x^2} \sin^2(\omega_B t) \quad (\text{付録 F.19})$$

$$= \frac{1}{1 + \eta^2} + \left(1 - \frac{1}{1 + \eta^2}\right) \cos^2(\omega_B t) \quad (\text{付録 F.20})$$

$\eta = |B_x/B_z|$  である。これをみると、上向きの確率が最も小さくなるのは  $t = \pi/2\omega$  の時である。たとえば磁場が 1T とすると、 $t_0 \sim 10^{-10}\text{s}$  のときである。銅板からパーマロイまでの距離が 3mm だとし、陽電子の速度が  $v/c \sim 0.5$  とすると、陽電子が発生してからパーマロイに達するまでの時間は  $T \sim 2 \times 10^{-11}\text{s}$  となる。これは  $t_0$  とさほど変わらないので、磁場の影響でスピンが変わる可能性は十分ある。しかし、 $\eta$  が十分小さければ無視することも出来ると思われる。

では、始状態がヘリシティの固有状態のときはどうなるだろうか。ヘリシティの固有状態は、

$$|\mathbf{p}, +\rangle = \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{2}} |\uparrow\rangle + e^{i\phi} \sqrt{\frac{1 - \cos\theta}{2}} |\downarrow\rangle \quad (\text{付録 F.21})$$

$$|\mathbf{p}, -\rangle = -e^{-i\phi} \sqrt{\frac{1 - \cos\theta}{2}} |\uparrow\rangle + \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{2}} |\downarrow\rangle \quad (\text{付録 F.22})$$

で与えられる。即ち、初期条件として

$$a_0(\alpha + \lambda) - b_0\beta = \sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{2}} \quad (\text{付録 F.23})$$

$$a_0\beta + b_0(\alpha + \lambda) = \sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} e^{i\phi} \sqrt{\frac{1 - \cos\theta}{2}} \quad (\text{付録 F.24})$$

や、

$$a_0(\alpha + \lambda) - b_0\beta = -\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} e^{-i\phi} \sqrt{\frac{1 - \cos\theta}{2}} \quad (\text{付録 F.25})$$

$$a_0\beta + b_0(\alpha + \lambda) = \sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{2}} \quad (\text{付録 F.26})$$



を考えることになる。それぞれ、

$$a_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{\lambda(\lambda + \alpha)}} \left( (\lambda + \alpha) + e^{i\phi} \beta \frac{\sin\theta}{1 + \cos\theta} \right) \quad (\text{付録 F.27})$$

$$b_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{\lambda(\lambda + \alpha)}} \left( -\beta + e^{i\phi} (\lambda + \alpha) \frac{\sin\theta}{1 + \cos\theta} \right) \quad (\text{付録 F.28})$$

$$a_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{\lambda(\lambda + \alpha)}} \left( \beta - e^{-i\phi} (\lambda + \alpha) \frac{\sin\theta}{1 + \cos\theta} \right) \quad (\text{付録 F.29})$$

$$b_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 + \cos\theta}{\lambda(\lambda + \alpha)}} \left( (\lambda + \alpha) + e^{i\phi} \beta \frac{\sin\theta}{1 + \cos\theta} \right) \quad (\text{付録 F.30})$$

と解ける。一般に

$$|\psi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)}} \left\{ (a_0(\lambda + \alpha)e^{-i\lambda t/\hbar} - b_0\beta e^{i\lambda t/\hbar}) |\uparrow\rangle + (a_0\beta e^{-i\lambda t/\hbar} + b_0(\lambda + \alpha)e^{i\lambda t/\hbar}) |\downarrow\rangle \right\} \quad (\text{付録 F.31})$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)}} \left\{ (a_0(\lambda + \alpha) - b_0\beta)\cos(\omega_B t) - i(a_0(\lambda + \alpha) + b_0\beta)\sin(\omega_B t) \right\} |\uparrow\rangle \quad (\text{付録 F.32})$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)}} \left\{ (a_0\beta + b_0(\lambda + \alpha))\cos(\omega_B t) + i(-a_0\beta + b_0(\lambda + \alpha))\sin(\omega_B t) \right\} |\downarrow\rangle \quad (\text{付録 F.33})$$

と書けるので、

$$P_{\uparrow}(t) = \left| \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)}} (a_0(\lambda + \alpha)e^{-i\lambda t/\hbar} - b_0\beta e^{i\lambda t/\hbar}) \right|^2 \quad (\text{付録 F.34})$$

$$= \frac{1}{2\lambda(\lambda + \alpha)} \left\{ |a_0|^2(\lambda + \alpha)^2 + |b_0|^2\beta^2 - 2\beta(\lambda + \alpha)\text{Re}(a_0^* b_0 e^{2i\lambda t/\hbar}) \right\} \quad (\text{付録 F.35})$$

である。よって、時刻  $t = 0$  で  $\theta, \phi$  の方向にヘリシティ  $+1$  の固有状態で放出された陽電子が時刻  $t$  でスピン上向きに観測される確率は

$$\text{Re}(a_0^* b_0 e^{2i\lambda t/\hbar}) = \frac{1}{2\lambda} [(-\beta\cos\theta + \alpha\sin\theta\cos\phi)\cos(2\omega_B t) - \lambda\sin\theta\sin\phi\sin(2\omega_B t)] \quad (\text{付録 F.36})$$

$$= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2}} (-\eta\cos\theta + \sin\theta\cos\phi)\cos(2\omega_B t) - \sin\theta\sin\phi\sin(2\omega_B t) \right] \quad (\text{付録 F.37})$$

や

$$|a_0|^2 = \frac{1 + \cos\theta}{4\lambda} \left[ (\lambda + \alpha) + (\lambda - \alpha) \left( \frac{\sin\theta}{1 + \cos\theta} \right)^2 + 2\beta \frac{\sin\theta\cos\phi}{1 + \cos\theta} \right] \quad (\text{付録 F.38})$$

$$= \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2}} \cos\theta + \frac{\eta}{\sqrt{1 + \eta^2}} \sin\theta\cos\phi \right] \quad (\text{付録 F.39})$$

$$|b_0|^2 = \frac{1 + \cos\theta}{4\lambda} \left[ (\lambda - \alpha) + (\lambda + \alpha) \left( \frac{\sin\theta}{1 + \cos\theta} \right)^2 - 2\beta \frac{\sin\theta\cos\phi}{1 + \cos\theta} \right] \quad (\text{付録 F.40})$$

$$= \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2}} \cos\theta - \frac{\eta}{\sqrt{1 + \eta^2}} \sin\theta\cos\phi \right] \quad (\text{付録 F.41})$$

$$(\text{付録 F.42})$$

から、

$$P_{\uparrow}(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{1 + \eta^2} (\cos\theta + \eta \sin\theta \cos\phi) \right] \quad (\text{付録 F.43})$$

$$- \frac{\eta}{1 + \eta^2} (-\eta \cos\theta + \sin\theta \cos\phi) \cos(2\omega_B t) + \frac{\eta}{\sqrt{1 + \eta^2}} \sin\theta \sin\phi \sin(2\omega_B t) \Big] \quad (\text{付録 F.44})$$

となる。

陽電子の質量は 0 ではないので、実際にはヘリシティの固有状態で放出されるわけではない。\$p\_{\uparrow} - p\_{\downarrow} = v/c\$ の割合になる。即ち、\$\theta, \phi\$ の方向に速度 \$v/c\$ で放出される陽電子の状態は

$$|e^+\rangle = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{v}{c}\right)} |\mathbf{p}, +\rangle + \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{v}{c}\right)} |\mathbf{p}, -\rangle \quad (\text{付録 F.45})$$

$$= \left( \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 + \frac{v}{c}\right)} (1 + \cos\theta) - e^{-i\phi} \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 - \frac{v}{c}\right)} (1 - \cos\theta) \right) |\uparrow\rangle \quad (\text{付録 F.46})$$

$$+ \left( e^{i\phi} \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 + \frac{v}{c}\right)} (1 - \cos\theta) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 - \frac{v}{c}\right)} (1 + \cos\theta) \right) |\downarrow\rangle \quad (\text{付録 F.47})$$

であると考えられる。従ってこの場合の初期条件は

$$a_0(\alpha + \lambda) - b_0\beta = \sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} \left( \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 + \frac{v}{c}\right)} (1 + \cos\theta) - e^{-i\phi} \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 - \frac{v}{c}\right)} (1 - \cos\theta) \right) \quad (\text{付録 F.48})$$

$$= \sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} \left( \sqrt{v_+ c_+} - e^{-i\phi} \sqrt{v_- c_-} \right) \quad (\text{付録 F.49})$$

$$a_0\beta + b_0(\alpha + \lambda) = \sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} \left( e^{i\phi} \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 + \frac{v}{c}\right)} (1 - \cos\theta) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(1 - \frac{v}{c}\right)} (1 + \cos\theta) \right) \quad (\text{付録 F.50})$$

$$= \sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)} \left( e^{i\phi} \sqrt{v_+ c_-} + \sqrt{v_- c_+} \right) \quad (\text{付録 F.51})$$

である。これを解いて、

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)}} \left[ (\lambda + \alpha) \left( \sqrt{v_+ c_+} - e^{-i\phi} \sqrt{v_- c_-} \right) + \beta \left( e^{i\phi} \sqrt{v_+ c_-} + \sqrt{v_- c_+} \right) \right] \quad (\text{付録 F.52})$$

$$b_0 = \frac{1}{\sqrt{2\lambda(\lambda + \alpha)}} \left[ -\beta \left( \sqrt{v_+ c_+} - e^{-i\phi} \sqrt{v_- c_-} \right) + (\lambda + \alpha) \left( e^{i\phi} \sqrt{v_+ c_-} + \sqrt{v_- c_+} \right) \right] \quad (\text{付録 F.53})$$

綺麗にまとめるのは非常に面倒なので、数値計算した結果を掲載する。

## F.2 物質との相互作用による陽電子のスピンフリップ

陽電子がパーマロイに入射した後、パーマロイ中の電子による散乱を受けて電子のスピン状態が変わってしまう可能性について考察する。電子と陽電子の散乱は **Bhabha** 散乱と呼ばれる。散乱前後の陽電子のスピンに依存した散乱断面積をツリーレベルで計算し、グラフにした。

これを見ると、重要である前方方向の散乱では、前後でスピンが変わらない断面積に比べてスピンが変わる断面積は非常に少なく、散乱回数が多くならなければその影響はほぼ無視できることが分かった。時間の都合でスピンの固有状態から固有状態への断面積しか計算できなかったが、大まかな傾向はつかめたと思われる。そのほかにも、銅の原子核は基底状態でもスピン 3/2 を持つので、銅原子核によるラザフォード散乱によって陽電子のスピンが変わる可能性はある。これについては計算はしていないので定量的評価は出来なかった。

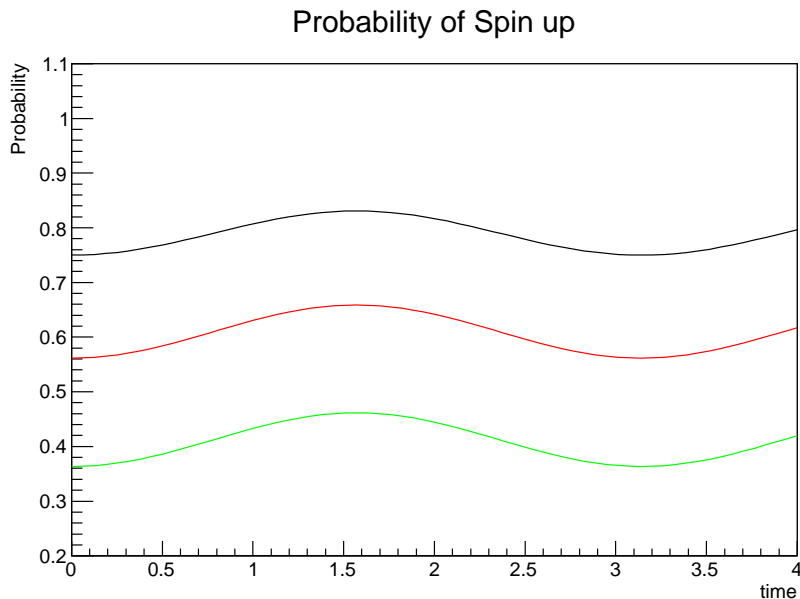


図 38  $p = 0.5\text{MeV}$  のときのスピンの確率。黒線が  $\theta = 0$ 、赤線が  $\theta = 0.4$ 、緑線が  $\theta = 0.8$  の場合である。

### F.3 物質中のポジトロニウムの反応

電子と陽電子の束縛状態であるポジトロニウムは、物質中でいくつかの反応を起こす。シミュレーションではその影響を完全に無視しているが、無視することによる実験結果との違いについて考察する。

ポジトロニウムは物質中で次の反応を起こすことが知られている

- pick-off 反応
- スピン交換反応
- 化学反応

**pick-off** 反応とは、ポジトロニウム中の陽電子が物質中で、束縛している相手以外の電子と対消滅する反応である。今回の実験では、ポジトロニウム中の陽電子が出会うポジトロニウム外の電子も同じ偏極率で偏極していると考えるので、陽電子がどの電子と対消滅するかは問題ではない。よって **pick-off** 反応については考えなくても良い。

スピン交換反応は、ポジトロニウム中の電子がポジトロニウム外の不対電子と相互作用してスピンを交換する反応である。この反応によって、**singlet** が **triplet** に、また **triplet** が **singlet** になる可能性がある。よってこの効果が主に非対称度を下げる働きをしていると考えられる。

化学反応は、ポジトロニウムの構造が水素原子に似ているという事から起こる様々な化学的反応である。この反応によるスピンへの影響は複雑なので今回は考えないことにする。

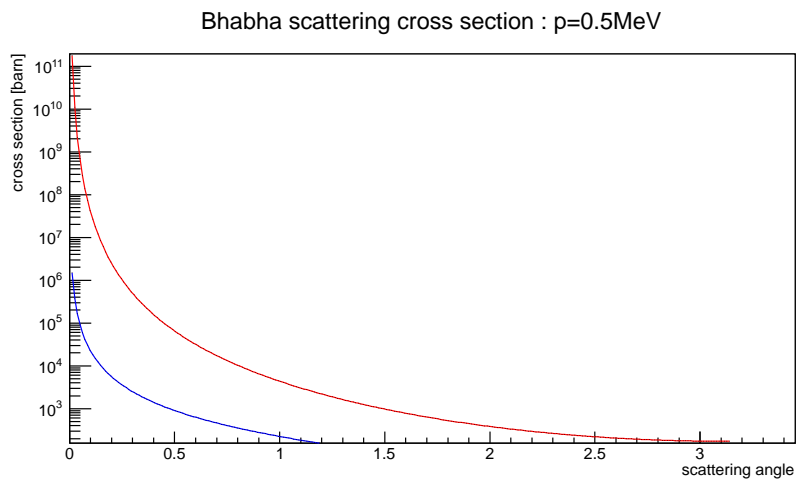


図 39 Bhabha 散乱断面積。赤線が陽電子のスピンの変化しない断面積。青線はスピンの変化する断面積。

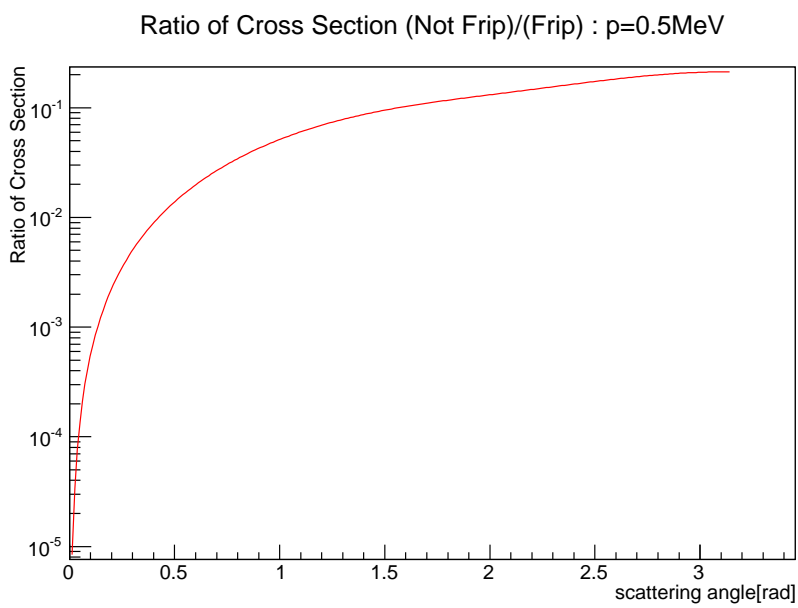


図 40 断面積の比。

## 付録 G シミュレーション

実験に先立って、シミュレーションを行って実験のセッティングを決めようとした。実際にはシミュレーションが間に合わず、セッティングを先に決めて実験を行なってしまったが、その後シミュレーションが完成したのでその結果を載せることにする。セッティングは実際の実験のものと同じにしたが、NaI シンチレータとゲルマニウムの結晶の大きさを調べなかったため、シミュレーションにおける統計を貯める意味もあってこれらの大きさは大きめに設定した。

### G.1 シミュレーションの手順

シミュレーションを以下の手順で行った。

1. 銅板のランダムな位置に、エネルギー分布に従った運動量を持つ陽電子を作る
2. 陽電子を一定距離進め、位置（銅・プラスチックシンチレータ・パーマロイ・鉛・NaI・ゲルマニウム・空気）に見合ったエネルギーを落とさせる  
(陽電子の運動エネルギーが無くなるまで続ける)
3. 陽電子のスピンの上向き確率を  $P_{\uparrow}^{(+)}$ 、物質中の電子が下向き確率を  $P_{\downarrow}^{(-)}$  とし、 $P_{\uparrow}^{(+)}P_{\downarrow}^{(-)} + (1 - P_{\uparrow}^{(+)})(1 - P_{\downarrow}^{(-)})$  の確率で（これは陽電子がスピン上向きかつ電子がスピン下向きもしくは、陽電子がスピン下向きかつ電子がスピン上向きとなる確率である）陽電子が止まった位置からランダムな方向に 511keV のガンマ線を飛ばす（それと真反対にもガンマ線を飛ばす）
4. ガンマ線を一定距離進め、位置に見合う断面積に従って光電効果・コンプトン散乱のどちらかを起こさせる
  - 5-1. 光電効果なら全てのエネルギーを落とす
  - 5-2. コンプトン散乱ならクライン-仁科の式に従って散乱角を選び、運動学に従ってエネルギーを落とす
6. プラスチックシンチレータ、NaI 検出器、ゲルマニウム検出器で落とされたエネルギーを記録して 1 へ

陽電子のスピンは、ヘリシティの偏りが  $p_+ - p_- = v/c$  であることから  $\theta, \phi$  の方向に速度  $v/c$  で放出される陽電子の状態は

$$|e^+\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{v}{c}\right)}|p, +\rangle + \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 - \frac{v}{c}\right)}|p, -\rangle \quad (\text{付録 G.1})$$

$$= \left( \sqrt{\frac{1}{4}\left(1 + \frac{v}{c}\right)(1 + \cos\theta)} - e^{-i\phi} \sqrt{\frac{1}{4}\left(1 - \frac{v}{c}\right)(1 - \cos\theta)} \right) |\uparrow\rangle \quad (\text{付録 G.2})$$

$$+ \left( e^{i\phi} \sqrt{\frac{1}{4}\left(1 + \frac{v}{c}\right)(1 - \cos\theta)} + \sqrt{\frac{1}{4}\left(1 - \frac{v}{c}\right)(1 + \cos\theta)} \right) |\downarrow\rangle \quad (\text{付録 G.3})$$

であるとした。また、パーマロイの磁化率は 14% とし、その他の物質については 0% とした。本来なら、スピン上向きの陽電子とスピン下向きの電子の結合状態では

$$|\uparrow\rangle_+ \otimes |\downarrow\rangle_- = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{|\uparrow\rangle_+ \otimes |\downarrow\rangle_- + |\downarrow\rangle_+ \otimes |\uparrow\rangle_-}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{|\uparrow\rangle_+ \otimes |\downarrow\rangle_- - |\downarrow\rangle_+ \otimes |\uparrow\rangle_-}{\sqrt{2}} \quad (\text{付録 G.4})$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} |S = 1, S_z = 0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |S = 0, S_z = 0\rangle \quad (\text{付録 G.5})$$

となり、三重項と一重項が等しい確率で現れるはずである。従って、 $2\gamma$  崩壊を起こす確率は  $(1/2)(P_{\uparrow}^{(+)}P_{\downarrow}^{(-)} + (1 - P_{\uparrow}^{(+)})(1 - P_{\downarrow}^{(-)}))$  となるはずだが、これは統計を  $1/2$  に減らすだけであるので  $1/2$  は除いてある。

## G.2 シミュレーションの結果

磁場の方向を  $z$  軸上向きにし、 $2 \times 10^7$  回 1-7 を繰り返した。磁場の上下での係数の違いを見るには、MARO を通った（落としたエネルギーが 0 でない）か、ATERUI を通ったかで場合分けすれば良い。以下がそのヒストグラムである。

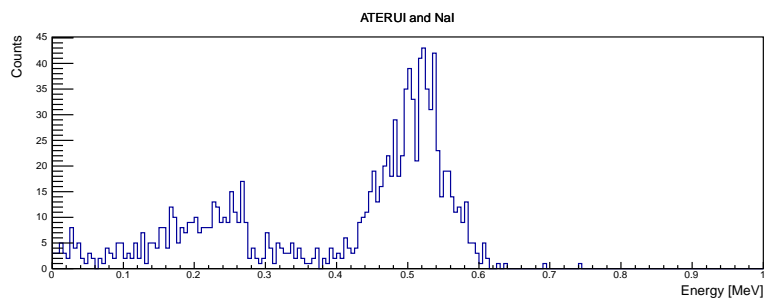
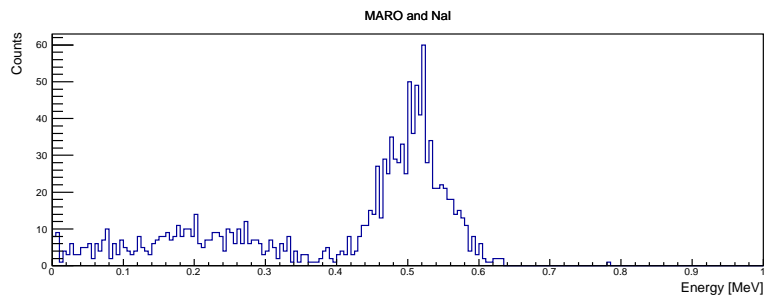


図 41 上:MARO  $\wedge$  NaI 下:ATERUI  $\wedge$  NaI

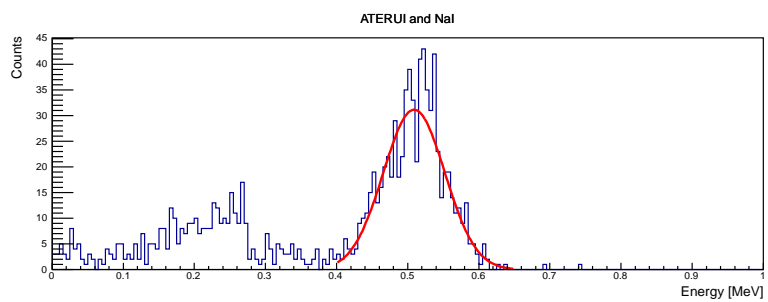
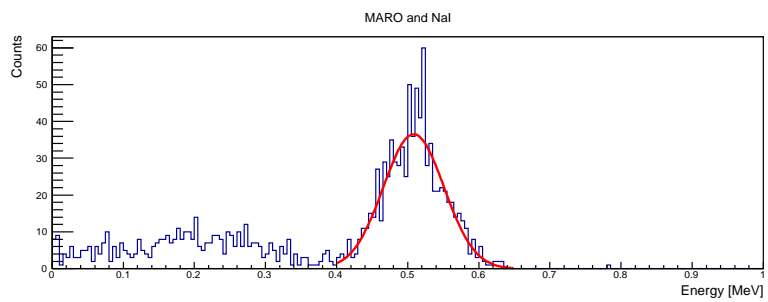


図 42 上:MARO  $\wedge$  NaI 下:ATERUI  $\wedge$  NaI

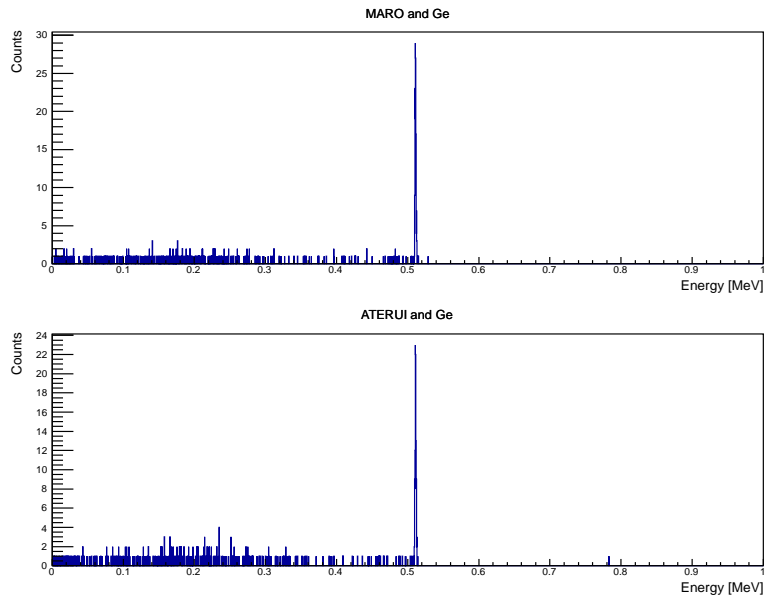


図 43 上:MARO  $\wedge$  Ge 下:ATERUI  $\wedge$  Ge

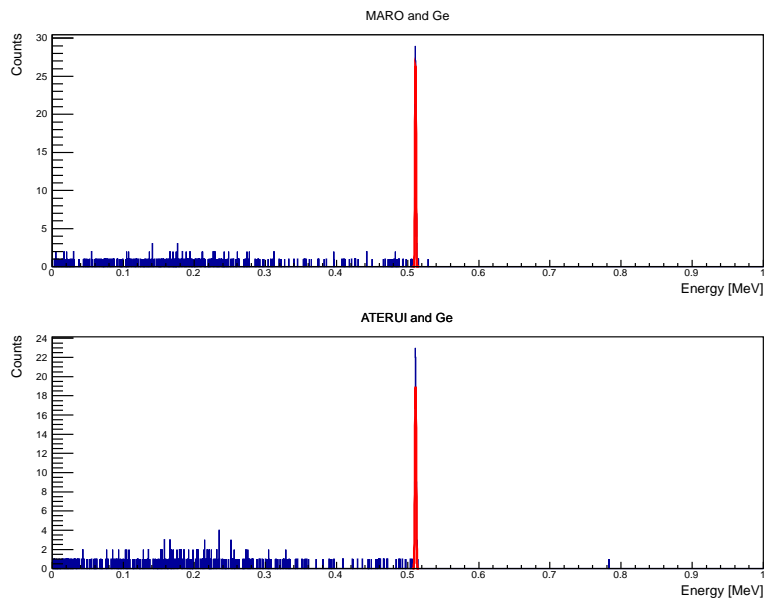


図 44 上:MARO  $\wedge$  Ge 下:ATERUI  $\wedge$  Ge

このフィットの結果、計数とアシンメトリーは表 18 のようになった。

実験の結果ではアシンメトリーは  $0.0648 \pm 0.0312$  であったので、よく一致していることが分かる。

### G.3 シミュレーションで考慮していないこととその影響

このシミュレーションでは以下のことは無視してある

1. 物質中の電子・原子核によって陽電子が散乱されて進行方向やスピンの変わる効果



表 18 各カウント

	$\wedge$ MARO	$\wedge$ ATERUI	Assymmetry
NaI	781 $\pm$ 28	675 $\pm$ 26	0.0723 $\pm$ 0.026
Ge	181 $\pm$ 13	158 $\pm$ 13	0.0675 $\pm$ 0.055
Ge $\wedge$ NaI	17 $\pm$ 4	9 $\pm$ 3	0.31 $\pm$ 0.19

物質との相互作用で実際は非対称度が減少すると考えられる。

## 2. 物質中でのポジトロニウムの反応

シミュレーションでは、陽電子が止まった後はすぐに対消滅させたが、ポジトロニウムを作って崩壊する課程では pick-off 反応やスピン交換反応などが起こる。

その考察については節を改めて考察する。

## 3. 検出器の不感層

陽電子は鉛の中でほとんど止まり、ガンマ線に対しては不感層は非常に薄いと考えられるため、これについてはあまり結果に影響しないと考えられる。

## 4. プラスチックシンチレータに巻かれた遮光テープ・アルミホイル

この効果でプラスチックシンチレータ内で止まる陽電子が増える。速度が大きくヘリシティの偏りが大きい陽電子が選択されやすくなるため、これは非対称度を上げる働きをする。

## 5. $3\gamma$ による影響

$3\gamma$  への対消滅は行っていない。ただ、シミュレーション結果の解析には 511keV の部分のみを用いたので  $3\gamma$  によるノイズはほぼ無いと考えられる。

実験との大きな違いを生み出す要因としては、物質中の陽電子やポジトロニウムの相互作用であると考えられる。しかし、シミュレーションと実験がほぼ一致していることから、その影響はかなり小さいと思われる。

## G.4 スピン交換反応の影響

ここからはスピン交換反応について詳しく考える。まずは次のような対消滅の過程のモデルを考えた。

陽電子のスピンが上向きの確率を  $P_{\uparrow}^{(+)}$ 、陽電子が束縛する相手の電子のスピンが上向きの確率を  $P_{\uparrow}^{(-)}$  とする。

1. 束縛状態について、陽電子の電子のスピンの向きによってポジトロニウムのスピンの状態を選択する。どちらも上向きなら  $(S, S_z) = (1, 1)$ 、どちらも下向きなら  $(S, S_z) = (1, -1)$ 、逆方向であれば  $(S, S_z) = (1, 0)$  の状態と  $(S, S_z) = (0, 0)$  の状態を等確率で選ぶ。ポジトロニウムの状態はスピンの固有状態とする。

2.  $T_{\text{ex}}$  を、スピン交換反応の時間スケールとする。即ち、時間  $t$  の間にスピン交換反応が起こる確率は  $1 - e^{-t/T_{\text{ex}}}$  で与えられるとする。

3. スピン交換反応が起こる際は、交換相手のスピンを  $P_{\uparrow}^{(-)}$  によって選択し、ポジトロニウムのスピン状態のケットの電子部分の状態のみを変える。例えば、 $(S, S_z) = (1, -1)$  のポジトロニウムと、上向きの電子がスピン交換反応を起こしたとすると、 $|\uparrow\downarrow\rangle \rightarrow |\uparrow\uparrow\rangle$  という置き換えでスピン交換反応を表す。

4. 反応後、ポジトロニウムはスピンの固有状態になるとする。例えば  $|\uparrow\downarrow\rangle$  は singlet と triplet の等確率の重ね合わせであるので、 $1/2$  の確率で  $(S, S_z) = (1, 0)$  と  $(S, S_z) = (0, 0)$  のどちらかの状態になるとする。

5. singlet については  $T_s = 125\text{ps}$ 、triplet については  $T_t = 142\text{ns}$  の寿命で崩壊させる。

この一連の過程を、磁場の上下 ( $P_{\uparrow}^{(-)}$  が変化する) それぞれについて 100000 回 ( $T_{\text{ex}} = \infty$  のみ 1000000 回) 繰り返してシミュレートし、 $2\gamma$  で崩壊した回数を記録した。ここで、パーマロイの磁化率が 14.3% であることから、磁場が下向きの際に  $P_{\uparrow}^{(-)} = 0.5715$  とした。また、後述のシミュレーションの結果からパーマロイに上向きに入射する陽電子のスピンの上向きの確率の平均として  $P_{\uparrow}^{(+)} = 0.77$  を得たので、これらの値を用いた。また、経過時間が 10ms を超えると計算を打ち切ることにした。様々な  $T_{\text{ex}}$  について計算した結果が以下の表 19 である。

表 19 各カウント

$T_{\text{ex}}$ [ns]	Assymmetry
$\infty$	$0.0772 \pm 0.0014$
800	$0.0692 \pm 0.0042$
600	$0.0676 \pm 0.0041$
400	$0.0651 \pm 0.0040$
200	$0.0556 \pm 0.0037$
100	$0.0450 \pm 0.0034$
50	$0.0317 \pm 0.0030$
10	$0.0105 \pm 0.0025$

$T_{\text{ex}} = \infty$  のときは、 $2\gamma$  崩壊の回数が  $P_{\uparrow}^{(+)}P_{\downarrow}^{(-)} + (1 - P_{\uparrow}^{(+)})(1 - P_{\downarrow}^{(-)})$  に比例するので、アシンメトリーは  $((0.77 * 0.5715 + 0.23 * 0.4285) - (0.77 * 0.4285 + 0.23 * 0.5715)) / ((0.77 * 0.5715 + 0.23 * 0.4285) + (0.77 * 0.4285 + 0.23 * 0.5715)) = 0.0722$  となるはずなので、誤差の範囲で一致が確かめられた。 $T_{\text{ex}}$  が小さくなるほどアシンメトリーが見えにくくなっているのは、triplet の状態で生成されたポジトロニウムがスピン交換によって singlet に変わってから崩壊するという過程が増えるからである。

その結果、スピン交換反応のみが非対称度を下げると考えると、 $T_{\text{ex}} \sim 400\text{ns}$  であるという事がわかる。

## G.5 シミュレーションのソースコード

各ソースコードの説明をする。

- "MainProgram.cc"

各ソースの関数を用いて全体の流れを作るもの

- "BetaDecay.cc"

ベータ崩壊の崩壊率を計算するもの

- "Compton.cc"

コンプトン散乱の微分断面積を計算するもの

- "CrossSections.cc"

各物質内でのガンマ線に関する全断面積を計算するもの

- "EnergyLoss.cc"

各物質内での陽電子の落とすエネルギーを計算するもの

本来ならストッピングパワーを全て代入するソースがあるのだが、紙面の都合で省略した

- "GammaDecay.cc"  
電子・陽電子が対消滅する際に出るガンマ線の方向を決定するもの
- "PhotonRenew.cc"  
ガンマ線を1ステップ更新するもの
- "PositronRenew.cc"  
陽電子を1ステップ更新するもの
- "Spin.cc"  
陽電子がスピン上向きの確率を計算するもの
- "Where.cc"  
陽電子やガンマ線が居る位置を判別するもの
- "SpinExchange.cc" これはスピン交換反応の影響を見るためのものである。

その他に、乱数生成は SIMD-oriented Fast Mersenne Twister 法 (Copyright (c) 2006,2007 Mutsuo Saito, Makoto Matsumoto and Hiroshima University. All rights reserved.) を用いた。以下がシミュレーションに用いたソースコードである。

#### ソースコード2 MainProgram.cc

```

1  #include <iostream>
2  #include <fstream>
3  #include <sstream>
4
5  #include <cmath>
6  #include <ctime>
7
8  #include "AngleStruggling.cc"
9  #include "BetaDecay.cc"
10 #include "Bhabha.cc"
11 #include "Where.cc"
12 #include "EnergyLoss.cc"
13 #include "GammaDecay.cc"
14 #include "CrossSections.cc"
15 #include "Compton.cc"
16 #include "PhotonRenew.cc"
17 #include "PositronRenew.cc"
18 #include "Spin.cc"
19
20 #include "SFMT.h"
21
22 #define N 5000000 //β崩壊させる回数
23 #define INIT 8587//乱数の初期値
24
25 #define P_Per 0.5715 //上向き電子の確率。パーマロイ中の電子の偏極率
    が0.143なので、0.5(1+0.143)=
26

```

```

27
28 int main(){
29     using namespace std;
30     init_gen_rand(INIT); //12537
31
32     double x,y,z,p1,p2,p3,p,theta,phi,beta,polarization; //陽電子のパラメータ
33     double lambda1=0.005; //陽電子が1ステップで進む距離
34     double m=0.511; //電子質量
35     int IfContinue1=0;
36     stringstream PositronTrack;
37
38     double px,py,pz,pp1,pp2,pp3; //光子のパラメータ
39     double lambda2=0.1; //1ステップで進む距離
40     int IfContinue2=0;
41     stringstream PhotonTrack1;
42     stringstream PhotonTrack2;
43
44     double buf1,buf2,buf3;
45     int w;
46
47     double t;
48
49     double E_NaI,E_Ge,E_ATERUI,E_MARO;
50
51     int StopPlace1[9]={0,0,0,0,0,0,0,0,0};
52     int StopPlace2[9]={0,0,0,0,0,0,0,0,0};
53
54     time_t timer;
55     time(&timer);
56
57     ofstream fEnergyData("EnergyData.dat");
58     ofstream fPositronTrack("PositronTrack.dat");
59     ofstream fPhotonTrack("PhotonTrack.dat");
60     ofstream fMainData("MainData.dat");
61     ofstream fPositronStopPosition("PositronStopPosition.dat");
62
63     fMainData <<"Parameters of this simulation"<<endl<<endl;
64     fMainData <<"seed value of Random number      : "<<INIT<<endl<<endl;
65     fMainData <<"number of beta decay                : "<<N<<endl<<endl;
66     fMainData <<"distance of positron for 1 step: "<<lambda1<<" cm"<<endl<<endl;
67     fMainData <<"distance of photon for 1 step  : "<<lambda2<<" cm"<<endl<<endl;
68     fMainData <<"simulation start time                : "<<ctime(&timer)<<endl<<endl;
69
70     for(int i=0;i<N;i++){
71         IfContinue1=1;

```

```

72
73     t=0;
74     E_NaI=0;
75     E_Ge=0;
76     E_ATERUI=0;
77     E_MARO=0;
78
79     PositronTrack.str("");
80     PhotonTrack1.str("");
81     PhotonTrack2.str("");
82
83     /*位置、運動量の指定*/
84     CuRandom(&x,&y,&z);
85     BetaDecay(&p1,&p2,&p3,&theta,&phi,&beta);
86
87     if(i%100==0) cout <<i<<"th loop"<<endl;
88
89     while(sqrt(p1*p1+p2*p2+p3*p3)>0.01&&IfContinue1==1){
90
91         t+=lambda1/(30*sqrt(p1*p1+p2*p2+p3*p3)/sqrt(p1*p1+p2*p2+p3*p3+m*m));
92         PositronRenew(lambda1,&p1,&p2,&p3,&x,&y,&z,&E_Ge,&E_NaI,&E_ATERUI,&
          E_MARO,&IfContinue1);
93
94
95         PositronTrack <<x<<" "<<y<<" "<<z<<endl;
96
97     }
98
99     w=Where(x,y,z);
100
101     if(w!=0){
102         fPositronStopPosition << w << " " << x << " " << y << " " << z << " " <<
          theta<<" "<<phi<<" "<<t<<" "<<PSpinUp(t,theta,phi,beta) << endl;
103     }
104
105     StopPlace1[w]++;//何処で止まったかをカウント
106
107     if(w==4){
108         polarization=P_Per;
109     }else{
110         polarization=0.5;
111     }
112
113     if(IfContinue1==1 && w!=0 && PSpinUp(t,theta,phi,beta)*polarization + (1-
          PSpinUp(t,theta,phi,beta))*(1-polarization) < genrand_real2()){

```

```

114      /*運動エネルギーがしきい値以下になったらすぐ崩壊させる?*/
115      /*2 $\gamma$ の方向を指定*/
116      GammaDecay(&pp1,&pp2,&pp3);
117      px=x;
118      py=y;
119      pz=z;
120      IfContinue2=1;
121
122      /*もう片方の $\gamma$ 線のために残しておく*/
123      buf1=pp1;
124      buf2=pp2;
125      buf3=pp3;
126
127
128      /*1つめの $\gamma$ */
129      while(IfContinue2==1){
130          PhotonRenew(lambda2,&pp1,&pp2,&pp3,&px,&py,&pz,&E_Ge,&E_NaI,&
131                      E_ATERUI,&E_MARO,&IfContinue2);
132          if(Where(px,py,pz)==0){
133              IfContinue2=0;
134          }else{
135              PhotonTrack1<<px<<" "<<py<<" "<<pz<<endl;
136          }
137
138          StopPlace2[Where(px,py,pz)]++;
139
140
141      /*2つめの $\gamma$ は逆方向*/
142      pp1=-buf1;
143      pp2=-buf2;
144      pp3=-buf3;
145      px=x;
146      py=y;
147      pz=p;
148
149      IfContinue2=1;
150
151      while(IfContinue2==1){
152          PhotonRenew(lambda2,&pp1,&pp2,&pp3,&px,&py,&pz,&E_Ge,&E_NaI,&
153                      E_ATERUI,&E_MARO,&IfContinue2);
154          if(Where(px,py,pz)==0){
155              IfContinue2=0;
156          }else{
157              PhotonTrack2<<px<<" "<<py<<" "<<pz<<endl;

```

```

157         }
158     }
159
160     StopPlace2[Where(px,py,pz)]++;
161 }
162
163 /*もし検出器が鳴ったら最後に出力して次の崩壊へ*/
164 if(E_Ge>0.001||E_NaI>0.001||E_ATERUI>0.001||E_MARO>0.001){
165     fEnergyData << E_Ge << " " << E_NaI << " " << E_ATERUI << " " <<
        E_MARO << endl;
166 }
167
168 if(E_Ge>0.001||E_NaI>0.001){
169     fPhotonTrack << PhotonTrack1.str() << endl;
170     fPhotonTrack << PhotonTrack2.str() << endl;
171     fPositronTrack << PositronTrack.str() << endl;
172 }
173
174 }
175
176 time(&timer);
177 fMainData <<"simulation end time           : "<<ctime(&timer)<<endl<<endl;
178
179 fMainData <<"places positron stopped:"<<endl;
180 fMainData <<"far away   : "<<StopPlace1[0]<<endl;
181 fMainData <<"air       : "<<StopPlace1[1]<<endl;
182 fMainData <<"ATERUI    : "<<StopPlace1[2]<<endl;
183 fMainData <<"MARO      : "<<StopPlace1[8]<<endl;
184 fMainData <<"Per       : "<<StopPlace1[4]<<endl;
185 fMainData <<"Ge        : "<<StopPlace1[5]<<endl;
186 fMainData <<"NaI       : "<<StopPlace1[6]<<endl;
187 fMainData <<"Lead      : "<<StopPlace1[7]<<endl;
188 fMainData <<"Cu        : "<<StopPlace1[3]<<endl<<endl;
189 fMainData <<"places photon stopped:"<<endl;
190 fMainData <<"far away   : "<<StopPlace2[0]<<endl;
191 fMainData <<"air       : "<<StopPlace2[1]<<endl;
192 fMainData <<"ATERUI    : "<<StopPlace2[2]<<endl;
193 fMainData <<"MARO      : "<<StopPlace2[8]<<endl;
194 fMainData <<"Per       : "<<StopPlace2[4]<<endl;
195 fMainData <<"Ge        : "<<StopPlace2[5]<<endl;
196 fMainData <<"NaI       : "<<StopPlace2[6]<<endl;
197 fMainData <<"Lead      : "<<StopPlace2[7]<<endl;
198 fMainData <<"Cu        : "<<StopPlace2[3]<<endl;
199 }

```

ソースコード3 BetaDecay.cc

```

1  #include<iostream>
2  #include<cmath>
3  #include"SFMT.h"
4
5  #define Q 0.656 //Q値
6
7  double dgamma(double x){
8      int k, n;
9      double w, y;
10
11     n = x < 1.5 ? -((int) (2.5 - x)) : (int) (x - 1.5);
12     w = x - (n + 2);
13     y = ((((((((((((-1.99542863674e-7 * w + 1.337767384067e-6) * w -
14         2.591225267689e-6) * w - 1.7545539395205e-5) * w + 1.45596568617526e-4) *
15         w - 3.60837876648255e-4) * w - 8.04329819255744e-4) * w +
16         0.008023273027855346) * w - 0.017645244547851414) * w -
17         0.024552490005641278) * w + 0.19109110138763841) * w -
18         0.233093736421782878) * w - 0.422784335098466784) * w +
19         0.9999999999999999;
20
21     if(n > 0){
22         w = x - 1;
23         for (k = 2; k <= n; k++) {
24             w *= x - k;
25         }
26     } else {
27         w = 1;
28         for (k = 0; k > n; k--) {
29             y *= x - k;
30         }
31     }
32     return w / y;
33 }
34
35 double cdgamma(double gam, double nu){
36
37     double xr, xi, wr, wi, ur, ui, vr, vi, yr, yi, t;
38     xr = gam;
39     xi = nu;
40     if (xr < 0) {
41         wr = 1 - xr;
42         wi = -xi;
43     } else {
44         wr = xr;
45         wi = xi;

```



```

39     }
40     ur = wr + 6.00009857740312429;
41     vr = ur * (wr + 4.99999857982434025) - wi * wi;
42     vi = wi * (wr + 4.99999857982434025) + ur * wi;
43     yr = ur * 13.2280130755055088 + vr * 66.2756400966213521 +
44         0.293729529320536228;
45     yi = wi * 13.2280130755055088 + vi * 66.2756400966213521;
46     ur = vr * (wr + 4.000000003016801681) - vi * wi;
47     ui = vi * (wr + 4.000000003016801681) + vr * wi;
48     vr = ur * (wr + 2.99999999944915534) - ui * wi;
49     vi = ui * (wr + 2.99999999944915534) + ur * wi;
50     yr += ur * 91.1395751189899762 + vr * 47.3821439163096063;
51     yi += ui * 91.1395751189899762 + vi * 47.3821439163096063;
52     ur = vr * (wr + 2.000000000000603851) - vi * wi;
53     ui = vi * (wr + 2.000000000000603851) + vr * wi;
54     vr = ur * (wr + 0.99999999999975753) - ui * wi;
55     vi = ui * (wr + 0.99999999999975753) + ur * wi;
56     yr += ur * 10.5400280458730808 + vr;
57     yi += ui * 10.5400280458730808 + vi;
58     ur = vr * wr - vi * wi;
59     ui = vi * wr + vr * wi;
60     t = ur * ur + ui * ui;
61     vr = yr * ur + yi * ui + t * 0.0327673720261526849;
62     vi = yi * ur - yr * ui;
63     yr = wr + 7.31790632447016203;
64     ur = log(yr * yr + wi * wi) * 0.5 - 1;
65     ui = atan2(wi, yr);
66     yr = exp(ur * (wr - 0.5) - ui * wi - 3.48064577727581257) / t;
67     yi = ui * (wr - 0.5) + ur * wi;
68     ur = yr * cos(yi);
69     ui = yr * sin(yi);
70     vr = ur * vr - ui * vi;
71     vi = ui * vr + ur * vi;
72     if (xr < 0) {
73         wr = xr * 3.14159265358979324;
74         wi = exp(xi * 3.14159265358979324);
75         vi = 1 / wi;
76         ur = (vi + wi) * sin(wr);
77         ui = (vi - wi) * cos(wr);
78         vr = ur * yr + ui * yi;
79         vi = ui * yr - ur * yi;
80         ur = 6.2831853071795862 / (vr * vr + vi * vi);
81         yr = ur * vr;
82         yi = ur * vi;
83     }

```

```

84     return (yr*yr+yi*yi);
85 }
86
87 double Fermi(int Z,double E,double R){ //Rは原子核の半径 [fm]
88     using namespace std;
89     double m=0.511;
90     double alpha=1./137.;
91     double p;
92     if(E<m){
93         p=0;
94     }else{
95         p=sqrt(E*E-m*m);
96     }
97     double gamma=sqrt(1-Z*Z*alpha*alpha);
98     double a=Z*alpha*E/p;
99     return 2*(1+gamma)*pow(2*p*R,-2*(1-gamma))*exp(3.1415926535*a)*cdgamma(gamma,-
100     a)/dgamma(2*gamma+1);
101 }
102 double SphereB(double* p1,double* p2,double* p3,double p){
103     *p1 = genrand_real2()*p*2-p;
104     *p2 = genrand_real2()*sqrt(p*p-(*p1)*(*p1))*2-sqrt(p*p-(*p1)*(*p1));
105
106     if(genrand_real2(<0.5){
107         *p3 = sqrt(p*p-(*p1)*(*p1)-(*p2)*(*p2));
108     }else{
109         *p3 = -1*sqrt(p*p-(*p1)*(*p1)-(*p2)*(*p2));
110     }
111     return 0;
112 }
113
114 double dWdE(double E){
115     double Z=29;
116     double A=64;
117     double R=1.21*pow(A,1.0/3.0);//[fm]
118     double m=0.511;
119     double DE=Q+0.511;//Q値が0.656MeV
120     double a;
121     if(DE<E){
122         a=0;
123     }else{
124         a=Fermi(-Z,E,R)*E*sqrt(E*E-m*m)*(DE-E)*(DE-E);
125         //ここで-Zになっているのでβ+崩壊である.
126     }
127     return a;

```

```

128 }
129
130
131 void BetaDecay(double* p1, double* p2, double* p3, double* theta, double* phi, double*
    beta){
132     //エネルギーの選択. dWの最大値が大体0.05くらい
133
134     double E, y, p;
135     double m=0.511;
136
137     while(1){
138         E=genrand_real2()*(Q+0.511-m)+m;
139         y=genrand_real2()*0.05;
140         if(y<dWdE(E)) break;
141     }
142
143     p=sqrt(E*E-m*m);
144
145     SphereB(p1, p2, p3, p);
146
147     //betaを求める
148     (*beta)=p/E;
149
150     // 角度を求める
151     (*theta)=acos((*p3)/p);
152     double a, b;
153     if((*theta)<=0 || M_PI<=(*theta)){
154         phi=0;
155     }else{
156         a=(*p1)/(p*sin((*theta)));
157
158         if(a>1 || a<-1){
159             b=0;
160         }else{
161             b=acos(a);
162         }
163
164         if((*p2)>0){
165             (*phi)=b;
166         }else{
167             (*phi)=2*M_PI-b;
168         }
169     }
170 }

```

ソースコード4 Compton.cc

```

1  #include<iostream>
2  #include <cmath>
3  #include "SFMT.h"
4
5  /* Lab系でのコンプトン散乱の微分断面積 [fm^2]*/
6  double ComptonLab(double E,double th){
7      double m=0.511;
8      double r=2.087;//fm
9      double g=E/m;
10     double a=r*r/(2*(1+g*(1-cos(th)))*(1+g*(1-cos(th))))*(1+cos(th)*cos(th)+g*g
        *(1-cos(th))*(1-cos(th))/(1+g*(1-cos(th))));
11     return a;
12 }
13
14 /*コンプトン散乱でのエネルギー、運動方向の変化。返す値はエネルギーロスをお願いします*/
15 double Compton(double *px, double *py, double *pz){
16
17     double Ep = sqrt((*px)*(*px) + (*py)*(*py) + (*pz)*(*pz));
18
19     //散乱角の決定(メトロポリス法)
20     double scattheta, scatphi;
21     double dist1, dist2;
22
23     while(1){
24         scattheta = acos(genrand_real1()*2-1);
25         dist1 = genrand_real2()*ComptonLab(Ep,0);
26         dist2 = ComptonLab(Ep, scattheta);
27         if(dist1<=dist2)break;
28     }
29
30     scatphi = genrand_real2()*2*M_PI;
31
32
33     //エネルギー、運動量の更新
34     double Eafter;
35     double m=0.511;
36     double g=Ep/m;
37
38     // 角度を求める方法
39     double ptheta=acos((*pz)/Ep);
40     double pphi;
41     double a,b;
42     if(pttheta<=0||M_PI<=ptheta){
43         pphi=0;

```

```

44     }else{
45         a>(*px)/(Ep*sin(ptheta));
46
47         if(a>1||a<-1){
48             b=0;
49         }else{
50             b=acos(a);
51         }
52
53         if((*py)>0){
54             pphi=b;
55         }else{
56             pphi=2*M_PI-b;
57         }
58     }
59
60
61     Eafter = Ep/(1 + g*(1-cos(scatheta)));
62     *px = Eafter*(sin(scatheta)*sin(scatphi)*cos(pphi)*cos(ptheta) - sin(
        scattheta)*cos(scatphi)*sin(pphi) + cos(scatheta)*cos(pphi)*sin(ptheta)
        );
63     *py = Eafter*(sin(scatheta)*sin(scatphi)*sin(pphi)*cos(ptheta) + sin(
        scattheta)*cos(scatphi)*cos(pphi) + cos(scatheta)*sin(pphi)*sin(ptheta));
64     *pz = Eafter*(sin(scatheta)*sin(scatphi)*cos(pphi)*cos(ptheta)
        + cos(scatheta)*cos(ptheta));
65
66
67     //エネルギー損失の決定
68     double Eploss;
69
70     Eploss = Ep - Eafter;
71
72     return Eploss;
73 }
74
75     /*メルセンヌ・ツイスター法による乱数生成について(メモ)
76     32ビットの整数乱数 0x0以上 0xffffffff以下
77     ul = genrand_int32();
78
79     31ビットの整数乱数 0x0以上 0x7fffffff以下
80     l = genrand_int31();
81
82     区間[0,1]の実数乱数
83     d = genrand_real1();
84

```

```

85     区間[0,1)の実数乱数(32bit)
86     d = genrand_real2();
87
88     区間(0,1)の実数乱数
89     d = genrand_real3();
90
91     区間[0,1)の実数乱数(53bit)
92     d = genrand_res53();
93     */

```

ソースコード5 CrossSections.cc

```

1  #include <iostream>
2  #include <cmath>
3  #include <string>
4
5  using namespace std;
6
7  double ComptonElements(string element, double E){
8      double m=0.511;
9      double r=2.087;//fm
10     double g=E/m;
11     double a = 2*M_PI*r*r*((1+g)/(g*g))*(2*(1+g)/(1+2*g) - (1/g)*log(1+2*g)) +
        (1/2*g)*log(1+2*g) - (1+3*g)/((1+2*g)*(1+2*g)) );
12
13     double Z;
14
15     if(element=="O"){
16         Z=8;
17     }else if(element=="H"){
18         Z=1;
19     }else if(element=="C"){
20         Z=6;
21     }else if(element=="N"){
22         Z=7;
23     }else if(element=="Cu"){
24         Z=29;
25     }else if(element=="Na"){
26         Z=11;
27     }else if(element=="I"){
28         Z=53;
29     }else if(element=="Pb"){
30         Z=82;
31     }else if(element=="Fe"){
32         Z=26;
33     }else if(element=="Ni"){

```

```

34     Z=28;
35 }else if(element=="Ge"){
36     Z=32;
37 }else{
38     Z=7; //in N
39 }
40
41     return Z*a;
42 }
43
44 //compton散乱の全断面積 [fm^2]
45 double ComptonTotal(int w, double E){
46     double m=0.511;
47     double r=2.087; //fm
48     double g=E/m;
49     double a;
50
51     switch(w){
52     case 1://in air
53         a=0.2*ComptonElements("O",E)+0.8*ComptonElements("N",E);
54         break;
55     case 2: //in ATERUI
56         a=(1.0/(1.0+1.104))*ComptonElements("C",E)+(1.104/(1.0+1.104))*
           ComptonElements("H",E);
57         break;
58     case 3: //in Cu
59         a=ComptonElements("Cu",E);
60         break;
61     case 4: //in Per
62         a=0.78*ComptonElements("Ni",E)+0.22*ComptonElements("Fe",E);
63         break;
64     case 5: //in Ge
65         a=ComptonElements("Ge",E);
66         break;
67     case 6: //in NaI
68         a=0.5*ComptonElements("Na",E)+ComptonElements("I",E);
69         break;
70     case 7: //in Lead
71         a=ComptonElements("Pb",E);
72         break;
73     case 8: //in MARO
74         a=(1.0/(1.0+1.104))*ComptonElements("C",E)+(1.104/(1.0+1.104))*
           ComptonElements("H",E);
75         break;
76     default: //in air

```

```

77         a=0.2*ComptonElements("O",E)+0.8*ComptonElements("N",E);
78         break;
79     }
80
81     return a;
82 }
83
84 double PhotoelectricElements(string element,double E){
85     double alpha=1.0/137;
86     double m=0.511;
87     double r=2.087;//fm
88     double g=E/m;
89
90     double Z;
91
92     if(element=="O"){
93         Z=8;
94     }else if(element=="H"){
95         Z=1;
96     }else if(element=="C"){
97         Z=6;
98     }else if(element=="N"){
99         Z=7;
100    }else if(element=="Cu"){
101        Z=29;
102    }else if(element=="Na"){
103        Z=11;
104    }else if(element=="I"){
105        Z=53;
106    }else if(element=="Pb"){
107        Z=82;
108    }else if(element=="Fe"){
109        Z=26;
110    }else if(element=="Ni"){
111        Z=28;
112    }else if(element=="Ge"){
113        Z=32;
114    }else{
115        Z=7; //in N
116    }
117
118    double a = (32*M_PI*sqrt(2)/3.0) * (alpha*alpha*alpha*alpha * r*r * Z*Z*Z*Z*Z
119        * pow(g,-3.5));
120    return a;

```



```

121 }
122
123 //1分子の光電吸収の全断面積 (shellの効果を考えない) [fm^2]
124 double PhotoelectricTotal(int w,double E){
125     double alpha=1.0/137;
126     double m=0.511;
127     double r=2.087;//fm
128     double g=E/m;
129     double a;
130
131     double Z;
132
133     switch(w){
134     case 1://in air
135         a=0.2*PhotoelectricElements("O",E)+0.8*PhotoelectricElements("N",E);
136         break;
137     case 2: //in ATERUI
138         a=(1.0/(1.0+1.104))*PhotoelectricElements("C",E)+(1.104/(1.0+1.104))*
            PhotoelectricElements("H",E);
139         break;
140     case 3: //in Cu
141         a=PhotoelectricElements("Cu",E);
142         break;
143     case 4: //in Per
144         a=0.78*PhotoelectricElements("Ni",E)+0.22*PhotoelectricElements("Fe",E);
145         break;
146     case 5: //in Ge
147         a=PhotoelectricElements("Ge",E);
148         break;
149     case 6: //in NaI
150         a=0.5*PhotoelectricElements("Na",E)+0.5*PhotoelectricElements("I",E);
151         break;
152     case 7: //in Lead
153         a=PhotoelectricElements("Pb",E);
154         break;
155     case 8: //in MARO
156         a=(1.0/(1.0+1.104))*PhotoelectricElements("C",E)+(1.104/(1.0+1.104))*
            PhotoelectricElements("H",E);
157         break;
158     default: //in air
159         a=0.2*PhotoelectricElements("O",E)+0.8*PhotoelectricElements("N",E);
160         break;
161     }
162
163     return a;

```

```

164 }
165
166 //1分子に光子が反応する全断面積[fm^2]
167 double PhotonTotalCS(int w,double E){
168     using namespace std;
169     double a = ComptonTotal(w,E) + PhotoelectricTotal(w,E);
170     return a;
171 }
172
173 double PhotonMeanFreePath(int w,double p){
174     using namespace std;
175     double rho;
176     double A;
177
178     switch(w){
179     case 1:
180         rho=1.293e-3;
181         A=16*0.2+14*0.8;
182         break;
183     case 2:
184         rho=1.032;
185         A=(1.0/(1.0+1.104))*12+(1.104/(1.0+1.104))*1.0;
186         break;
187     case 3:
188         rho=8.94;
189         A=63.5;
190         break;
191     case 4:
192         rho=8.25;
193         A=55.85*0.22+58.69*0.78;
194         break;
195     case 5:
196         rho=5.323;
197         A=72.59;
198         break;
199     case 6:
200         rho=3.67;
201         A=22.99*0.5+126.9*0.5;
202         break;
203     case 7:
204         rho=11.34;
205         A=207.2;
206         break;
207     case 8: //in MARO
208         rho=1.032;

```

```

209         A=(1.0/(1.0+1.104))*12+(1.104/(1.0+1.104))*1.0;
210         break;
211     default:
212         rho=1.293e-3;
213         A=16*0.2+14*0.8;
214         break;
215     }
216
217     double dens=rho/A;//式で表されるひとまの密度(例:空気は 0.2*0+0.8*N) [mol/cm^3]
218     double cs=PhotonTotalCS(w,p);
219     double mu=dens*cs*0.00602;//1cm進む間に散乱する回数
220     double MFP=1.0/mu;//MFP[cm]
221
222     return MFP;
223 }
224
225 double PhotonMu(int w,double p){
226     using namespace std;
227     double rho;
228     double Z,A;
229
230     switch(w){
231     case 1:
232         rho=1.293e-3;
233         A=16*0.2+14*0.8;
234         break;
235     case 2:
236         rho=1.032;
237         A=(1.0/(1.0+1.104))*12+(1.104/(1.0+1.104))*1.0;
238         break;
239     case 3:
240         rho=8.94;
241         A=63.5;
242         break;
243     case 4:
244         rho=8.25;
245         A=55.85*0.22+58.69*0.78;
246         break;
247     case 5:
248         rho=5.323;
249         A=72.59;
250         break;
251     case 6:
252         rho=3.67;
253         A=22.99*0.5+126.9*0.5;

```

```

254         break;
255     case 7:
256         rho=11.34;
257         A=207.2;
258         break;
259     case 8: //in MARO
260         rho=1.032;
261         A=(1.0/(1.0+1.104))*12+(1.104/(1.0+1.104))*1.0;
262         break;
263     default:
264         rho=1.293e-3;
265         A=16*0.2+14*0.8;
266         break;
267     }
268
269     double dens=rho/A;//density ofatoms [mol/cm^3]
270     double cs=PhotonTotalCS(w,p);
271     double mu=dens*cs*0.00602;//1cm進む間に散乱する平均回数
272
273     return mu;
274 }

```

ソースコード6 EnergyLoss.cc

```

1  #include <iostream>
2  #include <cmath>
3  #include <cstdlib>
4  #include <fstream>
5
6  double EnergyLoss(int w,double d,double* p1,double* p2,double* p3){
7      using namespace std;
8
9      double m=0.511;
10     double p=sqrt ((*p1)*(*p1)+(*p2)*(*p2)+(*p3)*(*p3));
11
12     /*元々の角度と、散乱角*/
13     double c1=(*p3)/p;
14     double s1;
15     double c2;
16     double s2;
17     if(1-c1*c1<=0){
18         s1=0;
19     }else{
20         s1=sqrt(1-c1*c1);
21     }
22

```

```

23     if(s1<=0){
24         c2=1;
25         s2=0;
26     }else{
27         c2>(*p1)/(p*s1);
28         s2>(*p2)/(p*s1);
29     }
30
31     double T=sqrt(p*p+m*m)-m;//運動エネルギー
32
33     double rho;
34     float stpw[301][2];
35
36     //場所によってファイルと密度を選択
37     switch(w){
38     case 1:
39         //本来なら空気中のStoppingパワーを代入する
40         rho=1.293e-3;
41         break;
42     case 2:
43         //本来ならプラスチックシンチレータ中のStoppingパワーを代入する
44         rho=1.032;
45         break;
46     case 8:
47         //本来ならプラスチックシンチレータ中のStoppingパワーを代入する
48         rho=1.032;
49         break;
50     case 3:
51         //本来なら銅中のStoppingパワーを代入する
52         rho=8.94;
53         break;
54     case 4:
55         //本来ならパーマロイ中のStoppingパワーを代入する
56         rho=7.874;
57         break;
58     case 5:
59         //本来ならゲルマニウム中のStoppingパワーを代入する
60         rho=5.323;
61         break;
62     case 6:
63         //本来ならNaI中のStoppingパワーを代入する
64         rho=3.67;
65         break;
66     case 7:
67         //本来なら鉛中のStoppingパワーを代入する

```

```

68     rho=11.34;
69     break;
70 default:
71     //本来なら空気中のStopping Powerを代入する
72     rho=1.293e-3;
73     break;
74 }
75
76 //エネルギーロスを計算
77 double dx=0.001;
78 double dEdx;
79 double loss=0;
80 double K=T;
81 int n=d/dx;
82
83 if(n<10){
84     n=10;
85     dx=d/10.0;
86 }
87
88 double a,t;
89 int j;
90
91 for(int i=0;i<n;i++){
92
93     //Stopping Powerを出す
94     j=0;
95     a=stpw[0][1];
96     while(j<301){
97         t=(stpw[j-1][0]+stpw[j][0])/2.;
98         if(t>T)break;
99         j++;
100    }
101    a=stpw[j][1];
102    dEdx=a*rho;
103    // dx 飛んだときに残るエネルギー
104    T-=dEdx*dx;
105    //cout <<T<<endl;
106 }
107
108 //運動量に直して更新、エネルギーロスも
109 if(T>0){
110     p=sqrt(T*T+2*T*m);
111     loss=K-T;
112 }else{

```

```

113         p=0;
114         loss=K;
115     }
116     if(p>0){
117         (*p1)=p*s1*c2;
118         (*p2)=p*s1*s2;
119         (*p3)=p*c1;
120     }else{
121         (*p1)=0;
122         (*p2)=0;
123         (*p3)=0;
124     }
125
126     //返値はエネルギーロス
127     return loss;
128 }

```

ソースコード7 GammaDecay.cc

```

1  #include<iostream>
2  #include <cstdlib>
3  #include <cmath>
4  #include "SFMT.h"
5  double SphereG(double* p1,double* p2,double* p3,double p){
6      *p1 = genrand_real2()*p*2-p;
7      *p2 = genrand_real2()*sqrt(p*p-(*p1)*(*p1))*2-sqrt(p*p-(*p1)*(*p1));
8      if(genrand_real2(<0.5){
9          *p3 = sqrt(p*p-(*p1)*(*p1)-(*p2)*(*p2));
10     }else{
11         *p3 = -1*sqrt(p*p-(*p1)*(*p1)-(*p2)*(*p2));
12     }
13     return 0;
14 }
15
16 double GammaDecay(double* p1,double* p2,double* p3){
17     double Energy=0.511;
18     SphereG(p1,p2,p3,Energy);
19     return 0;
20 }

```

ソースコード8 PhotonRenew.cc

```

1
2  #include<iostream>
3  #include<cmath>
4
5  #include"SFMT.h"

```

```

6
7
8 double PhotonRenew(double dx,double* pp1,double* pp2,double* pp3,double* px,double
  * py,double* pz,double* E_Ge,double* E_NaI,double* E_ATERUI,double* E_MARO,int
  * IfContinue2){
9     using namespace std;
10
11     double x,y,z,p1,p2,p3;
12     x=*px;
13     y=*py;
14     z=*pz;
15     p1=*pp1;
16     p2=*pp2;
17     p3=*pp3;
18
19     double p=sqrt(p1*p1+p2*p2+p3*p3);
20     int w=Where(x,y,z);
21
22     x+=dx*p1/p;
23     y+=dx*p2/p;
24     z+=dx*p3/p;
25
26     double dE;
27
28     double lambda=PhotonMeanFreePath(w,p); //平均自由行程
29
30     if(genrand_real2(<1-exp(-dx/lambda)){ //散乱が起こるか判定
31         if(genrand_real2(<ComptonTotal(w,p)/PhotonTotalCS(w,p)){ //どっちの反応を起こ
          すか判定
32             /*コンプトンのときは微分断面積に従って、運動量を決める。検出器の中にあつたらその分のエネル
              ギーを落とす*/
33
34             dE=Compton(&p1,&p2,&p3);
35
36             if(w==5){
37                 *E_Ge+=shade(dE,dE*0.0015);
38             }else if(w==6){
39                 *E_NaI+=shade(dE,dE*0.08);
40             }else if(w==2){
41                 *E_ATERUI+=dE;
42             }else if(w==8){
43                 *E_MARO+=dE;
44             }
45
46         }else{

```



```

47         /* 光電効果のとき、もし検出器の中にあつたら全てのエネルギーをそこで落として消える（ループか
48            ら抜ける）*/
49         dE=p;
50
51         if(w==5){
52             *E_Ge+=shade(dE,dE*0.0015);
53         }else if(w==6){
54             *E_NaI+=shade(dE,dE*0.08);
55         }else if(w==2){
56             *E_ATERUI+=dE;
57         }else if(w==8){
58             *E_MARO+=dE;
59         }
60         *IfContinue2=0;
61     }
62 }
63 /*運動量と位置の更新*/
64 if(w==0){
65     *IfContinue2=0;
66 }
67 *px=x;
68 *py=y;
69 *pz=z;
70 *pp1=p1;
71 *pp2=p2;
72 *pp3=p3;
73
74 return 0;
75 }

```

ソースコード9 PositronRenew.cc

```

1  #include<iostream>
2  #include<cmath>
3
4  #include"SFMT.h"
5
6  double shadeP(double m,double s){
7      double x,y,val;
8
9      x=genrand_real3();
10     y=genrand_real3();
11
12     val=sqrt(-2*log(x))*sin(2*M_PI*y);
13
14     return val*s+m;

```

```

15 }
16
17 double PositronRenew(double dx, double* pp1, double* pp2, double* pp3, double* px,
    double* py, double* pz, double* E_Ge, double* E_NaI, double* E_ATERUI, double*
    E_MARO, int* IfContinue1){
18     using namespace std;
19
20     double x, y, z, p1, p2, p3;
21     x=*px;
22     y=*py;
23     z=*pz;
24     p1=*pp1;
25     p2=*pp2;
26     p3=*pp3;
27
28     double p=sqrt(p1*p1+p2*p2+p3*p3);
29     int w=Where(x, y, z);
30
31     x+=dx*p1/p;
32     y+=dx*p2/p;
33     z+=dx*p3/p;
34
35     double dE=EnergyLoss(w, dx, &p1, &p2, &p3);
36
37     /*エネルギーロス検出器の分解能込み*/
38     if(w==5){
39         *E_Ge+=shadeP(dE, dE*0.0015);
40     }else if(w==6){
41         *E_NaI+=shadeP(dE, dE*0.08);
42     }else if(w==2){
43         *E_ATERUI+=dE;
44     }else if(w==8){
45         *E_MARO+=dE;
46     }
47
48     /*角度変化*/
49     AngleStruggling(w, dx, &p1, &p2, &p3);
50
51     /*運動量と位置の更新*/
52     if(w==0){
53         *IfContinue1=0;
54     }
55     *px=x;
56     *py=y;
57     *pz=z;

```

```

58     *pp1=p1;
59     *pp2=p2;
60     *pp3=p3;
61
62     return 0;
63 }

```

ソースコード 10 Spin.cc

```

1  #define Eta 0.0
2  #define Bz 0.7
3  #define Mu_hbar 87.939 //ボーア磁子をディラック定数で割ったもの。単位は[ns-1/T]
4  /*
5  t=0でθ、φの方向に速度βで飛び出した陽電子が時刻
        tで上向きのスピンとして観測される確率
6  */
7  double PSpinUp(double t,double theta,double phi,double beta){
8      double eta=Eta;
9      double eta2=Eta*Eta;
10     double a=1+eta2;
11     double b=sqrt(a);
12     double omega=Mu_hbar*Bz;
13
14     double pp=sqrt(0.25*(1+beta)*(1+cos(theta)));
15     double mm=sqrt(0.25*(1-beta)*(1-cos(theta)));
16     double pm=sqrt(0.25*(1+beta)*(1-cos(theta)));
17     double mp=sqrt(0.25*(1-beta)*(1+cos(theta)));
18
19     double Ar,Ai,Br,Bi;
20
21     Ar = 1/sqrt(2)*(sqrt(1+1/b)*(pp-cos(phi)*mm) + sqrt(eta2/(b*(b+1)))*(pm*cos(
        phi)+mp));
22     Ai = 1/sqrt(2)*(sqrt(1+1/b)*mm*sin(phi) + sqrt(eta2/(b*(b+1)))*pm*sin(phi));
23
24     Br = 1/sqrt(2)*(-sqrt(eta2/(b*(b+1)))*(pp-cos(phi)*mm) + sqrt(1+1/b)*(pm*cos(
        phi)+mp));
25     Bi = 1/sqrt(2)*(-sqrt(eta2/(b*(b+1)))*mm*sin(phi) + sqrt(1+1/b)*pm*sin(phi));
26
27     double a2,b2,Re_abe;
28
29     Re_abe = (Ar*Br+Ai*Bi)*cos(2*omega*t) - (Ar*Bi-Ai*Br)*sin(2*omega*t);
30
31     a2 = Ar*Ar+Ai*Ai;
32     b2 = Br*Br+Bi*Bi;
33
34     return 0.5*((b+1)/b*a2 + eta2/(b*(b+1))*b2 - 2*eta/b*Re_abe);

```

35 }

ソースコード 11 Where.cc

```
1 #include<iostream>
2 #include <cstdlib>
3 #include <cmath>
4 #include <fstream>
5 #include "SFMT.h"
6
7 #define X_Per 20.0
8 #define Y_Per 1.2
9 #define Z_Per 20.0
10 #define XX_Per 10.0
11 #define ZZ_Per 10.0
12 #define H_Per 0.5
13
14 #define X_Pla 2.0
15 #define Y_Pla 2.0
16 #define Z_Pla 0.05
17 #define H_Pla 0.05
18
19 #define X_Cu 1.0
20 #define Y_Cu 1.0
21 #define Z_Cu 0.01
22
23 #define R_Ge 6.0
24 #define X_Ge 5.0
25 #define Y_Ge 5.0
26 #define Z_Ge 5.0
27
28 #define R_NaI 6.0
29 #define X_NaI 5.0
30 #define Y_NaI 5.0
31 #define Z_NaI 5.0
32
33 #define Y_L 5.0
34 #define X_L 7.0
35 #define Z_L 20.0
36
37 #define H_H 0.5
38 #define X_H 4.0
39 #define Z_H 0.5
40
41 #define Theta (3.141592653589793238/2.0)
42
```

```

43  /*座標を与えたときどこにいるかを判別*/
44  //空気中なら1、ブラシン内なら2、銅板内なら3、パーマロイ中なら4、
    Ge中は5、NaI中は6、変なところに行ったら0
45  int Where(double x,double y,double z){
46      int a;
47      double xx,yy,zz;//xx=x'
48      double xxx,yyy,zzz;//xxx=x''
49
50      xx=x+X_Per/4+XX_Per/4;
51      yy=y;
52      zz=z;
53
54      xxx=x*cos(Theta)+y*sin(Theta);
55      yyy=-x*sin(Theta)+y*cos(Theta);
56      zzz=z;
57
58      if(fabs(x)<X_Cu/2 && fabs(y)<Y_Cu/2 && fabs(z)<Z_Cu/2){
59          a=3;//in Cu
60      }else if(fabs(x)<X_Pla/2 && fabs(y)<Y_Pla/2 && Z_Cu/2+H_Pla<z && z<Z_Cu/2+
        H_Pla+Z_Pla/2){
61          a=2;//in ATERUI
62      }else if(R_Ge<xxx && xxx<R_Ge+X_Ge && fabs(yyy)<Y_Ge/2 && fabs(zzz)<Z_Ge/2){
63          a=5;//in Ge
64      }else if(-R_NaI-X_NaI<xxx && xxx<-R_NaI && fabs(yyy)<Y_NaI/2 && fabs(zzz)<
        Z_NaI/2){
65          a=6;//in NaI
66      }else if(fabs(yy)<Y_Per/2 && fabs(zz)<Z_Per/2 && -X_Per/2<xx && xx< -XX_Per
        /2){
67          a=4;//in Per
68      }else if(fabs(yy)<Y_Per/2 && fabs(zz)<Z_Per/2 && fabs(xx)<XX_Per/2 && ZZ_Per
        /2<fabs(zz)){
69          a=4;//in Per
70      }else if(fabs(yy)<Y_Per/2 && fabs(zz)<Z_Per/2 && XX_Per/2<xx && xx< X_Per/2 &&
        H_Per/2<fabs(zz)){
71          a=4;//in Per
72      }else if(fabs(x)<X_Pla/2 && fabs(y)<Y_Pla/2 && Z_Cu/2+H_Pla<-z && -z<Z_Cu/2+
        H_Pla+Z_Pla/2){
73          a=8;//in MARO
74      }else if(fabs(x)<X_L/2 && Y_Per/2<fabs(y) && fabs(y)<Y_Per/2+Y_L && fabs(z)<
        Z_L){
75          a=7;//in Lead
76          if(fabs(x)<X_H/2 && H_H-Z_H/2 <fabs(z) && fabs(z)<H_H+Z_H/2){
77              a=1;
78          }
79      }else{

```

```

80     a=1;//in air
81     }
82
83     if(sqrt(x*x+y*y+z*z)>25||x>5||fabs(y)>12||fabs(z)>12){
84         a=0;
85     }
86
87     return a;
88 }
89
90
91 /*銅板のランダムな位置を指定する. 長さの単位はcm*/
92 void CuRandom(double *x,double *y,double *z){
93     *x=genrand_real2()*X_Cu/2*2-X_Cu/2;
94     *y=genrand_real2()*Y_Cu/2*2-Y_Cu/2;
95     *z=genrand_real2()*Z_Cu/2*2-Z_Cu/2;
96 }

```

ソースコード 12 SpinExchange.cc

```

1  #include<iostream>
2  #include<cmath>
3  #include"SFMT.h"
4
5
6  /*単位はps*/
7  #define SPINE 10000.0 //ピックアップ反応のタイムスケール(反応率の逆数)
8  #define TAUO 142000.0
9  #define TAUP 125.0
10 #define N 100000
11 #define T_THR 10000000 //この値以下のものしか検出しない
12
13 #define T 10.0
14
15 #define PP 0.77 //陽電子のスピン上向きの確率
16 #define PE 0.5715 //電子のスピンが上向きの確率
17
18 int main(){
19
20     init_gen_rand(12537);
21
22     int sp,se;//陽電子と電子のスピン
23     int op;//1がオルソ, 0がパラ
24     int numup=0;//磁場下向き(電子は上向きの傾向)2Gammaのイベント数
25     int numdown=0;//磁場上向き(電子は下向きの傾向)の時の2Gammaイベント数
26     int s;//スピンのz成分. -1,0,1

```

```

27     int IfContinue;
28     double spinup;
29
30     int t;
31
32     spinup=PE;
33
34     for(int i=0;i<N;i++){
35         /*まずは陽電子のスピンを選択*/
36         if(genrand_real2(<PP){
37             sp=1;
38         }else{
39             sp=-1;
40         }
41         /*反応する電子のスピンを選択*/
42         if(genrand_real2(<spinup){
43             se=1;
44         }else{
45             se=-1;
46         }
47
48         /*
49         オルソ, パラの選択.
50         スピンが逆であればオルソ, パラは半々
51         スピンが順方向であれば絶対オルソ
52         */
53         if(sp*se==-1){
54             if(genrand_real2(<0.5){
55                 op=0;
56                 s=0;
57             }else{
58                 op=1;
59                 s=0;
60             }
61         }else{
62             if(sp==1){
63                 op=1;
64                 s=1;
65             }else{
66                 op=1;
67                 s=-1;
68             }
69         }
70
71         IfContinue=1;

```

```

72     t=0;
73
74     while(IfContinue==1){
75         /* Tpsごとに判定する*/
76         /* スピン交換が起こるかどうか*/
77         if(genrand_real2()<T/SPINE){
78             /*
79             スピン交換後のo or p は相手の電子のスピンの向きの確率に依る
80             */
81             if(genrand_real2()<spinup){//相手のスピンの上向きするとき
82                 if(op==1){
83                     switch(s){
84                         case 1:
85                             op=1;
86                             s=1;
87                             break;
88                         case 0:
89                             if(genrand_real2()<0.5){
90                                 op=1;
91                                 s=1;
92                             }else{
93                                 if(genrand_real2()<0.5){
94                                     op=1;
95                                     s=0;
96                                 }else{
97                                     op=0;
98                                     s=0;
99                                 }
100                             }
101                             break;
102                         case -1:
103                             if(genrand_real2()<0.5){
104                                 op=1;
105                                 s=0;
106                             }else{
107                                 op=0;
108                                 s=0;
109                             }
110                             break;
111                         }
112                 }else{
113                     if(genrand_real2()<0.5){
114                         op=1;
115                         s=1;
116                     }else{

```



```

117         if(genrand_real2()<0.5){
118             op=1;
119             s=0;
120         }else{
121             op=0;
122             s=0;
123         }
124     }
125 }
126 }else{//相手のスピンの下向きするとき
127     if(op==1){
128         switch(s){
129             case 1:
130                 if(genrand_real2()<0.5){
131                     op=1;
132                     s=0;
133                 }else{
134                     op=0;
135                     s=0;
136                 }
137                 break;
138             case 0:
139                 if(genrand_real2()<0.5){
140                     op=1;
141                     s=-1;
142                 }else{
143                     if(genrand_real2()<0.5){
144                         op=1;
145                         s=0;
146                     }else{
147                         op=0;
148                         s=0;
149                     }
150                 }
151                 break;
152             case -1:
153                 op=1;
154                 s=-1;
155                 break;
156         }
157     }else{
158         if(genrand_real2()<0.5){
159             op=1;
160             s=-1;
161         }else{

```

```

162             if(genrand_real2()<0.5){
163                 op=1;
164                 s=0;
165             }else{
166                 op=0;
167                 s=0;
168             }
169         }
170     }
171 }
172 }
173
174 /*  $\gamma$ 崩壊するかどうか*/
175
176 if(op==1){
177     if(genrand_real2()<1-exp(-T/TAUO)){
178         /*これは3ガンマ*/
179         IfContinue=0;
180     }
181 }else{
182     if(genrand_real2()<1-exp(-T/TAUP)){
183         numup++;
184         IfContinue=0;
185     }
186 }
187 t++;
188 if(t>T_THR){
189     IfContinue=0;
190 }
191 }
192 if(i%1000==0){
193     std::cout << i <<std::endl;
194 }
195 }
196
197 /*磁場を逆にする*/
198 spinup=1.0-PE;
199
200 for(int i=0;i<N;i++){
201     /*まずは陽電子のヘリシティを選択*/
202     if(genrand_real2()<PP){
203         sp=1;
204     }else{
205         sp=-1;
206     }

```

```

207      /*反応する電子のスピンを選択*/
208      if(genrand_real2()<spinup){
209          se=1;
210      }else{
211          se=-1;
212      }
213
214      /*
215      オルソ, パラの選択.
216      スピンが逆であればオルソ, パラは半々
217      スピンが順方向であれば絶対オルソ
218      */
219      if(sp*se==-1){
220          if(genrand_real2()<0.5){
221              op=0;
222              s=0;
223          }else{
224              op=1;
225              s=0;
226          }
227      }else{
228          if(sp==1){
229              op=1;
230              s=1;
231          }else{
232              op=1;
233              s=-1;
234          }
235      }
236
237      IfContinue=1;
238      t=0;
239
240      while(IfContinue==1){
241          /* Tpsごとに判定する*/
242          /*スピン交換が起こるかどうか*/
243          if(genrand_real2()<T/SPINE){
244              /*
245              スピン交換後のo or p は電子のスピンの方の確率に依るはず
246              */
247              if(genrand_real2()<spinup){
248                  if(op==1){
249                      switch(s){
250                          case 1:
251                              op=1;

```

```

252         s=1;
253         break;
254     case 0:
255         if(genrand_real2()<0.5){
256             op=1;
257             s=1;
258         }else{
259             if(genrand_real2()<0.5){
260                 op=1;
261                 s=0;
262             }else{
263                 op=0;
264                 s=0;
265             }
266         }
267         break;
268     case -1:
269         if(genrand_real2()<0.5){
270             op=1;
271             s=0;
272         }else{
273             op=0;
274             s=0;
275         }
276         break;
277     }
278 }else{
279     if(genrand_real2()<0.5){
280         op=1;
281         s=1;
282     }else{
283         if(genrand_real2()<0.5){
284             op=1;
285             s=0;
286         }else{
287             op=0;
288             s=0;
289         }
290     }
291 }
292 }else{
293     if(op==1){
294         switch(s){
295             case 1:
296                 if(genrand_real2()<0.5){

```

```

297             op=1;
298             s=0;
299         }else{
300             op=0;
301             s=0;
302         }
303         break;
304     case 0:
305         if(genrand_real2()<0.5){
306             op=1;
307             s=-1;
308         }else{
309             if(genrand_real2()<0.5){
310                 op=1;
311                 s=0;
312             }else{
313                 op=0;
314                 s=0;
315             }
316         }
317         break;
318     case -1:
319         op=1;
320         s=-1;
321         break;
322     }
323 }else{
324     if(genrand_real2()<0.5){
325         op=1;
326         s=-1;
327     }else{
328         if(genrand_real2()<0.5){
329             op=1;
330             s=0;
331         }else{
332             op=0;
333             s=0;
334         }
335     }
336 }
337 }
338 }
339
340 /* γ崩壊するかどうか*/
341

```

```

342         if(op==1){
343             if(genrand_real2()<1-exp(-T/TAU0)){
344                 /*これは3ガンマ*/
345                 IfContinue=0;
346             }
347         }else{
348             if(genrand_real2()<1-exp(-T/TAUP)){
349                 numdown++;
350                 IfContinue=0;
351             }
352         }
353
354         t++;
355         if(t>T_THR){
356             IfContinue=0;
357         }
358     }
359
360     if(i%1000==0){
361         std::cout << i <<std::endl;
362     }
363 }
364
365
366 double a,a_err,b,b_err,c,c_err;
367 a=numdown;
368 b=numup;
369 a_err=sqrt(a);
370 b_err=sqrt(b);
371 c = (a-b)/(b+a);
372 c_err = 2/((a+b)*(a+b))*sqrt(b*b*a_err*a_err+a*a*b_err*b_err);
373
374 std::cout <<"time scale :" << SPINE <<"ps" << std::endl;
375 std::cout << a << " " << b << std::endl;
376 std::cout << c << "±" << c_err << std::endl;
377 }

```

## 参考文献

- [1] T. D. Lee, C. N. Yang, Phys. Rev. 104, 254 (1956).
- [2] C. S. Wu et al., Phys. Rev. 105 (1957) 1413.
- [3] S.S Hanna and R.S. Preston, Phys. Rev. 106, 1363 婁 1364 (1957).
- [4] Walter Greiner and Berndt Müller: "Gauge Theory of Weak Interactions," 4th Edition, Springer(2009).
- [5] 長島順清, "素粒子物理学の基礎," 朝倉書店 (1998).
- [6] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura: "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).
- [7] Richard B. Firestone: "Table of Isotopes," 8th Edition
- [8] V. L. Sedov and O. A. Tsigel'nik, Phys. Lett. A 262 (1999). 476 婁 482
- [9] 近角聡信, "磁性体ハンドブック," 朝倉書店 (2000).
- [10] W. R. Leo: "Techniques for Nuclear and Particle Physics experiments," 2nd Revised Edition(1994).
- [11] 九後汰一郎, "ゲージ場の量子論 I," 培風館 (1989).