

ポジトロニウムの寿命測定による量子振動  
の観測

高柳遠林 宮川大輝 山岡慎治

2014年3月24日



# 目次

はじめに	3
第 1 章 理論 担当：山岡	4
1.1 ポジトロニウム	4
1.2 実験の原理	5
第 2 章 装置・回路 担当：宮川	7
2.1 回路の説明	7
2.2 装置の配置・写真	13
第 3 章 予備実験 担当：山岡	23
3.1 磁場の profile 測定	23
3.2 マイラーを入れる枚数	26
3.3 calibration	28
第 4 章 補正・解析 担当：高柳	31
4.1 データのカット	31
4.2 t-Q 補正	31
第 5 章 結果・考察	36
5.1 結果	36
5.2 考察・改善点	38
5.2.1 磁場の非一様性による誤差	38
5.2.2 逆位相と振幅ゼロが観測できなかったこと	38
5.2.3 向かい合う NaI たちのカウントレートの違い	39
5.2.4 装置の設計についての改善案	39
5.2.5 pick-off 補正の難しさ	40
参考文献	44
謝辞	45

## はじめに

本実験は、磁場中にあるポジトロニウムの崩壊時間を測定することにより、崩壊曲線の振動を観測し、超微細分裂 (hyper-fine-splitting:HFS) の理論値からのずれを評価することを目的とする。ポジトロニウムとは、陽電子と電子が作る束縛系である。物質中へ入射された陽電子は、物質を構成する電子と出会い、互いに束縛してポジトロニウムとなり、しばらく物質中を漂った後に崩壊して放出されたガンマ線を NaI へと入射させる。この現象は、人間界における恋愛と全く同じものである。物質という世界の中で一人の構成員として代わり映えのしない日常を送っていた電子は、ある日、物質世界の外から颯爽と現れ、近寄る電子全てを惹きつけるような魅力を放ちながら往来を闊歩する陽電子に一目惚れする。時を待たず恋に落ちた二人は、互い独占欲の深さを尊重し合い、束縛し束縛され、それでも蜜月は続いてゆく。その仲の良さは全く間に世界中へと広まり、二人は尊敬の念を込めて「ポジトロニウム」(約束された二人<sup>1)</sup>) と呼ばれるようになった。時には陽電子の命を狙う原子団が二人の仲を引き裂こうとすることもあったが<sup>2</sup>、それでも二人は強く生きてゆく。しかし、永遠を誓い合った二人の世界もやがては終わりを告げる。陽電子は非常に不安定な存在だったのだ。電子の支えがあればこそ、今日この時まで生き抜くことができたのである。電子は言う。あなたは私の標でありました。あなたが逝くというのならば、私もあなたもろとも世界から消え失せ、共に光となりましょう、と。優しく微笑みあった二人は、温かい光の中へと融け合っていた。二人の魂は天界<sup>3</sup>へと誘われ、そして愛はここに永遠となった。

結局何が言いたかったのかというと、桜 Trick の優ちゃんは間違いなく可愛いということである。

---

<sup>1</sup>もちろん実際にはそんな意味など無い。

<sup>2</sup>pick-off 反応である。

<sup>3</sup>NaI である。

# 第1章 理論 担当：山岡

## 1.1 ポジトロニウム

ポジトロニウム (以後 Ps) とは電子と陽電子が電磁相互作用によって束縛された系である。その構造は水素原子と近く、水素原子の陽子が陽電子に対応している。その為、水素原子と同様の超微細構造を持つ。電子と陽電子のスピンの基底を

$$|\uparrow\rangle_-, \quad |\downarrow\rangle_-, \quad |\uparrow\rangle_+, \quad |\downarrow\rangle_+ \quad (1.1)$$

と表記すると、電子と陽電子のスピンの相互作用するときの状態が

$$|1, 1\rangle = |\uparrow\rangle_- \otimes |\uparrow\rangle_+ \quad (1.2)$$

$$|1, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |\uparrow\rangle_- \otimes |\downarrow\rangle_+ + |\downarrow\rangle_- \otimes |\uparrow\rangle_+ \} \quad (1.3)$$

$$|1, -1\rangle = |\downarrow\rangle_- \otimes |\downarrow\rangle_+ \quad (1.4)$$

$$|0, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |\uparrow\rangle_- \otimes |\downarrow\rangle_+ - |\downarrow\rangle_- \otimes |\uparrow\rangle_+ \} \quad (1.5)$$

と分類される。ここで  $|S, S_z\rangle$  の  $S$  は全スピン、 $S_z$  は全スピンの  $z$  成分である。1.2~1.4 式のスピンの平行な状態をオルソポジトロニウム (O-Ps) と呼び、1.5 式のスピンの反平行な状態をパラポジトロニウム (P-Ps) と呼ぶ。O-Ps と P-Ps のエネルギー差は 203GHz(0.84meV) である。

一方で水素原子とは異なり Ps は物質と反物質のペアである為、対消滅をおこし複数の  $\gamma$  線に崩壊する。Ps では弱い相互作用の効果が小さいので、*charge conjugation* 変換は対称性を保っている。

P-Ps の場合 *charge conjugation parity* は +1 であり、O-Ps の場合 *charge conjugation parity* は -1 である。

次に複数の  $\gamma$  線に崩壊したときの *charge conjugation parity* は、光子一つの時-1 であることから、 $n$  個の光子からなる系では  $(-1)^n$  となる。

よって崩壊前と崩壊後で *charge conjugation parity* が保存していることから、P-Ps の場合偶数個の  $\gamma$  線に分裂し、O-Ps では奇数個の  $\gamma$  線に分裂することが分かる。

また運動量・エネルギー保存則より O-Ps から 1 個の  $\gamma$  線に崩壊することは禁じられている。光子が一つ増えると decay rate は微細構造定数  $\alpha$  ( $\approx 1/137$ ) 倍されるので、本実験で観測されるのは最低次の

$$P - Ps \rightarrow \gamma + \gamma \quad (1.6)$$

$$O - Ps \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma \quad (1.7)$$

の場合である。

最後に Ps の寿命だが、摂動の高次の項は無視する近似を行って、transition rate を計算することで寿命を算出する。詳しくは [2] を参考されたし。P-Ps の寿命は～125ps、O-Ps の寿命は～142ns となる。

## 1.2 実験の原理

Ps に磁場を印加すると  $|1, 0\rangle, |0, 0\rangle$  状態間の混合が起きる。その為、混合した状態のエネルギー固有値がゼーマンシフトする。

$$\chi_0 = C_0^0|0, 0\rangle + C_1^0|1, 0\rangle, \chi_1 = C_0^1|0, 0\rangle + C_1^1|1, 0\rangle, \chi_2 = |1, 1\rangle, \chi_3 = |1, -1\rangle \quad (1.8)$$

$\chi_0 \sim \chi_3$  は混合した時の状態。係数 C は

$$C_1^0 = -C_0^1 = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}\right)} \quad (1.9)$$

$$C_0^0 = C_1^1 = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}\right)} \quad (1.10)$$

混合している時のエネルギー固有値は

$$E_0 = \frac{1}{2}(W_1 + W_0) - \frac{1}{2}(W_1 - W_0)(1+x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.11)$$

$$E_1 = \frac{1}{2}(W_1 + W_0) + \frac{1}{2}(W_1 - W_0)(1+x^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.12)$$

$$E_2 = E_3 = W_1 \quad (1.13)$$

となる。 $W_0$  は P-Ps のエネルギー、 $W_1$  は O-Ps のエネルギー、 $x$  は磁場の強さである ( $x = \frac{g\mu}{\Delta_{HFS}}H = 0.275H$ )。

ゼーマンシフトを図 1.1 の概念図で説明しておく。

ゼーマンシフトと超微細構造の関係性

$$\Delta_{SHIFT} = \frac{1}{2}\Delta_{HFS}(-1 + (1+x^2)^{\frac{1}{2}}) \quad (1.14)$$

があるので、ゼーマンシフトを測定することで超微細構造を間接的に測定することが出来る。

また O-Ps の  $3\gamma decay$  の場合、 $\gamma$  線の照射方向の分布が振動する。この時の振動数が  $\Delta_{SHIFT}$  と同一であるので、振動数を測定することが超微細構造を測定することに結び付く。

O-Ps の  $3\gamma decay$  の時の全断面積は

$$\sigma \sim (1 + h \sin \Omega t) \exp\left(-\frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)t\right) \quad (1.15)$$

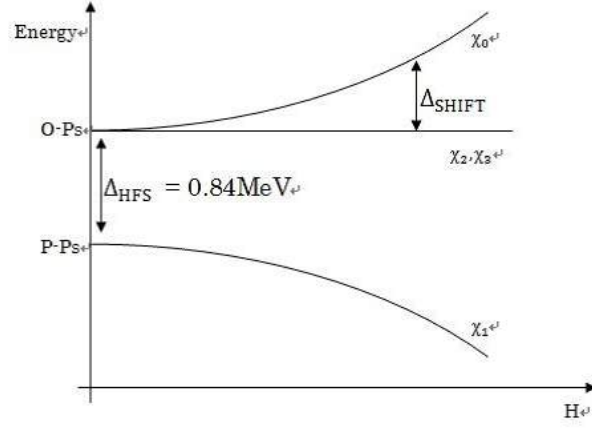


図 1.1: ゼーマンシフト (縦軸:エネルギー, 横軸:磁場の強さ,  $\Delta_{HFS} = W_1 - W_0$ , ゼーマンシフト:  $\Delta_{SHIFT}$ )

ともとまる。  $h, \Omega, \gamma_1, \gamma_2$  はそれぞれ次式で定義してある。  $h$  は modulation depth と呼ばれ、振動項と非振動項の比である。

$$h \equiv 0.213P |\sin \theta \sin \alpha \sin 2\beta| \quad (1.16)$$

ここで  $P$  は陽電子の偏極率,  $\theta$  は磁場に対する偏極の方向,  $\alpha$  と  $\beta$  は磁場を  $z$  方向にとった時の方位角と偏角である。

$$\Omega \equiv \frac{1}{2} \Delta_{HFS} ((1 + x^2)^{\frac{1}{2}} - 1) = \Delta_{SHIFT} \quad (1.17)$$

$$\gamma_1 \equiv (C_0^1)^2 \gamma_p + (C_1^1)^2 \gamma_o, \gamma_2 \equiv \gamma_o \quad (1.18)$$

ここで  $\gamma_p$  は P-Ps の崩壊率で  $\gamma_p = 8 \times 10^9 s^{-1}$ ,  $\gamma_o$  は O-Ps の崩壊率で  $\gamma_o = 7.04 \times 10^6 s^{-1}$  である。

磁場が弱いので  $\gamma_1 \sim \gamma_2 \sim \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)$  と近似してある。

全断面積の導出は煩雑になるので本レポートでは説明を省略する。詳細は文献 [1] を参照。

## 第2章 装置・回路 担当：宮川

### 2.1 回路の説明

本実験で用いた回路の説明を行う<sup>1</sup>。本節は次節と相補的である。以下では $\gamma$ 線をPMT(photomultiplier:光電子増倍管)で検出した時のスペクトルなどの基本的な知識は仮定する<sup>2</sup>。図2.1が、本実験で用いた回路である。図中にはないが、HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY (ハイボル)をNaI1~7及びP.S.に掛けた。図2.2が、信号の時間関係の概略である。この図が寿命測定の実理となる。

---

<sup>1</sup>課題演習 A2などでポジトロニウムの寿命を測定する方は、大いに参考にさせていただきたい。ちなみに、A2のレポートに書かれている回路図では veto がしばしば省略されており、それに騙されて苦労することがあるそうである。

<sup>2</sup>課題研究 P1 では、前期の実験ゼミにおいて学ぶ内容である。しかし担当教官の市川温子さん曰く、「ゼミやっても全然知識身につけてないから来年からどうしよっかなー」だそうである。奮起せよ、P1の民。



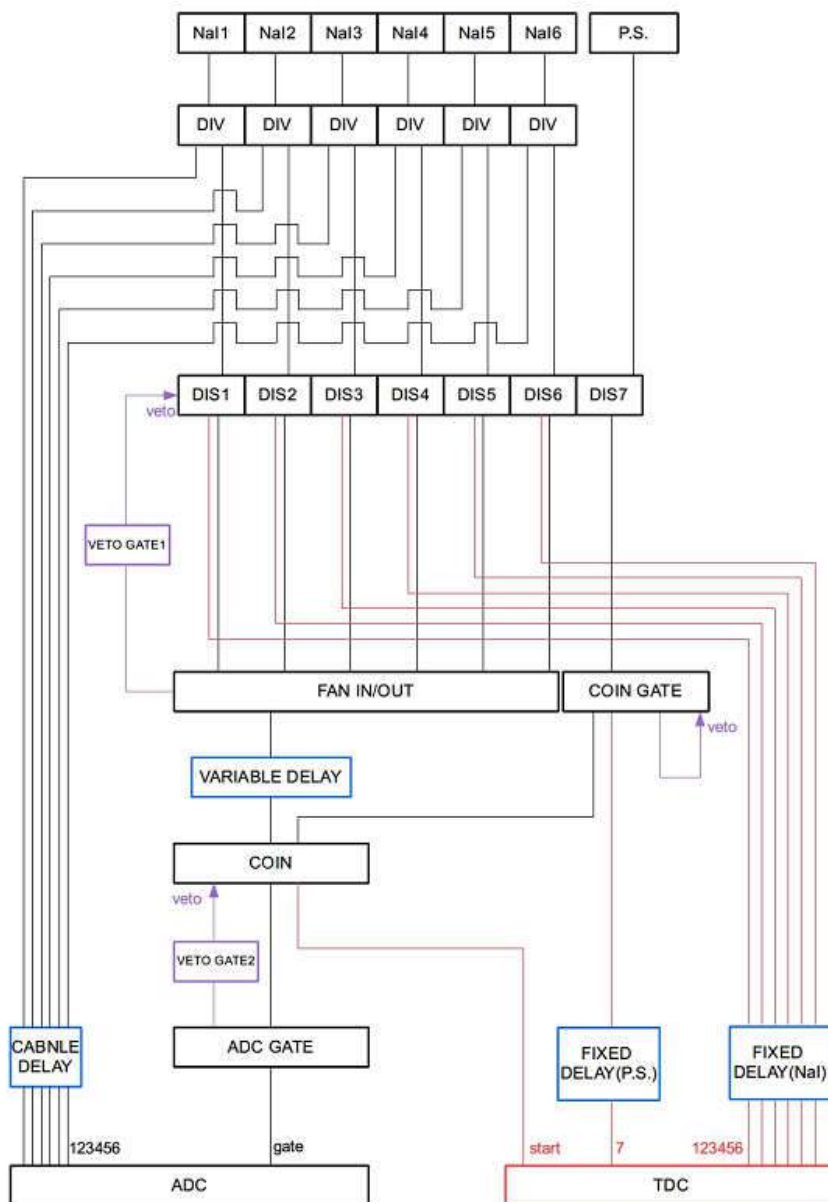


图 2.1: 回路图

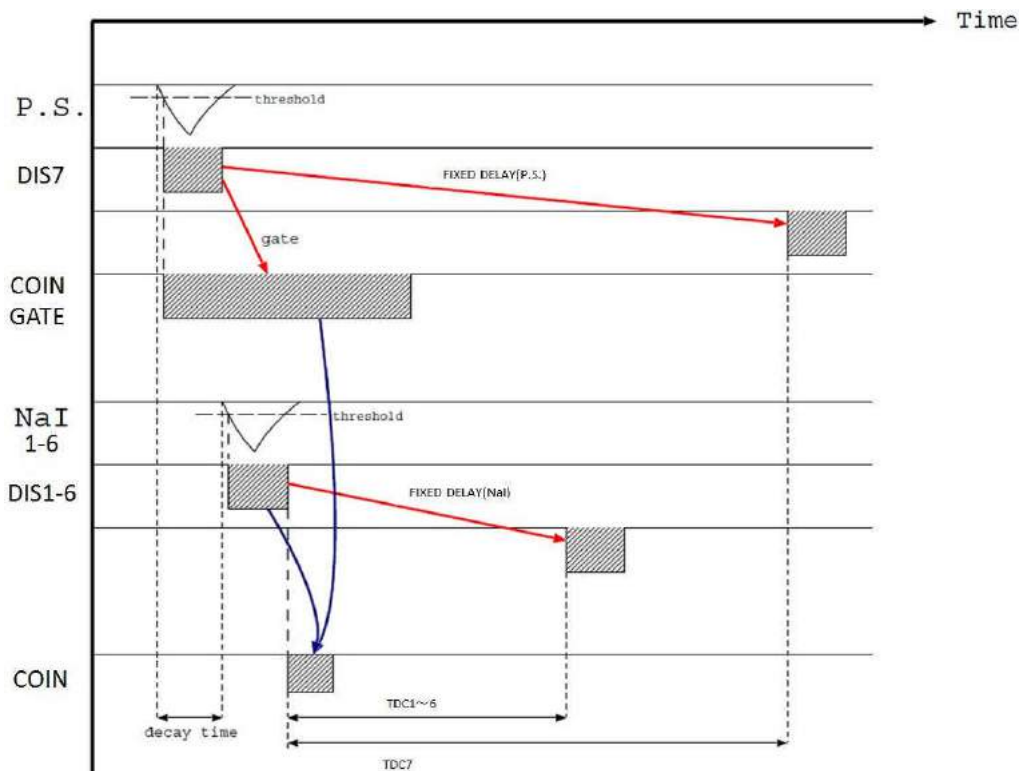


図 2.2: 信号の時間関係

この図は文献 [2] より引用、改変した。

**NaI1~6**  $\gamma$ 線を検出する NaI (Bicron 社製) である。NaI 内へ入った  $\gamma$ 線の生む電子シャワーを PMT で集めて、電気信号に変える。NaI1~6 に掛けたハイボルの値は、それぞれ 1632V、1261V、1470V、1250V、1450V、1504V であった。NaI の gain が大きくなるように、かつ生信号の高さが大体同じになるようにハイボルを調節した。

**P.S.** 浜松ホトニクスから購入した光電子増倍管 (型番: R1398 ASSY) に対し、アクリルとプラスチックシンチレータを、光学セメントを用いて接着したものである。電圧は 1900V まで掛けられるが、そんなに掛けなくても gain は十分であった。回路の他の部分の抵抗 (50 $\Omega$ ) と内部抵抗が異なるらしく信号が反射してしまうので、反射信号が DIS7 の threshold で落とせる程度の gain になるように、ハイボルを 1700V に設定した。p.21 の図 2.14 が実

際の写真である。

**DIV** signal divider である。これは入力信号を二つに分けるモジュールである。信号を分けた後に gain を半分にする。

**DIS1~7** discriminator (ディスクリ) である。アナログ信号をデジタル信号に変え、設定した threshold 以下の信号をカットするモジュールである。DIS1~7 はひとつのモジュール内の別々のチャンネルであり、threshold は別々に掛けられるが veto は共通である。threshold の値は、DIS1~6 をモジュールの最小である 10mV 程度に、DIS7 を 60mV 程度に設定した。我々の興味がある  $3\gamma$  崩壊のガンマ線は 511keV 以下にだらだらと分布しているため、多くのイベントをとるために DIS1~6 の threshold はなるべく低くした。DIS7 の threshold は、P.S. の項で述べたように、反射をカット出来る程度にした<sup>3</sup>。

DIS への入力信号が立ち上がり初めてから、threshold に引っかかって DIS から信号が出るまでの遅延は、DIS 1~6 に於いて 10~15ns 程度であった。これは解析の段階で TQ 補正によって補正した。DIS7 の遅延は、P.S. の信号の立ち上がりが甚だ急であるので、ほぼ認められなかった<sup>4</sup>。

**FAN IN/OUT** DIS 1~6 のうちいずれかが信号を出したらば、FAN IN/OUT が信号を出す。すなわち、回路において「or」の役割を果たす。内部遅延は 15ns であった。

**COIN** 付和雷同型信号発信機。COIN GATE からの gate 信号が入力されている間に FAN IN/OUT からの信号が入力されると、その瞬間<sup>5</sup>COIN から信号が出力される。すなわち、回路において「and」の役割を果たす。ここに COIN を置いた理由は、P.S. を鳴らした陽電子と、NaI に入った崩壊ガンマ線の元となったポジトロニウムを成していた陽電子が同じものであったことを保証するためである。

**ADC** みんなご存知小憎いアイツ (豊伸電子株式会社製 C009)。gate 信号が入力されている間にチャンネル 1~6 に入力された信号を積分するモジュールである。gate 信号は共通だが、積分はチャンネル 1~6 で別々にできる。今回の実験では、データの補正に用いられるのみである。量子振動の

<sup>3</sup>とは言うものの、反射を完全にカットできる調度良い threshold の値は無かった。しかし、threshold に引っかかってしまった反射信号は数秒に 1 個の程度のレートであったので無視できた。しかも、反射信号とそれの元信号との時間差は 50+数 ns あったので、COIN GATE の self-veto でカットできている。p.12 の **COIN GATE** 及び **self-veto** も参照せよ。

<sup>4</sup>今回我々が用いた DIS (Phillips Scientific 社製 octal discriminator model 705) は、threshold を電圧計で測定した値が実際の値の 10 倍となる仕様であった。誰か得るのであるうか、いやしない。

<sup>5</sup>実際には少々内部遅延があろう。

観測に重要なのはむしろ TDC である。

**TDC** みんな大好き小粋なアイツ（林栄精器株式会社製 RPC-170 8ch HR TDC）。スタート信号からゴール信号までの時間差を測定するモジュールで、分解能は 1ns である。スタート信号は start へ、ゴール信号はチャンネル 1~7 へ入れる。スタート信号は共通だが、ゴールまでの時間はチャンネル 1~7 別々に測定できる。測定可能な時間差の最大値は、モジュールの蓋を開けてスイッチを切り替えることによって調節できるので、今回は 500ns に設定した<sup>6</sup>。

**CABLE DELAY** ADC GATE からの gate 信号があまりにも遅いので、NaI たちから来る生信号が gate に先んじて ADC に入力されてしまう。そこで、NaI たちからの信号をそれぞれ 200ns 程度遅らせた。NaI たちからきた生のアナログ信号を遅らせなければならないので、カマックのモジュールではなくケーブルを用いた。用いたケーブルは 1 本あたり 30m (= 100ns 程度信号が遅れる) で、合計 12 本のケーブルを用意した。この小節の最後にある図 2.3 がケーブルたちの写真である。各ケーブルは巻き取ったあと半分に分けて片方をひっくり返してまた重ね、最後に輪をつぶしてケーブル帯で留めた。これはケーブルの輪を電磁波がくぐり抜けた時に電磁誘導によってノイズが入らないようにするためである。

**FIXED DELAY (NaI)** TDC のスタート信号が遅いので、ゴール信号の方が先んじてしまう。そこで、DIS1~6 からのゴール信号を、それぞれ 110ns 程度遅らせた。これらはデジタル信号なので、カマックのモジュールを用いて遅らせた。

**FIXED DELAY (P.S.)** 理由を上と同じくして、950ns 程度遅らせた。こちらもデジタル信号なので、カマックのモジュールを用いて遅らせた。

**VARIABLE DELAY** COIN GATE からの gate 信号がやや早かったので、FAN IN/OUT の信号を 30ns 程度遅らせた<sup>7</sup>。

<sup>6</sup>ポジトロニウムの寿命測定では、崩壊曲線の尻尾を長く取る為に、この最大値を 1  $\mu$ s 以上に設定することもある。しかし今回の実験では、尻尾の部分において量子振動は非常に小さくなるので、TDC の最大値を幾分短めに設定した。ちなみに、崩壊曲線の尻尾を長く取るのは、曲線のフィッティング範囲を伸ばすため、または pick-off 補正をするためといった理由がある。pick-off 補正については p.40 の第 5.2.5 項 pick-off 補正の難しさを参照せよ。

<sup>7</sup>VARIABLE DELAY が不十分で、FAN IN/OUT のシグナルが gate 信号の立ち上がり部分をまたいでしまうと、TDC 1 のグラフがなだらかになった（理想的には、ある時刻にピークを持つはずである；回路図を見よ）。十分に delay し、シグナルが gate に入ると、ピークが綺麗に見えた。この現象が起こった理由は、P.S. を鳴らし COIN GATE を作った陽電子が元となったポジトロニウムの崩壊ガンマ線シグナルは、FAN IN/OUT から出たあと自分の作った gate に入ることができず、次に来た何らかのシグナルが gate に入ってしまったせいであろうと我々は考えた。蓋し gate 信号の立ち上がり部分をまたぐような NIM 信号では、COIN から信号は出ないのであろう。

**ADC GATE** ADC に入力する gate 信号を作る。width は  $3\mu\text{s}$  で、内部遅延が  $15\text{ns}$  あった。width は ADC に入力される信号の尻尾までしっかりと入るように調節した。

**COIN GATE 及び self-veto** COIN に入力する gate 信号を作る。width は  $500\text{ns}$ 。width は、TDC の最大値に合わせて設定した<sup>8</sup>。内部遅延は  $50\text{ns}$  であった。

また、回路図にある通り self-veto を行っている<sup>9</sup>。これを行う理由は、COIN GATE から gate 信号が出ている間に新たな信号が入ると width 以上の大きな gate 信号となってしまうので、それを抑制するためである。上述の通り veto 信号は  $50\text{ns}$  遅延するが、DIS7 のシグナルレートは kHz のオーダーであったので、veto は間に合っていた。

**VETO GATE1** FAN IN/OUT が DIS を veto するための gate 信号を作る。width は  $1\mu\text{s}$  に設定した。内部遅延は  $15\text{ns}$  であった。この veto の存在理由は以下の通りである。NaI から出てくる信号は、大きく見れば山なりであるが、多少ギザギザしている。山の立ち下がり部分において<sup>10</sup> このギザギザが DIS の threshold に何度も引っかかることによって、ひとつの山なりの信号の入力に対しいくつもの DIS の出力が得られてしまう。この現象を抑制するためである。従って、veto の width は一つの山の幅よりも大きくなるように設定した。上述の通り VETO GATE1 には内部遅延が  $15\text{ns}$  あるが、山の立ち上がり部分が DIS の threshold に引っかかってから立ち下がり部分のギザギザが threshold に差し掛かるまでの時間よりは十分に短かったので、veto は間に合っていた<sup>11</sup>。

**VETO GATE2** ADC GATE が COIN を veto するための gate 信号を作る。width は  $300\mu\text{s}$  に設定した。内部遅延は  $50\text{ns}$  であった。ADC は gate 信号が終わったらすぐに次の gate 信号を待ち受けられるのではなく、実際には百数十  $\mu\text{s}$  の処理時間を要する<sup>[1]</sup> ので、この間のイベントを抑制するのがこの veto の役割である。この veto が有効な間は、ADC も TDC も新

<sup>8</sup>それ以上 width を広げることは無意味である。理由は以下のとおりである。まず、TDC の最大値は  $500\text{ns}$  なので、測定できるポジトロニウム崩壊時間の最大は  $500\text{ns}$  である。今、P.S. が鳴ってから NaI のいずれかが鳴るまでの時間を崩壊時間としているので、COIN GATE が鳴ってから FAN IN/OUT が鳴るまでの時間もまた崩壊時間である（ケーブル長の違い及び delay のせいで少々ずれるが）。よって、COIN への gate 幅を崩壊時間の最大よりも長くしても、それ以降に崩壊したポジトロニウムの寿命は測定できないからである。

<sup>9</sup>あるモジュールの veto に NIM 信号を入力すると、その信号の入力中はそのモジュールから信号が出なくなる。これを「モジュールが veto された」という。self-veto とは自分の出した信号で自分自身を veto することを言う。

<sup>10</sup>山の立ち上がり部分は、十分に急峻であったのでギザギザが threshold を何度もまたぐことは殆ど無かった。

<sup>11</sup>DIS に入力された山形の信号が終わる前に次の信号が来るかもしれない。しかし NaI のカウンtrateはこのような気遣いを催すほど甚だしくはなかった。

たにデータを取り始めることはない。veto が有効になるまでに ADC GATE と VETO GATE2 の内部遅延を合わせて 65ns 以上の時間がかかるが、その間 COIN から信号が出てこないことは COIN GATE における 500ms の self-veto が保証してくれる。

以下にケーブルの写真と、参考までに回路の写真を載せる。



図 2.3: CABLE DELAY

赤いコードはハイボルのものなので関係ない。

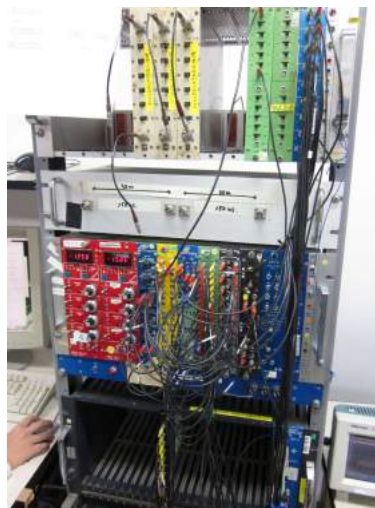


図 2.4: 回路の写真

左下の手は高柳君の手であろう。

## 2.2 装置の配置・写真

実際に製作、使用した装置のスペックやその配置を、写真を用いて解説する。本節は前節と相補的である。

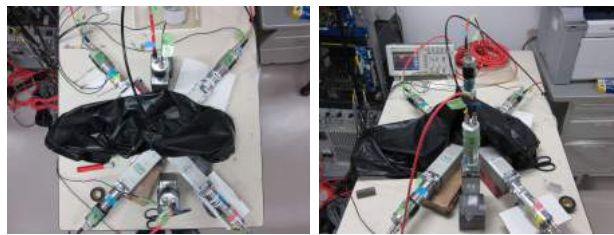
全体図 図 2.5 と図 2.6 が実験装置の全体図である。前者の図ではシリカパウダを置いていない。P.S. を遮光するため、データを取っている間は装置全体に暗幕を被せた。暗幕から伸びる黒い管は真空ポンプへと繋がっている。段ボールや鉛は磁石にくっ付かないので、NaI などを乗せる台としてはこれらを用いている。



(a) 真上から

(b) 斜めから

図 2.5: 装置の全体図 (暗幕被覆前)



(a) 真上から

(b) 斜めから

図 2.6: 装置の全体図 (暗幕被覆後)

装置の概念図とクロエ・ルメール 実験装置の中核をなす部分は、線源、シリカパウダ、磁石である。これらをまとめて固定する容器を、主にアクリル板を加工して作成した。我々が設計図を描き、課題研究 P1 担当教官の市川さんに頼んで発注していただいた。文献 [1] ではシリカパウダを入れたアクリルフランジで  $\gamma$  線が止まっていたので、 $\gamma$  線がなるべくアクリル板に当たらないように設計した。ポジトロニウムのターゲットとしてシリカパウダを採用した理由としては、入手が比較的容易であり、密度が小さいので pick-off<sup>12</sup> を起こしにくいからである。pick-offを抑えるためシリカパウダをオーブンで 15 分程焼いて水分を飛ばした後<sup>13</sup>、容器（下記）内に 1.4cm の高さまで入れ<sup>14</sup>、真空ポンプ（下記）へ結合して真空に引いた。

図 2.7–2.10 が装置全体の概念図である。クロエ・ルメールは赤い部分である。クロエ・ルメールの実際の写真は図 2.11–2.13 である。

図 2.7 を見よ。崩壊曲線の振動の振幅は、空間座標の  $z$  軸を鉛直上向きに取った時、方位角  $\phi$  方向に依存している（この図の平面上の角である）。振動数は角度に依存していない事に注意せよ。理論的には、NaI1 対 6 および 3 対 4 がそれぞれ逆位相（逆振幅）になっており、NaI2 と 5 は振幅ゼロとなるはずである。逆位相のものと振幅ゼロのものが確かにそうなっていることを

<sup>12</sup>pick-off については p.40 の第 5.2.5 項を参照せよ。

<sup>13</sup>念のため乾燥剤用のシリカパウダ（青色）も用意しておいたが、活躍の機会はなかった。

<sup>14</sup>あるフリーソフトで概算した結果、これくらいの高さだと陽電子がほとんどシリカパウダのところで止まってくれることが分かった。

確かめるために、NaI たちを斯の如く配置したのである。装置の実際の写真を見ると分かるが、コリメートはほとんど行っていない。しかし逆位相と振幅ゼロを見るには十分である。また、ネオジム磁石が検出器に近いので検出性能への影響が懸念されるが、磁石を NaI および P.S. の PMT 部分にさえ近づけなければ、少なくともシグナルレートには影響がなかった<sup>15</sup>。

図 2.8 を見よ。クロエ・ルメール下部に設置された線源より鉛直上向きへ放射された陽電子はマイラーで減速された後 P.S. を鳴らし、シリカパウダ内へ入りポジトロニウムを生成する。生成されたポジトロニウムは寿命を全うした後  $\gamma$  線となり、NaI で検出され回路信号となる。マイラーは 0.125mm である (DuPont 社製 MYLAR FILM304X200X0.125MM)。マイラーを何枚入れるかの決定については第 3 章を参照せよ。線源には  $^{22}\text{Na}$  を用いている。

図 2.9 を見よ。クロエ・ルメール側面のアクリル板下部には、P.S. 挿入用のスリットが開いているのだ！

図 2.10 がシリカパウダを入れる容器である。円筒の片方の口を専用の接着剤を用いて板で塞いだ形になっている。接着部分は脆弱である。板部分のパーツは、陽電子が通る中央部分だけ薄くなっている。板はアクリル、円筒はポリウレタンでできている。

---

<sup>15</sup>今回用いたネオジム磁石の規格は不明だが、PMT 部分に 15cm 程度まで近づけるとシグナルレートが著しく減った



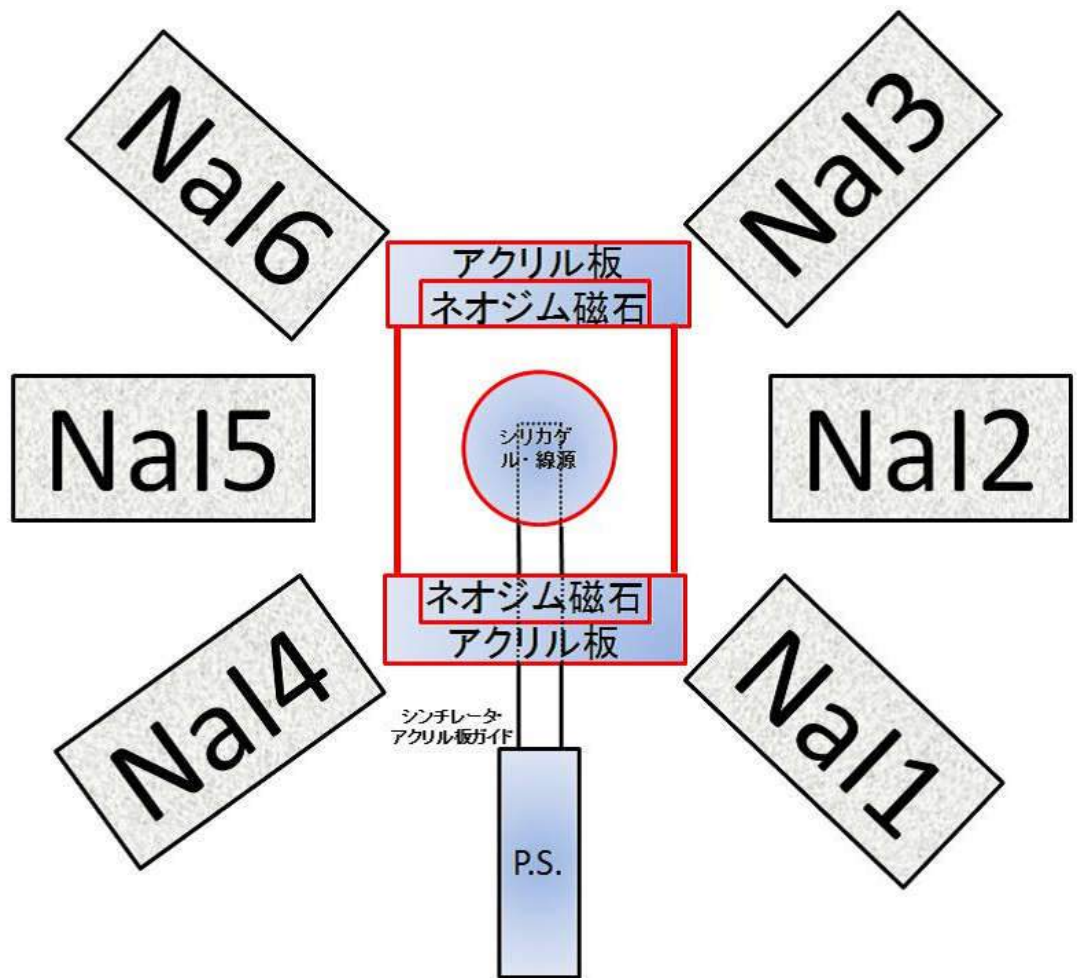


図 2.7: 装置の概念図 (上)

図中にシリカゲルと書いてあるのは、シリカパウダの誤りである。以下の図も同様である。

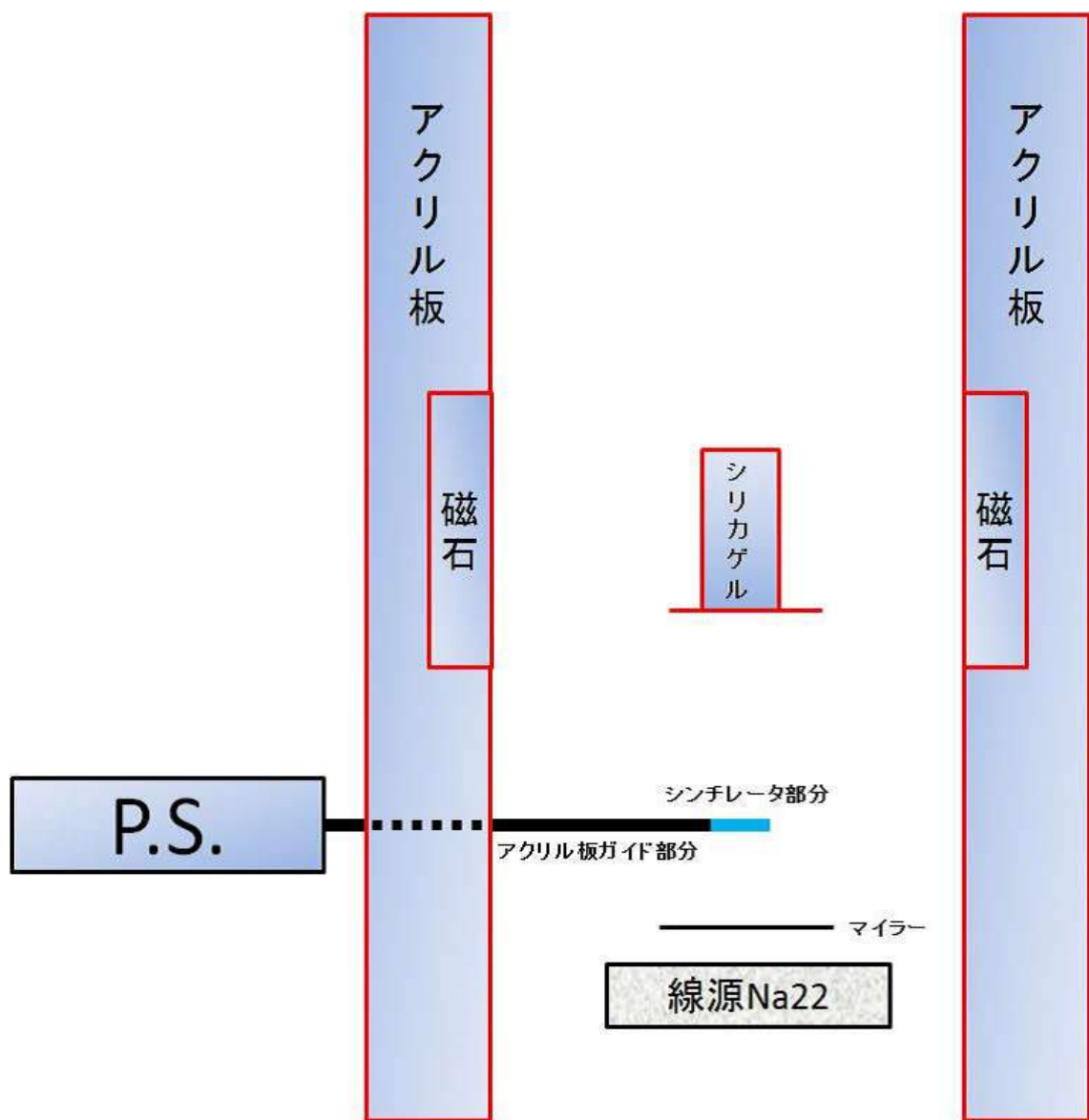


図 2.8: 装置の概念図 (横)

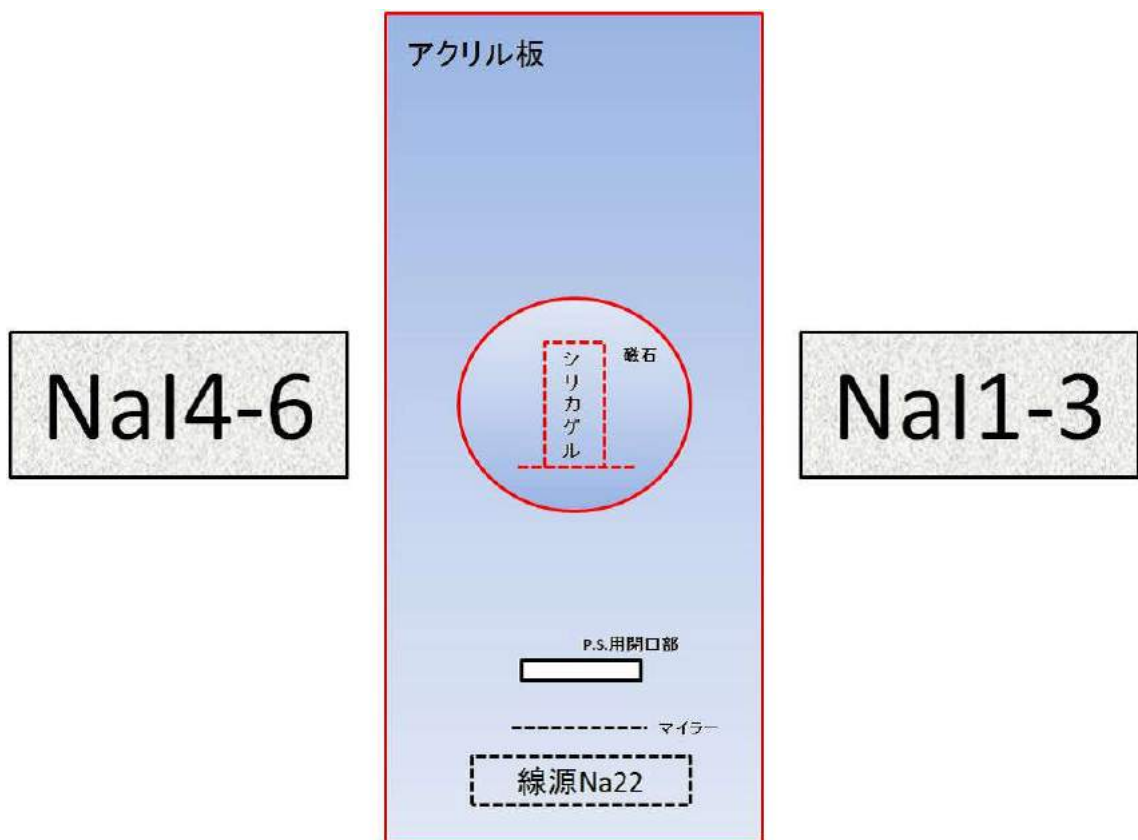


図 2.9: 装置の概念図 (前)

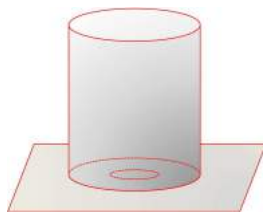


図 2.10: シリカパウダ容器の概念図

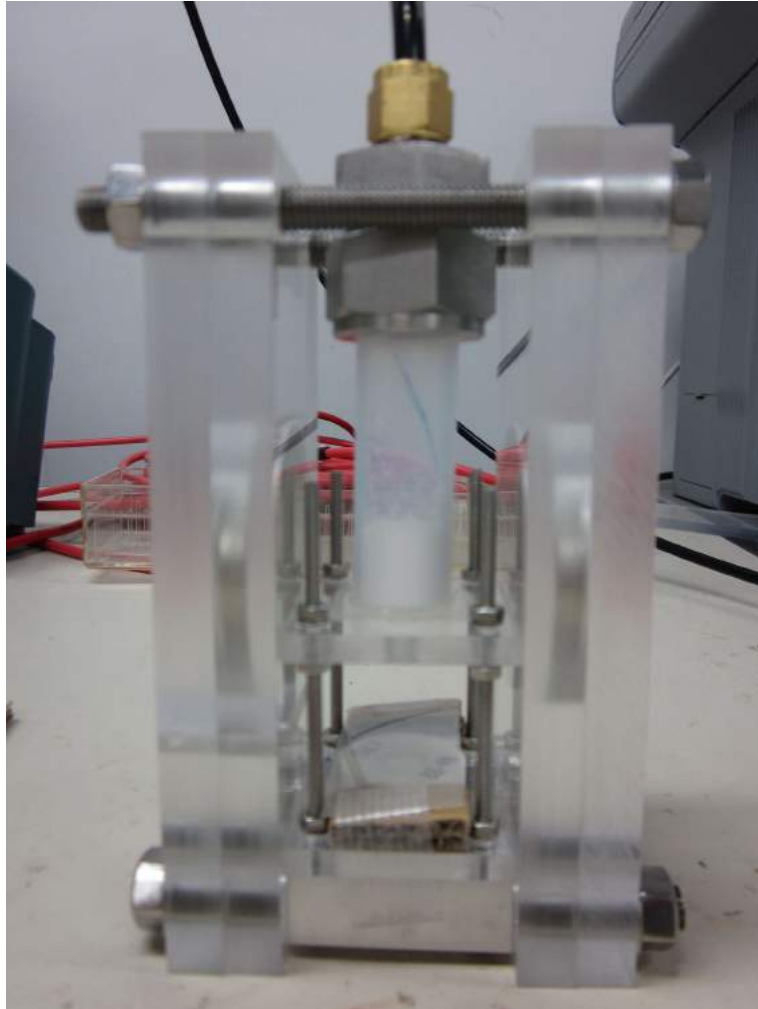


図 2.11: クロエ・ルメール (横)

シリカパウダ容器の乗っているアクリル板は、中央に穴が開いている。このアクリル板の上に図 2.10 に相当する容器が乗っている。

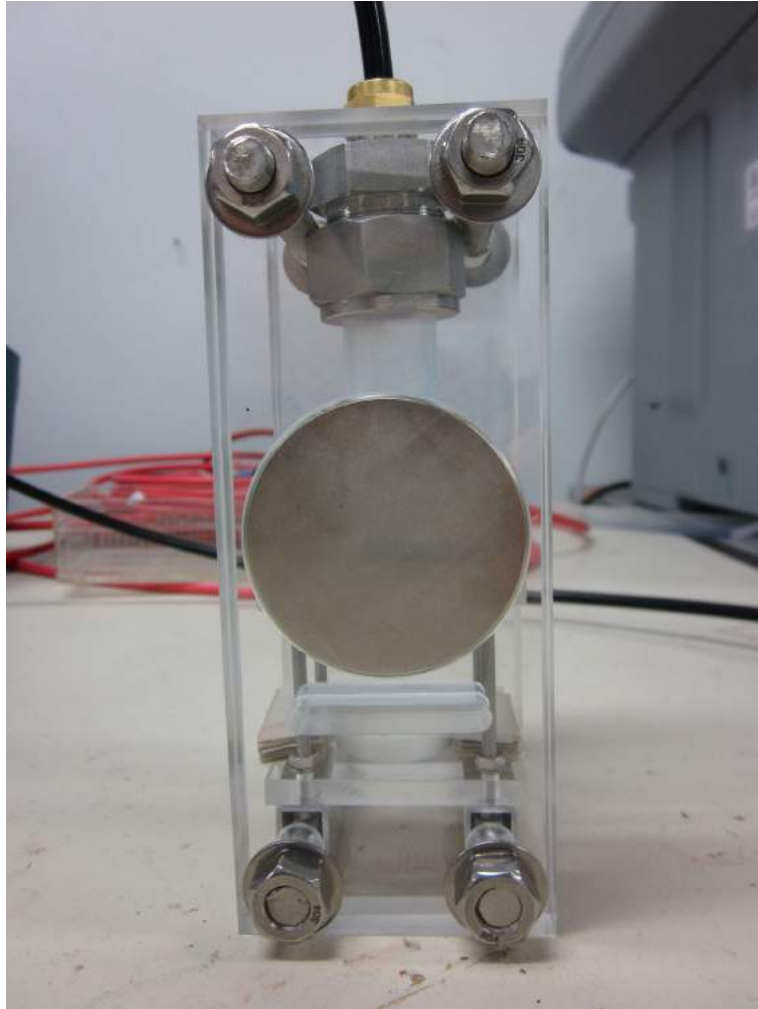


図 2.12: クロエ・ルメール (前)

中央の銀色の丸がネオジム磁石である。見難いが、磁石の少し下に P.S. を挿入するためのスリットがある！

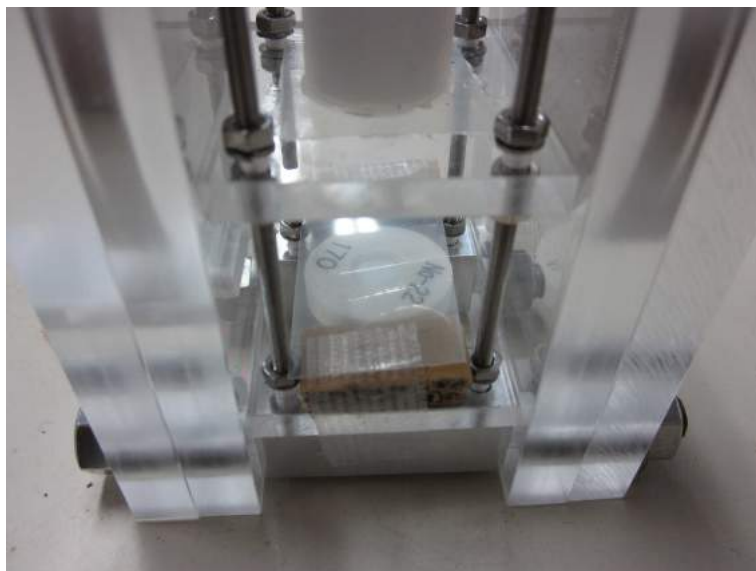


図 2.13: 線源設置部

線源とマイラーを段ボールとテープで留めてある。

**P.S.** 浜松ホトニクスから購入した光電子増倍管 (R1398 ASSY) に対し、アクリル製の光ガイドとプラスチックシンチレータを、光学セメントを用いて接着したものである。電圧は 1900V まで掛けられる。内部抵抗が  $50\Omega$  とは異なる様である。図 2.14 が、P.S.(plastic scintillator) の写真である。見辛いが、先端の小さな突出部がシンチレーター部分である。



(a) 遮光措置前

(b) 遮光措置後

図 2.14: P.S. の写真

**真空ポンプ** 空気分子は pick-off<sup>16</sup> レートを大きくするので、容器内を真空に引くための真空ポンプ (ULVAC DOP-40D) である<sup>17</sup>。図 2.15a がポンプの写真である。管の部分にフィルター (図 2.15b: アズワン KIC-T6、課題

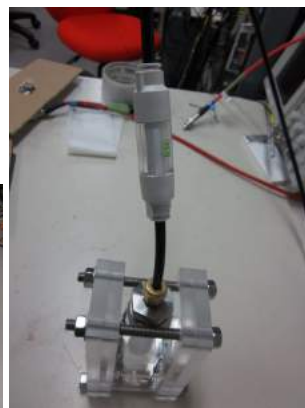
<sup>16</sup>pick-off については p.40 の第 5.2.5 項を参照せよ。

<sup>17</sup>文献 [2] に、真空に引いた時と引かなかった時の対照実験が載っている。

研究 P2 から拝借) を設置し、更に、真空に引く際にコックを徐々に開くことでポンプ内へシリカパウダが流入することを防いだ。



(a) 真空ポンプの写真



(b) フィルタの写真

図 2.15: 真空ポンプとフィルタ

## 第3章 予備実験 担当：山岡

### 3.1 磁場の profile 測定

振動数と磁場の関係は 1.17 であるので、TDC の分解能が 1ns、O-Ps の寿命が 142ns であることを考慮すると

$$H \sim \frac{1}{0.275} \sqrt{\left(1 + \frac{2 \times 0.00714}{\Delta_{HFS}}\right)^2 + 1} \sim 50 [\text{mT}] \quad (3.1)$$

$$H \sim \frac{1}{0.275} \sqrt{\left(1 + \frac{2 \times 1}{\Delta_{HFS}}\right)^2 + 1} \sim 190 [\text{mT}] \quad (3.2)$$

より磁場の強さは 50mT～190mT の間であれば、振動が確認できる。

今実験ではΦ 50mm × 5mm のネオジム磁石を用いたが、シミュレーション (FEMM4.2) を行うと磁石同士を 5cm 離すと適切な磁場の強さとなる。そこで実際にネオジム磁石を 5cm 離れた状態で図 3.4a, 3.4b の 12 個の測定点で磁場を計測した。東陽テクニカ製ハンディガウスメータ 4048 型を用い、再現性の為同じ場所で 3 回測定した。



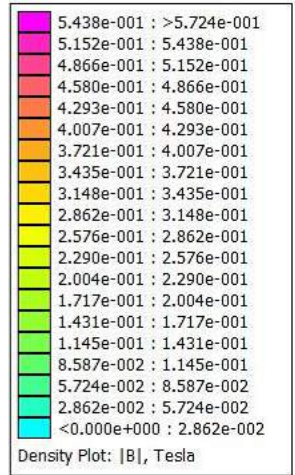
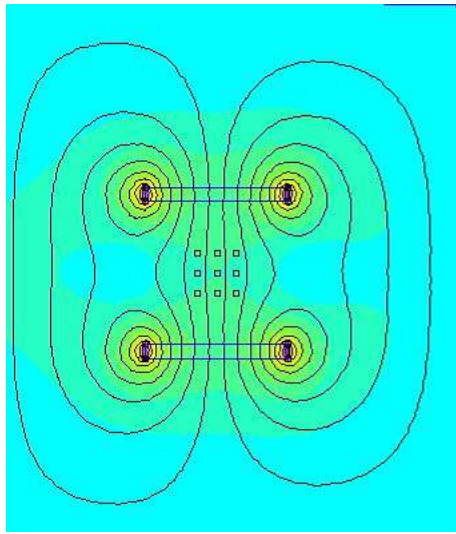


図 3.1: 磁場シミュレーション結果

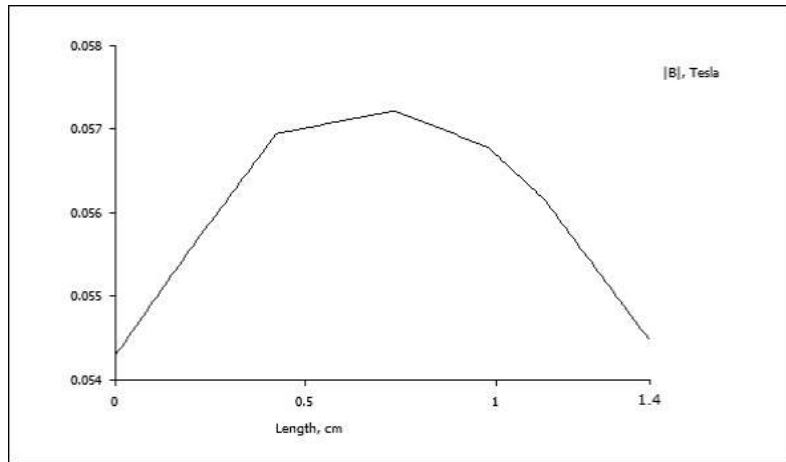


図 3.2: target 内部での磁石に平行方向の磁場の強さ (シミュレーション)

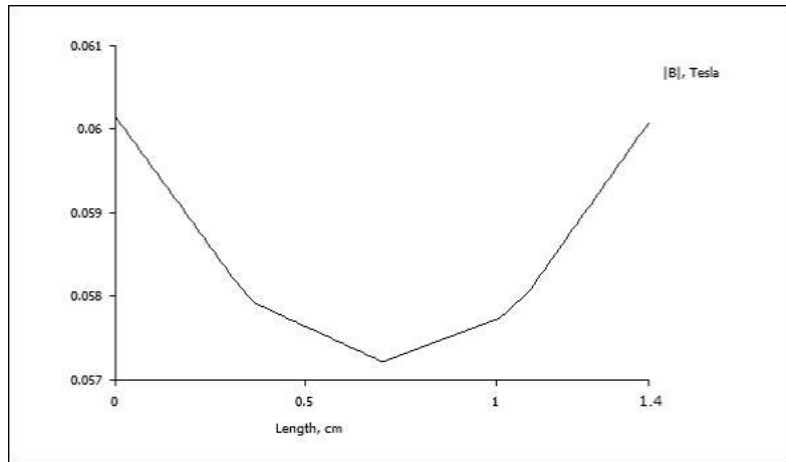


図 3.3: target 内部での磁石に平行方向の磁場の強さ (シミュレーション)

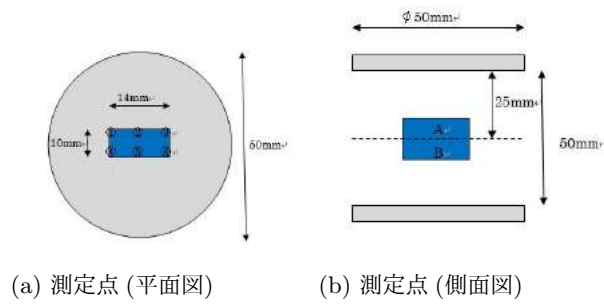


図 3.4

	first	second	third	mean	sigma
A-1	64.6	63.8	63.6	64	0.529
A-2	67.6	66.4	66.9	67	0.603
A-3	65.1	63.5	64.2	64.3	0.802
A-4	64.7	62.9	64.6	64.1	1.01
A-5	68.2	67.1	67.1	67.5	0.635
A-6	64.7	64.3	64.2	64.4	0.265
B-1	62.7	63.8	63.3	63.3	0.551
B-2	65.9	66.7	65.8	66.1	0.493
B-3	63.3	63.5	62.7	63.2	0.416
B-4	63.3	63	64.2	63.5	0.625
B-5	66.6	66.9	67	66.8	0.208
B-6	64.2	64.5	63.8	64.2	0.351

表 3.1: 磁場測定結果

表 3.1 より磁場の平均値は  $64.9 \pm 1.54\text{mT}$  とする。

但し、target であるシリカパウダーの体積を小さくしたために、陽電子が target 内で止まるように減速材で陽電子のエネルギーを落とさなくてはならない。今回は減速材としてマイラーを用いたが、何枚のマイラーを挟めば十分かを次節で説明する。

## 3.2 マイラーを入れる枚数

陽電子が target を通過するか否かを調べたいので図 3.5 の様に測定器を配置した。

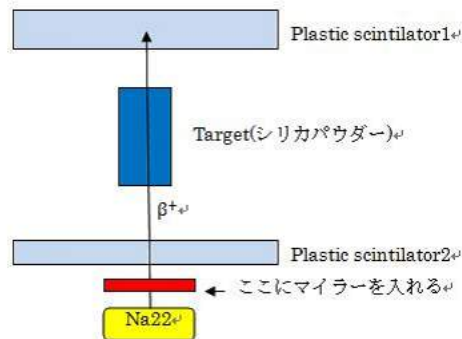


図 3.5: セットアップ

Plastic scintillator2 としては、もちろん本実験で用いる P.S. を使用した。

シリカパウダーの上下に配置した plastic scintillator の coincidence を取り、SCALER でカウント数を測定する。マイラーの数を変えながらカウント数をみることで、適当なマイラーの数を決めることにした。今実験では、Du Pont 社製マイラー (0.125mm) を用いた。

マイラー数	カウント数 (10min. あたり)
0	292
1	158
2	150
3	159

表 3.2: マイラー数とカウント数の関係

表 3.2 ではマイラー数が一枚以上のところでカウント数が変化していない。一枚以上では減速材の効果によって陽電子は完全に止まり、残りのカウント数は  $\gamma$  線による coincidence を取ったものだと考えられる。そこでマイラーの数を 1 枚にすることにした。

マイラーを一枚挟んだ場合に target に入る前に陽電子が止まらないか憂慮されるが、エネルギーロスを概算することで確認しよう。

まず初めに線源の部分で Al フィルム (0.1mm) が貼られているので、その部分での  $\beta$  線のエネルギーロスを計算する。ここで  $\beta$  線の最大飛程とエネルギーの関係は 1MeV 以下では線形であると近似した。27mg/cm<sup>2</sup> の時のエネルギー値は約 0.14MeV より、Al フィルムにより 0.14MeV エネルギーロスする。次にマイラー (1.39g/cm<sup>3</sup>, 0.125mm) 部分でのエネルギーロスは、17.38mg/cm<sup>2</sup>

の時のエネルギー値より約 0.1MeV である。

最後に薄膜 plastic scintillator(0.6g/cm<sup>3</sup>, 0.2mm) でのエネルギーロス、12mg/cm<sup>2</sup> の時のエネルギー値より約 0.07MeV である。

よって Na22 線源の  $\beta$  線最大エネルギーが 0.545MeV であるので、target に入るまでに陽電子が止まっていないことが分かる。

$$0.545[\text{MeV}] > 0.14[\text{MeV}] + 0.1[\text{MeV}] + 0.07[\text{MeV}] \quad (3.3)$$

### 3.3 calibration

#### ADC Calibration

長時間 NaI を動かすと pedestal が 100 程度変動するので、測定ごとに ADC Calibration を行うことにした。

NaI シンチレータを用いて Na22 の  $\gamma$  線を検出する、エネルギースペクトルは pedestal, 511keV, 1275keV のところにピークを持つので。ADCchannel 数とエネルギー (keV) が

$$\text{エネルギー} [\text{keV}] = a_0 \times \text{ADCchannel 数} + a_1 \quad (3.4)$$

と、線形の関係であるとして Fitting を行った。今実験では O-Ps の崩壊による  $\gamma$  線を検出するので、511keV 以下のエネルギー値を正確にするという観点から pedestal と 511keV の 2 点で Fitting した。Fitting 結果を表 3.3 に示す。

channel No.	NaI	$a_0$	$a_1$
1	NaI1	$-165.7 \pm 1.363$	$0.4582 \pm 1.268 \times 10^{-3}$
2	NaI2	$-167.8 \pm 1.368$	$0.4528 \pm 1.253 \times 10^{-3}$
3	NaI3	$-172.9 \pm 1.381$	$0.441 \pm 1.22 \times 10^{-3}$
4	NaI4	$-177.6 \pm 1.392$	$0.4631 \pm 1.282 \times 10^{-3}$
5	NaI5	$-225 \pm 1.506$	$0.5513 \pm 1.526 \times 10^{-3}$
6	NaI6	$-229.3 \pm 1.517$	$0.5432 \pm 1.503 \times 10^{-3}$

表 3.3: ADC Calibration 結果

#### TDC Calibration

今実験では REPIC 社製 RPC-170 8chTDC を用いて O-Ps の崩壊時間を測定する。Clock Generator で作った信号の 1 つを start 信号にして、もう一つを Gate Generator を用いて delay(50ns~200ns) をかけたものを stop 信号に

した。delay の長さを変えたときの TDCcount を測定することで Calibration を行う。stop 信号は ch1~ch7 までを用いるので、表 3.4 に全チャンネルでの delay 長さ と TDCcount の測定結果を載せておく。

delay[ns]	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7
50	113	107	47	45	119	46	118
125	388	392	346	337	419	345	407
150	481	483	450	422	514	488	490
175	582	585	556	524	620	554	593
200	673	678	654	620	718	651	687

表 3.4: delay 長さ [ns] と ch ごとの TDCcount の関係

delay 長さ と TDCcount は線形の関係

$$delay[ns] = a_0 \times TDCcount + a_1 \quad (3.5)$$

となるので、直線で Fitting を行った。図 3.6 が ch1 での Fitting 結果で、表 3.5 が全 ch での  $a_0, a_1$  の値である。

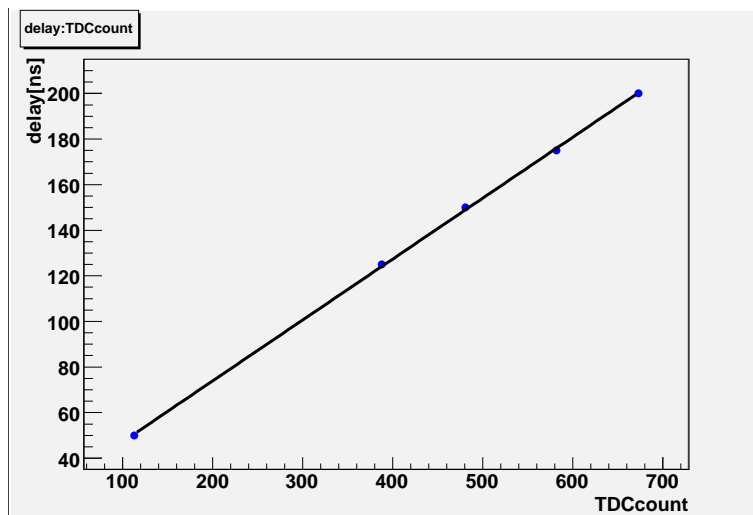


図 3.6: ch1 での Fitting 結果

channel No.	NaI	$a_0$	$a_1$
1	NaI1	$0.2672 \pm 2.322 \times 10^{-3}$	$20.44 \pm 1.131$
2	NaI2	$0.2625 \pm 2.280 \times 10^{-3}$	$22.15 \pm 1.117$
3	NaI3	$0.2463 \pm 2.140 \times 10^{-3}$	$38.85 \pm 0.986$
4	NaI4	$0.2615 \pm 2.272 \times 10^{-3}$	$38.12 \pm 0.9917$
5	NaI5	$0.2503 \pm 2.175 \times 10^{-3}$	$20.34 \pm 1.132$
6	NaI6	$0.2472 \pm 2.141 \times 10^{-3}$	$39.06 \pm 0.9781$
7	P.S	$0.2641 \pm 2.295 \times 10^{-3}$	$18.78 \pm 1.144$

表 3.5: TDC Calibration 結果

## 第4章 補正・解析 担当：高柳

### 4.1 データのカット

今回の実験では、式 1.15 より O-Ps の  $3\gamma$  崩壊の光子の観測が目的であり、観測する光子は 3 つの  $\gamma$  線のうち 1 つだけとしたので、 $2\gamma$  崩壊、 $3\gamma$  崩壊のどちらかに関わらず NaI が 2 つ以上反応したイベントはカットする。

#### ADC CUT

p-Ps の  $2\gamma$  崩壊の  $\gamma$  のエネルギーは 511keV であり、o-Ps の  $3\gamma$  崩壊の  $\gamma$  は 511keV 以下であることから、上限を p-Ps の  $2\gamma$  を含まない 450keV とした。下限は [1] より、装置の分解能を考慮して 300keV とした。

#### TDC CUT

TDC では、1 つの NaI のみ反応したイベントだけをとるために、6 つの NaI のうち 5 つがオーバーフロー値をとり、残り 1 つがピークの部分を取るというカットを行った。

### 4.2 t-Q 補正

今回の実験では NaI シンチレーターを使用しているが、これは時間の応答が悪く、threshold を超えるのに時間がかかり、その分タイムラグが生じるので補正する必要がある。(t-Q 補正)

そのために NaI の波形を図 4.1 のように三角形で近似する。 $w_0, w_1, h, z, \theta, \Delta T, T_0$  はそれぞれ信号の時間幅、信号がピークに達するまでにかかる時間、信号のピークの高さ、実際の  $V=0$  と信号の  $V=0$  のずれ、threshold の値、tQ 補正量、threshold を超えた時間である。 $w_0, w_1$  はエネルギー依存性が無いものとする。



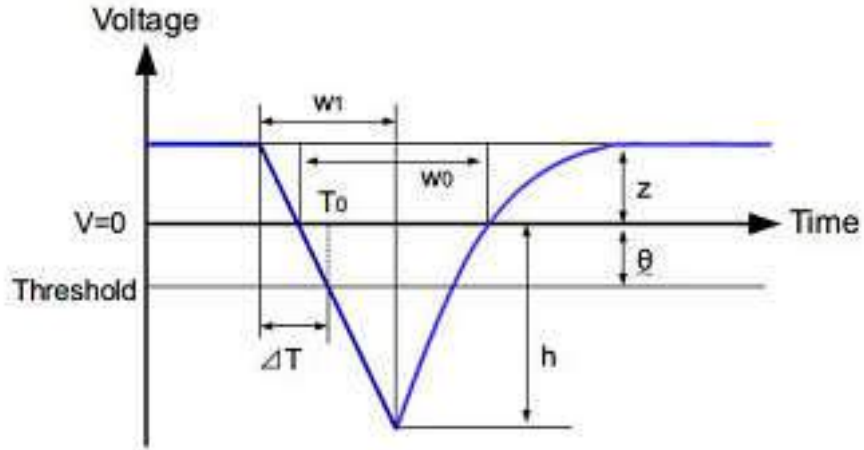


図 4.1: t-Q 補正

図 4.1 から次の関係が成り立つ。

$$\Delta T : w_1 = (z + \theta) : (h + z) \quad (4.1)$$

また、ADC の値は三角形の面積で近似することにより

$$ADC = 1/2hw_0 \quad (4.2)$$

ただし  $z$  はパルス高さ  $h$  と比べ十分小さいので、 $V \geq 0$  の領域の積分値は無視した。式 4.1 と式 4.2 から

$$\Delta T = \frac{1/2(\theta + z)w_0w_1}{ADC + 1/2w_0z} \quad (4.3)$$

$$= \frac{a}{ADC + b} \quad (4.4)$$

$a \equiv 1/2(\theta + z)w_0w_1$ ,  $b \equiv 1/2w_0z$  で定数である。

図 4.2 は TDC vs ADC のヒストグラムをプロファイリングした後、式 4.5 でフィッティングしたものである。また、図 4.3 及び図 4.4 はそれぞれ t-Q 補正前と後の TDC vs ADC のヒストグラムである。

エネルギーが低いところでは式 4.5 の fitting からずれている。これは、アナログ信号の立ち上がりが線形であるとした仮定が間違っていることに起因し

ている。

$$t = T_0 - \frac{a}{ADC + b} \quad (4.5)$$

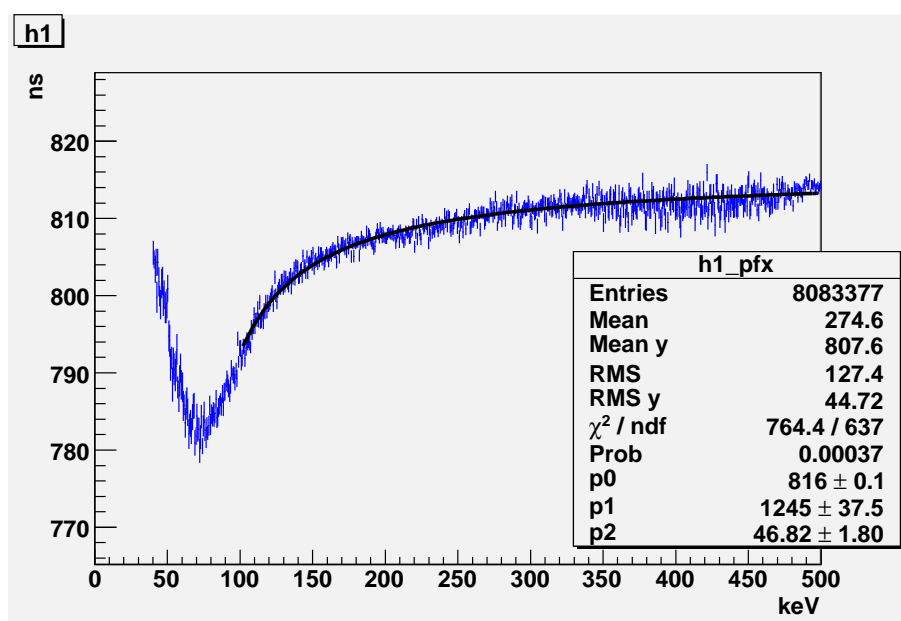


図 4.2: t-Qfit

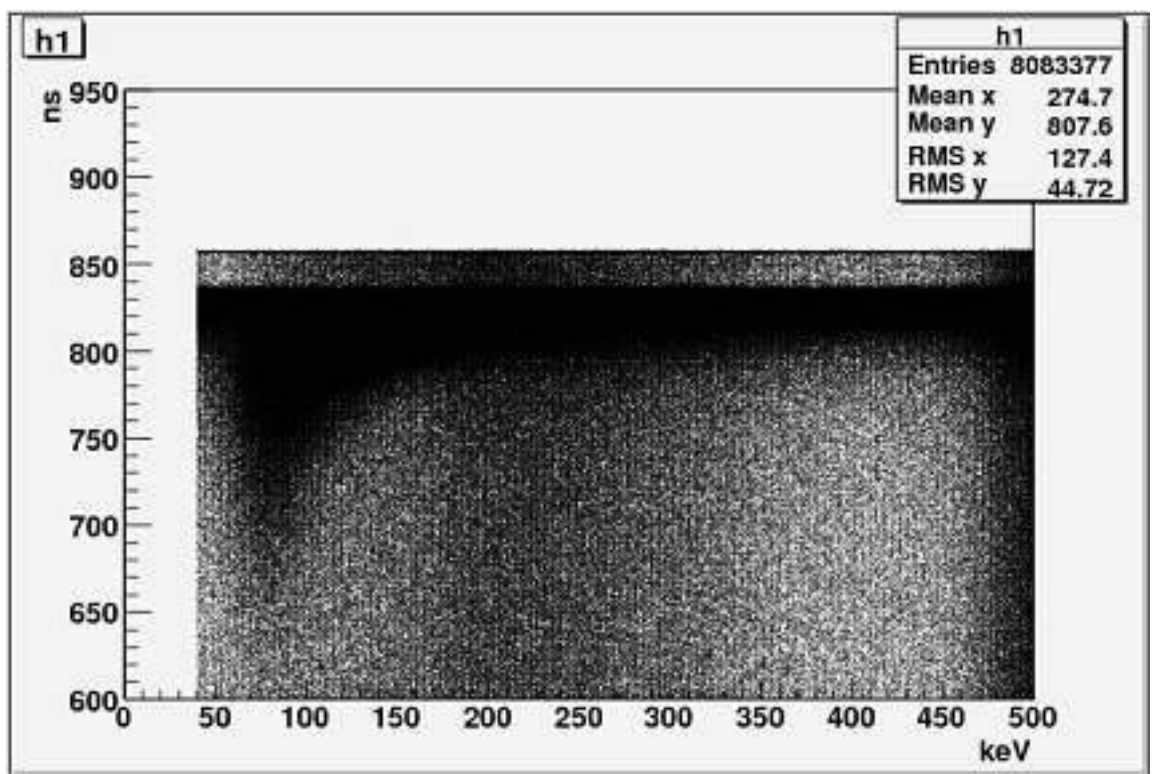


图 4.3: t-Q 補正前

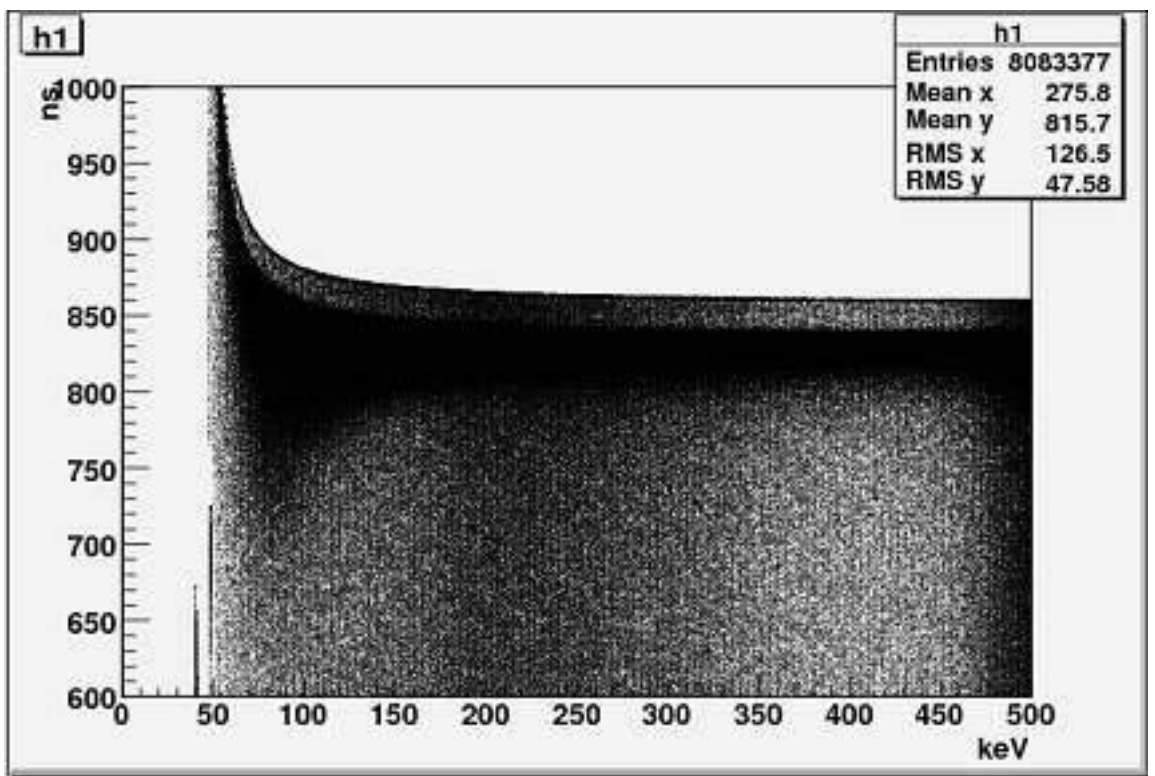


図 4.4: t-Q 補正後

## 第5章 結果・考察

### 5.1 結果

図 5.1, 図 5.2, 図 5.3 はそれぞれ同位相である NaI1 と 6,NaI2 と 5,NaI3 と 4 を足した後、式 5.1 でフィッティングしたグラフである。フィッティング結果及びに式 5.2 より求めた HFS を表 5.1 にまとめた。

図中の変数は  $p_0 : A, p_1 : \Gamma[\text{ns}^{-1}], p_2 : B, p_3 : h, p_4 : \Omega[\text{ns}^{-1}], p_5 : \phi$

$$y = A(1 + h \sin(2\pi\Omega x + \phi))e^{-\Gamma x} + B \quad (5.1)$$

$$\Delta_{HFS} \equiv \frac{2\Omega}{\sqrt{1 + \left(\frac{A\mu H}{\Delta_{HFS}}\right)^2} - 1} \quad (5.2)$$

$$\Gamma \equiv \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2) \quad (5.3)$$

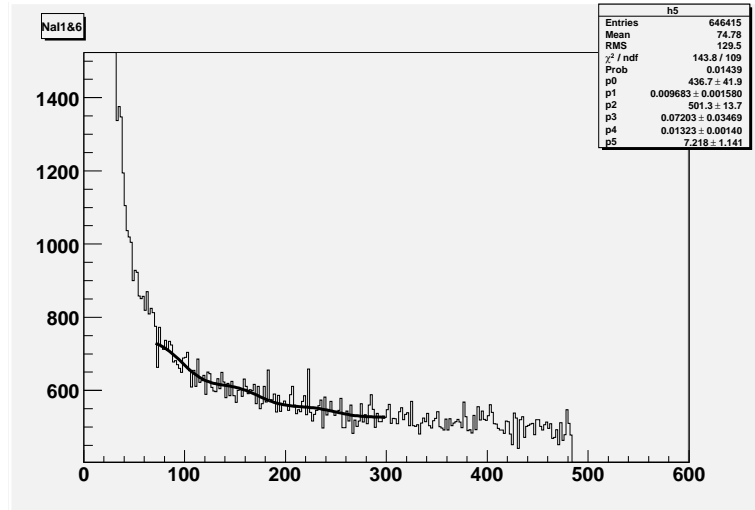


図 5.1: NaI1 と NaI6 の崩壊曲線  
縦軸がカウント数で、横軸が時間 [ns]

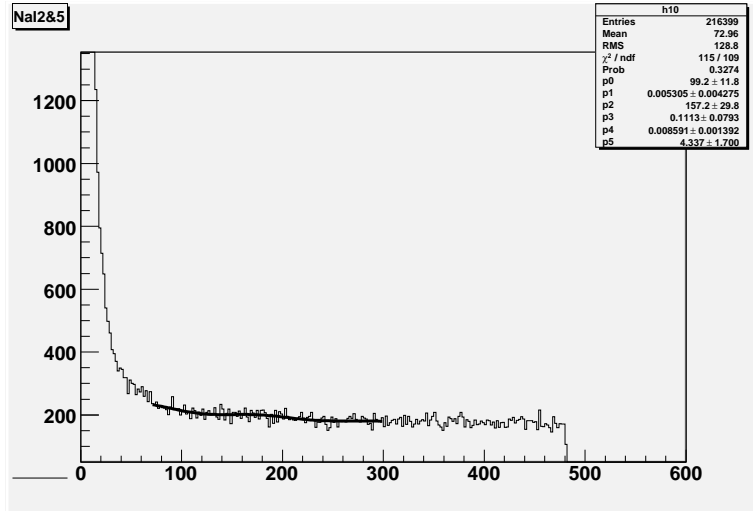


図 5.2: NaI2 と NaI5 の崩壊曲線  
縦軸がカウント数で、横軸が時間 [ns]

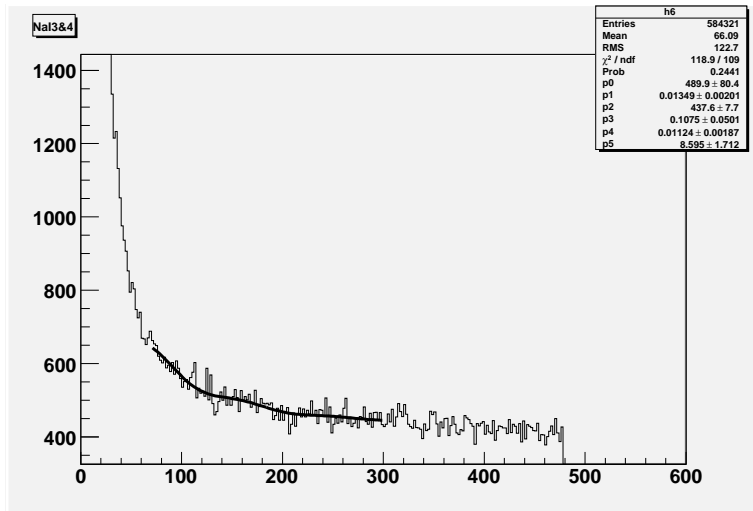


図 5.3: NaI3 と NaI4 の崩壊曲線  
縦軸がカウント数で、横軸が時間 [ns]

NaI pair	A[dimless]	$\Gamma[\text{ns}^{-1}]$	B[dimless]		
1 6	436.7±41.9	0.09683±0.001580	501.3±13.7		
2 5	99.2±11.8	0.005305±0.004275	157.2±29.8		
3 4	489.9±80.4	0.01349±0.00201	437.6±7.7		
NaI pair	h[dimless]	$\Omega[\text{ns}^{-1}]$	$\phi$ [dimless]	$\chi^2/ndf$	$\Delta_{HFS}[\text{GHz}]$
1 6	0.07203±0.03469	0.01323±0.00140	7.218±1.141	1.319	166.1±19.3
2 5	0.1113±0.0793	0.008591±0.001392	4.337±1.700	0.1376	107.9±18.2
3 4	0.1075±0.0501	0.01124±0.00187	8.595±1.712	1.091	141.2±24.4

表 5.1: fitting 結果及び HFS

超微細構造の理論値は  $\Delta_{HFS} = 203\text{GHz}$  である。振動しない Na2 と Na5 では  $\Delta_{HFS} = 107.9 \pm 18.2\text{GHz}$  と理論値より低く、 $\chi^2/ndf$  も 0.1376 と 1 からずれていたため、振動が見えていないことにより fitting が上手くいかなかったのだと考えることが出来る。しかし振動している Na1,6 と Na3,4 では  $\chi^2/ndf$  が 1.319, 1.091 と 1 に近いが、 $\Delta_{HFS}$  は  $166.1 \pm 19.3\text{GHz}$ ,  $141.2 \pm 24.4\text{GHz}$  と誤差範囲内に理論値が入っていないので、今実験では振動が見えていないようだ。

## 5.2 考察・改善点

HFS の値と理論と値のずれが何から来たのか、それを改善するにはどうすればよいのかを考察してゆく。本実験では QED の理論を検証できるほど精度のよいデータを取れなかったため、主に実験の反省点を述べてゆく。

### 5.2.1 磁場の非一様性による誤差

本実験では、ポジトロニウムにかけている磁場は空間的に一様であると仮定していた。しかし、第 3.1 節によると実際には磁場は非一様であった。崩壊曲線の振動数は磁場の 2 乗に比例しており、表 3.1 より磁場の相対誤差は 5 % 程度であるため、振動数は 10 % 程度ばやけている筈である。この誤差は振動の腹や節が見難くなるには十分な大きさであろう。

### 5.2.2 逆位相と振幅ゼロが観測できなかったこと

振幅ゼロになるはずだった NaI たちについては、ガンマ線のコリメートによって状況が改善するかもしれない。逆位相を示す NaI たちについては、正

負逆の振幅を示すので、コリメートをしてそれほど改善はされないだろう。逆位相および振幅ゼロが観測できなかったのは、シリカパウダ中でのクーロン相互作用によりポジトロニウムの運動量の方向が鉛直上向きでなくなったため、角度の定義に意味がなくなった事も理由として挙げられるかもしれない。

### 5.2.3 向かい合う NaI たちのカウントレートの違い

向かい合う NaI たち (NaI1 対 NaI3 と NaI4 対 NaI6) のカウントレートが最大で 40 %程度異なった。これは、各 NaI に入るガンマ線がクロエ・ルメールによって色んな角度に制限されていたことに起因する。

### 5.2.4 装置の設計についての改善案

クロエ・ルメールの設計段階で問題になったのは、 $\gamma$  線放出角度を確保することと一様磁場の確保することの両立である。

クロエ・ルメール全体を、強磁性体である鉄で覆って、磁場の一様性を確保するという案も出たが、磁場シュミレーションソフト FEMM4.2 を用いて磁場を計算してみると、それほど一様性は良くなりならず、むしろ悪化する可能性もあった。

磁石を大きくすることでも磁場の一様性は確保できる<sup>1</sup>。しかし、今度はガンマ線が磁石やそれを支えるアクリル板にあたることで放出角度が制限される。まずネオジム磁石中での  $\gamma$  線の遮蔽を概算してみよう。 $\gamma$  線のエネルギーを 511keV とした時の質量吸収係数は  $\mu_m \sim 0.2\text{cm}^2/\text{g}$  である、よってネオジム磁石の磁石は約  $7.5\text{g}/\text{cm}^3$  であるので線吸収係数は  $\mu \sim 1.5\text{cm}^{-1}$  だと分かる。ネオジム磁石の厚さが 5mm であることから、光子数が  $\exp(-1.5 \times 0.5) \sim 0.47$  倍される。つまり磁石の部分を通ると  $\gamma$  線は半数に減る。同様の計算を行うとアクリル版では  $\gamma$  線があまり遮蔽しないことが分かる。この問題を改善するには磁石の透過する部分を削ることなどがあるが、ネオジム磁石を加工することは難しい。

---

<sup>1</sup>磁石を大きくするならば、ネオジム磁石をやめて、より大きく強力な電磁石を用いる事が考えられる。そうすれば磁場の一様性も確保でき、強力な分崩壊曲線の振動周期も短くなるので、フィッティングがしやすくなる。実際文献 [4] では電磁石を用いて実験している。検出器は、アクリルガイドなどを用いることで、磁場の影響外へ置くことができる。



## 5.2.5 pick-off 補正の難しさ

シリカパウダ内で生成したポジトロニウムは、パラならば 1ns 以内にほとんど崩壊し、オルソならば約 140ns の寿命を全うするはずである。しかし実際にはそうになっていない。オルソポジトロニウムは、周りの原子の影響で崩壊前に対消滅したり、スピンを交換してパラになって崩壊したりするのである。pick-off 補正とは、実験で得たデータからこのような 511keV の影響を取り除くための補正である<sup>2</sup>。pick-off の原因としては、空気分子、シリカパウダに含まれる水分子などが考えられる。対消滅やパラポジトロニウム  $2\gamma$  崩壊のスペクトルは 511keV にピークを持つのにに対し、オルソポジトロニウムは  $3\gamma$  崩壊するのでスペクトルは 511keV 以下にだらだらと分布することを利用する。以下では、ポジトロニウムに磁場をかけない場合における pick-off 補正の簡単な解説を文献 [2] に従って行い、その後本実験における pick-off 補正の扱いについて説明する。

### pick-off 補正の原理

pick-off 補正を行うためには、崩壊曲線をフィットする際に式

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_{3\gamma}}} \quad (5.4)$$

ではなく、次の式

$$\begin{aligned} N(t) &= N_0 e^{-\frac{t}{\tau_{3\gamma}} - \frac{t}{\tau_{pick}(t)}} \\ &= N_0 e^{-\frac{t}{\tau_{3\gamma}} (1 + p e^{-t/q + r})} \end{aligned} \quad (5.5)$$

の最右辺を用いる。ここに、 $N(t)$  は時刻  $t$  において崩壊したポジトロニウムの数、 $\tau_{3\gamma}$  はオルソポジトロニウムの寿命、 $\frac{1}{\tau_{pick}(t)} \equiv \Gamma_{pick}(t)$  は時刻  $t$  においてポジトロニウムが pick-off される確率<sup>3</sup>、 $N_0, p, q, r$  は定数であり、

$$\frac{\tau_{3\gamma}}{\tau_{pick}(t)} \equiv p e^{-t/q} + r \quad (5.6)$$

である。従って TDC データを式 (5.5) でフィッティングしてやればよい。そのためには  $p, q, r$  を求めなければならないので、以下のようにして求める。実験で得られるデータと  $\frac{\tau_{3\gamma}}{\tau_{pick}(t)}$  の間には次のような関係がある。

<sup>2</sup>pick-off 補正については、京都大学課題演習 A 2 における寿命測定のリポートの多くに書いてある。特に文献 [2] では、当時学部 3 年生であった高木裕義氏と他の A2 メンバーが、pick-off 補正関数 (式 5.5:同文献の式 (4.32)) の理論的導出を試みている。かなり過激な近似を行っており必ずしも導出は成功していないようであるが、pick-off 補正関数の理解の一助となろう。より高級な参考文献は、[5] である。

<sup>3</sup>これが時間依存しているのは、以下に述べる熱化によるものである。

$$\frac{N_{pick}(t)}{N_{3\gamma}(t)} = \frac{2}{3} \frac{\tau_{3\gamma}}{\tau_{pick}(t)} \quad (5.7)$$

ここに、 $N_{pick}(t)$  は時刻  $t$  において pick-off されたポジトロニウムの数で、 $N_{3\gamma}(t)$  は時刻  $t$  において  $3\gamma$  に崩壊したオルソポジトロニウムの数である。右辺は  $\frac{2}{3}pe^{-t/q} + r$  であるので、結局 pick-off 補正関数のパラメタ  $p, q, r$  を求めるには、式 (5.7) の左辺をデータから読み取ればよいことになる。

以下では、簡単のためにアクシデンタルなバックグラウンドを無視する。これは適切な処方によって除去可能（のはず）である。 $N_{3\gamma}$  の方は、511keV 未満（例えば～440keV）のデータはオルソポジトロニウムのみである、すなわち 511keV のコンプトン散乱を無視できるという仮定を置くと<sup>4</sup>、ADC データの、例えば 0～440keV のデータを TDC で見ることで読み取れる<sup>5</sup>。 $N_{pick}(t)$  の方は、ポジトロニウムの熱化を利用して読み取る。ポジトロニウムは生成してから時間が経てば経つほど減速してゆき、pick-off 確率が減少してゆく。これをポジトロニウムの熱化という。この熱化を考慮して、TDC データのうち時刻が後の方のイベント（例えば 500ns 以降）の中に pick-off イベントはないと仮定する<sup>6</sup>。従って、例えば TDC で 500ns～のデータのみを拾うと、これは 511keV を含まず、オルソポジトロニウム（とアクシデンタルなバックグラウンド）である。このデータを ADC で見たスペクトルを base データと呼ぶことにする。この base データと生の ADC データに注目しよう。生の ADC データは、511keV に pick-off によるピークがあり、それ未満のエネルギー帯にだらだらとイベントが入っている。このだらだらとしたイベントは、511keV からのコンプトン散乱がないという上記の仮定により、すべてオルソポジトロニウム（とバックグラウンド）であると考えられるので、base データ（こちららもすべてオルソポジトロニウム）のイベント数を一様にスケール変換して生の ADC データから差っ引いてやることにより、511keV のピークのみを残せるはずである。こうして残ったデータを TDC で見ると、それは pick-off されたイベント（と 0ns 付近で一瞬で崩壊したパラポジトロニウムのイベント）のみである。このデータから  $N_{pick}(t)$  は読み取れる。

### pick-off 補正の問題点と本実験での扱い

式 (5.5) は、ポジトロニウムに磁場をかけない場合の式である。本実験では磁場をかけており  $\tau_{3\gamma}$  が時間に依存しているので、単純に式 (5.5) を用いることはできない。その際どのように式を変更するべきか、我々には分からなかった。また、理論では  $2\gamma$  崩壊は無視して計算しているので、 $2\gamma$  崩壊が

<sup>4</sup>実はこの仮定は不適當である。検出器によってはこのコンプトン散乱を無視できない。下記文献 [2] の誤りを見よ。

<sup>5</sup>正確には、まだアクシデンタルなバックグラウンドの効果が入っているので、これを除去せねばならない。

<sup>6</sup>実はこの仮定も不適當であることが [6] から分かる。以下にするいくつかの仮定も同様である。下記文献 [2] の誤りを見よ。

振動数に効いてくるのかどうかは不明である。以上の理由により、今回我々は pick-off 補正を行わなかった。更に、次の段落で説明するように、上で述べた pick-off 補正の方法自体にも問題がある。

## 文献 [2] の誤り

上で説明した pick-off 補正の方法論のうち、まず 511keV からのコンプトン散乱が無視できるという仮定についての問題点を述べる。本実験の TDC データにおいて 0~1ns で崩壊したイベントを拾い（従ってほぼ全部パラポジトロニウムの 511keV）、それらを ADC でプロットすると、確かに 511keV にピークがあり、更にそのコンプトン散乱がピークの半分くらいの山の高さで 200keV から 400keV のあたりに分布していた。従って、（少なくとも本実験で用いた）NaI では 511keV からのコンプトン散乱による影響が無視できないので、[2] や [3] のような pick-off 補正（いずれも 511keV からのコンプトン散乱によるスペクトルを無視している）は良い補正となりえない。

次に、熱化のおかげで後の時刻では pick-off が無視できるという仮定についての問題点を述べる。文献 [2] では、崩壊曲線の 500ns 以降の部分は熱化によりほとんどすべてがオルソポジトロニウム（とアクシデンタルなバックグラウンド）であると仮定していたが、文献 [6] によると、0ns 近傍と 500ns 以降での  $3\gamma$  崩壊に対する pick-off 確率は、大きくは変わらない（図 5.4）。従って、500ns 以降のイベントがオルソポジトロニウムおよびバックグラウンドであるとするのは良い仮定ではない。

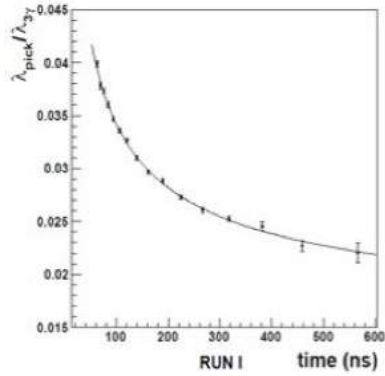


図 5.4: ポジトロニウムの熱化過程

この図は文献 [6] より引用した。 $\lambda$  は崩壊率である。ゲルマニウム半導体検出器を用いてポジトロニウムの寿命を測定している。ゲルマニウム検出器の良いエネルギー分解能を利用し、オルソポジトロニウム崩壊からくる  $\gamma$  線と、ピックオフ崩壊による 511keV の単色  $\gamma$  線を分離して、ピックオフ割合の時間依存性を出したのが、このスペクトルである。初めポジトロニウムは高速で飛んでいるために pick-off 頻度が高いが、熱化されて減速すると pick-off の占める割合が減っていく事が分かる。

## 参考文献

- [1] 上路市訓・仲村佳悟（2013）「オルソポジトロニウムにおける量子振動の測定」 京都大学平成 24 年度課題研究 P2 レポート
- [2] 神谷有輝・久野拓馬・高木裕義・宮川大輝・宮地真路・安井勇氣（2012）「オルソポジトロニウムの寿命測定」 京都大学平成 24 年度課題演習前期 A2 レポート・発表資料
- [3] 渡曾康介・新拓人・立石圭児・筒井翔一郎・宮津怜嗣（2011）「オルソポジトロニウムの寿命測定」 京都大学平成 22 年度課題演習後期 A2 レポート
- [4] G.Akimoto (2009) 「ポジトロニウムの超微細構造の精密測定実験」
- [5] Y. Kataoka, S. Asai, and T. Kobayashi, Phys. Lett. B. 671 (2009) 219;  
O. Jinnouchi, S. Asai, and T. Kobayashi, Phys. Lett. B. 572 (2003) 117
- [6] 「オルソポジトロニウムの寿命測定」 [http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/Tabletop\\_experiments/Lifetime\\_measurement.html](http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/Tabletop_experiments/Lifetime_measurement.html) (2014/2/20 アクセス)
- [7] 本実験全体の参考文献としては、Y. Sasaki, A. Miyazaki, A. Ishida, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, H. Saito, K. Tanaka, and A. Yamamoto (2010) *Measurement of positronium hyperfine splitting with quantum oscillation* arXiv:1002.4567v3 がある。

## 謝辞

線源を取りに行く際に鍵を開けて下さった方々、モジュールと一緒に探して下さった方々、中家さんに奇異の目で見られながらもケーブル巻き取り作業を手伝って下さった方々へ、この場を借りてお礼申し上げます。市川さん、黄さん、仲村さん、林野さんには特にお世話になりました。特に市川さんは、実験の改善提案、機材の発注、プログラミングなど、我々を陰日向になって支えてくださいました。悪名高き物理学実験の担当教官が市川さんのような熱意あふれる方へと代わったならば、実験好きの学生が増えることであろうと思考する次第です。

