

修士学位論文
オルソポジトロニウムを用いたCP非保存の探索実験

東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻

小林研究室

西原 一幸

2008年2月7日

概要

オルソポジトロニウムを用いて、レプトンセクターにおける CP 非対称性を探索する実験を計画している。現在この系での CP 非対称性を示すパラメータ C_{CP} は、 10^{-2} の精度まで検証されているが、未だ CP 非対称性は確認されていない。クォークセクターでの CP 非対称性は 10^{-3} の精度で発見されていることから、レプトンセクターの CP 非対称性を示すこのパラメータも 10^{-3} の精度で検証が出来るように計画した。実験装置の設計を行い、現在実験開始へ向けて装置の製作を進めている段階である。今回、実験本番に先立ってプロトタイプ装置の製作、および検出器等の性能評価を行った。この論文では、この性能評価の結果とプロトタイプ装置を用いてのテスト実験について紹介する。またテスト実験で得られたデータについて、その解析手法に触れ、 C_{CP} の導出および結果の考察を行なう。

目次

1	序論	4
1.1	実験計画への動機	4
1.2	テスト実験の実施と本論文の流れ	4
2	実験原理	6
2.1	ポジトロニウムについて	6
2.2	磁場中でのポジトロニウムについて	7
2.3	$o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ CP 非保存崩壊	9
3	実験方法およびプロトタイプ装置の製作	12
3.1	設計思想	12
3.2	ベータトリガーシステム	16
3.3	γ 線検出器 (LYSO 結晶)	22
3.4	磁場システム	29
3.5	データ取得回路構築	33
3.6	レートの見積もり	36
4	データ解析およびその結果	38
4.1	ゲインの時間変化およびキャリブレーション (180° での RUN)	39
4.2	時間分解能	42
4.3	オルソポジトロニウムの寿命と生成率の測定 (180° , 磁石なしでの RUN)	48
4.4	LYSO 結晶におけるエネルギー分布とシグナルイベント数 (180° での RUN)	52
4.5	磁石の向きを変えての RUN (0° での RUN)	55
4.5.1	オルソポジトロニウムの寿命と生成率の測定	55
4.5.2	LYSO 結晶におけるエネルギー分布とシグナルイベント数	57
4.6	^{176}Lu 起源のバックグラウンド測定	59
5	C_{CP} の導出とその考察	61
5.1	Q 値について	61
5.2	非対称パラメータ A の導出とその統計誤差 (イベント数による規格化)	63
5.3	C_{CP} の導出	66
5.4	非対称な理由への考察	67
5.4.1	装置配置のずれによる効果	67
5.4.2	イベント数の時間変化	69
5.4.3	考察のまとめ	73
5.5	非対称パラメータ A についての系統誤差の評価	74
5.5.1	線源位置のずれにより生じる系統誤差	74
5.5.2	系統誤差を生じさせるその他の要因	78

5.6	フィット結果を用いた C_{CP} の導出	79
6	実験本番に向けて	81
6.1	LYSO 検出器の増設	81
6.2	磁場の強化	81
6.3	ベータトリガーシステムの改善	81
6.4	回転台の使用	82
7	まとめ	83
付録	LYSO 検出器のゲイン低下について	84
	謝辞	87
	参考文献	88

1 序論

1.1 実験計画への動機

「CP 対称性の破れ」の探索は、我々の宇宙における物質・反物質の非対称性を理解する上で極めて重要である。現在までの素粒子物理学では、K 中間子や B 中間子の系を用いた実験で、クォークセクターにおける CP 対称性の破れを発見し、かつ高い精度で測定してきた。これらは小林・益川行列によって、標準理論の範疇で理解されているが、これだけでは現在の我々の宇宙における物質・反物質の非対称性を説明するには不十分であることも同時にわかってきた。

一方、レプトンセクターにおける CP 対称性の破れの探索実験は、これまでにあまり行なわれていない。しかし大統一理論 (GUT) では、レプトン・クォーク混合が期待されており、レプトンセクターにおける CP 非保存の発見・解明は、GUT の物理を理解する上で重要な成果になると期待されている。このレプトンセクターでの CP を測定するのに、電子・陽電子の束縛系であるポジトロニウムがよいプローブとなる。過去にポジトロニウムを使った実験では、 10^{-2} の精度でレプトンセクターの CP が測定されたが、未だ破れの発見には至っていない。クォークセクターでは、 10^{-3} の精度になって初めて CP 対称性の破れが発見された経緯を考えると、レプトンセクターでも、もう一桁精度を上げて測定を行なうと CP 対称性の破れが発見されるかもしれないと期待される。

今回計画している実験では、ポジトロニウムを用いてレプトンセクターでの CP 対称性の破れを 10^{-3} の精度で測ることを目的としている。

1.2 テスト実験の実施と本論文の流れ

実験本番に先立って、プロトタイプ装置の製作をおこなった。プロトタイプ装置の製作では、実験本番用の装置を製作する際に直面するであろう困難について事前に理解および推測することを目的とした。そして、このプロトタイプ装置を使ったセットアップを組み、テスト実験を行なった。

この論文では、事前に行なったプロトタイプ装置の性能評価、および実際にポジトロニウムを生成させてデータの取得を行なった、テスト実験の結果についての考察を述べることにする。

以下この論文での流れについて簡単に説明する。

第 2 章では

実験で必要となってくるポジトロニウムに関する事項、特にポジトロニウムの磁場中での振る舞いについて述べた後、どのようにしてポジトロニウムを使って、CP の破れを測定するかについて説明する。

第 3 章では

実験装置の設計思想、および今回製作したプロトタイプ装置の性能評価の結果について述べる。またテスト実験における回路設計、およびシミュレーションによるレートの見積もりについても、この章

で述べる。

第4章では

今回行なったプロトタイプ装置のテスト実験内容を挙げ、そこで得られたデータの解析手法について説明し、最終的にシグナルとみなされるイベント数を求める。

第5章では

データ解析結果について考察を行い、第4章で得られたイベント数の結果を基に、この系でCP非対称性を示すパラメータ C_{CP} の導出おこなう。またその誤差についてもこの章で議論する。

第6章では

現在準備を進めている実験本番用の装置について紹介し、テスト実験からの改善点・相違点について論じる。

第7章では

この論文中で行ったことについてまとめ、今後に残された課題の提示を行なう。

2 実験原理

この章では実験で用いるポジトロニウム（特に磁場中でのポジトロニウムの振る舞い）について紹介した後、実験手法について解説し、ポジトロニウムを使ってどのように CP 非対称性を測定するか述べる。

2.1 ポジトロニウムについて

ポジトロニウム (Ps) は電子と陽電子の束縛状態である。基底状態は電子・陽電子のスピンの統計によって 1 重項のパラポジトロニウム (p-Ps, 1S_0) と、3 重項のオルソポジトロニウム (o-Ps, 3S_1) に分けることができる。

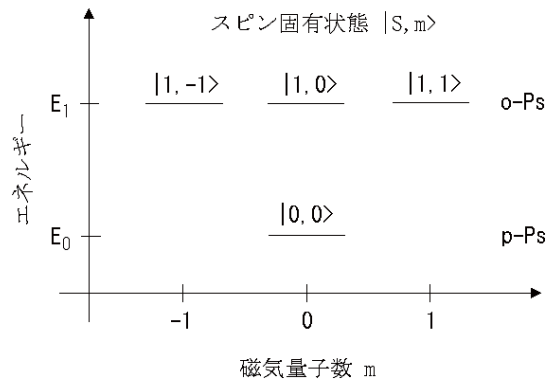


図 1: ポジトロニウムのスピン固有状態。基底状態のポジトロニウムにはスピン統計により 1 重項の p-Ps と 3 重項の o-Ps が存在する。

ここで p-Ps, o-Ps それぞれのエネルギー準位を E_0, E_1 とする。両者のエネルギー差 $E_1 - E_0$ は超微細構造と呼ばれ、実験的に以下のように求まっている [1]

$$\begin{aligned} E_1 - E_0 &= \hbar\omega_0 \\ \Delta\nu &= \frac{\hbar\omega_0}{2\pi\hbar} = (2.03403 \pm 0.00012) \times 10^2 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (1)$$

またこのポジトロニウムは数本の γ 線に崩壊することが知られている。ポジトロニウムの荷電共役変換演算子 C に対する変換性は、粒子・反粒子系であるため、スピン角運動量 S によって以下のように決定される。[2]

$$C = (-1)^S \quad (2)$$

電磁相互作用は荷電共役変換 C に対して不変であるため、崩壊の前後で C の固有値は変わらない。したがって p-Ps は偶数個の光子へ、また o-Ps は奇数個の光子へ崩壊する。主には p-Ps \rightarrow 2γ , o-Ps \rightarrow 3γ

に崩壊することになるが、それぞれの崩壊確率は実験により以下のように精度良く決定されている。[3]
[4]

$$\begin{aligned} (\text{o-Ps}) \Gamma_1 &= (7.0401 \pm 0.0006(\text{stat.})^{+0.0007}(\text{sys.})) \times 10^6 \text{ sec}^{-1} \\ (\text{p-Ps}) \Gamma_0 &= (7.9909 \pm 0.0017) \times 10^9 \text{ sec}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

寿命にして o-Ps は 142ns、p-Ps は 0.125ns であり、p-Ps は o-Ps に比べて短寿命で崩壊する。

2.2 磁場中でのポジトロニウムについて

今回の実験ではポジトロニウム生成箇所磁場に印加する。磁場中ではポジトロニウムの寿命が変化することが非常に重要となる。ここでは磁場中のポジトロニウムの振る舞いについて簡単に述べておく。[5]

磁場中でのポジトロニウムの運動は次式のシュレディンガー方程式で記述される。

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = H |\psi\rangle \quad (4)$$

$$H = H_0 + H_B \quad (5)$$

ここでのハミルトニアン H は磁場が存在しない状況下での崩壊も含めたハミルトニアン H_0 に磁場とスピンの相互作用による効果であるハミルトニアン H_B が加わった形をしている。具体的に H_B は、

$$\begin{aligned} H_B &= -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} \\ \boldsymbol{\mu} &= \boldsymbol{\mu}^- + \boldsymbol{\mu}^+ \\ &= -g^- \mu_B \mathbf{S}^- - g^+ \mu_B \mathbf{S}^+ \\ \mathbf{B} &= B \mathbf{e}_z \end{aligned}$$

となり、ここで μ_B はボーア磁子、 g^-, g^+ は電子・陽電子の g 因子で $g^- = -g^+ = 2$ である。また S^-, S^+ は電子・陽電子のスピンであり、磁場 B の方向は量子化軸と同じ z 軸にとった。

また、図 1 で示すスピン固有状態 $|S, m\rangle$ を以下のようにして基底にとる。

$$|1, 1\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |1, -1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, |1, 0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |0, 0\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

そこで上記のハミルトニアンをこの基底をによる表現で表すとそれぞれ以下ようになる。

$$H_0 = \begin{pmatrix} E_1 - i\frac{\hbar}{2}\Gamma_1 & & & \\ & E_1 - i\frac{\hbar}{2}\Gamma_1 & & \\ & & E_1 - i\frac{\hbar}{2}\Gamma_1 & \\ & & & E_0 - i\frac{\hbar}{2}\Gamma_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$H_B = g'\mu_B B \begin{pmatrix} 0 & & & \\ & 0 & & \\ & & 0 & 1 \\ & & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

これより磁場の存在は o-Ps の $m = \pm 1$ の状態に全く影響を与えないことがわかる。一方、 $|1, 0\rangle$ と $|0, 0\rangle$ の状態は磁場により混合されることになる。これから磁場の効果も含めた系全体のハミルトニアンの固有値問題を解くことにより、 $|1, 0\rangle$ と $|0, 0\rangle$ の混合後の状態 $|\psi_+\rangle, |\psi_-\rangle$ のもつエネルギーおよび崩壊確率は以下のように求めることができる。

状態	$ \psi_+\rangle$	$ \psi_-\rangle$	
エネルギー	$E_+ = E_1 + \frac{\hbar\omega_0}{4}x^2$	$E_- = E_0 - \frac{\hbar\omega_0}{4}x^2$	(9)
崩壊率	$\Gamma_+ = \Gamma_0 - \frac{1}{4}(\Gamma_0 - \Gamma_1)x^2$	$\Gamma_- = \Gamma_0 - \frac{1}{4}(\Gamma_0 - \Gamma_1)x^2$	

ここで、 $x = \frac{2g'\mu_B B}{\hbar\omega}$ のように置いた。この磁場により縮退が解ける様子を簡略図にして表したものが図 2 である。

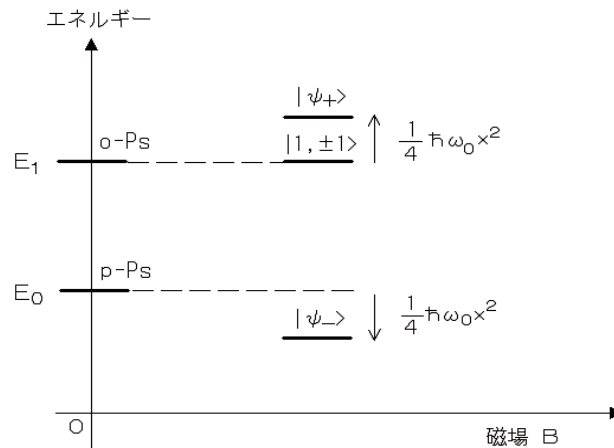


図 2: 磁場中におけるポジトロニウムのエネルギー準位の変化。 $|1, \pm 1\rangle$ の状態は磁場により変化しないが、 $|1, 0\rangle$ および p-Ps の $|0, 0\rangle$ の状態は混合を起こす。

今回の実験では混合後の状態 $|\psi_+\rangle$ の寿命 τ_+ と $|1, \pm 1\rangle$ の寿命 τ_1 の関係が重要になってくるが、 τ_+ を磁場の強さの関数としてみたのが図 3 である。今回のテスト実験での印加磁場 2.2kGauss 中における $|\psi_+\rangle$ 成分の寿命は 69ns となる。また $|\psi_-\rangle$ 成分の寿命は同様に 2.2kGauss 中で 0.125ns と圧倒的に短い。¹

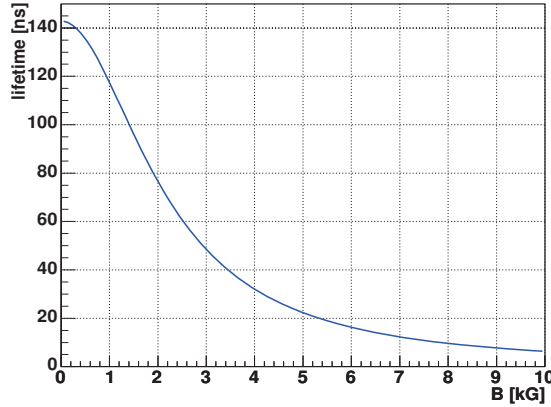


図 3: $|\psi_+\rangle$ の寿命と印加磁場強度の関係

2.3 o- $\text{Ps} \rightarrow 3\gamma$ CP 非保存崩壊

この節ではオルソポジトロニウムを用いて CP 非対称性を探る方法について議論する。オルソポジトロニウムは前述のように 3 本の γ 線に崩壊する。まずエネルギーの高い 線から順にその単位ベクトルを $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$ と表し²、またオルソポジトロニウムのスピンの向きは \vec{S} で表すことにする。これらを用いて記述される

$$C_{CP}(\vec{S} \cdot \vec{k}_1)(\vec{S} \cdot \vec{k}_1 \times \vec{k}_2) \quad (10)$$

という項を考える。ポジトロニウムの CP 変換に対する固有状態は

$$CP = (-1)^{S+1} \quad (11)$$

で決まるから [2]、オルソポジトロニウムに対しては 1 である。しかし最終状態の γ 線の方向を用いて記述される式 (10) の CP 変換に対する固有状態は -1 となる。すなわち $\text{o-}\text{Ps} \rightarrow 3\gamma$ の崩壊に式 (10) で書かれる項が寄与するのであれば CP 対称性が破れていることになる。つまりこの項の係数 C_{CP} を測定して、それが 0 でないことが証明されれば、この系で CP 対称性の破れを発見したことになる。ちなみに標準理論の範囲で、 C_{CP} はクォークセクターでの CP 対称性の破れの影響を受け、有限の値となるが 10^{-9} のオーダーでしかない。

¹ $\mu_B = 5.788 \times 10^{-11} [\text{MeV} \cdot \text{T}^{-1}]$, $g' = 2$ の値を用いた。

²以後はここで定義した単位ベクトル $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$ を用いて γ 線と呼ぶことにする。

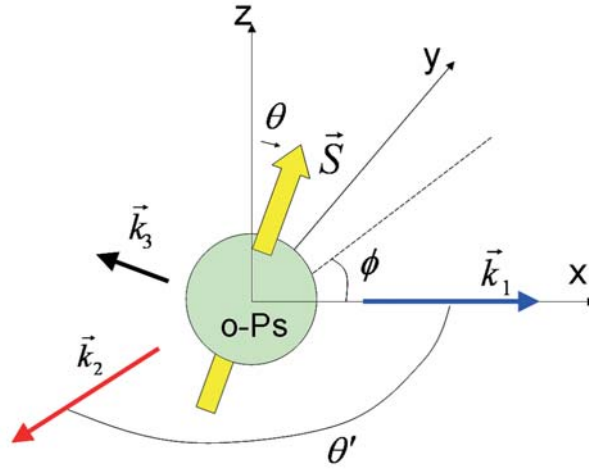


図 4: o-Ps \rightarrow 3 γ 崩壊の模式図

ではこの C_{CP} というパラメータをどのようにして測定するのか。もしパラメータ C_{CP} が有限の値をとるのであれば、o-Ps \rightarrow 3 γ 崩壊で放出される γ 線 \vec{k}_i の方向に次式で表される角度依存が生じる。

$$N = N_0(1 + C_{CP}Q) \quad (12)$$

$$Q = \frac{1}{2} \sin 2\theta \cos \phi \sin \theta' \quad (13)$$

式 (12) の第 2 項は CP を破る項 (10) 自身であり、角度については、 \vec{k}_1 の方向を x 軸、 \vec{k}_2 の方向を x-y 平面にもってきたときの o-Ps のスピン方向 \vec{S} の天頂角を θ 、方位角を ϕ 、そして \vec{k}_1 と \vec{k}_2 のなす角を θ' とした (図 4)。

ここで Q 値の絶対値が同じでちょうど逆符号になる 2 つの事象を取り上げるため、図 5 のような 2 通りの実験セットアップを考える。両者ともポジトロニウムの生成位置に磁場を印加し、周りに o-Ps \rightarrow 3 γ 崩壊で生じる γ 線を捕らえるための検出器を配置する。唯一異なる点は式 (13) で定義した磁石の方向 ϕ である³。左図のセットアップでの磁石の方向を ϕ とすると、右図では $\phi + 180^\circ$ となるようにセットアップを組む。式 (13) により、両者の Q 値は絶対値を同じにしてちょうど逆符号の関係にある。したがって、周りに配置した γ 線検出器でカウントしたイベント数 (左図: N_+ 、右図: N_-) は次式で表されることになる。(ここでは左図のイベントでの Q 値をとった。)

$$N_+ = N_0(1 + C_{CP}Q) \quad N_- = N_0(1 - C_{CP}Q) \quad (14)$$

これらのイベント数を正確に求め、下式のように非対称パラメータ A を計算することにより、 C_{CP} を求めることが出来る。

$$A = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} = C_{CP}Q \quad (15)$$

³磁石の向きにスピンの量子化軸をとるため、ここではスピンの方向と磁場の方向を同一視する。

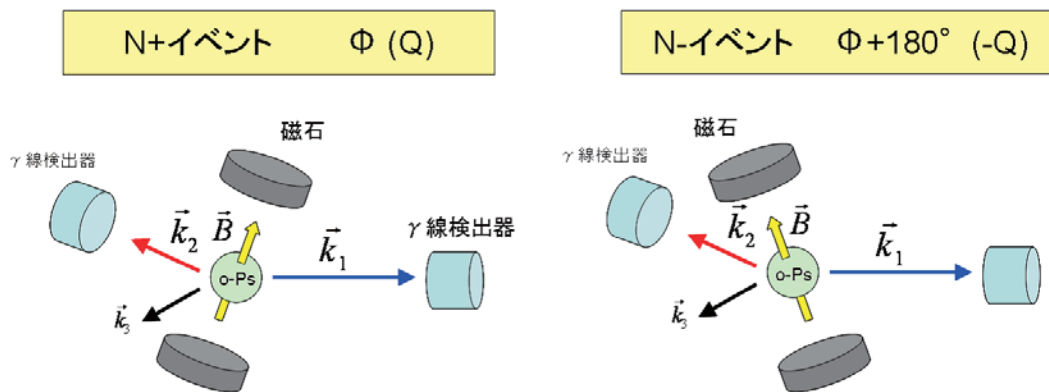


図 5: 実験原理概念図

現在までに行われた実験ではこの C_{CP} が 0 にコンシステントな量であることが、 10^{-2} の精度で検証されている。[6]

$$C_{CP} = -0.0056 \pm 0.0154 \tag{16}$$

現在装置の製作を進めている実験本番ではこの CP 非対称性を表すパラメータ C_{CP} に対する目標到達感度を、 10^{-3} に設定している。

3 実験方法およびプロトタイプ装置の製作

この章ではまず、設計思想を述べると同時に、今回製作をおこなったプロトタイプ装置における配置関係について紹介する。その後、装置細部の説明を、事前に行なった性能評価の結果と共に述べていく。また最後には、テスト実験で期待されるイベントレートについて見積もりを行なう。

3.1 設計思想

前章の最後で説明をおこなったように、この実験で必要となる主なものとして、以下の3つが挙げられる。

- ベータトリガーシステム (ポジトロニウム生成機構)
- γ 線検出器
- 磁場システム

この実験ではポジトロニウム生成を ^{22}Na とエアロジェルを用いて行なう。 ^{22}Na の β^+ 崩壊によって放出された陽電子はエアロジェル内で静止し、電子と結びつくことでポジトロニウム束縛状態を形成する。この実験ではポジトロニウムの崩壊時間を測定しなければならないが、ポジトロニウム生成時間は e^+ 放出によってタグする。そのため、プラスチックシンチレータを ^{22}Na とエアロジェルの間に挟み、そこからの光をライトガイドで光電子増倍管 (PMT) まで導き検出する。これら全てを含めた系全体をこの論文ではベータトリガーシステムと呼ぶことにする。

γ 線検出器は $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 崩壊で放出される \vec{k}_1 と \vec{k}_2 の γ 線を検出することを目的としている。この実験では測定したエネルギーによって \vec{k}_1 と \vec{k}_2 を正しく判別出来ることが必要となってくる。そこで今回、近年開発が進められてきた LYSO と呼ばれる高いエネルギー分解能をもつ無機シンチレータを使うことに決めた。

ポジトロニウム生成位置に印加する磁場が必要な理由は2つあり、1つは $o\text{-Ps}$ の $|1, \pm 1\rangle$ 状態と $|1, 0\rangle$ 状態の寿命による分離、そしてもう1つはスピンの量子化軸を決定することである。今回はネオジム磁石を2つ離して設置することでポジトロニウム生成位置に一樣な強磁場を作った。リターンヨークおよび、磁石を固定するためのホルダー部を全て含めた系をこの論文中では磁場システムと呼ぶことにする。

テスト実験のセットアップにおける、各装置の位置関係を図6に示す。この図は鉛直上方向からセットアップ見た様子を示している。図の中心位置でポジトロニウム生成を行い、それを睨むように LYSO 結晶でできた γ 線検出器を3台配置する。この3台の LYSO 検出器をこの論文では L1, L2, L3 と呼ぶことにし、どれも中心位置から LYSO 結晶表面まで 7cm の距離をもって固定する。後の便宜のため、軸の定義を行なう。ポジトロニウム生成位置を原点とし、L1 の置かれている方向を x 軸、LYSO 検出器が置かれている台と直行する方向を z 軸とし、鉛直上向きを正方向とする。残りの L2, L3 の配置位置は方位角にしてそれぞれ、 $\phi = 150^\circ$, $\phi = 210^\circ$ に配置している。またベータトリガーシステムを図のように y 軸方向に沿って配置し、ベータトリガー用 PMT は LYSO 検出器が固定してある台と同じ

く固定する。ベータトリガーシステム PMT のうち、 $\theta = 90^\circ$ 方向にあるものを PS-R、 $\theta = 270^\circ$ 方向にあるものを PS-L と呼ぶことにする。

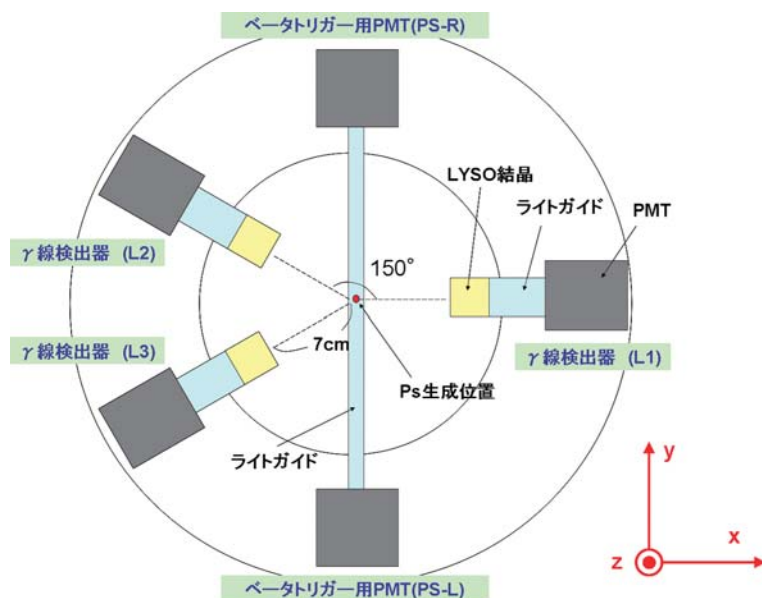


図 6: 検出器の配置関係 (上から見た図)

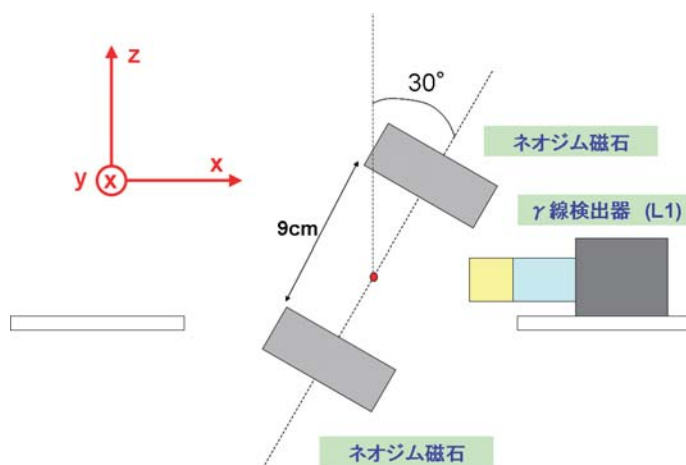


図 7: 磁石の配置方向との関係 (横から見た図)

次に磁石の配置方向について図示したものが図7である。今回テスト実験では、設定する2通りの磁石の方向を $(\theta, \phi) = (30^\circ, 0^\circ), (30^\circ, 180^\circ)$ にした。 C_{CP} の誤差を考える際、磁石の方向で決定される式(13)のQ値は出来るだけ大きな値が望ましく、このように決定した。

磁石の向きを変えたRUNを行なうことの利点

ベータトリガーシステムやLYSO検出器の配置位置はイベント数に大きな影響を及ぼす(第5章参照)。そのほか、線源の密度分布やLYSO検出器の個体差もイベント数に変化を及ぼすと予想される。したがって、同じ位置関係および同じLYSO検出器を用いて測定を行い、非対称パラメータをとることが望ましい。原理的にはQ値の絶対値が等しく逆符号の関係にある2つのイベント同士であれば、パラメータ C_{CP} を求めることが出来る。例えば、 $\phi = 180^\circ$ のRUNのみでも以下の(i),(ii)のイベントの非対称パラメータAを計算することにより、 C_{CP} を求めることは可能である。

- (i) $\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$
- (ii) $\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L3$

しかしこの場合、 \vec{k}_2 用の検出器をL2,L3と異なるものにとるため、線源の位置決め精度や検出器L2とL3の個体差が両者のイベント数の差に影響を及ぼしてしまう。そこで今回の実験では、磁石を $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ の2種類のセットアップを組むことにした。(図8)こうすることで、 $0^\circ, 180^\circ$ のRUNそれぞれで(i)となるイベントはちょうどQ値が逆符号の関係にあり、 C_{CP} パラメータをとることが可能となる。

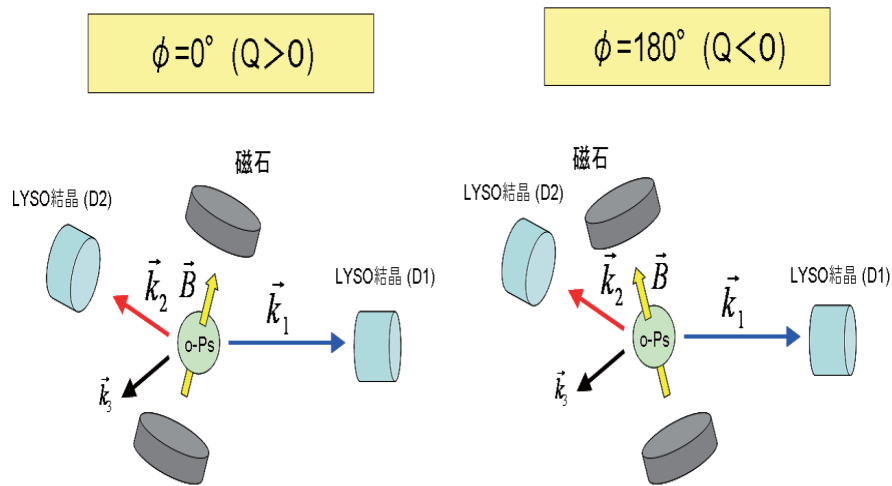


図8: 0° と 180° のRUN。同じ位置関係および同じ検出器同士で C_{CP} を導出することが可能。

つまり、このように磁石の向きを変えて測定を行なうことで、同じ位置関係および同じ検出器同士で測定による C_{CP} の導出が可能であり、線源の位置調整および密度分布の偏り、また検出器の個体差

からくる系統誤差を除去することができる。

図9は $(\theta, \phi) = (30^\circ, 0^\circ)$ 方向に磁石を配置した実際のセットアップの様子である。アルミ製の枠組みにLYSO検出器およびベータトリガーシステムを乗せたアクリル板を固定した。磁場システムに関しては、リターンヨーク部分に穴を開け、アルミ製の枠組みにボルトで装着している。装置のセットアップを考える際、ポジトロニウム生成位置での磁場が乱れないように、周りの装置は極力、非磁性の物質で製作する必要があった。

今回のセットアップでの位置決め精度については、磁石の方向 θ に関して、 $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ のどちらのセットアップにおいても

$$\theta = 30.0 \pm 0.1^\circ \quad (17)$$

である。また2つの磁石の中心位置に対する、先程定義した軸の原点の相対座標は、 $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ のセットアップでそれぞれ以下の通りである。

$$\begin{aligned} 0^\circ : (x, y, z) &= (0.5 \pm 0.5, 0.6 \pm 0.5, -0.1 \pm 0.5) \\ 180^\circ : (x, y, z) &= (0.9 \pm 0.5, 0.9 \pm 0.5, 0.5 \pm 0.5) \quad (\text{単位は mm}) \end{aligned} \quad (18)$$

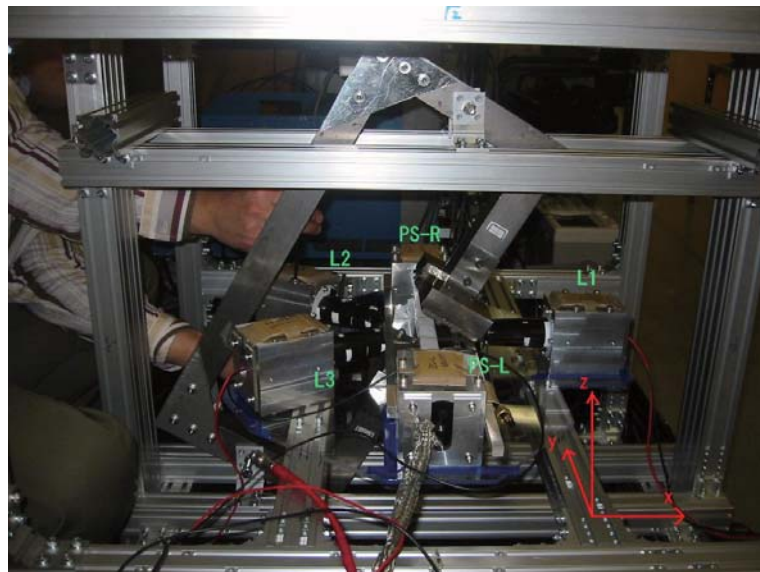


図9: プロトタイプ装置の全体写真。 $(\phi = 0^\circ$ 方向でのセットアップ)

以下この章では装置細部の説明と事前に行なった性能評価について述べていく。

3.2 ベータトリガーシステム

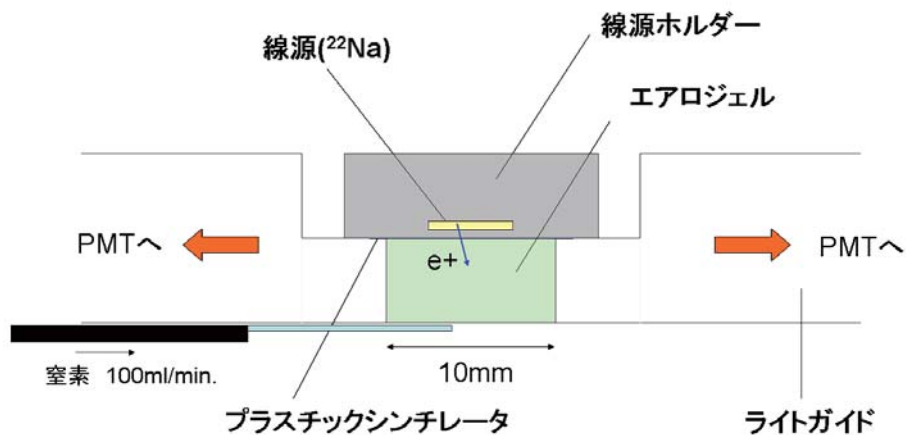


図 10: ベータトリガーシステムの設計図

ベータトリガーシステムの設計

ベータトリガーシステムの設計図を図 10 に示す。ポジトロニウム生成は ^{22}Na の β^+ 線源を用いて行なう。 β^+ 崩壊によって放出された陽電子はエアロジェルターゲット内 (ϕ 10mm \times t 5mm、密度 \sim 0.11g/cm³) で静止し、電子と結合してポジトロニウムを形成する。 ^{22}Na 線源とエアロジェルターゲットの間には 0.1mm の薄いプラスチックシンチレーター (ϕ 12mm \times t 0.1mm) が挟んであり、 e^+ 放出をタグできる仕組みになっている⁴。プラスチックシンチレーターからの光は両側に配置したアクリル製のライトガイドによって光電子増倍管 (浜松ホトニクス株式会社製 型番 H6614-70) まで導かれ検出される。ここで ^{22}Na の崩壊チャートおよび放出される e^+ のエネルギースペクトルを図 11・図 12 に示す。 ^{22}Na は半減期 2.602 年で ^{22}Ne へ崩壊していくが、主な崩壊過程で e^+ と 1275keV の γ 線が放出される。放出される e^+ は EndPoint が 545keV のエネルギースペクトルを持ち、ピークは 180keV 付近に位置する。

今回使用する線源は現在 17.4kBq の強度を持つものである。また、生成されたオルソポジトロニウムは、生成箇所に存在するガスやターゲット物質による影響で、崩壊するよりも前に電子と反応してしまう場合がある。このピックアップと呼ばれる現象を抑えるために、エアロジェルへ向けて、窒素を 100ml/min. で流し込むようにしている。

⁴このプラスチックシンチレータの中心が前節で定義した軸の原点である。

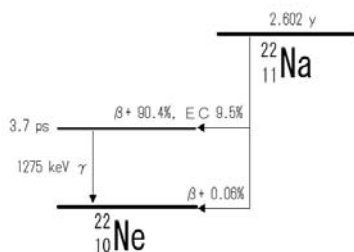


図 11: ^{22}Na 崩壊チャート

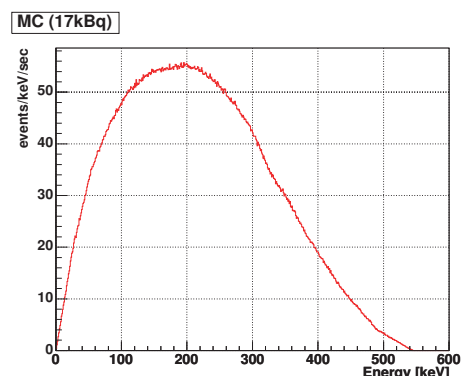


図 12: Geant4 シミュレーションで用いた ^{22}Na 線源 β^+ のエネルギースペクトル

Geant4 シミュレーション

放出された e^+ がプラスチックシンチレータでどのくらいのエネルギーを落とすか見積もるために、Geant4[7] を用いてシミュレーションを行なった。具体的には線源ホルダー、プラスチックシンチレータ、エアロジェル、アクリル製ライトガイドの構造を入れ、線源封入部である $\phi 5\text{mm} \times t 0.5\text{mm}$ の領域内でランダムな位置から、図 12 のエネルギー分布に従う e^+ を 4π ランダムな方向に放出させた。ここでは e^+ がプラスチックシンチレータで落とすエネルギーおよび e^+ 静止位置について調べた。プラスチックシンチレータに e^+ が落としたエネルギーをヒストグラムにすると図 13 になる。24keV 付近にピークが存在していることがわかる。

また、放出された e^+ は最終的にどこで静止するかについても評価を行った。図 14 は横軸をプラスチックシンチレーターで落としたエネルギーにとり、最終的にどこで静止したかについて「エアロジェル」、「プラスチックシンチレーター」、「その他」の 3 種類に分類してヒストグラムにしたものである。「その他」のヒストグラムのピークが存在する 20keV をスレッシュホールドに設定すると、スレッシュホールドを超えるイベントのうち 38.9% のイベントがエアロジェル内で静止することがわかった。

最後に Geant4 によるシミュレーションで評価した、このベータトリガーシステムの効率 (全 e^+ 放出イベントに対する割合) を下表にまとめておく。プラスチックシンチレータに 20keV 以上の Deposit があり、かつエアロジェル内で静止するイベントは、全 e^+ 放出イベントのうち 12.5% であることがわかった。

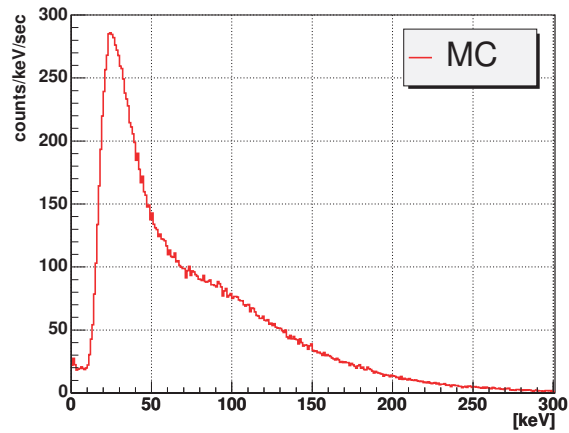


図 13: プラスチックシンチレータで落としたエネルギーの分布

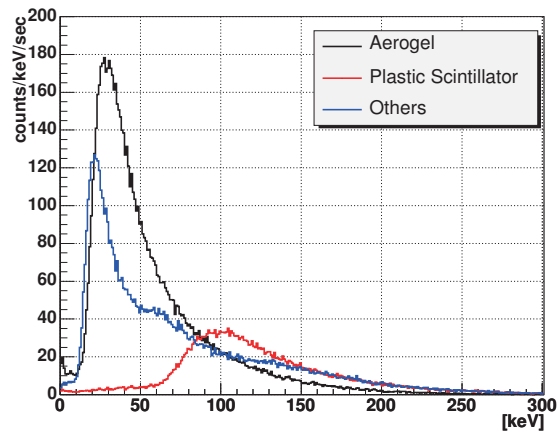


図 14: e^+ s 静止箇所別のエネルギー分布

表 1: Geant4 で評価したベータトリガーシステムの効率

①	プラシンで 20keV 以上の Deposit	32.1%
②	エアロジェル内で静止	13.1%
③	①かつ②	12.5%

ベータトリガーシステム予備実験

事前に LED を用いて、ベータトリガーシステムで使用する PMT(PS-R,PS-L) の性能評価を行なった。その結果、今回ベータトリガーシステムの光量を調べる際に印加した HV 設定 (PS-R:1.9kV, PS-L:1.8kV) では、1p.e. のピークが、チャージ積分型 ADC (林栄精器株式会社製 RPC-022) のチャンネル値で、表 2 のような値に得られた。

PMT	印加電圧	1p.e. ピーク値
PS-R	1.9kV	11.3ch
PS-L	1.8kV	10.9ch

表 2: ベータトリガーシステム用 PMT の性能。ADC で測定した 1p.e. のピークチャンネル値を示す。

LED を用いた性能評価後、この PMT にライトガイドを取り付け、プラスチックシンチレータでの発光を検出し、このベータトリガーシステムで得られる光量を調べた。このときの様子を図 15 の写真に示す。LYSO 検出器を配置しているが、この予備実験時には使用していない。

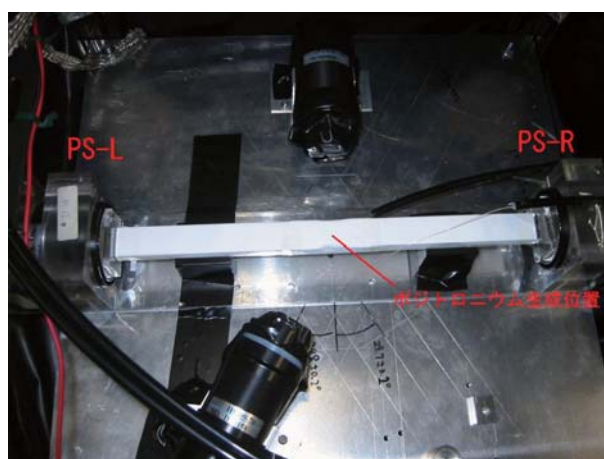


図 15: ベータトリガーシステム予備実験の様子

先程と同様のチャージ積分型 ADC を用いて光量を測定するが、トリガーのタイミングは双方の PMT からのシグナルを Discriminator (スレッシュホールド約 1p.e. に設定) に通した後の出力信号 (幅 20ns) のコインシデンスでかけるようにした。図 16 は ADC チャンネル測定値の 2 次元プロットであり、図 17 は各 PMT からのシグナルによる ADC 測定チャンネル値、および両者を足し合わせた値の 1 次元ヒストグラムである。ここで PMT-1, PMT-2 はそれぞれ PS-R, PS-L を示す。現在の設定状況下で、表 2 より 1p.e. ピークのチャンネル値は双方の PMT で差がないことから 1p.e. = 22.2ch であったとする。PMT からのシグナル両者を足し合わせた分布のピークは 235ch であり、10.6p.e.

に相当することがわかる。したがって先程のシミュレーション結果でこのピークは 24keV にあったことを考慮すると、このベータトリガーシステムでは光量が

$$1 \text{ p.e.} = 2.3 \pm 0.2 \text{ keV}$$

であることが求まる。ここでの付与している誤差はピーク位置を決定の不定性からつけたものである。

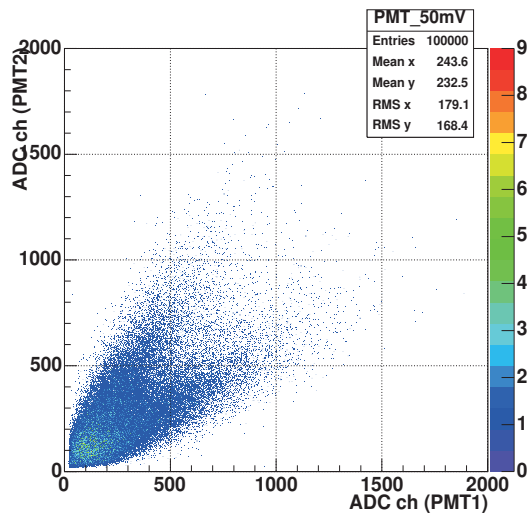


図 16: ベータトリガー用 PMT で検出された、 e^+ がプラスチックシンチレータで落としたのエネルギーの分布 (実測 2次元)

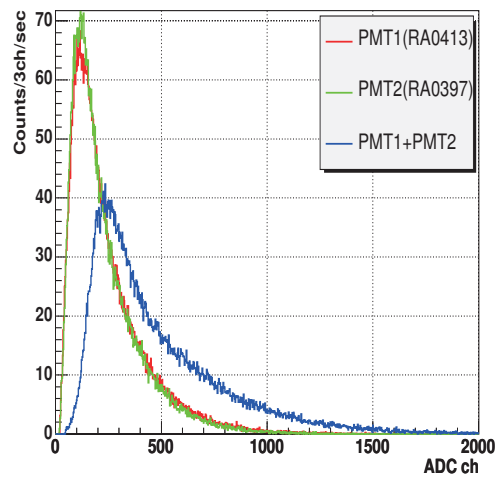


図 17: ベータトリガー用 PMT で検出された、 e^+ がプラスチックシンチレータで落としたのエネルギーの分布 (実測 1次元)

今回のベータトリガー設計では、両側に取り付けた光電子増倍管のコインシデンスによりトリガーをかける回路を構築した。そこでプラスチックシンチレーターで発光があった後に、両側の光電子増倍管でそれぞれ少なくとも1光子が検出され、トリガーがかかる確率をポアソン分布で評価する。このベータトリガーシステムの1光電子生成平均エネルギーを $E_{p.e.}$ とすると、 e^+ がプラスチックシンチレーターに $E_{dep}[\text{keV}]$ のエネルギーを落とした場合、片方の光電子増倍管で検出される光子数の分布は次のポアソン分布で与えられる。

$$f(n, \mu = E_{dep}/E_{p.e.}) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \quad (19)$$

したがって両側の光電子増倍管でそれぞれ少なくとも1光子以上が検出される確率は $E_{p.e.} = 2.3\text{keV}$ として、

$$P = \{1 - f(0, E_{dep}/E_{p.e.})\}^2 \quad (20)$$

$$= \{1 - \exp(-E_{dep}/2.3)\}^2 \quad (21)$$

となる。これをグラフにして表したのが図 18 である。

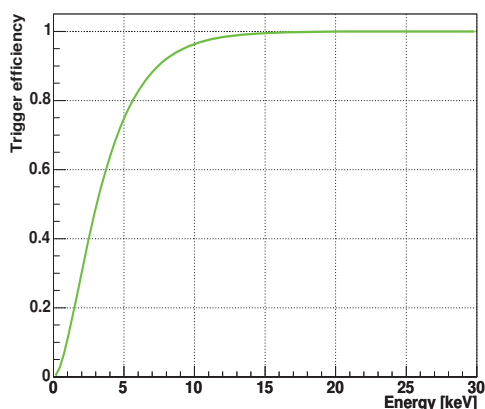


図 18: コインシデンスによるトリガー効率

e^+ のプラスチックシンチレーターで落とすエネルギーのピークは 24keV 付近であるが、この領域ではほぼ 100%での確率で問題なくトリガーをかけることができる。

3.3 γ 線検出器 (LYSO 結晶)

$o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ の崩壊微分断面積は次式で与えられる。[8]

$$d\sigma \propto \left[\left(\frac{m - \omega_1}{\omega_2 \omega_3} \right)^2 + \left(\frac{m - \omega_2}{\omega_1 \omega_3} \right)^2 + \left(\frac{m - \omega_3}{\omega_2 \omega_1} \right)^2 \right] \delta(\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3) \delta(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - 2m) \frac{d^3 p_1 d^3 p_2 d^3 p_3}{\omega_1 \omega_2 \omega_3} \quad (22)$$

ここで m は電子の質量、 ω_i 、 \vec{p}_i は i 番目にエネルギーの大きい γ 線のエネルギー、運動量を表す。この式に従う $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ の分布は図 19 のようになる。おおよそ ω_1 は 340 ~ 511keV、 ω_2 は 260 ~ 511keV の領域に分布する。今回の実験ではこの 1 番目と 2 番目のエネルギーの γ 線を検出し、イベントの振り分けを行なうことになる。

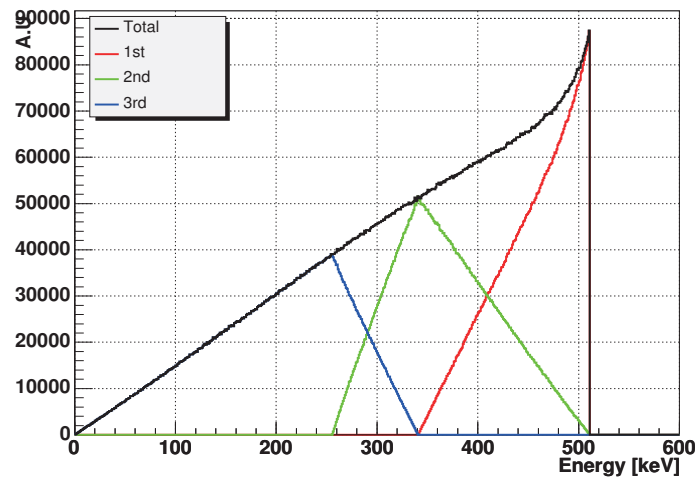


図 19: $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 事象で放出される γ 線のエネルギー分布

このようなエネルギー分布をする γ 線を検出するのに、最近実用化に向け開発が進められきた比較的新しい無機シンチレータ LYSO(組成式 $Lu_{1.8}Y_2SiO_5 : Ce$) を使用する。性能を NaI(Tl) との比較して表 3 に示す。[9]

この LYSO 結晶は、 Z が大きく高いエネルギー分解能を有しており、かつ発光の減衰時間が短いことから理想的な γ 線検出器の物質として注目されている。今回は SaintGobain 社の PreLude420 $\phi 3\text{cm} \times t 3\text{cm}$ の結晶を用意し実験に用いる (図 20)。

以下はこの結晶の性能評価の結果について述べていく。

	NaI(Tl)	LYSO
密度 [g/cm ³]	3.67	7.10
attenuation length[cm] (511keV)	3.0	1.2
光量 [photons/keV]	38	32
屈折率	1.85	1.81
最大放出波長 [ns]	415	420
減衰時間 [ns]	250	40

表 3: NaI(Tl) と LYSO の性能比較



図 20: LYSO 結晶と高磁界用光電子増倍管

– シグナル波形 –

まず始めに示すものは高磁界用光電子増倍管（浜松ホトニクス株式会社製 型番 H8409-70）に接着して、 γ 線を検出した際のシグナルをオシロスコープで観測した様子である（21）。減衰時間非常に短く約 40ns であり、高統計の実験に適している。

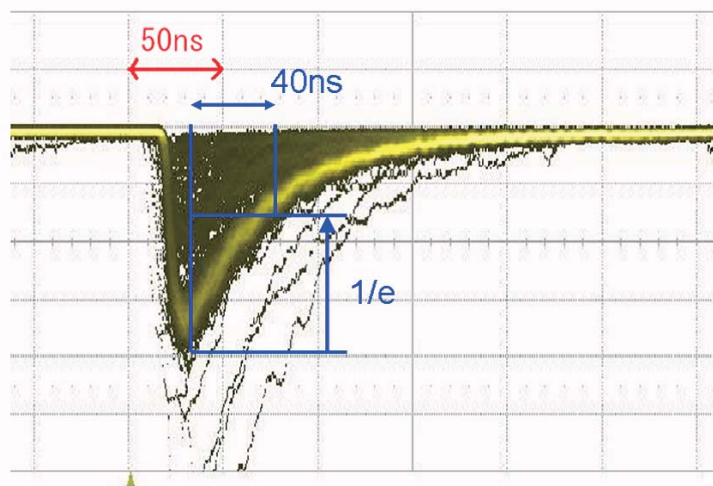


図 21: オシロスコープで観測した LYSO 結晶からの波形

– エネルギー分解能と時間分解能 –

次にエネルギー分解能と 2 つの LYSO 結晶の間の時間分解能について調べた。エネルギー分解能の評価は放射性同位体元素 ^{137}Cs からの 662keV γ 線を用いて評価した。662keV で FWHM にして 10.5% の高いエネルギー分解能が得られた。（図 22）
また時間分解能については、2 つの LYSO 結晶を向かい合わせて配置し、511keV back-to-back の γ 線を用いてその LYSO 結晶両者の時間差の揺らぎを評価した。図 23 は片側に 511($\pm 1\sigma$)keV を要求した時の、もう一方で測定されるエネルギーと両者間の時間分解能の関係を示している。両方の LYSO 結晶でそれぞれ 511keV のエネルギーを落とした場合、両者間の時間分解能は 200ps 以下を実現できることがわかった。

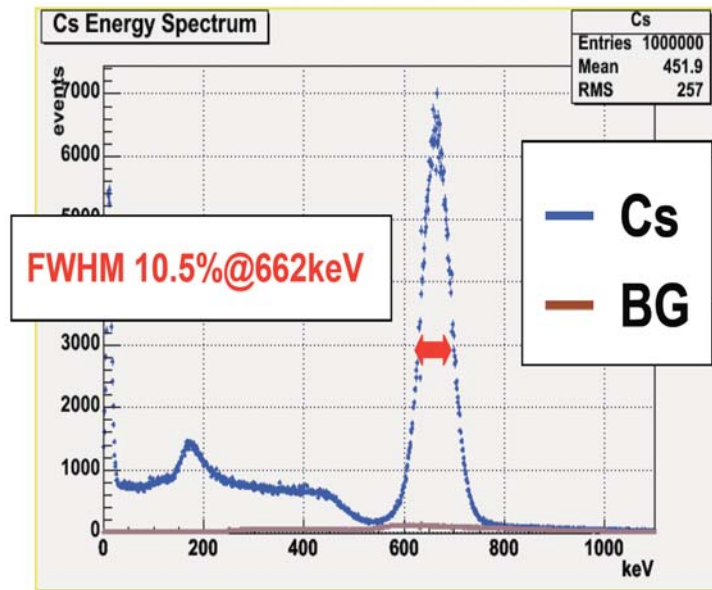


図 22: ^{137}Cs を用いて測定したエネルギー分布。662keV で 10.5%(FWHM) のエネルギー分解能を有する。

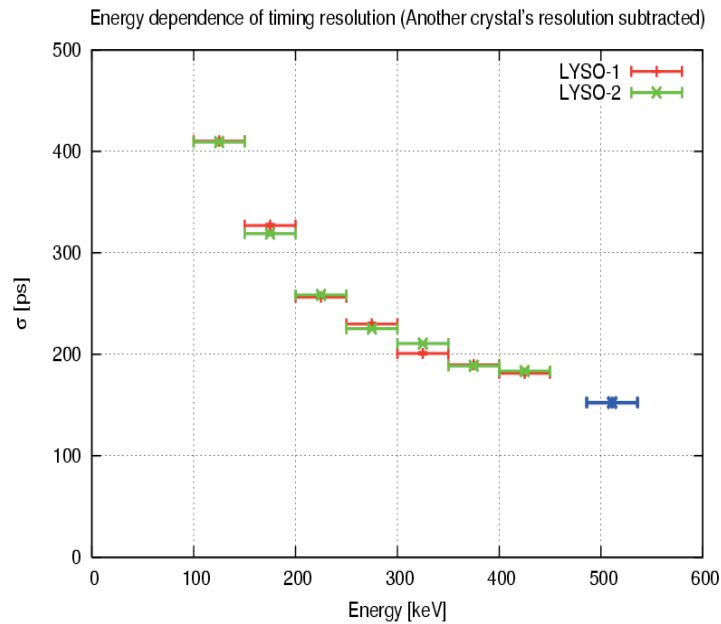


図 23: 511keV back-to-back の γ 線を用いて時間分解能を評価したグラフ。片方の LYSO 結晶で 511($\pm 1\sigma$)keV を要求した際の、もう一方の LYSO 検出器におけるエネルギーと時間分解能の関係を示している。

-¹⁷⁶Lu によるバックグラウンド -

しかし、このように理想的な無機シンチレータ LYSO であるが、注意しなければならない事項がある。LYSO の成分である Lu には天然存在比 2.61% で放射性同位体 ¹⁷⁶Lu が存在することが知られている。この ¹⁷⁶Lu は半減期 3.79×10^{10} 年で ¹⁷⁶Hf へ β^- 崩壊をする。この崩壊チャートを図 24 に示す。先程と同じ PMT(型番 H8409-70) に接着し、他に何も放射線源を置かず ¹⁷⁶Lu によるバックグラ

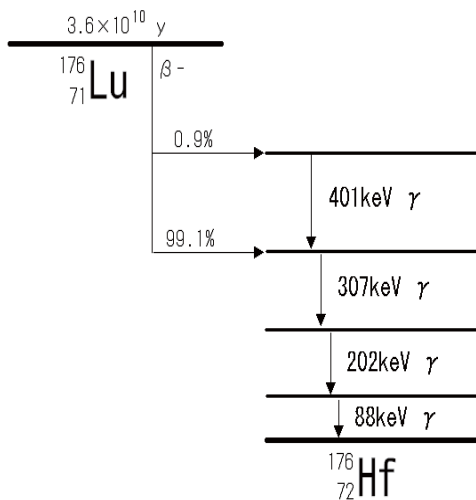


図 24: ¹⁷⁶Lu 崩壊チャート

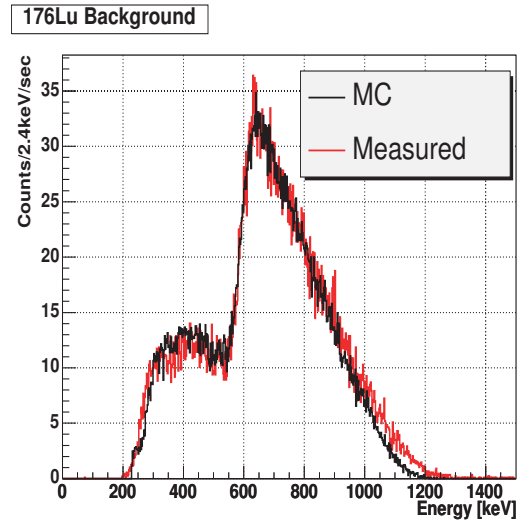


図 25: ¹⁷⁶Lu 崩壊によるバックグラウンド分布

ウンドのみをチャージ積分型 ADC を用いて計測した。このとき得られるエネルギー分布を図 25 に示す。計測されたレートは 5.65kHz で、¹⁷⁶Lu の天然存在比から計算した値 5.44kHz と非常によく一致している (スレッシュホールド 200keV)。このバックグラウンドの形状について、600keV 以上の領域は、図 24 の ¹⁷⁶Lu の崩壊後に放出される全ての γ 線が LYSO 結晶内で吸収され、それに β^- の連続スペクトル (Endpoint=565keV) がのった形をしている。それより低い領域での構造は、一本または複数の線が結晶外へ逃げて、残りの γ 線と β^- のエネルギーが合わさっている形である。

- γ 線検出器配置-

$o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 崩壊で放出される γ 線間の角度分布を図 26 に示す。黒線は \vec{k}_1 と \vec{k}_2 のなす角の分布で、その他は赤線で \vec{k}_1 と \vec{k}_3 のなす角、緑線で \vec{k}_2 と \vec{k}_3 のなす角を示す。横軸の単位は $[\circ]$ である。 \vec{k}_1 と \vec{k}_2 のなす角は 120 度以上の領域に分布している。

今回の実験では \vec{k}_1 と \vec{k}_2 を検出し、イベントの識別を行なうことを目的とするため、原点から 2 つの LYSO 検出器への方向がなす角度は 150° にして設置した。この角度に設置すれば、原点から放出された γ 線で、およそ $125^\circ \sim 175^\circ$ をなす角のものについて検出可能である⁵。また、ポジトロニウム生成位置から LYSO 結晶の表面までの距離は 7cm にしてある。(図 6)

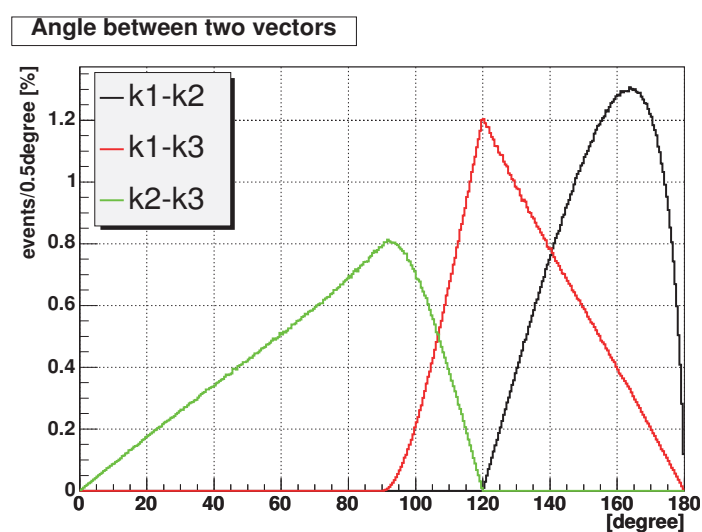


図 26: $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 事象で放出される γ 線同士のなす角度の分布。黒線: \vec{k}_1 と \vec{k}_2 のなす角度。赤線: \vec{k}_1 と \vec{k}_3 のなす角度。緑線: \vec{k}_2 と \vec{k}_3 のなす角度。

⁵ 150° の位置に配置すれば、原点における 2γ 現象からの γ 線を、同時に 2 つの LYSO 検出器で直接検出することは幾何学的にない。今回このようにして 150° という角度を設定したが、実際にはポジトロニウム崩壊位置の広がり を考慮した場合、 2γ 現象も検出されるようになり、テスト実験でも 511keV 同士のピークが存在している。(図 56,57 参照)

Energy Window (EW) の定義

データ解析でシグナルとなるイベント数をカウントする際、LYSO 検出器で測定された γ 線を、エネルギーによって \vec{k}_1 、 \vec{k}_2 のどちらであるか識別する必要がある。

そこで、2つのLYSO 検出器で γ 線がエネルギー落とし、1つ目のLYSO 検出器で E_1 、2つ目のLYSO 検出器で E_2 のエネルギーが測定されたとする。このとき E_1, E_2 が下記の条件を満たした場合、このイベントは1つ目のLYSO 検出器で \vec{k}_1 、2つ目のLYSO 検出器に \vec{k}_2 が検出されたシグナルイベントであるとしてカウントする。

$$400\text{keV} < E_1 < 500\text{keV} \quad (23)$$

$$300\text{keV} < E_2 < 400\text{keV} \quad (24)$$

$$E_1 > E_2 + 50\text{keV} \quad (25)$$

ここで式 (23),(24) の条件は γ 線のエネルギー分布から決定したもので、式 (25) は検出器の効果で実際の \vec{k}_1 と \vec{k}_2 を、入れ替えてカウントしてしまう可能性を除去するために課すものである。

このイベントセレクションで選ばれるエネルギー領域を Energy Window(EW) と呼ぶことにする。2つのLYSO 検出器による1つのペアを考えた場合、どちらを \vec{k}_1 用の検出器とみなすかによって2種類の Energy Window が存在することになる。

3.4 磁場システム

今回はネオジム磁石 ($\phi 90\text{mm} \times t 20\text{mm}$ 、表面磁束密度 3.7kGauss) を 2 つ用意し磁場システムを構築する。設計の簡略図を図 27 に示す。設計にあたり、周りの LYSO 検出器などと干渉しないこと、そしてポジトロニウム生成位置から LYSO 結晶までの γ 線の通り道を塞がないことを前提に、極力強い磁場をポジトロニウム生成位置でかけられるようにした。そのために印加部と反対の方向に伸びる磁束を集めてやるリターンヨーク、そして印加部に磁束を収束させて強度を上げる収束コーンを取り付けた。どちらも鉄で製作した。この磁場システムを鉛直方向から天頂角を 30° 傾けて ($\theta = 30^\circ$)、方位角としては $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ の 2 通りのセットアップを組む。(図 6,7 で定義した座標系を参照。)

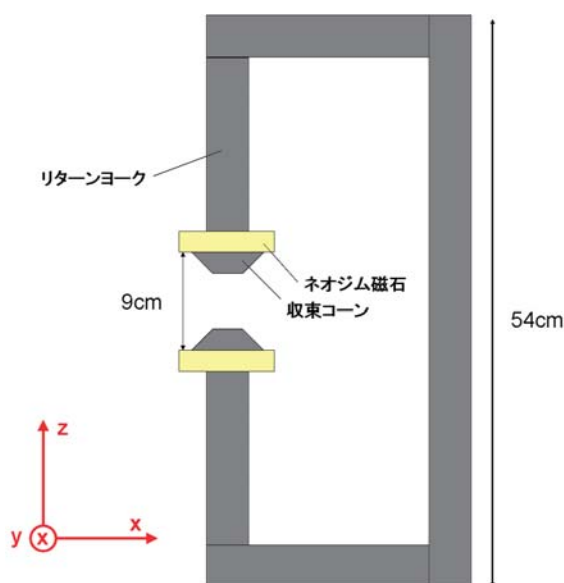


図 27: 磁場システム設計図

以下では、この磁場システムでの磁場分布について議論していくが、以後この節に限り、図 27 にあるような座標系をとることにする。このとき原点は磁石間の中心に設定する。この磁場システムを設計するに当たり、解析ソフトウェア ANSYS を用いて有限要素磁場計算を行った。ANSYS によって得られる磁場強度分布を図 28 に示す。これは x - z 平面上での磁場強度 $|B|$ を $-y$ 方向からみたものであり、中心部では 2.12kGauss 、そして半径 5mm 以内では 2.4 パーセントの一樣性となる。また LYSO 検出器やベータトリガシステムの PMT 配置位置では約 $50 \sim 100\text{Gauss}$ の磁場がかかることになる。これは高磁界用 PMT である H8409-70 ,H6614-70 で十分動作可能な磁場強度である。

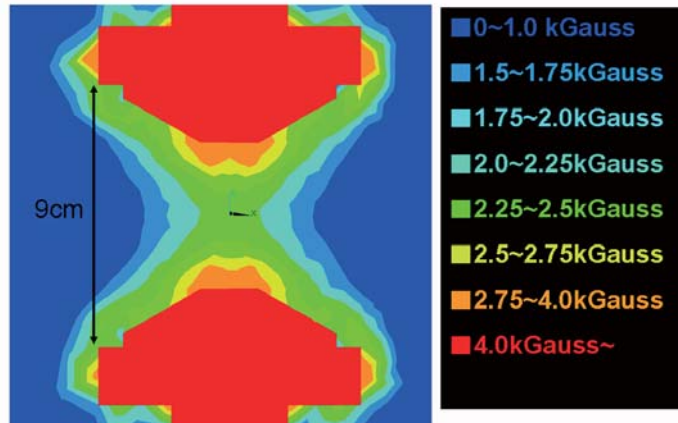


図 28: ANSYS での計算結果。x-z 平面における $|B|$ 分布。中心で 2.12kGauss。

この磁場システムの製作後、実際にガウスメーター (HIRST MAGNETIC INSTRUMENTS LTD 製 GM04) を用いて磁束密度を測定した。その様子を図 29 に示す。方眼紙を貼り付けた水平なアルミ板を磁石中心に設置して、ガウスメーターのセンサー部を 5mm 間隔で移動させることで、磁石間の中心である x-y 平面における B_z 成分を測定した。また、磁場印加部付近拡大写真を図 30 に示す。ネオジウム磁石はステンレス製のホルダーで固定され、収束コーンをそのホルダーに取り付けている。

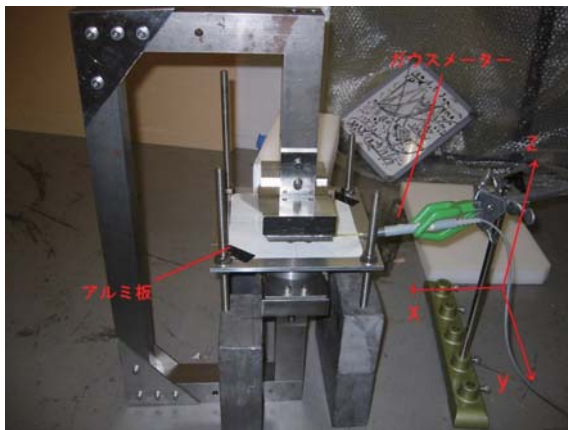


図 29: 磁場システム全体写真 (磁場測定の様子)

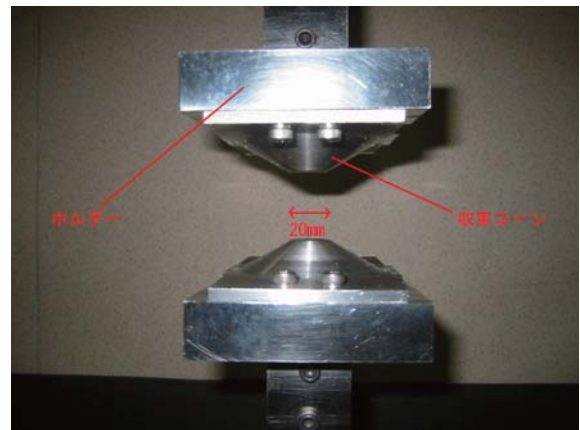


図 30: 磁場印加部分拡大写真

磁束密度を測定した結果を図 31 に示す。この図は、磁石間中心である $z=0\text{mm}$ の x-y 平面における

y 軸に沿った B_z 分布である。ここで付与している誤差は、横軸方向に関してはガウスメーターでの位置決定精度によるものであり、縦軸に関しては磁場システムの組み立てによるアライメント精度で生じるものを見積もって付けたものである。実測では中心部で 2.171kGauss となり、ANSYS の計算結果と 2.2 パーセント程度以内でほぼ再現できていることがわかる。

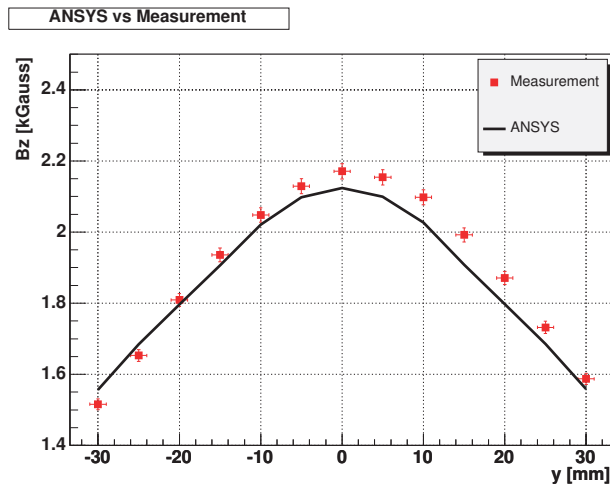


図 31: ANSYS 計算と実測の比較。z=0mm の x-y 平面で y 軸に沿った B_z 分布。横軸は y 座標にとる。

Timing Window (TW) の定義

ポジトロニウムに磁場を印加すると、o-Ps の縮退は解け、 $|1, \pm 1\rangle$, と $|\psi_+\rangle$ の状態が存在するようになる。この実験ではこれらのうち $|1, \pm 1\rangle$ 成分のみを使用したい。そこで、寿命の違いによってこれらを分離することを考える。

実際の測定では、ベータトリガーシステムで e^+ 放出がタグされた時間を「ポジトロニウム生成時間」とし、また LYSO 検出器で γ 線が検出された時間を「ポジトロニウム崩壊時間」とする。そして両者の時間差をとることでポジトロニウムの崩壊時間を求める。

今回分離したい $|1, \pm 1\rangle$, と $|\psi_+\rangle$ は寿命がそれぞれ 142ns と 69ns であるから、得られたデータに対し崩壊時間として 100~270ns であるものを選択することにする。この崩壊時間の領域を Timing Window(TW) と呼ぶ。

100~270ns という設定は、本来は最適化を行なわないといけないものであるが、既に行なわれている、参考文献 [6] での実験で使われた 100 ~ 270ns という設定を引用することにして、この論文では議論を進める。

今回製作したプロトタイプの磁場システムにおいて、 $|1, \pm 1\rangle$ と $|\psi_+\rangle$ の状態が、どの程度分離できるかについて議論する。図 32 は TW 内に崩壊する o-Ps 崩壊の数を、全 o-Ps 崩壊に対する割合にして、横軸印加磁場の関数でみたものである。今回の 2.17kGauss の磁場中では 30.3 パーセントになる。(ここでは、 $|1, \pm 1\rangle$ と $|\psi_+\rangle$ の両成分を含んでいる。)

また図 33 は TW 内で崩壊した事象のうち、 $|1, \pm 1\rangle$ と $|\psi_+\rangle$ 成分がそれぞれ何%あるか、横軸磁場の関数としてみたもので、赤線が $|1, \pm 1\rangle$ 成分、青線が $|\psi_+\rangle$ 成分を示す。(あわせると 100%である。)

今回の 2.17kGauss の磁場中で $|1, \pm 1\rangle$ 成分は 75.8 パーセント、 $|\psi_+\rangle$ 成分は 24.2 パーセントとなる。

以上から全 o-Ps 生成のうち $|1, \pm 1\rangle$ 成分である欲しいイベントは全 o-Ps 生成に対して、

$$0.303 \times 0.758 = 23.0\% \quad (26)$$

であると求めることができる。

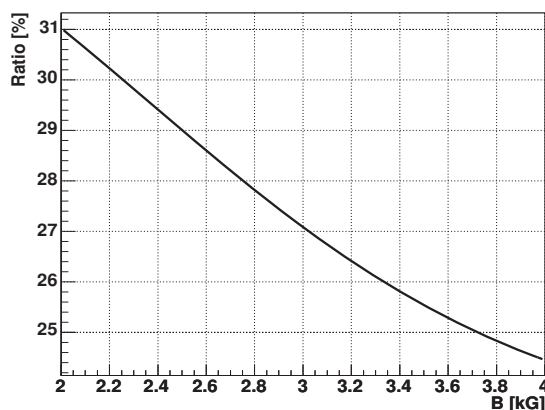


図 32: 全 o-Ps 事象のうち崩壊時間が TW 内 (100ns~270ns) で崩壊する o-Ps の割合

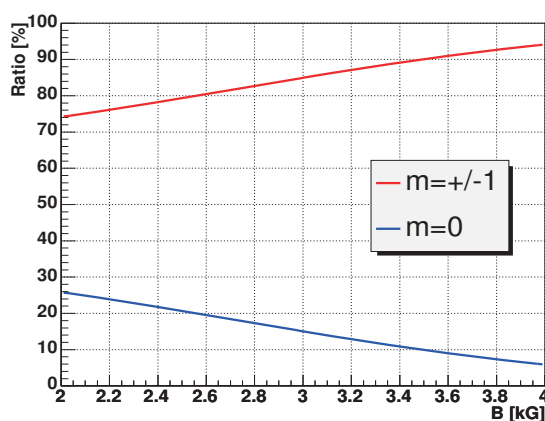


図 33: TW 内に崩壊する o-Ps の $|\psi_+\rangle$ と $|1, \pm 1\rangle$ との比率

3.5 データ取得回路構築

ここではデータ取得のために組んだ回路について説明する。実際に組んだ回路の簡略図を図 34 に示す。まずベータトリガーシステムの PMT(PS-R,PS-L) でプラスチックシンチレータからの光を検出し、幅 20ns でコインシデンスをとったあと、幅 500ns のパルスを出すようにしている。またこれとは別に LYSO 検出器からのシグナルのどれか 1 つでもあると、FANIN/FANOUT モジュールより 50ns のパルスを出すようにしている。これらベータトリガーのコインシデンスと LYSO からのシグナルとでコインシデンスをとることにより、最終的なデータ取得のトリガーとし GateGenerator から ADC ゲート (幅 500ns) と TDC スタートのパルスを送る。取得するデータについては以下の 11 種類である。

- ADC チャンネル値 (林栄精器株式会社 RPC-022 12bit)
 - プラスチックシンチレータ × 2
 - LYSO 検出器 × 3
- TDC カウント値 (TECNOLAND CORPORATION C-TS 102 12bit)
 - プラスチックシンチレータ × 2
 - LYSO 検出器 × 3
- LiveTime(TECNOLAND CORPORATION 4ch 80MHz Scaler C-TS 203)

今回使用した CAMAC モジュールを () 内に示しておく。LiveTime については、1MHz の CLOCK をスケーラーに入れ、veto 解除から次のデータ取得のトリガーがかかるまでの時間を記録する。最後に ADC に入れたゲートまたは TDC のスタートと、delay によって調節したそれぞれのシグナルとの時間関係について説明する。いま、ADC のゲート生成および TDC のスタートは LYSO 検出器からのシグナルのタイミングでとることにしている。例えば e^+ がプラスチックシンチレータを発光させた直後に (数 ns 以内で) 2γ 事象が起こり、L1 で γ 線が検出されたイベントでは、ADC ゲートと各検出器からのシグナルとの時間関係は、オシロスコープで観測すると図 35 のようになる。L1 のタイミングでトリガーがかかり、delay 調節より PS-R のシグナルは設定した 500ns のゲート内の極力後ろになるよう設定している。

他の検出器についても delay 時間を調節した結果、 2γ 事象におけるシグナルの立ち上がりまでの時間はおよそ表 4 の値となる。

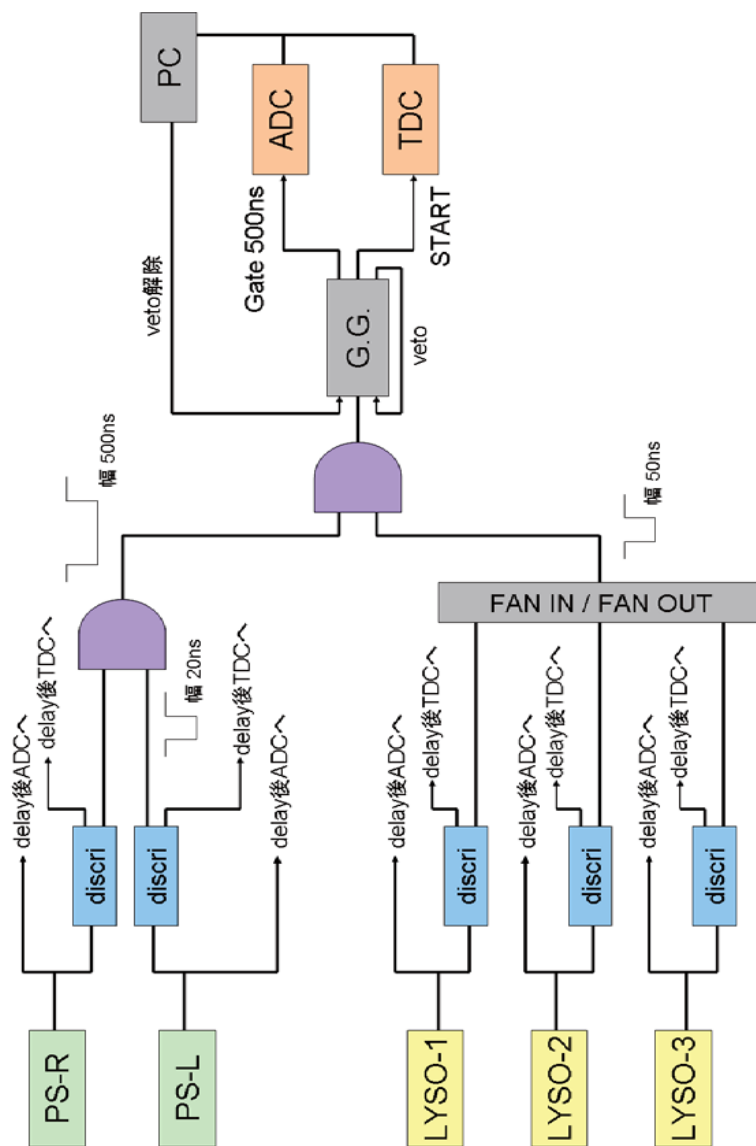


図 34: テスト実験用回路の簡略図

表 4: ADC ゲート始点または TDC スタートと各シグナルの立ち上がり時間の関係 (2γ 事象)

	ADC	TDC
PS-R	385 ns	410ns
PS-L	385 ns	410ns
L1	84ns	42ns
L2	26ns	42ns
L3	26ns	42ns

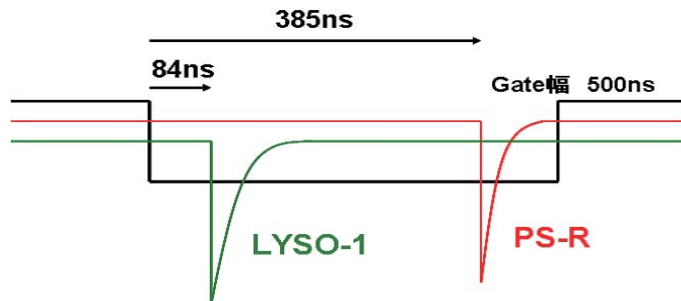


図 35: 2γ 事象での ADC ゲートと各検出器からのシグナルとの時間関係

次に、もし o -Ps 生成事象となれば、プラスチックシンチレータからのシグナルでコインシデンスがとられた後、数十～百数十 ns 後に LYSO 検出器で γ 線が検出される。LYSO 検出器からのシグナルのタイミングでデータ取得のトリガーがかかるため、LYSO 検出器のシグナルの時間位置は 2γ 現象と変わらない。この場合、ADC ゲートと各検出器からのシグナルとの時間関係は、図 36 のようになる。PS-R の ADC ゲート始点からの時間は o -Ps 崩壊時間が長いほど短くなる。今回組んだ回路系では、 o -Ps 崩壊時間が 400ns 程度のイベントまで取得可能となる。

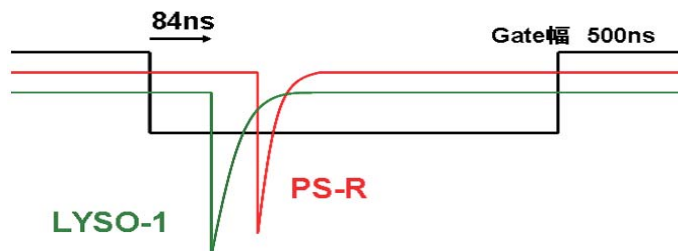


図 36: 3γ 事象での ADC ゲートと各検出器からのシグナルとの時間関係

3.6 レートの見積もり

今回のテスト実験において検出される o -Ps 生成事象のレート、およびシグナルとして認識されるイベントのレートについてはここではシミュレーションで得られた結果をもとに議論していく。
Geant4 にプロトタイプ装置の構造を組み込み (図 37)、先程のベータトリガーの節で行なった e^+ 放出のシミュレーションにおいて e^+ がエアロジェル中に静止したイベントを選び出し、その静止位置で式 (22) に従う 3γ 事象を 4π ランダムに発生させた。

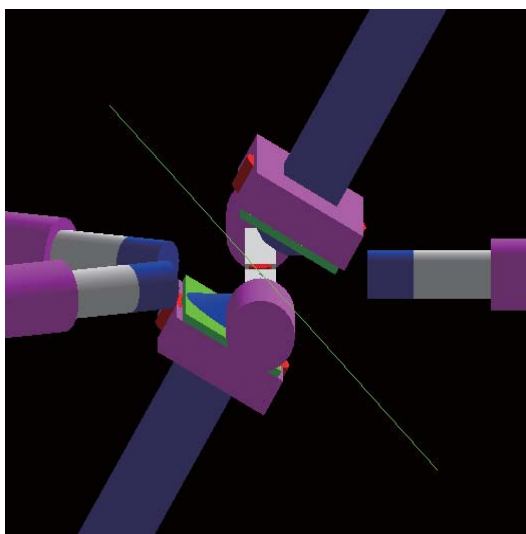


図 37: Geant4 に組み込んだプロトタイプ装置の構造

3.2 節で行なったベータトリガーシステムのシミュレーションでは、プラスチックシンチレータを発光させ、かつエアロジェルターゲットで静止するものが、全 e^+ 放出イベントのうち 12.5% であった。また今回のシミュレーションにより、全 3γ 事象のうち、LYSO 検出器「L1 と L2」もしくは「L1 と L3」のペアに、エネルギーを落としたイベントは全 3γ 放出イベントのうち 0.295% であった。今回使用した ^{22}Na 線源強度は現在 17.4kBq であり、電子捕獲反応を考慮すると 15.7kBq で e^+ 放出が起こっていることになる。これより、LYSO 検出器でのコインシデンスとなるイベントレートを見積もると、

$$15.7 \times 10^3 \times 0.125 \times 0.55 \times \frac{3}{4} \times 0.00295 = 2.4 \text{ [Hz]} \quad (27)$$

となる。ここで e^+ が静止したときのポジトロニウムが出来る確率を 55% とし、スピンの統計により o -Ps はそのうち $3/4$ であると仮定した。[10]

このうち最終的にシグナルとして採用するものは、崩壊時間が 100~270ns の o -Ps の $|1, \pm 1\rangle$ 成分らしき TW 内のイベントで、かつ先程定義した式 (23)~(25) による EW 内のイベントである。前者については、すでに述べたように全 o -Ps 事象のうち 30.3% がこの TW 内のイベントにあたり、後者の EW

内に入るイベントは、今回の Geant4 シミュレーションの結果、全 3γ 事象の 0.060%であることがわかった。(ここでも「L1 と L2」および「L1 と L3」のペアを考えている。)したがって、今回のテスト実験で得られるシグナルのイベントレートは、

$$15.7 \times 10^3 \times 0.125 \times 0.55 \times \frac{3}{4} \times 0.303 \times 0.0006 = 0.15 \text{ [Hz]} \quad (28)$$

であると期待される。

4 データ解析およびその結果

今回のテスト実験では磁場の方向を2通りに配置してそれぞれ2~3日間程データ取得を行なった。図 38,39 はそれぞれのセットアップの様子である。

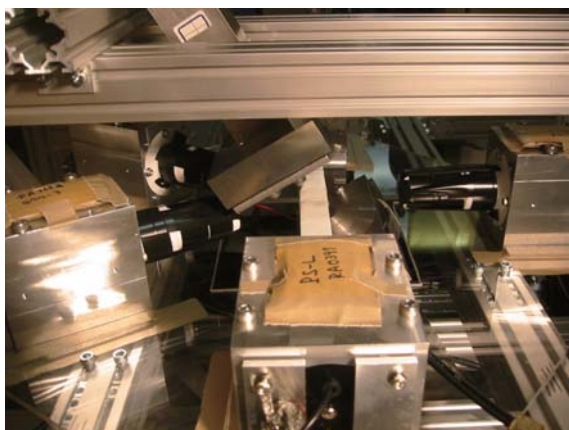


図 38: $\phi = 180^\circ$ 方向への配置

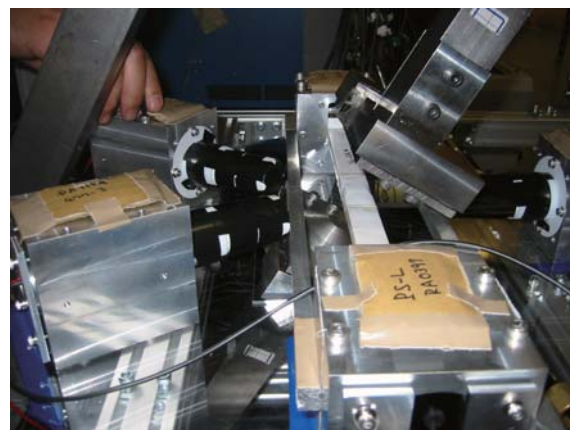


図 39: $\phi = 0^\circ$ 方向への配置

テスト実験の内容と取得データ量を表 5 に示す。まず磁石の方向を $\phi = 180^\circ$ 方向へ配置した RUN を行なったあと、磁石を取り外してポジトロニウム生成位置に磁場が印加されない状況でのデータを取得した。これにより o -Ps の寿命が 1 成分のみでの寿命測定と o -Ps 生成率の測定を行なった。この後、今度は磁石の方向を $\phi = 0^\circ$ 方向に向けた RUN を行なった。このとき o -Ps の生成率が低下した。180° とほぼ同数のシグナルイベントを取得するべく、180° 方向の RUN より長く RUN を行なった。最後に、 ^{176}Lu の存在によって起こる LYSO 検出器同士のコインシデンスでシグナルとみなされてしまう、偽イベントがどのくらいあるか見積もるために、ベータトリガーシステムを取り除いてのバックグラウンド測定をおこなった。

実験内容	取得データ量
磁石の向き $\phi = 180^\circ$ での RUN	7.2×10^7 イベント
磁石なしの RUN	2×10^7 イベント
磁石の向き $\phi = 0^\circ$ での RUN	1×10^8 イベント
^{176}Lu 起源のバックグラウンド測定	4×10^7 イベント

表 5: テスト実験内容と取得データ量

この章の前半では磁石の向きを 180° にしてセットアップしたときのデータ、および磁石を外しての RUN におけるデータを用いて、データ解析の流れを示し、最終的に 180° の方向での RUN におけるシグナル数を求める。0° に向けた RUN および線源を取り外してのバックグラウンド測定での結果は、章の後半で述べることにする。

4.1 ゲインの時間変化およびキャリブレーション (180° での RUN)

LYSO 検出器でのエネルギーを測定する際に行なったキャリブレーションについてここでは述べることにする。前章で述べた回路を組んで、実際に測定した γ 線エネルギー分布は横軸 ADC でチャンネル値にとると図 40 のようになる。ここでは最初の 2×10^6 イベントのデータを示す。

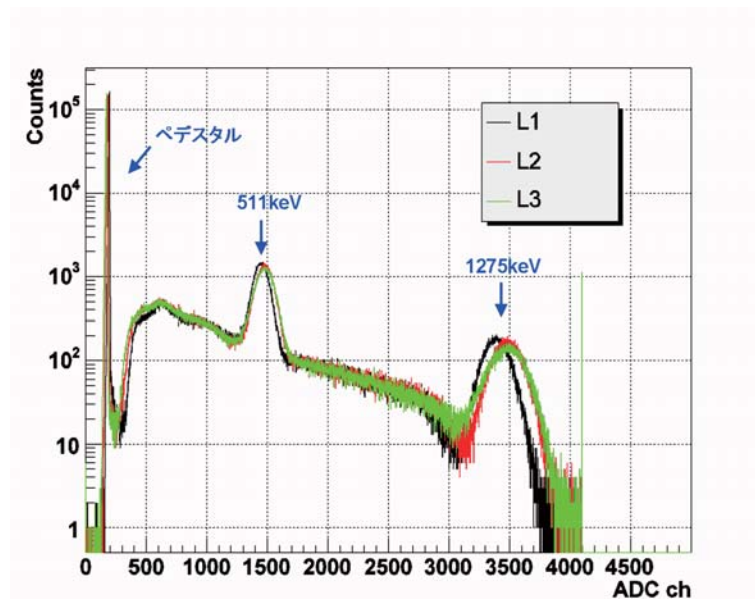


図 40: LYSO 検出器で測定した γ 線エネルギー分布 (イベントセレクションなし)

γ 線が 3 つの LYSO 検出器どれかで検出されれば、トリガーがかかるようになっているため、トリガーの掛らなかった残りの LYSO 検出器では、常にペDESTALが見えている。また、放出された e^+ のほとんどが物質内の e^- と対消滅して、511keV γ 線が back-to-back で 2 本出るイベントとなるため、511keV のピークが見える。さらには ^{22}Na の崩壊で放出される 1275keV γ 線もピークとして見える。これらのピークを使ってキャリブレーションを行なっていくが、今回のテスト実験では LYSO 検出器の時間によるゲインの低下が見られた。図 41, 42, 43 は磁石を 180° に配置した RUN における、ペDESTAL、511keV、1275keV の ADC チャンネル値の変化を、横軸にデータ取得からの経過時間数を取りプロットしている。データ取得から 30 時間後のところで、ペDESTALが変化している。この詳しい原因については不明であるが、このとき、きちんとしたデータがとれているか、一度データ取得を止めて確認を行なった。その際、ケーブルの抜き差しを行なったのが要因だと考えられる。

この ADC チャンネル値の推移を見ると、L1 と L2 では著しいゲインの低下が見られるが、L3 ではゲインの変動はあまり見られないことがわかる。ゲインの低下率は 511keV、1275keV とともに ADC チャンネル値で L1 で 0.04[%/hour]、L2 で 0.06[%/hour] 程度あった⁶。そこで、今回は 2×10^6 イベント (約 90 分間の測定) 毎にキャリブレーション直線を求め、エネルギーへの換算をおこなった。

⁶ゲインの低下について詳しく調べた結果を付録として本論文の末尾に記載した。

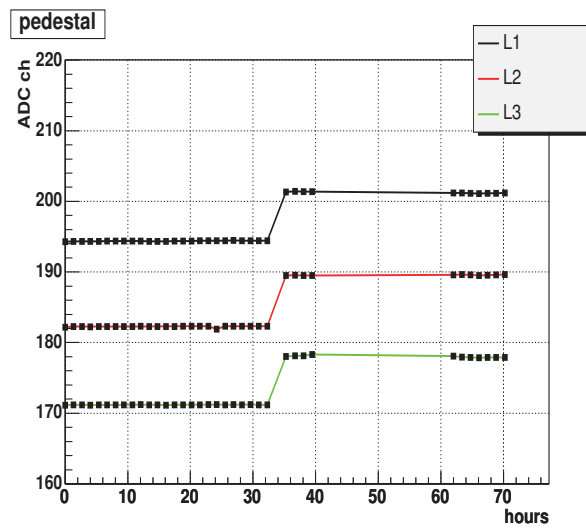


図 41: ペDESTALの時間変化 (180° での RUN)

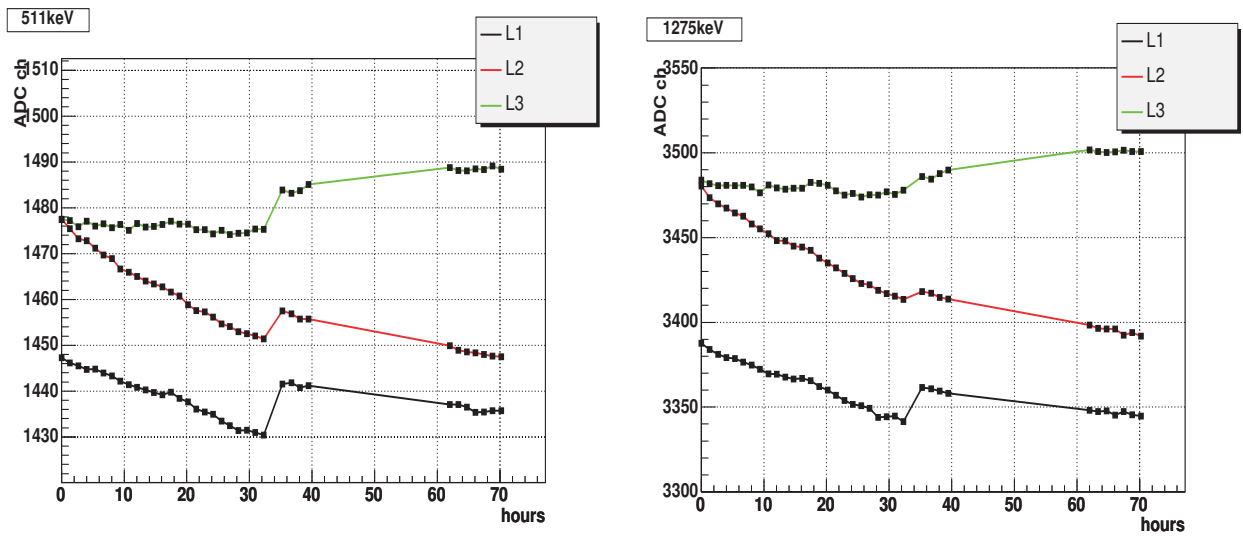


図 42: 511keV ピークの時間変化 (180° での RUN) 図 43: 1275keV ピークの時間変化 (180° での RUN)

その際、ペDESTALと511keVのピークのみを使用しキャリブレーション直線を求めた。データ取得開始時に1275keVのピークも使用してキャリブレーションが出来るようにPMTのゲインを図40のように調整したが、1275keVを含めた3点でキャリブレーション直線を求めると、その直線では511keVのピークが数keVも低くなり、ずれが生じる。今回の実験で実際に見たいエネルギー領域は300~500keVであるから、ペDESTALと511keVの2点によりキャリブレーション直線を導出することにした。キャ

リブレーションをおこなった後の、全イベント (180° 方向での RUN) のエネルギー分布を図 44,45 に示す。

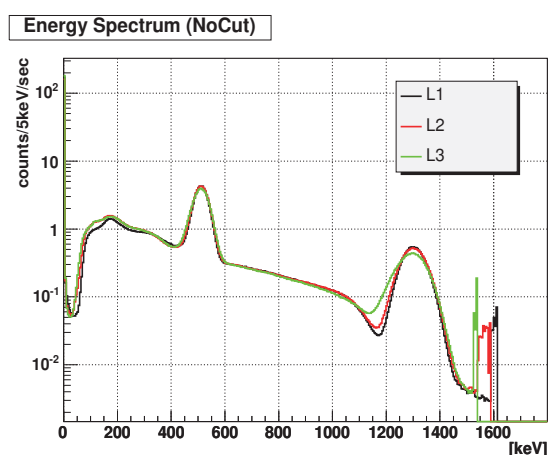


図 44: 180° での RUN 全イベントのエネルギー分布

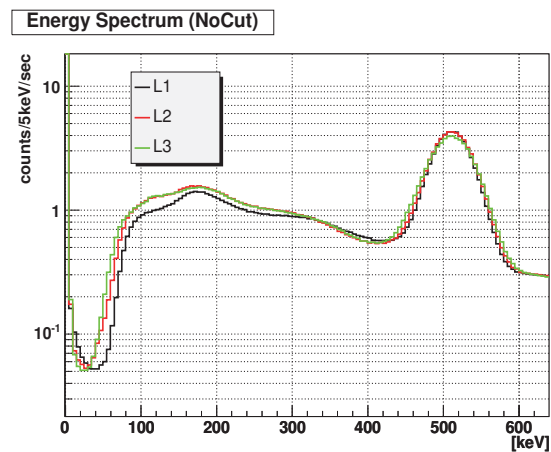


図 45: 左図の低エネルギー領域拡大図

これより 511keV のピークをガウシアンでフィットし、エネルギー分解能を各 LYSO 検出器で求めた結果、表 6 のようになった。ここでの LYSO 検出器エネルギー分解能は 3.3 節で行なった ^{137}Cs を用いての評価よりも悪くなっている。 ^{137}Cs を用いての評価を行なう際は、LYSO 結晶を直接 PMT の光電面に接着させたが、このテスト実験の際には LYSO 結晶と光電面の間に $\phi 30\text{mm} \times t 50\text{mm}$ のアクリル製ライトガイドを挟んで LYSO 検出器を製作している。このライトガイドの装着により、若干エネルギー分解能が悪くなっていると考えられる。

表 6: 各 LYSO 検出器のエネルギー分解能 (FWHM@511keV)

LYSO 検出器	エネルギー分解能 (FWHM@511keV)
L1	$12.35 \pm 0.03 \%$
L2	$13.09 \pm 0.04 \%$
L3	$14.25 \pm 0.05 \%$

4.2 時間分解能

この節では、実際のデータを用いて、以下の3つの時間分解能について議論する。

- PS-R・PS-L間の時間分解能
- ベータトリガーシステム・LYSO 検出器間の時間分解能
- LYSO 検出器間の時間分解能

それぞれの時間分解能について議論する前に、まず図 34 のように回路を組んだときに得られる、各検出器における TDC カウント値の分布を示す。(180° の RUN、最初の 2×10^6 イベントのデータ)

図 46 はプラスチックシンチレータからのシグナルで TDC ストップが掛る時間で、図 47 は LYSO 検出器からのシグナルで TDC ストップがかかる時間である。

これらのピーク位置は設定した delay の長さによって決まっていて、おおよそオシロスコープで確認した位置 (表 4) にピーク位置があることがわかる。

図 46 において 400ns 付近にあるピークは 2γ 事象によるものである。また、 o -Ps 生成によって数十～数百 ns の崩壊時間をもつと、TDC ストップがかかる時間は早くなるため、400ns 以下の領域に分布する。図 47 に関して、トリガーをかけた LYSO 検出器では、TDC カウント値はピーク値 44ns 付近の値を返す。また、トリガーを掛けず、かつアクシデンタルなシグナルがなかった LYSO 検出器に関しては TDC カウント値は一番右端のピーク値となる。

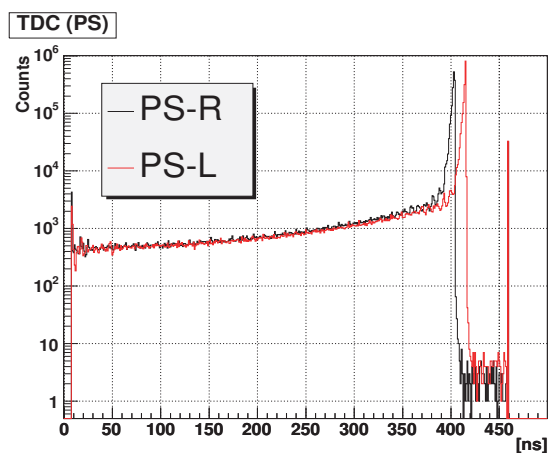


図 46: プラスチックシンチレータによる TDC ストップのタイミング

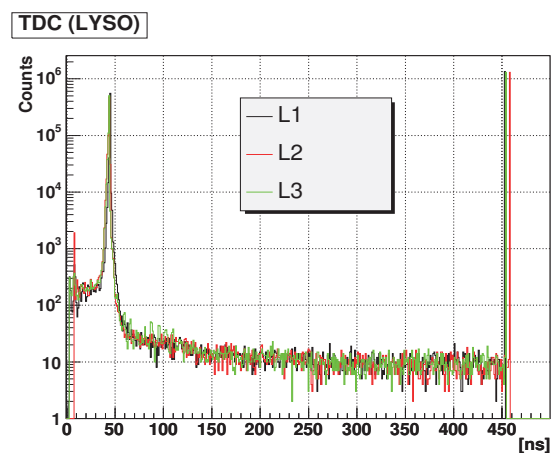


図 47: LYSO 検出器による TDC ストップのタイミング

PS-R・PS-L間の時間分解能

まず、図 46 のプラスチックシンチレータによる TDC のタイミング分布を横軸 PS-R、縦軸 PS-L として 2 次元にしてみたものが図 48 である。

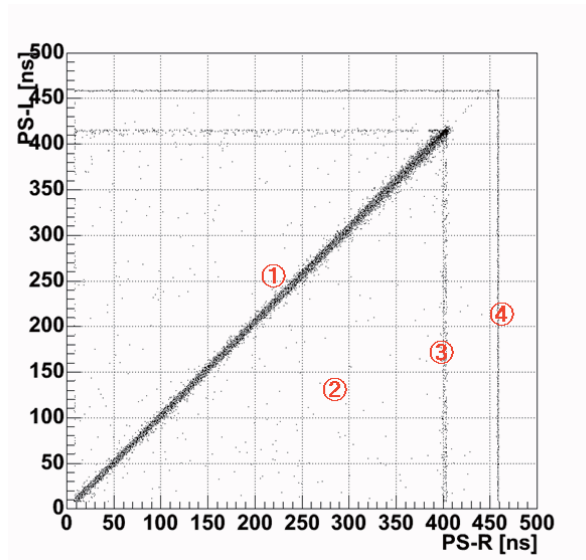


図 48: プラスチックシンチレータによる TDC ストップのタイミング 2 次元分布 (横軸:PS-R、縦軸:PS-L)

テスト実験用回路では PS-R と PS-L で幅 20ns のコインシデンスをとるようにしているので、TDC における時間は崩壊時間に応じて、通常 ① のライン上に分布する。② の領域に外れて分布するイベントというのは、PS-R と PS-L でコインシデンスは取られていて、かつ LYSO 検出器からのシグナルでデータ取得のトリガーがかかっているが、それ以前の数十～数百 ns の間にコインシデンスのとられなかった PS-L のシグナルが存在し、このシグナルによって先に TDC のストップがかかったイベントである。③ についても同様で、 e^+ 放出から 2γ 事象となるイベントが圧倒的に多いためラインとして見えている。また、④ のライン上に分布しているイベントは図 49 のようなイベントである。今回組んだ回路では崩壊時間が 400ns までのものしか取得できない。これにより、PS-R と PS-L のコインシデンスから 400ns 以後にきた LYSO のシグナルによって、データ取得のトリガーが掛った場合、PS-R, PS-L の TDC での値は両者ともサチレーションを起こした 460ns となる。しかし、図 49 のようにコインシデンスが取られたシグナルの後に、もう 1 つ PS-L のシグナルが存在すると、このシグナルで TDC のストップが取られるようになり、分布としては ④ のライン上にのるようになる。

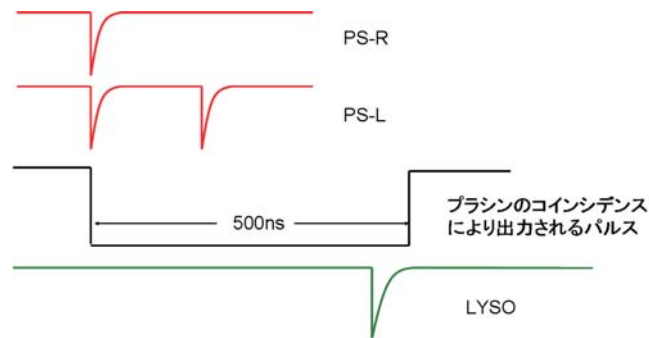


図 49: 図 48 において ④ のライン上に分布するイベントについて

次にこれら両 PMT 間の時間差についてみる。まず、図 46 では異なっている 2γ ピーク位置を 0 にシフトさせ、図 48 と同様に、TDC で測定された PS-R および PS-L の TDC ストップのタイミング分布を 2 次元にしてみたものが図 50 である。

これより、両 PMT 間の時間差について考察する際に、コインシデンスが取られたシグナルとは異なるシグナルで時間差を取らないように図 50 において以下を要求する。

$$(PS - R) < 20\text{ns}$$

$$(PS - L) < 20\text{ns}$$

$$(PS - R) - 40\text{ns} < (PS - L) < (PS - R) + 40\text{ns}$$

これらの条件を課して中心のライン上のイベントを選択し、PS-R と PS-L の時間差を見たものが、図 51 である。ここでは PS-R から PS-L の時間を引いている。このピークをガウシアンでフィットした結果、両 PMT 間の時間差は σ で 0.55ns の時間分解能であることがわかる。

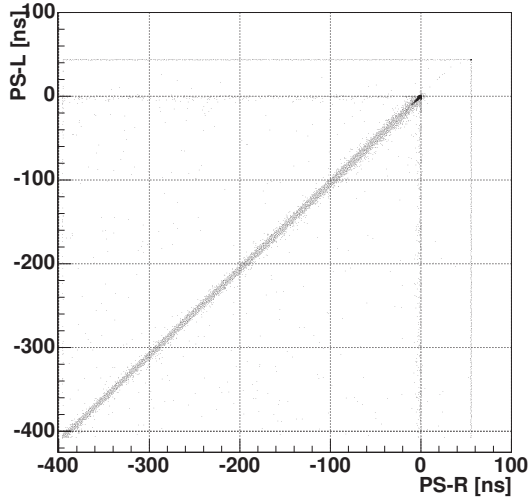


図 50: 図 46 の 2γ ピークを 0 にあわせての TDC2 次元分布

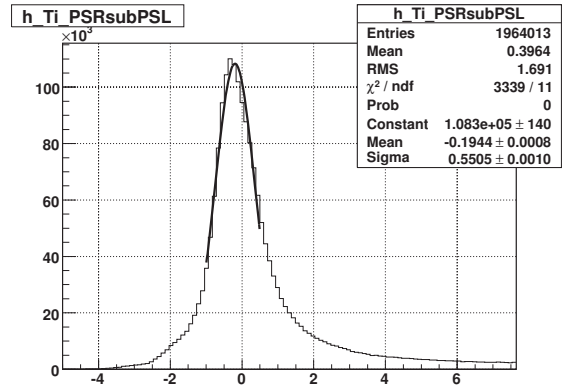


図 51: ベータトリガーシステムの PMT における時間差の分布 (PS-R)-(PS-L)

ベータトリガーシステム・LYSO 検出器間の時間分解能

次に、ベータトリガーシステム・LYSO 検出器間の時間分解能について議論する。ここで、ベータトリガーシステムの時間としては、PS-R と PS-L の平均の時間をとるようにする。LYSO には $511 \pm 30 \text{keV}$ ($\sim 0.5\sigma$) のエネルギーを要求し、LYSO の時間 (図 47 の値) からベータトリガーシステムの時間 (図 50 における値の平均値) を引き算してヒストグラムにしたものが図 52 である。

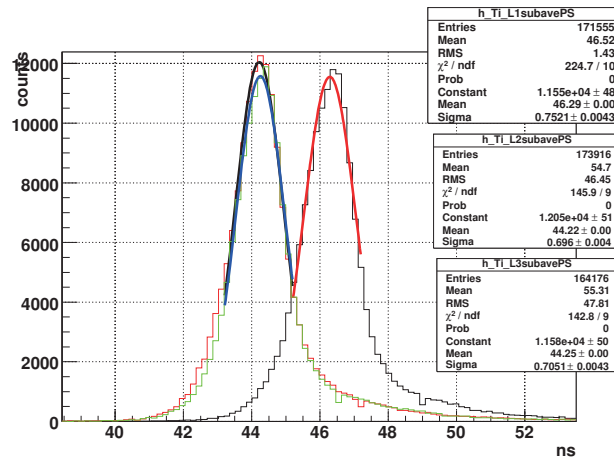


図 52: ベータトリガーシステム・LYSO 検出器間の時間差分布 (LYSO-ベータトリガーシステム) 黒線:L1、赤線:L2、緑線:L3

黒線はL1とベータトリガーシステムとの時間差。赤線はL2、緑線はL3を示している。L1のみ2ns程ピーク位置がずれているが、これは調節したdelayによるものである。このピークをガウシアンでフィットして各LYSO検出器とベータトリガーシステムとの間で時間分解能を求めた結果は、表7のとおりで、どのLYSO検出器でも700～800psの時間分解能を有することがわかった。

LYSO 検出器	時間分解能
L1	0.75 [ns]
L2	0.70 [ns]
L3	0.71 [ns]

表 7: 511keV γ 線による各LYSO検出器とベータトリガーシステム間の時間分解能評価 (フィットにおける σ)

LYSO 検出器間の時間分解能

最後にLYSO検出器間の時間分解能について調べる。ここでは、後にOff-lineによるコインシデンスをとるL1-L2間およびL1-L3間での時間分解能を考えることにする。LYSO検出器で γ 線が検出された状況として、時間差を見る2つのLYSO検出器にLYSO検出器に100～600keVのエネルギーを要求し、これらの時間差を求めてヒストグラムにしたものが図53となる。赤線で(L1)-(L2)の時間を計算した結果を示し、緑線で(L1)-(L3)の時間を計算した結果を示す。0より1～2ns程、ピーク位置が右にシフトしているのは、図52でL1のdelayがL2,L3に比べて大きいからである。この図で、「およそ-8ns以下」および「およそ12ns以上」の領域には、相関のないLYSO検出器同士で時間差が取られたものが存在している。後に、Off-lineでのコインシデンス状況を考える際は、これらのイベントを除くようにする。

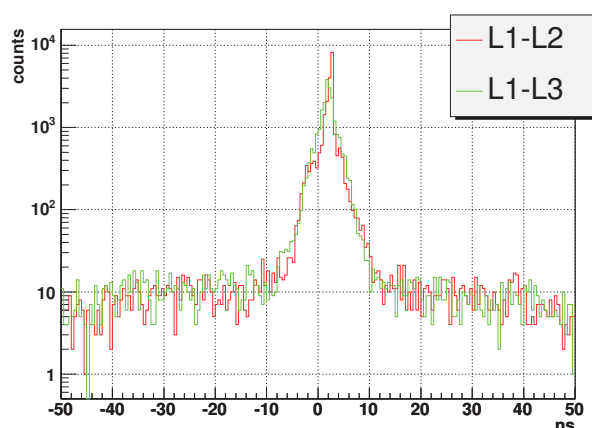


図 53: LYSO 検出器間の時間差の分布 (赤線:L1-L2、緑線:L1-L3)

Off-line での LYSO 検出器のコインシデンス条件

今回組んだ回路では LYSO 検出器同士で、コインシデンスをとることは行なっていない。したがって、LYSO 検出器のシグナルによる TDC 情報を用いて、Off-line でコインシデンスを取る必要がある。今回のテスト実験では 3 つの LYSO 結晶のうち「L1 と L2」「L1 と L3」のコインシデンスのペアを考える。ベータトリガーシステムにおける両側の PMT からのシグナルでハードウェア上のコインシデンスがとられると、幅 500ns のパルスが出力される。この間に LYSO 検出器どれか 1 つで γ 線が検出されると、この 500ns のパルスとコインシデンスがとられ、データ取得が開始される。このときトリガーをかけた LYSO 検出器の TDC のカウント値は、LYSO 検出器毎に常に同じ値となるはずで、それが図 47 のように、delay の調節によってどれも 44ns のピークを作っている。そこで、2 つの LYSO 検出器のコインシデンス条件として、まず両者の TDC カウント値が、図 47 の時間分布においてピークである 44ns の ± 10 ns 以内であることを要求する。さらには、相関のないシグナル同士でコインシデンスを取ってしまわないよう、両者の時間差が図 53 でみたように -8 ns 以上 12 ns 以下であることを要求する。以上を Off-line でコインシデンスをとるときの条件とする。

4.3 オルソポジトロニウムの寿命と生成率の測定 (180°, 磁石なしでの RUN)

この節では、オルソポジトロニウムの寿命と生成率を、崩壊時間分布のフィットから求めることを行なう。今回は、まずオルソポジトロニウムの寿命が1成分のみである「磁場なしでの RUN」における崩壊時間分布のフィッティングから、 $|1, \pm 1\rangle$ 成分の寿命を求める。その次に、求めた $|1, \pm 1\rangle$ 成分の寿命を固定値として、磁場を印加し寿命が2成分になった状況下での崩壊時間分布のフィッティングを行なうという手順をとる。

オルソポジトロニウムの寿命および生成率の測定 (磁石なしでの RUN)

まず磁場なしの RUN における崩壊時間分布のフィッティングを行なう。崩壊時間分布は、前節の Offline コインシデンス条件で選んだ「L1 と L2」または「L1 と L3」のコインシデンスイベントについて、PS-R と PS-L の時間の平均値と LYSO 検出器 L1 の時間の差を計算することで求めた。ここで LYSO 検出器の時間としては両コインシデンスペアで共通な L1 の時間をとることにした。(図 54)

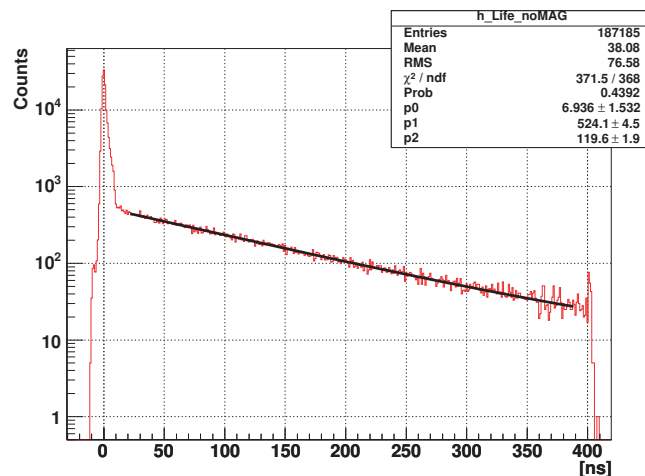


図 54: 磁場なしでの RUN における崩壊時間分布 (20ns~390ns の領域でフィッティング)

0ns に立つ鋭いピークは主に p-Ps 崩壊や e^+e^- 対消滅に起因するもので、そのすぐ後に数百 ns にわたって、o-Ps 崩壊によるなだらかな分布が存在する。今回組んだ回路では o-Ps の崩壊時間が 400ns までのデータを取得可能である。この崩壊時間分布を式 (29) でフィットを行なった。 ^{22}Na からの e^+ 放出と相関のない γ 線によるアクシデンタルなイベントを見積もるのに定数 p_0 をつけ、 p_2 が求めたい o-Ps の寿命となる。

$$p_0 + p_1 \exp(-t/p_2) \quad (29)$$

このフィット式で 20ns から 390ns の領域でフィットを行なうと、各パラメータは以下のように求まる。

$$p_0 = 6.9 \pm 1.5 \text{ ns}^{-1}$$

$$p_1 = 524.1 \pm 4.5 \text{ ns}^{-1}$$

$$p_2 = 119.6 \pm 1.9 \text{ ns}$$

またこのとき、 $\chi^2/\text{ndf}=371.5/368=1.01$ で、 $\chi^2 > 371.5$ となる確率は $P=44\%$ であるので、良いフィットであるといえる。

寿命については、119.6ns という値が求まった。これを崩壊幅 Γ_{meas} にし、本来の寿命 142ns である崩壊幅 Γ_1 (式 (3)) と比べると、 $\Delta\Gamma = 1.32 \mu\text{s}^{-1}$ の差異がある。

$$\begin{aligned}\Gamma_{\text{meas}} &= 8.36 \mu\text{s}^{-1} \\ \Gamma_1 &= 7.04 \mu\text{s}^{-1} \\ \Delta\Gamma = \Gamma_{\text{meas}} - \Gamma_1 &= 1.32 \mu\text{s}^{-1}\end{aligned}$$

今回の実験ではポジトロニウム生成位置であるエアロジェルに向けて、窒素を注入している。窒素の効果による崩壊幅は、文献 [11] よると、窒素一気圧の状況下 (密度 $d = 4.4 \times 10^{-2} \text{ mol/l}$) で、 $\Gamma_{N_2} = 7.25 \mu\text{s}^{-1}$ となる。また、エアロジェルの成分である SiO_2 の存在による効果では、文献 [12] によると、今回使用した密度 0.1 g/cm^{-3} のもので、崩壊幅は $\Gamma_{\text{SiO}_2} = 7.27 \mu\text{s}^{-1}$ となる。したがって、これら 2 つの要因からは崩壊幅に $0.44 \mu\text{s}^{-1}$ の寄与があることがわかる。そこで残り $1.32 - 0.44 = 0.88 \mu\text{s}^{-1}$ を全て残留酸素による寄与であると考え。酸素 1 気圧の状況下での崩壊幅は $\Gamma_{O_2} = 35 \mu\text{s}^{-1}$ [13] であり、下記の計算から、分圧として 3% の残留酸素が存在していたと求めることができる。

$$\begin{aligned}(35 - 7.04)p &= 0.88 \\ p &= 0.031\end{aligned}$$

今回のテスト実験では、磁場なしの RUN を行なった後に、窒素チューブが外れてしまう事態が起こった。窒素チューブ固定の不安定性から、十分な窒素がエアロジェル中に充満しておらず、このように残留酸素が存在したと考えられる。

またフィット結果から、磁石を取り外しての RUN で検出された o-Ps の数 N_{total} は

$$\begin{aligned}N_{\text{total}} &= \int_0^{\infty} p_1 \exp(-t/p_2) dt \\ &= p_1 \times p_2 \\ &= (62.7 \pm 1.1) \times 10^3 \text{ 事象}\end{aligned}$$

と求めることができる。全 RUN での LiveTime は磁石なしの際、47156.3[s] であったので o-Ps 生成レート⁷は

$$1.33 \pm 0.02\text{Hz}$$

となる。また e^+ がエアロジェル中に静止したイベントに対して o-Ps が形成される「o-Ps 生成率」 x を求める。現在の ^{22}Na 線源強度で e^+ 放出イベントは 15.7kBq、またシミュレーションによって、ベータトリガーをかけ、かつエアロジェル中に静止する確率は全 e^+ 放出の 12.5 パーセント、さらには 3γ 放出イベントのうち、「L1 と L2」または「L1 と L3」で同時に γ 線が検出されるのは 0.295 パーセントであることを考慮すると、o-Ps 生成率は

$$15.7 \times 10^3 \times 0.125 \times x \times 0.00295 = 1.33 \quad (30)$$

$$x = 23.0 \pm 0.4 \% \quad (31)$$

と求めることができる。イベントレートの見積もりを行なう際に、ポジトロニウム生成率を 55% とし、オルソポジトロニウムにかんしては、 $\frac{3}{4}$ の 41% ととしていたが、ここで得られた値はこの見積もりよりも半分近く低い値となって出ている。この原因については、見積もりの方に、生成されたオルソポジトロニウムが拡散され、エアロジェルターゲット外へ抜け出す効果が含まれてないことが挙げられる。

オルソポジトロニウムの寿命および生成率の測定 (180° での RUN)

次に磁場なしの RUN で求めた寿命 119.6ns を固定値とし、180° での RUN における $|\psi_+\rangle$ の寿命を求めることにする。図 55 が 180° での RUN における崩壊時間分布である。

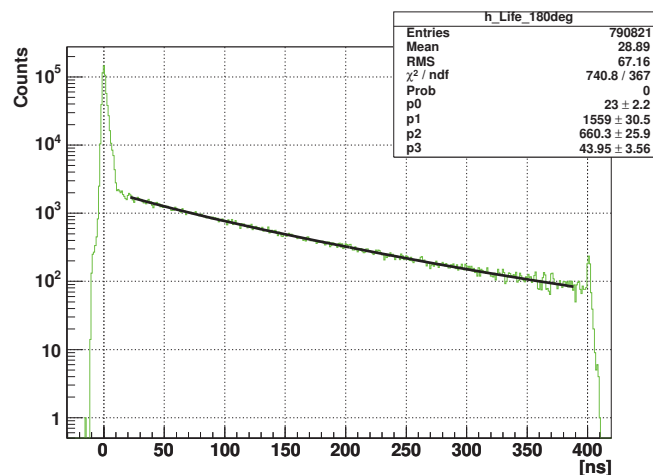


図 55: 180° での RUN における崩壊時間分布 (20~390ns でフィット)

⁷実際には LYSO 結晶で検出される o-Ps が生成されるレート

これを式 (32) のようにパラメータ化した式でフィットする。先程のフィット式と同様、アクシデンタルによる成分の定数項 p_0 を付与し、 $|\psi_+\rangle$ 成分の寿命 p_3 を求める。その際、 $|1, \pm 1\rangle$ 成分の寿命 τ_1 は磁場なしの状況下でのフィットから求めた 119.6ns で固定する。

$$p_0 + p_1 \exp(-t/\tau_1) + p_2 \exp(-t/p_3) \quad (32)$$

先程と同様、フィット領域を始点 20ns 終点 390ns にした場合、

$$\begin{aligned} p_0 &= 23.0 \pm 2.2 \text{ns}^{-1} \\ p_1 &= 1559 \pm 31 \text{ns}^{-1} \\ p_2 &= 660 \pm 26 \text{ns}^{-1} \\ p_3 &= 44.0 \pm 3.6 \text{ns} \end{aligned}$$

と求められる。ここでの $|\psi_+\rangle$ 寿命は 44ns であるが、 $|1, \pm 1\rangle$ の寿命が 119.6ns の場合での $|\psi_+\rangle$ 成分の寿命の理想値 64ns⁸からは大きな差異がある。

また、磁石を取り外したときの RUN と同様に o-Ps 生成率を求める。180° での RUN における LiveTime の総和は 146092[s] であり、全 o-Ps 生成の個数は

$$\begin{aligned} N_{\text{total}} &= \int_0^{\infty} [p_1 \exp(-t/\tau_1) + p_2 \exp(-t/p_3)] dt \\ &= p_1 \tau_1 + p_2 p_3 \\ &= (21.5 \pm 0.5) \times 10^4 \text{ 事象} \end{aligned}$$

となるので o-Ps 生成レートは

$$1.47 \pm 0.04 \text{ Hz}$$

と求まり、エアロジェル中に止まった e+ が o-Ps を形成する確率である「o-Ps 生成率」は先程と同様に

$$25.5 \pm 0.6 \%$$

と計算され、180° の RUN は磁場なしの RUN のときよりも、生成率が高かったことになる。

また、 $|1, \pm 1\rangle$ と $|\psi_+\rangle$ の生成される比 $p_1 \tau_1 : p_2 p_3 = (6.4 \pm 0.6) : 1$ は理想的な 2 : 1 と一致しない。

オルソポジトロニウムの寿命および生成率を求めることは、最終的に求めたシグナルイベント数の規格化を行なう際に非常に重要になってくるが、このように寿命および生成比に関して、理想的な状況下での値とコンシステントな結果が得られなかったため⁹、次章では「理想的な $|\psi_+\rangle$ バックグラウンドの見積もり」および「特殊な規格化操作」を行なうことにする。

⁸測定磁場 2.17kGauss での値

⁹また、フィットの際の χ^2 は $\chi^2/\text{ndf}=740.8/367=2.02$ であり、良いフィットとは言えない。

4.4 LYSO 結晶におけるエネルギー分布とシグナルイベント数 (180° での RUN)

この節では最終的にシグナルイベントの数を求めることを目標とする。まずコインシデンス条件を課した際の 2 次元エネルギー分布を図 56,57 に示す。図 56 は「L1 と L2」のコインシデンスをとったもので X 軸に L1, Y 軸に L2 のエネルギーを示す。図 57 は「L1 と L3」のコインシデンスをとったものになる。p-Ps または e^+e^- の対消滅による back-to-back の 511keV γ 線によるコインシデンスが存在し、また 511keV と 1275keV のコインシデンスも確認できる。o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ 事象は 511keV 以下の領域に帯状になって分布する。

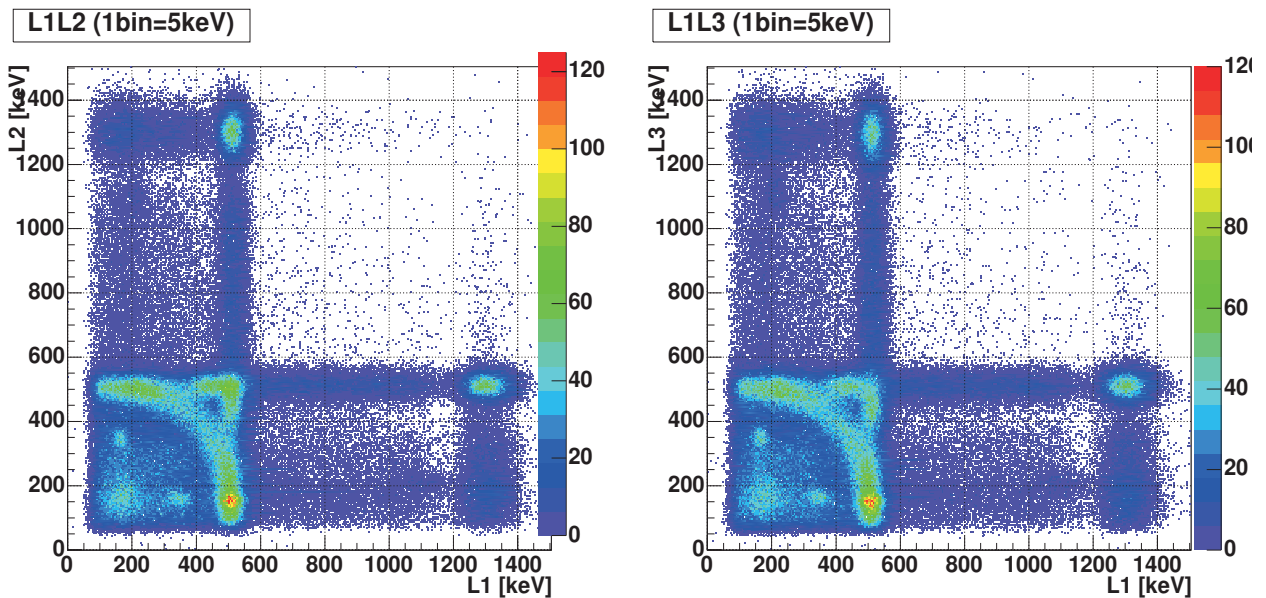


図 56: 「L1 と L2」でコインシデンスをとった際のエネルギー分布 (2 次元) 図 57: 「L1 と L3」でコインシデンスをとった際のエネルギー分布 (2 次元)

これから、o-Ps らしきイベントでかつ、 $|1, \pm 1\rangle$ 成分の寿命で崩壊した o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ 事象を抜き出すために、崩壊時間に 100ns~270ns を要求する。(TimingWindow (TW))
このイベントセレクションを要求したときのエネルギー分布変化を示したものが図 58,59 である。図 58 は「L1 と L2」のコインシデンスを要求した際の、LYSO 検出器毎のエネルギー分布である。黒線で表した L1 と赤線で表した L2 によってコインシデンスをとっており、コインシデンスを要求しなかった残りの L3 にも o-Ps $\rightarrow 3\gamma$ で放出される γ 線のうち一番低いエネルギーの γ 線が落とすエネルギーで低エネルギー領域に分布が存在する。TW を要求することで実線は点線へと変化する。このとき 511keV 同士のコインシデンスは消え、511keV のピークはなくなる。一方、図 59 は「L1 と L3」のコインシデンスを要求したときの分布である。図 58,59 示した 1 次元ヒストグラムで TW の条件を課した点線の分布を 2 次元で見たものが、図 60,61 である。511keV 同士のコインシデンスが消えていることが確認できる。

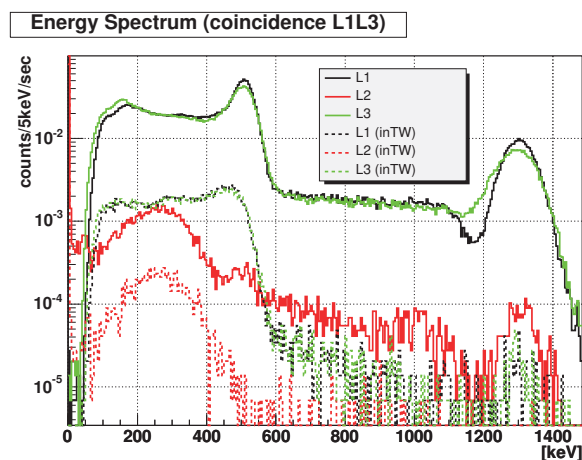
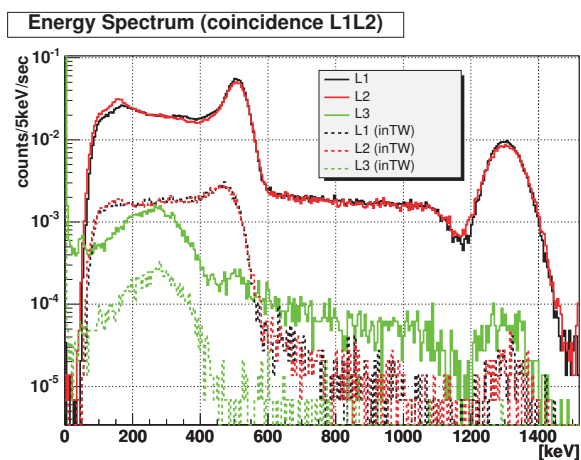


図 58: 「L1 と L2」の Coincidence をとったときの各 LYSO 検出器でのエネルギー分布。実線は TW の条件を課す前で点線は課した後を示す。

図 59: 「L1 と L3」の Coincidence をとったときの各 LYSO 検出器でのエネルギー分布。実線は TW の条件を課す前で点線は課した後を示す。

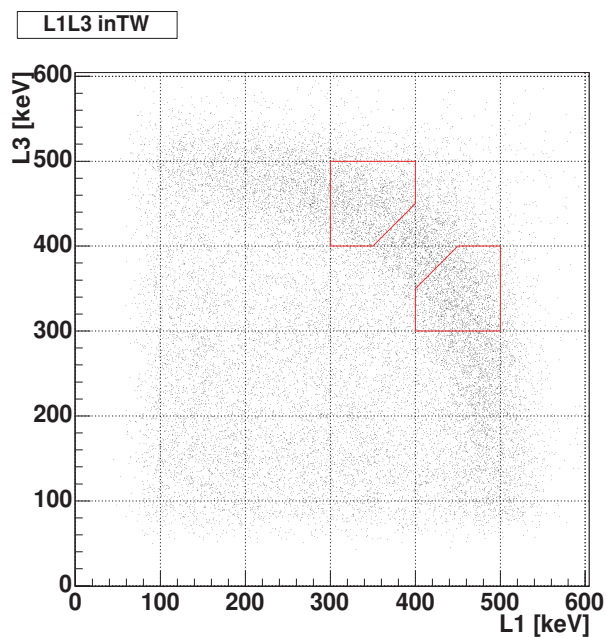
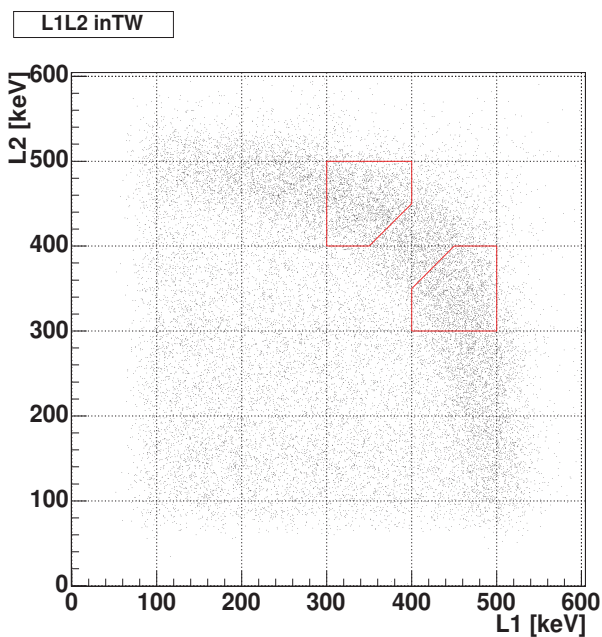


図 60: 「L1 と L2」で Coincidence をとり、TW の条件を課した場合のエネルギー分布 (X 軸:L1, Y 軸:L2)

図 61: 「L1 と L3」で Coincidence をとり、TW の条件を課した場合のエネルギー分布 (X 軸:L1, Y 軸:L3)

イベント内容	イベント数
$\vec{k}_1 \rightarrow \text{L1} \quad \vec{k}_2 \rightarrow \text{L2}$	2856 ± 53
$\vec{k}_1 \rightarrow \text{L2} \quad \vec{k}_2 \rightarrow \text{L1}$	2857 ± 53
$\vec{k}_1 \rightarrow \text{L1} \quad \vec{k}_2 \rightarrow \text{L3}$	2677 ± 52
$\vec{k}_1 \rightarrow \text{L3} \quad \vec{k}_2 \rightarrow \text{L1}$	2517 ± 50

表 8: 180° の RUN におけるシグナルイベント数

これより、シグナルイベントの数を求める。エネルギーの条件として先程定義した Energy Window(EW) を要求する。図 60,61 の赤い線で囲ってある領域がこの Energy Window である。このように、どちらの検出器を \vec{k}_1 用にするかで 1 種のコインシデンスで 2 つの Energy Window が存在する。さらにここでは、 \vec{k}_3 の γ 線を \vec{k}_2 としてカウントしてしまわないよう、残り 1 つの LYSO 検出器で測定されたエネルギーがコインシデンスをとっている 2 つの LYSO 検出器で測定されたエネルギーよりも低いことをさらに要求している。

このセレクションによって求めた 180° に配置した RUN でのシグナルイベントの数を表 8 に示す。ここでのエラーは統計によるものを記載した。Energy Window 内にシグナルとして検出されるイベントレートを計算すると、0.074Hz であった。これは、MC で o-Ps 生成率を 27% とした場合の数値である。

4.5 磁石の向きを変えての RUN(0° での RUN)

今回のテスト実験では初めに磁石を 180° 方向に向けての RUN および磁石を外しての RUN を行なった後、磁石を 0° 方向に向けての RUN を行なった。この節では 0° 方向にむけた RUN の結果を 180° 方向に向けた RUN と比較しながら議論していく。

4.5.1 オルソポジトロニウムの寿命と生成率の測定

まずはそれぞれの RUN における崩壊時間分布の比較をおこなった結果を図 62 に示す。ここで縦軸は LiveTime を使って規格化してある。

これをみると明らかなように、 0° 方向での RUN を行なった際に o-Ps の生成率が落ちている。100~270ns の TW 内で 180° 方向での RUN および磁石なしの RUN で 0.47Hz のイベントレートに対して 0° 方向での RUN では 0.33Hz のイベントレートと 70% にまで低下している。直接の原因は不明であるが、磁石を 0° 方向に向けた RUN へ移行する際、エアロジェルへ窒素を注入している管が外れ、エアロジェル付近に反射材として巻いている、マイラーを張り替えたことが起因しているのではないかと考えられる。したがって今回のテスト実験では 180° の RUN とほぼ同数のイベントを稼ぐために 0° 方向に向けた RUN は 180° の RUN より多く行った。

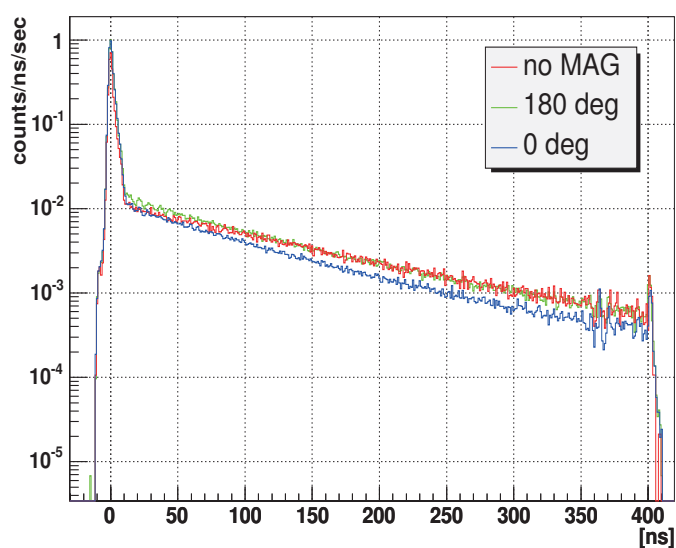


図 62: それぞれの RUN での崩壊時間分布の比較。青線で示す 0° の RUN で o-Ps 生成率が低下している。

次に 0° 方向での RUN における o-Ps の寿命および生成率を求める。先程と同じ式 (33) で崩壊時間分布 (図 63) をフィットする。

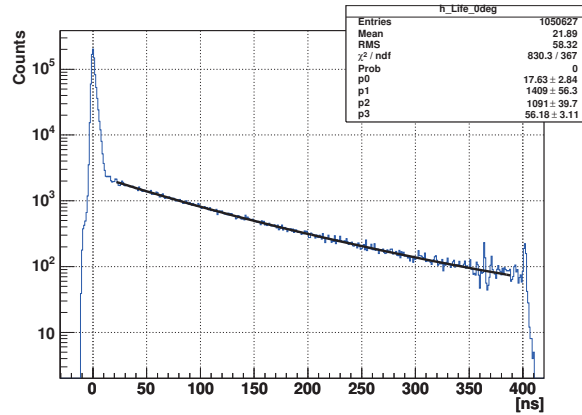


図 63: 0° での RUN における崩壊時間分布 (20~390ns でフィット)

$$p_0 + p_1 \exp(-t/\tau_1) + p_2 \exp(-t/p_3) \quad (33)$$

180° 方向での RUN と同様、始点 20ns・終点 390ns でフィットした結果、0° 方向での RUN で得られた値は以下ようになる。

$$\begin{aligned} p_0 &= 17.6 \pm 2.8 \text{ ns}^{-1} \\ p_1 &= 1409 \pm 56 \text{ ns}^{-1} \\ p_2 &= 1091 \pm 40 \text{ ns}^{-1} \\ p_3 &= 56.2 \pm 3.1 \text{ ns} \end{aligned}$$

寿命に関して、180° の RUN と同様、理想値である 64ns とコンシステントな値は得られなかった¹⁰。また、オルソポジトロニウムの生成率も 180° の RUN の時と同様に求める。0° に向けた RUN における全ての o-Ps 事象の数は

$$\begin{aligned} N_{\text{total}} &= \int_0^{\infty} [p_1 \exp(-t/\tau_1) + p_2 \exp(-t/p_3)] dt \\ &= p_1 \tau_1 + p_2 p_3 \\ &= (23.0 \pm 0.8) \times 10^4 \text{ 事象} \end{aligned}$$

と求められ、0° 方向での RUN における LiveTime の総和は 206713[s] であることより、o-Ps 生成レートは

$$1.11 \pm 0.04 \text{ Hz}$$

と求めることができる。またエアロジェル中に止まった e+ が o-Ps を形成する確率である「o-Ps 生成率」についても

¹⁰また、フィットの際の χ^2 は $\chi^2/\text{ndf}=830.3/367=2.26$ であり、良いフィットとは言えない。

$$19.2 \pm 0.7 \%$$

と求めることができる。これより、実際に 0° の RUN では 180° の RUN に比べて o -Ps の生成率は低下していることがわかる。また $|1, \pm 1\rangle$ と $|\psi_+\rangle$ の生成される比についても 180° の RUN と同様に求めると、 $p_1\tau_1 : p_2p_3 = (2.7 \pm 0.2) : 1$ となる。このときも理想的な 2:1 と一致しなかった。したがって、次章ではこの結果を用いずに、 $|\psi_+\rangle$ バックグラウンドの見積もりおよびイベント数の規格化を行なうことにする。

4.5.2 LYSO 結晶におけるエネルギー分布とシグナルイベント数

LYSO 結晶「L1 と L2」または「L1 と L3」で Off-line によるコインシデンスをとった後、崩壊時間 $100 \sim 270$ ns の TW 内のエネルギー分布をみたものが、図 64、65 縦軸は LiveTime を使って規格化し、実線は 0° での RUN、点線は 180° での RUN を示している。図 64 は「L1 と L2」によるコインシデンスによるもの、図 65 は「L1 と L3」によるコインシデンスによるものである。このエネルギー分布を 2 次元プロットにしたものをさらに図 66、67 に示す。

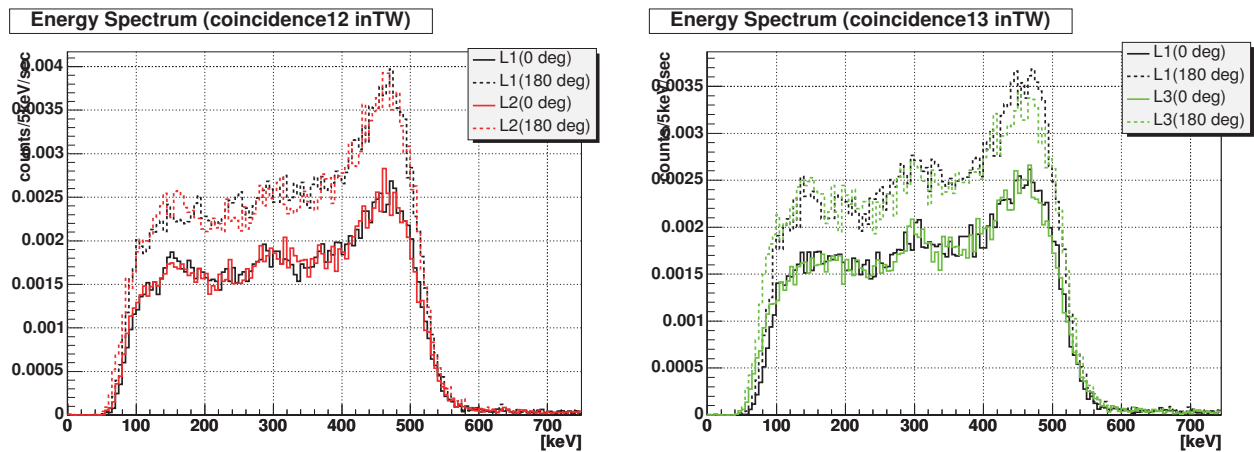


図 64: L1L2 コインシデンスの場合の 180° の RUN と 0° の RUN とエネルギー分布の比較 (TW 内) 図 65: L1L3 コインシデンスの場合の 180° の RUN と 0° の RUN とエネルギー分布の比較 (TW 内)

これら 2 次元分布で、既に定義している赤い枠線内の Energy Window 内のイベント数をカウントした結果、表 9 の通りとなる。ここで示した数は 0° 方向での RUN(LiveTime 206713[s]) 全てのデータを解析した結果である。

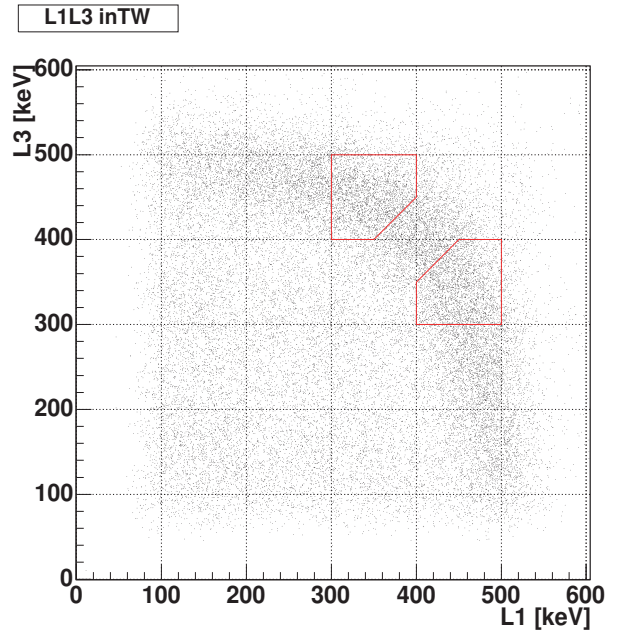
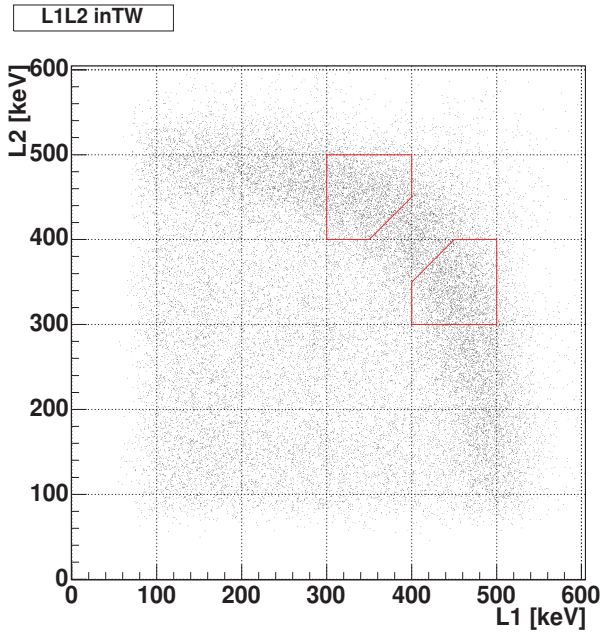


図 66: 0° の RUN において、「L1 と L2」でコインシデンスをとり、TW の条件を課した場合のエネルギー分布 (X 軸:L1,Y 軸:L2)

図 67: 0° の RUN において、「L1 と L3」でコインシデンスをとり、TW の条件を課した場合のエネルギー分布 (X 軸:L1,Y 軸:L3)

イベント内容	イベント数
$\vec{k}_1 \rightarrow L1 \vec{k}_2 \rightarrow L2$	2715 ± 52
$\vec{k}_1 \rightarrow L2 \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2682 ± 52
$\vec{k}_1 \rightarrow L1 \vec{k}_2 \rightarrow L3$	2630 ± 51
$\vec{k}_1 \rightarrow L3 \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2677 ± 52

表 9: 0° の RUN におけるシグナルイベント数

ここに付与されているエラーは統計によるものである。EnergyWindow 内にシグナルとして検出されるイベントは 0.052Hz であり、MC において $o\text{-Ps}$ 生成率を 19% にした数値に対応する。

4.6 ^{176}Lu 起源のバックグラウンド測定

3.3 節で述べたように LYSO 結晶の成分である Lu 元素には天然存在比 2.61 % で放射性同位体 ^{176}Lu が存在し、今回使用した結晶のサイズで、5.65kHz で ^{176}Lu 崩壊は検出される。単体で検出される限りでは Off-line でコインシデンスのカットを要求すれば、問題にならないが、 ^{176}Lu が崩壊したときに放出される γ 線がその結晶内では検出されず、他の LYSO 結晶で検出された場合、コインシデンス条件でも生き残るイベントとなる。最終的には Energy Window 内に入るイベント数が問題になってくるが、これを今回のテスト実験では、線源を外した RUN を行なうことで見積もった。

background (coincidence L1L2)

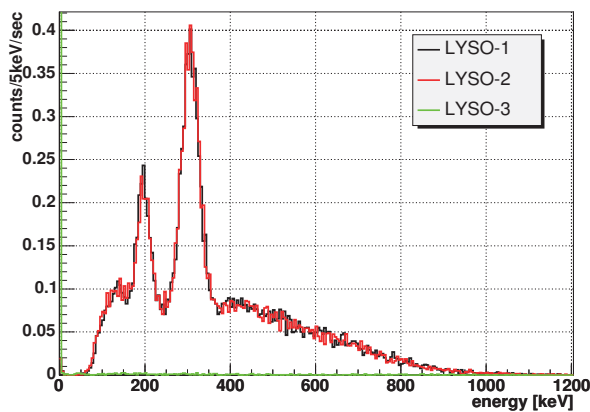


図 68: ^{176}L 起源バックグラウンド 1 次元分布 (「L1 と L2」のコインシデンス)

background (coincidence L1L3)

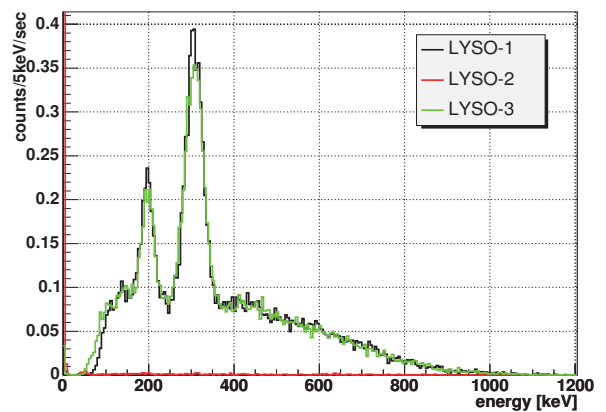


図 69: ^{176}L 起源バックグラウンド 1 次元分布 (「L1 と L3」のコインシデンス)

図 68,69 は Off-line でのコインシデンス条件を課した後の各 LYSO 検出器のエネルギー分布である。図 68 は「L1 と L2」のコインシデンス、図 69 は「L1 と L3」のコインシデンスをとったものである。 ^{176}Lu の崩壊で主に放出される γ 線のエネルギーは 88,202,307keV の 3 種類であるが、スレッシュホールド以下で見えない 88keV 以外の 202,307keV の γ 線のピークがきれいに見えている。それよりも高いエネルギー領域に見えているのが、他の LYSO 検出器へ γ 線がエスケイプした残りの e^- および γ 線のエネルギー分布である。

ちなみにこれまでの RUN において、エネルギーのキャリブレーションはペDESTアルと 511keV のピークを用いておこなったが、今回のバックグラウンド測定では ^{22}Na 線源を取り外しているため 511keV のピークは存在しない。このバックグラウンド測定の RUN のみペDESTアルと 307keV のピークを用いてキャリブレーションを行なった。

図 68,69 のエネルギー分布を 2 次元として見たのが図 70,71 になる。図 70 は「L1 と L2」のコインシデンス、図 71 は「L1 と L3」のコインシデンスをとったものである。202keV と 307keV のラインに残りの e^- のスペクトルが存在している分布になっている。黒枠で囲った領域がすでに定義している Energy Window である。バックグラウンド測定の RUN 全イベント (2×10^7 イベント LiveTime:2298.04[s]) の中でこの EW 内に入ったイベント数を表 4.6 にまとめる。

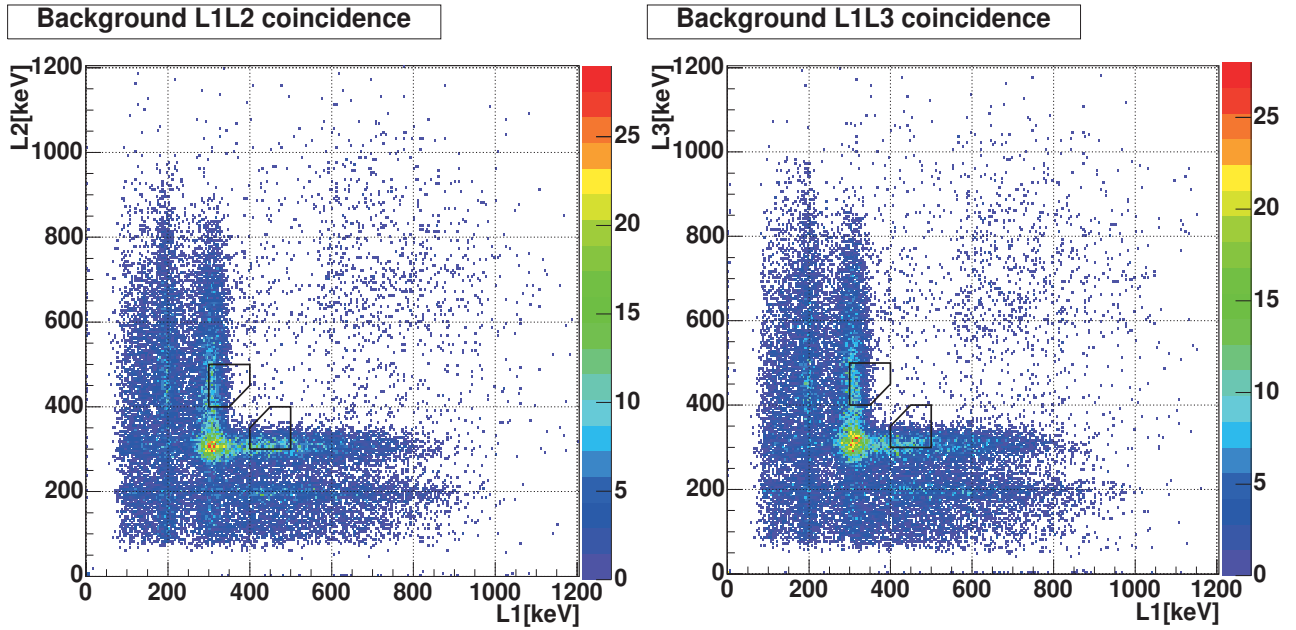


図 70: ^{176}Lu 起源バックグラウンド 2 次元分布 (「L1 と L2」のコインシデンス) 図 71: ^{176}Lu 起源バックグラウンド 2 次元分布 (「L1 と L3」のコインシデンス)

ここで、これまで求めてきた α -Ps シグナルの数にどのくらいの割合で LYSO 自身が鳴ることによる偽のシグナルが含まれるかを見積もる。EW 内に入るイベントのレートは、LiveTime 2298.04[s] のうちに 4049 イベントあることから、 $1.76 \pm 0.03 \text{ Hz}$ と求めることができる。ベータトリガーシステムは 5.5kHz で鳴り、100~270ms の 170ms 間の TW を設けるので 180° および 0° の RUN 中、 ^{176}Lu の起源のバックグラウンドは

$$1.76 \times 5.5 \times 10^3 \times 170 \times 10^{-9} = (1.65 \pm 0.03) \times 10^{-3} \text{ [Hz]}$$

である。イベントレートは 180° の RUN で 0.074Hz、 0° の RUN で 0.052Hz であったことから、バックグラウンドの割合はそれぞれ、2.2%、3.2% であったことがわかる。

イベント内容	イベント数
$\vec{k}_1 \rightarrow \text{L1} \quad \vec{k}_2 \rightarrow \text{L2}$	1063 ± 33
$\vec{k}_1 \rightarrow \text{L2} \quad \vec{k}_2 \rightarrow \text{L1}$	984 ± 31
$\vec{k}_1 \rightarrow \text{L1} \quad \vec{k}_2 \rightarrow \text{L3}$	985 ± 31
$\vec{k}_1 \rightarrow \text{L3} \quad \vec{k}_2 \rightarrow \text{L1}$	1017 ± 32

表 10: ^{176}Lu 起源のバックグラウンド測定におけるシグナルイベント数

5 C_{CP} の導出とその考察

5.1 Q 値について

今回のテスト実験では、LYSO 結晶間の角度は 150° 、磁石の方向を $(\theta, \phi) = (30^\circ, 0^\circ), (30^\circ, 180^\circ)$ にして配置してある。1つのセットアップで、L1 を \vec{k}_1 用の検出器とするか \vec{k}_2 用の検出器とするかで Q 値は異なる。ここで 0° の RUN について考える。「L1 と L2」でコインシデンスをとった

- (1) $\vec{k}_1 \rightarrow \text{L1}, \vec{k}_2 \rightarrow \text{L2}$
- (2) $\vec{k}_1 \rightarrow \text{L2}, \vec{k}_2 \rightarrow \text{L1}$

のイベントで Q 値は、(1) のイベントで正、(2) のイベントで負になるが、これを $Q_1, -Q_2$ と表すことにする。また、「L1 と L3」でコインシデンスをとったイベントを考えると、

- (3) $\vec{k}_1 \rightarrow \text{L1}, \vec{k}_2 \rightarrow \text{L3}$
- (4) $\vec{k}_1 \rightarrow \text{L3}, \vec{k}_2 \rightarrow \text{L1}$

のイベントの Q 値は $-Q_1, Q_2$ をとることになる。LYSO 検出器と磁石の配置から決まる角度を式 (13) に代入することで、理想的な Q_1, Q_2 は

$$Q_1 = 0.2165$$

$$Q_2 = 0.1875$$

と求めることが出来るが、実際には LYSO 結晶には有限の大きさがあるため Q 値に広がりが生じる。Geant4 によるシミュレーションで LYSO 検出器で測定されたエネルギーに Energy Window のカットをかけて生き残るイベントについて、実際に放った γ 線の方角と磁石の向きから、 Q_1, Q_2 を計算した¹¹ 分布を図 72, 73 に示す。

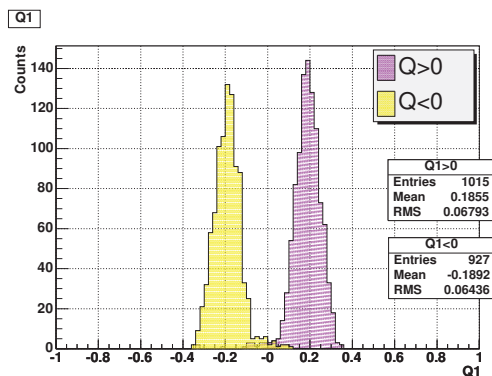


図 72: LYSO 検出器による Q_1 の広がり

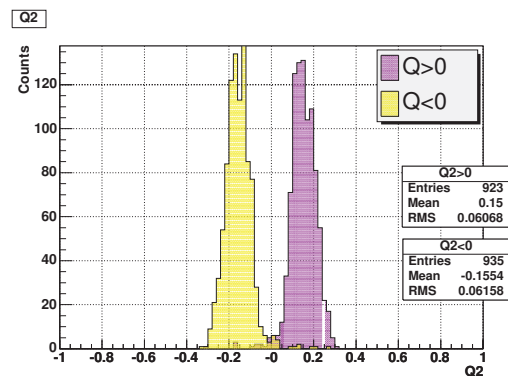


図 73: LYSO 検出器による Q_2 の広がり

¹¹ここで求めた Q 値の広がりにはシグナルとなるイベントの他に、 \vec{k}_3 を \vec{k}_2 と間違いカウントしているイベントや、検出器の効果の効果で \vec{k}_1 と \vec{k}_2 を入れ違えてカウントしているイベントの効果が含まれている。

例えば Q_1 の例で見ると、正の領域に分布しているのが (1) のイベントで負の領域に分布しているのが (3) のイベントということになる。

後に C_{CP} の値を求める際、 Q の値としては分布の平均値を採用することにする。

$$Q_1 = 0.187 \pm 0.003 \quad (34)$$

$$Q_2 = 0.153 \pm 0.004 \quad (35)$$

ここでは「(1) と (3)」および「(2) と (4)」で Q 値の絶対値の平均を取った。付与した誤差は2つの数値の標準偏差である。

5.2 非対称パラメータ A の導出とその統計誤差 (イベント数による規格化)

この節ではこれまでの RUN の結果で得られたイベント数から、非対称パラメータ A を求めることを目的とする。また A に付与される統計誤差についてもここで求める。Q 値が正の値をとるイベント数 N_+ と Q 値が負の値をとるイベント数 N_- を用いて、次式により非対称パラメータ A は計算される。

$$A = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \quad (36)$$

また、非対称パラメータの誤差 ΔA は、誤差の伝播から次式で求めることができる。

$$\Delta A = \frac{2\sqrt{N_-^2(\Delta N_+)^2 + N_+^2(\Delta N_-)^2}}{(N_+ + N_-)^2} \quad (37)$$

今回のテスト実験では、同じ LYSO 検出器のペアで 180° の RUN と 0° の RUN とで非対称パラメータをとる。例えば $L1$ を \vec{k}_1 用の検出器、 $L2$ を \vec{k}_2 用の検出器とした場合、磁石の方向を変えた 180° と 0° のイベント数を用いて、非対称パラメータを1つとる。すなわち、どれを \vec{k}_1 用、 \vec{k}_2 用の検出器にするかによって、計4つの非対称パラメータをとることができる。ここで、それぞれ RUN で得られたイベント数についてもう一度まとめておく。(表 11)

表 11: イベント数のまとめ

		180°	0°	^{176}Lu 起源バックグラウンド
	全イベント数	7.2×10^7	1×10^8	4×10^7
	LiveTime [s]	146092	206713	2298.04
(1)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$	2856	2715	1063
(2)	$\vec{k}_1 \rightarrow L2, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2857	2682	984
(3)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L3$	2677	2630	985
(4)	$\vec{k}_1 \rightarrow L3, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2517	2677	1017

^{176}Lu 起源のバックグラウンドの差し引き

表 11 最終列は LYSO 検出器自身の ^{176}Lu 崩壊によるバックグラウンドである。 0° 方向での RUN では α -Ps 生成率が低下したため、 180° 方向での RUN で得られた同程度のイベント数が得られるまで測定時間を延ばした。したがって2つの RUN でイベント数に含まれているバックグラウンドの量は異なってくる。そこで LiveTime でバックグラウンドの量を規格化し、得られたイベント数から差し引く。こうして得られたイベント数を統計的誤差と共に表 12 に示す。

表 12: ^{176}Lu 起源バックグラウンドを差し引いた数

		180°	0°
(1)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$	2792.8 ± 53.5	2625.6 ± 52.2
(2)	$\vec{k}_1 \rightarrow L2, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2798.5 ± 53.5	2599.2 ± 51.9
(3)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L3$	2618.5 ± 51.8	2547.2 ± 51.4
(4)	$\vec{k}_1 \rightarrow L3, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2456.5 ± 50.2	2591.5 ± 51.8

$|\psi_+\rangle$ 成分のバックグラウンドの差し引き

^{176}Lu によるバックグラウンド以上に主なバックグラウンドとなるのは $|\psi_+\rangle$ 成分である。今回は $|\psi_+\rangle$ 成分がシグナルイベント内にどれほどあるかについては、崩壊時間分布のフィット結果が理想的な値とコンシステントではなかったため、正確な見積もりができない。そこで理想的な状況下で $|\psi_+\rangle$ 成分のバックグラウンドになる割合を見積もることとする。今回用意した磁場システムでは、中心磁場が測定により 2.17kGauss であった。 $|1, \pm 1\rangle$ の成分の寿命は磁石を外した RUN で求めて 119.6ns であることから、理想的には $|\psi_+\rangle$ の寿命は 64ns と計算され、TimingWindow 内の $|1, \pm 1\rangle$ と $|\psi_+\rangle$ の比は 77% : 23% となる。ここでは $|1, \pm 1\rangle$ と $|\psi_+\rangle$ の生成比を理想的な 2:1 と仮定している。各シグナルイベントで、 $|\psi_+\rangle$ の割合とその不定性を見積もるのに、例えば 180° の RUN における (1) のイベントで ^{176}Lu 起源のバックグラウンドを差し引いたイベント数は上表より 2792.8 ± 53.5 イベントとなった。この 23% が $|\psi_+\rangle$ 成分となる。 $|\psi_+\rangle$ 成分のイベント数として、

$$2792.8 \times 0.23 = 642.3 \pm 12.3$$

と見積もる。ここで見積もった $|\psi_+\rangle$ 成分のイベント数の不定性に関して、割合の不定性からくる不定性については今回は考慮せず、 ^{176}Lu 起源のバックグラウンドを差し引いた時点でのイベント数の統計誤差からくる不定性のみを扱うこととする。このようにして $|\psi_+\rangle$ のイベント数を見積もり、全体のイベント数から差し引いた数を表 13 にまとめる。

表 13: $|\psi_+\rangle$ 成分のバックグラウンド差し引いた数

		180°	0°	0° (イベント数による規格化後)
(1)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$	2150.5 ± 54.9	2021.7 ± 54.8	2163.5 ± 56.9
(2)	$\vec{k}_1 \rightarrow L2, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2154.9 ± 54.9	2001.4 ± 54.8	2141.8 ± 56.7
(3)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L3$	2016.2 ± 53.1	1961.3 ± 53.1	1937.0 ± 51.8
(4)	$\vec{k}_1 \rightarrow L3, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	1891.8 ± 51.5	1995.4 ± 51.6	1970.7 ± 52.3

その他に、 ^{22}Na 線源を含んだベータトリガーシステムが存在することによるバックグラウンドも存在するが、TimingWindow 内には $|\psi_+\rangle$ 成分に比べてはるかに少ないことが予想されるので、ここで

は考慮しない。

イベント数による規格化

今回のテスト実験では 180° と 0° の RUN で o-Ps 生成率が著しく変化した。通常では o-Ps の生成率は 2 つの RUN で一致し、LiveTime によつてのイベント数を規格化を行なうはずであるが、今回それが出来なくなってしまった。そこで規格化すべき振り所として、1 ペアの LYSO 検出器で検出されるシグナルの総数を採用する。具体的には 0° の RUN における (1) のイベントを 180° のイベントに合わせて規格化する場合は、(1) と (2) のイベント数の和が 0° と 180° で同じになるように規格化する。

$$\frac{2150.5 + 2154.9}{2021.7 + 2001.4} \times 2021.7 = 2163.5 \quad (38)$$

表 13 最終列に示してある量はこのようにして規格化を行なった後の 0° の RUN におけるイベント数である。

最後にこうして得られたイベント数から求めた非対称パラメータとその統計誤差の結果を表 14 に示す。

表 14: 非対称パラメータ

		A
(1)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$	$A_1 = -0.00303 \pm 0.0183$
(2)	$\vec{k}_1 \rightarrow L2, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	$A_2 = -0.00304 \pm 0.0184$
(3)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L3$	$A_3 = -0.0200 \pm 0.0188$
(4)	$\vec{k}_1 \rightarrow L3, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	$A_4 = -0.0205 \pm 0.0190$

5.3 C_{CP} の導出

非対称パラメータは前節で表 14 のように求められた。また 5.1 節で求めた Q 値に含まれるバックグラウンドは、検出器の効果によって \vec{k}_1, \vec{k}_2 を逆にカウントしてしまったもの、および、 \vec{k}_3 を \vec{k}_2 とみなして、カウントしてしまっているものがある。実際には前節の最後で挙げた差し引きの行になっていないバックグラウンドの効果はすべて Q の中に考慮しないとイケないが、今回は 5.1 節で求めた Q 値を用いることにする。したがって、それぞれの非対称パラメータについて、 C_{CP} を式 (15) より求めると、

$$\begin{aligned} C_{CP\ 1} &= -0.0162 \pm 0.098 \text{ (stat)} \\ C_{CP\ 2} &= -0.0199 \pm 0.12 \text{ (stat)} \\ C_{CP\ 3} &= -0.107 \pm 0.10 \text{ (stat)} \\ C_{CP\ 4} &= -0.134 \pm 0.12 \text{ (stat)} \end{aligned} \tag{39}$$

となり、(1),(2) のイベントでは統計誤差 1σ の範囲で 0 にコンシステントであるが、(3),(4) のイベントでは統計誤差 1σ 程度の有限な値になっていることがわかる。

5.4 非対称な理由への考察

今回表 14 の結果で「L1 と L2」の LYSO 結晶で非対称パラメータをとったときは 1σ の統計誤差の範囲内で 0 にコンシステントな結果が得られたが、「L1 と L3」の非対称パラメータをとったときには非対称な結果が得られてしまった。これは、 180° の RUN で「L1 と L3」のペアを考えたときに、(3) と (4) のイベント数に差が出てしまっていることに起因する。検出器の個体差を考慮すると、イベント数に差が出ることに自体に問題はない。 0° の RUN では差がないにも関わらず、 180° の RUN で差が出ていることが問題なのである。この節では 180° の RUN でイベント数に差が生じている原因について追求していくことにする。

5.4.1 装置配置のずれによる効果

ここでは装置の配置のずれによって (3) と (4) のイベント数に差が出てくる可能性について議論する。今回のテスト実験では、 180° の RUN から 0° の RUN へ移行する際、装置の構造上、L2、L3 およびベータトリガーシステムの取り外しを行なった。再び元の位置に配置を行なう際、大きく見積もって 1mm 程度のずれが生じた可能性がある。そこで、装置の配置のずれがイベント数にどれだけ変化を及ぼすか見積もることにする。

イベント数が変化することとして 2 つの要因が挙げられる。1 つは線源から LYSO 検出器までの距離が変化することでアクセプタンスが変化する効果。もう 1 つは、 \vec{k}_1, \vec{k}_2 を検出する LYSO 検出器間の角度が変わることによって、検出する γ 線のエネルギーや角度の領域が異なってくる効果。この 2 つの要因それぞれにおいて、イベント数変化の割合が (3) と (4) で異なってくるか否か、以下では L3 の配置位置を 1mm ずらして見積もることにした。

L3 がずれる効果を次の 2 通りに分ける。(i) 距離がずれた場合、(ii) 角度がずれた場合

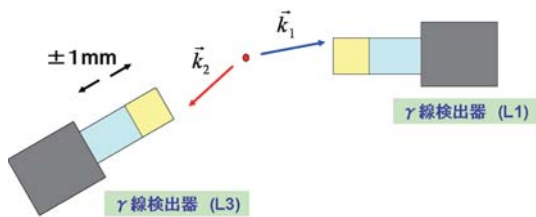


図 74: 距離がずれた場合

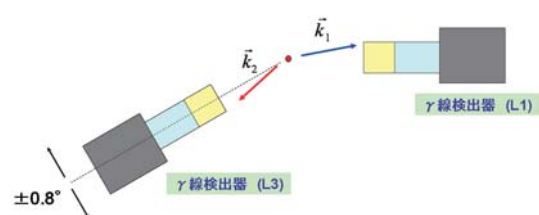


図 75: 角度がずれた場合

評価方法について

モンテカルロにより $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 崩壊に従う γ 線を放出させる。(i) に関しては、線源から L3 表面までの距離を $70 \pm 1\text{mm}$ と変化させ、L1、L3 表面に入る (3),(4) のシグナルイベントの数の変化を見る¹²。

¹²ここで検出器の効果は考慮せず、 γ 線の方向ベクトルが LYSO 検出器の表面内に向いているかどうかで判断する。

このときLYSO結晶間の角度は変化させず150°のままとしておく。(ii)に関しては、距離は変化させず、角度のみを $150 \pm 0.8^\circ$ と変化させ、同様に(3)と(4)のシグナルイベント数の変化を見る。 $(\pm 0.8^\circ)$ ずれることはL3表面で左右に1mmずれることに相当する。)

これらのずれにより実際の測定で生じた(4)のイベント数に対する(3)のイベントの増分

$$\frac{2016.2}{1891.2} = 6.6 \pm 4.0 \% \quad (40)$$

を生じさせることが出来るか検討する。

－ 距離がずれた場合の結果 －

距離がずれた場合の結果を表15に示す。1列目は、(3)となるイベントについて、70mmにきちんと配置してあるときからのイベント数の変化を記載している。ここで付与してある誤差はモンテカルロを行なった数に応じて付けてある。2列目に関しては同様に(4)となるイベントについての増分。これをみると、(3)(4)ともに、アクセプタンスの効果により、1mm遠ざかったときはイベント数が減少し、1mm近づいたときはイベント数が増加しているのがわかる。そこで、このようにずらした場合、(3)と(4)のイベント数に差が生じるかについてみたものが、3列目である。ここでは(4)に対する(3)のイベント数の増分を記載している。この結果、LYSO検出器までの距離が1mm変化することで有意なイベント数のずれは生じないと結論できる。

表 15: 距離がずれた場合のイベント数の変化

	(3) の変化	(4) の変化	(3) と (4) のイベント数のずれ
+1mm ずれた場合	$-2.3 \pm 1.7\%$	$-2.4 \pm 1.7\%$	$0.061 \pm 1.7\%$
-1mm ずれた場合	$2.5 \pm 1.8\%$	$2.5 \pm 1.7\%$	$0.044 \pm 1.7\%$

－ 角度がずれた場合の結果 －

距離がずれたときと同じように、角度がずれた場合の結果を表16に示す。この場合もイベント数に有意なずれは生じないと結論できる。

表 16: 角度がずれた場合のイベント数の変化

	(3) の変化	(4) の変化	(3) と (4) のイベント数のずれ
+0.8° ずれた場合	$4.3 \pm 1.8\%$	$4.3 \pm 1.8\%$	$0.30 \pm 1.7\%$
-0.8° ずれた場合	$-3.7 \pm 1.7\%$	$-3.7 \pm 1.7\%$	$0.54 \pm 1.7\%$

以上のように距離をずらした場合も角度をずらした場合も(3)と(4)のイベントに差が生じないことがわかった。したがって、測定で得られたイベント数の差は装置の配置のずれでは説明できないと結論できる。

5.4.2 イベント数の時間変化

次に調べたものは、イベント数の時間変化についてである。今回、最終的なシグナルの総数として見たときに (3) と (4) のイベント数は非対称な結果となっているが、時間ごとに分けてみたとき、一貫して非対称となっているかどうかについて調べた。テスト実験では、 2×10^6 イベント（データ取得時間約 90 分）を 1 ファイルとして記録し、キャリブレーションも 1 ファイルごとで行なっている。このファイル毎のシグナルのイベント数の変化を見たものが、図 76 である。

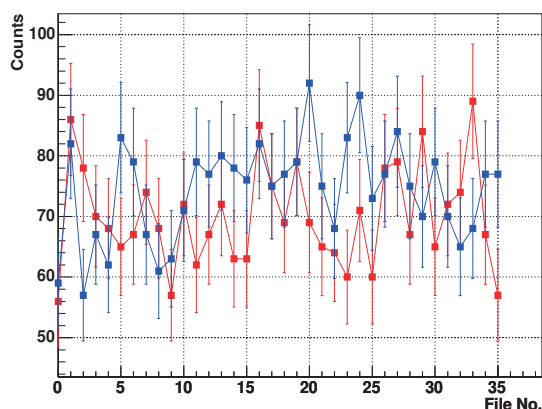


図 76: ファイル毎のイベント数の変化 (180° での RUN)。青線は (3) のイベント数、赤線は (4) のイベント数を示す。

ここで 11 ファイル目から 24 ファイル目あたりで青色で示された (3) のイベントが赤色で示された (4) のイベント数よりも 1 ファイルあたり約 10 イベントほど上回っているのがわかる。また、x ファイル目までの総イベント数の推移を見たものが図 77 であり、x ファイル目までにおける、総イベント数の差 ((3)-(4)) を見たのが図 78 となる。

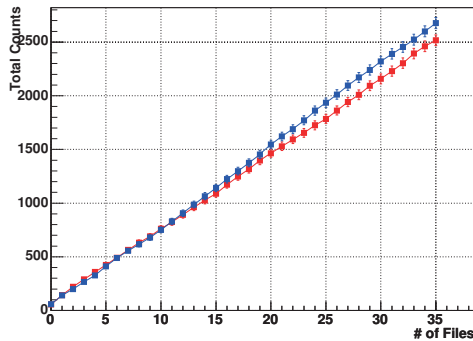


図 77: x ファイル目までの総イベント数 (180° での RUN)。青線は (3) の総イベント数、赤線は (4) の総イベント数を示す。

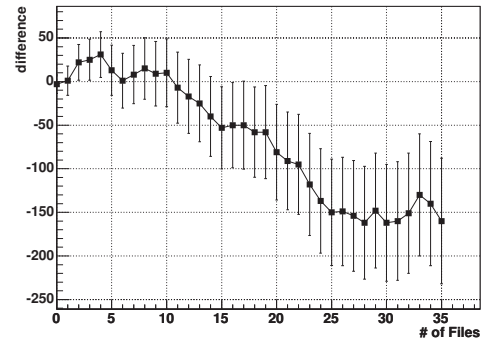


図 78: x ファイル目までの総イベント数の差 (3)-(4)(180° での RUN)

これを見ると、11 ファイル目から 24 ファイル目の間 (約 21 時間のデータ取得時間) のみで、総イベント数の差が生じ、他の測定時では横一線にイベント数の差が生じていないことがわかる。

ゲインの低下率の変化

そこで、他の測定時と比べて 11 ファイル目 ~ 24 ファイル目で異なる点について調べてみる。まず LYSO 検出器のゲイン低下率の変化が挙げられる。180° での RUN では、L1 と L2 に関しては著しくゲインの低下が見られた。(図 41,42,43) 11 ファイル目から 24 ファイル目までを見ると、L1 および L2 に関してゲインの低下率がそれまでよりも若干増大していることがわかる。

表 17: ゲインの低下率

	11 ファイル目以前	11 ~ 24 ファイル
L1 のゲイン低下率	0.71ch/file	0.86ch/file
L3 のゲイン低下率	8ch 以内	8ch 以内

そこで、(3) と (4) のイベント数に差が生じているのは L1 のゲイン低下率が大きくなったためではないかと考えた。実際に 1 ファイルの中でも最初のデータと最後のデータではゲインも違うはずである。しかし、1 ファイルでは 1 直線としてキャリブレーションしているため、ゲインの低下率の増大により、キャリブレーションの粗さが現れ、イベント数に変化が生じているのではないかと考えた。

ここで式 (41) によってフィットして求めたキャリブレーションパラメータ (p_0, p_1) 時間変化について、図 79,80 に示す。

$$y[\text{keV}] = p_0 + p_1 x[\text{ch}] \quad (41)$$

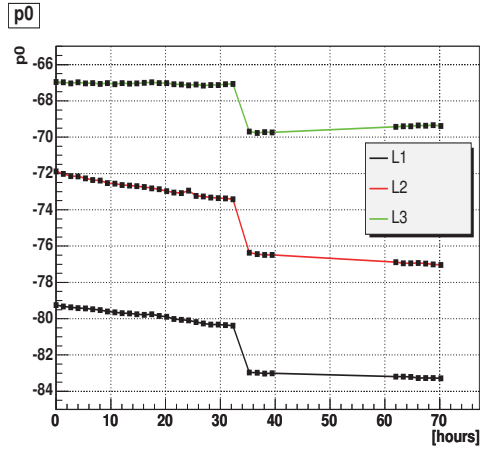


図 79: p_0 の時間変化 (180°)

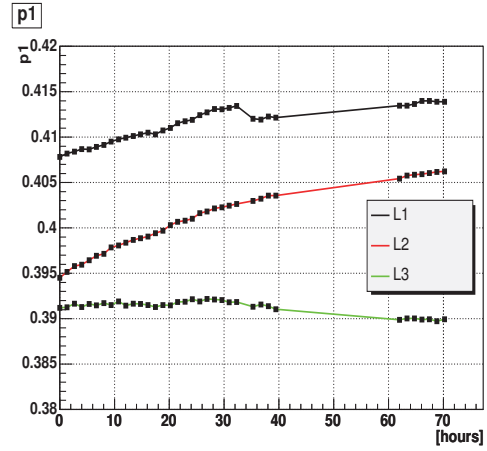


図 80: p_1 の時間変化 (180°)

ゲインの変化により、1 ファイルで p_0 に関しては約 0.1 減少し、 p_1 に関しては約 0.0002 の増加がある。

これより、故意的にキャリブレーション直線のパラメータ値 (p_0, p_1) を変化させ、イベント数に差がでるどうか試すことにする。ここでは 11 ファイル目を取り扱うことにする。変化させるのは L1 のキャリブレーション定数のみとする。実際に求めているキャリブレーション定数は

$$p_0 = -74.745 \pm 0.016 \quad (42)$$

$$p_1 = 0.41031 \pm 0.00008 \quad (43)$$

である。これを下記のエネルギーが高く換算される (i) の場合と低く換算される (ii) の場合とでのイベント数の変化を見る。

$$(i) \quad p_0 = -74.745 + 0.1 \quad p_1 = 0.41031 + 0.0002 \quad (44)$$

$$(ii) \quad p_0 = -74.745 - 0.1 \quad p_1 = 0.41031 - 0.0002 \quad (45)$$

ここで変化させた量は 1 ファイルで変動する p_0, p_1 のおよその値で、先程述べたように p_0 に関しては 0.1、 p_1 に関しては 0.0002 とする。これらはおよそ 511keV 付近で約 0.5keV キャリブレーションがずれていることに相当する。このようにして、1 ファイルにおけるキャリブレーション定数の違いによるイベント数の違いをまとめたものが表となる。

表 18: キャリブレーション定数の違いによるイベント数の変化 (11 ファイル目)

	(3) のイベント数	(4) のイベント数
$p_0 = -74.745, p_1 = 0.41031$	79	62
(i)	79	63
(ii)	78	62

この結果をみると明らかなように、キャリブレーションの粗さにより 1 ファイルごとに 10 イベントずつ差を生じさせるとは考えにくい。つまり、これまで追求してきた (3) と (4) のイベント数の差はゲインの低下率増大によるキャリブレーションの粗さが原因で生じているのではないと考えられる。

エネルギー分布の違い

180° の RUN における EW 内のイベントのエネルギー分布をみる。(図 81) この図は点線が (3) のイベントで、実線が (4) のイベントでのエネルギー分布を示している。色の違いは黒線が L1、緑線が L3 を表している。

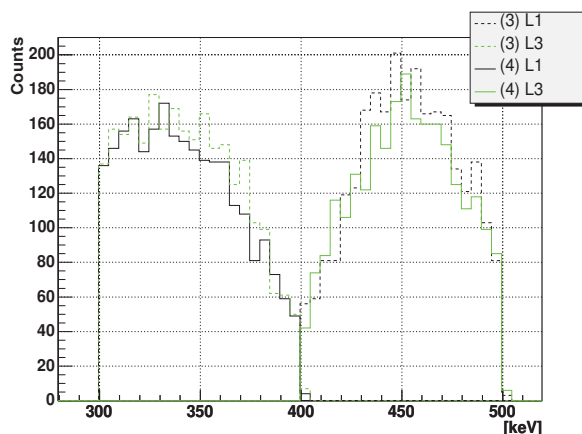


図 81: 180° の RUN における EW 内イベントのエネルギー分布。点線が (3) のイベント、実線が (4) のイベントを表す。色の違いは、L1 で測定されたエネルギーについては黒線、L3 で測定されたエネルギーについては緑線。

(3) と (4) の分布を比較したときに、 \vec{k}_1 用検出器では 430~470keV、 \vec{k}_2 用の検出器では 330~370keV の領域で (4) に比べ (3) の excess が見られる。

このエネルギー領域に入る γ 線の \vec{k}_1 と \vec{k}_2 のなす角度について調べた。(図 82) 青線が LYSO 検出器に入り得る全ての γ 線の角度分布、赤線が上記のエネルギー領域で LYSO 検出器に入り得る γ 線の角度分布となる。縦軸は双方とも任意のままである。

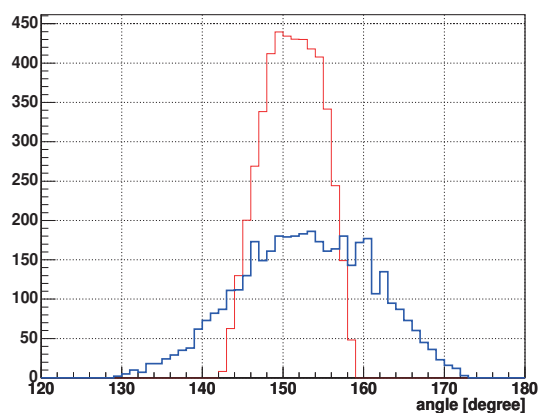


図 82: excess のあるエネルギー領域に入る \vec{k}_1 と k_2 のなす角度分布 (赤線)。青線は EW 内に入り得るすべての \vec{k}_1 と k_2 のなす角度分布。

以上より、(3) と (4) のイベント数の差を生じさせているのは \vec{k}_1 用検出器では 430~470keV、 \vec{k}_2 用の検出器では 330~370keV の領域で $\vec{k}_1 - \vec{k}_2$ 間角度はおよそ $140^\circ \sim 160^\circ$ の間であろうことがわかった。

5.4.3 考察のまとめ

これまで 180° 方向での RUN において L1 と L3 によって検出するシグナルイベントである (3) と (4) で数に差が生じる原因について追求してきた。これまででわかったことは、ある一定の期間のみでイベント数の差が生じていること。キャリブレーションの粗さからイベント数の差が生じる可能性について議論してきたが、これでは現在生じているイベント数の差は説明できなかった。また、イベント数の差を生じさせているエネルギー領域は、 \vec{k}_1 用検出器で、430~470keV、 \vec{k}_2 用の検出器では 330~370keV の事象であり、これらの角度はおよそ $140^\circ \sim 160^\circ$ の間であること予想された。しかし根本的な原因についてはまだ不明のままである。

5.5 非対称パラメータ A についての系統誤差の評価

5.5.1 線源位置のずれにより生じる系統誤差

前節で装置の配置のずれにより、イベント数は変化することをみた。ここでは ^{22}Na 線源と LYSO 検出器の位置関係の不定性からくる非対称パラメータ A への系統誤差について議論する。線源位置の決定は、線源ホルダーに関してはベータトリガーシステム（アクリル製ライトガイド）への取り付けを図 83 のように中心に合わせてマイラーテープで固定して行い、また LYSO 検出器とベータトリガーシステム全体に関しては図 84 のように同じアクリル板に固定して行なった。今回のテスト実験では磁石を 180° 方向から 0° 方向の状態へと動かすときに、ベータトリガーシステムと LYSO 検出器 L2, L3 については一度取り外しを行なった。このとき、2 つの RUN での配置位置の再現性は 1mm 程度であったと言える。

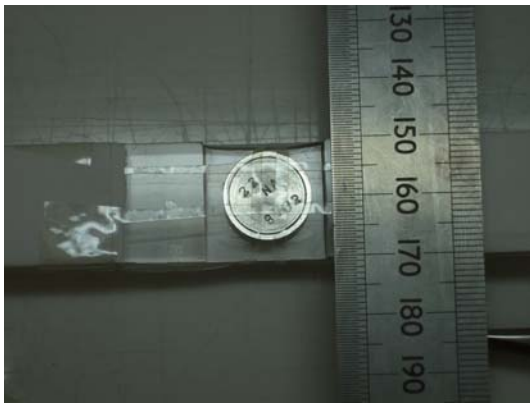


図 83: 線源ホルダーの配置

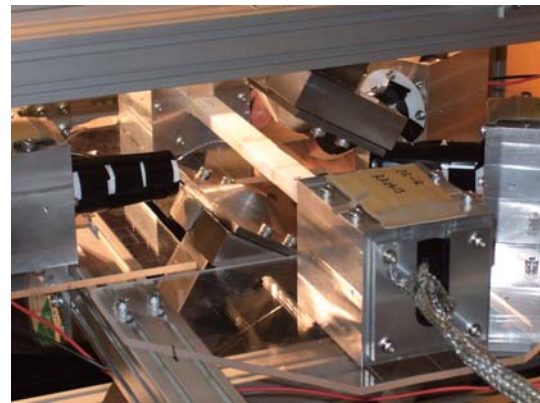


図 84: LYSO 検出器と ^{22}Na 線源の配置

実際に 2 つの RUN でどのくらいの配置のズレが生じたかはわからないが、図 85 の模式図のように LYSO 検出器群の中心に配置してあるはずの ^{22}Na 線源が 1mm ズれて配置されたと仮定し、きちんと中心に配置されたときとの差を議論することにより、線源位置の不定性による非対称パラメータ A の系統誤差を見積もる。

線源位置がずれることによりイベント数に変化が生じる主な理由としては次の 2 つが挙げられる。

- LYSO 検出器へのアクセプタンスの違い
- 2 つの LYSO 検出器のなす角による検出される $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ キネマティクスの違い

これらの効果が最も顕著に現れるのは ^{22}Na 線源が y 軸方向にずれた場合である。まずは y 軸方向に +1mm ずれた場合の $\vec{k}_1 \rightarrow L1$, $\vec{k}_2 \rightarrow L2$ のイベント数の変化について考察を進めていく。

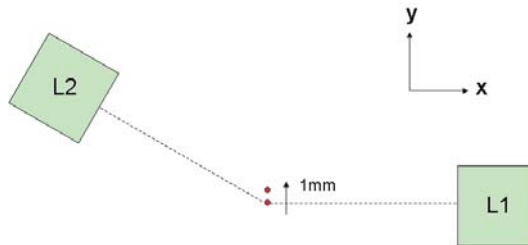


図 85: $y=+1\text{mm}$ へずれた場合

いま ^{22}Na 線源 (Ps 生成位置) は 1 点として扱い、議論をおこなう。
 y 方向へ 1mm ずれた場合にアクセプタンスの増分は L2 への距離が 70mm から 69.5mm となるため、 $(70/69.5)^2 = 1.0144$ と計算される。つまり約 1.4% イベント数が増加すると考えられる。
 また 2 つの LYSO 検出器がなす角度についても、 y 軸方向に +1mm ずれることで、中心にきちんと配置されたときよりも大きな角度のものが検出されるようになる。この様子を示したものが図 86 で、線源位置から $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ イベントを発生させ、LYSO 結晶表面に γ 線の方角ベクトルが向いたイベントを選び、 \vec{k}_1 と \vec{k}_2 のなす角をヒストグラムにしたものである。ここでは L1 に \vec{k}_1 、L2 に \vec{k}_2 のベクトルがイベントを選んだ。黒実線が中心にきちんと配置した場合の分布、赤点線が y 軸方向に +1mm ずらした場合の分布である。これより 150° 以下の領域のイベント数の減少以上に 160° 以上の領域のイベント数の増加が多いことがわかる。以上から、線源位置 y 方向に +1mm をずらした場合、イベント数の増加が起きていることがわかる。

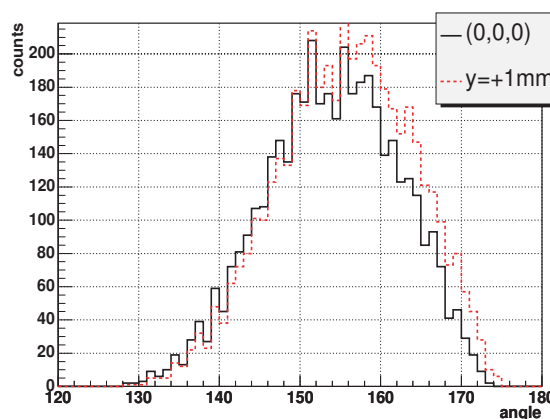


図 86: LYSO 検出器内に入るイベントの角度分布の違い。黒実線は原点に線源を配置したもの。赤点線は y 方向に +1mm ずらして配置したもの。

この増加した大角度のイベントの \vec{k}_1, \vec{k}_2 のエネルギーはどの領域であるか調べる。先程と同じく発生させた $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 事象のうち、 γ 線がLYSO結晶の表面に向かっているものを選び出し、今度はエネルギーの分布をみてる。図87は1次的にE1,E2の分布をみたもので、実線で示したものが中心にきちんと配置したもの、点線がy軸方向に+1mmずらして配置した分布である。これより、E1に関して、450keV~500keVの領域にイベントが増加しているのが確認できる。これを2次的にみると図88のようになり、線源をずらした配置の赤点が、Energy Window (青枠線) 内で450~500keVの領域に増加しているのがわかる。今回、実際に発生させたモンテカルロの $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 事象で、EW内に入るイベント数の変化を見積もった結果、このy方向+1mmへの線源位置のずれにより、 $7.9 \pm 1.6\%$ のイベント数の増加がみられることがわかった。

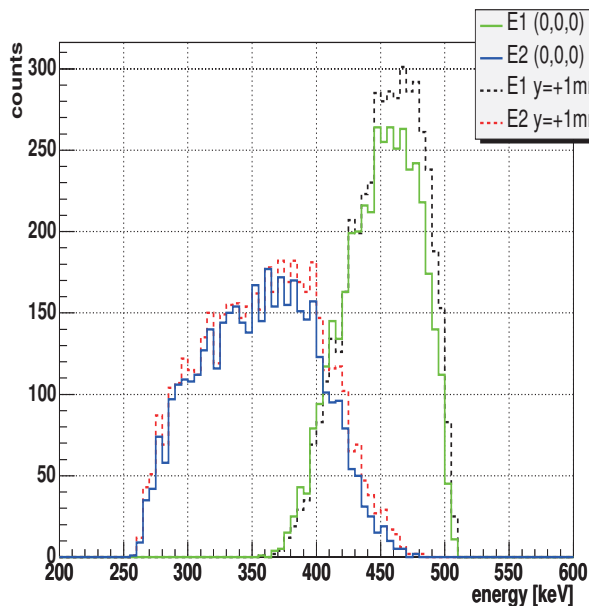


図 87: LYSO 検出器内に入る $\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$ のイベントのエネルギー分布。実線が原点に線源を配置したもの、点線がy方向に+1mmずらして配置したもの。

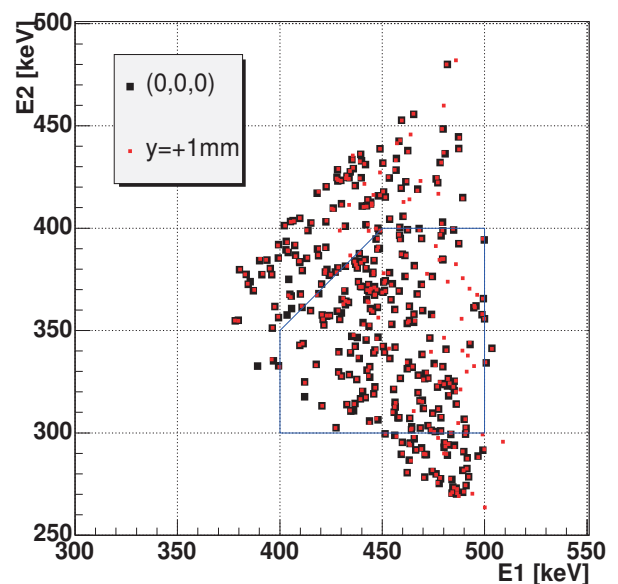


図 88: LYSO 検出器内に入る $\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$ のイベントのエネルギー分布。黒点が原点に線源を配置したもの、赤点がy方向に+1mmずらして配置したもの。

これまでではモンテカルロにより、 $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$ 事象の生成を行い、 γ 線の方角によってイベント数の変化を議論してきた。より詳細に、 ^{22}Na 線源・Ps生成位置の広がりやLYSO結晶内での物理過程の効果を検討するために、第3章で行なったGeant4を用いたシミュレーションにおいて、ベータトリガーシステムの配置を様々な方向にずらした場合のシミュレーションを再度行なった。

このとき得られた $\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$ のイベント数を表19に示す。ここでは、x,y軸についてそれぞれ、 $\pm 1\text{mm}$ 線源位置を動かして、EW内のイベント数の変化をみた。z軸については今回2つのRUNでの再現性は良く、また、イベント数の変化がx,y軸方向のずれに比べ小さいと予想されるので省略

した。

表 19: 線源位置をずらした場合の Geant4 シミュレーション結果。イベント数は全体である 2×10^8 の e^+ 放出イベントに対する数。

	イベント数	原点に置いたときからの増減
(0,0,0)	3901	—
$x = -1\text{mm}$	3837	$-1.6 \pm 2.2 \%$
$x = +1\text{mm}$	3849	$-1.3 \pm 2.2 \%$
$y = -1\text{mm}$	3560	$-8.7 \pm 2.1 \%$
$y = +1\text{mm}$	4104	$5.2 \pm 2.4 \%$

このシミュレーションの範囲では、線源を x 軸方向にずれたときのイベント数と原点に配置したときのイベント数に有意な差はなかった。一方、線源を y 軸方向へずらしたときは、数%のイベント数がみられた。

以上から、線源の配置位置のずれにより、イベント数に最大 9% の増減があるとして、非対称パラメータ A の誤差を見積もることとする。イベント数 N に対し、 $\Delta N_+ \sim \Delta N_- \sim 0.09N$ の変動があるとして式 (37) を適用すると、各非対称パラメータ $A_1 \sim A_4$ で見積もられる線源の配置位置のずれからくる系統誤差は

$$\Delta A (\text{sys}) \sim 0.64 \quad (46)$$

と見積もられる。すなわちこの節の結論としては、「セットアップ組みなおしの際に線源の位置が 1mm ずれた場合の非対称パラメータ A への系統誤差は、表 14 で記載した統計誤差のおよそ 3 倍の量であると見積もられる。」ということである。また C_{CP} に関しても、この場合、統計の誤差のおよそ 3 倍の誤差がつく。

5.5.2 系統誤差を生じさせるその他の要因

今回この論文では、セットアップを入れ替える際の装置配置の再現性から生じる系統誤差について議論した。しかし、実験本番では、今回のように磁石の向きを変える際に装置の取り外しを行なう必要はなく(第6章参照)、ここで議論した系統誤差は問題とならない。したがって、その他の要因から生じる系統誤差が重要になってくる。これは、今回のテスト実験についても同様のことが言え、前節で議論した装置配置の再現性からくる系統誤差だけが全てではない。これらについて評価していくことが今後の課題となるが、ここでは考えられる系統誤差について列挙するにとどめる。

- o-Ps 生成率の不定性
2つのセットアップ間で、イベント数を規格化する際に、o-Psの生成レートの決定精度が重要になってくる。本来はLiveTimeを用いて規格化するのであるが、このとき生成レートに不定性が存在すると、規格化後のイベント数に不定性が生じることになり非対称を生む可能性がある。
- $|\psi_+\rangle$ 成分の混入率
前節では理想的な状況下での、 $|\psi_+\rangle$ 成分のシグナルへの混入率を見積もったが、実際には、崩壊時間分布をフィットして得られるパラメータの値から $|\psi_+\rangle$ 成分の混入率を求める。したがってこのパラメータ決定精度が重要になる。
- 偽イベントの見積もり
 \vec{k}_3 を \vec{k}_2 と誤って認識してしまったり、検出器の効果により \vec{k}_1 と \vec{k}_2 の順番を入れ換えてカウントしてしまう偽イベントの割合を見積もり、それが Q 値に及ぼす影響をその不定性と共に評価しなければならない。
- バックグラウンドの評価
今回のテスト実験では ^{176}Lu 起源のバックグラウンド評価を行なうのに、ベータトリガーシステムを取り外したセットアップを用いた測定を行なった。しかし、 ^{22}Na があることで存在する γ 線と ^{176}Lu によるコインシデンスで生じるバックグラウンドについては考慮していない。これが EW 内に混入してくる割合の評価を行なう必要がある。

5.6 フィット結果を用いた C_{CP} の導出

今回のテスト実験における崩壊時間分布のフィット結果は、 χ^2 の値から良いフィットとは言えず、また寿命に関しても理想値と大きく異なっていたために、5.3 節まででは、「理想的な状況下での $|\psi_+\rangle$ 成分バックグラウンドの見積もり」および「イベント数による規格化」によって A, C_{CP} の導出を行なった。この節では、通常行なうべきであったこれらの操作の手順を示すこと目的とする。

$|\psi_+\rangle$ 成分バックグラウンドの差し引き

まず、 $|\psi_+\rangle$ 成分バックグラウンドを見積もり、差し引くことを行なう。ここでは、100~270ns に設定した Timing Window 内のイベントの何%が $|1, \pm 1\rangle$ であるか、前章の崩壊時間分布のフィッティングで得られたパラメータ $p_1 \sim p_3, \tau_1$ を用いて、求めることにする。この量は、理想的な場合の 5.2 章では 77% であると見積もられる量である。

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\int_{100}^{270} p_1 \exp(-t/\tau_1) dt}{\int_{100}^{270} [p_1 \exp(-t/\tau_1) + p_2 \exp(-t/p_3)] dt} \\
 &= \frac{p_1 \tau_1 (e^{-100/\tau_1} - e^{-270/\tau_1})}{p_1 \tau_1 (e^{-100/\tau_1} - e^{-270/\tau_1}) + p_2 p_3 (e^{-100/p_3} - e^{-270/p_3})} \\
 &= \begin{cases} 0.954 \pm 0.014 & (180^\circ \text{での RUN}) \\ 0.849 \pm 0.033 & (0^\circ \text{での RUN}) \end{cases} \quad (47)
 \end{aligned}$$

これを ^{176}Lu 起源のバックグラウンドを差し引いた数 (表 12) に乗じると、 $|\psi_+\rangle$ を差し引いた数として以下の表 20 のとおりになる。

表 20: ^{176}Lu 起源バックグラウンドを差し引いた数

		180°	0°
(1)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$	2640.2 ± 63.9	2229.8 ± 98.0
(2)	$\vec{k}_1 \rightarrow L2, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2645.6 ± 64.0	2207.4 ± 97.1
(3)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L3$	2475.4 ± 61.2	2163.2 ± 95.4
(4)	$\vec{k}_1 \rightarrow L3, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2322.3 ± 58.7	2200.8 ± 96.8

ここで付与されている誤差は統計によるものであり、「表 12 に記載されているイベント数の統計的ふらつき」と、「崩壊時間分布のフィッティングの際に各パラメータに付く統計誤差である式 (47) の誤差」に相関がないとして誤差の伝播から計算を行なった。

LiveTime および o-Ps 生成率を用いた規格化

次に、「LiveTime」および「フィット結果から求められる o-Ps の生成率の比」を用いてイベント数の規格化を行なう。表 20 で求めた数字は各 RUN でのイベント数を求めたもので、両者の RUN で LiveTime および o-Ps 生成率が異なるために、比較することはできない。そこで、 0° の RUN におけるイベント数を 180° の RUN における LiveTime および o-Ps に合わせて規格化を行なう。すなわち次式で定義される規格化因子 f を表 20 での 0° の RUN におけるイベント数に乗じることを行なう。

$$f = \frac{(\text{180}^\circ \text{の RUN における LiveTime})}{(\text{0}^\circ \text{の RUN における LiveTime})} \times \frac{(\text{180}^\circ \text{の RUN における o-Ps 生成率})}{(\text{0}^\circ \text{の RUN における o-Ps 生成率})} \quad (48)$$

ここで、 180° での RUN における LiveTime および o-Ps 生成率はそれぞれ $146092\text{sec}, 25.5 \pm 0.6\%$ であり、 0° での RUN においてはそれぞれ、 $206713\text{sec}, 19.2 \pm 0.7\%$ であるので、

$$f = 0.938 \pm 0.041 \quad (49)$$

と計算される。これを 0° の RUN のイベントに乘じ、イベント数および非対称パラメータ A は表 21 のようになる。

表 21: 最終的に比較するイベント数と非対称パラメータ A

		180°	0° (規格化後)	A
(1)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L2$	2640.2 ± 63.9	2090.7 ± 129.9	0.116 ± 0.033
(2)	$\vec{k}_1 \rightarrow L2, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2645.6 ± 64.0	2069.7 ± 128.7	-0.112 ± 0.033
(3)	$\vec{k}_1 \rightarrow L1, \vec{k}_2 \rightarrow L3$	2475.4 ± 61.2	2028.3 ± 126.2	-0.0993 ± 0.033
(4)	$\vec{k}_1 \rightarrow L3, \vec{k}_2 \rightarrow L1$	2322.3 ± 58.7	2063.5 ± 128.3	0.0590 ± 0.033

これより、5.3 節と同様に C_{CP} を計算すると、

$$\begin{aligned} C_{CP 1} &= 0.621 \pm 0.18 \text{ (stat)} \\ C_{CP 2} &= -0.798 \pm 0.22 \text{ (stat)} \\ C_{CP 3} &= -0.531 \pm 0.18 \text{ (stat)} \\ C_{CP 4} &= 0.386 \pm 0.22 \text{ (stat)} \end{aligned} \quad (50)$$

と求められる。本来は、以上のようにフィット結果を用いて C_{CP} の導出を行なうべきであった。。

6 実験本番に向けて

この章では現在準備を進めている実験本番での改善点などについて簡単にふれることとする。

6.1 LYSO 検出器の増設

今回のテスト実験では γ 線検出器として LYSO 結晶を $0^\circ, 150^\circ, 210^\circ$ の 3 箇所に設置したが、本番では、LYSO 検出器をもう 1 つ 60° の方向に配置する予定である。これによってペアをとる LYSO 検出器の組み合わせが 3 通りになり、統計量を増やすことが出来る。

6.2 磁場の強化

本番では新たに磁場システムを製作し、Ps 生成位置での磁場を強化することを計画している。現段階の設計では中心位置で 3.5kGauss 半径 5mm 以内で 1 パーセントの磁場がかかる予定である。テスト実験用磁場システム (中心位置で 2.2kGauss) で $|\psi_+\rangle$ 成分の寿命が 69ns であり、100 ~ 270ns の TimingWindow 内の $|\psi_+\rangle$ 成分混入率は 24.2 パーセントであったが、本番用磁場システムでは $|\psi_+\rangle$ 成分の寿命が 39.0ns になり、TimingWindow 内の $|\psi_+\rangle$ 成分混入率は 9.8 パーセントまで抑えられる。

今回のテスト実験では、寿命の決定および生成率の導出がうまくいかず、したがって、 $|\psi_+\rangle$ 成分がシグナルに混入する割合の評価は行なわなかった。うまくいかなかった原因として、2 つの寿命の成分が近かったことが上げられると考えられる。したがって磁場を強化することで、寿命および生成率の決定の精度が上がるのではないかと期待される。

6.3 ベータトリガーシステムの改善

テスト実験では ^{22}Na 線源として 17.4kBq の密封線源を使用した。本番では図 89 のように非密封 ^{22}Na 線源を用意し強度を増し、またエアロジェルターゲットに関しても上下 2 箇所に配置してプロトタイプ装置の実験では密封線源のホルダーの構造上使えなかった片側も有効にし統計量を稼ぐ。

このベータトリガーシステムのパフォーマンスを調べるために、 ^{22}Na 線源の広がりを半径 3mm とし、Geant4 によるシミュレーションを行なった。その結果、「プラスチックシンチレータで 20keV 以上エネルギーを落とし、かつエアロジェル中で静止する e^+ の割合」が、プロトタイプ装置では 12.5% だったのに対して、36% にまで上げることが出来るとわかった。この結果、期待されるイベントレートを計算すると、

$$1 [\text{MHz}] \times 0.904 \times 0.36 \times 0.23 \times \frac{3}{4} \times 0.23 \times 0.0003 \times 3 = 11.6 [\text{Hz}] \quad (51)$$

となる。ここで電子捕獲反応 (EC) を考慮し線源強度に 0.904 を乗じ、さらには今回のテスト実験で得られた $o\text{-Ps}$ 生成率約 23%、TW 内のイベント 23%、および LYSO 検出器 1 ペアにおける EW 内のイ

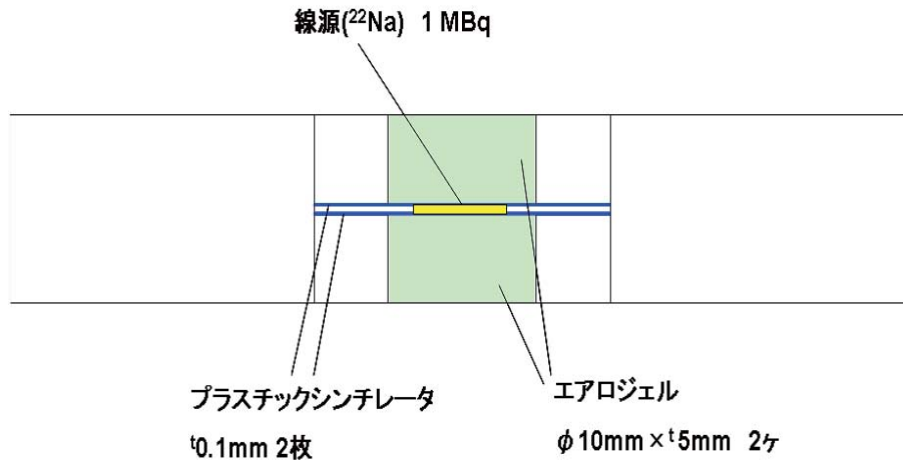


図 89: 本番用ベータトリガーシステム

ベント 0.03% であることを使った。最後に乗じてある 3 は LYSO 検出器 3 ペアを意味するファクターである。

したがって $\Delta C_{CP} \sim 10^{-3}$ を目指そうとした場合、 $Q \sim 0.15$ として、 ΔA はおよそ 0.15×10^{-3} の精度が必要である。統計誤差としてこれを達成するにはシグナルとなるイベント数として、

$$\Delta A \sim \frac{1}{2N} \sim 0.15 \times 10^{-3} \quad (52)$$

$$2N \sim \left(\frac{10^3}{0.15} \right)^2 \sim 6.7 \times 10^7 \text{ 事象} \quad (53)$$

必要である。ここでの N は式 (12) のシグナルイベント数である。したがって、必要なデータ取得は $6.7 \times 10^7 / 11.6 = 44$ [日] となる。

6.4 回転台の使用

今回のテスト実験では磁石の向きとして、方位角を 0° と 180° の方向に設定して測定を行なったが、本実験ではベータトリガーシステムおよび γ 線検出器を載せた台を回転させる駆動系を構築する予定である。台を回転させることで、今回のような 0° と 180° のセットアップでの非対称パラメータをとることがあらゆる角度で可能となる。また、今回のような磁石の配置換えによるセットアップの組みなおしをする必要はなく、この論文で議論した装置配置の再現性からくる系統誤差は除去できると期待される。

7 まとめ

オルソポジトロニウムを用いて、レプトンセクターにおける CP 対称性の破れを探索する実験を計画している。現在までに、この系での CP 非対称性を示すパラメータ C_{CP} は、 10^{-2} の精度で検証されているが、未だ CP 非対称性は確認されていない。クォークセクターにおける CP 非対称性は、 10^{-3} の精度で発見されたことから、このパラメータ C_{CP} についても、 10^{-3} の精度で検証ができるように現在実験準備を進めている。今回、実験本番に向けてプロトタイプ装置を製作し測定を行なった。この論文では、実験概要およびプロトタイプ装置の性能評価の結果について述べた後、ポジトロニウムを生成させてデータを取得したテスト実験について紹介した。

データ解析では、磁場印加時のオルソポジトロニウムの状態 $|1, \pm 1\rangle, |\psi_{\pm}\rangle$ の寿命および生成率を求める際、崩壊時間分布のフィッティングを上手く行なうことが出来ず、精度良くこれらを決定することはできなかった。この点について、フィット方法の改良による精度向上を現在検討している。また実験本番では磁場を強化することで、2成分の寿命差は大きくなり、今回のテスト実験よりも、寿命および生成率の決定精度は良くなると期待される。

また、今回のテスト実験では、1つのLYSO検出器のペア(L1,L3)で得られたシグナルのイベント数が、磁石を $\phi = 180^\circ$ 方向に向けたRUNの結果、非対称になった。この原因を追求すべく行なった考察を、本論文では記載した。ある一定のデータ取得期間のみで非対称性が生じていること、また、イベント数の差が生じるエネルギー・角度分布についてもわかってはいるが、結局原因については未だ不明のままである。この点に関しては、更なるデータ解析や検出器個々の特性評価を行い追求していく予定である。

また系統誤差に関して、この論文中では装置配置の再現性からくる系統誤差について評価した。今回のテスト実験で行なった、磁石方向を入れ換える際のセットアップの組み直しによって起こり得る装置配置のずれから、大きな系統誤差が生まれることがわかった。実験本番では、検出器を乗せた回転台を用意する。これにより、セットアップの組みなおしをせずに、あらゆる角度の磁場で測定が行なうことが可能となり、ここで議論した系統誤差は除去される。また、この論文では列挙するのみとした系統誤差の要因についても、今後引き続き評価を行ない、実験本番ではパラメータ C_{CP} の到達感度として 10^{-3} を目指す。

付録 LYSO 検出器のゲイン低下について

LYSO 検出器のゲインは図 41~43 のように L1 と L2 で著しく低下している。この低下率は 180° の RUN より後に行なった 0° の RUN でのおよそ 1/3 になっているが、依然 0.01 ~ 0.02%/h でゲインは低下している。(図 90~92)

このゲイン低下が起こる原因を追求したところ、「PMT からシグナルとして引いているカレント量」の違いによりゲインの低下率が変化することがわかった。以下ではその結果について紹介する。

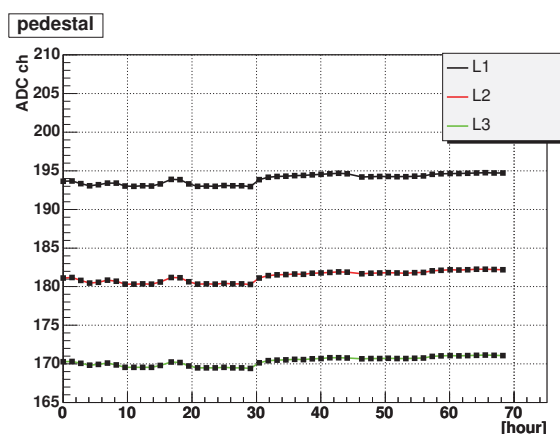


図 90: ペDESTALの時間変化 (0° での RUN)

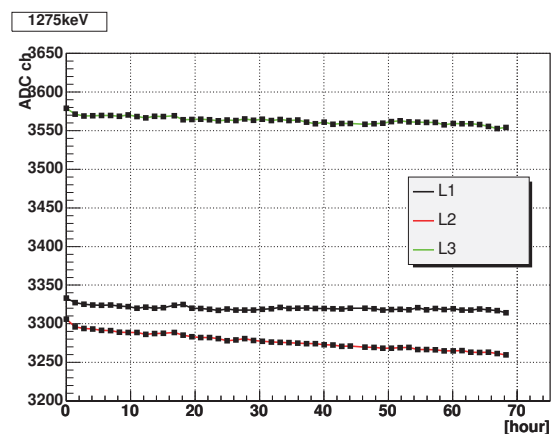
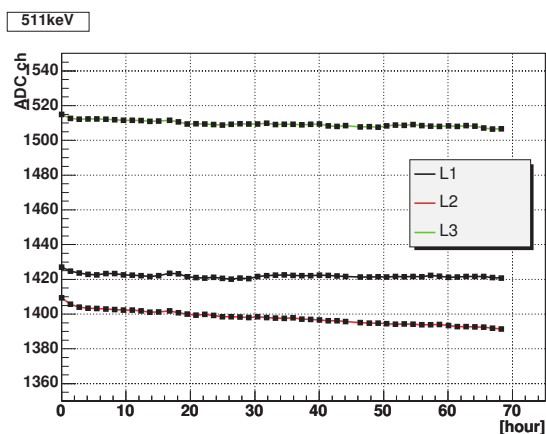


図 91: 511keV ピークの時間変化 (0° での RUN) 図 92: 1275keV ピークの時間変化 (0° での RUN)

レートの違いによるゲイン低下率の変化

まずは、シグナルのレートの違いによるゲイン低下率の変化について調べた。今回のテスト実験でも用いた LYSO 結晶 ($\phi 3\text{cm} \times t 3\text{cm}$) を、PMT(H8409-70) に装着させた LYSO 検出器を 2 台用意し、 ^{60}Co 線源からの γ 線をあてる。このとき ADC(RPC-022) で測定した 1173keV の γ 線のチャージ量の時間変化を、線源と LYSO 検出器の間の距離を変えて調べることを行なった。図 93 がその結果である。横軸に測定開始時からの時間、縦軸に 1173keV のチャージ量の測定開始時との比をプロットした。ここで黒色と灰色で示してあるのが、同じ LYSO 検出器 (LYSO-1)¹³ で測定を行なったもので、 ^{60}Co 線源との距離を変え、それぞれ 25kHz, 15kHz のレート (スレッシュホールド数十 keV) で測定を行なったものである。これより、レートが高いほうがゲインの低下率も大きく、25kHz の場合およそ 0.05%/h、15kHz の場合およそ 0.01%/h であることがわかる。

赤色と桃色で示してあるのが、別の LYSO 検出器 (LYSO-2) での結果を示しており、こちらは 19kHz と 8kHz のレートで測定している。19kHz の測定では LYSO-1 での 15kHz と同程度のゲインの低下が見られたが、8kHz の測定では、19kHz の測定を行なった直後に行なったこともあり、ゲインは回復し増加の傾向にある。

すなわち、この結果から少なくとも、「レートが高い測定ほどゲインの低下率が大きい」ということが言える。

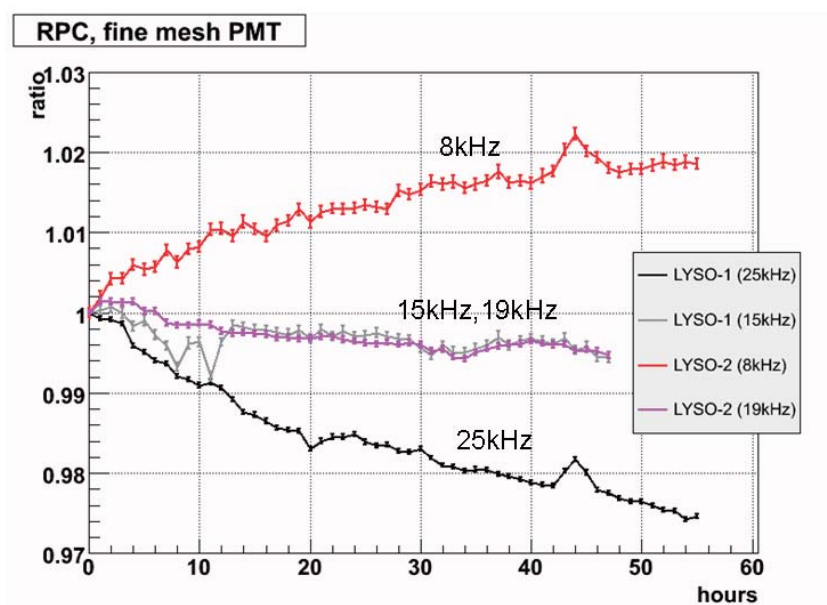


図 93: レートの違いによるゲイン低下率の違い

¹³ この測定で用いた LYSO 検出器は、テスト実験で用いた LYSO 検出器とは異なるが、使用している結晶のサイズおよび PMT の型番は同じである。

PMT への印加電圧の違いによるゲイン低下率の変化

次に、先ほどのLYSO 検出器 (LYSO-1) を用いて、PMT への印加電圧の違いによるゲイン低下率の変化を調べた。その結果を図 94 に示す。この図の中で、灰色と黒色のプロットがLYSO-1でPMTの印加電圧を変えての測定結果である¹⁴。横軸・縦軸は先ほど同じで、横軸に測定開始からの経過時間、縦軸に1173keVのチャージ量の測定開始時との比をプロットしている。灰色で示してあるプロットはPMTに1650Vの電圧を印加したもので、このときPMTからシグナルとして引くカレント量は $13\mu\text{A}$ であった。また黒色で示したプロットは灰色の測定時のPMTから引くシグナルのカレント量を1/10にして測定しようとしたもので、PMTへの印加電圧を1165Vに下げて設定し、さらにPMTからのシグナルを $\times 10$ アンプに通して測定を行なっている。このときアンプを通す前のPMT自体からシグナルとして引いているカレント量は $1.3\mu\text{A}$ であった。

これより、PMTに印加する電圧が低く、シグナルとして引くカレント量が少ない黒色の測定では、ゲインの低下がみられないことがわかる。

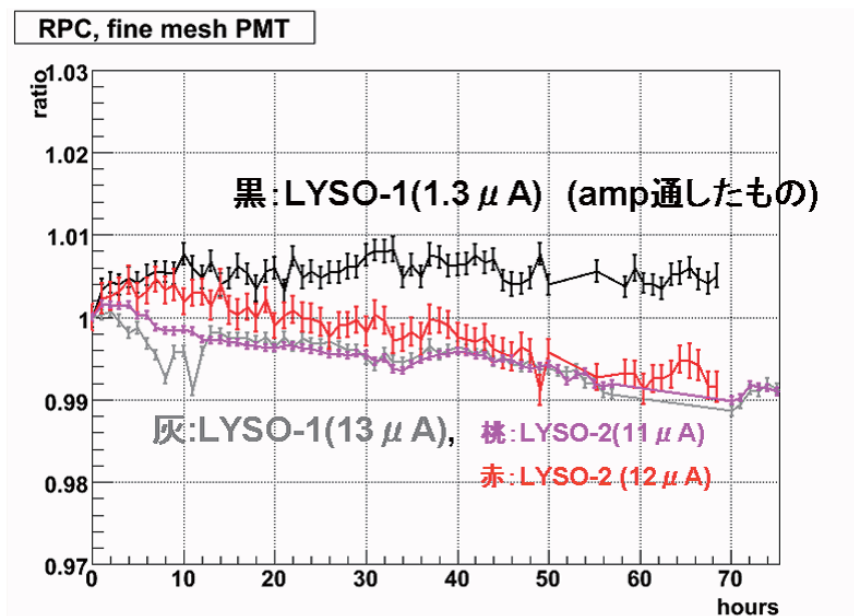


図 94: PMT への印加電圧の違いによるゲイン低下率の違い

以上のように、レートやPMTへの印加電圧の違いによるゲイン低下率についてみてきたが、これらに共通して言えることは、ゲインの低下率はPMTからシグナルとして引くカレント量によって変化し、少ないほど抑えられるということである。したがって実験本番では、PMTへの印加電圧を下げて補助的にシグナルをアンプに通すことで、ゲインの低下を抑えることを行なう予定である。

¹⁴ここでLYSO-2のLYSO検出器での結果についてもプロット(赤色、桃色)してあるが、両者とも印加電圧は1650Vに設定しており、印加電圧の違いによる比較は行なっていない。

謝辞

本論文を執筆にあたり、多くの方々からご指導、ご協力を賜りましたことを、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

指導教官である小林富雄教授には、この興味深い研究テーマを私に与えていただき、非常に感謝しています。研究を進めていく姿勢から装置設計の細部まで多くの助言して下さい、非常に刺激的な研究生を送ることが出来ました。

浅井祥仁准教授からは、本研究を進める上で必要な、ポジトロニウムに関する知識や検出器の特性、物理解析の手法にいたるまで幅広く多くのことを学び、深く感謝しています。また常に論理的思考をするよう指導していただき、今後の実生活においても非常に役立っていくものだと思っています。

難波俊雄助教は、研究室に入ったばかりの右も左もわからない私に素粒子物理や放射線の基礎に関する知識から、様々な機器の取り扱い・物理解析の細部にいたるまで、多くを指導して下さいました。最後まで辛抱強く面倒見て下さったこと、心から感謝しています。

試作室の大塚茂巳氏、南城良勝氏は磁場システム製作の際に、工作機器の使い方や設計図の書き方について指導して頂き、大変お世話になりました。試作室に出向く度にかけて下さる激励の言葉は私の励みとなりました。

東京大学素粒子センターリサーチフェローの片岡洋介氏、小林研研究室 D1 の兼田充氏には物理に関する議論からシミュレーションの手法にいたるまで様々な場面で面倒見て頂きました。物理以外のプライベートな話をする機会も多くあり、非常に癒され勇気付けられました。

また、東京大学素粒子センター学生の皆さんには、物理に関することからプライベートなことまで、たくさんの御助言を頂きました。特に小林研究室同期である富島佑允君には LYSO 結晶の特性評価を手伝ってもらい、とても感謝しています。

また素粒子センター秘書の皆さんは、常に研究に専念できる環境を提供して下さいました。深く感謝しています。

この他、ここに御名前を挙げられなかった多くの皆様にも多大なるご支援、激励を頂きました。改めまして、本論文作成にあたり御協力頂いた皆様にも心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Phys. Rev. A **2** 707(1970)
- [2] N.V.KRASNIKOV International Journal of Modern Physics A Vol.19, No.23, (2004)
- [3] 「TEST OF BOUND STATE QED HIGHER ORDER CORRECTION : PRECISION MEASUREMENT OF ORTHOPOSITRONIUM DECAY RATE」 Ph. D. THESIS Yousuke Kataoka (2007)
- [4] Phys. Rev. Lett. **72**, 1632(1994)
- [5] 「Positronium Hyperfine Structure in Its Ground States」 T.Sumida, M.Fujita, K.Iida, S.Sugiyama
- [6] M.Skalsey and J.Van House, Phys. Rev. Lett. **67**(1991) 1993.
- [7] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [8] 『相対論的量子力学 1』 ランダウ、リフシッツ著 東京図書株式会社
- [9] SAINT-BOBAIN Scintillation Products (Scintillation Crystal Arrays and Assemblies)
- [10] 「オルソポジトロニウムの稀崩壊を用いた余剰次元の探索」 修士学位論文 是木玄太
- [11] Phys. Rev. A **40** 5489(1989)
- [12] 『PRECISION MEASUREMENT OF THE DECAY RATE OF ORTHOPOSITRONIUM AS A TEST OF QUANTUM ELECTRODYNAMICS』 David Westfall Gidley (1979)
- [13] M. Charlton, Rep. Prog. Phys. 48, 737 (1985).