

大気中でのオルソポジトロニウムの寿命測定

Diana Seitova 佐藤友太 澤田恭範 西宮隼人

平成 28 年 5 月 9 日

目次

第 1 章	序章	3
1.1	研究の背景	3
1.2	目的	3
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	理論	4
2.1	粒子の寿命	4
2.2	ポジトロニウムの物理	4
2.2.1	ポジトロニウムの形成	5
2.2.2	ポジトロニウムの崩壊	7
2.2.3	ポジトロニウムの物質中での相互作用	9
第 3 章	実験原理	10
3.1	概要	10
3.2	実験器具	10
3.3	実験のセットアップ	12
3.3.1	配置	12
3.3.2	DAQ システム	12
3.3.3	エレクトロニクス	13
第 4 章	予備実験	18
4.1	較正	18
4.1.1	HV のセットアップ	18
4.1.2	ADC のエネルギー較正	20
4.1.3	TDC の時間較正	24
4.2	^{22}Na からの陽電子がプラスチックシンチレーターを貫通していることの確認	25
第 5 章	結果と考察	28
5.1	データ	28
5.2	解析	30
5.2.1	Time-walk 補正	30
5.2.2	事象選別	34
5.3	大気中での o-positronium の寿命	38
5.3.1	事象選別の効果	38

5.4	オルソポジトロニウムの寿命	41
5.4.1	大気中でのオルソポジトロニウムの寿命	41
5.5	真空中でのオルソポジトロニウムの寿命測定	42
5.5.1	真空中における実験の配置	42
5.5.2	真空中でのオルソポジトロニウムの寿命測定に必要な解析	44
5.5.3	真空中でのオルソポジトロニウムの寿命	48
5.6	考察	49
第 6 章	謝辞	51
第 7 章	参考文献	52

第1章 序章

1.1 研究の背景

ポジトロニウムとは電子とその反粒子である陽電子との束縛系である。この系はレプトンのみで構成されるため、相互作用としては低エネルギー領域で電磁相互作用以外を無視できることから、量子電磁気学の精密検証の手段としてよく用いられる。量子電磁気学の検証を目的とした実験としては、オルソポジトロニウムの崩壊寿命の測定と超微細構造の測定の2つが主に行われてきており、前者においては、2016年現在 $O(\alpha^2)$ まで、理論と測定結果が一致することが報告されている。

1.2 目的

大気中、及び真空中に置かれたシリカエアロゲル中で生成されたオルソポジトロニウムの崩壊寿命を測定する。

1.3 本論文の構成

第2章では、本研究対象であるポジトロニウムの生成とその諸反応の理論について述べる。第3章では、我々の実験で用いた装置、測定方法について解説する。第4章では予備実験について解説し、5章で本実験の結果と考察をまとめる。

第2章 理論

この章では、初めに粒子の寿命、次にポジトロニウムの生成と崩壊の理論、物質中での反応について述べる。

2.1 粒子の寿命

ある粒子が時間当たりに崩壊する確率を Γdt と表したとき、 Γ を崩壊率と呼ぶ。 $N(t)$ を時間 t における粒子数で表すとする。このとき、次の瞬間 dt の間までに $N\Gamma dt$ 個の粒子が崩壊すると考えると、粒子の変化量 dN について次の関係式が成り立つ。

$$dN = -\Gamma N dt$$

したがって、次の関係式が導かれる。

$$N(t) = N(0) \exp(-\Gamma t) \quad (2.1)$$

粒子の平均寿命は崩壊率の逆数として定義される。

$$\tau = \frac{1}{\Gamma} \quad (2.2)$$

2.2 ポジトロニウムの物理

ポジトロニウムとは電子 e^- とその反粒子である陽電子 e^+ との電氣的引力による束縛状態である。これは広義には一種の原子とみなすことができ、通常の原子を構成する電子、陽子、中性子以外の粒子を含んだ系であるエキゾチック原子に分類される。それゆえ元素記号 Ps としてが一般的に与えられており、本論文中でも以下この表記を用いる。

また、Ps はちょうど水素原子中の陽子を陽電子に置き換えた形をとっているため、水素原子と非常によく似たエネルギー準位構造を持っている。ただし、陽子と陽電子の質量の違いがあるため、Ps の場合の換算質量は水素の場合の約半分である。そのため、基底状態の Ps の束縛エネルギーは水素の場合の半分の 6.8 keV、軌道半径は水素の場合の約 2 倍の 106 \AA である。

Ps は基底状態の全スピン角運動量 S の大きさによって 2 種類に分けられる。これは、スピン $\frac{1}{2}$ をもつレプトンの 2 粒子系であるため、スピン 3 重項状態 (3S_1) とスピン 1 重項 (1S_0) が存在するからである。前者はオルソポジトロニウム (o-Ps)、後者はパラポジトロニウム (p-Ps) と呼ばれる。また、両者のエネルギー準位を比較すると、p-Ps のほうが 0.84 meV だけ大きい。これはスピン-スピン相互作用によるものである。

なお、通常この差は Ps が生成される際に必要なエネルギー (後述) よりも遥かに小さいので、o-Ps と p-Ps の生成確率の比は単純に状態数 $2s + 1$ によって決まり、3:1 と考えて十分である。この他、両者の間の決定的な違いとして真空中の寿命があるが、こちらについては後述する。

2.2.1 ポジトロニウムの形成

ポジトロニウムは、陽電子が物質中に入射され、物質中の電子に捕獲されて形成される。例えば、気体などの低密度の物質や液体、高分子中で形成される。その他、金属に関しても表面やボイドと呼ばれる微細な空洞中で形成されることが知られている。

陽電子源としては通常 β^+ 崩壊を起こす核種を用いる。物質中に入射した陽電子は、分子のイオン化や励起を起こし散乱を繰り返して運動エネルギーを失い減速し、Ps を形成するか、物質中を拡散して Ps を形成せずに対消滅を起こす。

物質中で Ps を形成しない場合、電子・陽電子対消滅の断面積は、電子と陽電子の相対速度が小さいほど大きくなるので、通常、入射陽電子は最初に散乱されて十分に減速してから対消滅する。この時、光子は 2 本放出される。電子と陽電子が対消滅するとき、それらの運動エネルギーが無視できるほど充分小さいのであれば、2 本の光子が消滅点から互いに逆方向に 511 keV のエネルギーを持って放出される。

次に、本実験で用いたシリカエアロゲルに陽電子を入射させた際の Ps の形成過程について述べる (図 2.1、図 2.2)。

シリカエアロゲルは、二酸化ケイ素 (シリカ、 SiO_2) の微粒子を骨格とする多孔質構造をもつ物質である。シリカ微粒子の大きさは数 nm から 20 nm 程度であり、それらが連なり微細なネットワークを形成している。体積のほとんどは、大きさが 100 nm ほどのボイドと呼ばれる空孔領域が占めており、それらは互いにつながっている。そのため、極めて低密度 (100 mg/cm^3 程度) であり、さらにエアロゲルを気体中に置くと、気体分子が空孔中に入り込むことがある。

シリカエアロゲル中に入射した陽電子は、シリカ微粒子に散乱されながら周囲の分子をイオン化あるいは励起を引き起こし、数 eV 程度まで急速に (1~2 ps) 自身の運動エネルギーを失う。この後、一部の陽電子は対消滅をせずに近くの電子に捕獲されて束縛状態をつくり Ps が形成される。この Ps はさらにエネルギーを失いながら微粒子中を拡散し、高確率で微粒子の表面へ到達して空孔中へ放出される。放出された Ps は空孔中を飛び回り、周囲の分子との熱平衡状態へと向かっていく (熱化)。また、空孔中へ自発的に放出されたり、再びシリカ微粒子中へ Ps が侵入しないのは、Ps に対して SiO_2 が負の仕事関数を持つためである (図 2.3)。

上述の Ps の形成機構のさらに詳細なモデルとして代表的なものに、Ore モデルと Spur モデルの 2 つが存在する。

Ore モデル

Ore モデルは当初、気体中での陽電子対消滅に関する実験を理解するために提案されたものである。このモデルにおいては、十数 eV 程度の運動エネルギーをもった陽電子が分子 M から電子を引き抜き、Ps が形成されると考える。



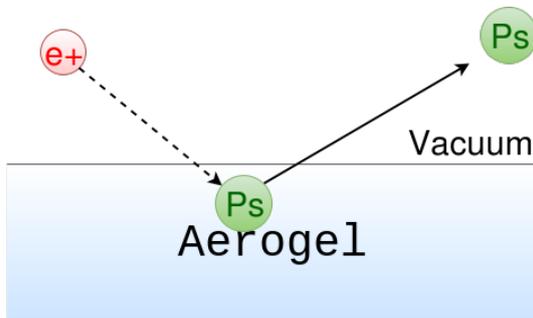


図 2.1: ポジトロニウムの生成

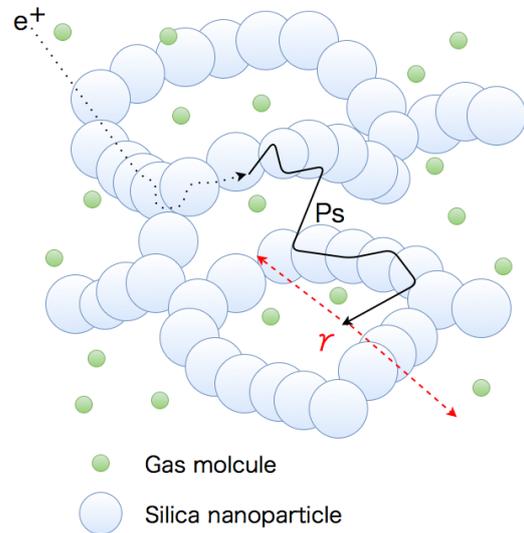


図 2.2: 陽電子の消滅過程

この過程は陽電子の運動エネルギー E が次の範囲 (Ore gap) にある時にもっとも起こりやすい。

$$I - 6.8 \text{ eV} < E < 6.8 \text{ eV} \quad (2.4)$$

ここで I は分子 M の第一イオン化エネルギーを表す。6.8 eV という値は Ps の真空中での束縛エネルギーである。この条件が意味することは、陽電子が分子から電子を引き抜くため、この過程は $I - 6.8 \text{ eV}$ だけの吸熱反応になるので、Ps 形成にはこれ以上の運動エネルギーが必要である一方、陽電子のエネルギーが Ps の束縛エネルギーよりも大きいと、励起やイオン化が支配的になるので Ps の形成が抑えられるということである。

Spur モデル

Spur モデルは次の 3 つの仮定の上に成り立つ。

- 1). 陽電子とイオン化で叩き出された二次電子は同じ領域内で熱化し、陽イオンも同じ領域に留まる。この領域は Spur と呼ばれる。
- 2). 二次電子は陽イオンまたは陽電子と同じ確率で再結合する。したがって、陽電子が電子を捕獲し、その後 Ps を形成する確率は $n_0/(1 + n_0)$ に等しい。ここで n_0 は最終 Spur 内でのイオン-電子対の初期数である。
- 3). 電子と陽電子が再結合する確率は Onsager の理論によると、 $1 - \exp(-r_c/b)$ で与えられる。ここで、 $r_c \equiv e^2/\epsilon k_B T$ (ϵ は誘電率、 $k_B T$ は Boltzmann 定数) は電子-陽イオン間のクーロンポテンシャルが $k_B T$ に等しくなる距離 (critical distance) で、 b は熱化が終わるまでの電子と陽電子の間の初めの距離である。すなわち Spur の大きさが b 程度になる。

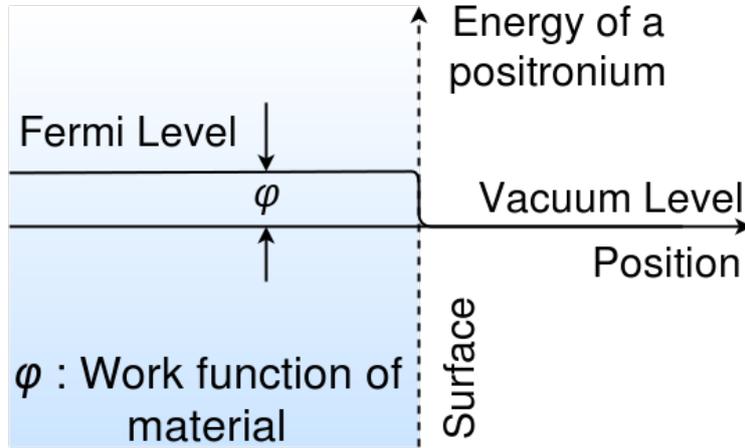


図 2.3: 仕事関数

Spur モデルの枠組みの中で、Ps 形成の確率は次のように書かれる。

$$Prob_{Ps} = \frac{n_0}{1 + n_0} \cdot (1 - \exp(-r_c/b)) \cdot \exp(-t_{Ps}/\tau_2) \quad (2.5)$$

最後の指数関数の部分は、自由陽電子が Ps 形成の時間 t_{Ps} (\sim psec) の間に確率 $1/\tau_2$ ($\leq 2 \text{ ns}^{-1}$) で対消滅することを考慮に入れているためである。明らかにこの部分の寄与は無視することができる。また、多くの無極性分子 ($\epsilon \approx 2$) の場合、室温では $r_c \approx 30 \text{ nm}$ で、電子の場合の典型的な長さ b は 10 nm 以下であることが知られており、これは r_c よりも短い。したがって、陽電子と Spur 内の電子が再結合し Ps を形成する確率が高くなる。

2.2.2 ポジトロニウムの崩壊

ポジトロニウムは準安定状態であるため、真空中において自発崩壊する。この崩壊機構は対消滅と同じであるため、電子と陽電子の波動関数に重なりが生じれば崩壊する。したがって、軌道角運動量が s 波状態からの崩壊を考えればよい。

光子において、C 変換の固有値は光子の数 n で決まり、以下の式が成り立つことが知られている。

$$C = (-1)^n \quad (2.6)$$

また、スピン $\frac{1}{2}$ の粒子系の C 固有値は次のように求められる。まず、2 粒子系の波動関数は以下のように軌道部分、スピン部分、荷電部分の積の形で書く。

$$\Psi_{tot} = \Phi_{orbit} \cdot \chi_{spin} \cdot \eta_{charge} \quad (2.7)$$

軌道状態は水素原子と同様に動径部分と角部分に変数分離でき、角部分は球面調和関数 $Y(\theta, \varphi)$ となる。球面調和関数はその性質としてパリティ $(-1)^l$ を持つが、今は $l = 0$ の場合を考えているので固有値は 1 となる。

スピン状態は次の4つの状態が存在する。

$$\begin{aligned}
 |1, 1\rangle &= |\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 \\
 |1, 0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 + |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2) \\
 |1, -1\rangle &= |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 \\
 |0, 0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2)
 \end{aligned}$$

ここで、 $|\uparrow\rangle$ は $|1/2, 1/2\rangle$ 、 $|\downarrow\rangle$ は $|1/2, -1/2\rangle$ を表し、右下の添字は粒子を区別するラベルである。これより、スピン部分のパリティは $(-1)^{s+1}$ である。Ps の場合は、o-Ps は 3 重項状態に、p-Ps は 1 重項状態に対応する。

今、スピン 1/2 のフェルミ粒子について考えているので、粒子の入れ替えに対して波動関数は反対称でなければならない。また、相対座標の反転、スピンの入れ替え、荷電状態の入れ替えを同時に行うことは粒子の入れ替えと等価であるため、以下の等式が成り立つ。

$$(-1)^l (-1)^{s+1} C = -1 \quad (2.8)$$

ゆえに、p-Ps については $C = 1$ 、o-Ps については $C = -1$ であることが分かる。したがって、C 固有値と光子数の関係から p-Ps は偶数個の光子へ、o-Ps は奇数個の光子へのみ崩壊することになる。

また、平均寿命の逆数である崩壊率 Γ は、放出される光子の数が一つ増える度に微細構造定数 $\alpha \sim 1/137$ の因子が掛かり小さくなっていく。そのため、測定においては、p-Ps は 2 光子崩壊、o-Ps は 3 光子崩壊のみ¹ を起こすと考えてよい。したがって、真空中での寿命は o-Ps の寿命の方が p-Ps のそれよりもおよそ $1/\alpha \sim 137$ 倍長いと予想できる。しかし厳密には、これに崩壊が許される位相空間の体積の違いも加わり、o-Ps の寿命は p-Ps のその 1000 倍程度になる。

量子電磁気学を用いた寿命の最低次の計算について、p-Ps に対しては P.A.M.Dirac が、o-Ps に対しては A.Ore が既に計算を行っており、以下の値が求められている。

$$\begin{aligned}
 \tau_{p-Ps} &= 2(\hbar c/e^2)^4 (\hbar^2/mc^2) = 1.25 \times 10^{-10} \text{ sec} \\
 \tau_{o-Ps} &= (9\pi/4)/(\pi^2 - 9)(\hbar c/e^2) \tau_{p-Ps} = 1.4 \times 10^{-7} \text{ sec}
 \end{aligned}$$

2016 年現在では、 $O(\alpha^2)$ までの摂動計算がなされており、o-Ps については $1.4208 \times 10^{-7} \text{ sec}$ という値が得られている。

¹ 光子崩壊は運動量保存則から第 3 の粒子 (原子核等) を必要とするので強く抑制される。

2.2.3 ポジトロニウムの物質中での相互作用

物質中では真空での崩壊とは異なる機構で崩壊が起こり、それらの影響によって寿命は短くなる。我々の実験においても、Ps を物質中で生成するので、物質との相互作用の理解は必須である。

相互作用は一般的に大きくピックオフ消滅、スピン転換反応、化学反応の3つに分けられる。

ピックオフ消滅

Ps が物質中の電子と非弾性衝突を繰り返すうちに減速し、Ps 中の陽電子が物質中の電子と対消滅を起こす現象。その反応率は物質への衝突頻度に比例する (図 2.4)。

スピン転換反応

物質中の不対電子と Ps 中の電子がスピンを交換する現象。この反応により、o-Ps と p-Ps の転換が起こることがある。大気中で行う実験では酸素分子によりこの反応が引き起こされる (図 2.5)。

化学反応

Ps は水素原子同様、酸化反応などの化学反応を起こすことがある。低密度物質中ではその反応率は低いため、我々の実験では考慮しない。

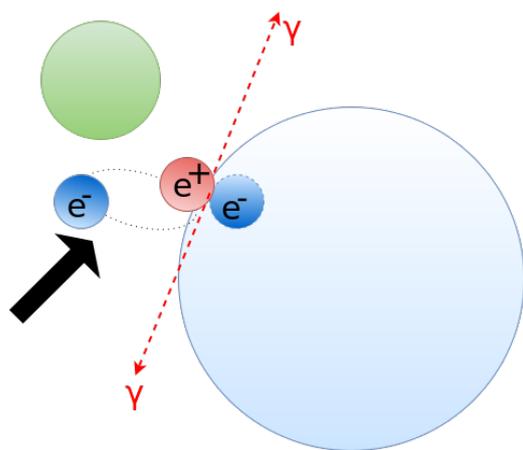


図 2.4: ピックオフ消滅 (緑丸は気体分子、水色丸は SiO₂ を表す。)

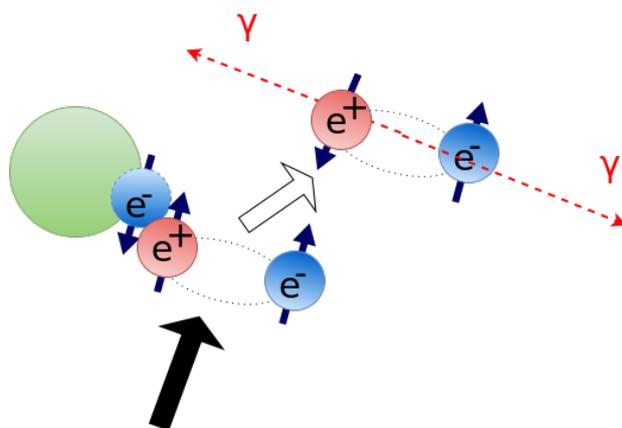


図 2.5: スピン転換反応

p-Ps は寿命が極めて短いため、ほとんどが上記の反応が起きる前に崩壊する。ゆえに、これらは主に大気中での o-Ps の寿命に影響を及ぼすことになる。したがって、崩壊率は以下のように書くことができる。

$$\Gamma_{o-Ps} = \Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{pickoff} + \Gamma_{spin-conversion} \quad (2.9)$$

粒子の寿命は崩壊率の逆数であるので、大気中でのポジトロニウムの寿命は真空の場合よりも長くなる。

第3章 実験原理

この章では、ポジトロニウム (以下、Ps と表記) の寿命測定の実験の原理、実験に使用した機器の詳細、実験のセットアップについて述べる。

3.1 概要

Ps は β^+ 線源 ^{22}Na から放出される陽電子をシリカエアロゲルに入射させ、エアロゲル中の電子を捕獲し束縛状態を作ることで生成する。我々が測定したのは、 β^+ 線源から放出された陽電子がプラスチックシンチレーション検出器を通過した時間と、各 NaI(Tl) シンチレーション検出器で o-Ps 由来の γ 線が検出した時の時間差である。

3.2 実験器具

本実験を行う際に使用した機器等の一覧である。データ収集システム用のエレクトロニクスについては別途後述する。

陽電子線源

Ps の構成要素である陽電子のソースとしては放射性同位体 ^{22}Na を使用した。線源の密封構造を図 3.1 に示す。購入時 (2013 年 10 月) での線源の強度はおよそ 1 MBq であった。線源窓の厚みは約 $5\ \mu\text{m}$ である。陽電子は ^{22}Na が β^+ 崩壊によって ^{22}Ne の励起状態に遷移する際に β^+ 線として放出される。その後、3.7 ps の半減期で ^{22}Ne の励起状態から ^{22}Ne の基底状態に遷移し、1275 keV の γ 線を放出する (図 3.2)。

シリカエアロゲル

ポジトロニウムを生成するために陽電子を入射させるターゲットとして用いる。今回用いたエアロシリカゲルは疎水処理を施したもので、密度と平均粒子径は不明である。本実験では大きなエアロゲル片を入手できなかったため、数 mm から数 cm の不定形の碎片を集めたものを使用した。

プラスチックシンチレーション検出器

陽電子線源とシリカエアロゲルの間に、陽電子検出器としてプラスチックシンチレーション検出器を用いた。構成は浜松ホトニクス製光電子増倍管 (Photomultiplier) にプラスチックシンチレータをオプティカルセメントで接着させたものとなっている。線源から飛び出す陽電子のエネルギーは十分に高いので陽電子の飛行時間は考慮しない。プラスチックシンチレータの形状は、 $1\ \text{cm} \times 1\ \text{cm}$ の正方形の板で、厚みは $350\ \mu\text{m}$ である。光電子増倍管の型番は H3164-10 である (図 3.3)。

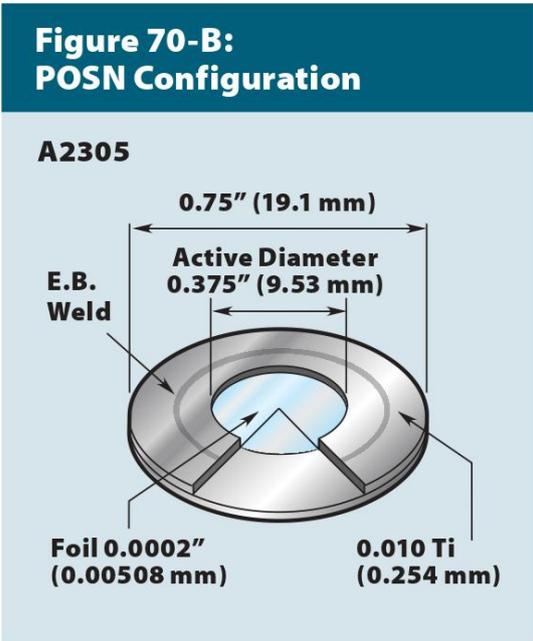


図 3.1: 線源 ^{22}Na の構造

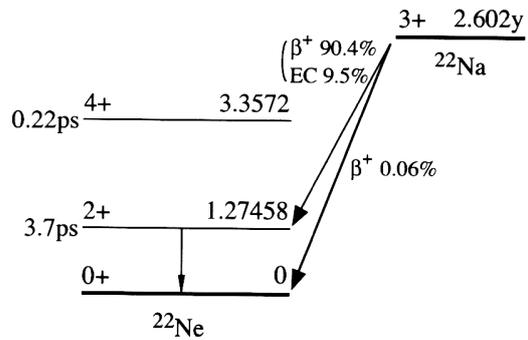


図 3.2: 線源 ^{22}Na の崩壊図式

NaI(Tl) シンチレーション検出器

ポジトロニウムの崩壊により放出される γ 線の検出器として NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いた。構成は NaI(Tl) シンチレータをオプティカルグリスで浜松ホトニクス製光電子増倍管 (H1161) に接合したものとなっている。NaI(Tl) の形状は 33.9 cm \times 6.6 cm \times 6.7 cm の直方体である。また、潮解を防ぐためと外部からの遮光のために厚みが 1 mm 程度の薄いアルミニウムの外箱で密封されている。

暗箱 (エアロゲル容器)

陽電子がプラスチックシンチレータを貫通してエアロゲルまで達しなければポジトロニウムが生成されない。そのため、できるだけ対消滅を起こしてしまう陽電子の数を少なくしたい。そこで、検出器のプラスチックシンチレータをブラックシートで覆うことはせずに、陽電子線源、シンチレータ、シリカエアロゲルのすべてを一つの箱の中に入れた。箱の材質は合板で、形状は、底辺が一辺 12 cm の正三角形で高さが 17 cm の三角柱である。側面にはプラスチックシンチレーション検出器を挿入するために直径 1 cm 程の穴を設けて固定した (図 3.4、図 3.5)。また、線源とプラスチック板の距離が 40 mm になるように配置した。線源は暗箱の天井の中心部に配置し、セロハンテープで固定した。暗箱の下部にはシリカエアロゲルを底から 30 mm まで隙間が生じないように敷き詰めた。図 3.5 には示されていないが、遮光を確実にするため、暗箱上部をブラックシートを包むように覆った。



図 3.3: プラスチックシンチレーション検出器

3.3 実験のセットアップ

3.3.1 配置

暗箱と各検出器を図 3.6、図 3.7 のように配置した。中心部の正三角形の緑の箱が暗箱である。各 NaI 検出器の周りには鉛ブロックを置いているが、この理由は線源物質の β^+ 崩壊に伴って放出される 1275 keV の γ 線や、線源の直近での対消滅による 511 keV の γ 線などと言った、ポジトロニウム由来以外の γ 線を遮蔽するためである。この配置で 3 つの検出器のうち 2 つ以上の検出器で検出できた事象を拾うことで、511 keV の back-to-back の崩壊事象の大半は取り除くことができる。

3.3.2 DAQ システム

本実験では、陽電子がプラスチックシンチレータを通過した時と、シリカエアロゲル中で生成されたポジトロニウムが崩壊した後にできる γ 線を 2 つ以上の NaI(Tl) シンチレーション検出器で検出した時の時間差を測定する。簡易的な構成図を図 3.8 に示す。

各事象が起こった時の信号を読み出して記録に至るまでの詳細なモジュールの構成のダイアグラムは図 3.9 のようになっている。まず、線源からの陽電子をプラスチックシンチレータ (P) によって検出し、Fan-In/Fan-Out (F_0) で信号を分配して、一方を Discriminator (D_3) と GATE Generator を通じて幅 600nsec の論理信号を変換する。また、同時に Discriminator (D_3) からもう一つ論理信号を 500nsec 程度ケーブルで遅延させて作っておく。プラスチックシンチレータを貫通した陽電子の中には、シリカエアロゲル中でポジトロニウムを生成するものがある。このポジトロニウムは崩壊して光子を 2 本以上出す。これら 2 本以上の γ 線が NaI シンチレーション検出器 (S_0, S_1, S_2) で同時に検出された時に出される信号を Discriminator (D_0, D_1, D_2) を通じて幅 20 nsec の NIM 信号を出力し、Coincidence (C_1) へ送る。ここで、 C_1 に同時に 2 つ以上の信号が入力された時に NIM 信号を出力するようにした。そのようにした理由は、o-Ps の崩壊由来の 3γ のみを最終的に見るためである。2 つの検出器でのみ同時に検出されるような事象は後の解析によって排除する。

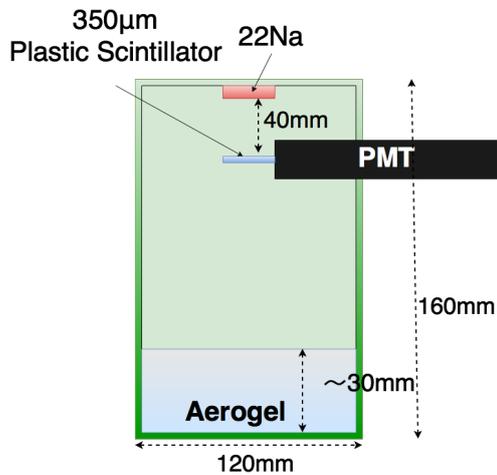


図 3.4: 暗箱の構造



図 3.5: 暗箱の写真

C_1 から幅 30 nsec で出力された信号は C_0 へ送り、GATE Generator からの幅 600 nsec の信号とコインシデンスを取る。その後 C_2 の IN へ送り、 C_2 の VETO には Interrupt Register の出力を入れる。この C_2 からの信号をトリガー信号として用いる。

トリガー信号を TDC の START と、ADC の GATE、Interrupt Register へ分配するために Fan-In/Fan-Out (F_1) を用いる。ADC の GATE へ送る信号は、GATE Generator で幅を $2.0\mu\text{ sec}$ に広げておき S_0, S_1, S_2 からのアナログ信号が十分に GATE の中に入るようにした。

TDC の STOP のうち、ch.3 には D_3 からの信号を 500 nsec 程度ケーブルで遅延させて D_4 で整形した NIM 信号を入れる。START と ch.3 の STOP の時間差を寿命成分の解析に主に用いる。 D_0, D_1, D_2 からの信号も TDC の START よりも数十 nsec 遅れて STOP の ch.0, ch.1, ch.2 へ NIM 信号を入れる。これらの時間分布は Time-walk Correction に用いる。

3.3.3 エレクトロニクス

今回用いた各 CAMAC モジュールの製造元や機能の概略と、使用目的を述べる。

Analog to Digital Converter (ADC)

アナログ信号をデジタル信号に変換するモジュールである。入力したアナログ信号の電荷量のある時間内で積分した値をデジタル信号として出力する。積分時間は GATE 端子で制御され、NIM 規格に準拠する矩形パルスが入力されている間のみ入力信号は積分される仕様になっている。出力される信号は CAMAC 規格に準拠し、PC 等の端末でデータを読み出す。使用したのは LeCroy 社製の 2249W である。

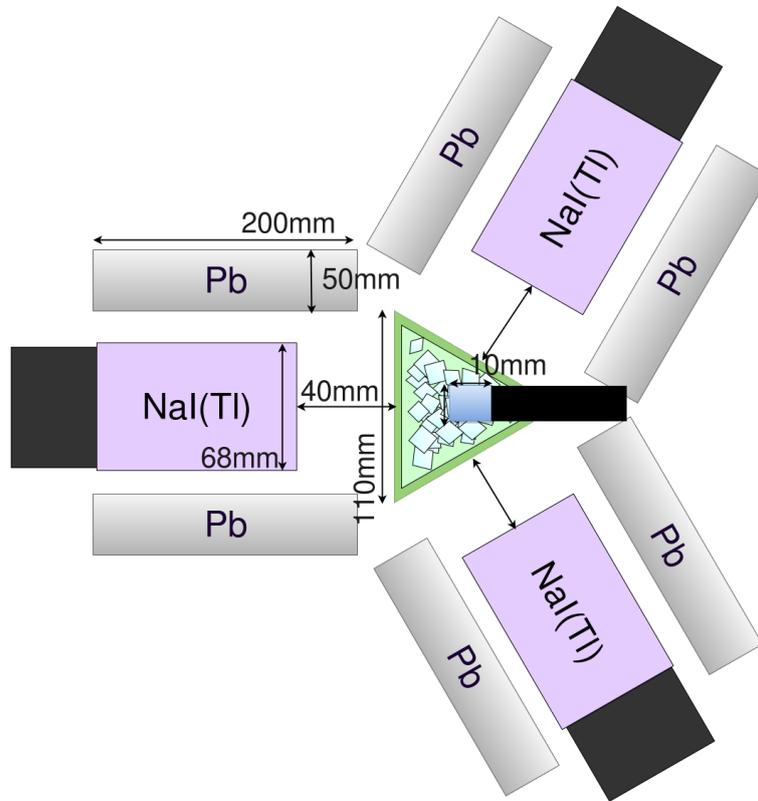


図 3.6: セットアップの俯瞰図

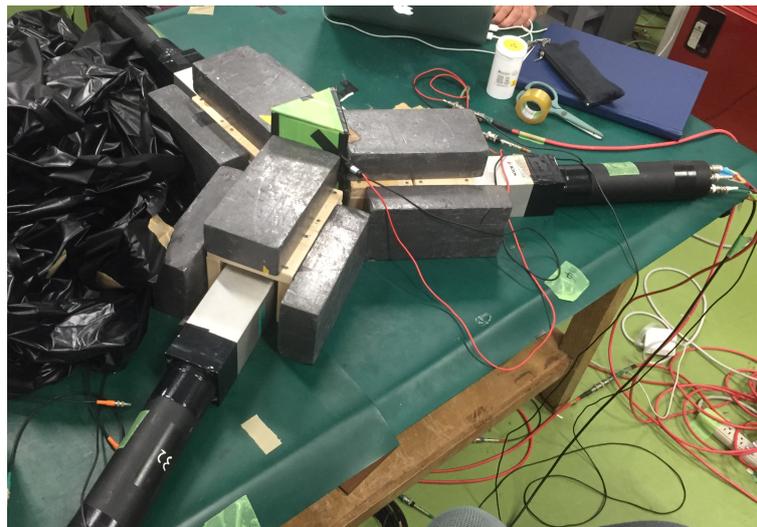


図 3.7: 実際のセットアップ

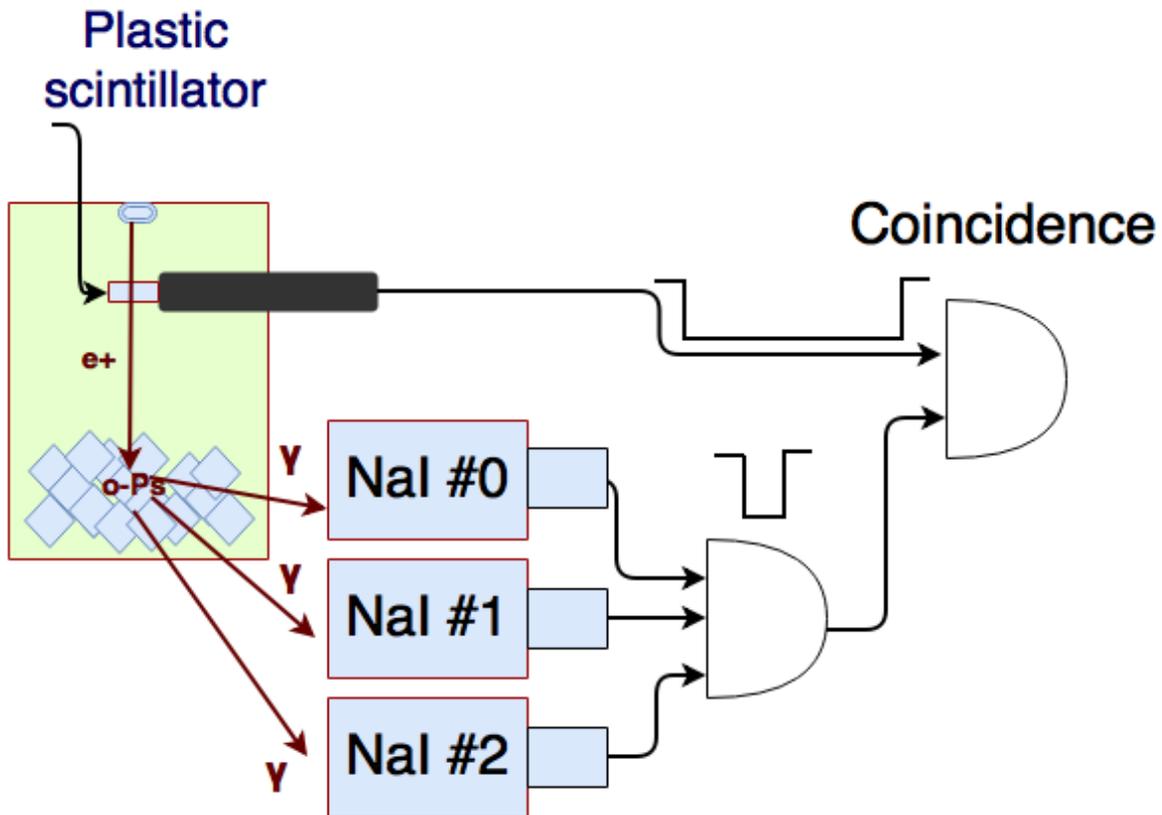


図 3.8: 測定の概念図

Time to Digital Converter (TDC)

START、STOP の 2 つの入力端子があり、START 端子に信号が入力されてから STOP 信号に信号が入力されるまでの時間差を測定し、デジタル信号に変換するモジュールである。実験で使用したのは LeCroy 社製の 2228A である。入力信号は NIM 信号に、出力信号は ADC 同様 CAMAC 規格に対応している。

Discriminator

ある閾値 (Threshold) 以上の波高のアナログ信号が入力されたタイミングで、論理信号を出力するモジュールである。実験では LeCroy 821 Quad 100MHz Discriminator、テクノランドコーポレーション製の N-TM 716 4CH Discriminator、カイズワークス社製の KN240 QUAD DISCRIMINATOR の 3 種類を用いた。

NaI(Tl) シンチレーション検出器からのアナログ信号を 3 つの Discriminator を通してからロジック回路に渡しているが、この理由については次章で述べる。

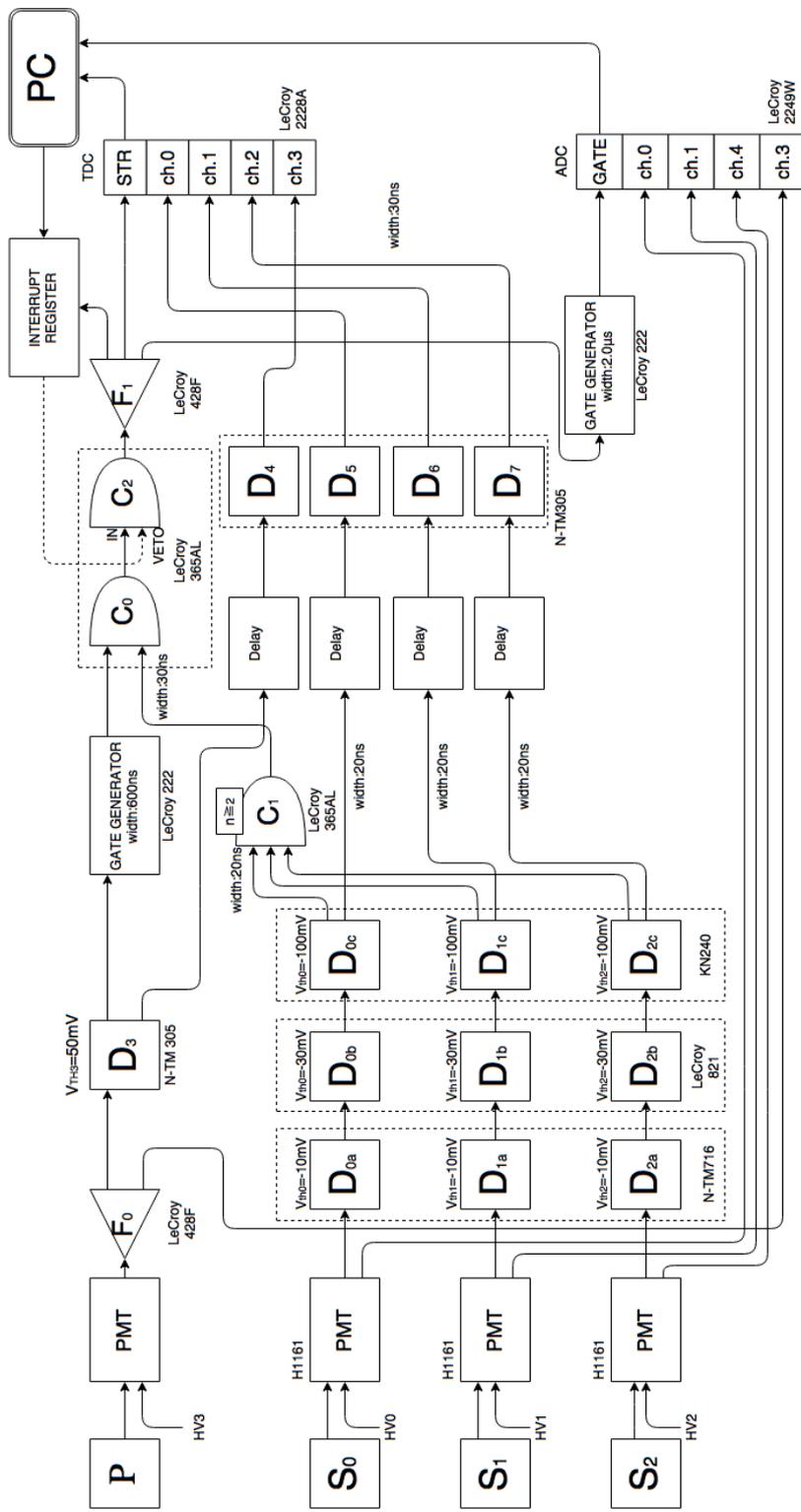


图 3.9: 回路图

Gate Generator

入力した論理信号を任意の時間幅と遅延時間で出力するモジュールである。プラスチックシンチレーション検出器からの信号と NaI(Tl) シンチレーション検出器の信号のコインシデンスを作るため、ADCのGATEとして使用した。前者の信号の幅は 600 nsec、後者の信号の幅は o-Ps の寿命よりも十分に長い 2.0 μ sec に設定した。使用したのは LeCroy 222 である。

Fan-In/Fan-Out

Fan-Out は一つの入力論理信号を、入力信号と同じ波形情報を保ったまま複数の論理信号に分割するモジュールで、Fan-In は複数の入力論理信号を論理和で出力するモジュールである。実験では両方の機能を持つ LeCroy 428F を使用した。

Coincidence Logic

複数の入力論理信号の論理積を出力するモジュールである。入力論理信号の幅は 20 nsec あるいは 30 nsec の幅で設定している。使用したのは LeCroy 365AL である。

Interrupt Register

割り込み信号の情報を出力するモジュールである。コンピュータ側のプロセスでデータの測定処理が開始されると、データの測定許可を出す。データが取得されると、読み出し処理をしてストレージへ記録されるが、その間の時間は測定を行わないようにするため、データの測定許可を取り消す。そのため Interrupt Register から NIM 信号を出してトリガー用のコインシデンスモジュールの VETO に入れるようにした。型番不明。

第4章 予備実験

4.1 較正

本実験で用いる PMT の電圧の決定と、ADC と TDC の較正を行った。

4.1.1 HV のセットアップ

NaI(Tl) に接続された PMT にかける電圧を変化させ、その時の出力信号の計数率の変化を見ることで電圧の調整を行った (図 4.1)。測定はそれぞれの電圧について 5 分間ずつ行った。

ただし、プラスチックシンチレーターについてはプラトー領域の測定が困難であったため、MIP ピークが見えるような電圧を設定した。

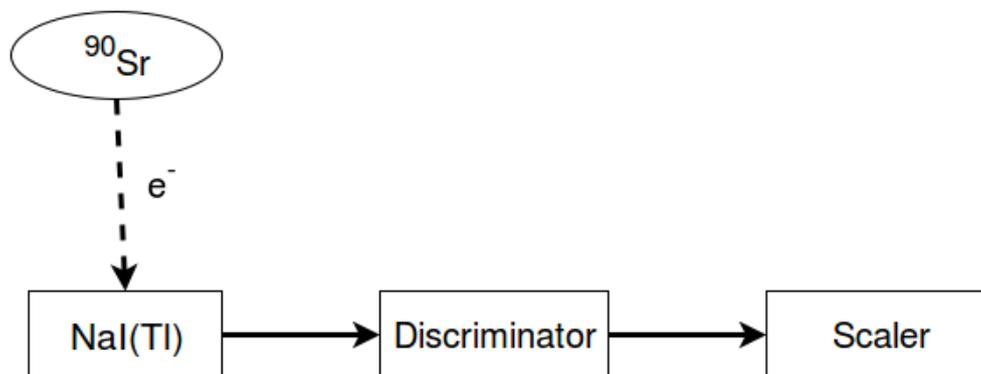


図 4.1: HV の調整

測定結果は図 4.2 から図 4.4 の通りである。

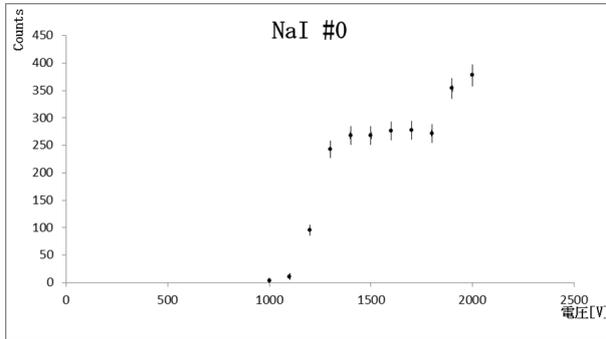


図 4.2: 計数率 NaI 0

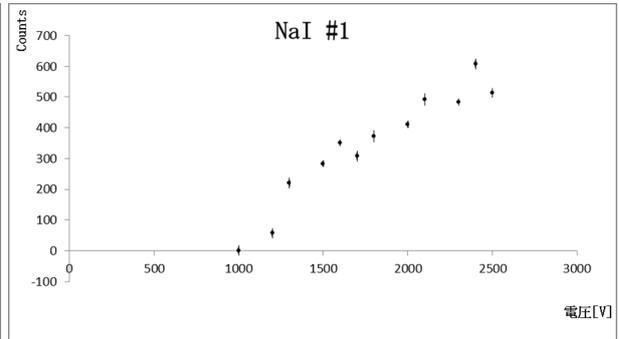


図 4.3: 計数率 NaI 1

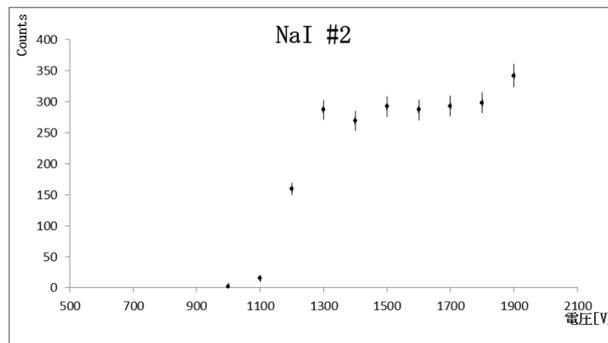


図 4.4: 計数率 NaI 2

プラトー領域では電圧が変化したときの計数率の変化量がほかの領域に比べて少ないため、実験ではこの領域を用いるとよい。そのため、PMT にかける電圧は表 4.1 のように決定した。

シンチレーター	電圧 [V]
プラスチック	1200
NaI 0	1600
NaI 1	1600
NaI 2	1450

表 4.1: PMT にかける電圧

4.1.2 ADC のエネルギー較正

^{137}Cs と ^{22}Na の光電吸収ピーク (それぞれ 661.7 keV と 511 keV) を用いて ADC のエネルギー較正を行った。

線源と三本の NaI(Tl) 検出器を本測定と同じ配置 (図 3.6) で設置し、図 4.5 にあるような回路を用いて測定を行った。ペDESTALについては、ADC の Gate にクロック信号を入れることで測定した。



図 4.5: ADC の較正

ここで、図 4.5 で 3 つの Discriminator を用いている理由を説明する。

今回、NaI(Tl) に接続された PMT からのアナログ信号は鋸歯状波のようになっているため、出力される信号幅が小さい Discriminator を用いると、一事象につきいくつものデジタル信号が生じてしまう。しかし、出力信号の幅が大きい Discriminator は閾値の下限が 300 keV 程度となっているため、一つ目の Discriminator は出力信号の幅が小さいものを使う必要がある。そのため、一つ目の Discriminator で一事象につき複数個生じた信号を二つ目の Discriminator で統合した。さらに、後に行う測定では NaI(Tl) からの信号を Coincidence モジュールに入れるため、三つ目の Discriminator でデジタル信号の幅を小さくし、同時性を見られるようにした (図 4.6)。

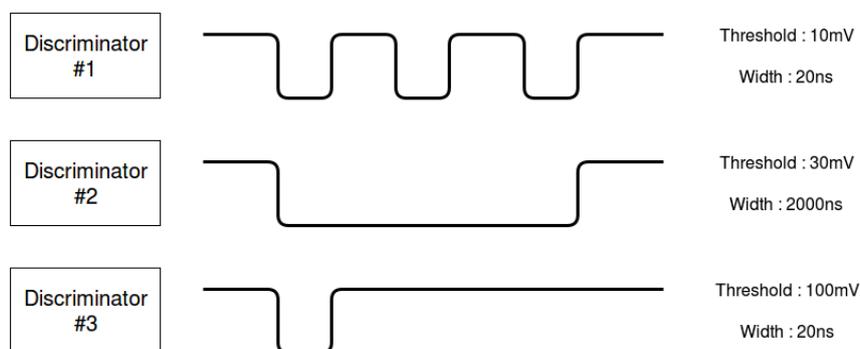


図 4.6: 信号のタイミング

得られた ADC 分布は図 4.7 から図 4.12 の通りである。光電吸収ピークのフィッティングにはガウシアン+二次関数 (式 4.1) を用いた。フィット領域は、光電吸収ピークが全て入るように選んだ。

$$y = A \exp\left(-\frac{(x - B)^2}{\sigma^2}\right) + C(x - D)^2 + E \quad (4.1)$$

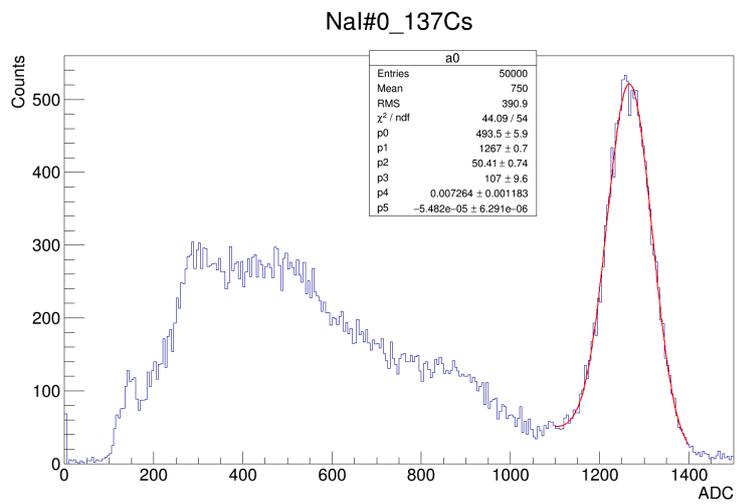


図 4.7: ^{137}Cs のエネルギースペクトル (NaI 0)

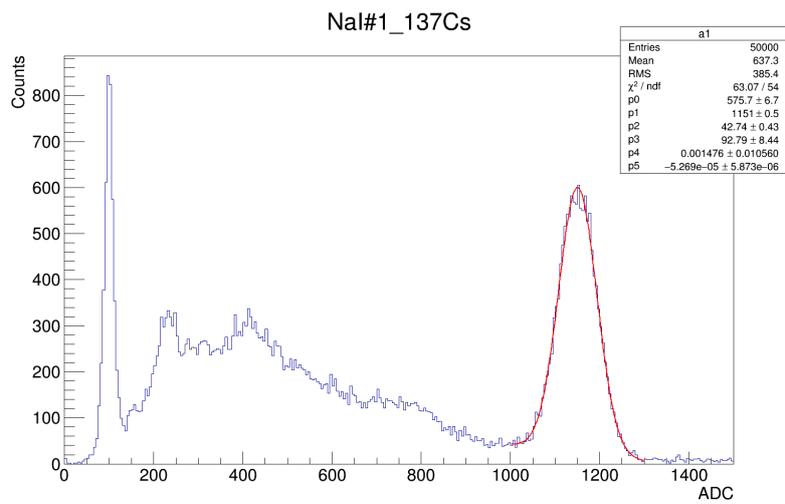


図 4.8: ^{137}Cs のエネルギースペクトル (NaI 1)

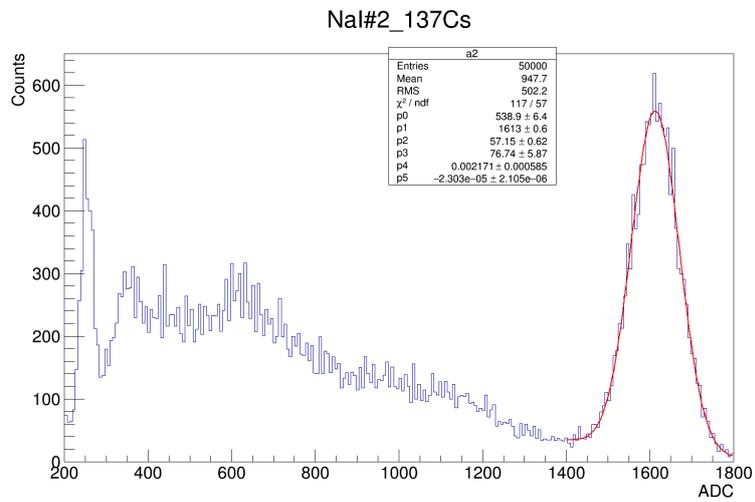


図 4.9: ^{137}Cs のエネルギースペクトル (NaI 2)

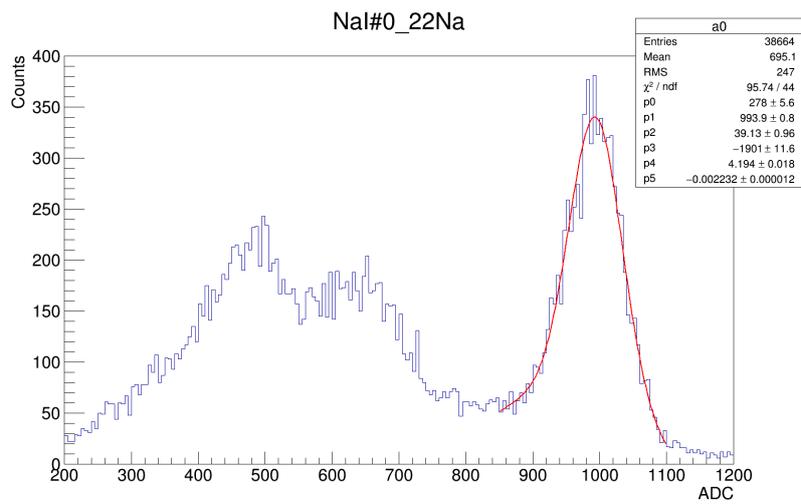


図 4.10: ^{22}Na のエネルギースペクトル (NaI 0)

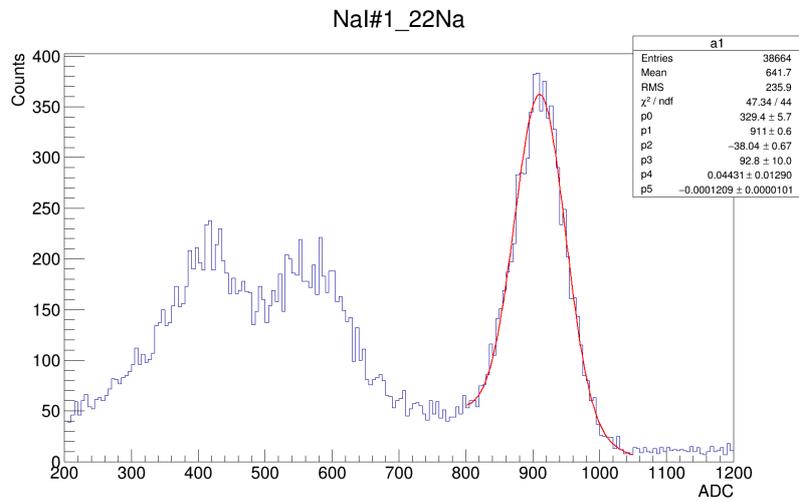


図 4.11: ^{22}Na のエネルギースペクトル (NaI 1)

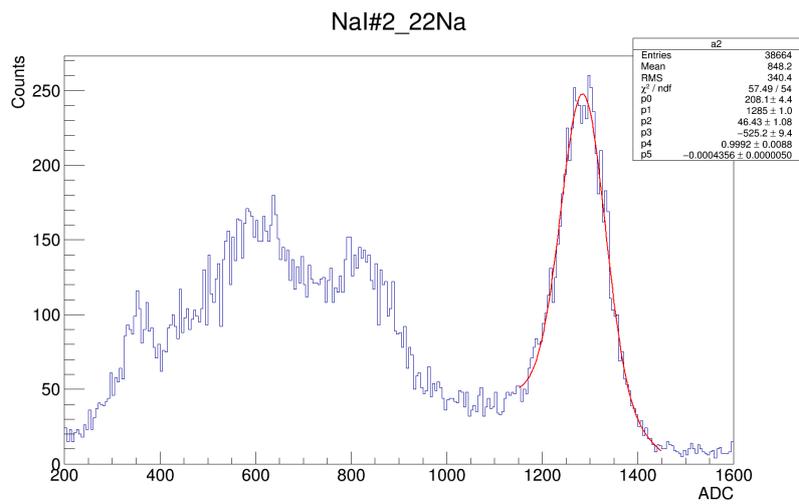


図 4.12: ^{22}Na のエネルギースペクトル (NaI 2)

図 4.7 から図 4.12 の光電吸収ピークの位置から、エネルギーと ADC 値の対応は表 4.2 のようにまとめられる。

NaI	0 keV	511.0 keV	661.7 keV
0	131.4	993.9	1267
1	91.25	911.0	1151
2	172.3	1285	1613

表 4.2: エネルギーと ADC 値の関係

表 4.2 と各ピークの広がりから、エネルギーと ADC 値の関係は式 4.3 から式 4.4 のように表される。

$$NaI\ 0 : E = (ADC - 131.4 \pm 0.5) \times 0.585 \pm 0.008 \quad (4.2)$$

$$NaI\ 1 : E = (ADC - 91.3 \pm 0.2) \times 0.624 \pm 0.001 \quad (4.3)$$

$$NaI\ 2 : E = (ADC - 172.3 \pm 0.2) \times 0.454 \pm 0.001 \quad (4.4)$$

4.1.3 TDC の時間較正

図 4.13 のような回路を組み、X の部分を変化させながら TDC の較正を行った。X が 0 ns のとき、TDC の Start と Stop に同時にクロック信号が来ることをオシロスコープで予め確認しておいた。クロックの周波数は 1kHz であった。

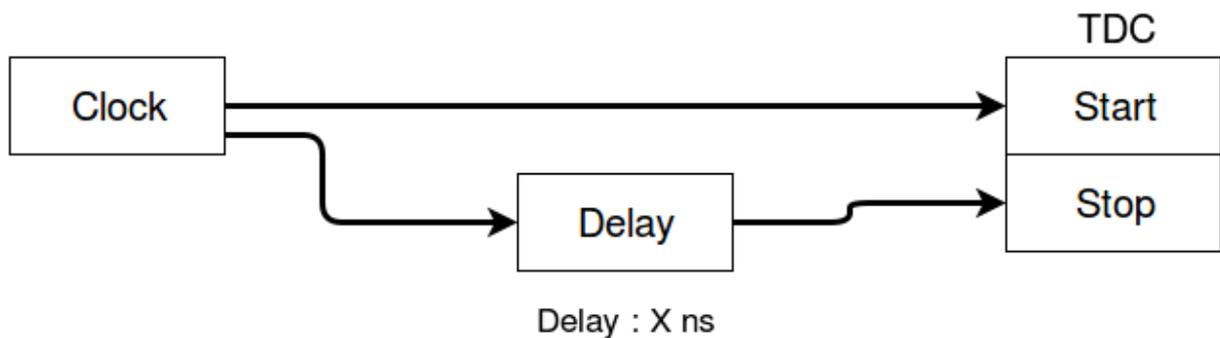


図 4.13: TDC の較正

測定の結果、TDC 値と時間の関係は図 4.14 のようになった。

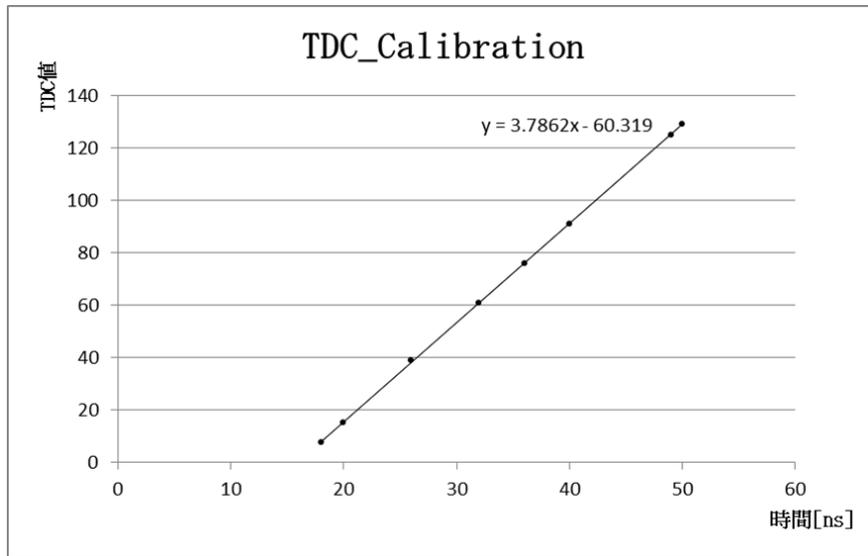


図 4.14: TDC 値と時間の関係

図 4.14 から、TDC 値と時間 T の間に成り立つ関係は式 4.5 のように表される。

$$T = \frac{TDC + 60.3 \pm 0.5}{3.79 \pm 0.01} [ns] \quad (4.5)$$

4.2 ^{22}Na からの陽電子がプラスチックシンチレーターを貫通していることの確認

陽電子がプラスチックシンチレーターを貫通していることを保証するために、Bethe-Bloch の式を用いて陽電子がプラスチックシンチレーター中で失うエネルギーを計算した。

図 4.15 の縦軸は陽電子のエネルギー、横軸はプラスチック中の距離を表す。 ^{22}Na から出た陽電子は初めは 546 keV の運動エネルギーを持っているが、プラスチック中でそのエネルギーを徐々に失い、最終的に対消滅によって光子に変わる。この図から、 ^{22}Na からの陽電子が今回用いた厚さ 350 μm のプラスチックシンチレーター中で落とす平均エネルギーは 109 keV であるため、陽電子は十分貫通できることが分かる。

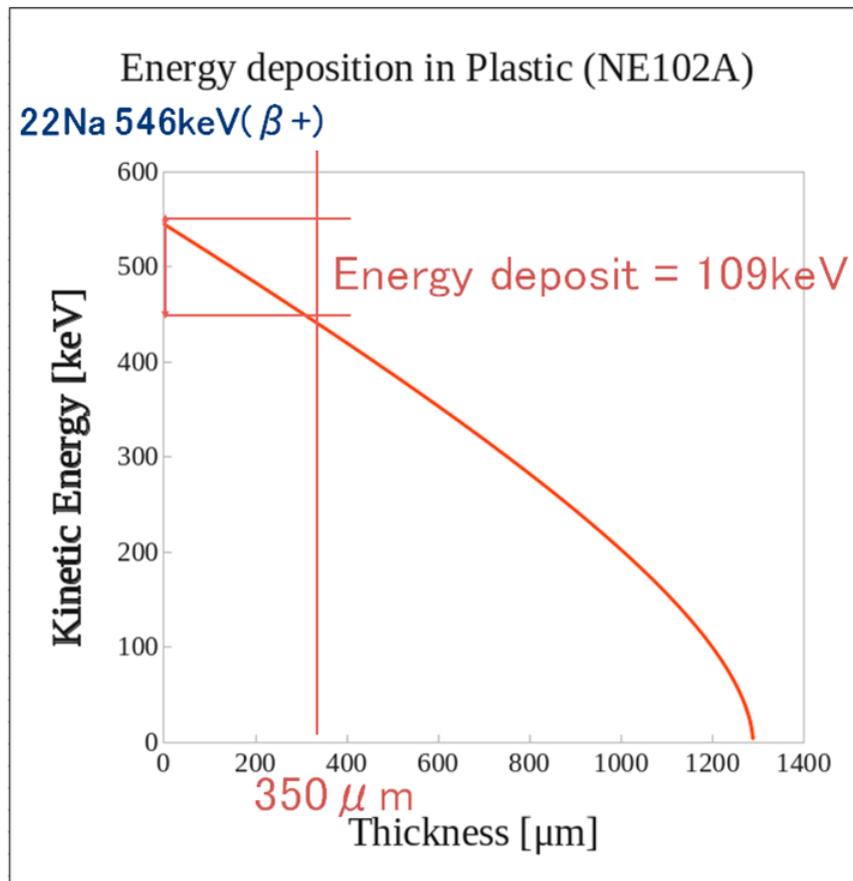


図 4.15: プラスチック中を進む陽電子の運動エネルギー

図 4.16 は本実験でプラスチックシンチレーターに落とされたエネルギーの分布である。150 ch 付近に分布している小さなピークはペDESTAL であることは事前に確かめておいた。このエネルギー分布は Landau 分布となっているため、これが MIP ピークである場合、陽電子はプラスチックシンチレーターを通過しているといえる。

本来は他の線源についても同様の測定を行い、ピークの位置が同じであることを確かめるべきである。しかし、事前に ^{90}Sr について行った測定ではプラスチックシンチレーターに接続された PMT にかけた電圧が本実験と異なっていたため、ピーク位置の比較を行うことはできなかった。

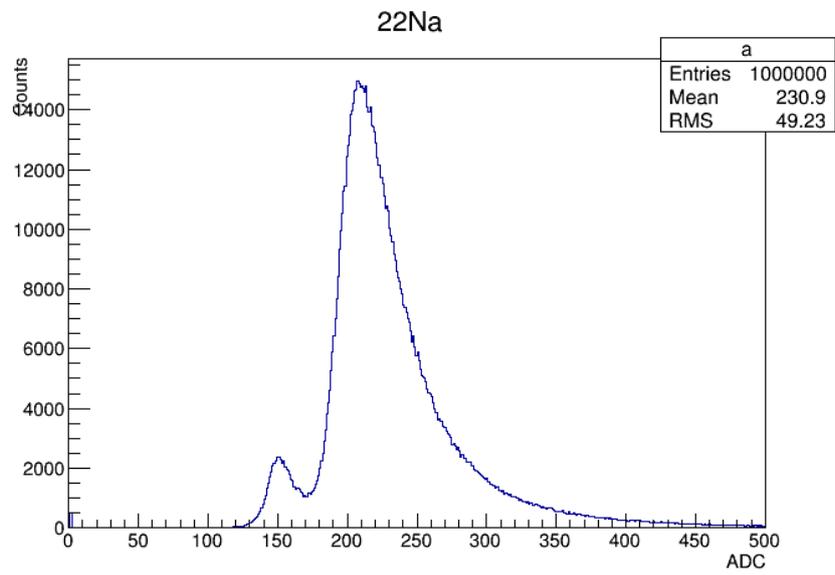


図 4.16: プラスチックシンチレーターに落とされたエネルギーの分布

第5章 結果と考察

5.1 データ

図 3.6 のように実験機材を配置し、図 3.9 のような DAQ を用いて測定を行った。エアロゲルがある状態での測定を四日間行い、 1×10^6 事象を集めた。また、エアロゲルがない状態では二日間測定を行い、 5×10^5 事象を集めた。測定結果は図 5.1 から図 5.7 の通りである。これらは全て測定時間で規格化を行った後のプロットである。

青色のプロットはエアロゲルありのデータ、赤色のプロットはエアロゲルなしのデータを示している。また、図 5.7 は $\Delta t = 500 - TDC$ 値で変換した後のものである。

- ・ エネルギー分布 (図 5.1 から図 5.3)

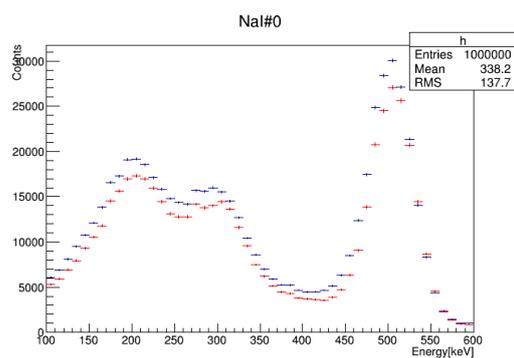


図 5.1: NaI 0 に落とされたエネルギーの分布 (青がエアロゲル有、赤がエアロゲル無しのデータに対応する)

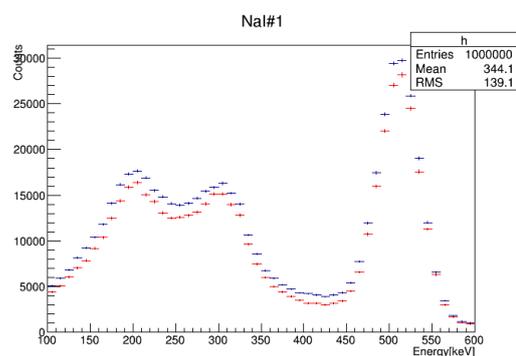


図 5.2: NaI 1 に落とされたエネルギーの分布

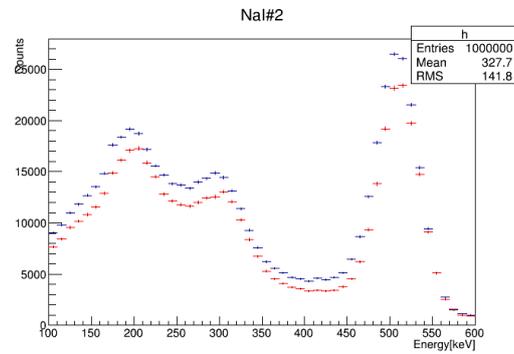


図 5.3: NaI 2 に落とされたエネルギーの分布

511 keV にあるピークは、p-Ps の崩壊もしくは陽電子が物質中で起こした対消滅事象によるピークである。より低エネルギー側には、200 keV 付近に後方散乱ピーク、300 keV 付近にコンプトン端も見ることができる。

・時間分布 (図 5.4 から図 5.7)

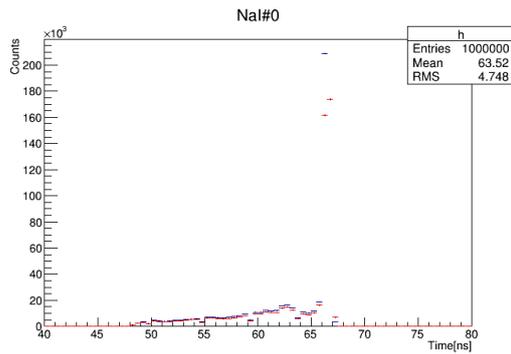


図 5.4: NaI 0 の時間分布 (青がエアロゲル有、赤がエアロゲル無しのデータに対応する)

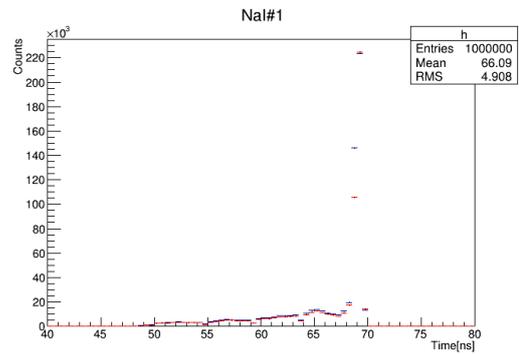


図 5.5: NaI 1 の時間分布

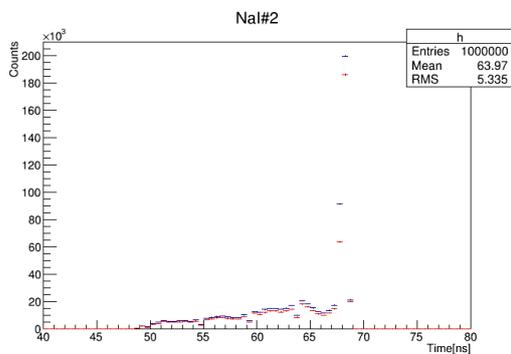


図 5.6: NaI 2 の時間分布

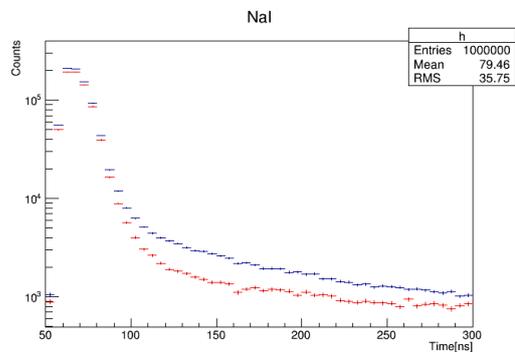


図 5.7: プラスチックシンチレーターが信号を出してからトリガーがかかるまでの時間の分布

図 5.4 から図 5.6 で 67 ns 付近に現れているピークは、対応する NaI からの信号がトリガーとなった事象によるものである。

5.2 解析

5.2.1 Time-walk 補正

図 5.8 は NaI 検出器に接続された PMT からのアナログ信号と Discriminator が信号を出すタイミングの関係を模式的に表している。

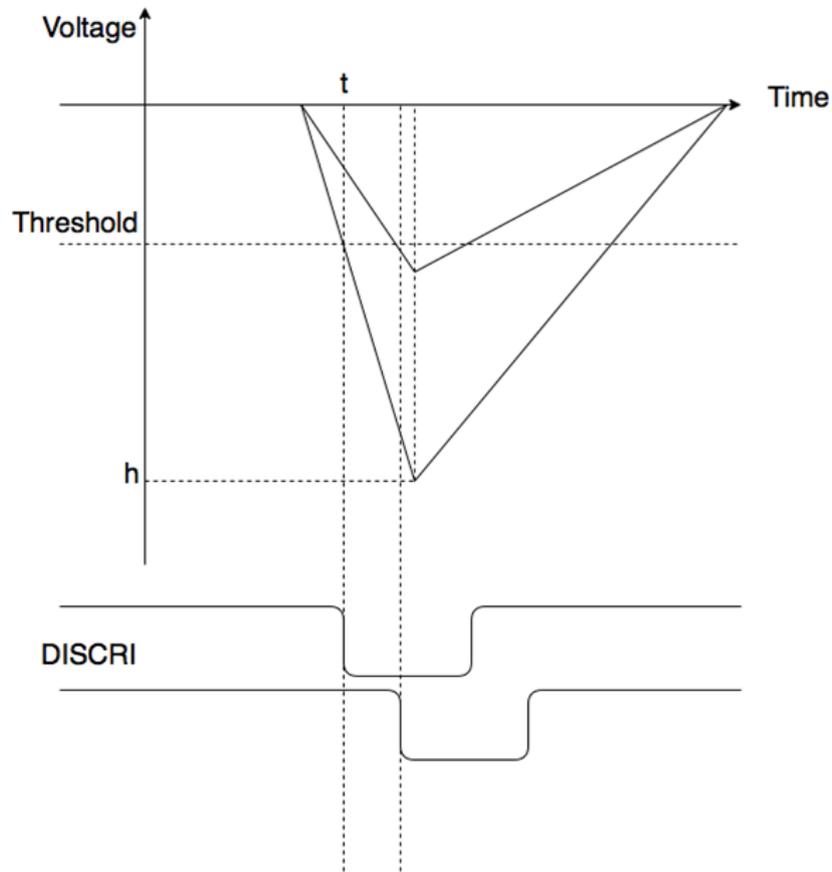


図 5.8: 閾値を超えるタイミングのエネルギー依存性

信号が立ち上がり始めてから Discriminator の閾値を超えるまでの時間は、各 NaI(Tl) で検出されたエネルギーに依存する。そのため、得られた生の時間分布はエネルギーに依存したバイアスを持つこととなる。そこで、以下の仮定のもと、このバイアスを補正した。

- PMT からの信号の立ち上がりは線形である
- 信号の波高はエネルギーに依存する
- 信号が立ち上がり始めてから立ち上がりきるまでの時間は一定である

これらのことを仮定すると、信号が立ち上がり始めてから立ち上がりきるまでの時間 T は式 5.1 のように表される。

$$T = \frac{A}{E} + B \quad (5.1)$$

ただし、 A と B はデータのフィッティングで決まる定数である。

次に、Time-walk をどのようにして見るかを考える。本実験の回路では、プラスチックシンチレータと NaI からの信号は図 5.9 のようなタイミングで TDC に入る。

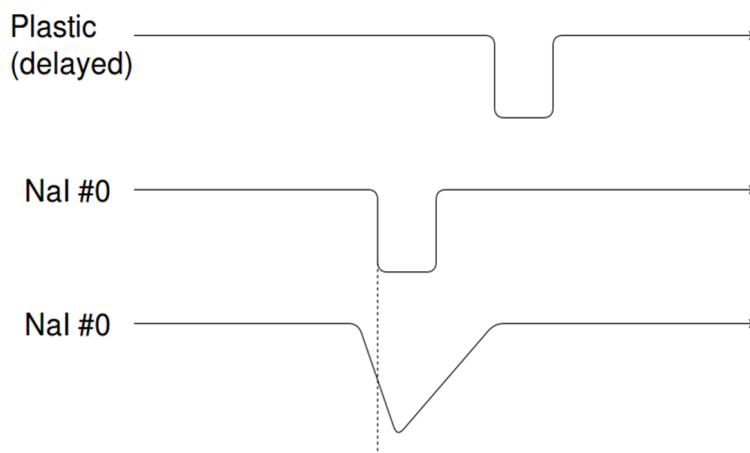


図 5.9: 信号のタイミング

プラスチックシンチレーターからの信号は NaI に落とされたエネルギーに依存せず、NaI からの信号は NaI に落とされたエネルギーに依存したタイミングでやってくる。よって、これらの 2 つの信号の時間差を取ることで Time-walk の情報を得ることができる。縦軸をこの時間差、横軸をエネルギーとしたものが図 5.10 から図 5.15 である。 p_0 と p_1 はそれぞれ式 5.1 中の定数 B, A を表す。ここでは、陽電子がプラスチックシンチレーターを貫通してすぐに起こった対消滅事象によるガンマ線だけを捉えるために、NaI に囲まれた領域からエアロゲルを取り除いたうえで測定を行った。また、赤い枠で囲われている領域以外では事象が縦縞を作っている。縦縞を作っている領域の事象は時間によらず一定計数率で観測されていることを意味するため、偶発的であるといえる。そのため、Time-walk の式を決定する際はこれらの事象を取り除いたうえでフィッティングを行った。

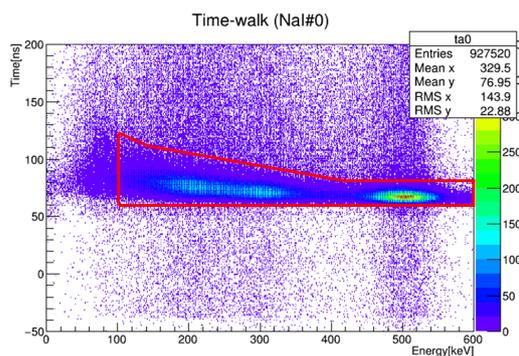


図 5.10: 時間とエネルギーの相関図 (NaI 0)

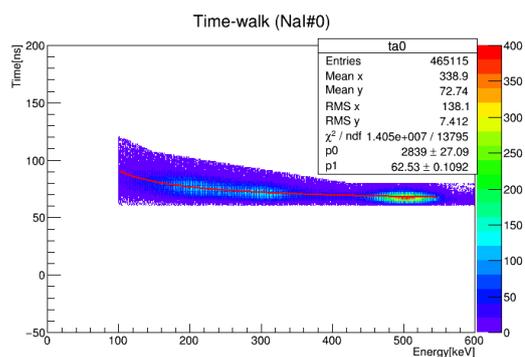


図 5.11: 時間とエネルギーの相関図を式 5.1 でフィットしたもの (NaI 0)

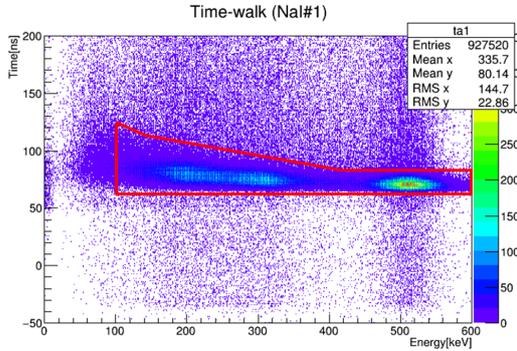


図 5.12: 時間とエネルギーの相関図 (NaI 1)

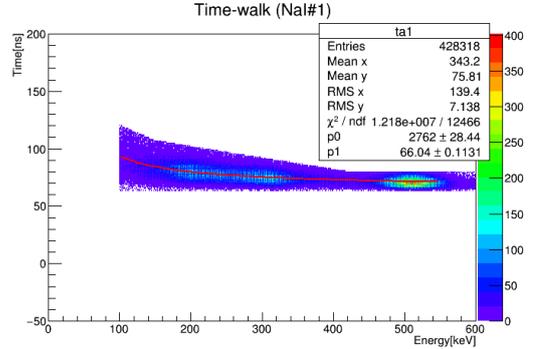


図 5.13: 時間とエネルギーの相関図を式 5.1 でフィットしたもの (NaI 1)

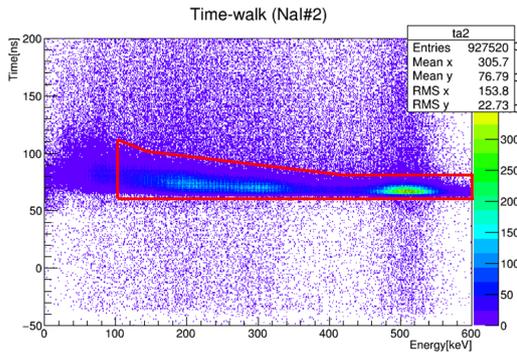


図 5.14: 時間とエネルギーの相関図 (NaI 2)

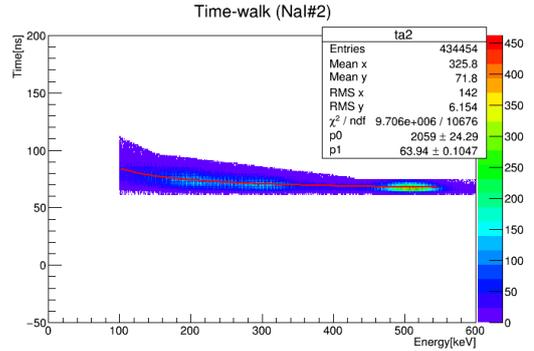


図 5.15: 時間とエネルギーの相関図を式 5.1 でフィットしたもの (NaI 2)

フィッティングの結果、Time-walk の式は式 5.3 から式 5.4 のように求まった。フィット領域は 100 keV から 550 keV である。フィット領域の下限の 100 keV は、後に述べるように、NaI の直後にある Discriminator の閾値から決定した。また、511 keV の周辺には多くの統計があるため、この領域を利用するために上限を 550 keV に設定した。

$$NaI\ 0 : T = \frac{(2.84 \pm 0.03) \times 10^3}{E} + (6.25 \pm 0.01) \times 10^1 \quad (5.2)$$

$$NaI\ 1 : T = \frac{(2.76 \pm 0.03) \times 10^3}{E} + (6.60 \pm 0.01) \times 10^1 \quad (5.3)$$

$$NaI\ 2 : T = \frac{(2.06 \pm 0.02) \times 10^3}{E} + (6.39 \pm 0.01) \times 10^1 \quad (5.4)$$

この結果を用いて Time-walk 補正を行った後の時間とエネルギーの関係は図 5.16 から図 5.18 のようになった。ただし、縦軸の 0 ns は陽電子がプラスチックシンチレーターを貫通した時間に対応する。

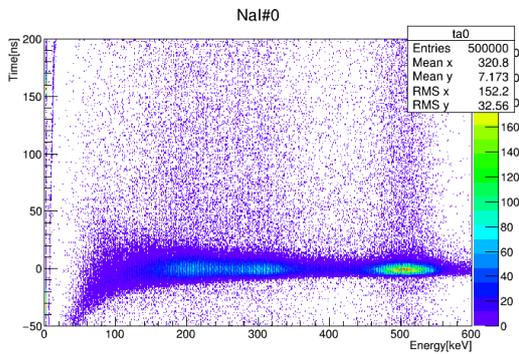


図 5.16: Time-walk 補正を行った後の時間とエネルギーの相関図 (NaI 0)

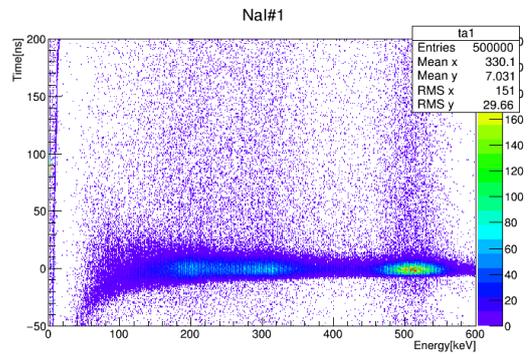


図 5.17: Time-walk 補正を行った後の時間とエネルギーの相関図 (NaI 1)

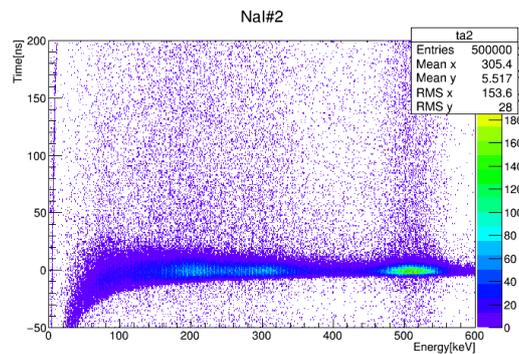


図 5.18: Time-walk 補正を行った後の時間とエネルギーの相関図 (NaI 2)

5.2.2 事象選別

まず、 o -Ps の寿命計算に用いる事象について、エネルギーの下限を Discriminator の閾値から決定した。ここで、各 NaI についての閾値を見る方法について述べる。図 5.19 は NaI0 が検出した事象のエネルギー分布である。ただし青は全事象、赤は NaI0 がトリガーを出した事象である。

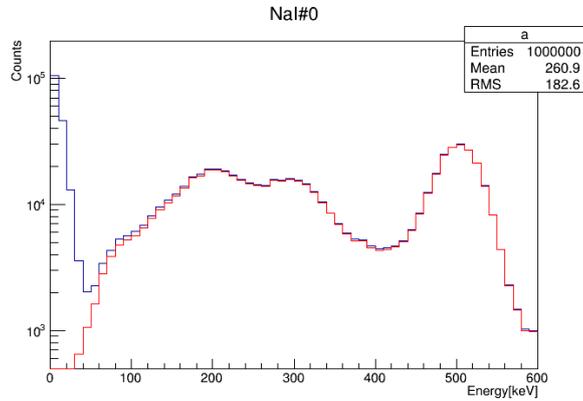


図 5.19: NaI0 が検出した事象のエネルギー分布。青は全事象、赤は NaI0 がトリガーを出した事象についてのヒストグラムである。

図 5.19 の赤のヒストグラムでは、各 NaI からのアナログ信号をデジタル信号に変える Discriminator の閾値を超えた事象のみを見ているため、低エネルギーの事象については青と赤のヒストグラムで大きな差が出る。このことから、図 5.19 の赤のヒストグラムを青のヒストグラムで割り、その値が 0 から 1 に変化する点を見ることで本実験での各 NaI についての閾値を見ることができる。

図 5.20 から図 5.22 は各 NaI についての閾値を示すグラフである。縦軸は各 NaI がトリガーを出した事象の数を全事象の数で割った値、横軸はエネルギーである。

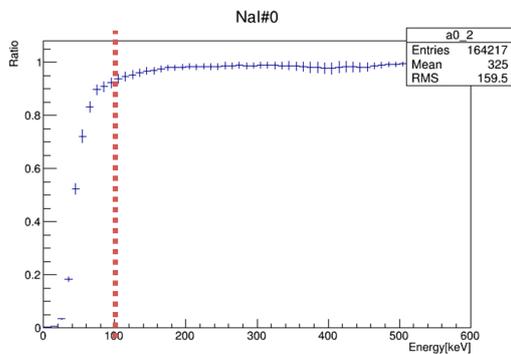


図 5.20: 閾値 (NaI 0)

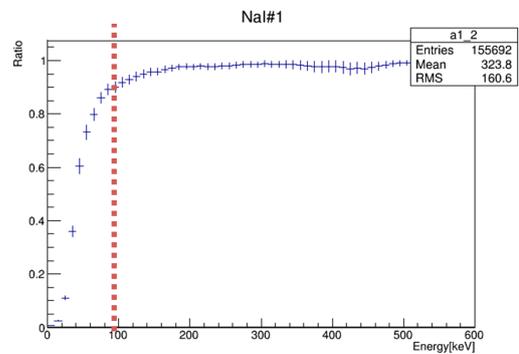


図 5.21: 閾値 (NaI 1)

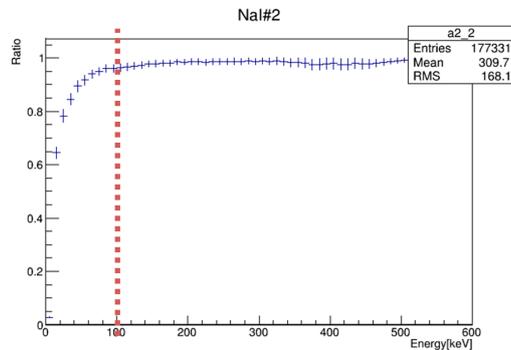


図 5.22: 閾値 (NaI 2)

図 5.20 から図 5.22 より、どの NaI についても閾値は 100 keV 以下となっていることが分かるため、事象選別に用いるエネルギーの下限は 100 keV とする。

次に、エネルギーの上限値を決定する。図 5.23 は NaI0 についてのエネルギー分布である。

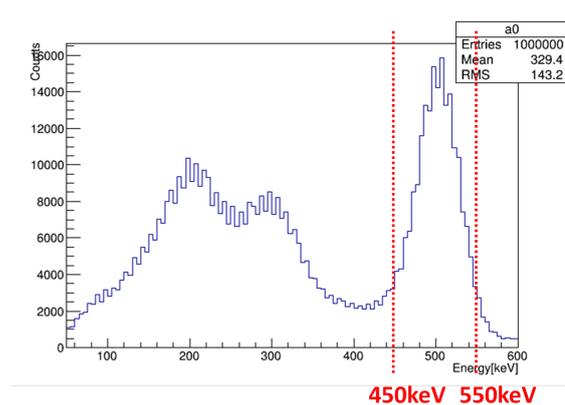


図 5.23: エネルギースペクトル (NaI 0)

図 5.23 から、 ^{22}Na の光電吸収ピークは 450 keV から 550 keV にわたって分布していることが分かる。このピークは主に p-Ps や対消滅に由来する事象で構成されるため、o-Ps の寿命を求める際の事象として用いることは難しい。このことから、事象選別に用いるエネルギーの上限を 450 keV とする。

最後に、時間分布のうち、どの時間以上の領域を用いて寿命を計算するかを決定する。NaI0 についての全事象 (図 5.7) のうち、450 keV から 550 keV のものだけを抜き出したものが図 5.24 である。

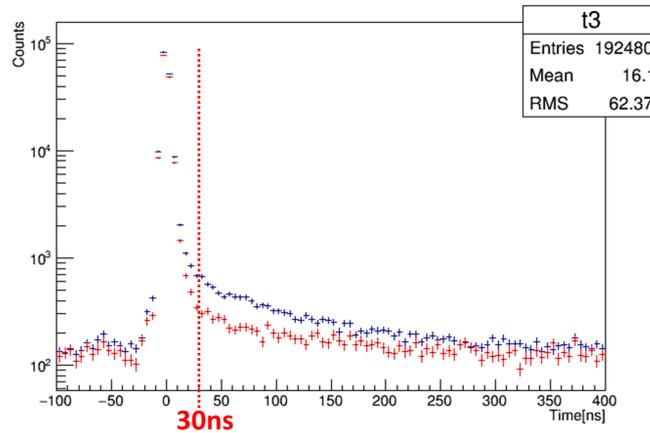


図 5.24: 光電吸収ピークの時間分布 (NaI 0)

図 5.24 から、光電吸収ピークを構成している事象は 30 ns より早くに来ていることが分かる。このことから、事象選別に用いる時間の下限を 30 ns とした。また、図 5.24 を見るとエアロゲルがあるときはこのエネルギー領域でも $o\text{-Ps}$ 由来の長寿命成分を持つことが分かる。しかし、これらの事象を解析によって抽出することは困難である。そのため、本実験では 450 keV から 550 keV の間のエネルギー領域にある $o\text{-Ps}$ 由来の事象は寿命計算に用いない。

また、 $o\text{-Ps}$ からの 3γ を見るために、3 つの NaI が同時に信号を出した事象を選ぶ必要がある。トリガーとなった事象は図 5.4 から図 5.6 で鋭いピークを構成しているものであるため、3 つの NaI に対応する TDC のチャンネル全てがこのピークに値を持つような事象を選ぶ (表 5.1)。

表 5.1: 3 つの NaI が同時に信号を出した事象を選ぶための条件

NaI の番号	カット (単位は ns)
0	$65 < t_0 < 68$
1	$67 < t_1 < 71$
2	$66 < t_2 < 70$

以上から、事象選別の条件をまとめると以下のようになる。

- NaI に落とされたエネルギーは 100 keV から 450 keV の間である事象
- 陽電子がプラスチックシンチレーターを通過してから 30 ns 以上後にトリガーがかかった事象
- 3 つの NaI が同時に信号を出した事象

5.3 大気中の o-positronium の寿命

5.3.1 事象選別の効果

オルソポジトロニウムの寿命を測定するためには、3つの γ 線が同時に来た時のイベントを選別しその時間情報を得る必要がある。今回の測定では、前の事象選別の節で述べた選別法を用いる。それぞれの選別法に次の表 5.2 にあるように名前をつける。

表 5.2: 事象選別

選別名	事象選別
cut1	エネルギー<450keV
cut2	エネルギー>100keV
cut3	3 コインシデンス
cut4	時間:30ns 以降

ここまでで述べた事象選別により正しく3つの γ 線のイベントを選ぶことができているか調べるために、これよりそれぞれの cut を加えたそれぞれの NaI のエネルギーの和について、エアロゲルがあるものとなしもの比較したプロットを書いていく。以降、青いプロットがエアロゲルがあるプロット、赤いプロットがエアロゲルがないプロットとする。

まずは cut1 をかけたエネルギー和のプロットを次の図 5.25 に示す。

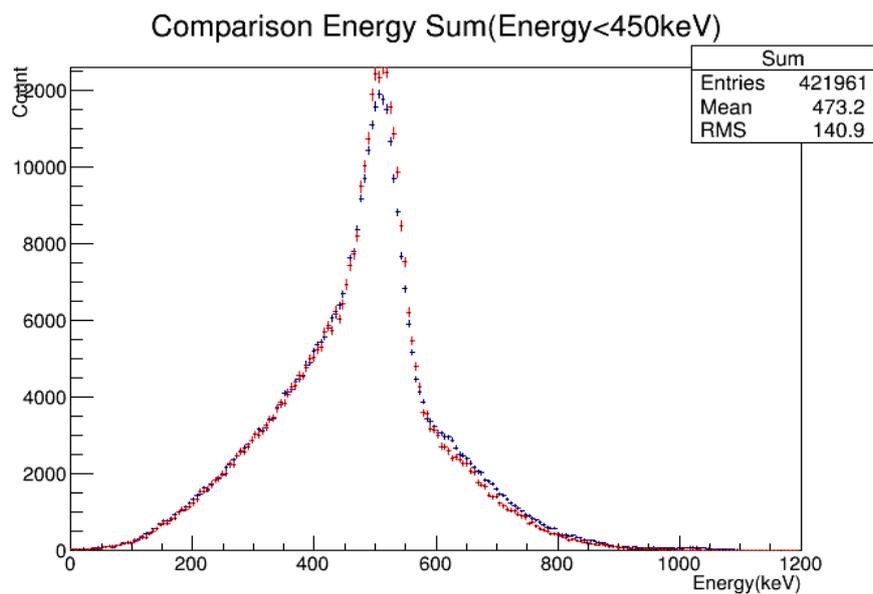


図 5.25: cut1 をかけたエネルギーの和のプロット

このプロットでは、エアロゲルがある状態でのプロットとエアロゲルがない状態でのプロットについて有意な差はない。

次に、cut2 も加えて比較のプロットを書いてみると、次のページの図 5.26 のようになった。

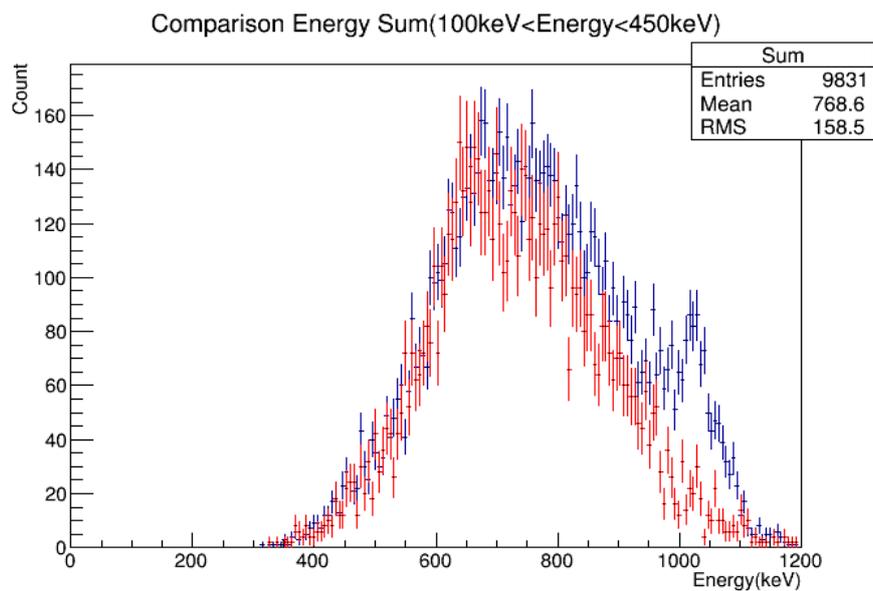


図 5.26: cut1,2 をかけたエネルギーの和のプロット

このプロットでは、800keV 程度までは、エアロゲルがある状態とない状態で有意な差はないが、1000keV 付近で、有意な差が生じている。今扱いたいエネルギーの和のエネルギー帯は 1000keV 前後であるため、cut2 により 1000keV 前後の 2 γ イベントを一定以上排除できたことがわかる。

更に cut3 を加えてプロットすると次の図 5.27 のようになった。

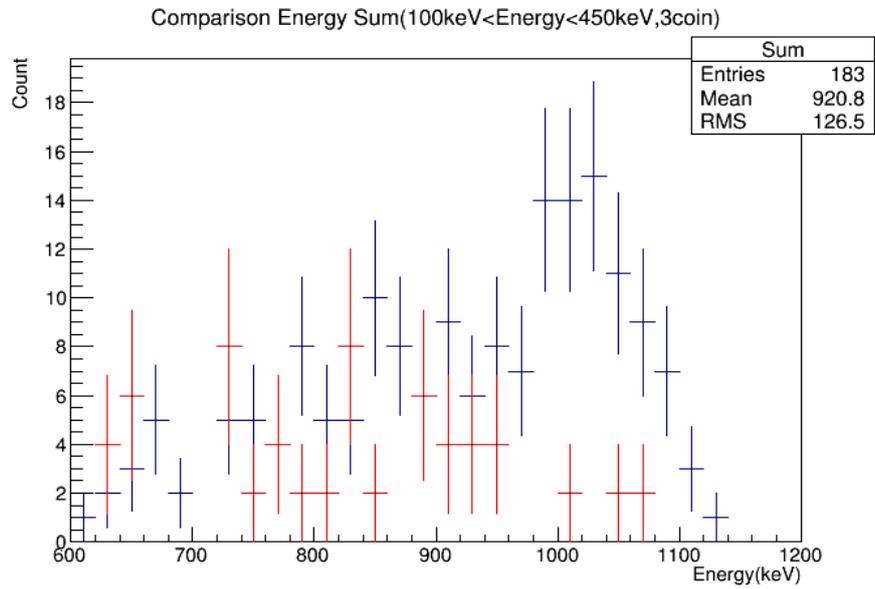


図 5.27: cut1,2,3 をかけたエネルギーの和のプロット

更に cut3 をかけると、図のように 1000keV 周辺のエネルギー帯については、エアロゲルがない時のプロットはほぼ排除することができた。残りは、900keV 以下のエネルギーのプロットを除去できれば良い。最後に全ての cut をかけた状態でのエネルギー和のプロットを次の図 5.28 に示す。

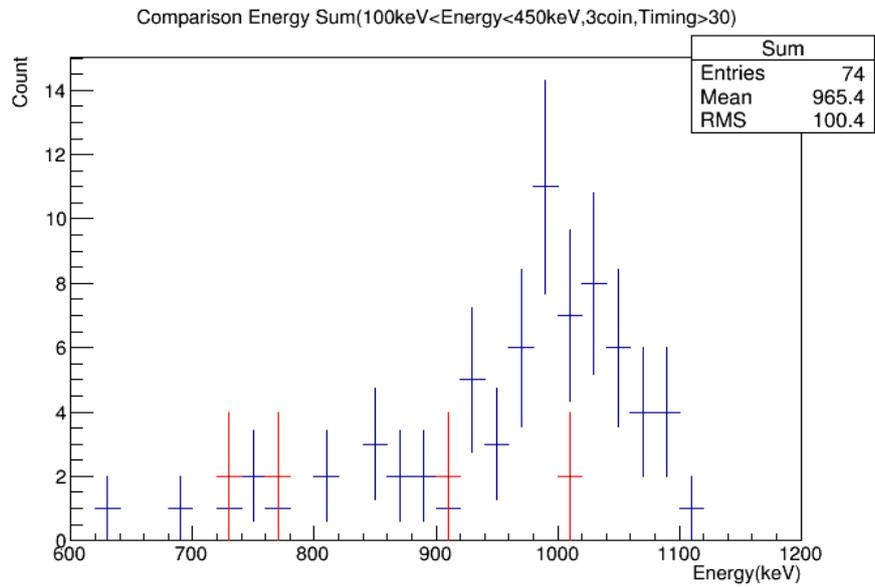


図 5.28: cut1,2,3,4 をかけたエネルギーの和のプロット

全てのカットをかけたことにより、エアロゲルがない時のプロットをほぼ全て排除でき、かつエアロゲルの方も 1000keV 付近にピークができた。このことより、かなり理想的な事象選別になったと考える。

5.4 オルソポジトロニウムの寿命

5.4.1 大気中でのオルソポジトロニウムの寿命

大気中での寿命を解析する。カット条件は 1.1.2 で用いたものを使い、Time-walk correction をした後のプラスチックシンチレーターのタイミング情報を用いる。2.1 で述べたように、 N_0 個の粒子があり、崩壊定数が Γ である粒子の t 秒後の粒子数について、粒子数の時間変化は次のようになる。

$$N(t) = N_0 \exp(-\Gamma t) \quad (5.5)$$

となる。今回の解析では、当初 5.5 を用いていたが、テイルが生じたため、定数項を加えてフィッティングを行った。

$$N(t) = N_0 \exp(-\Gamma t) + C (C \text{ は定数}) \quad (5.6)$$

また、縦軸を対数スケールでプロットした。次のページの図 5.29 にそのプロットを示す。

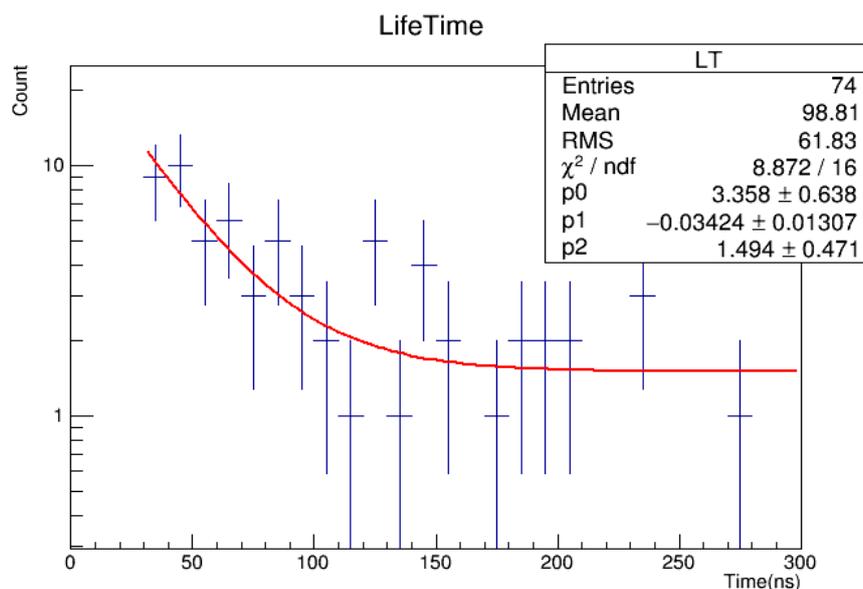


図 5.29: 大気中でのオルソポジトロニウムの寿命

今、表中の値 p1 がこのフィッティングの傾きの値なので、寿命をここから導出するには、この逆数を取り、絶対値をつければ良い。

$$p1 = -0.03424 \pm 0.01307 \quad (5.7)$$

これより、寿命 τ は

$$\tau = 29 \pm 11 (ns) \quad (5.8)$$

となった。この値が今回の実験で得られた大気中でのオルソポジトロニウムの寿命である。

5.5 真空中でのオルソポジトロニウムの寿命測定

5.5.1 真空中における実験の配置

今回の実験では、大気中でのオルソポジトロニウムの寿命測定に加え、真空中でもオルソポジトロニウムの寿命測定を行った。真空中での実験でも、使った NaI(Tl)、使った回路については変更はないが、NaI(Tl)、プラスチックシンチレーターなどの配置に変更が出た。そこで、この節では、回路の説明、使った器具の説明などを改めて行うことはしないが、新しい配置について説明する。次のページの図 5.30 が今回使った配置の概略図である。

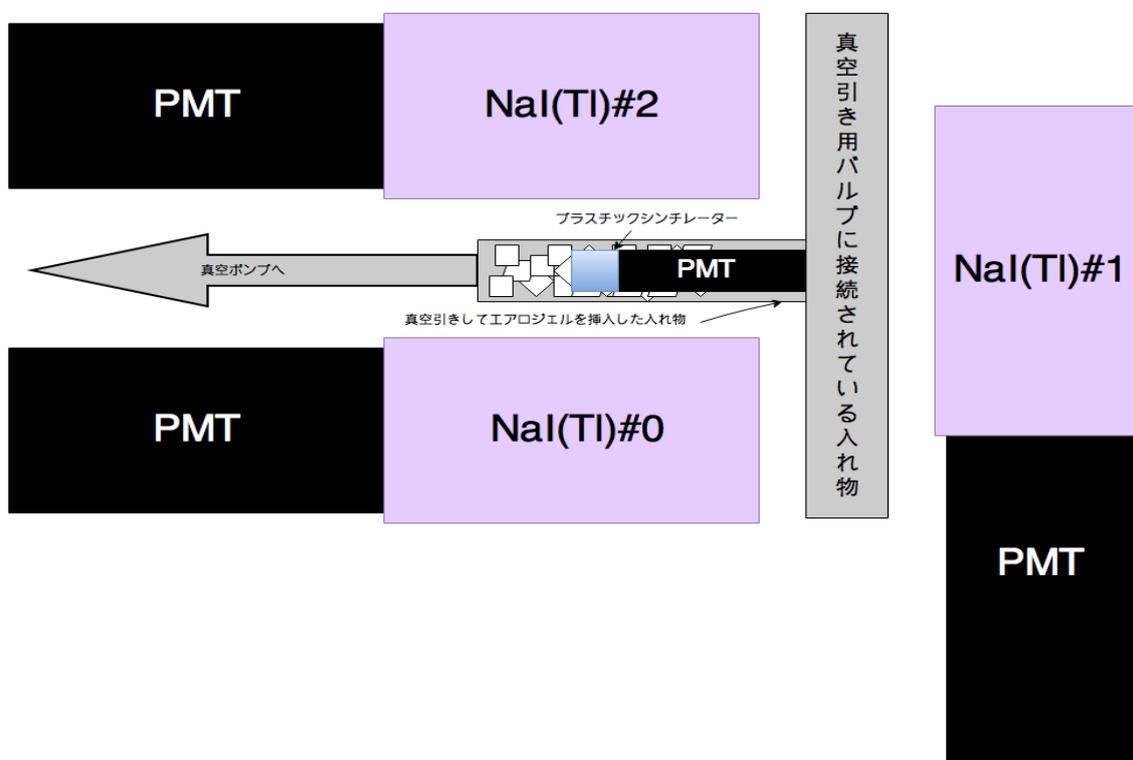


図 5.30: 真空中での実験で用いたセットアップの概略図

ここで、プラスチックシンチレーターの下には、真空管に $30 \mu\text{m}$ の薄い窓 (カプトンラップ) が付いており、プラスチックシンチレーターを透過した陽電子はカプトンラップを通過後真空管内に入ることができる。また、次に、実際の配置を写した写真を上からのものを図 5.31 に、横から撮ったものを図 5.32 として添付する。

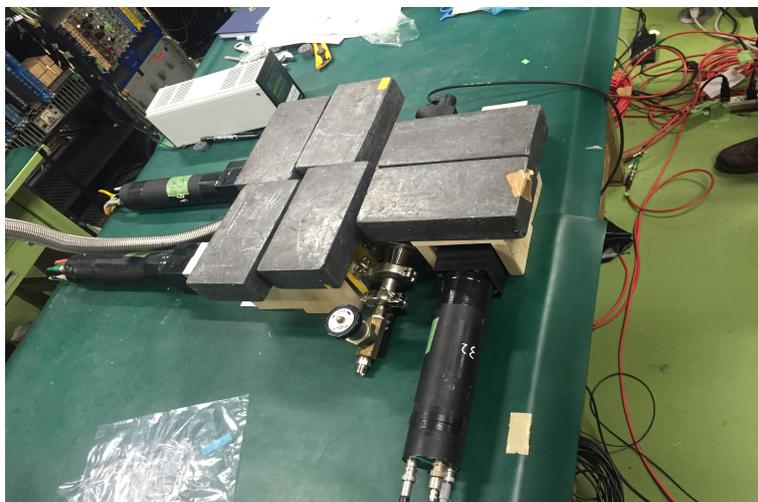


図 5.31: 上から見た配置の図

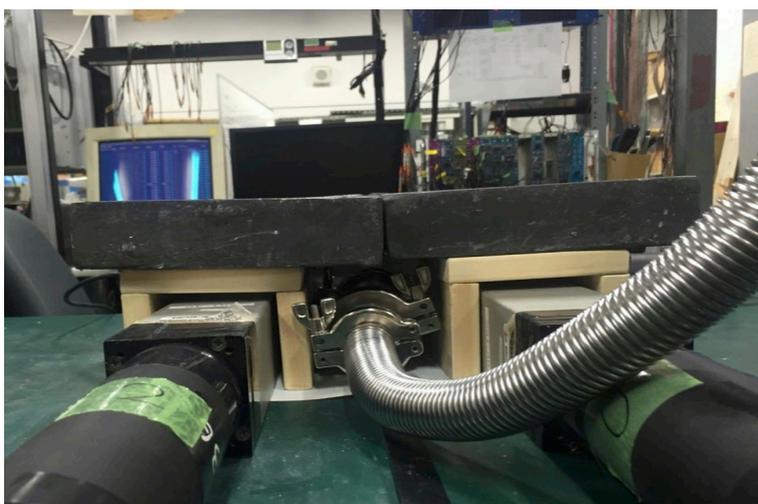
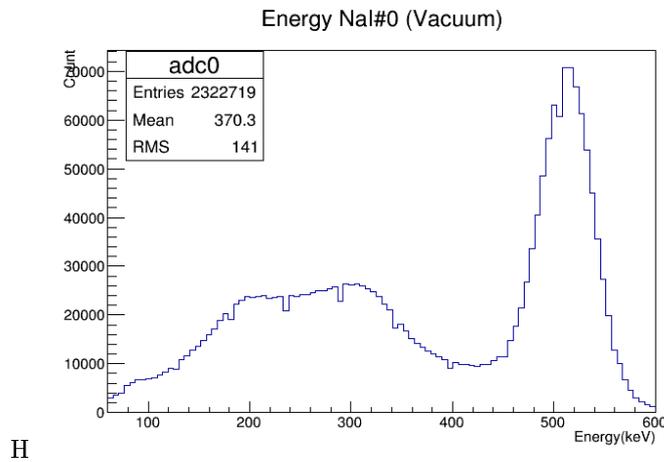


図 5.32: 横から見た配置の図

図 5.31、図 5.32 のように、今回の実験では、NaI の上部を鉛で遮蔽している。図 5.31 から分かるように、4 つの鉛ブロックの真ん中に穴を作っており、この上に ^{22}Na の線源を置き、この線源のちょうど真下にプラスチックシンチレーターが来るように配置した。これにより、 ^{22}Na で発生した陽電子が、プラスチックシンチレーターを貫通し、エアロゲルの中に到達できる。また、鉛により遮蔽したことで、 ^{22}Na から直接 NaI に入るポジトロニウムを排除した。



H

図 5.33: NaI(Tl)#0 のエネルギースペクトル分布

5.5.2 真空中でのオルソポジトロニウムの寿命測定に必要な解析

真空中でのオルソポジトロニウムの寿命測定の実験についても、寿命測定に必要なエネルギーの較正、Time-walk correction などを行った。まず、エネルギー較正の結果を次の表 5.3 にまとめる。

表 5.3: 真空測定におけるエネルギー較正の値

NaI(Tl) の番号	較正
0	$0.6068(E_0 - 131.4)$
1	$0.6689(E_1 - 91.25)$
2	$0.4573(E_2 - 155.7)$

また、今回、NaI(Tl)#1 について、検出器と、エアロジェルが入った入れ物の間に、真空パルプと繋がった金属の筒があり、これよりエアロジェルからくる γ 線が遮蔽されている。これにより、それぞれのエネルギースペクトルは、NaI(Tl)#0:図 5.33、NaI(Tl)#1:図 5.34、NaI(Tl)#2:図 5.35 に示した。

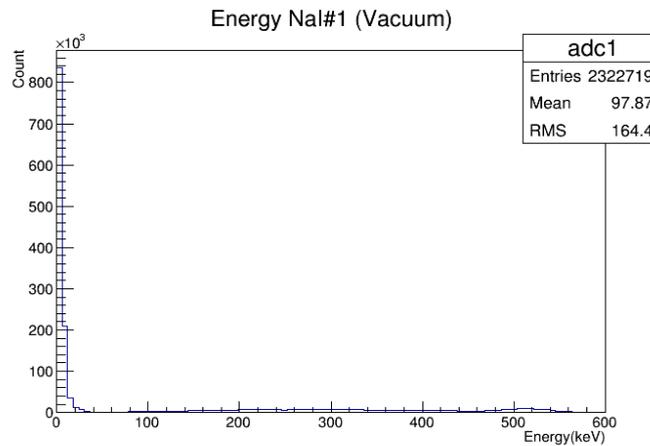


図 5.34: NaI(Tl)#1 のエネルギースペクトル分布

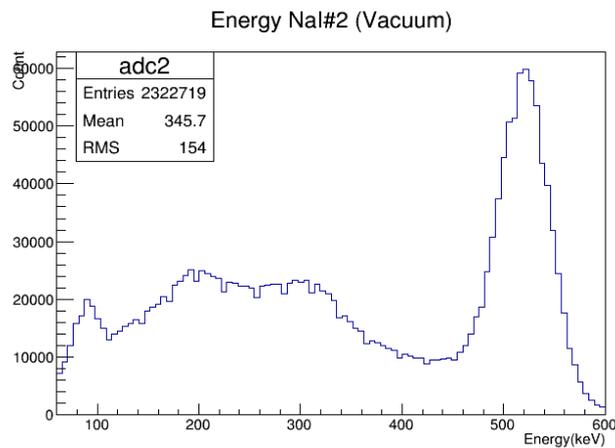


図 5.35: NaI(Tl)#2 のエネルギースペクトル分布

このように、NaI(Tl)#0、NaI(Tl)#2 については、今までの大気中での測定時と同じようなスペクトルとなっているが、NaI(Tl)#1 については、ペDESTALのみのスペクトルとなっている。これより、今後の解析では、NaI(Tl)#0、NaI(Tl)#2 の情報のみを用いていくことにする。まず、プラスチックシンチレーターの時間情報について、NaI(Tl)#0、NaI(Tl)#2 のエネルギー情報を用いて、Time-walk correction を行う。なお、Time-walk correction に用いた事象選別、フィット領域については、大気中での測定で行った Time-walk correction で用いた値と同じものを利用した。Time-walk correction を行ったプラスチックシンチレーターの NaI(Tl)#0 に対するプロットを図 5.36 に、NaI(Tl)#2 に対するプロットを図 5.37 に、NaI(Tl)#0 に対して Time-walk correction を行った後のプラスチックシンチレーターの時間情報のプロットを図 5.38 に、NaI(Tl)#2 に対して Time-walk correction を行った後のプラスチックシンチレーターの時間情報のプロットを図 5.39 に示す。

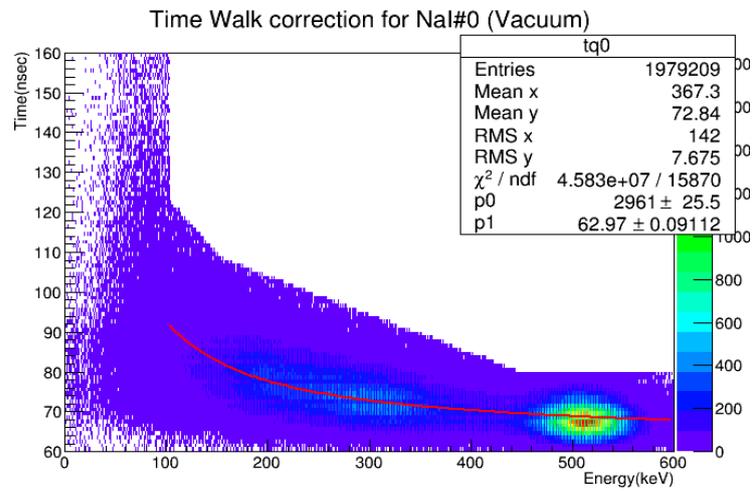


図 5.36: プラスチックシンチレーターに対する NaI(Tl)#0 による Time-walk correction

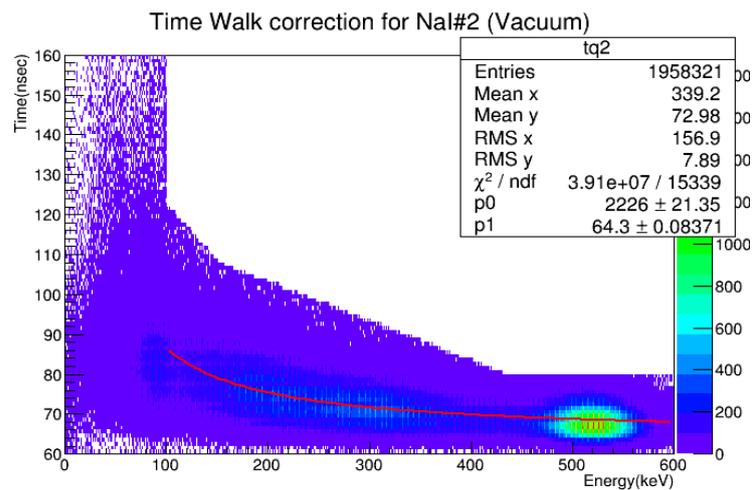


図 5.37: プラスチックシンチレーターに対する NaI(Tl)#2 による Time-walk correction

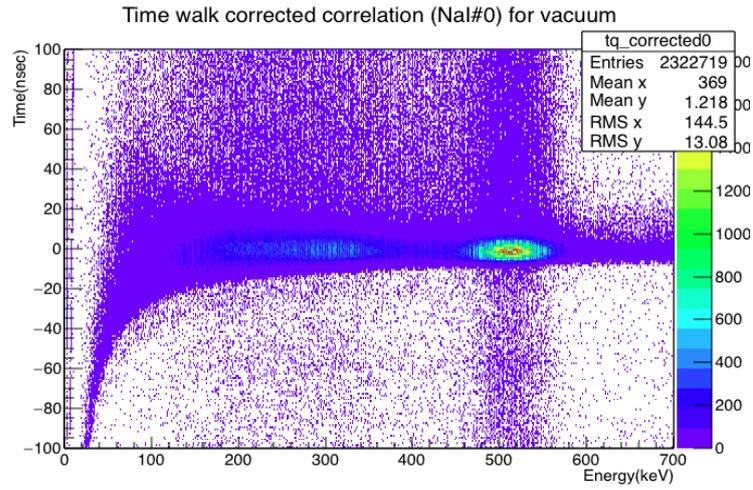


図 5.38: NaI(Tl)#0 によって Time-walk correction を行った後のプラスチックシンチレーターの時間情報

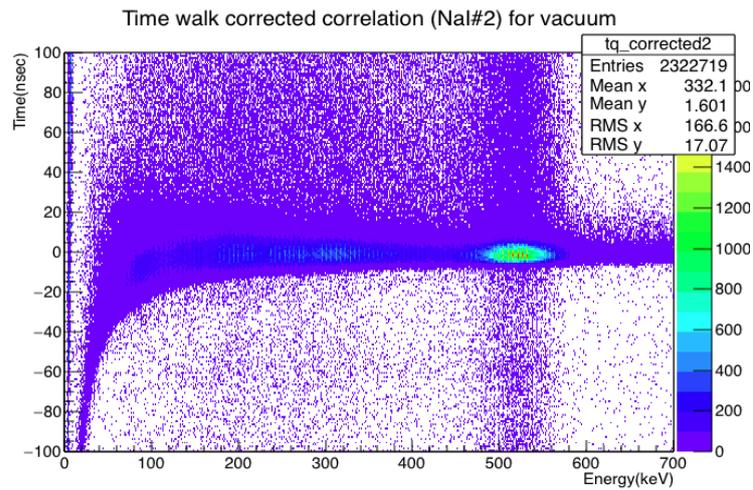


図 5.39: NaI(Tl)#2 によって Time-walk correction を行った後のプラスチックシンチレーターの時間情報

Time-walk correction により、時間情報は次のように変わる。

$$T_{tq} = T - \frac{A}{E_0} - B \quad (5.9)$$

また、それぞれの NaI による Time-walk correction の値を次の表 5.4 に載せる。

表 5.4: Time-walk correction の値

NaI(Tl) の番号	A の値	B の値
0	2961	25.5
2	2226	64.3

今回の解析では、この二つの Time-walk correction の平均をとることにする。これより、寿命測定に用いる式は次の式 5.10 ようになる。

$$T_{tq} = T - \frac{\frac{2961}{E_0^0} + \frac{2226}{E_0^2} + 89.8}{2} \quad (5.10)$$

5.5.3 真空中でのオルソポジトロニウムの寿命

オルソポジトロニウムの真空中でのオルソポジトロニウムの寿命を調べる。事象選別については、今回は NaI(Tl)#1 の情報が使えないため、節 1.1.1 で説明した事象選別で、NaI(Tl)#1 を除いたものを用いる。また、フィッティング関数としては、大気中でのオルソポジトロニウムの寿命測定時と同じ、式 5.6 を用いた。縦軸は対数スケールを用いた。プロットは次の図 5.41 となった。

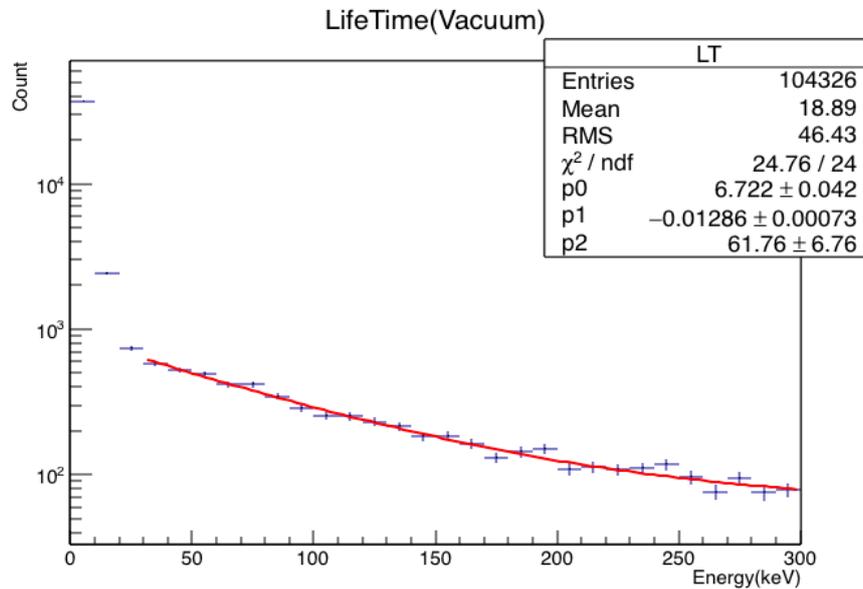


図 5.40: 真空中のオルソポジトロニウムの寿命

今回も寿命は図中の p1 の逆数の絶対値である。

$$p_1 = -0.01286 \pm 0.00073 \quad (5.11)$$

であるので、真空中でのオルソポジトロニウムの寿命は、

$$\tau_v = 78 \pm 4(ns) \quad (5.12)$$

となった。

5.6 考察

まず大気中のオルソポジトロニウムの寿命測定について考察する。今回、3つの γ 線が同時に来た事象のみを用いて寿命の測定を行ったが、テイルの部分が長くなってしまい、かつ、フィッティングエリアから大きく外れたデータも多くあった。これについては、NaI(Tl)の反応の中心からの距離が短かったため、バックグラウンドとなる事象が多く、それを削りきれなかったことが原因であると考えた。バックグラウンドの原因として、NaI(Tl)シンチレータにおける多重散乱、また、ポジトロニウムとの崩壊と対消滅が同時に起きてそれによって、対消滅の γ 線2本とポジトロニウムからの γ 線1本が同時に検出されるというものがある。これより、テイルのカウント数を減らし、バックグラウンドを減らすためには、NaI(Tl)を反応の中心から離し、これらのバックグラウンド事象を起りにくくする必要があると考えた。また、真空中での寿命の測定について、真空中のオルソポジトロニウムの寿命と、大気中のNaI#0とNaI#2の二つのコインシデンスのみを取った時の寿命のプロットを比較すると、次のようになった。

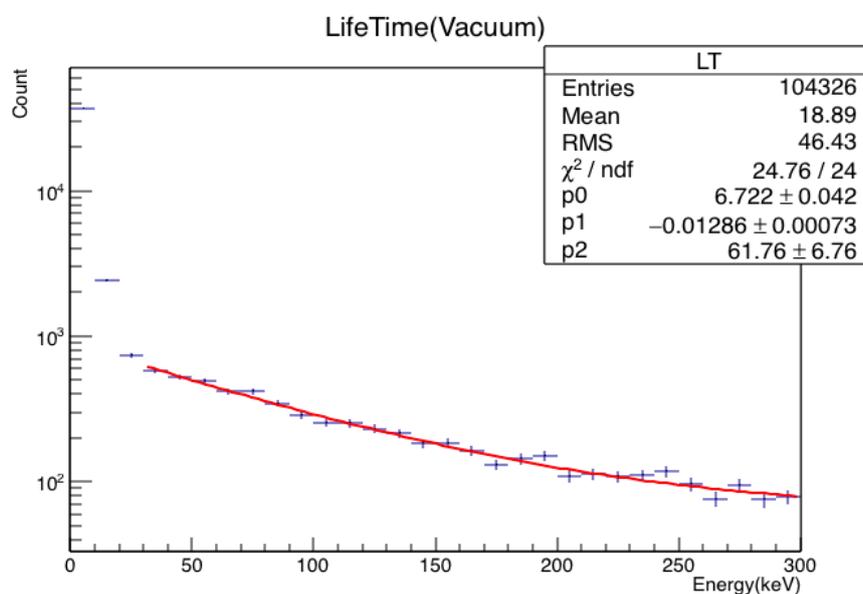


図 5.41: 真空中のオルソポジトロニウムの寿命

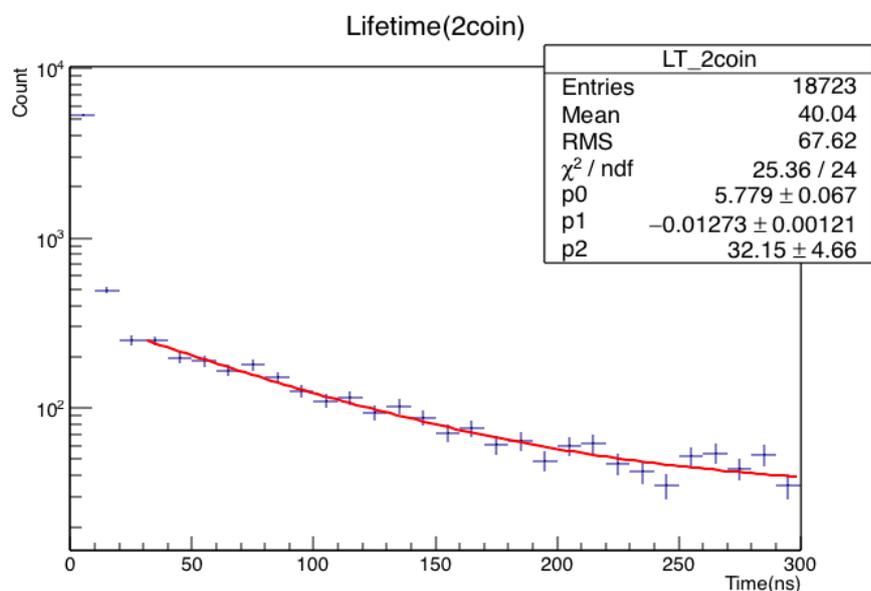


図 5.42: 大気中のオルソポジトロニウムの寿命 (2coin)

共に p1 の逆数が寿命であり、寿命は次の表 5.5 のようになった。

表 5.5: オルソポジトロニウムの真空中での寿命と大気中での寿命 (2coin) の比較

NaI の番号	キャリブレーション
真空中	78 ± 4(ns)
大気中 (2coin)	79 ± 7(ns)

このように、真空中と大気中 (2coin) でほとんど同じ寿命となってしまった。これについては、大気中でのオルソポジトロニウムの寿命測定は全ての NaI の情報を使えており、対消滅の過程を大幅に減らしているが、真空中での寿命測定の配置の場合、NaI(Tl)#1 の情報が使えないため結果的に対消滅の過程を削りきれていないのが原因であると考えた。このため、真空中のオルソポジトロニウムの寿命をより正確に測るためには、抜本的な配置の見直しが必要であると考えた。

第6章 謝辞

実験にあたり、ご指導いただいた山中卓教授、花垣和則教授、外川学助教、そして NaI(Tl) シンチレーターを貸していただいた岸本研究室の阪口篤志准教授、及び山中研究室の先輩方にはこの場でお礼申し上げます。

第7章 参考文献

宮崎康一, 山内洋子, 矢島和希, “大気中でのオルソポジトロニウムの寿命測定” (2014).

今坂俊博, 原口弘, 森哲平, “大気中でのオルソポジトロニウムの寿命測定” (2015).

濱田栄作, 陽電子寿命測定法を用いた高分子材料表面解析装置の開発研究, 博士論文, 総合研究大学院大学 (2000).

Y.Kataoka, S.Asai, T.Kobayashi, “First test of $O(\alpha^2)$ correction of the orthopositronium decay rate”, Phys. Rev. B 671(2009) 219.

David Griffiths, “Introduction to Elementary Particles (Second Revised Edition)”, WILEY-VCH.

W.R.Leo, “Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments : A How-to Approach (Second Revised Edition)”, Springer-Verlag.

Y.C.Jean, P.E.Mallon, D.M.Schrader, “Principle and Applications of Positron and Positronium Chemistry”