

o-Ps の寿命測定

京都大学理学部

石黒陽太郎 井上陽裕 梅田直弥 川井大輔 金子雅紀 平岡友基

2012/4/15

目次

第 1 章	序文	2
第 2 章	理論	2
2.1	ポジトロニウム	2
2.2	ポジトロニウムの崩壊過程	2
2.3	予想される誤差とその影響	5
2.4	寿命の測定方法	6
第 3 章	実験原理及びセットアップ	6
3.1	実験原理	6
3.2	検出器のセットアップ	6
3.3	回路図と各装置の役割	7
3.4	High Voltage の設定	8
3.5	ADC calibration	13
3.6	TDC calibration	13
第 4 章	結果と解析	16
4.1	データについて	16
4.2	シグナルの遅れによる ADC の値の減少の補正	19
4.3	t-Q 補正	23
4.4	NaI2 についての検証	28
4.5	寿命測定	31
4.6	結論	32
第 5 章	考察	36
5.1	誤差の評価	36
5.2	初期の setting で back-to-back γ -ray が観測されなかった原因	38
5.3	T_{\min} の評価	38
5.4	発表を終えて	39
	謝辞	40

第 1 章 序文

本実験では、オルソポジトロニウム (o-Ps) の寿命を測定し QED の理論値と比較することで、QED により記述されるポジトロニウム (Ps) の存在を実感し、また QED の妥当性を確かめる実験を行った。また例年とは異なった検出器の配置、回路を用いてより精度の高い測定を目指した。

第 2 章 理論

2.1 ポジトロニウム

ポジトロニウム (Ps) とは、陽電子と電子がクーロン相互作用により束縛状態を形成したものを指し、水素原子に近い構造を持つ。ただし、電子と陽電子が対消滅を起こすため準安定状態であり、しばらくすると崩壊して光子になる。Ps は一般に ^{22}Na などで放出された陽電子を SiO_2 などの絶縁体中に入射させることで、陽電子が絶縁体中の電子を奪って生成される。

水素原子同様、Ps も合成スピンの値によってパラポジトロニウム (p-Ps, スピン一重項) とオルソポジトロニウム (o-Ps, スピン三重項) の 2 種類が存在する。両者は崩壊の際に決定的な差が現れる。p-Ps と o-Ps は荷電共役変換 (C 変換) に対してそれぞれ固有値 1, -1 を持つ。光子が C 変換に対して固有値 -1 を持つので、崩壊過程が C 変換の対称性を保つことを要請すると、p-Ps は偶数個の光子に、o-Ps は奇数個の光子に崩壊することがわかる。QED の相互作用では n 個の光子を含む崩壊過程に寄与する最低次の項は n 次の項であり、高次の寄与ほど小さくなるため、p-Ps, o-Ps はそれぞれ 2 個, 3 個の光子に崩壊する。

2.2 ポジトロニウムの崩壊過程

2.2.1 p-Ps の崩壊

2.1 で述べたとおり、p-Ps は崩壊する際偶数個の光子に崩壊する。系の相互作用として QED の相互作用を考えると、QED の相互作用は小さいので最も崩壊しやすい過程は 2 光子放射型の崩壊であり、Feynmann Diagrams は図 1 のようになる。系の Lagrangian は

$$L_{QED} = \bar{\psi}(i \not{D} - m)\psi - \frac{1}{4}(F_{\mu\nu})^2 \quad (1)$$

であり、相互作用表示で量子化すると、スピノル場・ベクトル場はそれぞれ

$$\psi = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2E_{\mathbf{p}}}} \sum_s (c_{\mathbf{p}}^s u^s(p) e^{-ip \cdot x} + d_{\mathbf{p}}^{\dagger s} \bar{v}^s(p) e^{ip \cdot x}) \quad (2)$$

$$A_{\mu} = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2\omega_{\mathbf{k}}}} \sum_r (a_{\mathbf{k}}^r \epsilon_{\mu}^r(\mathbf{k}) e^{-ik \cdot x} + a_{\mathbf{k}}^{\dagger r} \epsilon_{\mu}^r(\mathbf{k}) e^{ik \cdot x}) \quad (3)$$

となる。これを用いて、2 光子放射型消滅の不変散乱振幅を書き下すと

$$M = e^2 \bar{v}_{s_2}(p_2) \not{\epsilon}_{r_2}(\mathbf{k}_2) S_F(p_1 - k_1) \not{\epsilon}_{r_1}(\mathbf{k}_1) u_{s_1}(p_1) + e^2 \bar{v}_{s_2}(p_2) \not{\epsilon}_{r_1}(\mathbf{k}_1) S_F(p_1 - k_2) \not{\epsilon}_{r_2}(\mathbf{k}_2) u_{s_1}(p_1) \quad (4)$$

となる。ここで p_1, p_2 はそれぞれ電子、陽電子の (重心系での) 運動量、 k_1, k_2 は放射光子の運動量を表す。

不変散乱振幅より、微分断面積

$$d\sigma = \frac{1}{2E_{\mathbf{p}_1} 2E_{\mathbf{p}_2} v_{rel}} \frac{d^3k_1 d^3k_2}{(2\pi)^6} \frac{1}{2\omega_{k_1} 2\omega_{k_2}} |M(e^+ e^- \rightarrow 2\gamma)|^2 (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - k_1 - k_2) \quad (5)$$

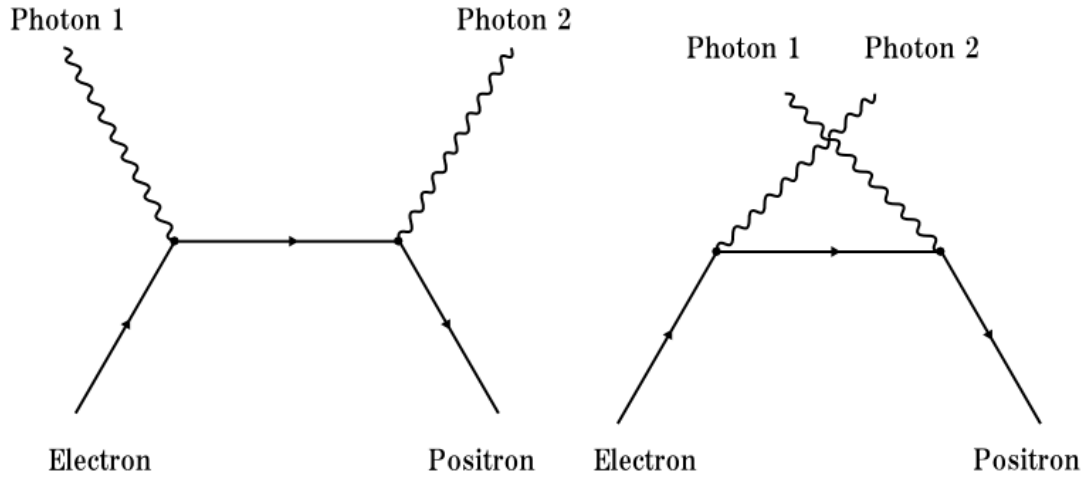


図1 2光子放射型崩壊の Feynmann Diagrams. 左右の2種類の幾何学的に異なる図が描けるため、不変散乱振幅はこの2つに対応する振幅の和になる。

を計算すると

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{CM} = \frac{\alpha^2}{4Ep} \left[\frac{E^2 + p^2 \cos^2 \theta}{m_e^2 + p^2 \sin^2 \theta} + \frac{2m^2}{m^2 + p^2 \sin^2 \theta} - \frac{2m^4}{(m^2 + p^2 \sin^2 \theta)^2} \right] \quad (6)$$

となる。

$$\Gamma = \sigma_{\text{total}} v_{\text{rel}} \rho \quad (7)$$

だが電子密度 ρ の媒質中での2光子放射型消滅の部分崩壊幅を表し、 $p \rightarrow 0$ の極限において光子の不可弁別性に注意しながら断面積の積分を行うと

$$\Gamma = \frac{\pi\alpha^2}{m_e^2} \rho \quad (8)$$

となる。電子密度 ρ は、陽電子の静止系における Ps の基底状態の波動関数 $\psi_{1s}(\mathbf{r})$ を用いて

$$\rho = |\psi_{1s}(\mathbf{r} = \mathbf{0})|^2 \quad (9)$$

とする。ここで、Ps の Bohr 半径は $r_0 = \frac{1}{\alpha\mu} = \frac{2}{\alpha m_e}$ であることを考えると、水素原子と同様にして

$$\rho = \frac{(\alpha m_e)^3}{8\pi} \quad (10)$$

と表せる。o-Ps が上の Γ に寄与しないこと、スピんで平均をとっているため p-Ps の寄与が $\frac{1}{4}$ になっていることを考慮すると、p-Ps の平均寿命

$$\tau_{\text{para}} = \frac{1}{4\Gamma} = \frac{2}{\alpha^5 m_e} \simeq 1.25 \times 10^{-10} \text{sec} \quad (11)$$

を得る。

2.2.2 o-Ps の崩壊

o-Ps の場合は C 変換の対称性などの帰結で 2 光子放射型の消滅は禁じられ、3 光子放射型が摂動において最低次の寄与を持つ。したがって、o-Ps の寿命は p-Ps に比べて $\frac{1}{\alpha}$ 程度長くなることが推測できる。3 光子放射型の崩壊の Feynmann Diagrams は図 2 のようになるが、この崩壊過程の不変散乱振幅は複雑である (6 つの項をもつ)。文献 [1] によると、o-Ps の寿命は

$$\tau_{\text{ortho}} = \frac{9\pi}{4(\pi^2 - 9)\alpha} \tau_{\text{para}} \simeq 1.39 \times 10^{-7} \text{sec} \quad (12)$$

である。

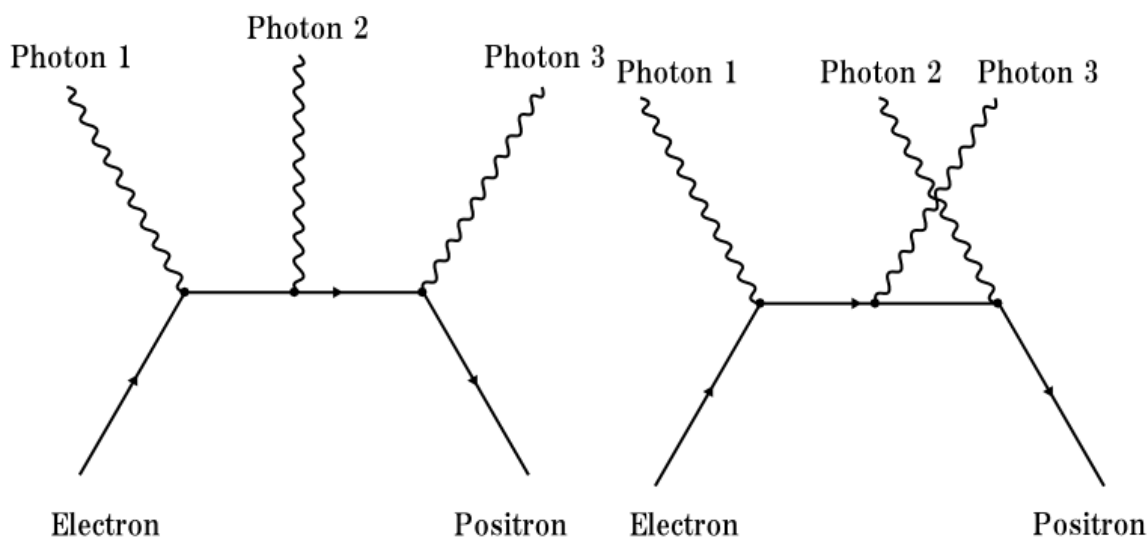


図 2 3 光子放射型崩壊の Feynmann Diagrams. 上の 2 つ以外にも幾何学的に異なる図が描けるため、不変散乱振幅はこの 2 次の場合よりも複雑になる。

2.2.3 Ps の寿命

2.2.1, 2.2.2 での計算結果より、o-Ps, p-Ps の寿命はそれぞれ 125 ps, 139 ns であった。

o-Ps の寿命を測定するにあたっては、p-Ps の寿命は o-Ps のそれと比べて非常に短いため、p-Ps 生成と同時に崩壊しているように見える。したがって、Ps が生成されたあと、p-Ps はすぐに崩壊して 2 本の γ 線を放出し、残った o-Ps が一定の崩壊幅で確率的に崩壊していくことが推測できる。

しかし、o-Ps は寿命が長いので、崩壊するまでに試料中の電子や不純物などと相互作用を起こすことができ、それによって実際に測定される寿命は大きく影響を受ける。予想される相互作用については 2.3 で述べる。

2.3 予想される誤差とその影響

2.3.1 pick-off 反応

Ps が他の原子と衝突した際に、衝突相手の原子が持つ電子と Ps 中の陽電子が対消滅を起こしてしまうことがある。この反応を pick-off 反応と呼び、この反応により Ps の寿命は短くなることが予想される。また、pick-off 反応は衝突相手の電子のスピン状態に関係なく生じるので、これによって放出される γ 線は 2 本または 3 本である。pick-off 反応は試料中の物質との衝突により生じるため、試料中の不純物 (水・空気など) を取り除くことである程度減らすことが可能である。

2.3.2 スピン交換反応

Ps が他の原子と衝突した際に、pick-off 反応以外の反応として、Ps と他の原子の間でスピンを入れ替えることがある。この反応によって o-Ps は p-Ps になり、Ps の寿命は短くなることが予想される。p-Ps は寿命が短く pick-off 反応やスピン交換反応が生じる前に崩壊してしまうので、スピン交換反応で o-Ps が生成されることはほとんどないと考えられる。したがってスピン交換反応による影響はすべて p-Ps の崩壊、すなわち 2 本の γ 線の放出という形で現れる。

2.3.3 Compton 散乱

Ps の崩壊によって放出された γ 線も、試料やシンチレータなどの物質を透過する際に Compton 散乱によりエネルギーが減衰する場合がある。 γ 線が発生してから検出されるまでの時間は γ 線のエネルギーによらず一定とみなせるので、Compton 散乱による影響は γ 線のエネルギーにのみ依存すると考えられる。散乱 γ 線の角度分布は微分散乱断面積に対するクライン・仁科の式

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = r_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \left[\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right] \left[1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos^2\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right] \quad (13)$$

で与えられ、入射 γ 線のエネルギーが大きいほど前方散乱が大きくなる傾向にあるが、本実験で測定するエネルギー域では分布はエネルギーに依存しないとしてよい。

2.3.4 観測可能な崩壊幅と寿命

前述の効果により、本実験で観測される寿命 τ_{total} は純粋な o-Ps の寿命 $\tau_{3\gamma}$ よりも短くなると考えられる。測定を始めた時刻の o-Ps 数を N_0 とすると、純粋な o-Ps の時刻 t における個数 $N_{3\gamma}$ と観測される個数 N_{total} は以下ようになる。

$$N_{3\gamma} = N_0 \exp(-t/\tau_{3\gamma}) \quad (14)$$

$$N_{\text{total}} = N_0 \exp(-t/\tau_{\text{total}}) \quad (15)$$

また、純粋な o-Ps の崩壊幅を $\Gamma_{3\gamma}$ 、前述の pick-off などによる崩壊幅を Γ_{pick} とおくと

$$\tau_{3\gamma} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma}} \quad (16)$$

$$\tau_{\text{total}} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{\text{pick}}} \quad (17)$$

が成り立つ。式 (16), (17) から $\tau_{3\gamma}$ と τ_{total} には以下の関係が成り立つ。

$$\tau_{3\gamma} = \frac{\tau_{\text{total}}}{1 - \frac{\Gamma_{\text{pick}}}{\Gamma_{3\gamma}}} \quad (18)$$

2.3.5 t-Q 補正

上に挙げた 3 つとは少し性質が異なるが、本実験では t-Q 補正というものが become 必要になる。 γ 線を検出する際にシンチレータと光電子増倍管を用いて検出するため、直接観測するデータは光電子増倍管によって増幅された電流である。したがって、 γ 線の通過を記録するためにはバックグラウンドから一定の値に threshold を設定する必要があるが、立ち上がり (γ 線の通過したタイミング) から threshold を超えるまでに時間差があるため、それによる補正を考慮する必要がある。この時間差は γ 線のエネルギーによって異なり、低エネルギーの γ 線ほど大きな補正が必要になる。この補正を t-Q 補正と呼び、補正を考慮しなければ時間差の影響で Ps の寿命は長く測定されると考えられる。 t-Q 補正は γ 線の信号の時間分布をある関数で近似することで行うことができる。

2.4 寿命の測定方法

2.3 で述べた反応は本実験においては望ましくない反応であるため、出来る限り測定中にそういった反応が起きないようにする。具体的には、Ps を生成する試料 (SiO_2) に含まれる不純物 (水・空気) を出来るだけ取り除けばよい。試料中の Ps の崩壊による γ 線は p-Ps の 511keV の γ 線と o-Ps の 0~511keV に分布する γ 線があるが、エネルギーを同時に測定することで p-Ps に起因する γ 線は棄却する。残った 511 keV 以下のデータについて、Ps 生成から経過した時間と測定された γ 線の数 (対数) の関係を見ると直線になっていることが期待されるが、その傾きが o-Ps の寿命である。

第 3 章 実験原理及びセットアップ

3.1 実験原理

実験では、放射線源 (^{22}Na) の β^+ 崩壊によって出てきた陽電子がシリカパウダー (主成分: SiO_2) 内で崩壊し Ps を生成し、崩壊するまでの過程を観測した。

その Ps が生成する時刻を知るために β^+ 崩壊で出る β 線をプラスチックシンチレータで検出し、Ps が崩壊した時刻を知るために Ps の崩壊で出る γ 線を NaI シンチレータで検出し、この検出時間の差から Ps の寿命を求めるといった方法をとった。ここで NaI シンチレータを用いたのは、光の収率が高く、光出力と直線性の点で優れている点からであり、プラスチックシンチレータを用いたのは、時間応答がよいためである (2ns 程度)。

3.2 検出器のセットアップ

本実験では図 3 のようにシリカパウダーの入った容器を xyz 座標系の中心として三つの NaI シンチレータ NaI1-3 をそれぞれ $(x,y,z)=(-10,0,0)$, $(0,10,0)$, $(10,0,0)$ の位置 (単位は cm) に配置し、プラスチックシンチ

レータ、線源 (^{22}Na) を z 軸負の方向に配置し、これらは陽電子の空気との接触をできるだけなくすためできるだけシリカパウダーの入った容器に近付けた。

このような NaI を三つ用いるセットアップを組むことのメリットとして、NaI1 と NaI3 に同時に γ 線が入った時は 2γ 、NaI1 と NaI2 もしくは NaI2 と NaI3 に同時に γ 線が入った時は 3γ というように、p-Ps と o-Ps をより明確に区別することができるかと期待できたからである。

ここで気を付けたのは以下の二つである。

- ・線源 (^{22}Na) から出る γ 線が直接 NaI に入ってしまうように、十分鉛で遮蔽すること (図 4)。
- ・ 2γ が NaI1, NaI3 以外で観測されないようにそれぞれ距離を離すこと (例えば NaI1, NaI2 が近いと、 x 軸 y 軸に対して斜めに出た 2γ を NaI1, NaI2 が観測してしまう) (図 5)。ただし離しすぎるとカウント数が減るなどのデメリットが生じるため、先に述べたように中心から 10 cm とした。

シリカパウダーは円筒状の容器に入れ、実験前にはオーブントースターで十分に水分を飛ばし、更に容器は常に真空に保った。これは pick-off 消滅、スピン交換反応、など o-Ps の寿命が縮む要因をできるだけ排除するためである。

以上を考慮して実験装置をセットした (図 6)。図 7 の真上からの写真で分かるようにに遮蔽鉛と線源に関して各 NaI に出来るだけ対称性を持たせた。またプラスチックシンチレータの性質上、装置全体に暗幕をかけて余計な光が入らないようにした。

3.3 回路図と各装置の役割

実験の回路図は図 8 のようになった。

ここで各装置の役割を説明する。

- ・DIVIDER・・・入力信号を二つに分配する。
- ・AMP・・・入力信号を増幅する。
- ・DISCRIMINATOR・・・アナログ入力パルスの先端部の波高が設定した閾値 (THR) を超えたときのみ標準ロジックパルスに変換して出力する。本実験では NaI の THR を 30 mV、プラスチックシンチレータの THR を 10 mV に設定した。
- ・COINCIDENCE・・・入力端子の一つにパルスが到達してから一定時間内に他の選択した端子すべてにパルスが現れた場合に、ロジックパルスを出力する。本実験ではプラスチックシンチレータと三つの NaI シンチレータのうち二つの組み合わせ三通りの Coincidence を取り、この信号が来たときに Gate を開く設定にした。
- ・GATE GENERATOR・・・ロジックパルスの入力があった時に、ゲートパルスを出力する。本実験では 800 ns に設定した。
- ・DUAL FAN IN OUT (OR 回路)・・・二つ以上の入力端子の少なくとも一つにロジックパルスの入力があった時に、ロジックパルスを出力する。
- ・ADC・・・ゲートパルスの入力がありゲートが開いている場合のみ、他の端子からのパルスの入力を受け入れ、その波高の積分値に線形に関係した数値 (デジタルコード) を出力する。ADC のキャリブレーションによってこの ADC 値と γ 線のエネルギーとの関係を求めることで、測定の結果得られた ADC 値からそのエネルギーを知ることができる。

・TDC・・・START にパルスが入力してから他の STOP の端子にパルスの入力があるまでの時間に線形に
関係した数値（デジタルコード）を出力する。本実験では Ps の崩壊時間の測定に使った。

ただし、Delay はケーブルによるディレイ、Fixed Delay などを用いて、各装置による信号の遅延ごとにオシ
ロスコープで見ながらその遅らせる量を決めた。

また前年までの実験では Gate を開くために Gate Generator を用いていたが、本実験では、Gate Generator
をはさまず Amp のシグナルで開いた。これは NIM シグナルの発せられる時間を正確にするためである。

3.4 High Voltage の設定

3 本の NaI シンチレータ 1-3 にかける HV (High Voltage) の設定を行った。NaI1-3 を ADC2-4 につなぎ、
 ^{22}Na からの放射線のエネルギーを ADC で測定し、その際の pedestal と 511 keV ピークの ADC カウントの
差が等しくなるように HV の値を定めた。基準として、NaI3 にかける HV を 1280 V に設定して行った。その
結果は表 1 のとおり。

表 1 HV の設定. 設定した HV と、その際の pedestal, 511 keV ピークの ADC カウントとその差.

	HV [V]	pedestal	511 keV	差
NaI1 (ADC2)	1155	127	1346	1219
NaI2 (ADC3)	1185	106	1314	1208
NaI3 (ADC4)	1280	106	1318	1212

以下、本実験を通して NaI1-3 にこの HV をかけて実験を行った。

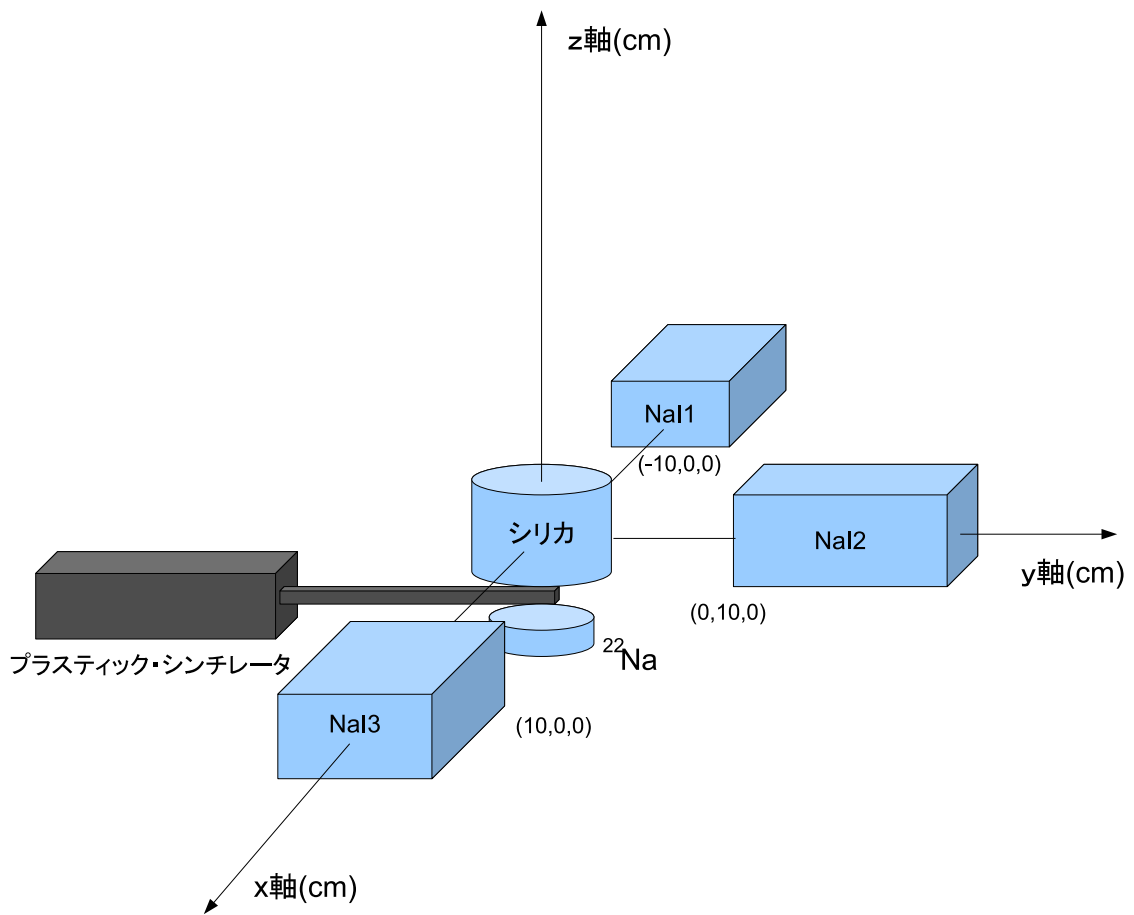


図3 実験装置図

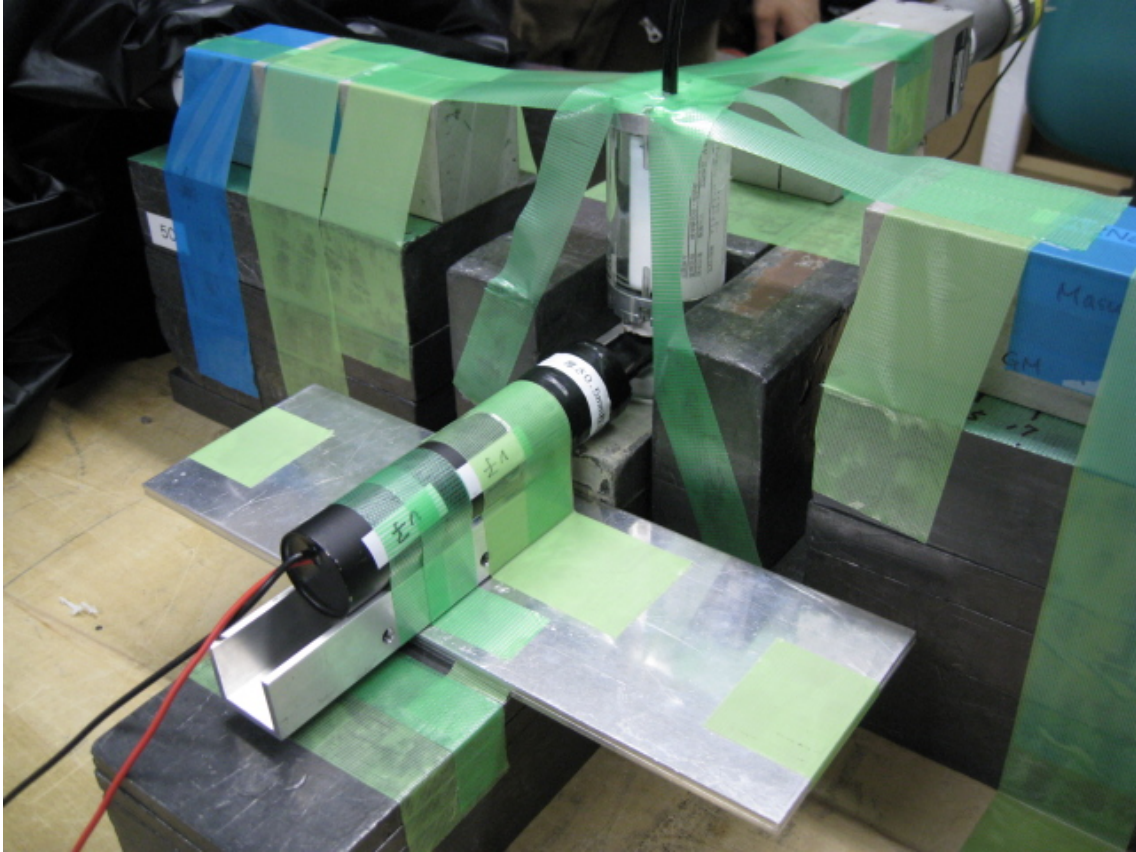


図4 実験装置の写真

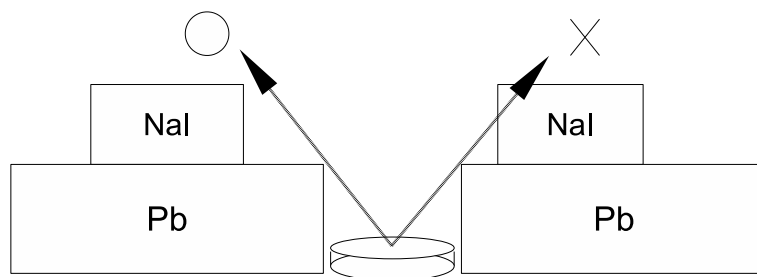


図5 ^{22}Na から直接の γ 線の鉛による遮蔽

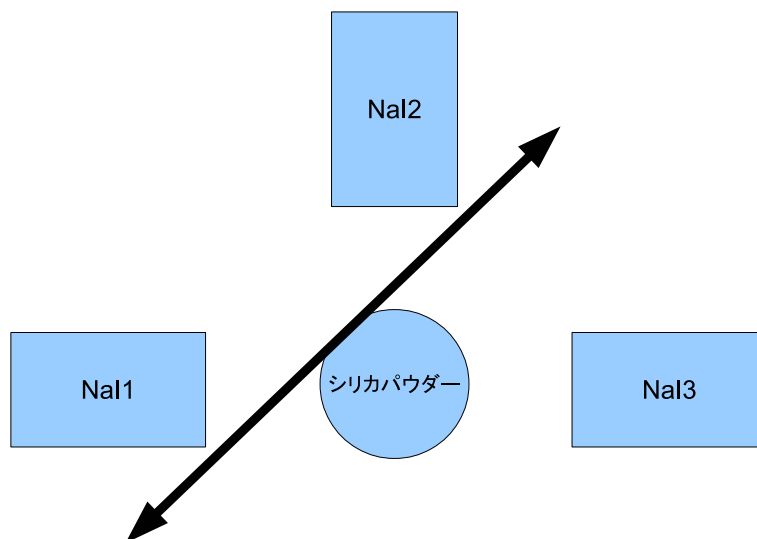


図6 2 γ 関連の NaI の位置決定

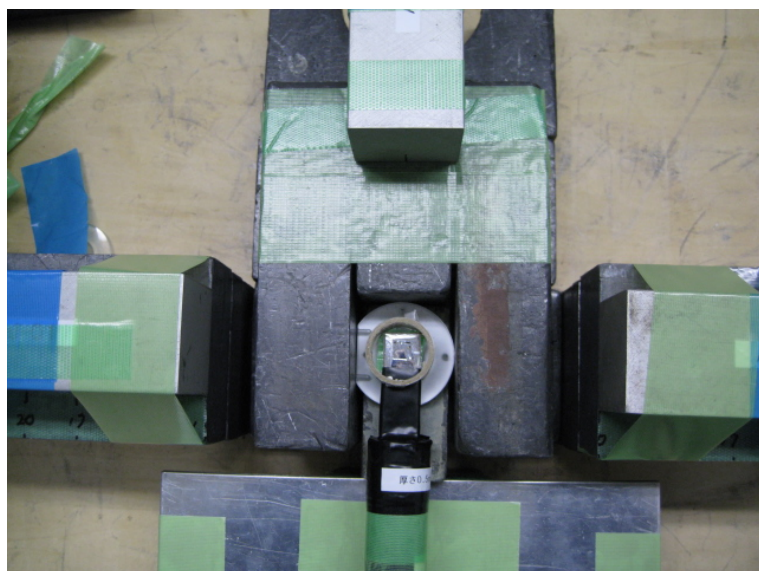


図7 実験装置上面

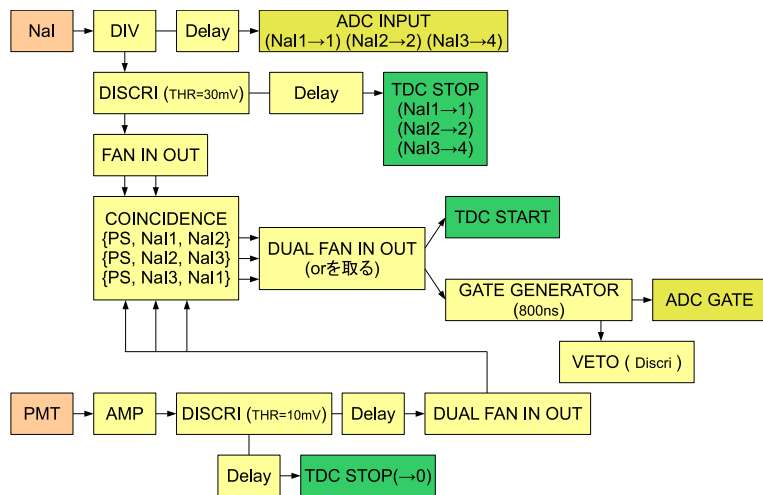


图 8 回路图

3.5 ADC calibration

観測するエネルギーの値と ADC カウントの対応を調べる ADC calibration を行った。これには本実験のデータでの pedestal の値, NaI の 511 keV, 1275 keV のピークを Gaussian で fitting した平均値の 3 点を用いた。その結果は図 9 のようになり, これを次式で fitting した。

$$\text{Energy[keV]} = a \times \text{ADC[counts]} + b \quad (19)$$

その結果が表 2 である。

表 2 ADC calibration の結果

	a	b
ADC2 (NaI1)	0.5120 ± 0.0083	-115 ± 14
ADC3 (NaI2)	0.510 ± 0.015	-84 ± 25
ADC4 (NaI3)	0.522 ± 0.010	-99 ± 17

3.6 TDC calibration

以下の方法で, 観測する時間差と TDC の値の対応を調べた。図 11 の回路を作り, NaI シンチレータから Discriminator で分けた信号の一方を TDC START に入れ, もう一方は Delay をかけて 118 ns, 235 ns, 350 ns, 586 ns, 700 ns の遅れで TDC2-4 に入れ, TDC カウントを測定した。この時の STOP 信号の遅れはオシロスコープを用いて正確な値を確認している。その結果, 各 NaI シンチレータ 1-3 につないだ TDC2-4 について時間差と TDC カウントの対応が得られ, 例えば TDC2 (NaI1) では図 10 のようになった。これを 1 次関数

$$\text{Time[ns]} = c \times \text{TDC[counts]} + d \quad (20)$$

で fitting した。また, プラスチックシンチレータ (PS) をつなぐ TDC1 についても同様に calibration を行ったが, プラスチックシンチレータは γ 線に反応しないため, NaI を TDC1 につないで calibration を行った。その結果が表 3 である。

表 3 TDC calibration の結果

	c	d
TDC1 (PS)	0.24813 ± 0.00037	$-13.50 \pm 0, 70$
TDC2 (NaI1)	0.24864 ± 0.00069	-13.0 ± 1.3
TDC3 (NaI2)	0.25028 ± 0.00069	-14.2 ± 1.3
TDC4 (NaI3)	0.24859 ± 0.00070	-14.1 ± 1.3

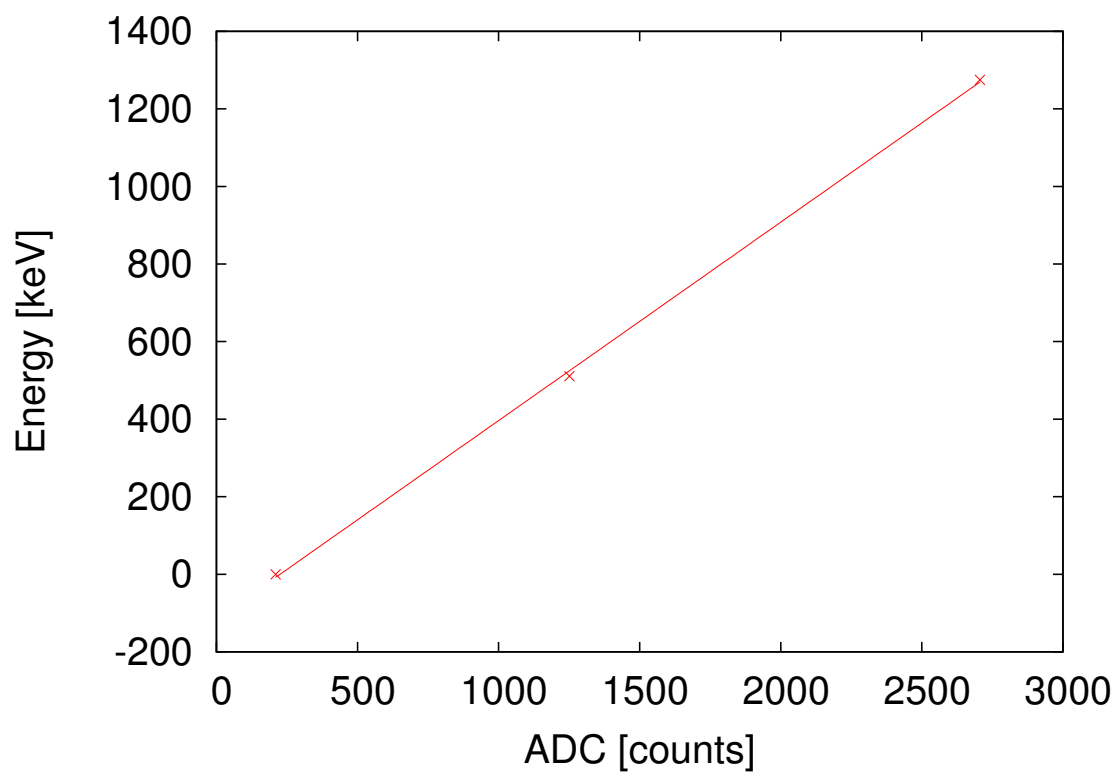


図9 ADC2 (NaI1) での Energy-ADC の対応のグラフ

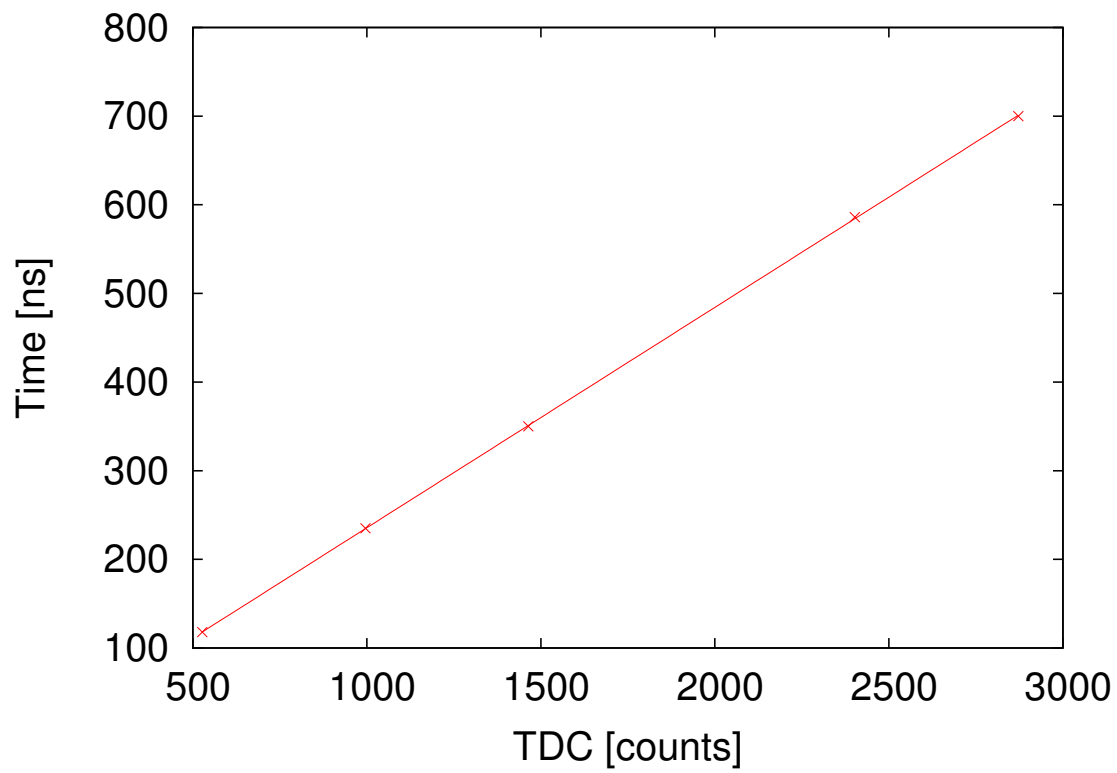


図 10 TDC2 (NaI1) での Time-TDC の対応のグラフ

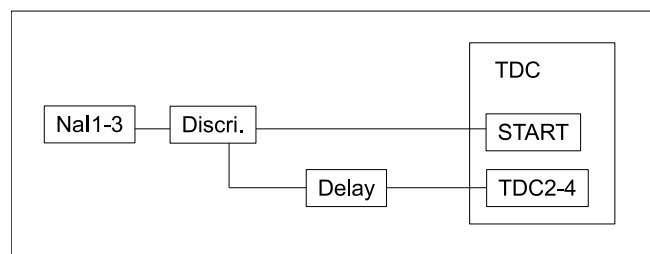


図 11 TDC calibration に用いた回路の図

第 4 章 結果と解析

4.1 データについて

セットアップの章で示したトリガー回路でデータを取ったため、今回取ったデータではどの NaI の Coincidence でトリガーが引かれたかによって o-Ps の崩壊か p-Ps の崩壊かをおおよそ判定できると考えられる。NaI1-NaI3 はシリカパウダーに向き合うようにして置かれていることから back-to-back の γ 線を捉える。このことから、NaI1-NaI3 は主に p-Ps の崩壊を捉えらる。同様に考えて、それぞれシリカから見て直角に配置されていることから NaI1-NaI2, NaI2-NaI3 は o-Ps の崩壊を主に捉えらる。各 NaI の組み合わせによってトリガーの引かれたデータの個数は表 4 に示す。

表 4 各トリガーによるデータの個数.

NaI1	NaI2	NaI3	Total
339301	18715	333947	349115

このトリガーの引かれ方から、今回我々が実験に用いたセットアップでは主に p-Ps の崩壊を捉えているということが予想される。これは我々が設定した Gate を開くタイミングが p-Ps の崩壊も捉えるように設定してあることから妥当だと考えられる。また (Energy)vs.(Time) のヒストグラムをとると、それぞれの NaI で取ったデータはそれぞれ図 12-図 14 のようになる。170 ns あたりに伸びているテールは p-Ps の崩壊による 511 keV γ と ^{22}Na が崩壊するときに出る 1275 keV γ が Compton 散乱などにより減衰したことによるものであると考えられる。したがってこの時刻がこのデータにおける崩壊時刻にあたり、各時刻とエネルギーの領域に入る現象としては図 15 のような分布になると考えられる。

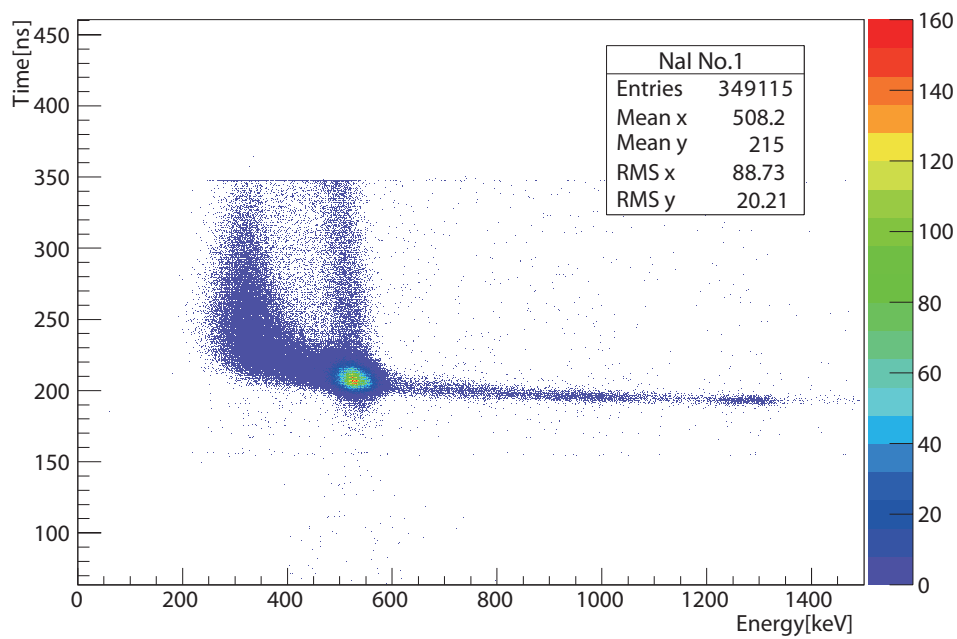


図 12 NaI1 のヒストグラム

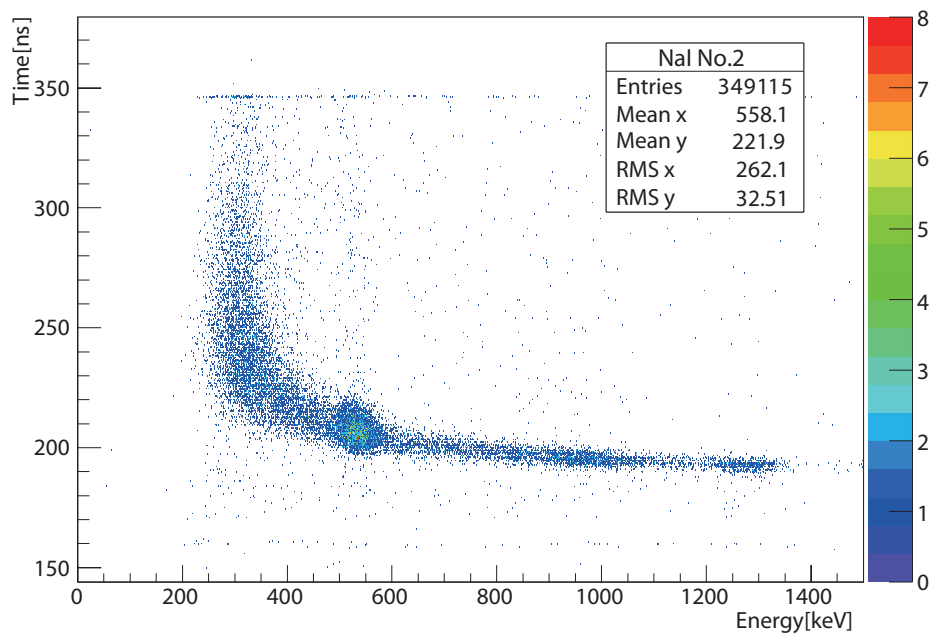


図 13 NaI2 のヒストグラム

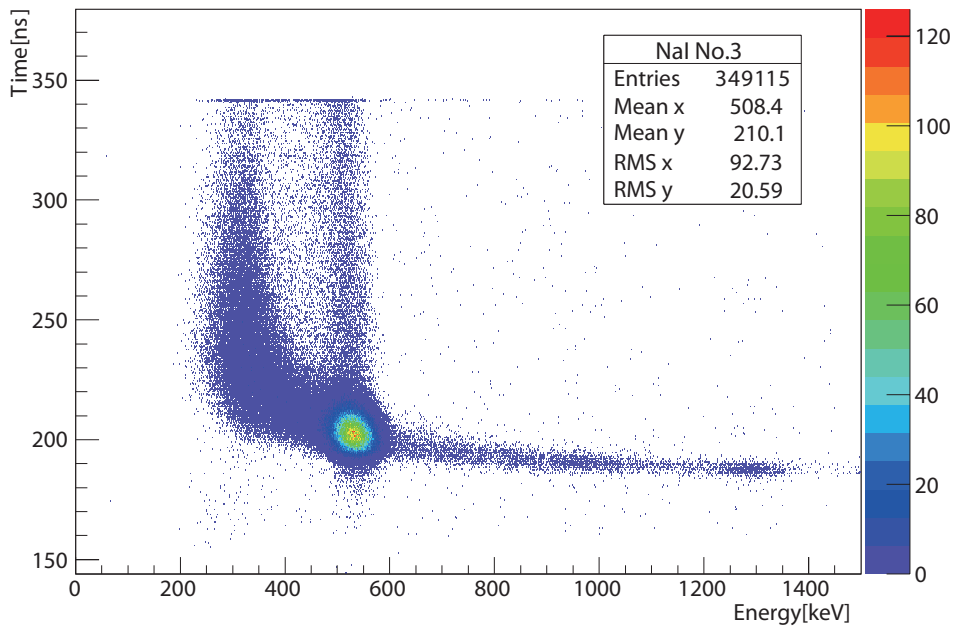


図 14 NaI3 のヒストグラム

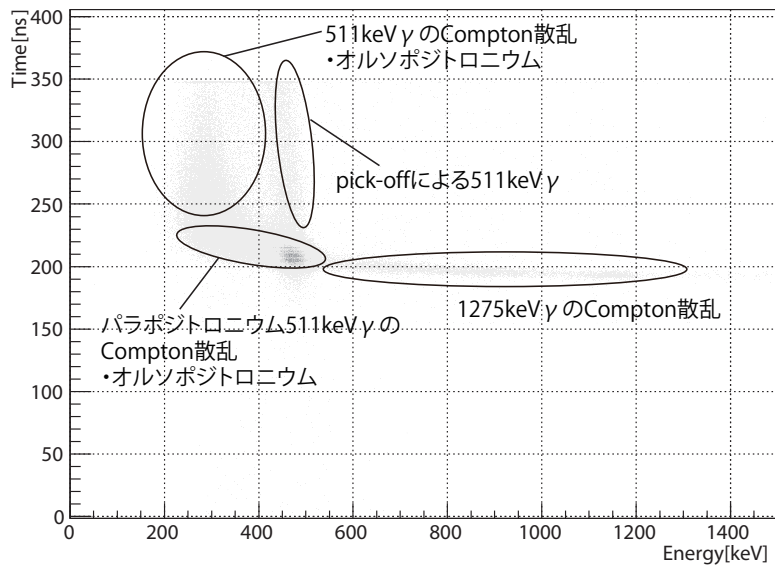


図 15 ヒストグラムの各領域における成分分布

4.2 シグナルの遅れによる ADC の値の減少の補正

ADC の Gate のシグナルから遅れて到達するシグナルは図 16 のようにシグナルのテールが Gate からみ出してしまうことにより、ADC の値が本来の値よりも小さくなってしまふ。そのため、このままではこの後の解析に支障をきたすのでエネルギーを補正する。

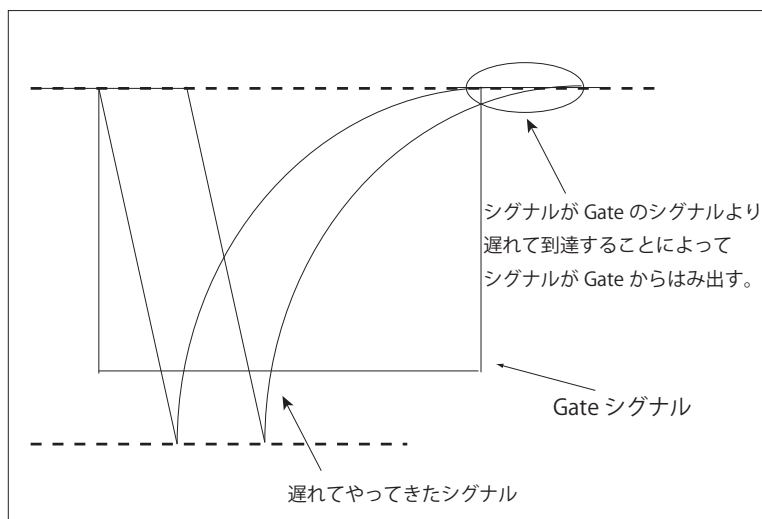


図 16 ADC 減衰のイメージ図

ただし、十分 α -Ps のシグナルも入るように Gate Generator のシグナルの長さを調整してあるので補正幅は十分に小さいと考えられる。このことを踏まえてこの減少分を以下のような方法で補正した。

4.2.1 補正の理論

図 12-図 14 から $\text{Energy} \approx 511 \text{ keV}$ のあたりからイベントの密度が高くなっていることが分かるが、これは p -Ps の崩壊と pick-off 由来の p -Ps が幅広い時間で生じること起因している。このことから、このエネルギー領域で見られるイベントのエネルギーは 511 keV に近い値を取りその密度境界はどの時間領域でも同じエネルギーを持つべきと考えられる。しかし、実際には急な右肩下がりの曲線にのっていることが分かる。このため、このイベントの密度境界線が減衰曲線を表していると考えられる。ここで補正すべき減衰は大きくないと考えるので、補正を一次関数 (式 (21)) で行った。

$$\Delta\text{Energy}[\text{keV}] = -a \times \text{Time}[\text{ns}] + b[\text{keV}] \quad (21)$$

4.2.2 補正の方法

以下の方法で補正を行った。

1. 図 12 などから $450 \text{ keV} \leq \text{Energy} \leq 550 \text{ keV}$ かつ $\text{Time} \geq 240 \text{ ns}$ の領域を取り出す。
2. この領域の各時間毎の平均値を計算し、一次元ヒストグラムにする。

3. これを式 (21) で fit する. 各 NaI におけるその結果を図 17-図 19 に示し, この補正で得られた定数を表 5 に示す.
4. 上の過程で傾きが分かったので, その傾きを用いた以下の一次関数 (式 (22)) で補正を行った.

$$\Delta\text{Energy}[\text{keV}] = a \times (\text{Time}[\text{ns}] - 200[\text{ns}]) \quad (22)$$

この 200 ns は図 12 などから分かるように, ^{22}Na の崩壊が起こった時刻がおおよそ 200 ns であることを用いた. 補正後のヒストグラムを図 20-図 22 に示す.

表 5 補正関数の係数

	a	b
NaI1	0.152 ± 0.011	549.5 ± 3.3
NaI2	0.1365 ± 0.0085	549.4 ± 2.5
NaI2	0.1066 ± 0.0086	547.6 ± 2.5

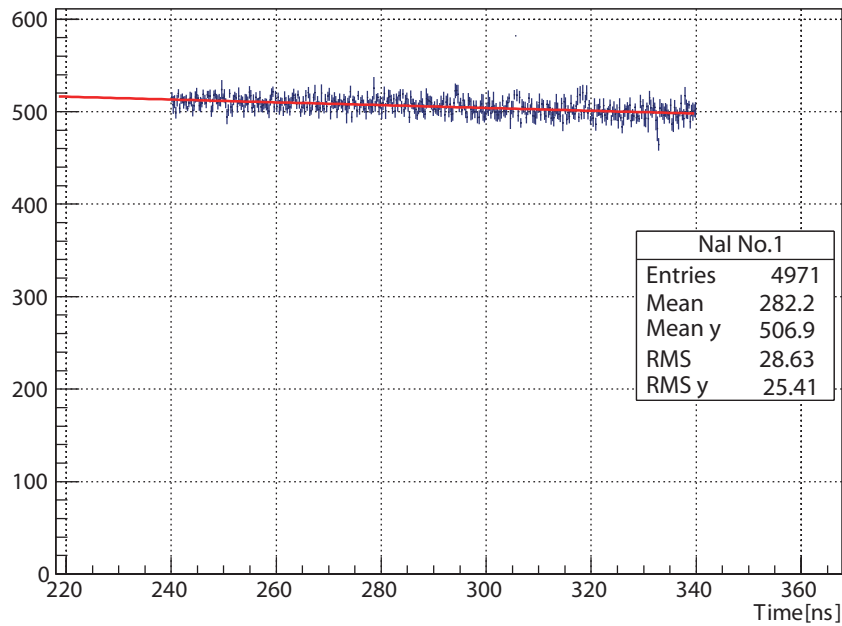


図 17 NaI1 における減衰曲線の 1 次元ヒストグラム

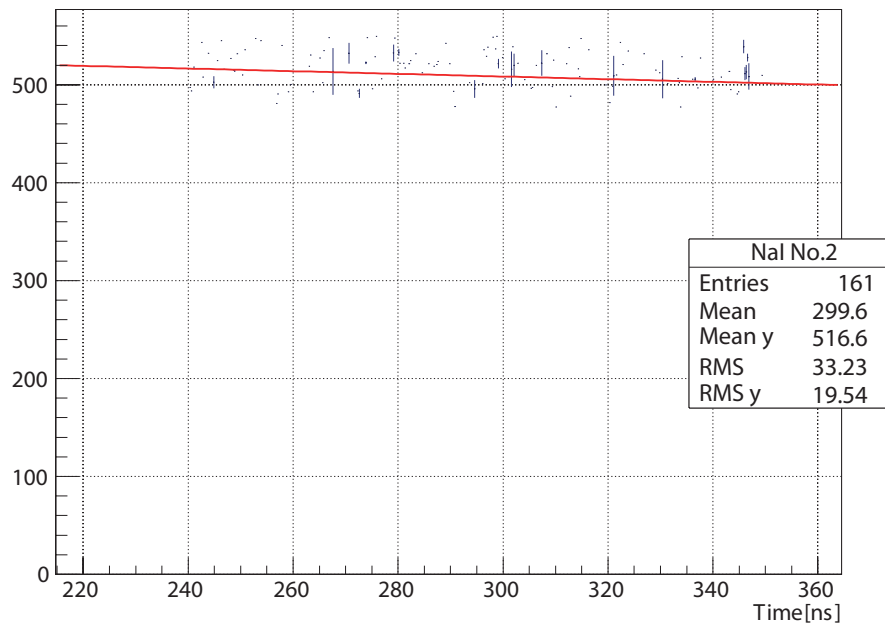


図 18 NaI2 における減衰曲線の 1 次元ヒストグラム

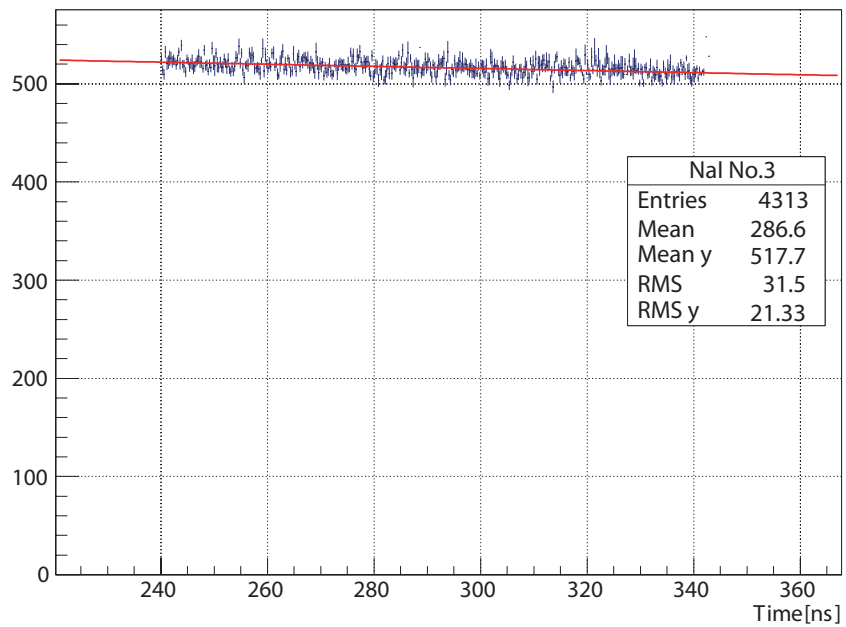


図 19 NaI3 における減衰曲線の 1 次元ヒストグラム

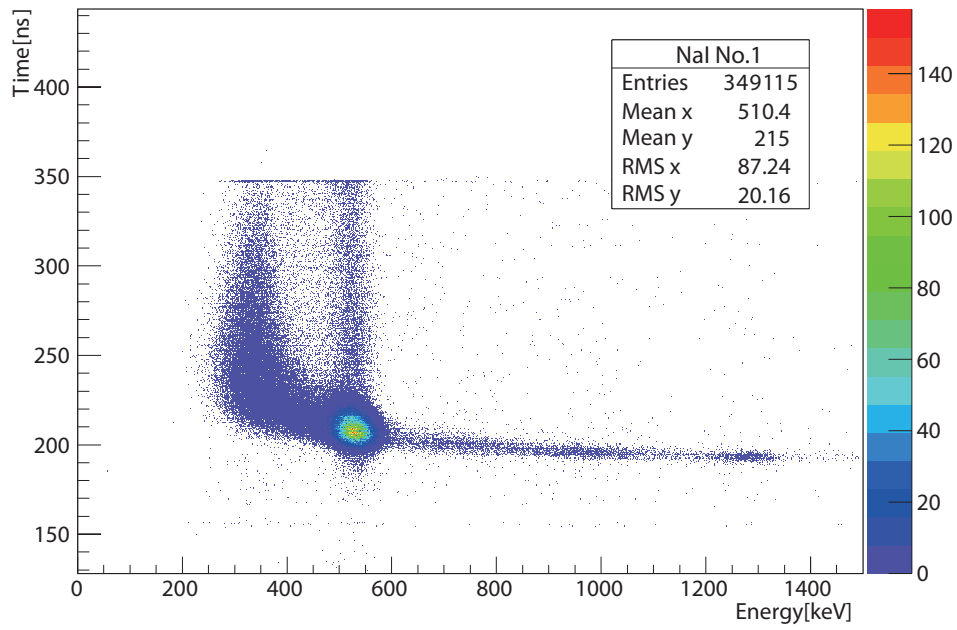


図 20 NaI1 の補正後のヒストグラム

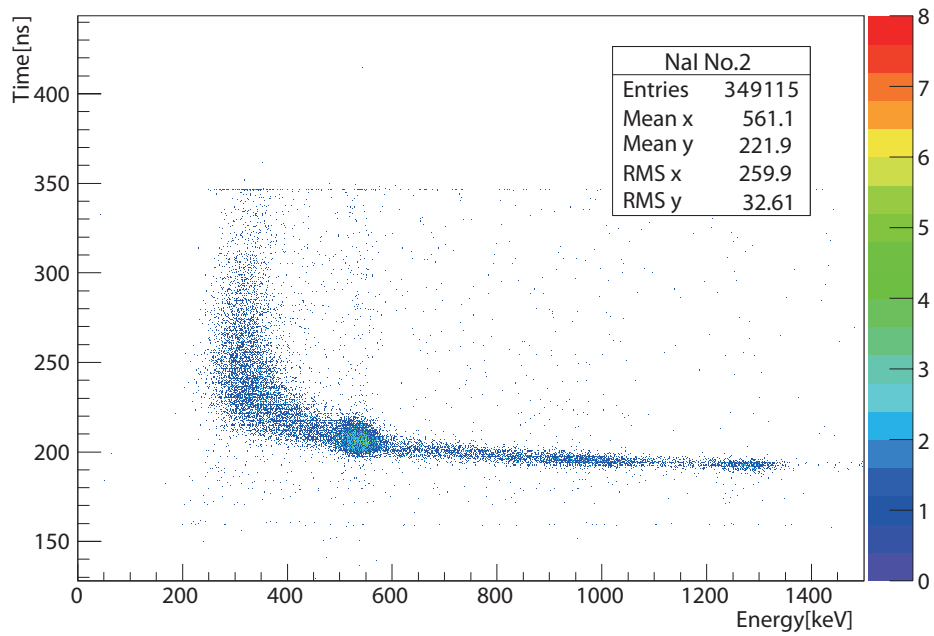


図 21 NaI2 の補正後のヒストグラム

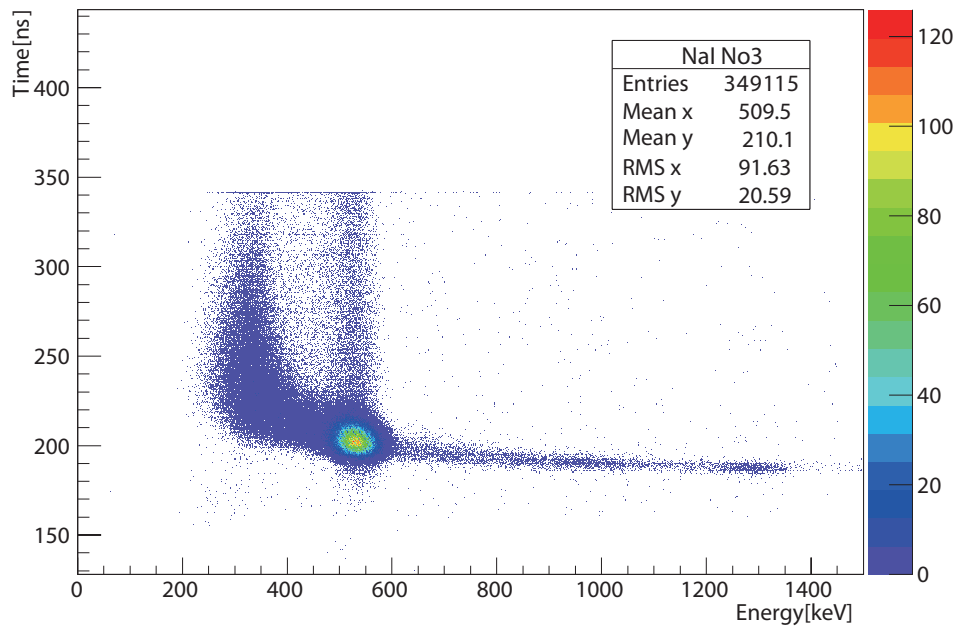


図 22 NaI3 の補正後のヒストグラム

4.3 t-Q 補正

理論でふれたように、この実験ではバックグラウンドを取り除くために threshold が設定されている。そのため、立ち上がりから threshold を越えるまでにかかる時間だけ TDC に記録される時間が遅くなってしまうのでそれ以下の要領で補正する。

4.3.1 補正の理論

回路を流れるシグナルが Discriminator に届いたとき、図 23 のようにエネルギーの小さいシグナルは大きなエネルギーに対応するシグナルに比べて NIM シグナルが出力されるまでの時間差がある。立ち上がりのシグナルを三角形で近似すると、ADC は Gate が開いている間のシグナルの面積の値であることから以下の関数 (式 (23)) で fitting して実際のシグナルの出始めからのずれを補正できる。

$$\Delta T = \frac{a}{\sqrt{E+b}} + c \quad (23)$$

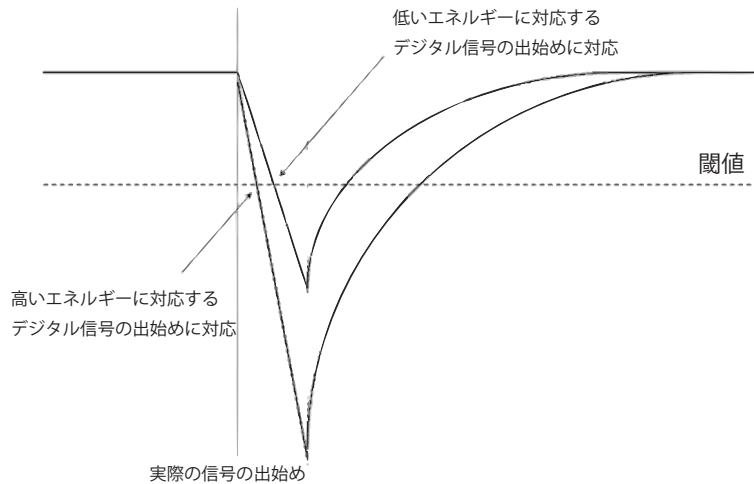


図 23 エネルギーの差による立ち上がりの違い

4.3.2 補正の方法

図 12-図 14 の $T=200$ ns のあたりに 511 keV のイベントが多くあり、1275 keV γ のテールも伸びていることからこの時刻が ^{22}Na の崩壊が起こった時刻であり、この領域に多く存在するイベントは p-Ps の崩壊を捉えていると考えられることが分かる。したがって、この時間領域で 1275 keV γ と 511 keV γ ののテールを式 (23) で fitting すれば補正関数を求められる。また、NaI の配置から p-Ps を判別できることを用いて pick-off 効果などによるイベントを除いた。

補正は以下の方法で行った。

- NaI1
 1. $190 \text{ ns} \leq \text{Time} \leq 210 \text{ ns}$ かつ NaI3 の Energy $\geq 500 \text{ keV}$ のイベントを取り出す。これによって、考えているイベントは 511 keV γ か 1275 keV γ と Coincidence を取ったものに限られる。
 2. 上の過程で得られたヒストグラムを各時間毎に平均値をとり 1 次元ヒストグラムにする。
 3. この 1 次元ヒストグラムを式 (23) で fitting する。fitting に用いたヒストグラムを図 24-図 26 に示す。
- NaI2

NaI2 は配置上 back to back の p-Ps が入ってこないので、1275 keV γ との Coincidence を取っているイベントで補正をした。その他の点は NaI1 と同じ。
- NaI3

NaI1 と NaI3 の役割を入れ替えて同じようにした。

この補正の結果得られた定数を表 6 に示し、t-Q 補正後のそれぞれのヒストグラムを図 27-図 29 に示す。

表 6 補正関数の係数

	a	b	c
NaI1	1414 ± 25	190.3 ± 9.4	155.28 ± 0.58
NaI2	1039.2 ± 6.1	63 ± 28	163.5 ± 1.5
NaI2	1373 ± 48	212 ± 17	152.7 ± 1.2

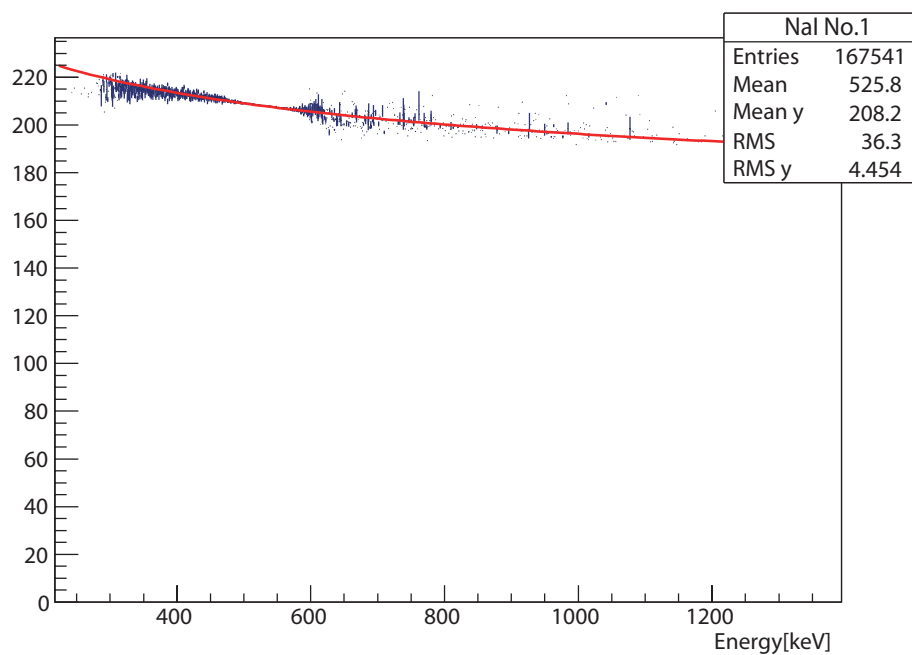


図 24 NaI1 の t-Q 補正のプロファイル

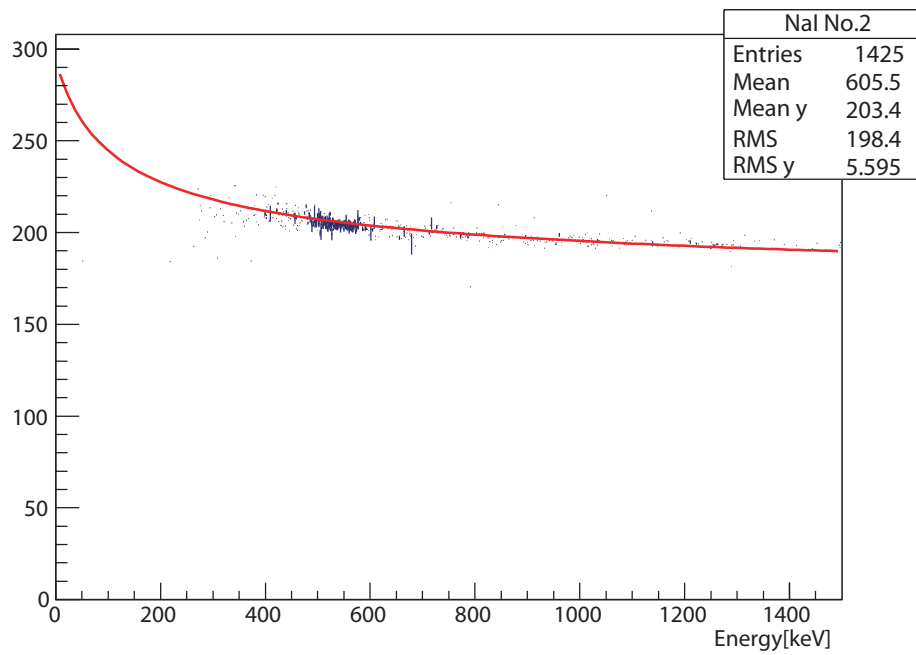


図 25 NaI2 の t-Q 補正のプロファイル

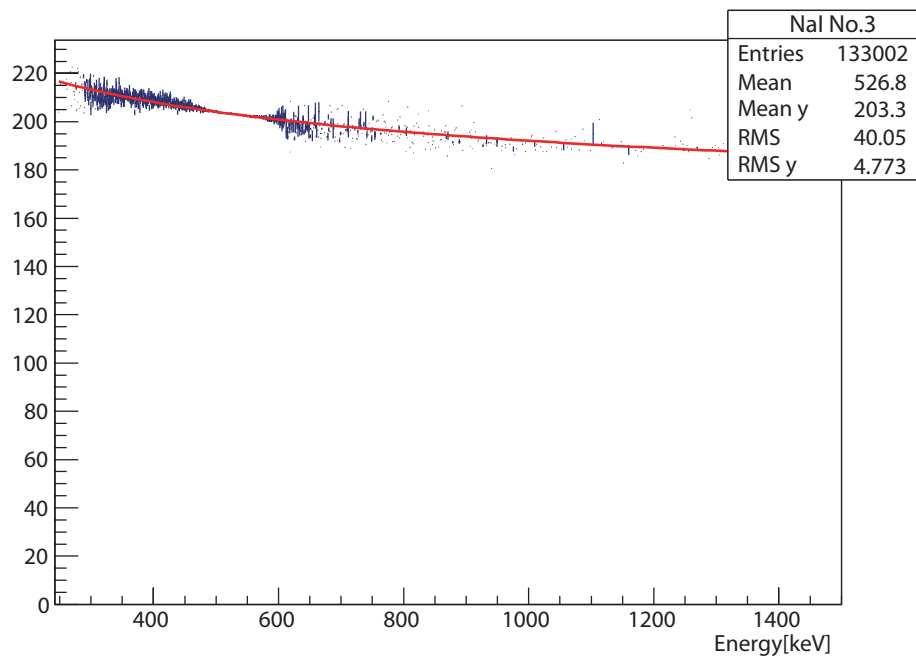


図 26 NaI3 の t-Q 補正のプロファイル

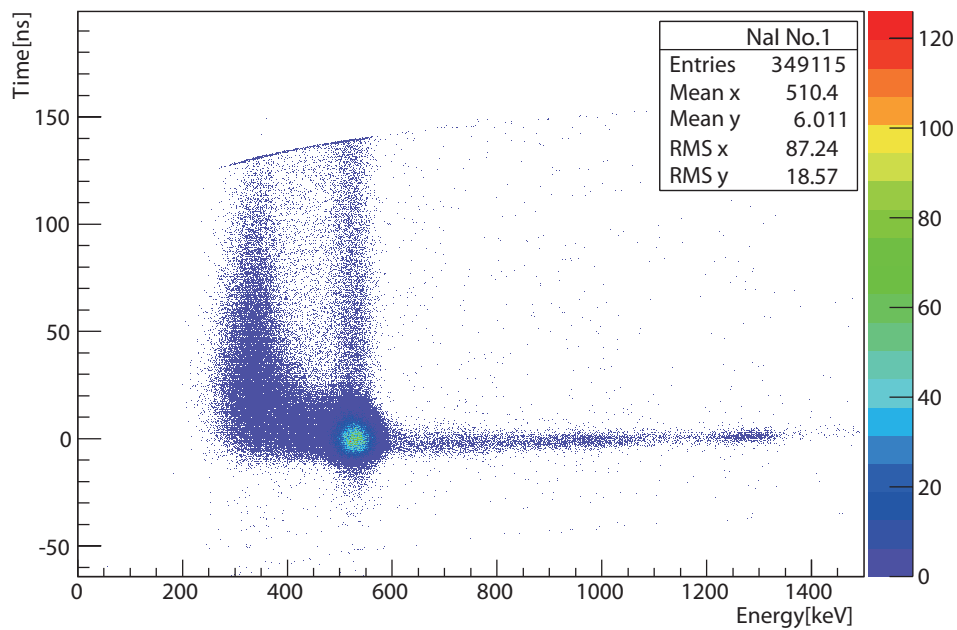


図 27 t-Q 補正後の NaI1 のヒストグラム

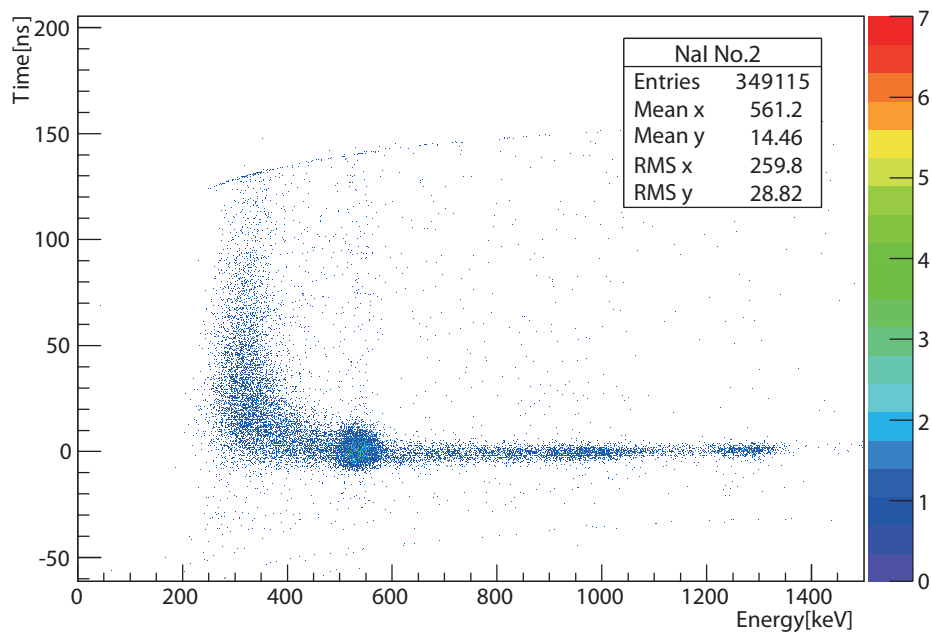


図 28 t-Q 補正後の NaI2 のヒストグラム

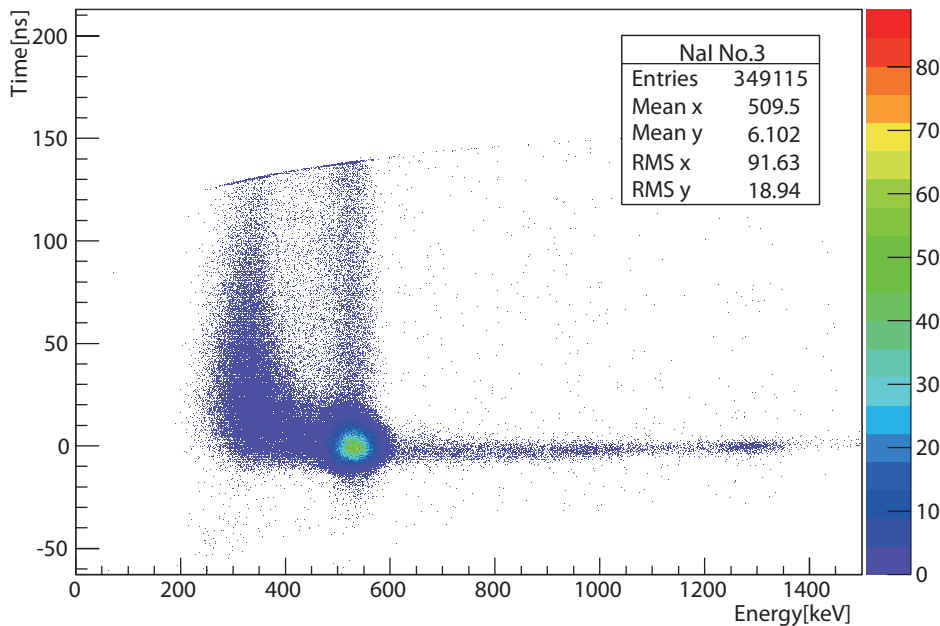


図 29 t-Q 補正後の NaI3 のヒストグラム

4.4 NaI2 についての検証

今, NaI2 の結果について当初想定していなかった問題を検証する.

それは, 図 27-図 29 を見比べれば明らかなように, NaI2 の捉えるイベントの傾向が NaI1, NaI3 の傾向によく似ていることである. 前述のように NaI2 は配置から p-Ps を捉えないはずであり, 傾向が似ているのは我々が当初考えていなかったイベントを NaI2 が捉えているためであると考えられる. そこで, この結果がどのような効果から来ているのかを検証した.

そこで, すべての NaI のヒストグラムの $\text{Energy} \leq 400 \text{ keV}$ かつ $\text{Time} \geq 20 \text{ ns}$ に現れているひときわイベント数が多い領域に注目した. この領域のイベントがどのようなイベントであるのかを考えるために, この領域のイベントが Coincidence をとっているイベントがどのようなものであるかを調べた. すると, この領域のイベントはほとんどが p-Ps の崩壊による $511 \text{ keV} \gamma$ と Coincidence を取っていることが分かった. NaI3 が p-Ps の崩壊による $511 \text{ keV} \gamma$ を捉えているときの NaI1 のヒストグラムを図 30 に示す.

このことから, この領域にあるイベントは p-Ps の $511 \text{ keV} \gamma$ であると考えられる. p-Ps の $511 \text{ keV} \gamma$ がこれだけ遅い時刻で観測されていることとエネルギーが非常に小さくなっていることから, これは $511 \text{ keV} \gamma$ が多重に Compton 散乱を受けた結果であると考えられる.

また, ADC のヒストグラムを見てみると, NaI1 の $-10 \text{ ns} \leq \text{Time} \leq 10 \text{ ns}$ の領域を取り出したときに Energy の図 31 はほとんど Compton 散乱によるピークが見えないが, 図 30 の時の Energy のヒストグラム (図 32) をとると, Compton 散乱によるピークが見えることが分かる. この結果もこの領域のイベントが $511 \text{ keV} \gamma$ が Compton 散乱されたものであることを支持する結果であると考えられる.

この結果から, NaI2 のヒストグラムにある $\text{Time} \geq 20 \text{ ns}$ かつ $\text{Energy} \leq 400 \text{ keV}$ の領域のイベントも同様に p-Ps の $511 \text{ keV} \gamma$ が Compton 散乱されたものであると考えられる. また, $\text{Time} \leq 10 \text{ ns}$ にあるイベントも同様に p-Ps の $511 \text{ keV} \gamma$ が Compton 散乱されたものと考えられることが分かる.

このような効果によるイベントが NaI2 の有意なイベント約 20000 個のうち 15000 個あり, 前述のスピン交換反応で生じる $511 \text{ keV} \gamma$ にも同じ効果が働くことを考えると, 配置から直接的に o-Ps を判別するのは困難であり, 別の判別方法を用いる必要があることが分かる.

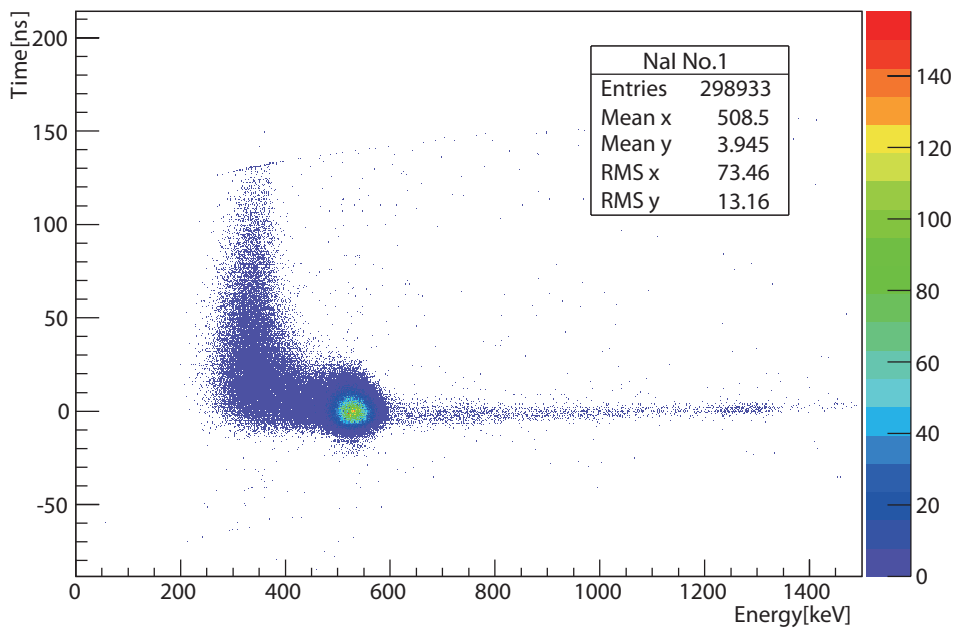


図 30 NaI3 が p-Ps の崩壊を捉えたときの NaI1 のヒストグラム

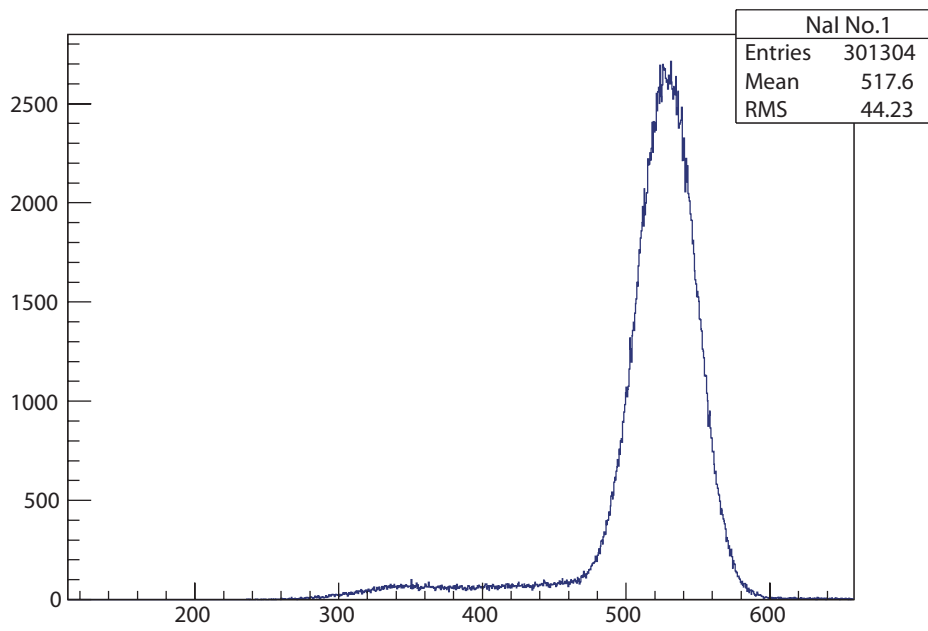


図 31 NaI1 $-10 \text{ ns} \leq \text{Time} \leq 10 \text{ ns}$ の領域

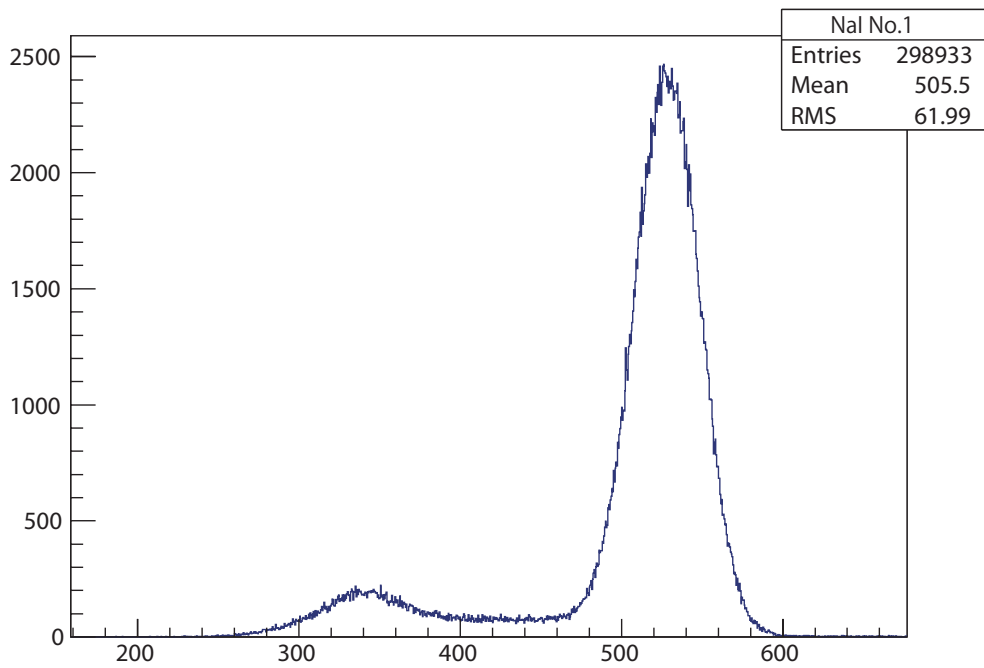


図 32 NaI3 が p-Ps の崩壊を捉えたときの NaI1 の Energy

4.5 寿命測定

今までの解析をもとに pick-off のレートを評価し, 寿命を測定する.

・ τ_{total} の測定

図 27-図 29 と前述の考察から, すべての NaI で $\text{Time} \geq 30 \text{ ns}$ の領域を取り出すと各 NaI について p-Ps の崩壊を除いたイベントを取り出せることが分かる. p-Ps の崩壊による $511 \text{ keV}\gamma$ がともに多重に Compton 散乱される可能性については, 図 31-図 32 の比較からほとんどないことが分かる. この時の NaI1 のヒストグラムを図 33 に示す. このうち $\text{Energy} \leq 450 \text{ keV}$ の領域を考えると, この領域に入るイベントは o-Ps の崩壊による γ とスピン交換反応による $511 \text{ keV}\gamma$ が Compton 散乱されたものなどの pick-off によるものに限られる.

したがって, この領域で寿命を測定すると, 測定できる値は τ_{total} である. これを Time の上限を 120 ns とし NaI1 と NaI3 について測定すると, 表 7 のようになった. また, その時の NaI1 と NaI3 の Time のヒストグラムをそれぞれ図 34 と図 35 に示す.

表 7 各 T_{min} に対する τ_{total} [ns]

T_{min}	30ns	40ns	50ns	60ns	70ns
NaI1	95.5 ± 7.9	95.1 ± 9.7	102 ± 14	112 ± 22	118 ± 33
NaI3	102.8 ± 8.9	104 ± 11	100 ± 13	96 ± 15	101 ± 23

・ $\Gamma_{\text{pick-off}}/\Gamma_{\text{total}}$ の測定

NaI1 について, NaI3 の $-10 \text{ ns} \leq \text{Time} \leq 10 \text{ ns}$ のイベントと Coincidence をとっているものを取り Energy のヒストグラムを取ると, これは p-Ps のスペクトルになる. このヒストグラムを H1 とする (図 36).

ここで, τ_{total} を測定したときの領域の Energy のヒストグラムを取り, このヒストグラムを H2 とする (図 37). この H2 の $511 \text{ keV}\gamma$ のピークの高さを H1 の p-Ps のピークに合わせる. また, この時の H1 \cdot H2 の $200 \text{ keV} \leq \text{Energy} \leq 450 \text{ keV}$ での面積をそれぞれ $S1 \cdot S2$ とおく.

この時, $S1/S2$ は全イベント中の $511 \text{ keV}\gamma$ によるイベントの割合を表すので次の式 (24) が成り立つ.

$$\frac{S1}{S2} = \frac{\Gamma_{\text{pick}}}{\Gamma_{\text{total}}} \quad (24)$$

したがって, $S1/S2$ を求めれば $\Gamma_{\text{pick-off}}/\Gamma_{\text{total}}$ が出せ (図 38), これから式 (18) によって $\tau_{3\gamma}$ が計算できる.

上記の方法で $\Gamma_{\text{pick-off}}/\Gamma_{\text{total}}$ と $\tau_{3\gamma}$ を測定して表 8 に示す.

表 8 $\Gamma_{\text{pick-off}}/\Gamma_{\text{total}}$ と $\tau_{3\gamma}$

	T_{min}	30ns	40ns	50ns	60ns	70ns
NaI1	$\Gamma_{\text{pick-off}}/\Gamma_{\text{total}}$	0.227	0.268	0.274	0.268	0.275
	$\tau_{3\gamma}$ [ns]	124 ± 10	130 ± 13	140 ± 19	153 ± 30	163 ± 46
NaI3	$\Gamma_{\text{pick-off}}/\Gamma_{\text{total}}$	0.281	0.291	0.288	0.282	0.285
	$\tau_{3\gamma}$ [ns]	143 ± 12	146 ± 15	140 ± 18	134 ± 21	142 ± 32

4.6 結論

表 8 から NaI1 は T_{min} が大きくなるにしたがって $\tau_{3\gamma}$ と誤差が急激に大きくなることから pick-off のレートを大きく見積もりすぎた、もしくは p-Ps の崩壊によるイベントを十分に取り除けていなかったということが考えられる。

一方、NaI3 の $\tau_{3\gamma}$ はすべての T_{min} で $\tau_{3\gamma}$ が変化していないことから適切に o-Ps の寿命を評価できていると考えられる。

また、 T_{min} が大きくなるとイベント数が少なくなり誤差が大きくなるため結果としての信用性が低くなることから、我々は結論として NaI3 の $T_{\text{min}} = 30$ ns の時の値を採用し

$$\tau_{3\gamma} = 143 \pm 12 \text{ [ns]}$$

という結果を得た。

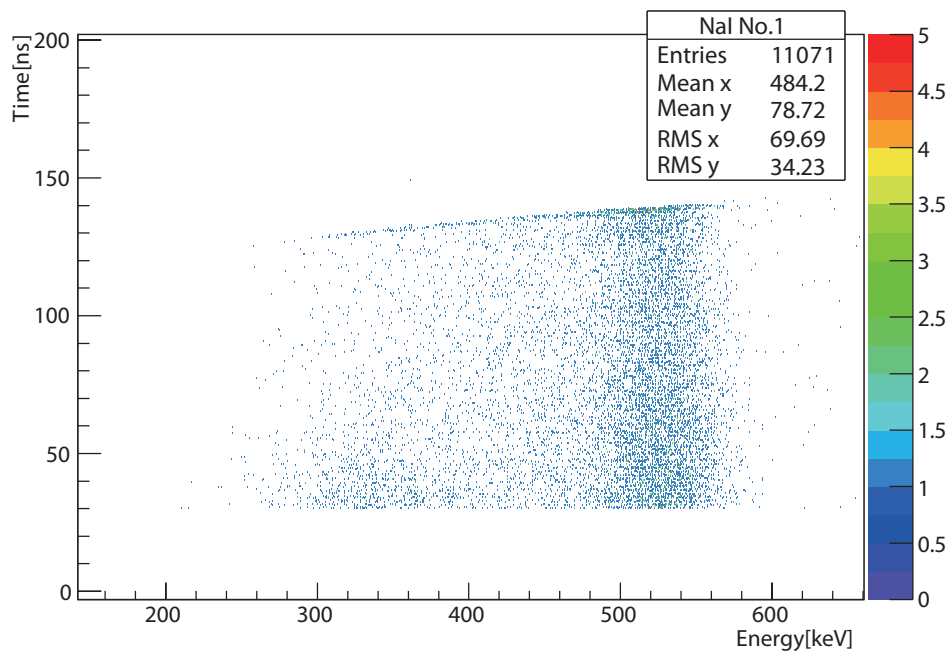


図 33 すべての NaI で Time \geq 30 ns のときの NaI1 のヒストグラム

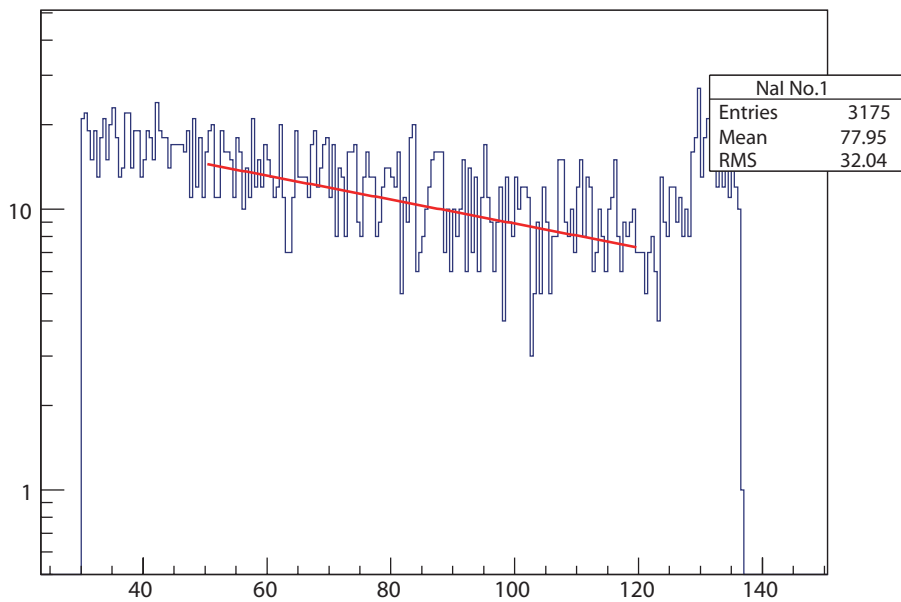


図 34 NaI1 の τ_{total} の fitting

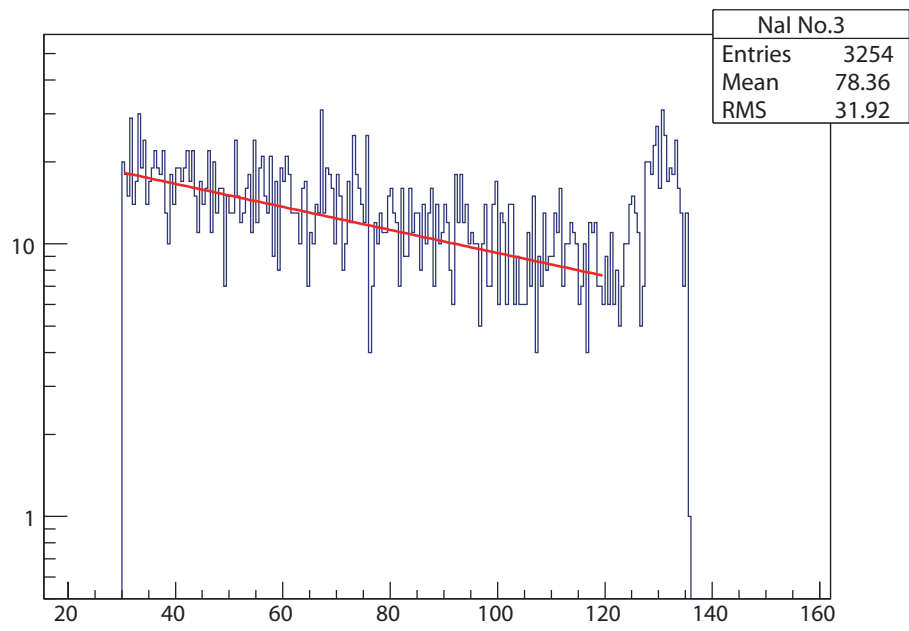


図 35 NaI3 の τ_{total} の fitting

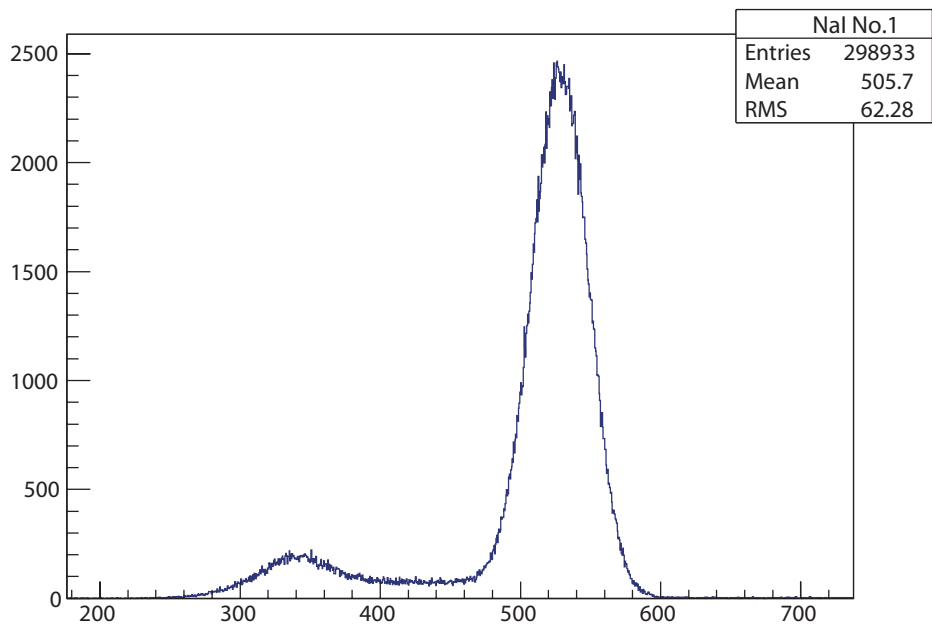


図 36 ヒストグラム H1

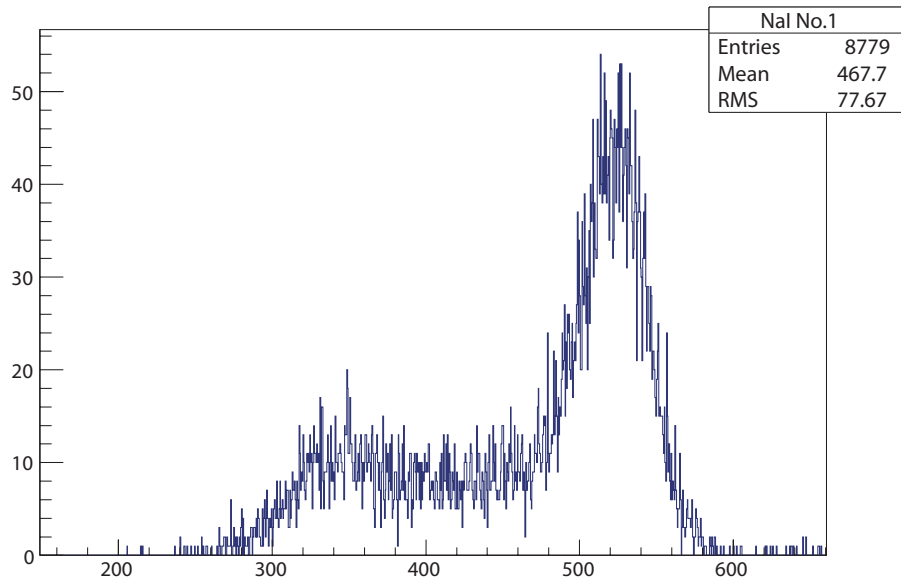


図 37 ヒストグラム H2

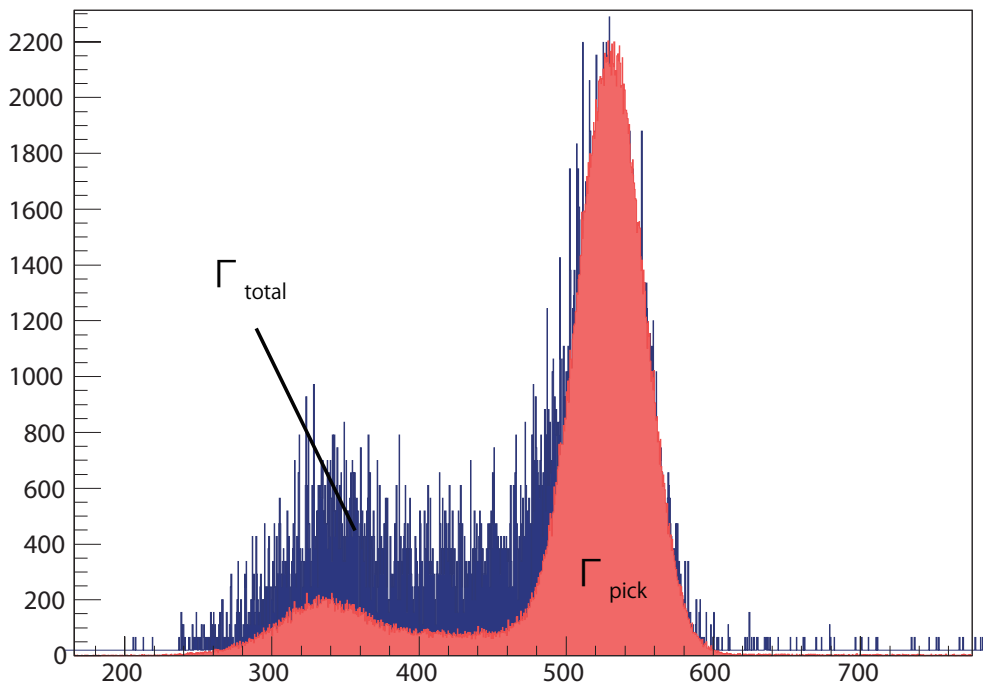


図 38 $S1/S2$

第 5 章 考察

5.1 誤差の評価

5.1.1 概要

本実験では, o-Ps の寿命を得るまでにいくつかの過程を経た. そこで, 各々の測定及び解析において生じてくる誤差が, 最終的な寿命の誤差にどのように寄与するのか考察する.

ADC, TDC 値は整数なので ± 1 程度の誤差があると見積られる. また, ヒストグラムのエントリー数については \sqrt{N} 程度の誤差が生じるが, これは解析ソフト ROOT が自動的に計算してくれる.

今回は NaI1 と NaI3 のそれぞれで寿命の解析を行ったので, 誤差伝搬に関しても, それぞれの伝搬を考察することにする.

5.1.2 誤差の伝搬に関する一般式

$q = q(x, \dots, z)$ なる x, \dots, z の任意関数において, それらの誤差 $\delta x, \dots, \delta z$ がすべて互いに独立かつランダムであれば, q の誤差 δq は

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \delta x\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z} \delta z\right)^2} \quad (25)$$

で表される.

5.1.3 ADC calibration の誤差

ADC calibration においては, a, b の誤差として ROOT の 1 次関数 fitting により計算された誤差を用いた (表 9).

また ADC の値には, 誤差 σ_{adc} が最大になるような値を用いた.

表 9 ADC calibration の誤差

	a	b
ADC2	0.5120 ± 0.0083	-114 ± 14
ADC3	0.510 ± 0.015	-84 ± 26
ADC4	0.523 ± 0.010	-100 ± 17

以上から, 式 (25) を用いて, ADC calibration の Energy に伝搬する誤差 σ_{adc} を求めると,

$$\sigma_{\text{adc}} = \begin{cases} 17.0 & [\text{keV}] & (\text{NaI1}) \\ 20.4 & [\text{keV}] & (\text{NaI3}) \end{cases} \quad (26)$$

となる.

5.1.4 TDC calibration の誤差

TDC calibration においてはまず, 105 ns fixed delay のモジュールによる時間の遅れをオシロスコープを用いて目視で確認した際の表示画面の最小目盛りが 4 ns でありおよそ半分まで読み取れたので, 誤差を 2 ns とした. c, d の誤差としては, 最小二乗法により計算された誤差を用いた (表 10).

表 10 TDC calibration の誤差

	c	d
TDC2	0.24864± 0.00069	-13.0± 1.3
TDC3	0.25028± 0.00069	-14.2± 1.3
TDC4	0.24859± 0.00071	-14.1± 1.3

以上から, TDC calibration の時間に伝搬する誤差 σ_{tdc} は

$$\sigma_{\text{tdc}} = \begin{cases} 1.35 & [\text{ns}] & (\text{NaI1}) \\ 1.38 & [\text{ns}] & (\text{NaI3}) \end{cases} \quad (27)$$

と求められた.

5.1.5 t-Q 補正の誤差

まず ADC の減衰項の誤差伝搬に関しては, ROOT が計算してくれた誤差を用いる (表 11).

表 11 ADC 減衰項の誤差

	p0	p1
NaI1	5.495e+02± 3.3e+00	-1.52e-01± 1.1e-02
NaI2	5.494e+02± 2.5e+00	-1.365e-01± 8.5e-03
NaI3	5.476e+02± 2.5e+00	-1.066e-01± 8.6e-03

また t-Q 補正式に関しても同様の誤差を用いるのだが, ADC の減衰項に関しては独立な誤差ではないため, 一般式 (25) が単純には使えないことに注意しなければならない. ここでは Energy の誤差として, 少々多く見積もってしまうことになるが calibration と減衰項の単純和をとって考える. その他, fitting 関数の定数項に関しては ROOT により計算された値を用いた (表 12).

表 12 t-Q 補正の誤差

	p0	p1	p2
NaI1	1.414e+03± 2.5e+01	1.903e+02 ± 9.4e+00	1.5527e+02± 5.8e-01
NaI2	1.039e+03± 6.1e+01	6.3e+01 ± 2.8e+01	1.635e+02± 1.5e+00
NaI3	1.373e+03± 4.8e+01	2.13e+02 ± 1.7e+01	1.527e+02± 1.2e+00

従って t-Q 補正の fitting 関数に対する誤差 σ_{tqcor} は

$$\sigma_{\text{tqcor}} = \begin{cases} 2.22 & [\text{ns}] & (\text{NaI1}) \\ 3.28 & [\text{ns}] & (\text{NaI3}) \end{cases} \quad (28)$$

であるから, 時間に伝搬する誤差 σ_t は式 (27), (28) を用いて

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{\text{tdc}}^2 + \sigma_{\text{tqcor}}^2} = \begin{cases} 2.60 & [\text{ns}] & (\text{NaI1}) \\ 3.56 & [\text{ns}] & (\text{NaI3}) \end{cases} \quad (29)$$

と求められた。

以上から、伝搬による誤差はそれほど大きいものではなく、求めた寿命の誤差は fitting によるものが主と考えられ、後述する pick-off 反応の評価によるものも大きいと思われる。

5.2 初期の setting で back-to-back γ -ray が観測されなかった原因

初期の setting においては、Ps の崩壊による γ -ray は NaI シンチレータによって観測されていたものの、NaI1 と NaI3 の Coincidence がそれほど観測されず、p-Ps の崩壊による back-to-back γ -ray を捉えきれていないということが起きていた。レートとしては単純な 511 keV γ -ray が 1 本のみ (NaI2-4 のいずれかで)、観測されるとき 0.5 % 程度。

その理由として、

- geometry の効果
- set up の問題
- o-Ps, p-Ps の生成率 (3 : 1)
- Ps の崩壊位置

など、考えられるものはいくらかある。だがそもそも 2 つの NaI シンチレータはシリカパウダー容器内のシリカパウダーの中心点で対称に配置されているため、本来ならば崩壊によって生じた 511 keV γ -ray が NaI1 または NaI3 で観測される場合は、必ず back-to-back が観測されるはずである。それにもかかわらず NaI1, NaI3 において 511 keV γ -ray が back-to-back でほとんど観測されず 1 本だけ観測されていることが不可解なことであり、勘案すべき事象である。

ここで、上での考察があくまで Ps が容器内のシリカパウダーの中心点において崩壊を起こしているという仮定のもとでの考察であることを省いてみると、この仮定が正しくない可能性がある。Ps の崩壊が対称に設置されたシンチレータの中心軸から外れているとすれば、崩壊の立体角も 2 つのシンチレータに対して対称にはならず、511 keV γ -ray が 1 本だけ観測されているのもある程度納得できる。

さて、Na 線源の位置、また陽電子の物質中の飛程が容器のスケールで非常に短く^{*1} 入射後すぐに減速して Ps の束縛エネルギーに落ち着くことを考慮すると、仮定よりも入射フィルター側にもっと近いところで Ps が生成、崩壊が起きていると考えられる。

実際、本実験のようにフィルターの少しだけ上の部分と、2 つの NaI シンチレータの中心軸が重なるように setting を調整してみると、NaI1 と NaI3 の観測において back-to-back γ -ray Coincidence のレートが 0.5Hz 程度になり、511 keV γ -ray が 1 本だけ観測されるという事象もほぼ解消された。

以上から、シリカパウダー内において Ps は陽電子の入射後早い段階で生成され崩壊を起こしていると考えられ、シリカパウダーの中心あたりで反応を起こしているとの考えで組んだ setting に問題があったと言えるよう。

5.3 T_{\min} の評価

本実験の解析において、pick-off effect, スピン交換反応, Compton 散乱は寿命の測定に大きな影響を与える。30 ns < T_{\min} < 70 ns の範囲における解析を行ったわけだが、 T_{\min} を調整することで、最終的に求めら

^{*1} 低密度物質の場合 MeV 当り約 2 mm, 中密度物質では MeV 当り約 1 mm.

れる寿命に何らかの影響が出れば、これら反応が時間に何らかの依存関係があることが期待できる。

まず、pick-off 反応は Ps が物質中で他の原子と衝突し Ps の陽電子と相手原子の電子が対消滅する反応である。この反応により、Ps の寿命が本来のものよりも短くなる。

スピン交換反応は o-Ps が p-Ps になった後、すぐに崩壊するのでこれも寿命が短くなる反応である。Compton 散乱は寿命に大きく影響はしないが、多重に相互作用する場合は、寿命が長くなる反応である。

そのため、寿命が短くなっていけば、その領域により多くの pick-off、スピン交換反応を見ていることになり、長くなっていけば、多重 Compton 散乱の影響が出ている可能性がある。

30 ns ~ 70 ns の前後の T_{\min} に対する、pick-off 反応も含んでの寿命、pick-off 反応を除いた寿命をそれぞれ求めたものを表 13, 14 に示す。

表 13 NaI1 における、各 T_{\min} に対する寿命 [ns]

T_{\min} [ns]	30	40	50	60	70
τ_{total}	95.52 ± 7.93	95.06 ± 9.73	101.8 ± 14.0	111.8 ± 21.7	118.2 ± 33.5
$\tau_{3\gamma}$	123.6 ± 10.3	129.9 ± 13.3	140.3 ± 19.2	152.7 ± 29.6	163.1 ± 46.2

表 14 NaI3 における、各 T_{\min} に対する寿命 [ns]

T_{\min} [ns]	30	40	50	60	70
τ_{total}	102.76 ± 8.87	103.5 ± 11.0	99.7 ± 12.7	96.1 ± 15.4	101.4 ± 23.0
$\tau_{3\gamma}$	143.0 ± 12.3	146.0 ± 15.4	140.0 ± 17.8	133.9 ± 21.4	141.7 ± 32.2

以上から、NaI3 においては全体に大きな変化は見られず、pick-off 反応、スピン交換反応が全体的に散らばっていると考えられる。

一方 NaI1 においては、 T_{\min} を小さくすると寿命が短く、大きくすると寿命が長くなっており、NaI3 との違いを見た。ここから考えられるのは

- T の値が小さい領域では pick-off 反応の割合が増え、逆に大きい領域では多重の Compton 散乱の割合が増えている。
- シリカパウダーが不均一になっている。
- 単に計算手法の特性。

などであるが、これも NaI1 と NaI3 が対称におかれている限りは似たような T に対する反応を見せてもいいはずである。このように結果として多少の差異が認められるのは気がかりな内容ではある。

残念だがここから更なる評価の手法を思いつくには至らなかった。

5.4 発表を終えて

本レポートの内容は基本的に 2011 年後期 課題演習 A2 の期末発表が行われる以前に書かれた。しかし発表の際に先生方から受けた指摘があるのでそれを最後に記載しておく。

- Coincidence のせいで o-Ps のデータがとれていない
今回の実験では Gate を開く信号としてプラスチックシンチレータと 2 つの NaI シンチレータの

Coincidence を取ったが、それが o-Ps のデータを排除するように働いていた。発生した γ 線が NaI シンチレータに入る確率は試料から NaI への立体角に比例するが、Coincidence を取ることによってその確率が立体角の 2 乗になり、o-Ps から来た γ 線を検知する確率が小さくなってしまふからである。一方、p-Ps からの back-to-back γ -ray は立体角の 1 乗で入ってくるので、結果的に p-Ps のデータばかりが取れるセットアップになっていたといえる。

- threshold の値が大きすぎた

o-Ps を十分取れなかったもう一つの理由として、NaI シンチレータにつないだ Discriminator の threshold の値が大きすぎたということが挙げられる。実験を行う段階では十分に小さい threshold に設定しているつもりだったが、図 8 を見てわかるように、NaI からの信号は一度 Divider を経由しエネルギーが半分になって Discriminator に入る。このため低エネルギー領域が過剰にカットされ、o-Ps が十分に感知されなかった。また、threshold に近いエネルギー領域のシグナルが非常に遅れてきているように見えてしまっていた。おそらく、図 15 で左上になっている領域 ($\text{Energy} \leq 400 \text{ keV}$, $\text{Time} \geq 20 \text{ ns}$) のデータ点は多重コンプトン散乱によるものではなく、エネルギーが threshold に非常に近いために時刻が遅れたものと思われる。このような理由からも o-Ps の寿命の解析が困難になってしまっていた。

- t-Q 補正をもっと低エネルギー領域のデータを用いて行うべきだった

「4.3 t-Q 補正」の項で行った t-Q 補正だが、これを o-Ps が分布している低エネルギー領域 ($\text{Energy} \leq 400 \text{ keV}$) で行うべきであった。実際に図 26 を見ても分かるように、今回 t-Q 補正に用いた高エネルギー領域ではたしかに補正関数 (23) とプロファイルが一致しているが、エネルギーが低い領域では補正関数とプロファイルがずれている。これは、エネルギーが低い領域では t-Q 補正に用いるべき関数形が式 (23) のようにならないためである (図 23 においてエネルギーが小さすぎると関数形が変わる)。低エネルギー領域のデータが少なかったため高エネルギー領域のデータで t-Q 補正を行ったという事情はあったのだが、本来は o-Ps の分布する低エネルギー領域で補正をするべきである。

先程も述べたように、図 15 で左上になっている領域 ($\text{Energy} \leq 400 \text{ keV}$, $\text{Time} \geq 20 \text{ ns}$) のデータ点は t-Q 補正の誤差が著しく現れた領域であるともいえる。

以上、今回の実験では十分な o-Ps のデータがとれておらず、解析にも誤りがあった。次年度以降同じ実験に取り組む者にはこの教訓を生かし、よりよい実験を行なってほしい。

謝辞

今回の実験にあたり石野先生、隅田先生、TA の高橋さん、合田さんに丁寧なご指導とご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] A. Ore and J. L. Powell, *Three-Photon Annihilation of an Electron-Positron Pair*, The American Physical Society, 1949
- [2] Michael E. Peskin and Daniel V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Chapter 5
- [3] J. J. Sakurai, *Advanced Quantum Mechanics*, Chapter 4
- [4] 2008 年度前期 A2 レポート
<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/A2/reports/a2report08a.pdf>
- [5] 「計測における誤差解析入門」 John R. Taylor 著 林重雄・馬場涼訳 東京化学同人