オルソポジトロニウムの寿命測定による QED の実験的検証

課題演習 A2,2013 年度前期

池田敦俊　酒井勝太　田嶋竣介
寺澤大樹　平本綾美　藤井知暁

2013 年 10 月 4 日

目次

1　はじめに

1.1　実験目的

電子と陽電子の対消滅は、QED の検証に用いることのできる素粒子反応のひとつである。この実験では、NaI シンチレータとプラスチックシンチレータを用いてオルソポジトロニウムの寿命を求めることを目的とした。また、そこで得られた寿命と QED による理論値とを比較し、一致するかを検討した。

1.2　課題演習として

この実験は課題演習 A2 において行われたものであり、実験を通してシンチレータや光電子増倍管の使い方、放射線実験の手順などを学ぶ目的もある。

2　理論

2.1　ポジトロニウムとは？

ポジトロニウム (略して Ps とかく) とは電子と陽電子が電気的な相互作用により束縛状態をつくり対になったものである。Ps には反対称スピンのパラポジトロニウム (p-Ps) と対称スピンのオルソポジトロニウム (o-Ps) が存在する。それぞれ 1 重項と 3 重項をなす。

2.2　荷電共役不変性

場の理論より次の形で場を展開する。

$$A(\mathbf{x},t) = \frac{1}{\sqrt{V}}\sum_{\mathbf{k}}\sum_{\alpha} c\sqrt{\frac{\hbar}{2\omega}}\left(a_{\mathbf{k},\alpha}(t)\epsilon^{(\alpha)}e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} + a^{\dagger}_{\mathbf{k},\alpha}(t)\epsilon^{(\alpha)}e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}}\right) \tag{1}$$

Ps の電気的相互作用のラグラジアンは

$$\mathcal{L}_I = -J^{\mu}A_{\mu}$$

であり、ここで荷電共役変換を考えると電荷が変わることから容易に電流の符号が反転することが分かる。

$$J^{\mu} \stackrel{charge\,conj}{\longrightarrow} -J^{\mu}$$

荷電共役不変性を持たせるために

$$A_{\mu} \stackrel{charge\,conj}{\longrightarrow} -A_{\mu}$$

を要請することになる。
したがって $a_{\mathbf{k},\alpha}$ は A_{μ} に一次に比例するため

$$a_{\mathbf{k},\alpha} \stackrel{charge\,conj}{\longrightarrow} -a_{-\mathbf{k},\alpha}, \quad a^{\dagger}_{\mathbf{k},\alpha} \stackrel{charge\,conj}{\longrightarrow} -a^{\dagger}_{-\mathbf{k},\alpha}$$

を要請し、

$$a^{\dagger}_{\mathbf{k}_1,\alpha_1}a^{\dagger}_{\mathbf{k}_2,\alpha_2}\dots a^{\dagger}_{\mathbf{k}_n,\alpha_n}|0\rangle \stackrel{charge\,conj}{\longrightarrow} (-1)^n a^{\dagger}_{-\mathbf{k}_1,\alpha_1}a^{\dagger}_{-\mathbf{k}_2,\alpha_2}\dots a^{\dagger}_{-\mathbf{k}_n,\alpha_n}|0\rangle \tag{2}$$

となる。
この式 (2) から 3 重項 $\longrightarrow$ 奇数光子、1 重項 $\longrightarrow$ 偶数光子であることがわかる。
一光子を放出して崩壊する過程は運動量を保存することができないので o-Ps,p-Ps に考えられるもっとも簡単な崩壊過程は次の二つになる。

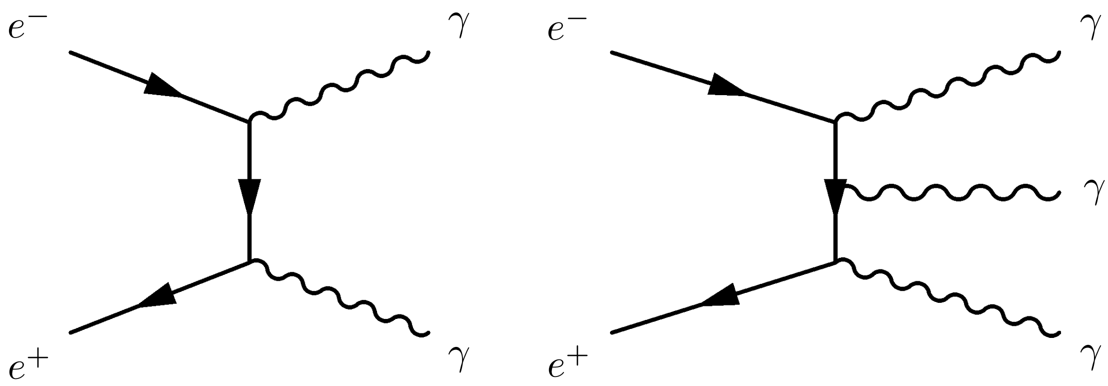


図 1　ポジトロニウムの崩壊

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}_{Lab} = \frac{\omega_1 r_0^2}{8|\mathbf{p}_+|(m+E_+)}\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}+\frac{\omega_1}{\omega_2}+2-4(\epsilon^{(\alpha_1)}\cdot\epsilon^{(\alpha_2)})^2\right) \tag{3}$$

式 (3) を使うと

$$\Gamma = \frac{1}{2}\alpha^5 m \tag{4}$$

が求まる。

$$\tau_{singlet} = \frac{2}{\alpha^5 m} \simeq 1.25\times 10^{-10} \tag{5}$$

ダイアグラムから $\tau_{triplet}$ は式 (5) の $\frac{1}{\alpha}$ 倍であることは予測できる。
より詳しくは参考文献より

$$\frac{\tau_{triplet}}{\tau_{singlet}} \simeq 1115 \tag{6}$$

である。
したがって、式 (5) と式 (6) からおおよその寿命は以下のように求まる。

$$\tau_{singlet} = 1.25\times 10^{-4}\mu\mathrm{s},\ \tau_{triplet} = 1.39\times 10^{-1}\mu\mathrm{s}$$

2.3　寿命の理論値

最後に参考文献 [1] よりより詳しい結果をあげておく。
p-Ps の崩壊確率は

$$\begin{aligned}\Gamma(\mathrm{p-Ps}\to\gamma\gamma) &= \frac{m_e\alpha^5}{2}\left(1-(5-\frac{\pi^2}{4})\frac{\alpha}{\pi}+2\alpha^2\log\frac{1}{\alpha}+1.75(30)\frac{\alpha}{\pi}^2-\frac{3\alpha^3}{2\pi}(\log\frac{1}{\alpha})^2+\mathrm{O}(\alpha^3\log\frac{1}{\alpha})\right)\\ &= 7989.50(2)\mu\mathrm{s}^{-1}\end{aligned}$$

であり、寿命は $1.2516\times 10^{-4}\mu\mathrm{s}$ となる。

o-Ps の崩壊確率は

$$\Gamma(\mathrm{o-Ps} \to \gamma\gamma\gamma) = \frac{2(\pi^2-9)m_e\alpha^5}{9\pi}\left(1 - 10.28661(1)\frac{\alpha}{\pi} - \frac{\alpha^3}{3}\log\frac{1}{\alpha} + B_o\frac{\alpha}{\pi}^2 - \frac{3\alpha^3}{2\pi}(\log\frac{1}{\alpha})^2 + \mathrm{O}(\alpha^3\log\alpha)\right)$$
$$= (7.0382 + 0.39\times10^{-4}B_o)\mu\mathrm{s}^{-1}$$

であり、寿命は $1.4208\times10^{-1}\mu\mathrm{s}$ となる。

参考文献

[1] Andrej Carnecki,Savely G. Karshenboim, "Decays of Positronium", hep-ph/9911410

[2] J.J.Sakurai "Advanced Quantum Mechanics"NewYork, Addison Weysley(1967).

[3] M.Peskin,D.Schroeder, "An Introduction to Quantum Mechanics" New York, Addison Wesley(1995).

[4] A.Messiah, "Quantum Mechanics"(translated by J.Potter). North-Holland Pubilishing Co.,Amsterdam,TheNetherlands(1962).

3　実験方法、実験装置

3.1　実験方法

β^+ 線源として ^{22}Na を用意し、線源から出た e^+ がプラスチックシンチレータを通過した後、シリカパウダーに当たるように配置した。シリカパウダー内で Ps が形成され、その崩壊に伴う γ 線を NaI シンチレータで観測した。Ps の崩壊時間として、e^+ がプラスチックシンチレータを通過してから NaI で γ 線が観測されるまでの時間を測定した。今回寿命を測定するのは o-Ps なので、観測される γ 線のエネルギーの違いによって p-Ps と o-Ps を区別した。また、o-Ps から p-Ps への転換を抑えるため、実験前にシリカパウダーを加熱して水分を飛ばし、シリカパウダーを入れた容器から空気を抜いて約 13 hPa の下で実験した。プラスチックシンチレータはわずかな光にも反応するので、実験中は黒いビニルシートで装置を覆って遮光した。

3.2　実験装置

3.2.1　装置の配置

線源、鉛板、プラスチックシンチレータ、NaI、シリカパウダーを図 2 のように配置した。e^+ が通る穴が NaI の中央になるよう注意した。

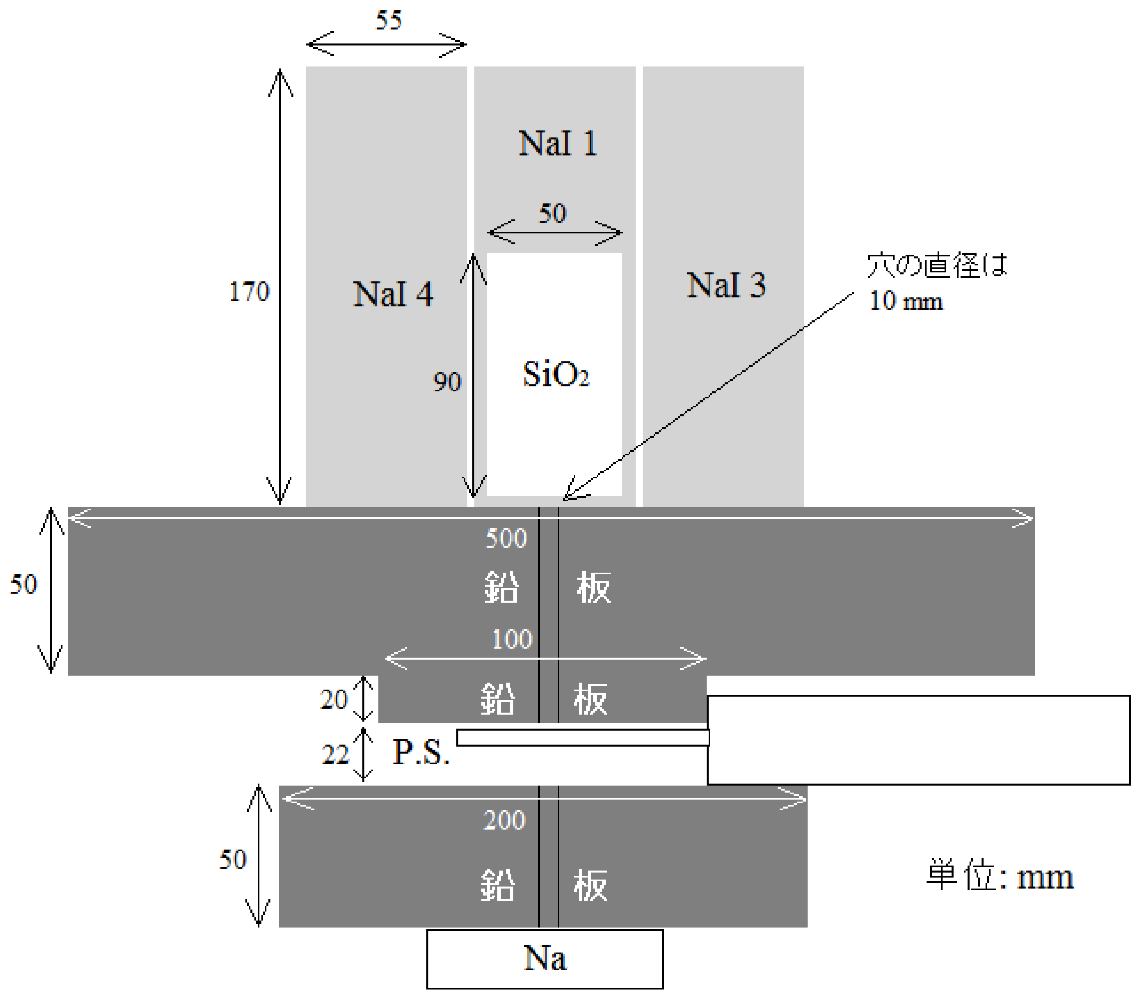


図 2　装置の配置図

図 2 の記号の説明

NaI　γ 線を観測するための NaI シンチレータ

SiO_2　ポジトロニウムを形成するためのシリカパウダー

鉛板　^{22}Na から出る γ 線を遮断するための鉛

P.S.　e^+ を観測するためのプラスチックシンチレータ

Na　β^+ 線源としての ^{22}Na

図 3 から図 6 が実際の写真である。

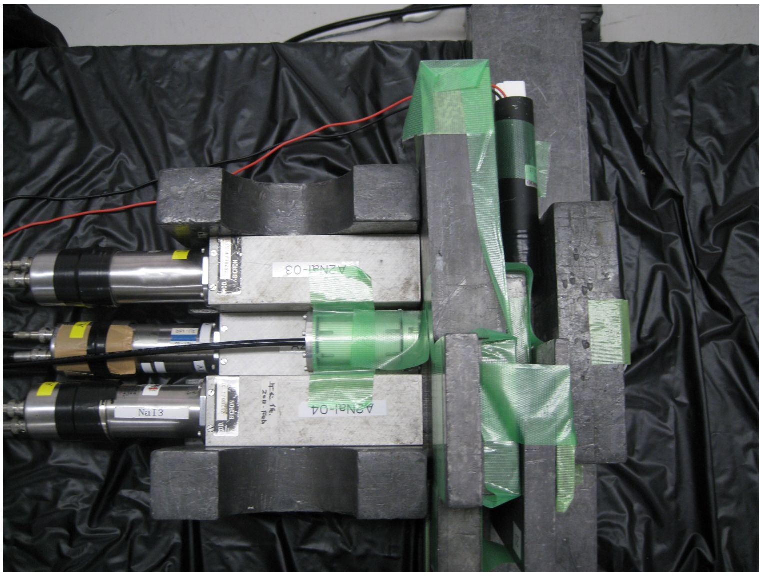


図 3　真上からの写真

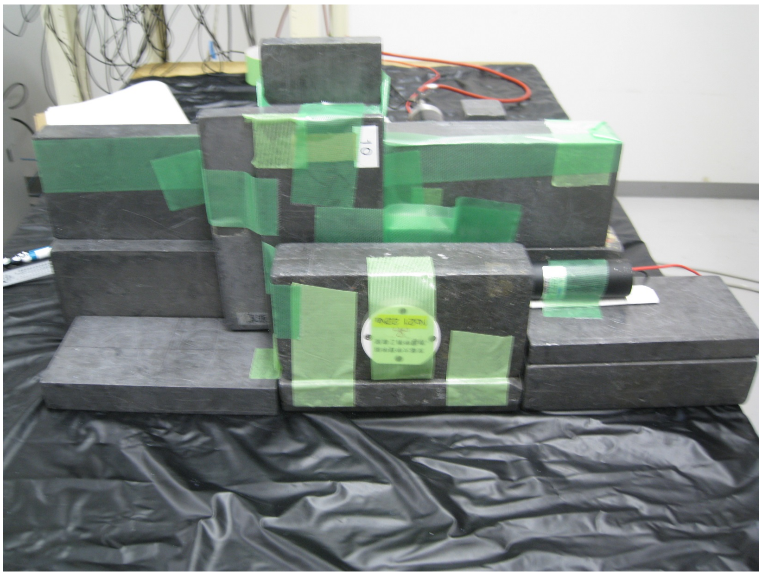


図 4　正面からの写真

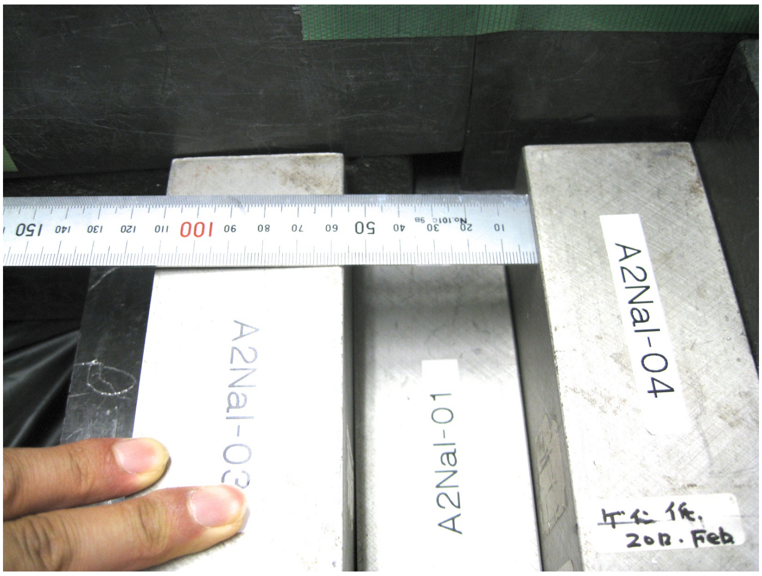


図 5　穴の位置

図 6　遮光の様子

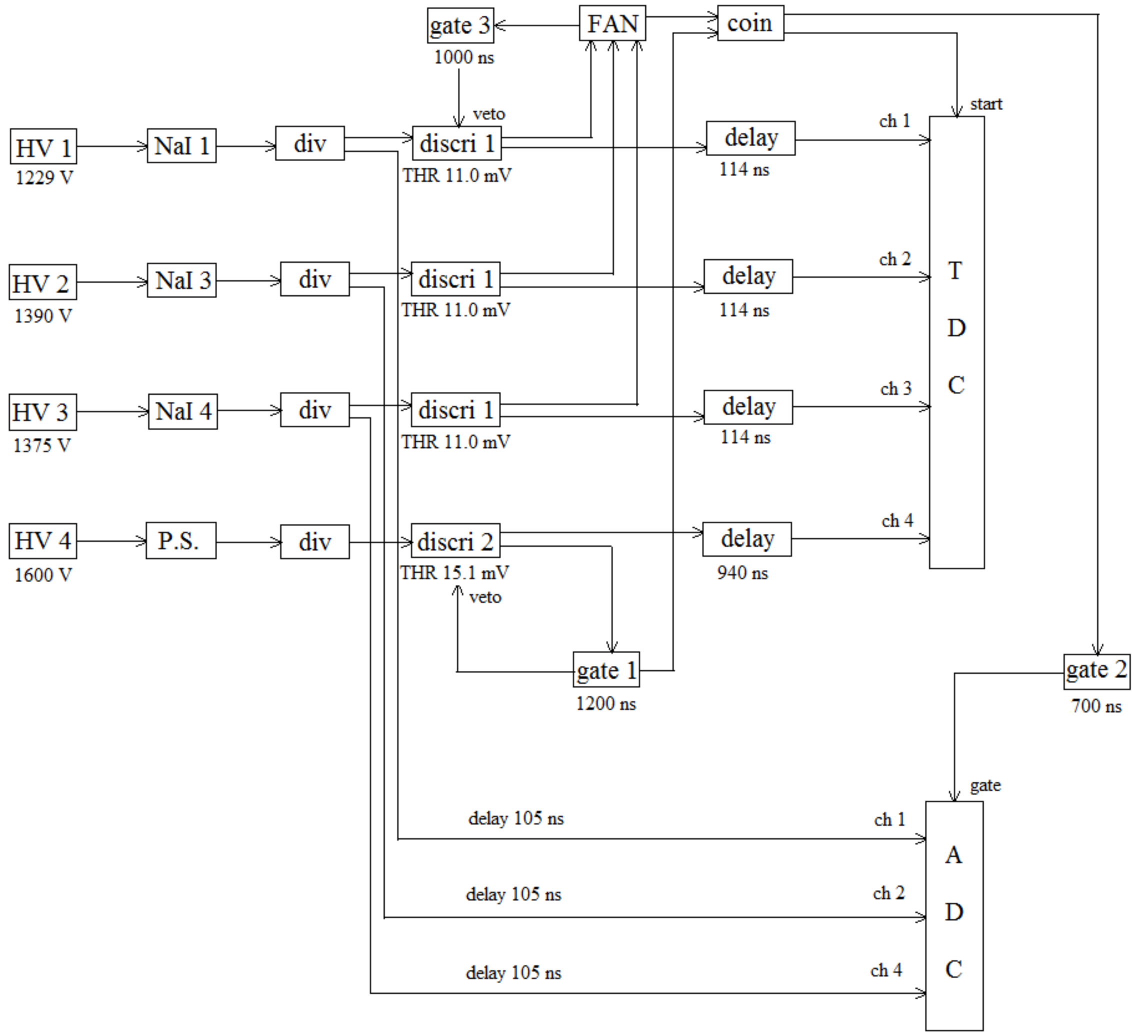


図 7　実験で用いた回路

3.2.2　回路

図 7 のような回路で実験を行った。

図 7 の記号の説明

HV negative high voltage. 光電子増倍管に印加する負の電圧。

NaI NaI シンチレータ。光電子増倍管が取り付けられている。

P.S. プラスチックシンチレータ。光電子増倍管が取り付けられている。

div divider. 入力信号を 2 つに分ける。

discri discriminator. 入力信号がしきい値を超えると NIM 信号を出力する。

FAN 入力端子のいずれかに信号が入力されると信号を出力する。

gate gate generator. 信号が入力されると NIM 信号を出力する。

delay fixed delay. 入力信号を遅らせて出力する。

coin coincidence. 入力端子のすべてに信号が入力されると信号を出力する。

TDC time to digital converter.
start から各チャンネルの stop までの時間に比例する値を出力する。

ADC analog to digital converter.
gate が入力されている間に各チャンネルに入ってくる電荷に比例する値を出力する。

また、ADC のチャンネル 1, 2, 4 の直前では長いケーブルを用いて信号を遅らせた。

この回路で出力される信号の概要を図 8 に示す。

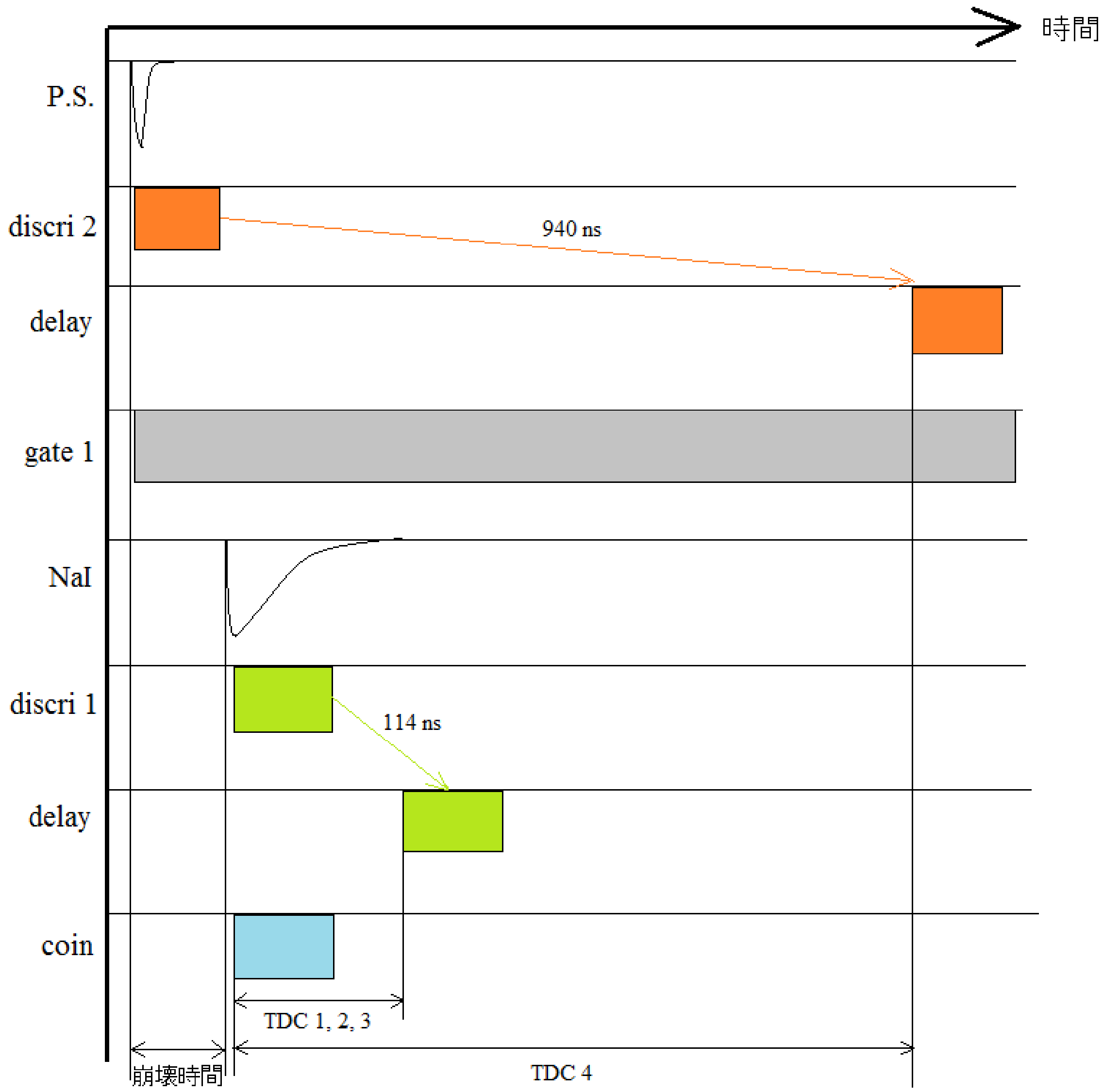


図 8　信号の概要

3.2.3　各モジュールの設定

各光電子増倍管 (PMT と書く) に印加した負の電圧を表 1 に示す。

表 1　PMT に印加した電圧

	HV [V]
NaI 1	1229
NaI 2	1390
NaI 3	1375
P.S.	1600

各 discriminator の設定を表 2 に示す。

表 2　discriminator の設定

	threshold [mV]	width [ns]
discri 1	11.0	30
discri 2	15.1	190

各 gate generator の設定を表 3 に示す。

表 3　gate generator の設定

	width [ns]	delay
gate 1	1200	through
gate 2	700	through
gate 3	1000	through

4　真空中でのデータ解析

4.1　calibration

4.1.1　ADC の calibration

真空中で集めたデータを元に解析する。初めに ADC の生データを掲載すると以下のとおりである。

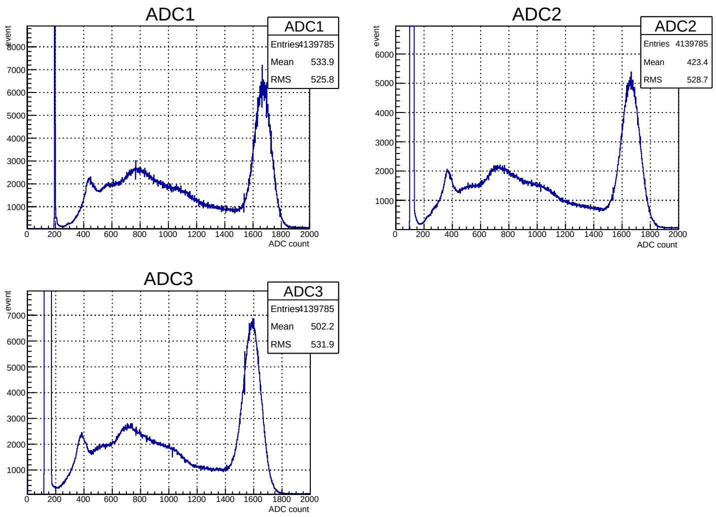


図 9　ADC の生データ

どの PMT でも同じくらいの大きさの波形が得られ、1274keV のピークが ADC の 4095ch 付近に見えるように、オシロスコープを使って HV を調節した。
calibration はペデスタルと 511kev の二点を用いて行った。それぞれの値は以下のとおりである。

表 4　ADC とエネルギーの値の関係

	0 keV	511 keV
ADC1	195	1668
ADC2	116	1661
ADC3	147	1587

calibration の結果、以下の式が得られる。

$$\mathrm{Energy[keV]} = 0.3469(\mathrm{ADC1} - 195) \tag{7}$$

$$\mathrm{Energy[keV]} = 0.3307(\mathrm{ADC2} - 116) \tag{8}$$

$$\mathrm{Energy[keV]} = 0.3549(\mathrm{ADC3} - 116) \tag{9}$$

calibration 後のグラフは以下のとおり。横軸は [keV]

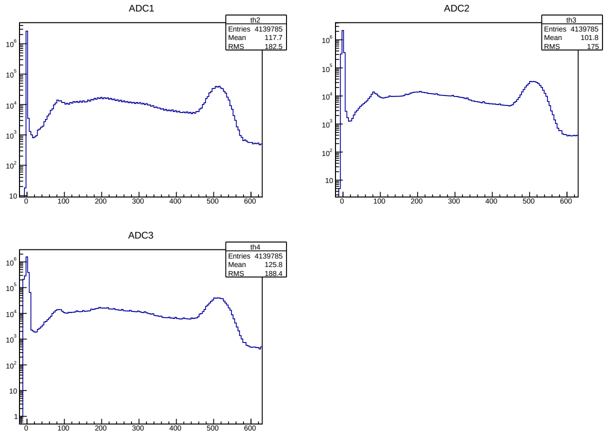


図 10　calibration 後のグラフ

4.1.2　TDC calibration

ADC 同様、まず TDC の生のデータを以下に示す。
今回は TDC4 しか必要でないので、TDC4 の calibration のみを行う。

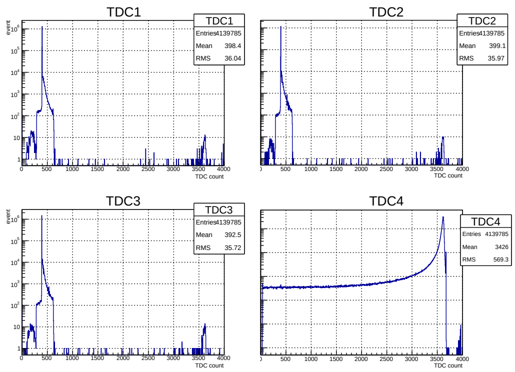


図 11　TDC の生データ

回路に組み込んでおいた fixed delay と TDC の値を比べて最小二乗法で fitting する。

表 5　fixed delay と TDC4

delay [ns]	TDC4
205	866.0
440	1799.3
810	3275.5

fitting の結果、次の式が求まった。

$$\mathrm{Time[ns]} = 0.251 \times \mathrm{TDC4} - 12.1 \tag{10}$$

これを用いて TDC4 をキャリブレーションし、940ns からそれを引いたグラフが以下のグラフである。横軸は [ns]

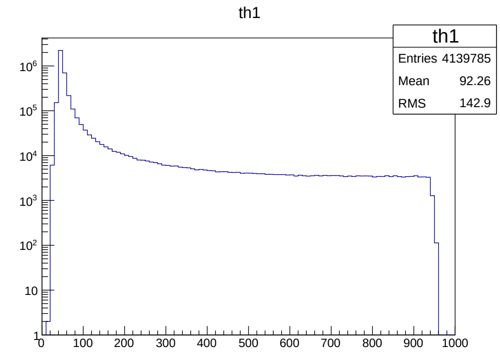


図 12　calibration 後の TDC4

また今回、TDC1,2,3 は定値を返すはずなのでそれぞれ、$394 \leq$ TDC1 ≤ 395、$394 \leq$ TDC2 ≤ 395 、$387 \leq$ TDC3 ≤ 389 のデータのみ用いる。

4.2　ペデスタルの取扱い

ADC の生データのグラフを見ると、ペデスタルと思われるピークが ADC2,4 で複数みられる。これがもし時間に依存して動いているのであれば、その時間毎に区切ってキャリブレーションをしなければならない。そこで、時間とペデスタルの関係を調べると、それぞれのペデスタルの変化が突発的に起こっていることがわかった。

次に、ADC2,4 のペデスタル変化の相関性について調べてみた。ペデスタル付近の ADC2,4 を二次元ヒストグラムにプロットすると、直線上に多くの点があることが分かる。よって ADC2,4 のペデスタル変化の原因は同じものであることが分かる。今回は時間変化していないので、ペデスタルのピークのミーンをペデスタ

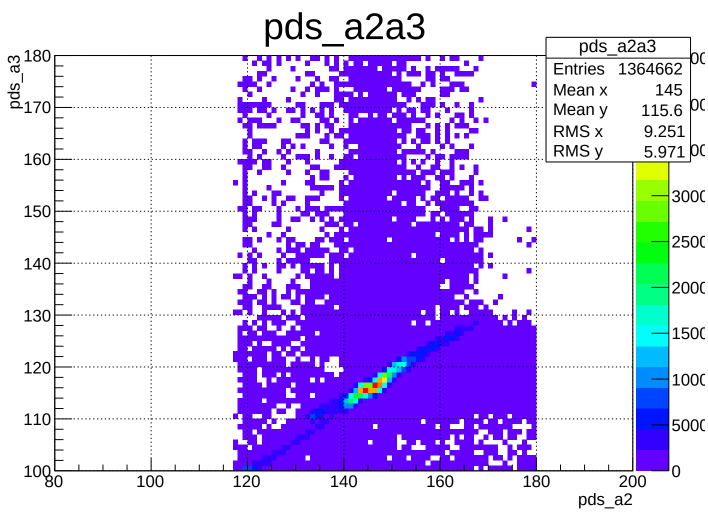


図 13　ペデスタル変化の相関

ルの固定値としてキャリブレーションを行った。また、上の相関図より二つの ADC のペデスタル変化には明らかに相関があるので、二つの原因は同じものであると思われる。

4.3　TQ 補正

4.3.1　TQ 補正

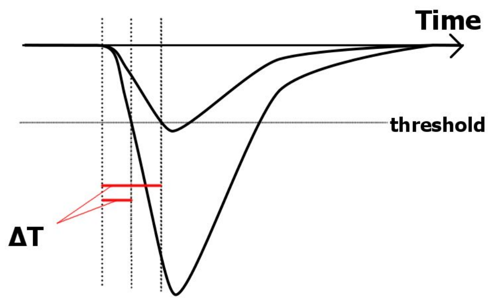


図 14　NaI からの信号をオシロスコープで見た図

図 14 に示すとおり、NaI から発される信号は立ち上がるのに時間を要する。そのため、信号が threshold を超える時刻は、真に信号がを受けはじめた時刻より遅れる。そしてその時間差 ΔT は信号の大きさ、すなわち γ 線のエネルギーの大きさに依存する。そこで ΔT を見積り、TDC4 の値から得た信号のタイミング Time を Time − ΔT に補正する。これが TQ 補正である。時間のずれは次の図 15 から確認できる。

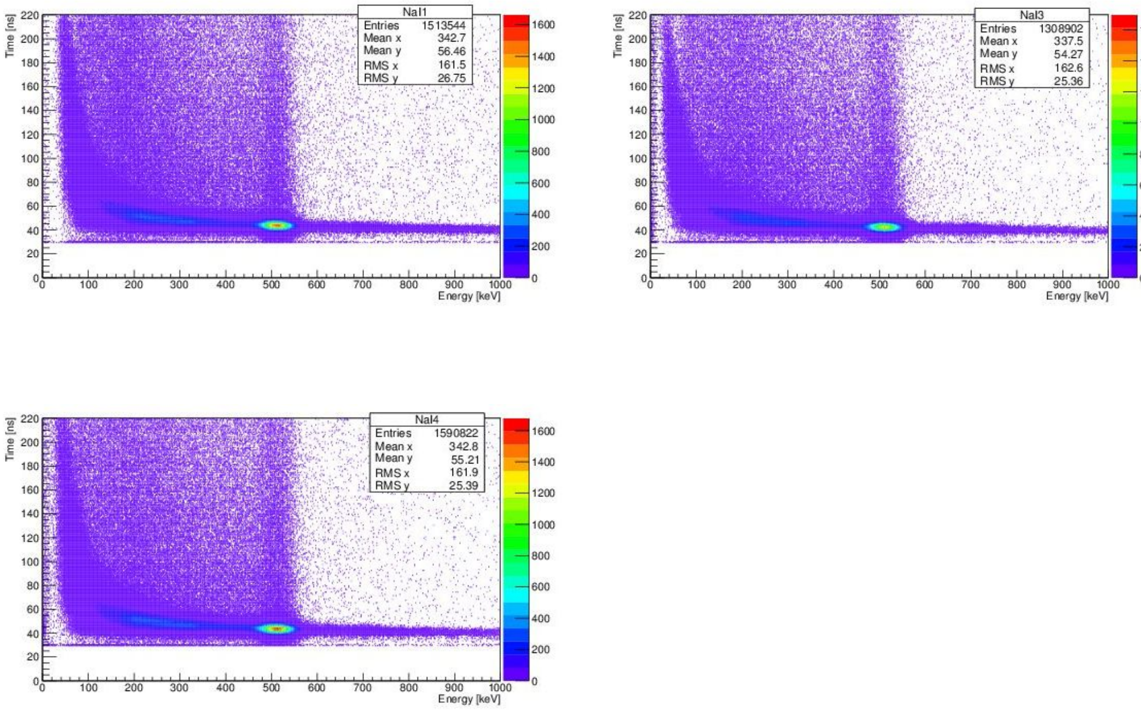


図 15　TQ 補正前のエネルギー対時間分布

4.3.2　TQ 補正関数の作成

TQ 補正関数は、 $\Delta\mathrm{T}$ をエネルギーの関数として表したものである。fitting に際して、 $\Delta\mathrm{T}$ の関数形は次のように仮定した。

$$\Delta\mathrm{T} = \frac{p_0}{(\mathrm{energy} - p_1)^{p_2}} \tag{11}$$

これは、信号の形を三角形として近似した場合に、$\Delta\mathrm{T}$ がエネルギーの -1 乗に比例することを意識したものである。fitting に用いたデータは、もっともよく見える p-Ps による現象 (Time = 40ns 付近) である。p-Ps の寿命は 0.13ns と極めて短いので、この時刻が Ps 生成時刻とみなせる。

まず $\Delta\mathrm{T} + p_3$ で fitting した。

これを用いて補正した図を掲載する。

4.3.3　TQ 補正後の寿命

この時点で一度 o-Ps の寿命を求めてみた。エネルギー 0keV~550keV のデータを用いて、100ns~900ns の範囲で fitting した。fitting 関数は

$$\mathrm{count} = p_0 \exp\left(-\frac{\mathrm{Time}}{p_1}\right) + p_2 \tag{12}$$

とした。 p_1 が寿命 τ_{ortho} に等しい。fitting 結果を掲載する。

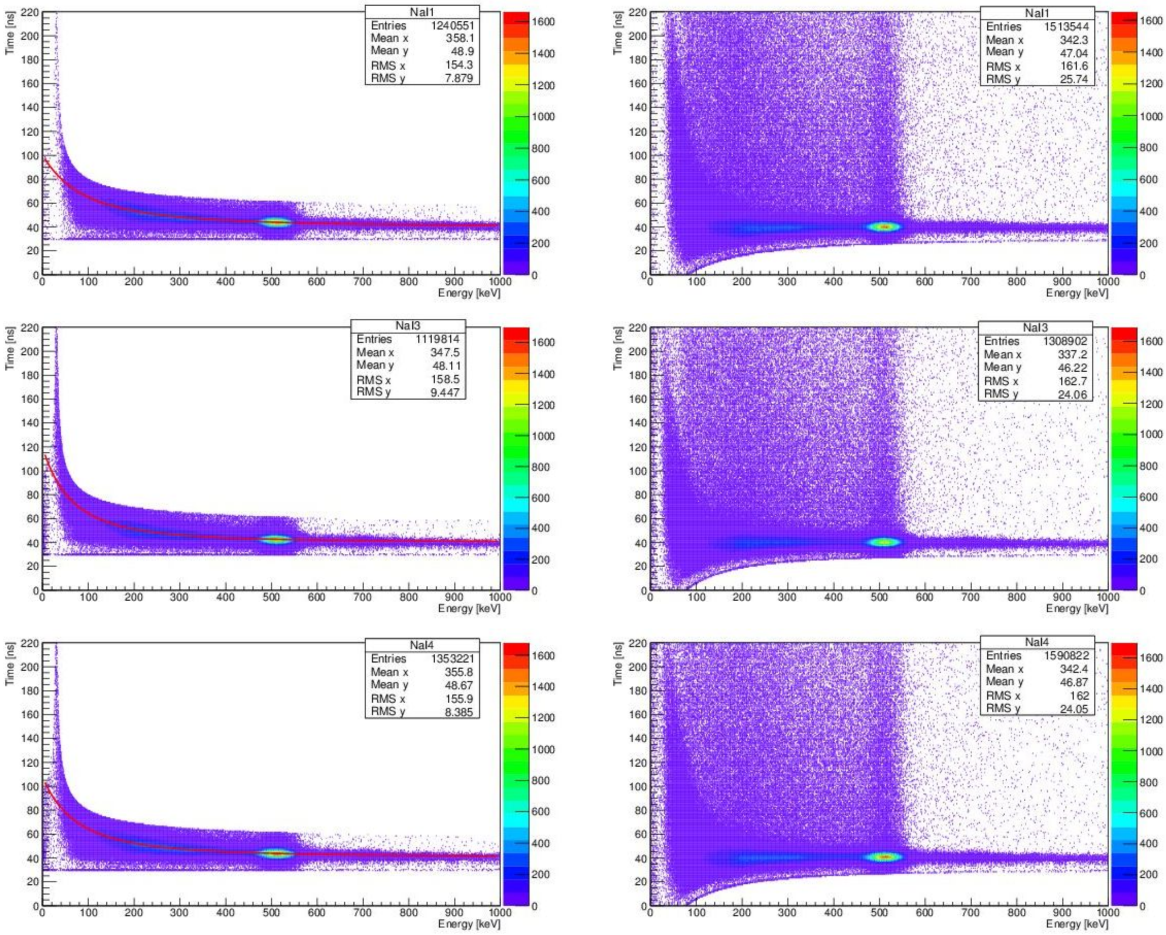
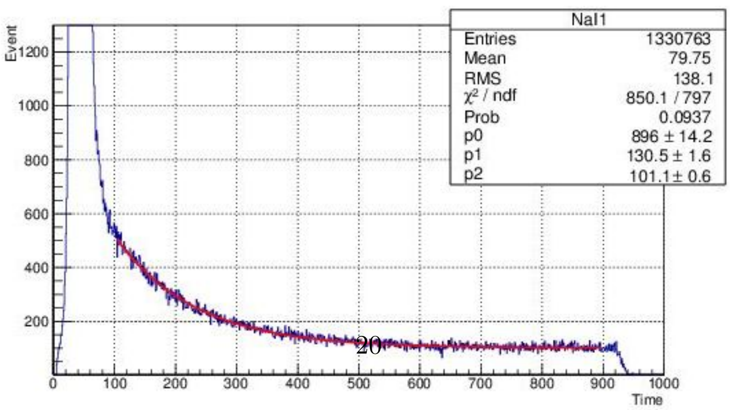
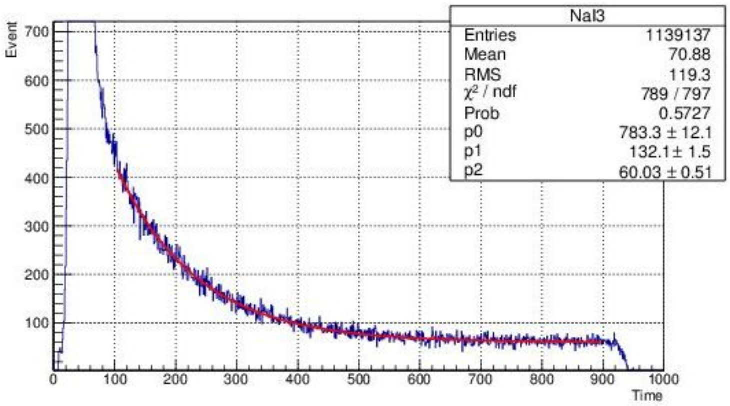


図 16　TQ 補正関数と補正後のエネルギー対時間分布

表 6　TQ 補正関数の fitting

	p_0	p_1	p_2	p_3
NaI1	4.948×10^6	-196.3	2.144	40.07
NaI3	1.493×10^7	-156.6	2.405	40.26
NaI4	4.953×10^6	-165.0	2.197	40.79





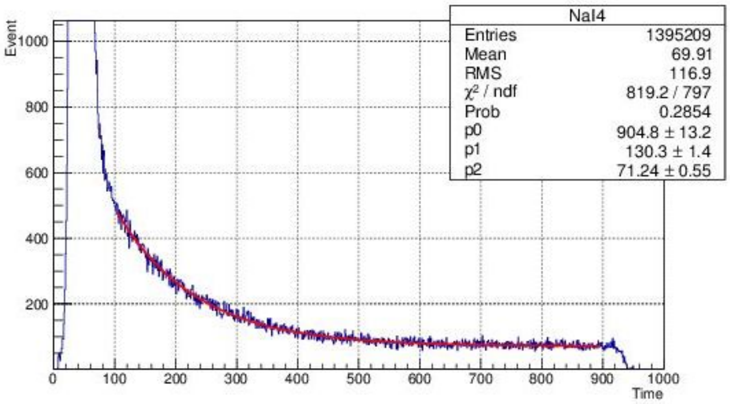


図 17　pick-off 補正前の寿命の fitting 関数

表 7　pick-off 補正前の寿命の fitting

	p_0	p_1	p_2
NaI1	896.0	132.1	101.1
NaI3	783.3	130.5	600.3
NaI4	904.8	130.3	71.2

すなわち、検出器ごとに算出した o-Ps の寿命は、

NaI1：130.5ns

NaI3：132.1ns

NaI4：130.3ns

である。pick off 反応を考慮していないため、理論値よりも小さい値となっている。

4.4 pick-off 補正

4.4.1 pick-off 補正

o-Ps は周囲の物質とスピン交換をして p-Ps となって崩壊したり、結合状態の陽電子が周囲の電子と対消滅を起こしたりすることがある。これらの o-Ps としての崩壊とは異なる反応を pick-off 反応と呼ぶ。これと o-Ps としての崩壊が競合するため、崩壊幅は次のようになる。

$$\Gamma_{\mathrm{obs}} = \Gamma_{\mathrm{ortho}} + \Gamma_{\mathrm{pick-off}} \tag{13}$$

Γ_{obs} は実験から直接知ることができる崩壊幅である。pick-off 反応の崩壊幅、$\Gamma_{\mathrm{pick-off}}$ は熱化により時間変化することが知られている。その時間依存性は Ps 生成の場所となる物質 (今回は SiO_2) に依存すると考えられるが、我々は今回、具体的な関数形についての情報を持っていないので、データ分布から仮定した。

4.4.2 pick-off 補正関数の作成

図 16 の 40ns 付近に見られるのは p-Ps の崩壊である。それより遅い時間に見られる 511keV のデータは pick-off 反応による崩壊である。100ns 程度以降に 500keV 以下に見られるデータは、pick-off 反応の崩壊の compton 散乱と o-Ps の崩壊である。511keV γ 線のピークとその compton 散乱のスペクトル形がどの時刻でも相似であるとみなし、o-Ps の崩壊のみを取り出した。

まず、取り出す時刻 (t とする) での 511keV ピークの高さと、40ns 付近でのそれの高さが一致するようスケール調節した。調節するのは、40ns でのスペクトルである。(この時刻のスペクトルを 511keV γ 線のピーク及び compton 散乱のスペクトル形として用いた。) スケール調節後のスペクトルを、時刻 t での pick-off 反応のスペクトルと解釈した。そして、時刻 t でのスペクトルからスケール調節したスペクトルを引けば、その差分が o-Ps の崩壊によるスペクトルになる。

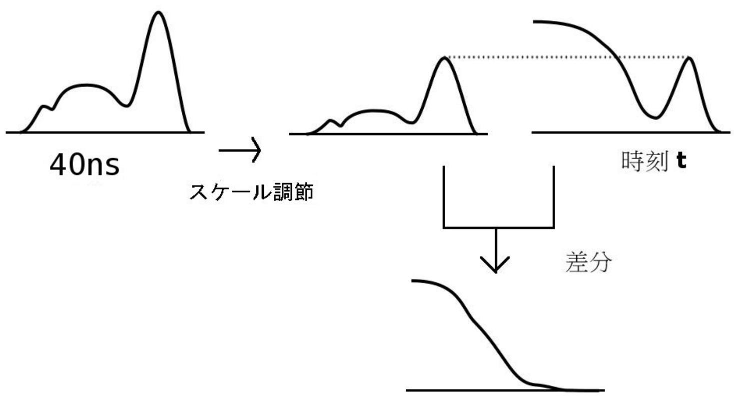


図 18 o-Ps の取り出し

時刻 t での pick-off 反応 (による崩壊) と o-Ps の崩壊の検出数を $\Delta N_{\mathrm{pick-off}}$ 、$\Delta N_{\mathrm{ortho}}$ とすると、時刻 t での崩壊幅の比は

$$\frac{\Gamma_{\mathrm{pick-off}}(t)}{\Gamma_{\mathrm{ortho}}} = \frac{\Delta N_{\mathrm{pick-off}}(t)}{\Delta N_{\mathrm{ortho}}(t)} \tag{14}$$

と表せる。この比が pick-off 補正関数 $f(t)$ である。

我々が検出しているのは Ps の崩壊であるから、寿命を求める際の fiting 関数は

$$-\frac{dN}{dt}(t) = N_0\big(\Gamma_{\mathrm{ortho}} + \Gamma_{\mathrm{pick-off}}(t)\big)\exp\left(-\int^t dt\big(\Gamma_{\mathrm{ortho}} + \Gamma_{\mathrm{pick-off}}(t)\big)\right) \tag{15}$$

$$= N_0\big(\Gamma_{\mathrm{ortho}} + \Gamma_{\mathrm{pick-off}}(t)\big)\exp\left(-\frac{1}{\tau_{\mathrm{ortho}}}\int^t dt\big(1 + f(t)\big)\right) \tag{16}$$

のような形で行うことにした。

200ns から 850ns まで 50ns ごとに、 $\Gamma_{\mathrm{pick-off}}(t)/\Gamma_{\mathrm{ortho}}$ の値を調べた。取り出すデータの時間的幅は、

40ns の pick-off 反応の雛形： 前後 5ns

実際に調べる各時刻のスペクトル： 前後 50ns である。

この様にして得た崩壊幅の比の時間変化を見、次式で fitting し、pick-off 補正関数とした。

$$f(t) = p_0 \exp(-\frac{t}{p_1}) + p_2 \tag{17}$$

その結果が次の表及び図である。

表 8 $\Gamma_{\mathrm{pick-off}}/\Gamma_{\mathrm{ortho}}$

	NaI1	NaI3	NaI4
Time [ns]	$\Gamma_{\mathrm{pick-off}}/\Gamma_{\mathrm{ortho}}$		
200	0.28800	0.35137	0.34476
250	0.28387	0.33308	0.33702
300	0.23587	0.28397	0.30737
350	0.20338	0.22832	0.26247
400	0.16172	0.20965	0.22635
450	0.15538	0.18035	0.20768
500	0.13253	0.15281	0.19068
550	0.11915	0.13291	0.15483
600	0.09405	0.12098	0.12889
650	0.09863	0.12981	0.14166
700	0.09213	0.10918	0.12564
750	0.09753	0.09392	0.12270
800	0.08989	0.10313	0.12813
850	0.08696	0.10161	0.13351

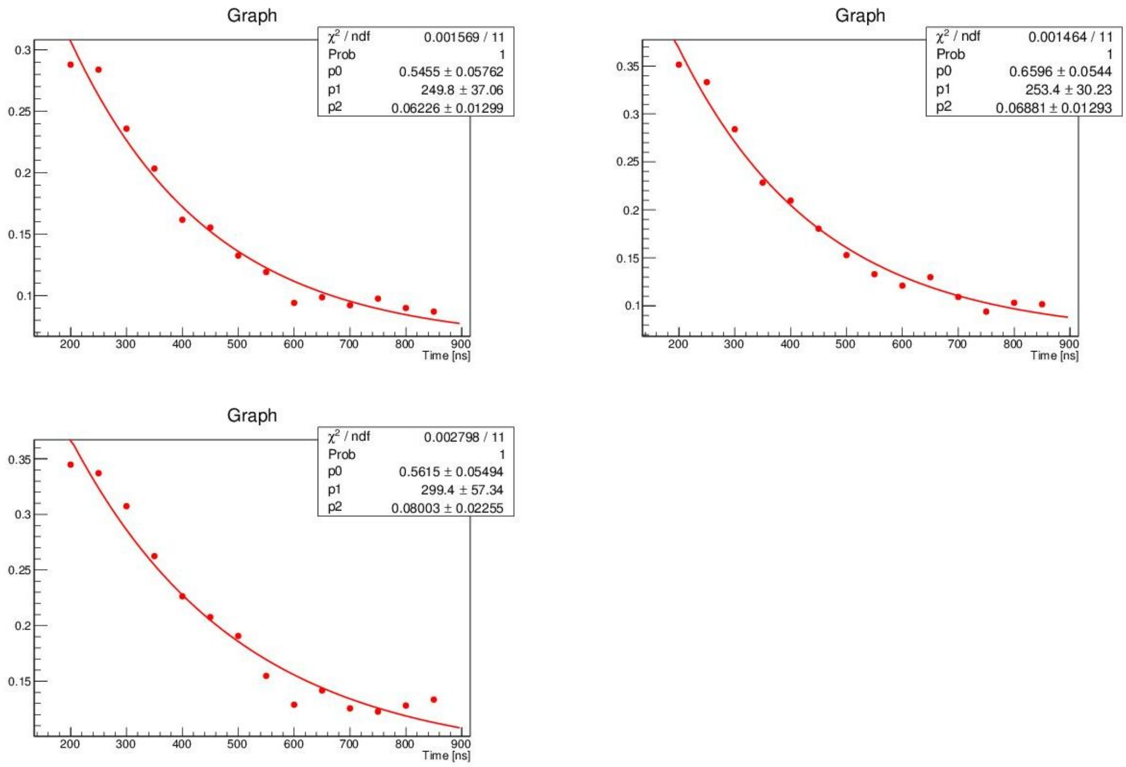


図 19　pick-off 補正関数

表 9　pick-off 補正関数の fitting

	p_0	p_1	p_2
NaI1	0.5455	249.8	0.06226
NaI3	0.6596	253.4	0.06881
NaI4	0.5615	299.4	0.08003

4.4.3　pick-off 補正後の寿命

これを用いて、再び寿命を評価した。エネルギー・時間の範囲は前回に準ずる。fitting 関数は、

$$p_0(1+f(t))\exp\left(-\frac{1}{p_1}\int dt(1+f(t))\right)+p_2 \tag{18}$$

である。前回同様、 p_1 が寿命 τ_{ortho} に等しい。fitting 結果を掲載する。

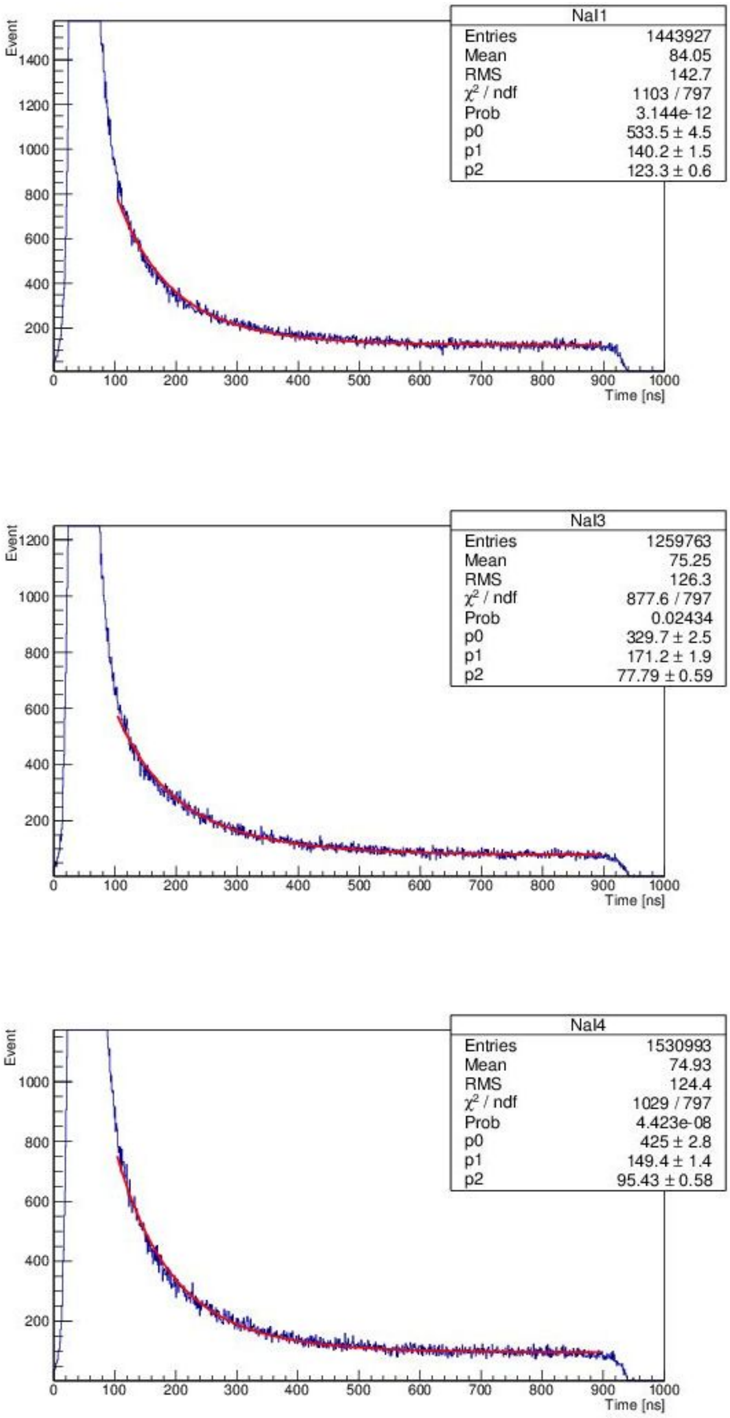


図 20　pick-off 補正後の寿命の fitting 関数

表 10　pick-off 補正後の寿命の fitting

	p_0	p_1	p_2
NaI1	533.5	140.2	123.3
NaI3	329.7	171.2	77.79
NaI4	425.0	149.4	95.43

検出器ごとに算出した o-Ps の寿命は、

NaI1：140.2ns
NaI3：171.2ns
NaI4：149.4ns

である。NaI3 と他のシンチレータで値が大きく異なる。

5　考察

5.1　考察内容

今回、以下の 2 点について考察を行った。

1. 誤差の評価
2. ペデスタルの問題

5.2　誤差の評価

今までの話では触れていなかったが、本来解析の際には様々な誤差が生じている。そして、これらの誤差により、寿命の値にはある程度の不定性があるはずである。そこで、これらの誤差が寿命の値にどの程度影響するかを計算していくことにする。

今回、寿命に誤差を生ずる要因として、以下の 3 つについて考える。

1. TDC4 の calibration 関数の誤差
2. TQ 補正関数の誤差
3. pick-off 補正関数の誤差

5.2.1　TDC4 の calibration 関数の誤差

TDC4 の calibration 関数は図 11 における横軸を時間に直すのに使われる。そのため、この関数の誤差は寿命に直接影響する。とくに傾きの誤差は、時間軸のスケールに直接影響するため、寿命への影響として重要視するべき要素である。

今回、TDC4 の calibration には、表 5 を用いたが、その結果を誤差まで含めると以下のようになった。

$$\mathrm{Time[ns]} = (0.251 \pm 0.000184)\mathrm{TDC4} + (-12.1 \pm 0.4751) \tag{19}$$

これより、TDC4 の calibration 関数の傾きのは 0.07% 程度の誤差があることが分かる。したがって、寿命にも百分の数 % 程度の誤差があると思われる。

5.2.2　TQ 補正関数の誤差

ここで求めた関数を用いて TQ 補正を行うので、関数の誤差は直接補正の結果に影響してくる。したがって、寿命値にも影響してくる。

TQ 補正は、式 11 を用いて行ったが、fitting の際に出力されたパラメータの計算結果には誤差も同時に表示された (表 11 参照)。これらの誤差をもとに誤差の伝播公式を用いて、TQ 補正関数の誤差を表す関数 $\sigma_{\Delta\mathrm{T}}$ を求め、その誤差を含めた関数で TQ 補正を行い、再度同じ方法で寿命を求めた。その結果得られた寿命を表 12 に示す。

表 11　TQ 補正関数のパラメータ

	p_0	p_1	p_2
NaI01	4.948e6±4.385	-196.3±3.430	2.144±0.01515
NaI03	1.493e7±8.975	-156.6±1.952	2.405±0.01037
NaI04	4.953e6±4.541	-165.0±2.798	2.197±0.01481

表 12　誤差を含めたときの寿命

	$\Delta\mathrm{T}$	$\Delta\mathrm{T} + \sigma_{\Delta\mathrm{T}}$	$\Delta T - \sigma_{\Delta\mathrm{T}}$
NaI01	140.2	143.0	135.9
NaI03	171.2	173.7	168.4
NaI04	149.4	151.4	144.4

5.2.3　pick-off 補正関数の誤差

pick-off 補正関数 f についても TQ 補正関数と同じようにして pick-off 補正関数の誤差を表す関数 $\sigma_{\Delta\mathrm{f}}$ を用いて、再度寿命を求めた。

表 13　pick-off 補正関数のパラメータ

	p_0	p_1	p_2
NaI01	0.5455±0.05762	249.8±37.06	0.06226±0.01299
NaI03	0.6596±0.0544	253.4±30.23	0.6881±0.01293
NaI04	0.5615±0.0594	299.4±57.34	0.08003±0.02255

表 14　誤差を含めたときの寿命

	f	$f + \sigma_{\Delta f}$	$f - \sigma_{\Delta f}$
NaI1	140.2	141.8	138.6
NaI3	171.2	173.2	169.1
NaI4	149.4	151.2	147.4

5.2.4　誤差の評価

ここまでは、各々の誤差について評価する時、他の誤差は考慮せずに評価してきた。しかし、本来誤差の評価ではすべての誤差をその都度考慮した寿命を求めるべきである。今回の場合、Tq-fitting 関数と pick-off 補

正関数の両方の誤差を考慮した寿命を求めるべきである。

そこで、Tq-fitting 関数の誤差を考慮して行った Tq 補正に対し、さらに pick-off 補正関数の誤差も考慮して pick-off 補正を行い寿命を求めた。そのうち寿命が一番大きくなったものと一番小さくなったものを図 15 に示し、誤差の評価とする。

表 15　寿命の誤差

	確定値	最大値	最小値
NaI1	140.2	145.0	134.1
NaI2	171.2	176.0	165.9
NaI3	149.4	152.9	142.5

5.2.5　寿命を求める fitting の際の誤差

寿命を求める fitting の時にも誤差が出力されるので、以下にそれを示しておく。

表 16　寿命

NaI1	140.2±1.5
NaI3	171.2±1.9
NaI4	149.4±1.4

5.3　ペデスタルの問題

すでに述べたように、今回の測定ではペデスタルのピークが一つではなく、複数観測されてしまった。次にこの原因について考察していく。

まず初めに、昼夜の使用電力の関係などで、印加した電圧が一定でなく時間によって多少変化していた可能性を考えペデスタルの時間変化を調べた。時間帯によってペデスタルが変化しているのであれば、ピークの点が時間によって推移するはずである。しかし、図 21 から、そうではないと分かる。ペデスタルは時間に依存せず、突発的に変化していることになる。また、ADC2 と ADC4 がペデスタルを観測するとき ADC1 は 511keV のピークを観測するわけだが、ADC1 の 511keV のピークは一つしか観測されないことからも、電圧変化によるものとは考えにくいと思われる。

次に、ADC2 と ADC4 の相関性を調べた。その結果、ADC2 と ADC4 は比例関係にあることが分かった。このことから、ADC2 と ADC4 でペデスタルのピークが複数観測される原因は同一のものである可能性が高いと考えられる。

次に、ADC1 に NaI2、ADC2 に NaI1、ADC4 に NaI4 を接続しなおして再度測定した。すると今度は ADC1 のペデスタルに複数のピークが見られた。このことから、ピークが分かれる原因は ADC ではないことが分かる。また、この時の測定時間は約１時間３０分と短かったのにも関わらず、ピークの分裂が測定できている。このことから、昼夜での電圧の変化のような長期的な変化が要因ではないことが分かる。

以下、今回の考察で分かったこと

1. ピークの分裂は突発的に起こる
2. 長期的な変化が要因ではない
3. ADC の故障ではない
4. ADC2 と ADC4 でピークが分裂する要因は同じものである可能性が高い

外部要因でこのように短期的かつ突発的な要因は考えにくい。また、要因が同じものである可能性を考えると、コードが同じように壊れていた可能性は低いので、それはないと思われる。

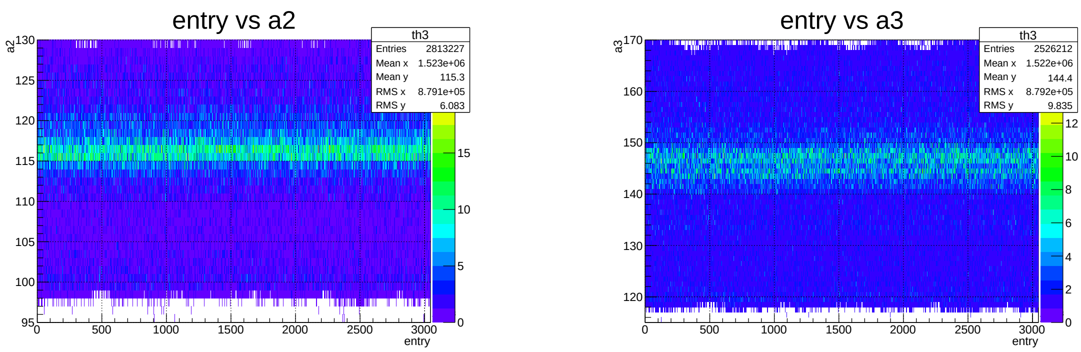


図 21　ペデスタルの時間変化

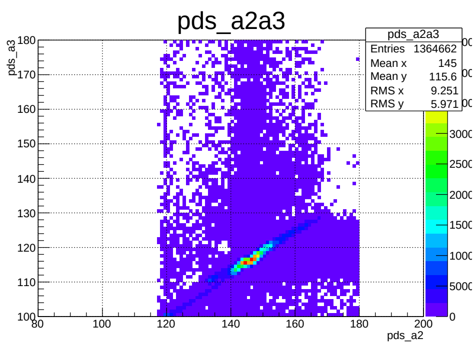


図 22　ADC2 と ADC4 の相関性

5.4　おわりに

5.4.1　今回の実験について

今回は前回までの実験から NaI を新たに 1 つ増やし、3 つ用いて測定を行った。配置には多少工夫を要したが、その結果、前回までより少ない時間で測定を行うことができた。新しく設置した NaI の測定も他の NaI と遜色なく行うことができ、とても有意義な試みであったと思う。

また、前回の実験で見られた TDC4 の 700ns あたりのピークは観測されなかった。前回の実験でも原因が解明されていなかった現象だけに、謎は深まるばかりである。

今回、鉛の特性 X 線と思われているピークは有意に観測されなかった。

5.4.2　課題演習として

今回 1 回生以来の実験であった。とくに、ここまで長期間かけて行う実験は初めてだった。ROOT や実験機器など、新しいことばかりであったが、何回も使っていくうちに徐々になれていった。途中上手くいかないこともあったが、なんとか乗り越えることができた。今回の実験で使った技術は今後物理を勉強していくときに、必要になってくる技術であると思うので、しっかりと頭にとどめ、いかしていきたい。

謝辞

期末実験を進めるにあたり、懇切丁寧に指導、助言してくださった石野雅也准教授と隅田土詞助教に感謝致します。また、実験にお付き合い頂いた TA の救仁郷氏と田代氏に感謝致します。