

2022 年度後期課題演習 A2

オルソポジトロニウムの寿命測定

溝添泰隆 佐々木駿斗 三木幸大 上林暉 藤木恒成 齊藤巧磨

2023 年 4 月 12 日

目次

1	実験目的	2
2	理論	2
2.1	ポジトロニウム	2
2.2	Ps の崩壊様式	2
2.3	寿命の理論値	4
3	実験方法	4
3.1	実験原理	4
3.2	実験器具	4
3.3	セットアップ	5
3.4	回路	5
4	実験結果・解析	8
4.1	実験開始前に発生した問題点	8
4.2	生データ	9
4.3	Calibration	9
4.4	TQ 補正	10
4.5	Pick-off 補正	15
5	考察	20
5.1	生データについて	20
5.2	不適切なデータをカットした寿命計算について	22
5.3	Ps の生成を疑うべき新たな視点	23
5.4	シリカパウダーを抜いて再実験	23

1 実験目的

本実験ではオルソポジトロニウムの寿命測定を通じて量子電磁力学 (以下 QED) の実験的検証を行う。通常の (多体系の) 量子力学において場を量子化することで得られる QED では相互作用項が各場の点接触という形で理論の内部で第一義的に決定されており, 物理量を演算子化しただけの量子力学とは違った相互作用を示す。そのため QED は通常の量子力学では記述できない物理現象を予言し, その物理現象の検証は QED が量子力学を包含した, より正確な基礎理論であることを実験的に証明する重要な仕事である。

QED の記述する物理現象の一つに, 電子と陽電子が対として束縛状態を形成しある寿命の後に崩壊するという現象がある。この電子陽電子対の束縛状態をポジトロニウムといい, ポジトロニウムの崩壊現象は, そもそも理論に反粒子の登場しない通常の量子力学では記述できない現象であり, この現象の検出は QED を支持する強力な実験的証拠となる。本実験ではポジトロニウムのうち, 比較的寿命の長い 3 重項状態であるオルソポジトロニウムの寿命測定を行い, 得られた寿命の測定値を QED による理論値と比較する。

2 理論

2.1 ポジトロニウム

ポジトロニウムとは電子と陽電子の準安定な束縛状態である。ポジトロニウムは電氣的に中性であることからある種の原子 (エキゾチック原子) とも捉えることができ, 以下では元素的表記としてポジトロニウムを Ps と書く。

Ps は二種類に大別され, スピン一重項状態のものをパラポジトロニウム (以下 p-Ps), スピン三重項状態のものをオルソポジトロニウム (以下 o-Ps) と呼ぶ。

2.2 Ps の崩壊様式

一般に真空中の Ps はある時間 (寿命) だけ経過すると崩壊し, 電子陽電子の対消滅により γ 線光子を放出する。崩壊時に放出する光子数は, p-Ps では偶数個で, o-Ps では奇数個であり, この事実を以下に証明する。

2.2.1 p-Ps

一般に Ps の状態ケット $|\text{Ps}\rangle$ は

$$|\text{Ps}\rangle = |\psi(\mathbf{r}_{e^-}, \mathbf{r}_{e^+})\rangle \otimes |jm\rangle \quad (1)$$

と書け, 荷電共役演算子を \hat{C} とすると, 荷電共役変換は粒子反粒子を入れ替える操作であることから, 電子陽電子のフェルミ統計性より

$$\hat{C}|\psi(\mathbf{r}_{e^-}, \mathbf{r}_{e^+})\rangle = -|\psi(\mathbf{r}_{e^-}, \mathbf{r}_{e^+})\rangle \quad (2)$$

である。

さて p-Ps の状態ケット $|\text{p-Ps}\rangle$ は

$$|\text{p-Ps}\rangle = |\psi(\mathbf{r}_{e^-}, \mathbf{r}_{e^+})\rangle \otimes |0, 0\rangle \quad (3)$$

であり

$$\hat{C}|0, 0\rangle = -|0, 0\rangle \quad (4)$$

より

$$\begin{aligned}\hat{C}|\text{p-Ps}\rangle &= (-|\psi(\mathbf{r}_{e^-}, \mathbf{r}_{e^+})\rangle) \otimes (-|0, 0\rangle) \\ &= |\text{p-Ps}\rangle\end{aligned}\quad (5)$$

である.

一方で p-Ps が n 個の γ 線光子となった終状態 $|n\gamma\rangle$ は, i 番目の光子の生成演算子を a_i^\dagger として

$$|n\gamma\rangle = a_1^\dagger a_2^\dagger \cdots a_n^\dagger |0\rangle \quad (6)$$

と表せるが, a_i^\dagger の荷電共役変換は, 電磁場の荷電共役変換 $\hat{C}A_\mu\hat{C}^{-1} = -A_\mu$ であることと, A_μ が a_i^\dagger と a_μ の線型結合であることから

$$\hat{C}a_i^\dagger\hat{C}^{-1} = -a_i^\dagger \quad (7)$$

であり, これを用いると終状態 $|n\gamma\rangle$ の荷電共役変換は

$$\hat{C}|n\gamma\rangle = (-1)^n |n\gamma\rangle \quad (8)$$

となる. しかしながら QED は荷電共役不変な理論なので, p-Ps の崩壊前後で変換性は変わらず

$$\hat{C}|n\gamma\rangle = |n\gamma\rangle \quad (9)$$

となるはずなので, n は偶数である.

2.2.2 o-Ps

オルソポジトロニウムの状態ケット $|\text{o-Ps}\rangle$ は

$$|\text{o-Ps}\rangle = |\psi(\mathbf{r}_{e^-}, \mathbf{r}_{e^+})\rangle \otimes |1, m\rangle \quad (10)$$

であり ($m = \pm 1, 0$)

$$\hat{C}|1, m\rangle = |1, m\rangle \quad (11)$$

より

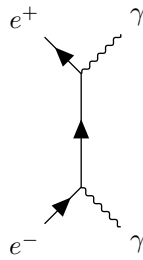
$$\begin{aligned}\hat{C}|\text{o-Ps}\rangle &= (-|\psi(\mathbf{r}_{e^-}, \mathbf{r}_{e^+})\rangle) \otimes |1, m\rangle \\ &= -|\text{o-Ps}\rangle\end{aligned}\quad (12)$$

であり, 崩壊前後の荷電共役不変性から

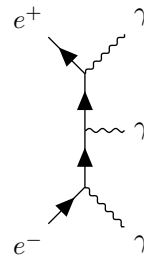
$$\hat{C}|n\gamma\rangle = -|n\gamma\rangle \quad (13)$$

となるはずなので, n は奇数であることが要請される.

しかしながら任意の奇数個への崩壊が可能というわけではなく, 実は運動量保存の要請から $n = 1$ への崩壊はありえない. o-Ps の重心系では崩壊前の全運動量は 0 だが, 1 個の光子へ崩壊したと仮定すると, 光速不変の原理からその光子は重心系でも光速であり運動量を有するので, 運動量保存則に矛盾する. したがって o-Ps は $n \geq 3$ 個の光子へとしか崩壊しない.



(a) p-Ps の 2 光子崩壊のダイアグラム



(b) o-Ps の 3 光子崩壊のダイアグラム

図 1: Ps 崩壊の主要なダイアグラム

2.3 寿命の理論値

Ps の寿命は QED の摂動計算によって求められるが、崩壊確率はファインマンダイアグラムの vertex の個数が 1 つ増えるごとに $\alpha \simeq 0.007$ 倍になるので $n \geq 4$ の寄与は無視でき、以下実験では p-Ps は光子 2 つに、o-Ps は光子 3 つに崩壊すると考える。

さて寿命の理論値は p-Ps が 0.124 ns で o-Ps が 142 ns である。ただし o-Ps の寿命計算は高次の摂動も考慮している。o-Ps は vertex が p-Ps より 1 つ多いので崩壊確率が p-Ps より小さく、そのため寿命が比較的長いので、本実験では o-Ps の寿命を測定する。

3 実験方法

3.1 実験原理

線源として用いる ^{22}Na は β^+ 崩壊によって陽電子線 (β^+ 線) を放出する。この陽電子をシリカパウダー (SiO_2) 中の電子と相互作用させて Ps を生成させる。この時シリカパウダーを用いるのは、最外殻電子数が多く、陽電子と反応しやすいためである。

実際の実験では、発生した β^+ 線を PSc で検出、通過した陽電子がシリカパウダーに入り、Ps を生成する。その後 Ps が崩壊した際に出す γ 線を NaI シンチレーターで検出する。(図 2 参照) この時線源からシリカパウダーまでの飛程と、シリカパウダーから NaI シンチレーターまでの飛程の時間を十分短いと仮定すると、PSc で検出されてから NaI シンチレーターで検出されるまでの時間差が、Ps の寿命ということになる。

3.2 実験器具

- **線源:** ^{22}Na - β^+ 崩壊により β^+ 線を放出するナトリウムの放射性同位体。放出される放射線には、このほかに崩壊後の励起状態から基底状態に戻る際に放出される 1275 keV の γ 線と、 e^+ が線源中で対消滅した際に放出される 511 keV の γ 線がある。これらの γ 線が NaI シンチレーターで検出される可能性があることに注意する。利用可能なもののうち、より線量の多かった No. 21 の線源を用いた。
- **プラスチックシンチレーター (PSc):** 薄膜状のシンチレーターで β^+ 線を透過させながら検出する

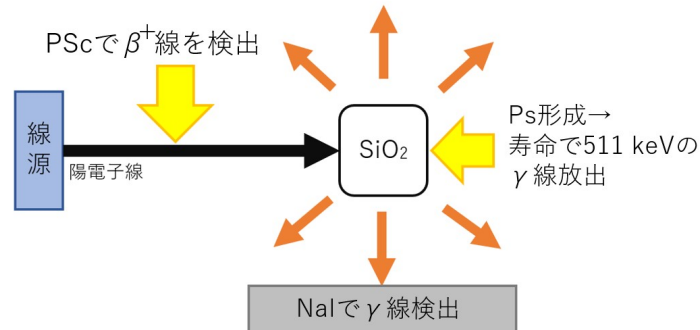


図 2: 実験原理の概念図

検出器. NaI シンチレーターに比べて励起時間が短い特徴がある.

- **NaI シンチレーター:**Ps 崩壊後の γ 線を検出する検出器. 3つのシンチレーターを図3の配置で配置した.
- **シリカパウダー:** 主成分 SiO_2 . 最外殻電子が多いため, e^+ と反応して Ps を生成しやすい.
- **鉛ブロック:** 外部からの放射線の影響を少なくするため装置全体を鉛ブロックで囲う. また線源からの β^+ 線がシリカパウダーにのみ入るように, 小さな穴の開いた鉛ブロックを用いて β^+ 線の方角を限定した.
- **遮光シート:** 可視光等によるシンチレーターの誤検出を防ぐため装置全体を黒い遮光シートによって覆う.
- **電源装置: 林栄精器株式会社/RPH-034/QUAD HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY:** シンチレーターに電圧をかける装置.

3.3 セットアップ

図 2, 3 のように各検出器を配置する. β^+ 線の方角を指向するために穴の開いた鉛ブロック (図 3 中の黄色い部分) を用いる.

NaI シンチレーター, PSc にはそれぞれ 1200 V, 1600 V の電圧をかけた. シリカパウダーは最適化のため容器を斜めに傾けて配置した.

3.4 回路

実際の実験測定において, PSc が検出してから NaI シンチレーターが検出するまでの時間を直接計測すると, PSc の検出数が非常に多くなるため, NaI シンチレーターの信号に対応する PSc の信号を判別することができない. そのため実際の実験では PSc の信号から gate を生成し, NaI シンチレーターの信号と coincidence

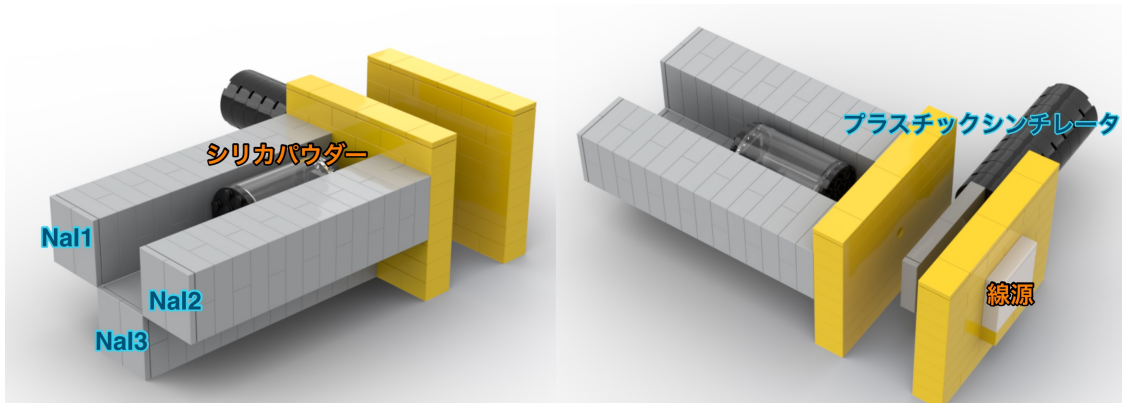


図 3: 検出器のセットアップのイメージ図

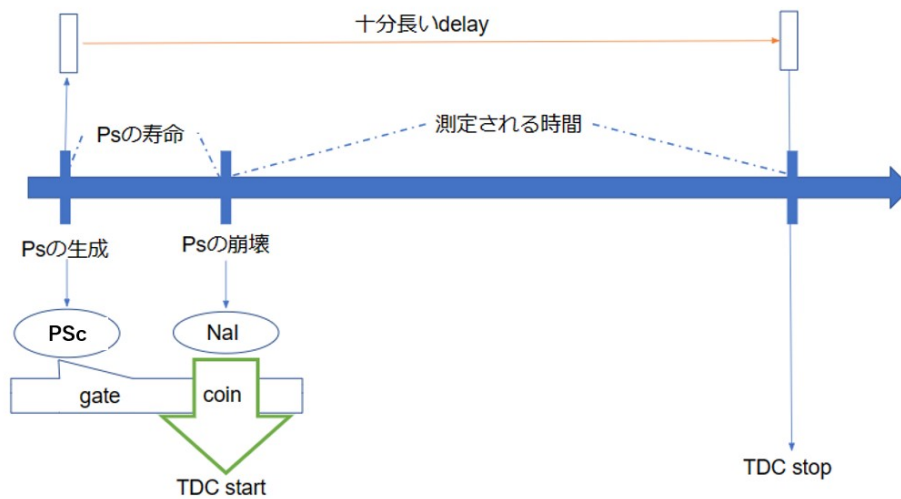


図 4: 寿命測定概念図

をとったものをトリガーとして時間計測をはじめ、一定時間遅延させた PSc の信号までの時間を計測することで寿命測定を可能にしている。

概念図を図 4 に示す。

実際の寿命は

$$(\text{寿命}) = (\text{delay}) - (\text{TDC}) \tag{14}$$

によって求められる。本実験では delay を 850 ns に設定した。

上記の測定を可能にするため、実験で用いた回路を図 5 に示す。

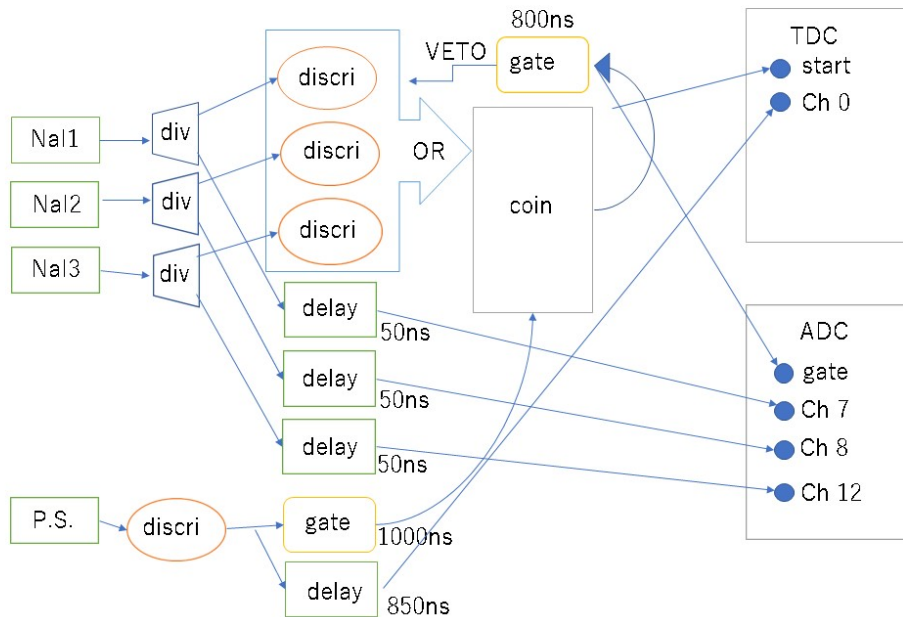


図 5: 寿命測定回路図

3.4.1 図 5 中の実験器具

- **divider**(図中 div): 入力信号を二つの端子に分けるユニット.
- **discriminator**(図中 discri): 入力信号が任意の一定電圧を超えた場合に一定の長さの NIM 信号を生成するユニット. Threshold は NaI シンチレータの Discri は 17.3 mV, PSc の discri は 11.4 mV に設定した.
- **delay**: 信号を任意の時間遅らせるユニット.
- **gate generator**(図中 gate): NIM 信号が入力された際, 任意の長さの gate(長い NIM 信号) を出力するユニット.
- **OR**: 複数の入力端子のうちいずれかに NIM 信号が入力された際に信号を出力するユニット.
- **coincidence**(図中 coin): 複数の入力端子に, 同時に NIM 信号が入力された際に信号を出力するユニット.
- **ADC**: gate に信号が入っている間, 各チャンネルの入力信号を積分するユニット. 生信号を各チャンネルに入力することで放射線のエネルギーを計測することができる.
- **TDC**: start に入力があった時点から各チャンネルに信号が入力されるまでの間, 一定電圧の信号を ADC と同様に積分することで二つの信号の間の時間差を測定するユニット. このデータを用いて寿命測定を行う.

4 実験結果・解析

4.1 実験開始前に発生した問題点

PSc の不具合

実験用に当初用いようとしていた PSc に 1600 V の電圧をかけようとする時、過電流で電源装置の安全機能が働くようになった。この問題は光電子増倍管 (PMT) を交換することで解決したが、その後シンチレーター自体の検出力に問題があったため、シンチレーター部分もより発光量の大きいものに交換した。

NaI シンチレーターの不具合

3つ用いた NaI シンチレーターのうち、シリカパウダー下部に配置した NaI3 がデータが常に 4096 の値を出力したため、後の解析では NaI3 のデータは用いなかった。

NaI シンチレーターと PSc の同期

実験開始前に装置の確認を行ったところ、NaI シンチレーターの検出信号と、PSc の検出信号の同期がとれなかった。coincidence を用いた確認だけでなく、オシロスコープによって 2 つの検出器の信号を比べたが、寿命程度の時間差をもって発生する信号はごくわずかだった。遮蔽用の鉛ブロックの穴の位置が合っていないことも考えられたが、遮蔽用のブロックを取り除いてもこの問題は継続した。前述の PSc の交換により直列配置ではシンチレーター間の同期がとれたため、この状態で実験を行うことにする。

NaI シンチレーター用の discriminator の不具合

一つの信号に対して複数の NIM 信号を発生させる現象が起こる。Width の調整による解決を試みるも解決しなかったため、discriminator の信号を適度に遅延させて gate を生成し、Veto に入れることで信号を単独にすることに成功した。

ADC チャンネルの不具合

ADC の全 15 チャンネルのうち、複数のチャンネルが正常に動作しなかったため、正常に動作することが確認された 7,8,12 チャンネルを用いた。

実験配置でのシリカパウダーでの反応

実験装置を実験配置 (図 3 参照) にした際、再度 PSc と NaI シンチレーターで同期がとれなくなった。PSc につながる discriminator のしきい値を下げることで同期がとれたが 31 回/5min 程度の頻度しかなく、シリカパウダー無しでも同程度 (39 回/ 5 min) の頻度が得られた。つまり得られているデータは Ps 崩壊によるものではない可能性がある。

検出コードの不具合

検出データを dat ファイルに書き出す際、同じ検出データが二つずつ記録される現象が発生した。まれに一つだけのデータも存在する。原因が判明しなかったためそのままのデータを解析に用いたので、以下の章で示すデータの実験データ数は約半数になる。

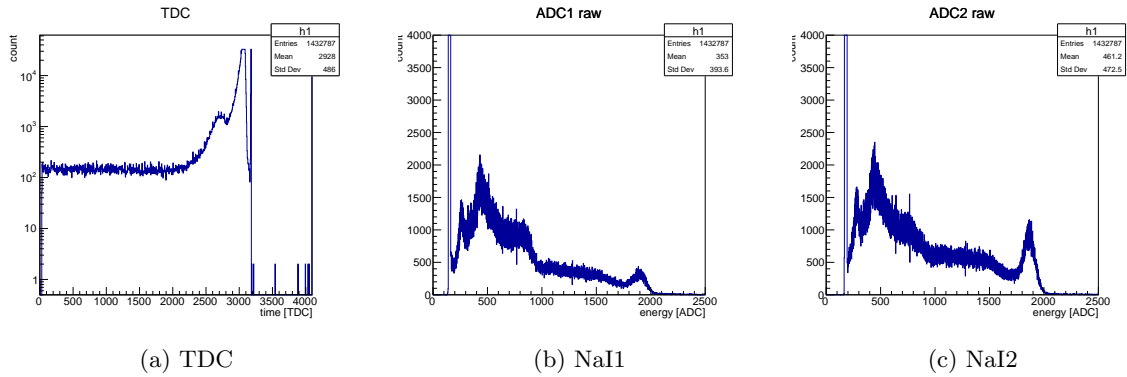


図 6: TDC, 各 ADC の生データ

4.2 生データ

4.2.1 生データ

実験により取得した各データを図 6 に示す。

4.2.2 問題点

4.1 節で述べたように, NaI3 のデータは同じ値を記録し続けているため割愛した. また残り二つの NaI の ADC データについても 511 keV のピークが見えず, 1275 keV のピークのみがはっきりと見えている. 唯一のピークが 1275 keV に対応していることは, 複数の線源を用いたエネルギー較正からも確かである.

4.3 Calibration

4.3.1 TDC Calibration

Clock Generator から特定の長さの信号を出力し, その TDC の計測値から対応させて使用するチャンネルの較正を行った. 較正式は

$$t' [\text{ns}] = 0.2459 \times (\text{TDC}) - 22.626 \quad (15)$$

となる. さらに,

$$t [\text{ns}] = 850 - t' [\text{ns}] \quad (16)$$

とすることで, 寿命に相当する時間データとなる.

4.3.2 ADC Calibration

較正は本来は 3 点以上でデータを入力し Fitting するのが望ましいが, 4.2.2 で言及したようにこの ADC のヒストグラムでは較正に用いることができる 511 keV に相当するピークが確認できない. よって, ここでは左端のピークを 0 keV, 右側のピークを 1275 keV に対応させる 2 点での較正を行った. 較正は各ピークを Gauss Fitting しその Mean の値を用いた. 図 8 にそれぞれの Gauss Fitting の様子を示す.

図 9 のグラフにより較正式を求めた. 較正式は

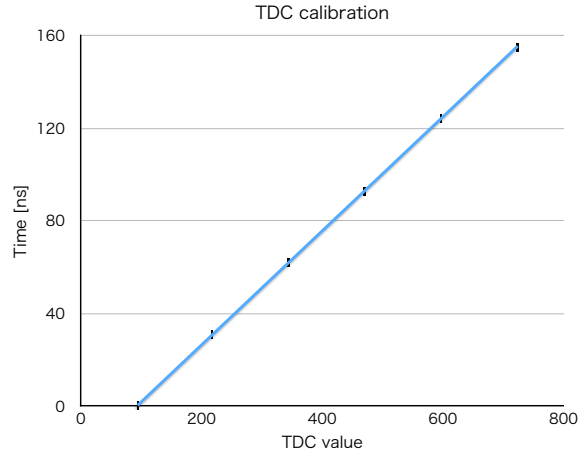


図 7: TDC 較正のグラフ

$$\text{NaI1} : E[\text{keV}] = 0.7374 \times (\text{ADC}) - 112.8 \quad (17)$$

$$\text{NaI2} : E[\text{keV}] = 0.7612 \times (\text{ADC}) - 137.8 \quad (18)$$

となる。

4.4 TQ 補正

較正したデータについて、横軸をエネルギー、縦軸を時間に取り、2次元分布としてプロットしたのが図 10 である。下部の集中している分布が 0 ns に対応すると考えられる。

図 11 に示した通り、エネルギーが低い領域で時間が少し遅れて観測されているのが分かる。これを補正するのが TQ 補正である。下部のピークを 0 ns に合わせる補正もここでまとめて行う。

4.4.1 TQ 補正の理論

図 12 は時間の遅れ ΔT が生じる仕組みを表している。本来計測したい時間は図中の原点を始点とするものであるが、discriminator の仕組みとして設定した閾値 (Threshold) を超えた信号が来たタイミングで信号を出力する。そのため、実際に信号が出力されるまでに図 12 のような ΔT 分の遅れが生じる。そして、この信号の遅れは入力信号の高さ (エネルギーに相当) が低いほど大きくなることも図 12 から分かる。

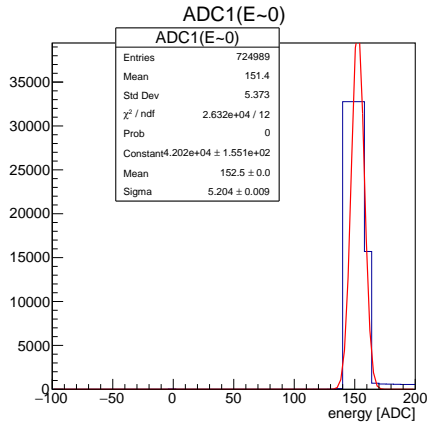
具体的に ΔT について考えるために、図 13 のように入力信号の波形を三角形で大まかに近似する。 t_{peak} , t_{out} はそれぞれ信号がピークに達するまでの時間、信号の入力が終わるまでの時間であり、これらは信号によらず一定と仮定する。 y_{th} , y_{peak} はそれぞれ Threshold の大きさ、信号のピークの高さである。

$$\Delta T = t_{\text{peak}} \frac{y_{\text{th}}}{y_{\text{peak}}} \propto \frac{1}{y_{\text{peak}} t_{\text{out}}} \propto \frac{1}{E} \quad (19)$$

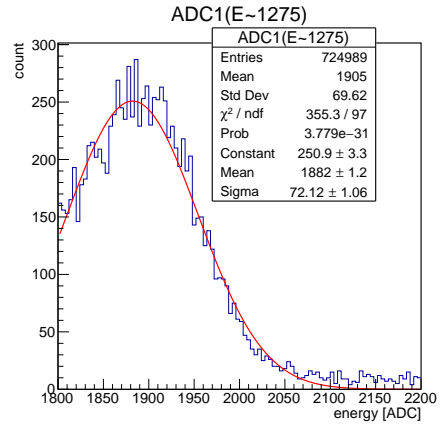
よって、 ΔT はおおよそエネルギーの値に逆比例するものだと話を進めていくことができる。これを踏まえて、式 (20) の関数を用いて $E - \Delta T$ の Fitting を行うこととする (TQ 補正関数)。

$$\Delta T = \frac{p_0}{(E - p_1)^{p_2}} + p_3 \quad (20)$$

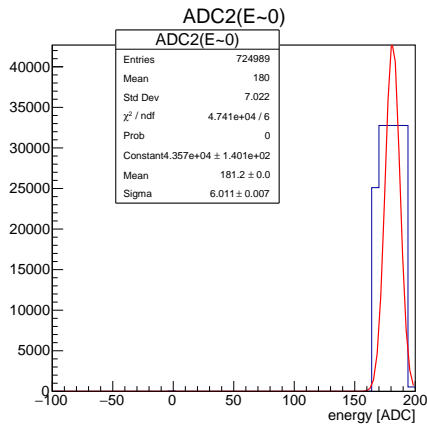
p_0 から p_3 は Fitting パラメーターである。



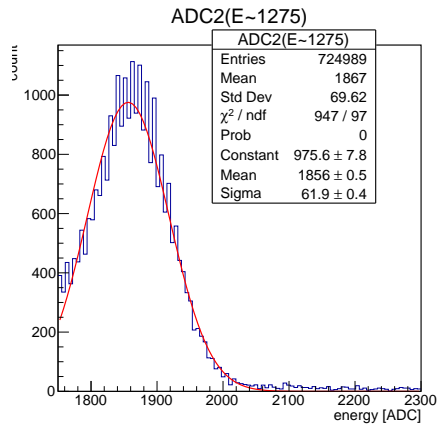
(a) NaI 0 keV



(b) NaI 1275 keV



(c) NaI2 0 keV



(d) NaI2 1275 keV

図 8: 各 NaI の Gauss Fitting

4.4.2 TQ 補正の実践

実際に測定データから ΔT を求めるには、時間の測定値のうちどのくらいが ΔT に相当するのかが分からなければならない。そこで、時間が 0 ns であるはずのデータを取り出せればその測定値はそのままそのエネルギーでの ΔT になるはずである。4.4 で言及した通り、どのエネルギー帯でも下部の分布が集中している領域が時間が 0 ns であると考えられる。これを踏まえ、以下の手順で TQ 補正を実践していく。

1. $E_1 = 150 \text{ keV}$, $E_2 = 170 \text{ keV}$, \dots , $E_{16} = 450 \text{ keV}$ のように 20 keV ごとに 16 個のエネルギー帯を定める。
2. 各 E_i について $E_i \pm 5 \text{ keV}$ の範囲で時間についてのヒストグラムを描く。
3. 適切な範囲で Gauss Fitting を行いその Mean の値をその E_i における ΔT の値とする。
4. 式 (20) に従い Fitting を行う。

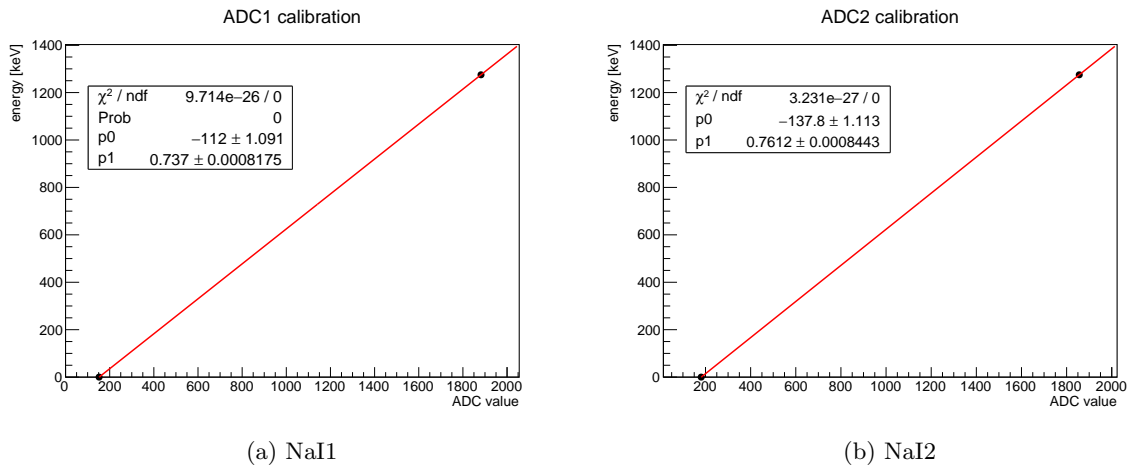


図 9: NaI 較正のグラフ

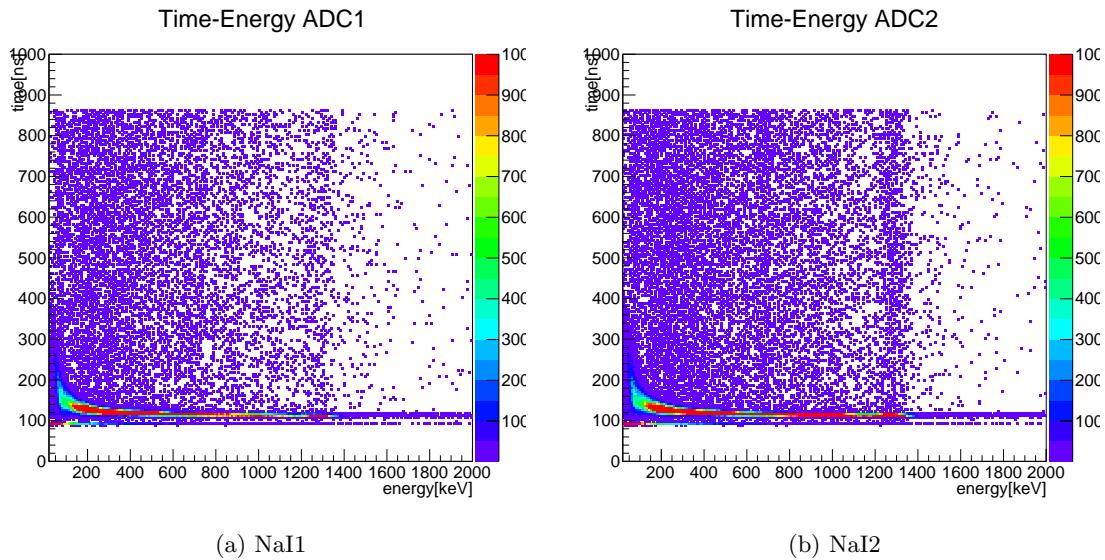


図 10: Time-Energy 分布

5. 求めた $\Delta T(E)$ を用いて $t - \Delta T(E)$ を新たな時間のデータとする.

Gauss Fitting の様子を図 14, 15 に示す. 式 (20) を用いた Fitting は図 16 のようになる. Fitting の初期値, 結果を表 1 にまとめた. TQ 補正を施して Time-Energy 分布を描いたのが図 17 である. 低エネルギー帯での時間の遅れが修正され, また, 下部のピークが 0 ns に合致したことが分かる.

4.4.3 TQ 補正関数の関数形

図 16 の Fitting において, p_2 が非常に小さく算出されていることが分かる. 式 (19), (20) によれば, p_2 は 1 に近い値になることが望ましい. ここで, 図 19 での三角形の近似を見直してみる. これは主に「波形の面積を三角形で近似して求める」という目的が先行しているが, もし「ある程度高いエネルギー帯ではエネルギーに

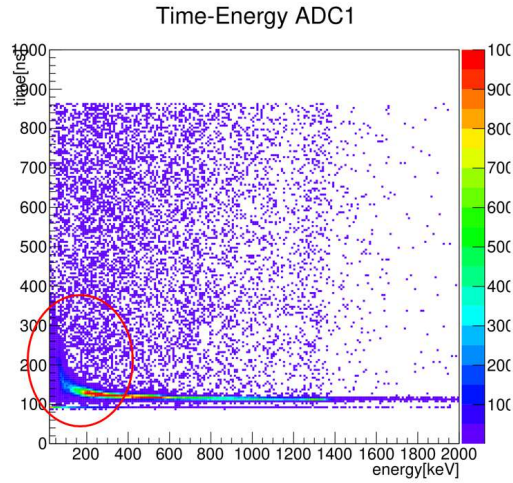


図 11: 低エネルギー帯での時間の遅れ

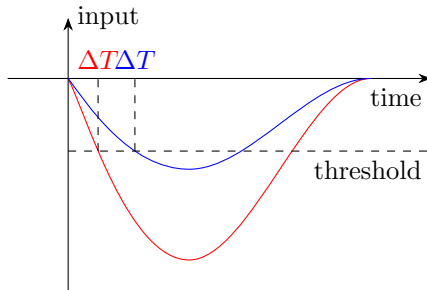


図 12: 時間の遅れの概念図

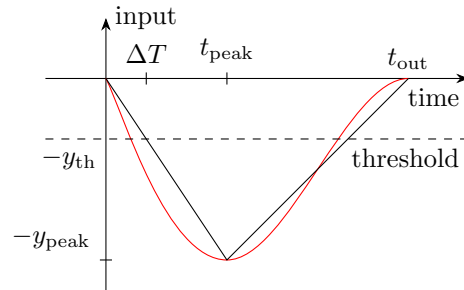


図 13: ΔT の算出

よらず波形の立ち上がり方は一定である」という仮定を置いた場合どうなるか考えてみる。図 18 では、エネルギーの高い①、②ではほぼ一定の ΔT を取り、エネルギーの低い③では大きな ΔT を生じる。これは $p_2 \approx 0$ のときの ΔT の振る舞いに一致する。いずれにせよ、「低エネルギーでは大きく時間が遅れ、高エネルギーではそれほど遅れが見られない」という概観に沿い、図 17 にも不自然な点は見られないことから、ここでは大きな問題ではないと判断した。

	p_0	p_1	p_2	p_3
初期値	1000	50	1	0
NaI1	274.6 ± 19.33	133 ± 0.06611	0.02482 ± 0.001558	-118.6 ± 18.82
NaI2	332.7 ± 27.23	138.3 ± 0.1404	0.0191 ± 0.001215	-177.8 ± 26.49

表 1: TQ 補正関数の Fitting の統計データ

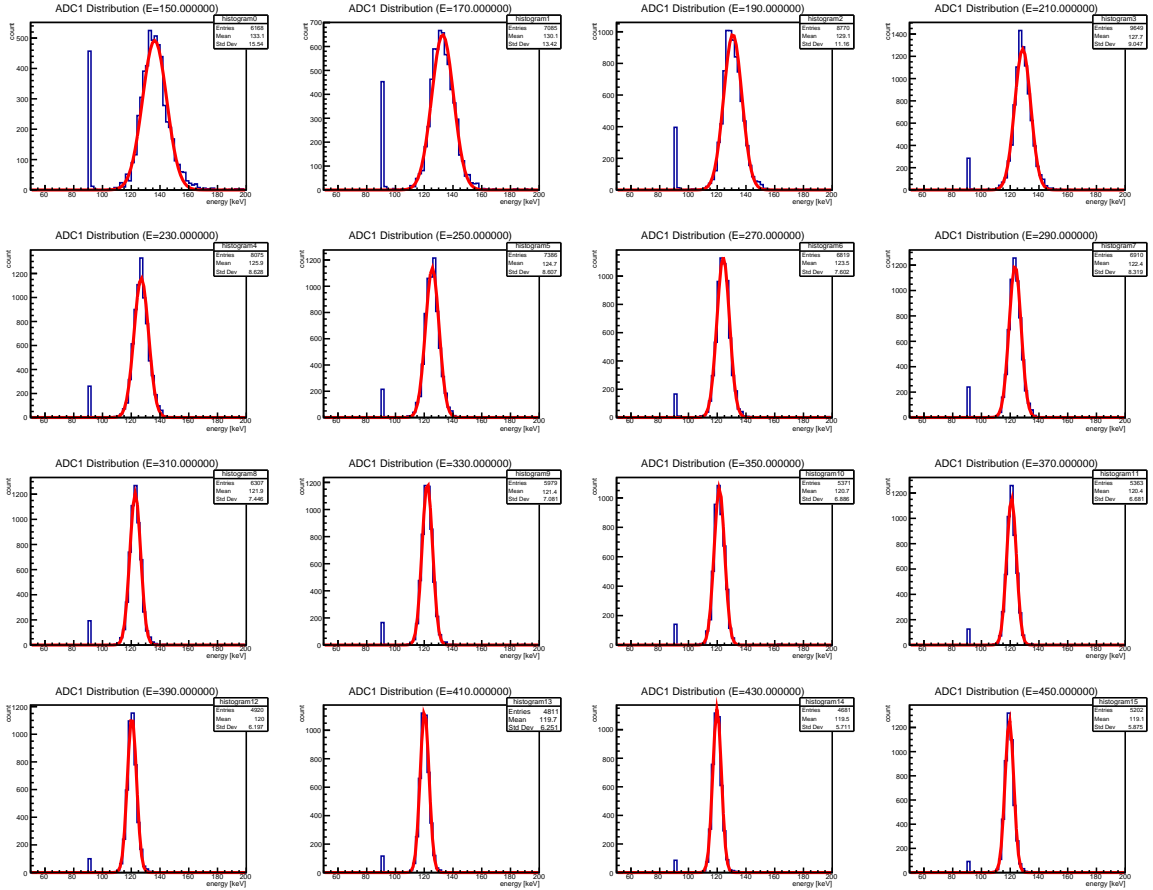


図 14: NaI1 TQ 補正の Gauss Fitting

4.4.4 TQ 補正後の寿命

これまでの補正で 1 度 o-Ps の寿命を求めてみる．寿命算出は式 (21) のような関数を時間データのヒストグラムに対し Fitting して行う．

$$p_0 \exp\left(-\frac{t + p_1}{p_2}\right) + p_3 \quad (21)$$

p_0 から p_3 は Fitting パラメーターであり, p_2 が寿命に相当する．寿命の Fitting を行ったのが図 19 である．このとき, o-Ps の崩壊の反応に限って寿命を考える必要があるため, Fitting に用いるデータはエネルギーが 450 keV 以下のもののみを抽出している．また, Fitting 範囲は $72.5\text{ns} \leq t \leq 654\text{ns}$ とした．これは o-Ps が

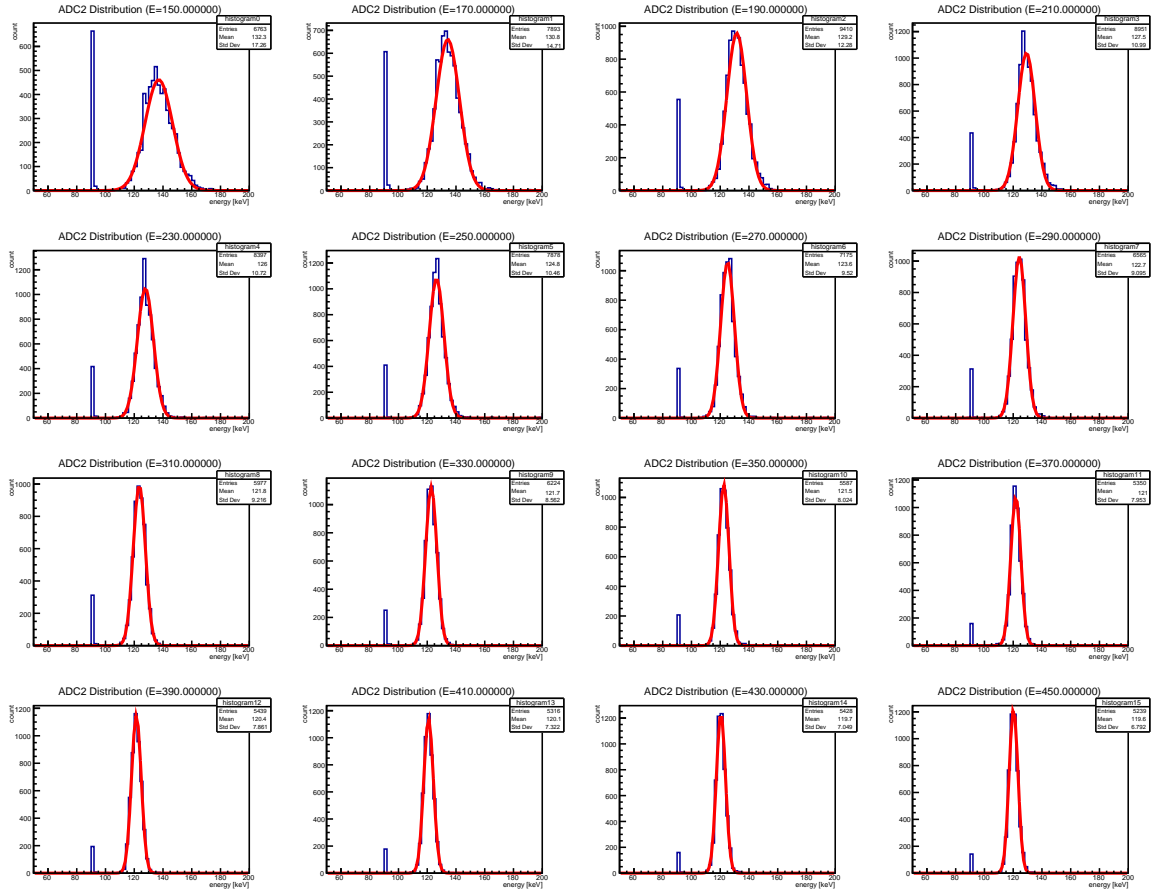


図 15: NaI2 TQ 補正の Gauss Fitting

	p_0	p_1	p_2	p_3
初期値	1	600	100	-20
NaI1	0.001922 ± 0.005246	-485.6 ± 131.5	50.77 ± 10.42	42.44 ± 0.31
NaI2	1.288 ± 6.006	-125.6 ± 235.1	51.15 ± 20.61	36.78 ± 0.29

表 2: TQ 補正後の寿命 Fitting の統計データ

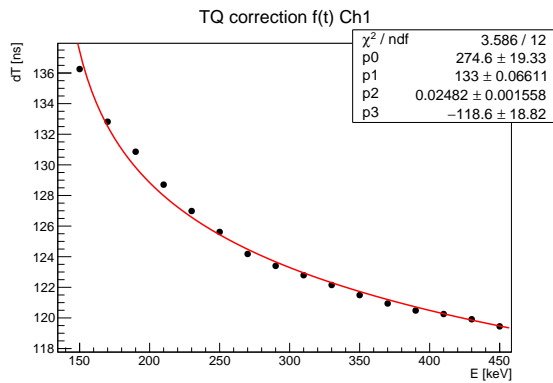
40%~99% 崩壊していると考えられる時間帯である。Fitting の初期値, 結果を表 2 にまとめた。図 19 について, N_0 が p_0 , x_0 が p_1 , τ が p_2 , BG が p_3 に該当する。以上から, TQ 補正後の寿命は表 3 のようになった。これは理論値である 142 ns とは一致していない。

4.5 Pick-off 補正

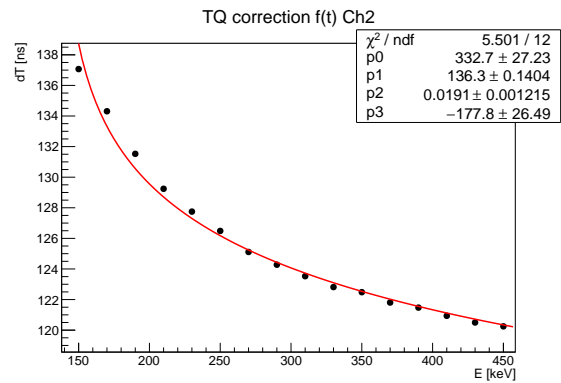
4.5.1 理論

本実験では o- P_s の崩壊を単体でデータから取り出すことはできない。o- P_s との区別がつかない反応として

1. Pick-off 反応: o- P_s の e^+ が周囲の物質電子と対消滅する

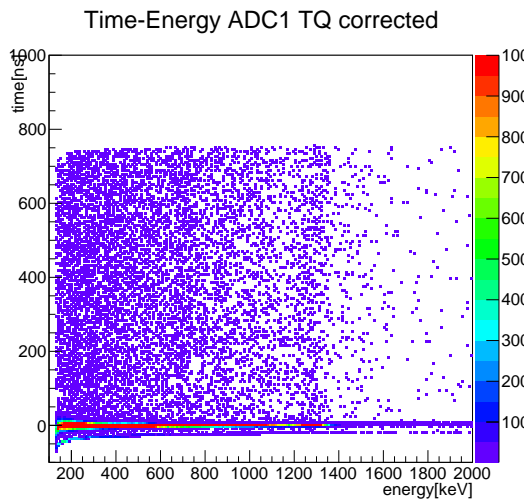


(a) NaI1

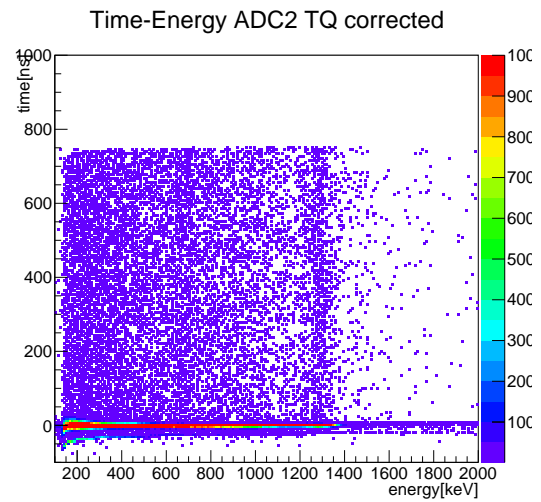


(b) NaI2

図 16: TQ 補正関数



(a) NaI1



(b) NaI2

図 17: TQ 補正後の Time-Energy 分布

2. スピン交換反応: 周囲の物質の対電子と o-Ps がスピンを入れ替えて p-Ps を生じ, 短寿命で崩壊する
3. 酸化還元反応: o-Ps が酸化されて e^- を奪われ, 残った e^+ が周囲の物質電子と対消滅する

が考えられ, 以後まとめて pick-off 反応と呼ぶことにする. 3 つとも e^+e^- の対消滅であり, 511 keV の γ 線を back to back に放出する.

本実験で観測できると予測される全ての反応は以下の通りである. 各番号は図 20 中の番号に対応する.

1. Na の 1275 keV の γ 線と Compton 散乱
2. p-Ps による 511 keV の γ 線
3. p-Ps による 511 keV の γ 線の Compton 散乱
4. Pick-off 反応による 511 keV の γ 線

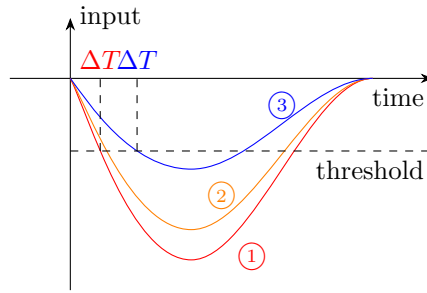


図 18: TQ 補正の再考

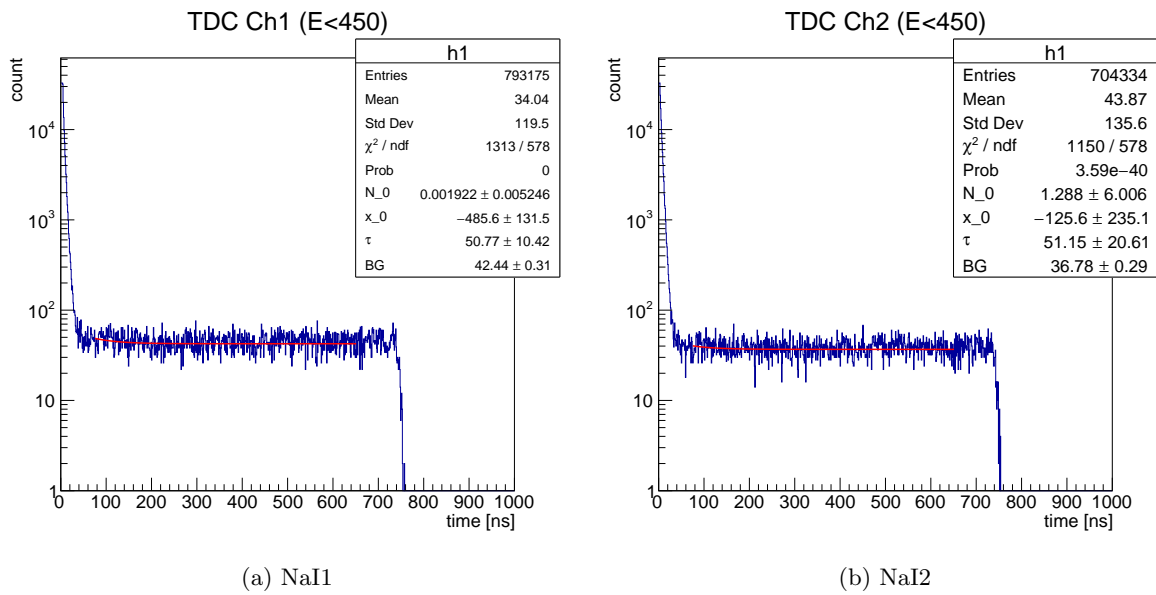


図 19: TQ 補正後の寿命 Fitting

NaI	寿命 [ns]
1	50.77 ± 10.42
2	51.15 ± 20.61

表 3: TQ 補正後の寿命

5. Pick-off 反応による 511 keV の γ 線の Compton 散乱

6. o-Ps による γ 線

特に pick-off 反応で生じた γ 線の Compton 散乱は o-Ps の pick-off 反応を伴わない崩壊と同じエネルギー帯に属するが、o-Ps 本来の崩壊をする前に対消滅するので寿命がやや短く観測される。このエネルギー・寿命帯から o-Ps のみを峻別するためには、補正により pick-off 反応の Compton 散乱を除去する必要がある。

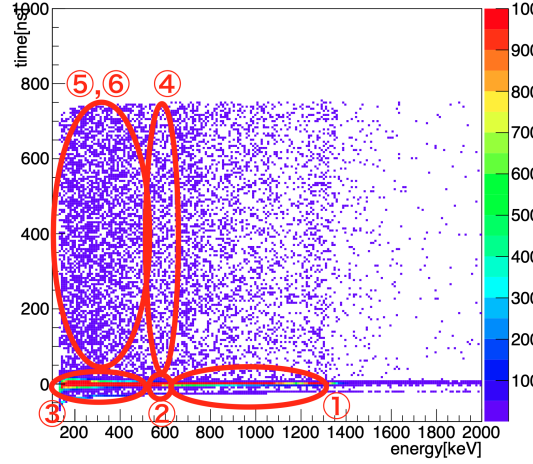


図 20: 観測が期待されるイベント

一般に時刻 t での粒子数 $N(t)$ について $dN/dt = -\Gamma N$ なので,

$$\frac{dN_{5,6}(t)}{dt} = -\Gamma_{5,6}N_{5,6}(t) \quad (22)$$

と表せる. 観測されるイベント数は $g(t) \equiv -dN_{5,6}(t)/dt$ に比例し, ここから dN_{ortho}/dt を求めて o-Ps の寿命を算出する. $\Gamma_{5,6} = \Gamma_{\text{pickComp}} + \Gamma_{\text{ortho}}$ と表せば,

$$\frac{dN_{5,6}(t)}{dt} = -\frac{1+f(t)}{\tau_{\text{ortho}}}N_{5,6}(t). \quad (23)$$

ここで

$$f(t) \equiv \frac{\Gamma_{\text{pickComp}}}{\Gamma_{\text{ortho}}}, \quad \tau_{\text{ortho}} \equiv \frac{1}{\Gamma_{\text{ortho}}} \quad (24)$$

とした.

$f(t)$ の具体形を求めるため,

$$f(t) = \frac{\Gamma_{\text{pickComp}}N_{5,6}(t)}{\Gamma_{\text{ortho}}N_{5,6}(t)} \equiv \frac{N_{\text{pickComp}}(t)}{N_{\text{ortho}}(t)} \quad (25)$$

に注目する. どの時刻 t でも o-Ps の pick-off 反応と p-Ps とで生じる 511 keV の γ 線は同一であり, Compton 散乱される割合も等しい. ゆえに

$$\frac{N_{\text{pickComp}}(t)}{N_{\text{pick}}(t)} = \frac{N_{\text{paraComp}}(0)}{N_{\text{para}}(0)} \quad (26)$$

$$\therefore N_{\text{ortho}}(t) = N_{5,6}(t) - N_{\text{pickComp}}(t) = N_{5,6}(t) - \frac{N_{\text{paraComp}}(0)}{N_{\text{para}}(0)}N_{\text{pick}}(t).$$

ただし p-Ps は短寿命のため $t = 0$ にのみ存在するとしている. 従って

$$f(t) = \frac{N_{\text{paraComp}}(0)N_{\text{pick}}(t)}{N_{5,6}(t)N_{\text{para}}(0) - N_{\text{paraComp}}(0)N_{\text{pick}}(t)} \quad (27)$$

が得られる.

	p_0	p_1	p_2
初期値	1	511	0
Ch. 1	$1.442 \times 10^{-8} \pm 5.033$	1873 ± 14.2	4.377 ± 2.785
Ch. 2	7.809 ± 18.07	1401 ± 9419	$4.676 \times 10^{-8} \pm 18.09$

表 4: f のフィッティングパラメーター

一方 (23) を解いて

$$N_{5,6}(t) = N_{5,6}(0) \exp \left[-\frac{1}{\tau_{\text{ortho}}} \left(t + \int_0^t dt' f(t') \right) \right] \quad (28)$$

であり, t で微分して

$$g(t) = \frac{N_{5,6}(0)}{\tau_{\text{ortho}}} (1 + f(t)) \exp \left[-\frac{1}{\tau_{\text{ortho}}} \left(t + \int_0^t dt' f(t') \right) \right] \quad (29)$$

を得る.

4.5.2 実践

(27) 右辺各項は得られたデータのうち特定のエネルギー帯・時間帯に得られたカウントを値として用いることができる. f の決定は以下の手順で行う.

1. $t_1 = 150 \text{ ns}, t_2 = 200 \text{ ns}, \dots, t_{13} = 700 \text{ ns}$ を設定する.
2. $t_i \pm 25 \text{ ns}$ に入るイベントの ADC ヒストグラムを合計 13 枚描画する.
3. 各 t_i に対し $500 \text{ keV} < E < 520 \text{ keV}$ のイベント数を $N_{\text{pick}}(t_i)$, $10 \text{ keV} < E < 450 \text{ keV}$ のイベント数を $N_{5,6}(t_i)$ とする.
4. $t = 0 \text{ ns}$ について同様に $500 \text{ keV} < E < 520 \text{ keV}$ のイベント数を $N_{\text{para}}(0)$, $10 \text{ keV} < E < 450 \text{ keV}$ のイベント数を $N_{\text{paraComp}}(0)$ とする.
5. $N_{\text{para}}(0), N_{\text{paraComp}}(0), N_{\text{pick}}(t), N_{5,6}(t)$ によって (27) をフィッティングする

手順 3, 4 にて $N_{5,6}, N_{\text{paraComp}}$ のエネルギー下限を 10 keV としたのは, これ以下のエネルギー帯に pedestal のピークが立っているためである.

例年の傾向に従ってフィッティングパラメーター p_i により

$$f(t) = p_0 e^{-t/p_1} + p_2 \quad (30)$$

で (27) をフィッティングした. パラメーター p_i の初期値と合わせて結果を表 4 及び図 21 に示す. 特に図 21 からは相関性が見られず誤差も大きい. 加えて $f(t)$ は本来定義から 0 を下回ることはないが, 結果はこの規則を破っている.

結果は信頼性に乏しいが, このままプロトコルに従って補正を進める. (30) を (29) に適用して,

$$g(t) = q_0 \left(p_0 e^{-t/p_1} + p_2 + 1 \right) \exp \left[-\frac{1}{q_1} \left(p_0 p_1 e^{-t/p_1} + (1 + p_2) t \right) \right] + q_2 \quad (31)$$

を得る. パラメーター p_i に表 4 の値を入れた (31) で TDC ヒストグラムをフィッティングした結果を表 5 及び図 22 に示す. フィッティング範囲は 4.4.2 と同じく $72.5 \text{ ns} < t < 654 \text{ ns}$ である.

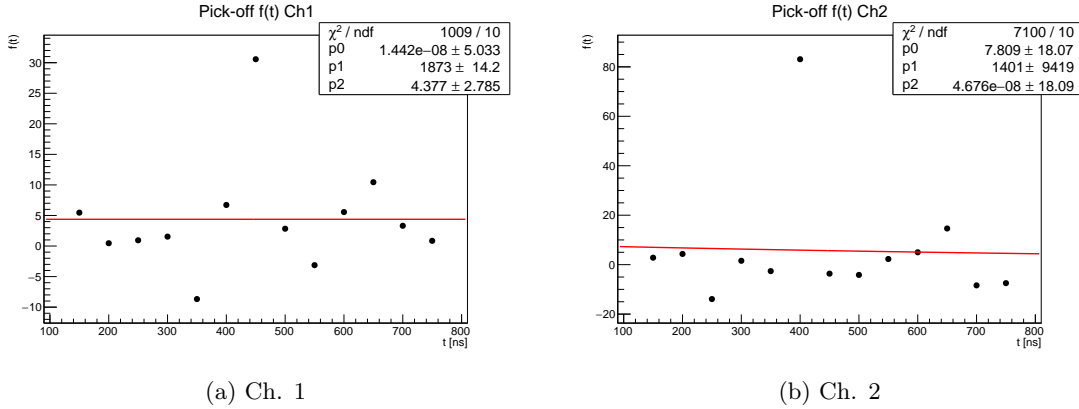


図 21: 各チャンネルを補正したときの $f(t)$ 分布

	q_0	$q_1 = \tau_{\text{ortho}}$	q_2
初期値	1	100	100
Ch. 1	$-2.605 \times 10^4 \pm 2.405 \times 10^{20}$	$1.543 \times 10^8 \pm 0.0$	$1.403 \times 10^5 \pm 2.405 \times 10^{20}$
Ch. 2	$(4.204 \pm 4.204) \times 10^{-45}$	100.5 ± 0.0	302 ± 1.6

表 5: g のフィッティングパラメーター

Ch.	lifetime [ns]
1	$1.543 \times 10^8 \pm 0.0$
2	100.5 ± 0.0

表 6: Pick-off 補正後の寿命

以上の補正の値を無批判に使えば寿命 $q_1 = \tau_{\text{ortho}}$ は表 6 の通りになる. f の決定が信頼性に乏しいことを踏まえると当然だが, 理論値に比較して乖離が大きい. q_1 の誤差が両方で消えているのは, 表 5 の通り $q_0 \ll q_2$ となっているため (31) に従い TDC のヒストグラムが τ 依存性のない定数でほとんどフィットされていることに由来していると考えられる.

5 考察

5.1 生データについて

5.1.1 問題

Calibration 後の生データについて図 6 の通り, 本来見えるはずの 511 keV のピークが見えていない. 511 keV のガンマ線は Ps の消滅によって生じるはずなので, このピークが確認できないと本実験の観測対象である Ps の存在自体も疑われてしまう.

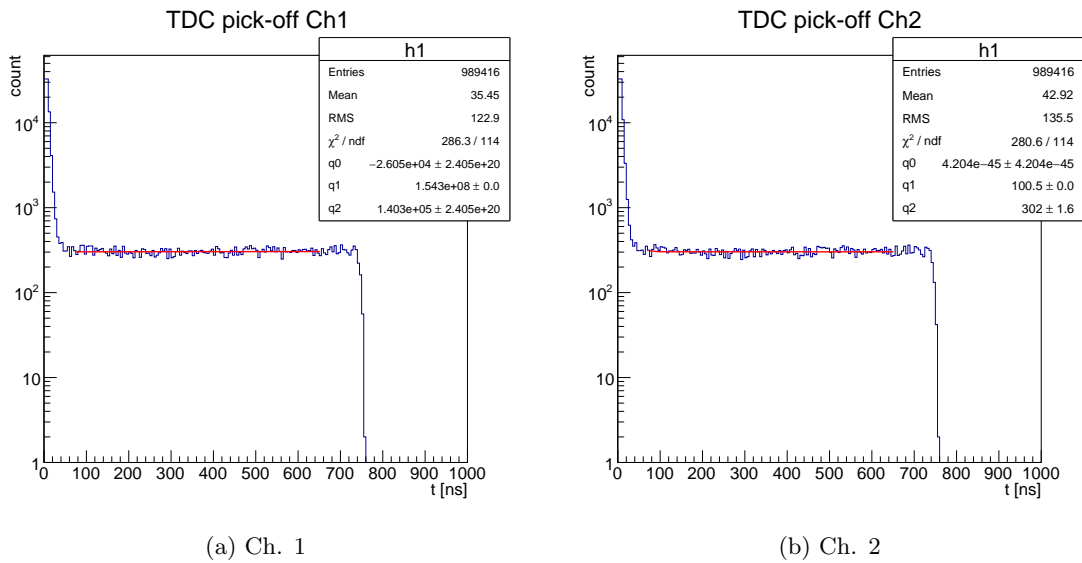


図 22: 各チャンネルを補正したときの $g(t)$ による TDC フィッティング

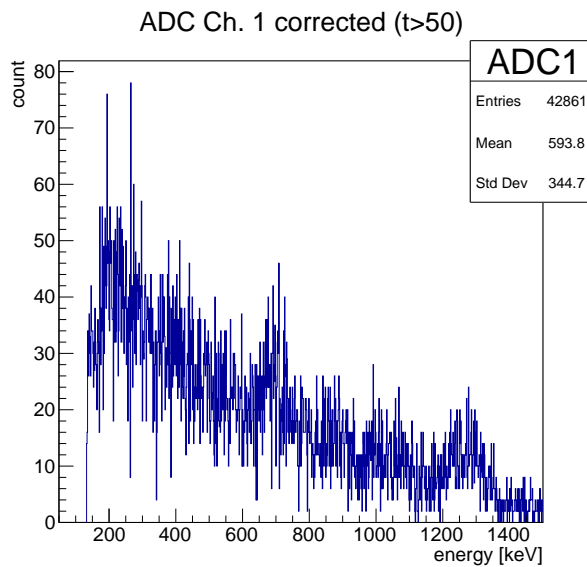


図 23: NaI1 の ADC データを 50 ns 以上のものに限定し較正したデータ

5.1.2 原因への考察

試しに 50 ns 以下のデータをカットして ADC の生データを見たところ 511 keV に対応すると考えられるピークが見られた. 0 keV, 511 keV, 1275 keV をピークに対応させて ADC 較正をし直したカット後のデータが図 23 である.

ADC 較正した結果ピークが 600 keV から 700 keV の範囲に存在するため Ps の消滅によるものと断定はできないが, そうだと考えると pick-off 反応のピークが見えていることになるので o-Ps の生成消滅が観測され

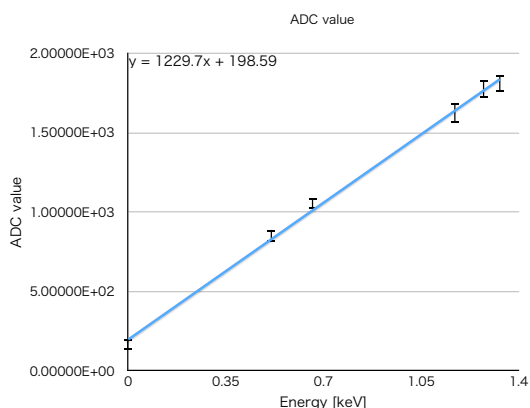


図 24: 各種放射線源による ADC calibration

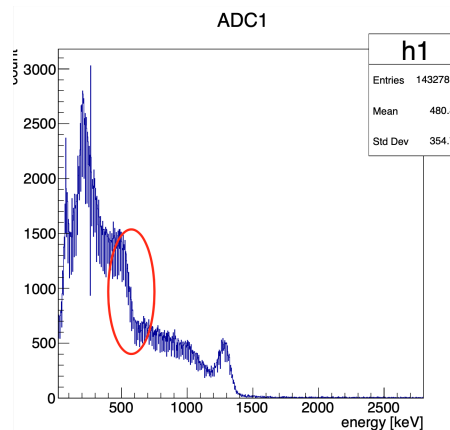


図 25: 600 keV 付近における ADC のエッジ

ていることは保証される。

ではカット前のデータで 511 keV のピークが見えなくなっていたのはなぜなのか。以下に考えられる可能性とそれに対する考察を記す。

可能性 1 エネルギー分解能が悪くてピークが重なっている。→ しかし、線源と NaI シンチレーターを一列に並べて検出した時には十分にピークが見られたので可能性は薄い。

可能性 2 Compton 散乱の寄与が大きくてピークが重なっている。→ データカット後に現れたピークが 511 keV に対応するピークだと考えると Pick-off 反応のピークが見えているので、Compton 散乱の寄与はそれほど大きくないと結論付けられる。

可能性 3 ADC 較正が適切でない。→ 様々な線源で ADC 較正を行ったところ fitting 関数はほとんど同じ値が出ているのでそこまで大きな寄与はないと考えられる (図 24)。

可能性 4 200 keV 付近に別のガンマ線を検出している。→ 全ての t において 200 keV 付近にピークがたっているので Ps に関係のないガンマ線と考えられるが、図 25 の通り生データで 600 keV 付近からデータ数が顕著に減っていることを考えると Ps の対消滅に関係があるとも考えられる。Coincidence を取っているため background とは考えにくい。

以上のような可能性は考えられるものの、明確な理由は見つけられていない。

5.2 不適切なデータをカットした寿命計算について

50 ns 以下のデータが不適切であることが分かるので、その部分をカットしてデータ解析を行う。上述のように三つのピークを用いて ADC 較正をし直し、すでに得られている TQ 補正の式を用いて補正を行い、得られた TDC のデータに対して fitting すると図 26 のようになる。

以上から、TQ 補正後の寿命は表 7 のようになる。

どちらも得られた寿命は誤差の範囲でも理論値と一致はしていない。図 26 を見ると、ほとんど fitting 関数の定数の寄与なのであまり信頼できる結果ではないのは明らかである。Pick-off 補正に関しては原理的に 0 ns 付近のデータを参照しなければならず、適切な補正はできない。

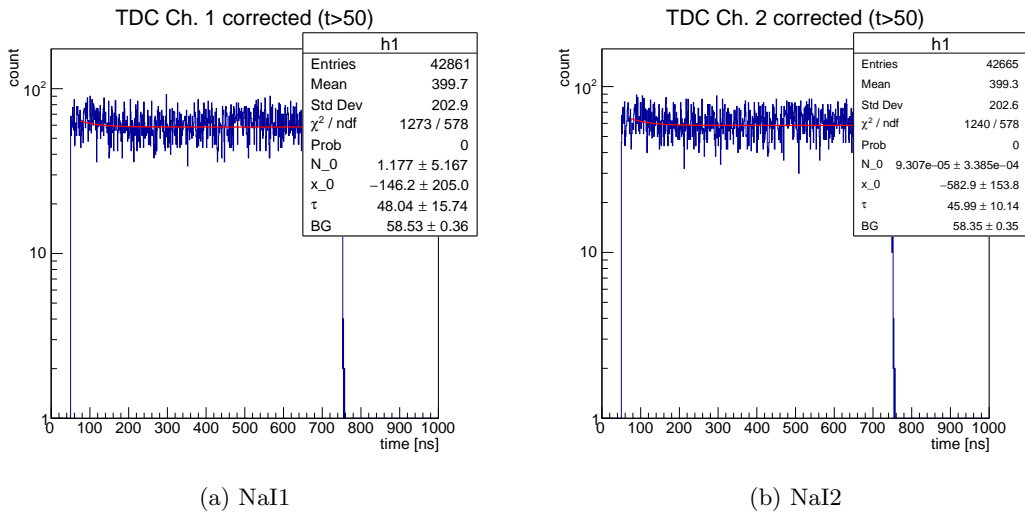


図 26: カットしたデータを用いた寿命 Fitting

NaI	寿命 [ns]
1	48.04±15.74
2	45.99±10.14

表 7: カットしたデータを用いた TQ 補正後の寿命

5.3 Ps の生成を疑うべき新たな視点

本実験の実験配置ではシリカパウダーを NaI1 と NaI2 のシンチレータで挟むように設置されていた。したがって、Ps が消滅した時の 511 keV のガンマ線は NaI1 と NaI2 で同時に観測されるべきだと考えられる。NaI1 と NaI2 の ADC 較正後のデータを二次元プロットしたものが図 27 である。ADC1 と ADC2 で両方が 511 keV の点付近が濃くなっているわけではないので Ps が生成消滅することによっての寄与は得られていないと考えられる。

5.4 シリカパウダーを抜いて再実験

本実験で 511 keV のピークが見えなかったので Ps がしっかりと生成されているかを判断するためにシリカパウダーを抜いて再度実験を行った。

5.4.1 ピークについて

既に得られている ADC 較正式を用いて較正した ADC データは図 28 の通り。

1275 keV に対応するピークが見えているのは自然なのだが、511 keV にピークが見えていることにも注目したい。シリカパウダーを抜くことによって Ps が生成されていないと仮定すると 511 keV 付近のピークは background によるものであることが分かる。もしくは Na から出たベータ線が空気中の電子とポジトロニウムを生成してその崩壊によるものだとも考えられる。しかし、TQ 補正まで行った後の Time-Energy 分布 (図

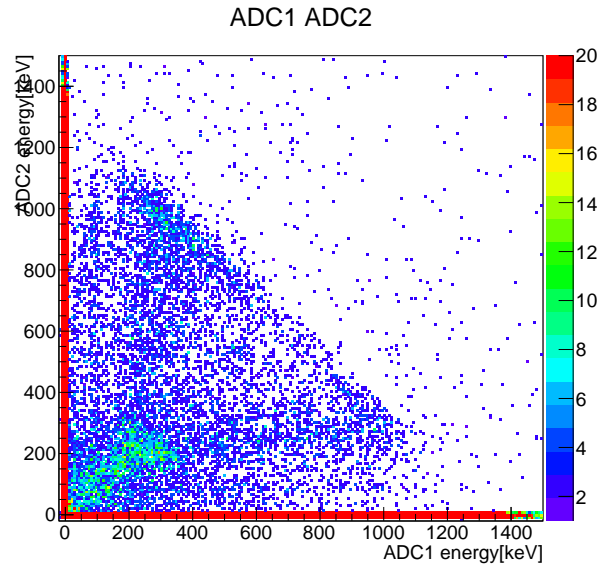


図 27: 本実験の ADC 較正後の NaI1 と NaI2 の ADC データの二次元プロット

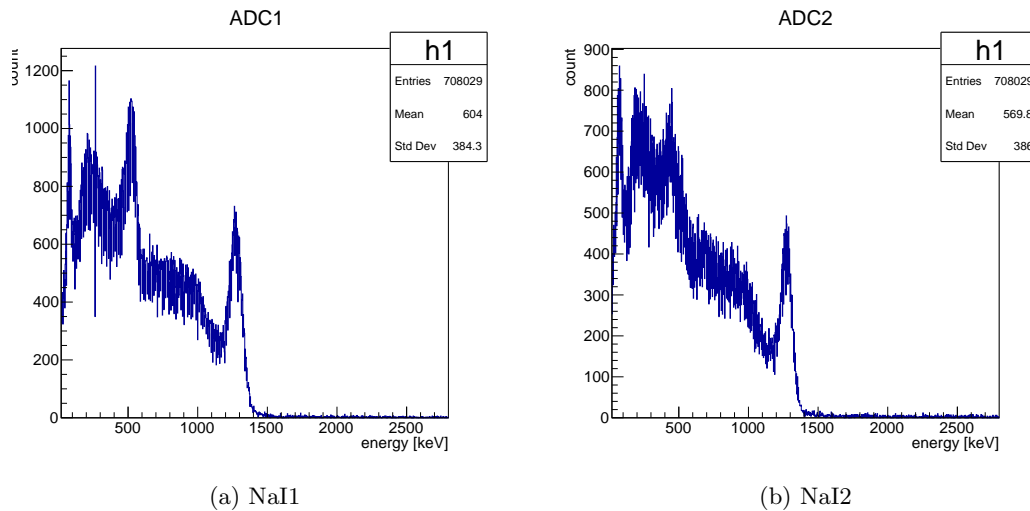


図 28: ADC の較正後のデータ

29) を見ると 0 ns 付近でのみデータが集まっているので α -Ps は生成していない. p -Ps のみが偏って生成されているとは考えづらい. さらに ADC 較正後の NaI1 と NaI2 の ADC データを二次元プロットすると図 30 の通りであり, NaI の配置から考えると Ps の崩壊であれば同時に 511 keV のデータを観測して欲しいが, 両方が 511 keV の点付近が濃くなっているわけではない. 以上のことから, やはり今回の測定で得られたのは background の寄与だと考えられる.

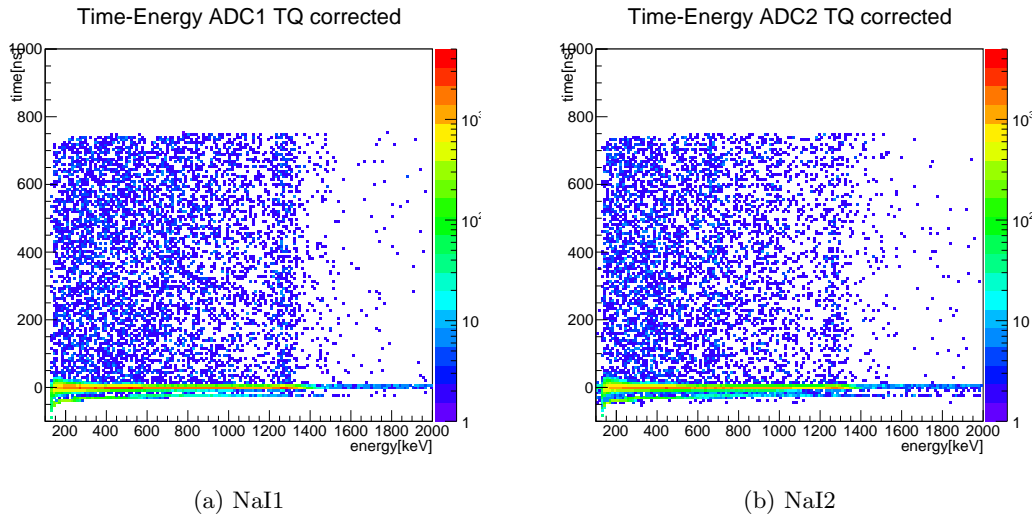


図 29: TQ 補正後の Time-Energy 分布

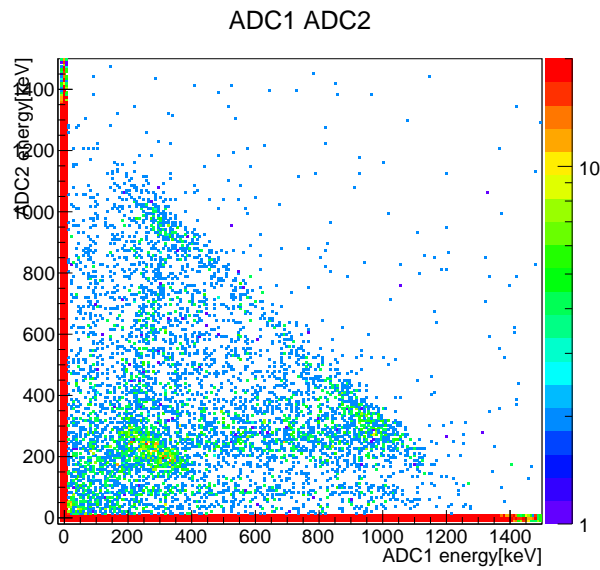


図 30: 再実験での ADC 較正後の NaI1 と NaI2 の ADC データの二次元プロット

5.4.2 Ps の生成について

シリカパウダーを抜いた実験では background によるデータを集めていると考えられ、Time-Energy 分布 (図 29) において 50 ns 以上の 511 keV 付近に濃くなっているところがないことと、本実験においては同じ領域に濃くなっているところがあったこと (図 10) を比較すると、シリカパウダーによってほとんど background に紛れてしまうほど少数の Ps が生成されていた、もしくは本実験においてベータ線を観測してからの gate が終わるまでの短い時間に background のガンマ線がいくらか入ってきていたと考えられる。