

# オルソポジトロニウムの寿命測定

翁昂平 西辻裕紀 吉川尚孝 岡田裕行 古賀太一郎

平成 22 年 10 月 15 日

# 目次

0	実験の目的	2
1	理論	2
1.1	ポジトロニウム	2
1.2	主な崩壊	2
1.3	pick-off	3
2	実験装置と方法	3
2.1	実験の原理	3
2.2	測定装置	4
2.3	回路	5
2.4	t-Q 補正	7
3	解析	8
3.1	キャリブレーション	8
3.2	カッティング	8
3.3	t-Q 補正	8
3.4	fitting	10
4	考察	13
4.1	誤差の評価	13
4.2	pick off の評価	14
4.3	TDC2 のグラフのコブ	15
4.4	実験環境の変化	17
4.5	崩壊時間 t の fitting 範囲	19
4.6	一步進んだ実験のために	19
	謝辞	20

## 0 実験の目的

オルソポジトロニウムの寿命を求め、QED の検証を行う。

## 1 理論

### 1.1 ポジトロニウム

ポジトロニウムとは、 $e^+$  と  $e^-$  の 2 粒子系がなす束縛状態である。ポジトロニウムの波動関数は次のように書ける。

$$\Psi = \Phi \chi C$$

ここに、 $\Phi, \chi, C$  はそれぞれ波動関数の空間依存部分および時間依存部分、電荷依存部分である。 $e^+, e^-$  はそれぞれスピン  $\frac{1}{2}$  をもつため、波動関数のスピン部分は次の 4 つの直交基底状態をもつ。

$$|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle, \quad \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle + |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle), \quad |\downarrow\rangle|\downarrow\rangle \quad (I=1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle) \quad (I=0)$$

スピン  $I=1$  のものをオルソポジトロニウム (以下 o-Ps) ,  $I=0$  のものをパラポジトロニウム (以下 p-Ps) という。

### 1.2 主な崩壊

p-Ps は主に次のように崩壊する。

$$e^+e^- \longrightarrow 2\gamma$$

一方 o-Ps は主に次のように崩壊する。

$$e^+e^- \longrightarrow 3\gamma$$

どちらも電磁相互作用による崩壊である。運動量保存則より、光子 1 つへの崩壊は禁止されている。光子はスピン 1 で向きは進行方向かその逆向きだから、偶数個の光子は偶数スピン、奇数個の光子は奇数スピンを持つ。スピン数保存より、p-Ps は偶数個の光子、o-Ps は奇数個の光子への崩壊が許されている。運動量保存則とエネルギー保存則から、放出する光子のエネルギーは  $2\gamma$  崩壊では 511keV ,  $3\gamma$  崩壊では 511keV 以下に連続的に分布する。崩壊する光子の個数が 1 つ増えれば崩壊率は微細構造定数  $\alpha$  のオーダーで小さくなる。このため高次の崩壊は無視できる。弱い相互作用による崩壊の寄与も、主な崩壊モードに比べて  $10^{-6}$  程度の崩壊率であるから無視できる。QED によれば、p-Ps の  $2\gamma$  崩壊の寿命は 0.125ns である。o-Ps の  $3\gamma$  崩壊の寿命は 2 次の摂動までで 142.01ns である。(下式参照 [1])

$$\tau_{o-Ps}^{-1} = \tau_{LO}^{-1} \left[ 1 - 10.286606(10) \frac{\alpha}{\pi} - \frac{\alpha^2}{3} \ln \frac{1}{\alpha} + B_o \left( \frac{\alpha}{\pi} \right)^2 - \frac{3\alpha^3}{2\pi} \ln^2 \frac{1}{\alpha} + \dots \right]$$

ここで  $\tau_{LO}(= 138.674\text{ns})$  は最低次における o-Ps の寿命を表す。 $B_o \sim 99$  であることが部分的な計算により知られている。

### 1.3 pick-off

o-Ps のその他の崩壊で、寿命の測定への寄与が無視できないものがある。

- pick-off : o-Ps 中の  $e^+$  が物質中の電子と対消滅を起こす反応。
- スピン交換反応 : o-Ps 中の  $e^-$  が物質中の逆向きのスピンを持つ  $e^-$  と交換して p-Ps となり、 $2\gamma$  崩壊する反応。
- 化学反応 : o-Ps が物質と化学反応を起こす。o-Ps 中の  $e^-$  は不対電子として働くため反応しやすい。

o-Ps の速さが大きくなるほど衝突頻度が大きくなり、以上 3 つの反応は起こりやすくなる。生成された直後の o-Ps は約 1eV の運動エネルギーを持つ (速さ  $\sim c/700$ ) ため、その崩壊頻度は無視できない。実際測定される崩壊率  $\Gamma$  は  $3\gamma$  崩壊の崩壊率  $\Gamma_{3\gamma}$  と上記 3 つの反応をまとめた崩壊率  $\Gamma_{\text{pick}}$  の和として観測される。

$$\Gamma = \Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{\text{pick}}$$

単位時間当たりの崩壊数は次のようになる。

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \Gamma \exp(-\Gamma t) \quad (1)$$

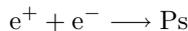
## 2 実験装置と方法

### 2.1 実験の原理

人工的に o-Ps を生成し、その崩壊時間を測定することで o-Ps の寿命を求める。

図 1 のように、 $e^+$  線源、ポジトロニウム生成物質、シンチレータ 2 個を使い測定を行う。ポジトロニウム生成物質は  $e^-$  の供給源である。

- ①まず、 $e^+$  線源からの  $e^+$  を、シンチレータが検出するので、これを Ps の生成した時刻とする。
- ②Ps 生成物質中の  $e^-$  と  $e^+$  が束縛状態を作り、p-Ps、o-Ps が生成する。



この Ps が、状態により  $2\gamma$  あるいは  $3\gamma$  に崩壊する。③崩壊で生じた  $\gamma$  線をシンチレータで検出する。このときの  $\gamma$  線のエネルギーによって p-Ps と o-Ps を区別するため、同時に  $\gamma$  線のエネルギーも測定する。

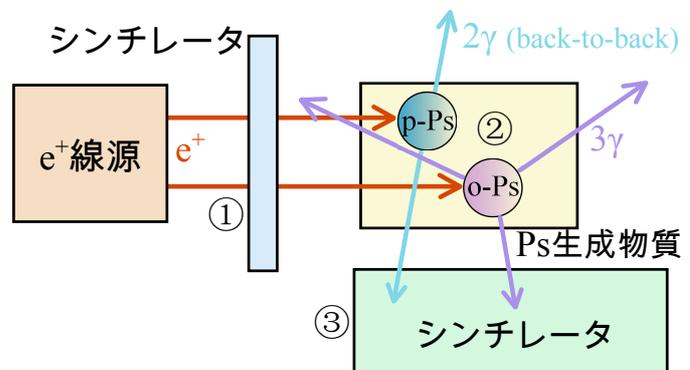


図 1: 実験原理

o-Ps について①の時刻と③の時刻の差を取って o-Ps の崩壊時間とする。この崩壊時間ごとの崩壊数をヒストグラムに描き、フィッティングすることにより o-Ps の寿命を求める。このとき、(1) 式に加えて background( $n_{\text{BG}}$ ) も考慮し、フィッティングには、

$$\left| \frac{dN}{dt} \right| = N_0 \Gamma \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + n_{\text{BG}} \quad (2)$$

を使う。 $\tau$  が求めるべき寿命である。ここで、 $n_{\text{BG}}$  は定数であると仮定する。

## 2.2 測定装置

実験装置には以下のものを使った。

- $e^+$  線源： $^{22}\text{Na}$
- シンチレータ 1：プラスチックシンチレータ ( $e^+$  の通過を検出)
- シンチレータ 2：NaI シンチレータ ( $\gamma$  線とそのエネルギーを計測する)
- Ps 生成物質と真空容器：オープンで焼き乾燥させたシリカパウダーを真空容器に入れたもの
- 穴あき鉛板 (関係のないイベントを極力排除するため)  
暗箱と暗幕 (自然光を遮断するため)

実験装置の配置は図 2 に示してある。実際にはこの装置の上に暗箱をかぶせ、さらに暗幕で覆って測定した。

シンチレータ 1 には、比較的時間応答の良いプラスチックシンチレータを使用し、シンチレータ 2 には、エネルギー分解能を考慮し、NaI シンチレータを使用した。NaI シンチレータは時間応答が良くないので、これに関しては  $t$ - $Q$  補正 (後述) を行った。また、Ps 生成物質にはできるだけ pick-off 等の影響を小さくするためシリカパウダーを使用し、できるだけ空気や水分を除去するために、シリカパウダーをオープンで約 2 時間乾燥させた後すばやく真空容器に入れて測定を開始した。

データを取る期間は、できるだけ多くのイベントを集めるため約 6 日とした。

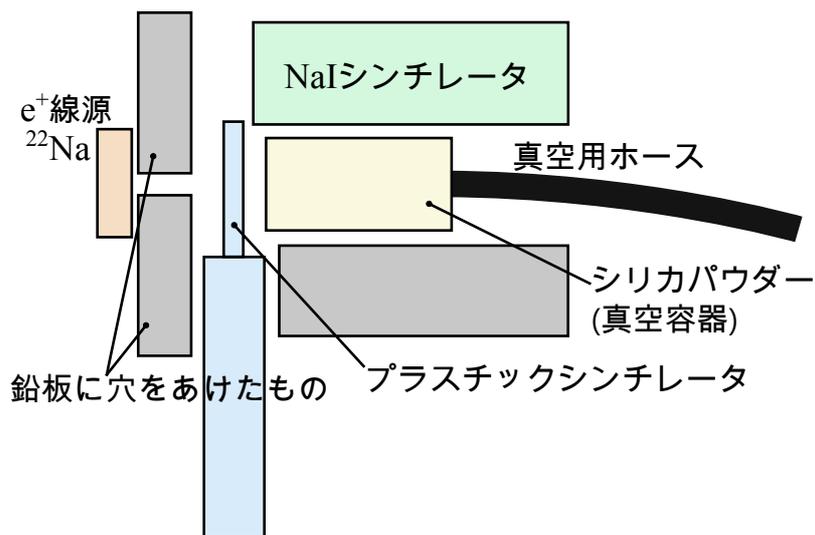


図 2: 実験装置の配置

## 2.3 回路

プラスチックシンチレータおよび NaI シンチレータからの信号を下に示す回路に入力する。

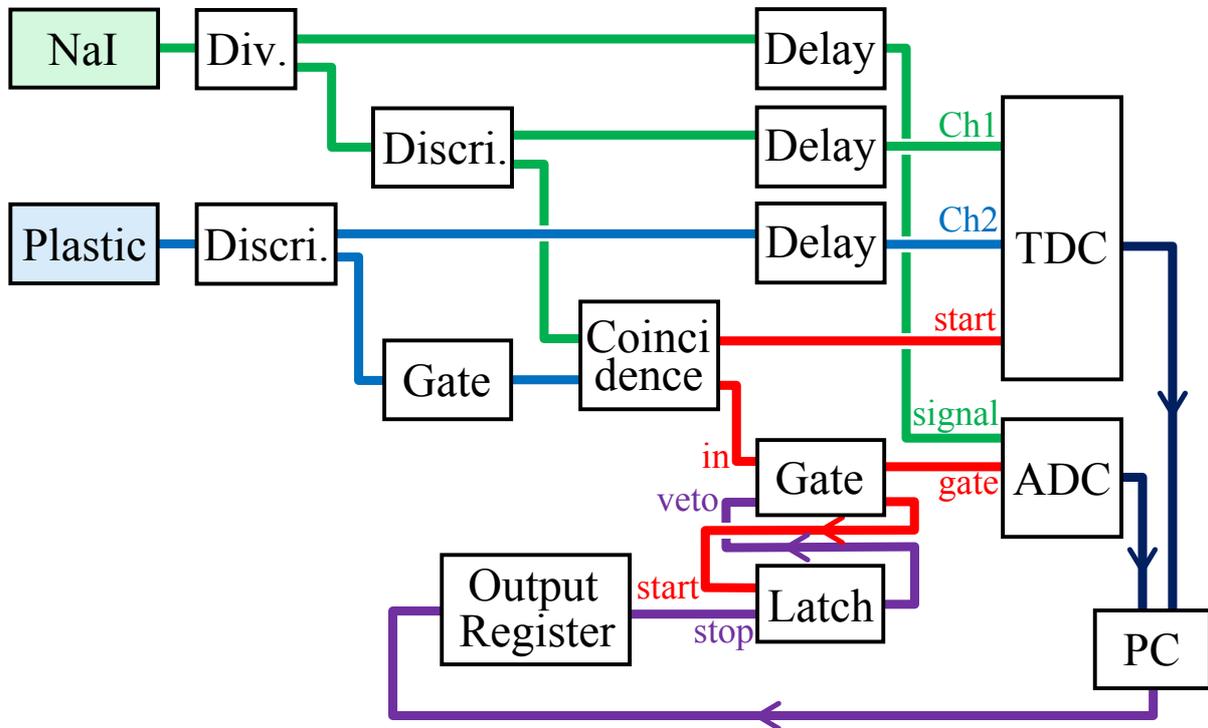


図 3: 回路図

Div. Divider。アナログ信号を 2 つに分ける。

Discr. Discriminator。アナログ信号をデジタル信号に変換する。threshold の設定は 16mV とした。

Delay 信号を遅らせる。長く遅らせるために延長ケーブル, Analog Delay, Digital Delay を併用。

Gate Gate Generator。信号の時間幅を広げる。Coincidence を取るためと, ADC の gate 用の 2 つを使ってある。

Coincidence 入力に 2 つの信号が同時に入ったときに信号を出す。AND。プラスチックシンチレータからの Gate と NaI シンチレータからの signal の AND を取ることで, 出力のタイミングを NaI からの信号のタイミングにあわせてある。

TDC start の信号と stop(複数チャンネル:ここでは Ch1, Ch2) の信号の時間の差を返す。

ADC gate に入った信号の積分を返す。その値は  $\gamma$  線のエネルギーに相当する。

Latch & Output Register ADC と TDC が "READY" 状態になるまで次のイベントを受け付けないようにするためのもの。PC から "READY" の信号を Output Register から Latch に入れ, そのときにだけ Gate Generator に入る veto を止めるようにしてある。

HV シンチレータの信号を増幅するために電圧を印加する必要がある, そのために HV を使う。  
本実験では NaI シンチレータに 1200mV, プラスチックシンチレータに 1700mV を印加した。

この回路に入った信号は次のように TDC に入力される。

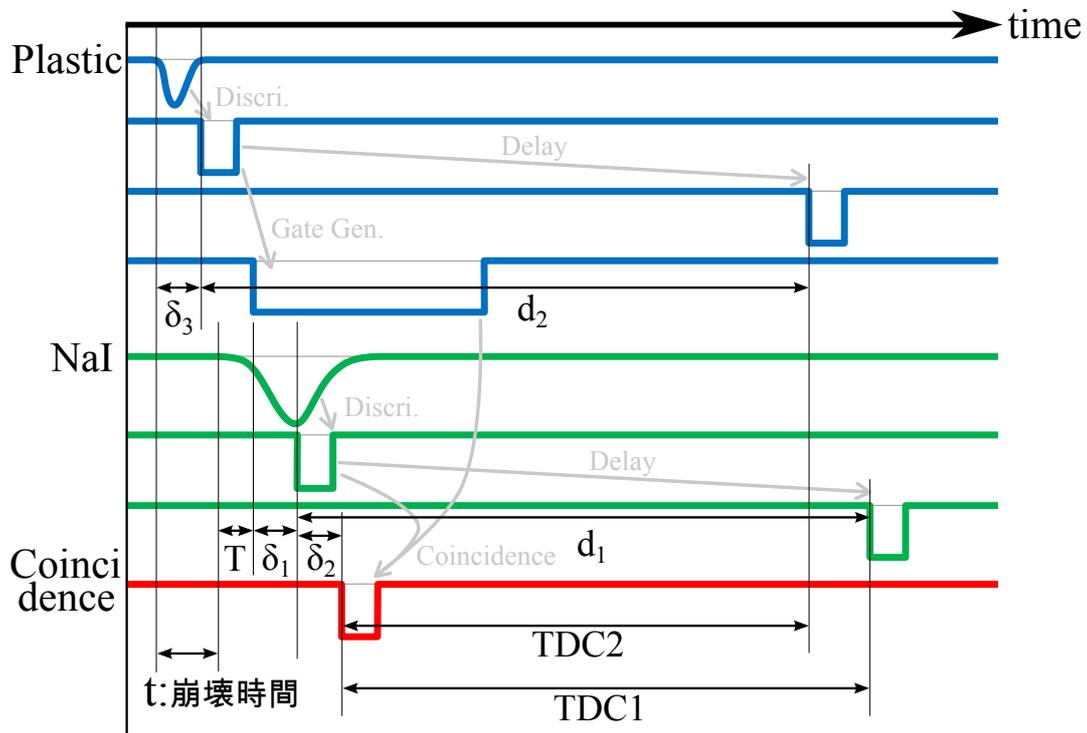


図 4: 信号の概略

TDC の start には、2つのシンチレータの Coincidence を入力し、シンチレータが両方反応したイベントについて測定を開始する。TDC の stop(Ch1)にはNaIシンチレータの信号を遅らせたもの、stop(Ch2)にはプラスチックシンチレータの信号を遅らせたものを入力してある。

図 4 で測定すべき量は  $t$  (崩壊時間) で、データとして得られるのは TDC1, TDC2 の部分である。 $d_1, d_2$  は Delay による遅れ、 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  はケーブル等による遅れで、いずれも定数である。そして、 $T$  は後述の  $t$ -Q 補正量であり、これは  $\gamma$  線のエネルギーに依存する。この図より、

$$TDC1 = d_1 - \delta_2 \quad (3)$$

$$TDC2 = d_2 + \delta_3 - t - T - \delta_1 - \delta_2 \quad (4)$$

となる。(3) 式からわかるとおり、TDC1 の値は各イベントで全く同じ値になるはずである。そして、(3), (4) より崩壊時間  $t$  は、

$$\begin{aligned} t &= TDC1 - TDC2 - T + (d_2 - d_1 + \delta_3 - \delta_1) \\ &= TDC1 - TDC2 - T + const. \end{aligned} \quad (5)$$

として求められるはずである。ここで  $t$  の表式中に定数が入っているが、この部分はフィッティングの際に  $t$  軸方向の平行移動の寄与が小さいため、問題になることはない。

また、NaIシンチレータの raw signal を適当に遅らせたものと、2つのシンチレータの Coincidence 信号から作った gate を、それぞれ ADC の signal と gate に入れ、崩壊で生じた  $\gamma$  線のエネルギーを測定できるようにしてある。

## 2.4 t-Q 補正

本実験において, NaI シンチレータで問題となるのが時間応答の悪さである。信号の立ち上がりが遅く, Discriminator の threshold を越えるまでに多少のタイムラグが生じるので, その結果崩壊時間が大きく見積もられてしまうことになる。この誤差は特に低いエネルギーの  $\gamma$  線の場合に顕著になる。そこで, できるだけこの誤差の影響を小さくするため, 補正を行う (t-Q 補正)。

簡単のため, NaI シンチレータの raw signal を図 5 のような三角形に近い形で近似する。ここに,  $r, w, h, \theta, z, T$  はそれぞれ, 信号がピークに達するまでの時間, 信号の時間幅, 信号の高さ, Discriminator の threshold の値, 実際の  $V = 0$  と信号の  $V = 0$  のずれ, および t-Q 補正量を表す。このうち,  $\theta, z$  は原理的に定数であるが, さらに簡単のために  $r, w$  も定数であるとみなす (実際は  $r, w$  は  $h$  に依っている)。ADC が返す値は, 三角形の面積で近似して,

$$ADC \cong \frac{1}{2}hw \quad (6)$$

図中の色をつけた 2 つの三角形の辺の比について次の関係が成り立つ。

$$T : r = (\theta + z) : (h + z) \quad (7)$$

(7) 式を変形し, (6) 式を使って  $h$  を消去すると,

$$\begin{aligned} T &= \frac{\frac{1}{2}(\theta + z)wr}{ADC + \frac{1}{2}wz} \\ &= \frac{a}{ADC + b} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに,  $a \equiv (1/2)(\theta + z)wr, b \equiv (1/2)wz$  は定数で, 実験的に決定することができるものである。(5) 式に, (8) 式を代入すると, 崩壊時間  $t$  は次のように表されることがわかる。

$$t = TDC1 - TDC2 - \frac{a}{ADC + b} + const. \quad (9)$$

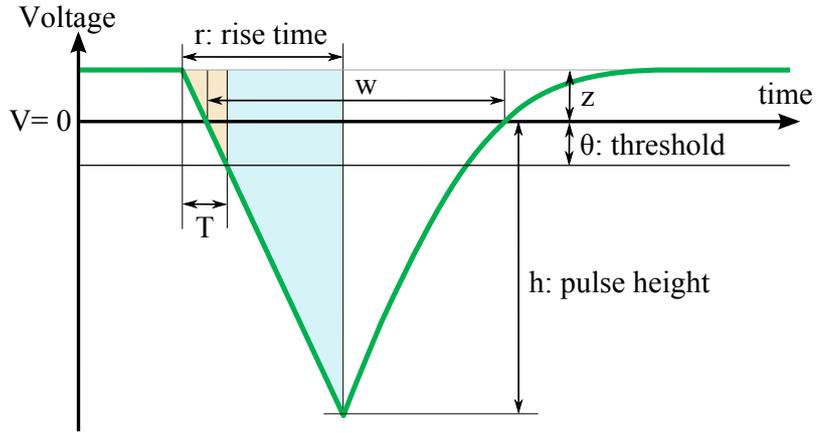


図 5: t-Q 補正

### 3 解析

#### 3.1 キャリブレーション

- ADC キャリブレーション

ADC は入力されたアナログ信号を積分した値に対応する数値を返すが、これは実際のエネルギー値とは異なる。そこで、 $\gamma$  線のエネルギー値と ADC の出力値は

$$\text{energy}[\text{keV}] = p \times \text{ADC} + q$$

のような一次関数であるとし  $^{22}\text{Na}$  線源が放出する 511keV の  $\gamma$  線と pedestal を利用して  $p, q$  を決定した。ここで、511keV は単一スペクトルであるので、ガウシアンで fitting を行った。また、pedestal も fitting を行った。結果、 $p$  は  $0.34692 \pm 0.00002$ ,  $q$  は  $-42.1 \pm 0.005$  となった。

- TDC キャリブレーション

クロック信号の一方を TDC start, 他方を一定の間隔で delay させたあと各 channel に入れて測定した。各 delay の間隔はオシロスコープで計 4 人が delay 時間を計測し各自の 4 つの値の平均をとったものを採用した。以下はその表である。

TDC1[count]	264.8	513.5	736.9	980.7	1204.3	1451.7	1674.8	1920.9
TDC2[count]	264.0	511.8	734.3	977.6	1200.0	1447.2	1669.5	1914.7
時間間隔 [ns]	55	116	173	234	290	351	407	468
TDC1[count]	2144.9	2391.1	2614.9	2856.0	3080.0	3324.5	3548.6	
TDC2[count]	2137.8	2383.3	2606.3	2846.6	3070.0	3313.1	3536.6	
時間間隔 [ns]	524	586	641	701	758	819	874	

$$\text{time}[\text{ns}] = a_i \times \text{TDC}_i + b_i$$

( $i=1,2$ ) とし、このデータを用いて Excel の最小二乗法により  $a, b$  を決定した。 $a_1 = 0.2494 \pm 0.0001$ ,  $b_1 = 11.0 \pm 0.2$ ,  $a_2 = 0.2503 \pm 0.0001$ ,  $b_2 = 11.1 \pm 0.2$  となった。

#### 3.2 カッティング

図 6 はキャリブレーション後の TDC1 と TDC2 (以下 T1, T2 と称する) の相関を示したものである。

この図において、 $T1=990$  付近のデータは同一の信号により正常にスタート・TDC1 ストップがつけられたものであり、それ以外は何らかの原因により正常にデータが取得できていないものである。よって  $985 < T1 < 997$  以外の範囲にあるデータをまず取り除いた。さらに T2 が 1000 以上のものについても何らかの原因で TDC2 のストップが遅れたものと見られ、負の崩壊時間を与えるためこれを排除した。

#### 3.3 t-Q 補正

崩壊時間に相当する  $T1 - T2$  とキャリブレーション後の ADC1 (以下 E1 と称する) との相関を示したのが図 7 である。このデータに式 9 で述べた t-Q 補正を行う。これらのデータの大半が寿命 0 の p-Ps であるため、これらを開数

$$y = \frac{a}{x + b}$$

を用いて fitting した。結果、 $a$  は  $10964 \pm 0.3$ ,  $b$  は  $-8.19 \pm 0.003$  となった。t-Q 補正後の崩壊時間を  $T_m[\text{ns}]$  として、 $T_m$  と E1 との相関を示したのが図 8 である。

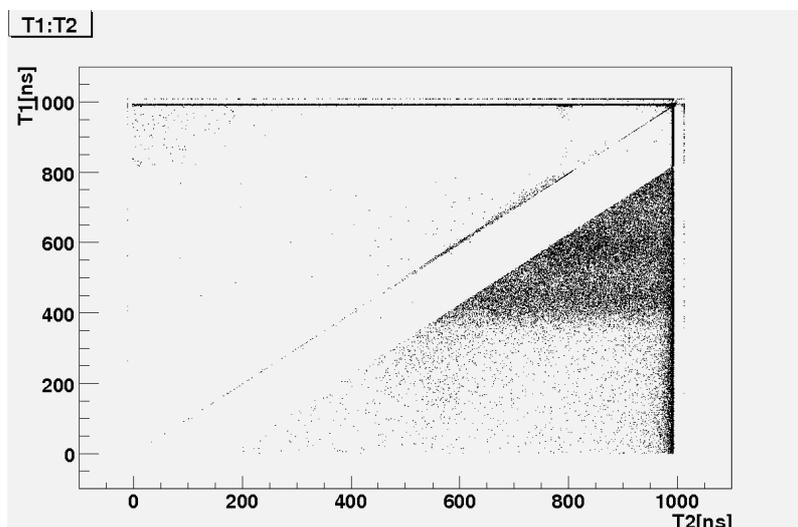


図 6: TDC 相関

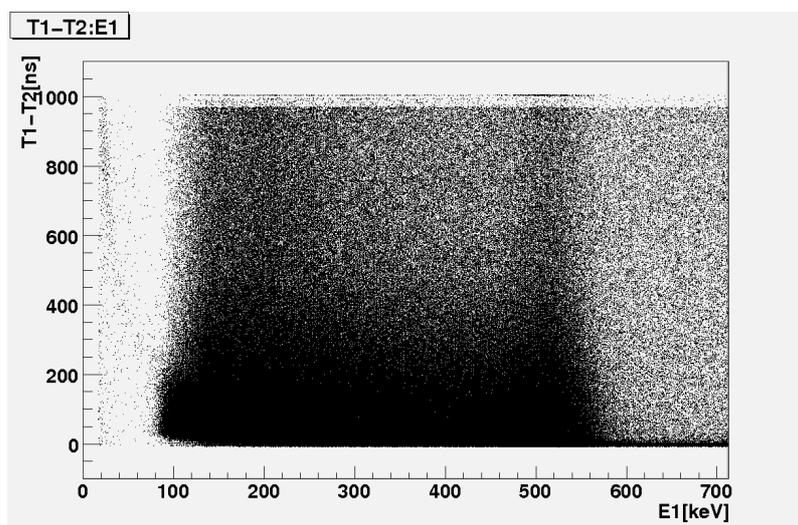


図 7: T1-T2:E1 相関

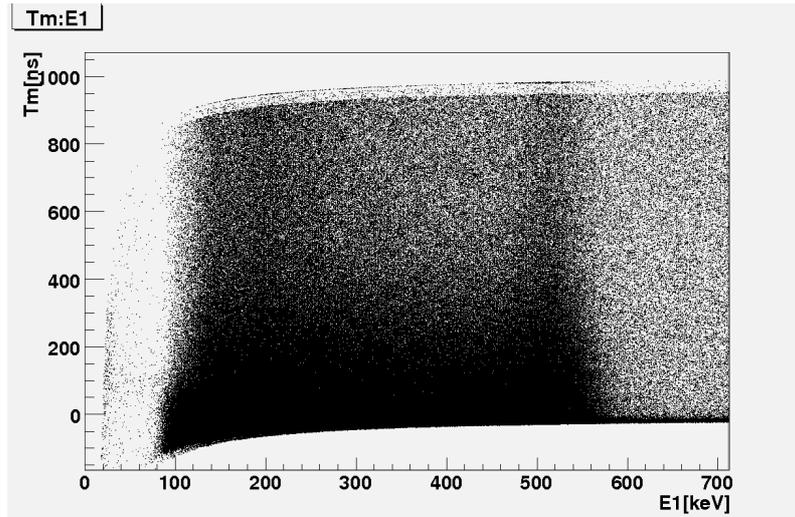


図 8:  $T_m:E1$  相関

### 3.4 fitting

図 8 に示すデータを用いて寿命を決定する。まず, 511keV 付近のデータはほとんどが p-Ps の崩壊を示すものであるため o-Ps の寿命を評価するために不適切である。またエネルギーが低い領域では threshold 付近の波形が不安定であるために TDC のデータの精度が低い。これらの理由から, 図 8 に示すデータのうち  $200 < E1 < 450$ ,  $-200 < T_m < 900$  の範囲にあるものを fitting に使用する。図 9 はこれらを用いた  $T_m$  のヒストグラムであり, これら関数

$$y = A \exp\left(-\frac{x}{\tau}\right) + B$$

(ただし  $\tau$  は寿命,  $B$  は background を表す。)を用いて図 10 のように fitting する。

ここで, 図 9 を見ると  $T_m$  が 600ns から 900ns の範囲は background 中心で fitting における background 評価には重要な範囲である一方, データがばらついており fitting の精度に悪影響を与える恐れもある。そこで今回は,

1. 600ns までの範囲で fitting を行う。
2. 900ns までの範囲で fitting を行う。

の二通りの fitting を行った。なお開始時間に関しては 0 から 400 まで 4 刻みで動かした。各 fitting による寿命  $\tau$  をエラーバーつきで表示したものが図 11, 12 である。なお赤い直線は理論値 142.01[ns] を示している。

ここでどちらの fitting が優れているかを検討する。どちらも fitting 開始時間が 0 から 150 の範囲では寿命の値が安定し誤差も小さい。安定領域におけるいくつかの数値を図 1 に示す。

これを比べると 900ns まで fitting したほうがより安定であり, また誤差も小さいことがわかる。よって 900ns までの fitting のほうが優れていると言える。

ここでは結果として, fitting 範囲が 40~900[ns] のものを採用する。

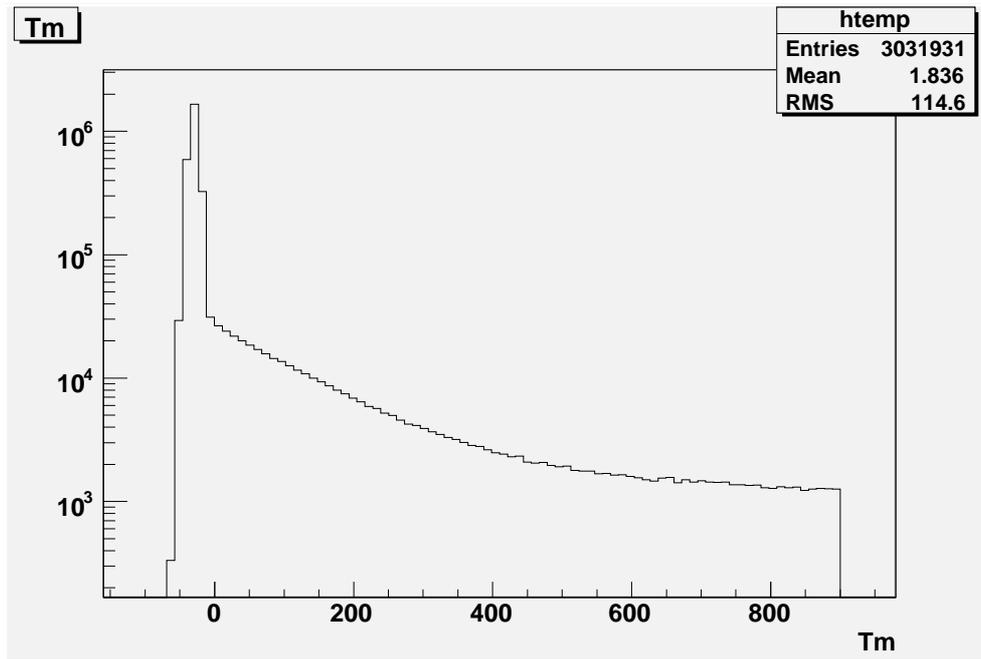


図 9: Tm ヒストグラム

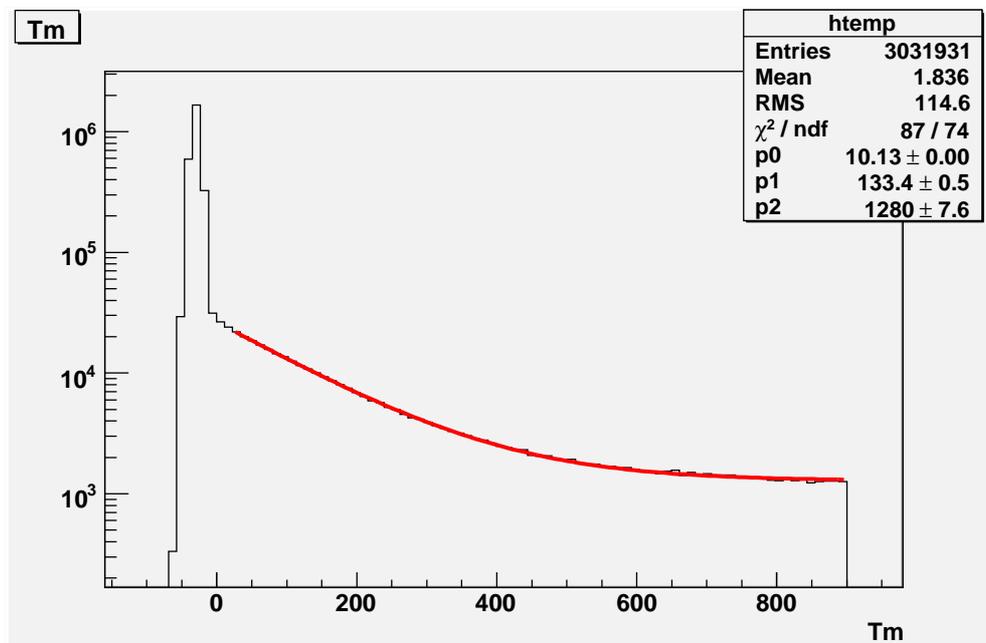


図 10: fitting

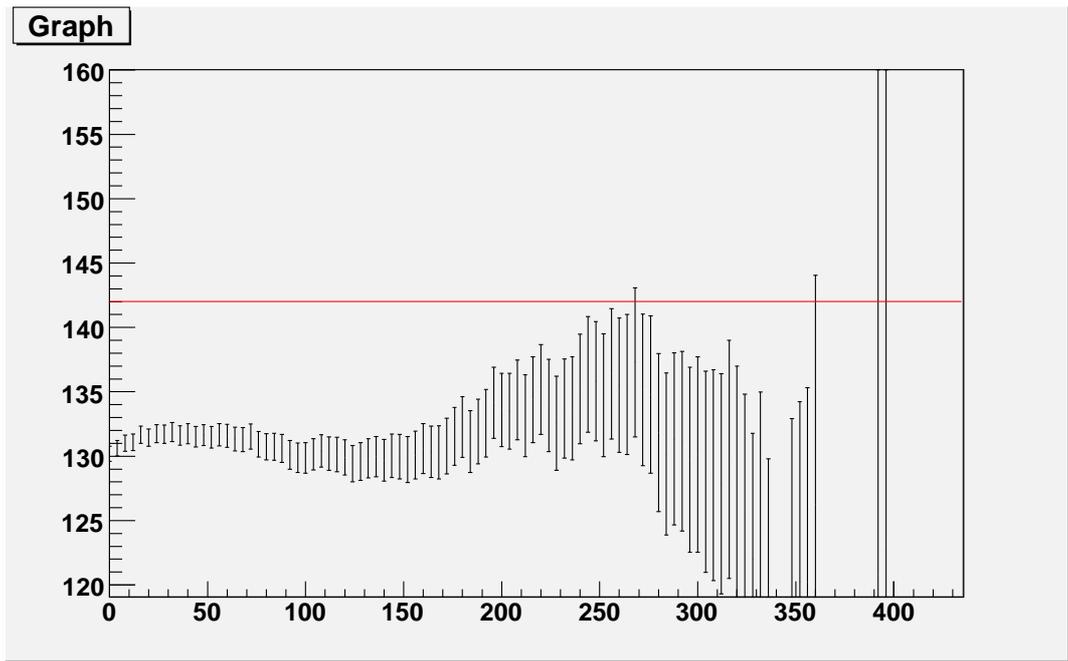


図 11: 600ns まで fitting

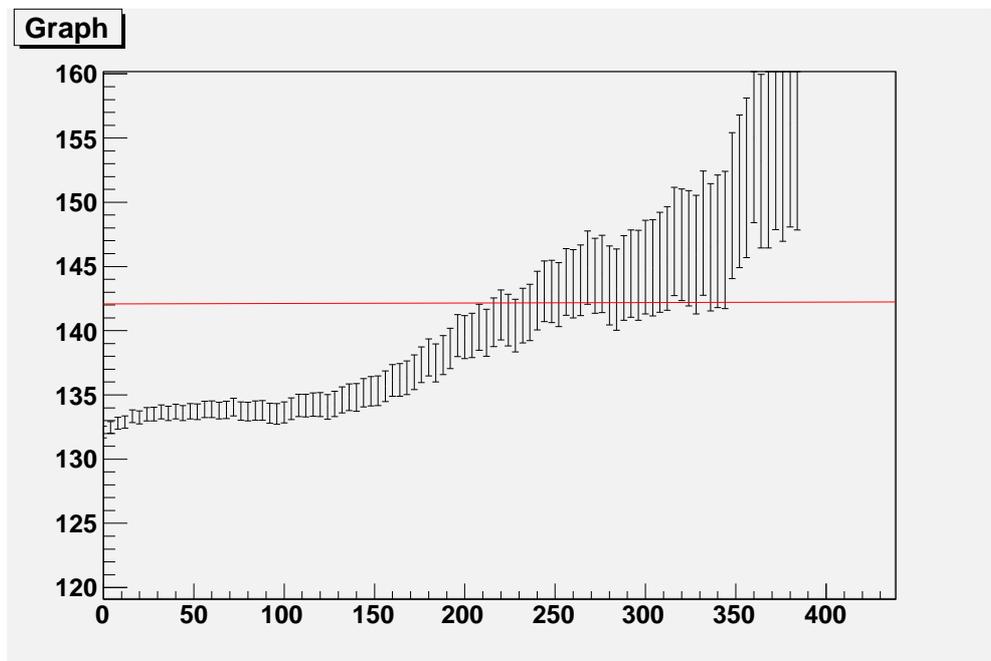


図 12: 900ns まで fitting

表 1: 各 fitting における寿命と誤差

	フィット開始	寿命 $\tau$ ( $\times 10^2$ )	誤差 ( $\times 10^{-2}$ )
600	40	1.317414	7.781320
	80	1.307290	10.22472
	120	1.299084	13.76082
	フィット開始	寿命 $\tau$ ( $\times 10^2$ )	誤差 ( $\times 10^{-2}$ )
900	40	1.336921	5.701099
	80	1.336967	7.243491
	120	1.342382	9.362274

## 4 考察

### 4.1 誤差の評価

fitting 範囲が 40~900[ns] のデータを採用すると、結果は  $\tau = 133.69 \pm 0.57$ [ns] である。

この誤差の項は calibration 等の誤差の伝播を含んでいない。そこで、いろいろな段階での誤差を考える。但し、今実験の各々のデータの使い方は複雑で、レポート作成者の理解の範疇をこえていたため、非常に大雑把な評価のみ行う。

まず、1. 考えるべき誤差と 2. 考えなくてもよいと思われる誤差 に分類する。

#### 1. 考えるべき誤差

- (a) TDC calibration の際の時間の遅れのオシロスコープでの読み取り誤差
- (b) TDC calibration の際の TDC の値のブレ
- (c) TDC calibration の際の線形近似での TDC 係数の統計誤差

#### 2. 考えなくてもよいと思われる誤差

- (a) t-Q 補正の誤差
- (b) ADCcalibration に関する誤差 (ADC のデータは t-Q 補正と Cutting にしか使われない)
- (c) TDCcalibration の線形近似での定数部分の誤差 (崩壊時間の定数分の差は fitting には影響しない)

などが考えられる。

1. の 3 種の相対誤差をそれぞれ  $\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$  とする。

(a) について、各人の目盛り読み取りの相対誤差を 1% と仮定すると、4 人の平均を取って

$$\sigma_a = \frac{0.01}{\sqrt{4}} = 0.005$$

(b) について、各 TDCcalibration の Gaussian での fitting を採用して、

(各値での相対誤差)<sup>2</sup>  $\leq 1.8 \times 10^{-3} = 3.2 \times 10^{-6} \ll \sigma_a^2 = 2.5 \times 10^{-5}$  (参照: 表 2) であり、

$\sigma_b^2$  は  $\sigma_a^2$  の二乗に比べて無視できる、とした。

delay[ns]	TDC1 の相対誤差	TDC2 の相対誤差
54.775	0.00181	0.00160
116.45	0.00130	0.00099
173.15	0.00096	0.00062
233.7	0.00068	0.00074
289.65	0.00037	0.00040
351.3	0.00034	0.00040
406.75	0.00042	0.00042
467.5	0.00033	0.00026
524.25	0.00035	0.00037
585.5	0.00024	0.00031
641.25	0.00023	0.00030
700.75	0.00018	0.00030
757.5	0.00018	0.00031
818.75	0.00018	0.00018
873.75	0.00016	0.00021

表 2: TDC1,TDC2 の値の fitting 誤差

(c) について, TDC1 の ERROR を  $\sigma_{c1}$ , TDC2 の ERROR を  $\sigma_{c2}$  とすると, Excel の LINEST 関数の ERROR の値を採用して

$$\sigma_c^2 = \sigma_{c1}^2 + \sigma_{c2}^2 = \left(\frac{0.0001}{0.2495}\right)^2 + \left(\frac{0.0001}{0.2503}\right)^2$$

となる。

この三つと, もともとの寿命の fitting 相対誤差  $\sigma_\tau^2 = (0.6/133.7)^2$  を合わせて  $\sigma^2 = \sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_c^2 + \sigma_\tau^2$   $\sigma_a^2 + \sigma_\tau^2 = 4.5 \times 10^{-5}$  よって 相対誤差  $\sigma = 6.7 \times 10^{-3}$  と評価される。

従って (寿命) =  $133.69 \pm 0.90$ [ns] となった。

## 4.2 pick off の評価

実験で得た (見かけの) 寿命の値は,  $\alpha$ -Ps  $\rightarrow 3\gamma$  の崩壊のみでなく, pick off 過程 (スピン交換反応なども存在するが, ここではまとめて pick off と述べる) の寄与も含んだ崩壊率から求まったものである。従って, 純粋に  $3\gamma$  崩壊の寿命  $\tau_3$  を求める際には, この pick off の影響を除外しなければならない。

具体的には,  $3\gamma$  崩壊の崩壊率  $\Gamma_{3\gamma} (= 1/\tau_{3\gamma})$  とは別に pick off での崩壊率  $\Gamma_{\text{pick}}$  を考える。このとき,  $\Gamma_{\text{pick}}$  を定数とするか, 時間経過によるかで解析の難しさや確度が変わる。

この  $\Gamma_{\text{pick}}$  を評価する方法として, 以下が考えられる。

- (1) 気圧などを変えた各環境下での実験で得られた (見かけの) 寿命 ( $=1/(\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{\text{pick}})$ ) をもとに,  $\Gamma_{\text{pick}}$  を, 環境を決定するパラメータ (気圧 etc.) の関数として評価し, 真空状態にこの関数を外挿する。
- (2) 実験データから, 何らかの方法により pick off 崩壊のみのデータを取りだし, fitting に使用するデータから差し引いておく。ex.(摂動で得た) 理論値下でのモンテカルル口法により,  $3\gamma$  崩壊のみの各時間での崩壊数を再現し, そのデータを実験で得たデータから差し引く [1]。(pick off が寿命に及ぼす影響は小さく, 真の理

論値と摂動値の差も小さいので、モンテカルロ法に真の理論値を使わなかったことによる寿命に対する影響は無視できるとする)

方法 (1) において、 $\Gamma_{\text{pick}}$  は各パラメータに対し線型な変化をするわけではないので、関数としての正確な評価はかなり難しい。さらに、pick off 反応は、真空引きしても残ってしまう空気、シリカパウダーと結合した水分子、シリカパウダーそのものによって引き起こされる。したがって、方法 (1) では、真空計だけでなく、シリカパウダーの状態や量なども変化する場合を考えなければ、精密かつ説得力のある結果は得られない。

そして今実験では、真空計の値は 0MPa(真空) を示しており、さらにシリカパウダーの量、質に関する定量的なデータを取っていないので、pick off の評価をするならば (2) の方法に依るほかない。しかし、実現可能な評価法に考えが至ることはなかった。

### 4.3 TDC2 のグラフのコブ

TDC2 の生データの log スケールヒストグラム (図 13) を作成すると、  
 なだらかなカーブの途中、 $3200 < \text{TDC2} < 3300$  ( $789 < T_2 < 814$ ) あたりに小さなコブがある。

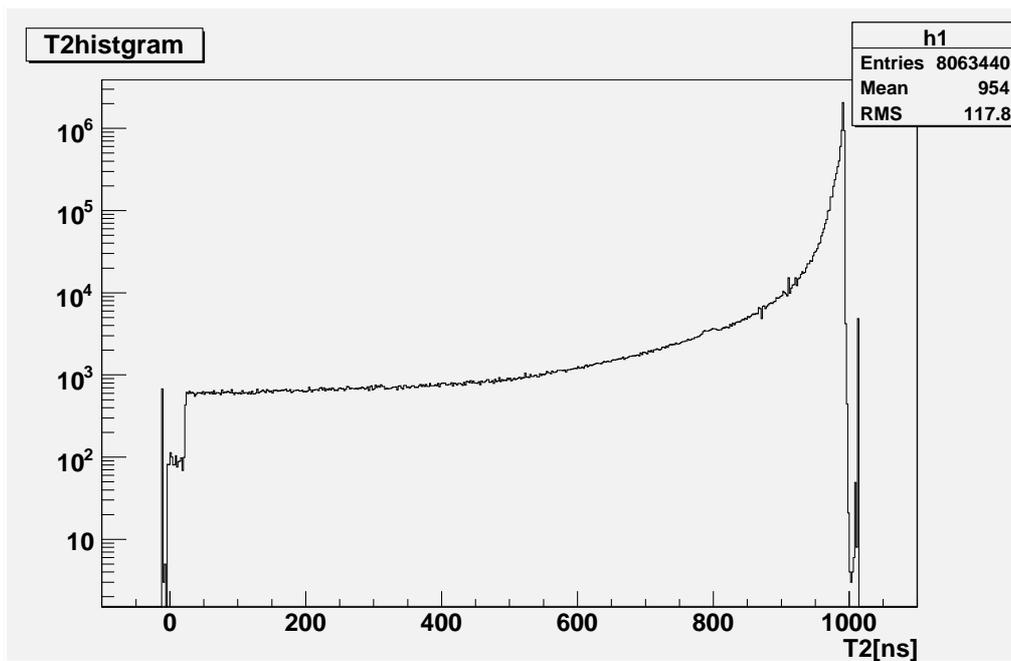


図 13: TDC2 のコブ

2009 後期 A2 の実験でも、これに類似のコブが生じており [2]、このグループはコブが生じる原因を特定できずに解析で苦しんだということらしいので、昨年のもよりも目立たないコブではあるが、この問題の原因を探った。

さて、図 14 は生データの TDC1:TDC2 相関である。このデータで、 $\text{TDC1} = \text{TDC2}$  となる傾き 1 の直線上にプロットが少数分布しているが、このうち上述の範囲のみ分布が密になっているのが見て取れる。

したがって、カッティングにより  $985 < T_1 < 997$  ( $\rightarrow 4000 < \text{TDC1} < 4049$ ) の範囲を抜き出した後のデータである図 15 ではこの範囲が排除されているためコブは見受けられず、このデータを基に寿命を求めた上述の解析にはコブの影響は入らない、と思われる。

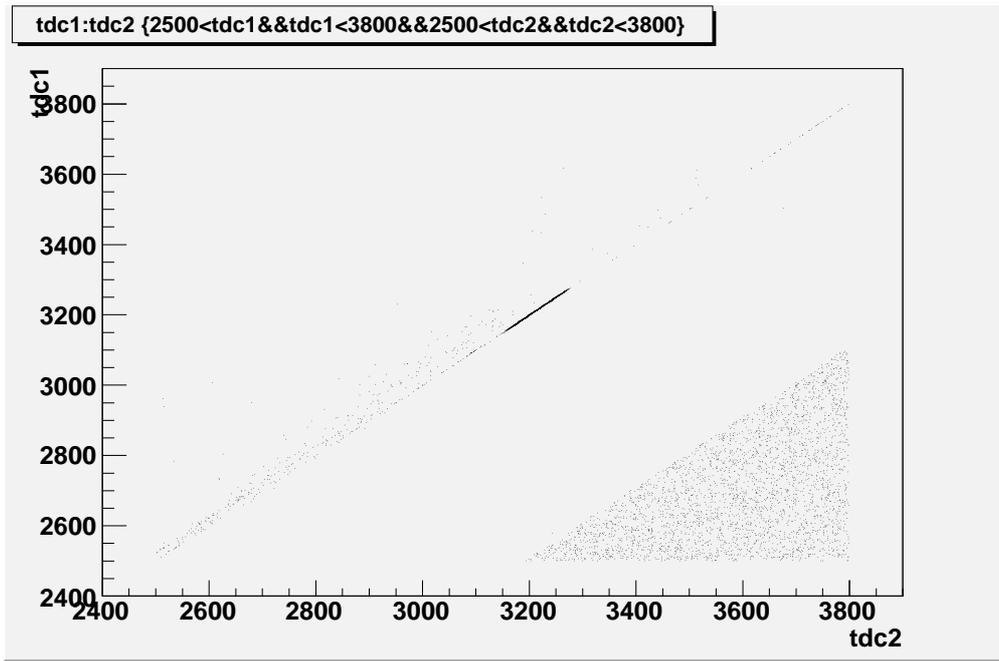


図 14: TDC1:TDC2

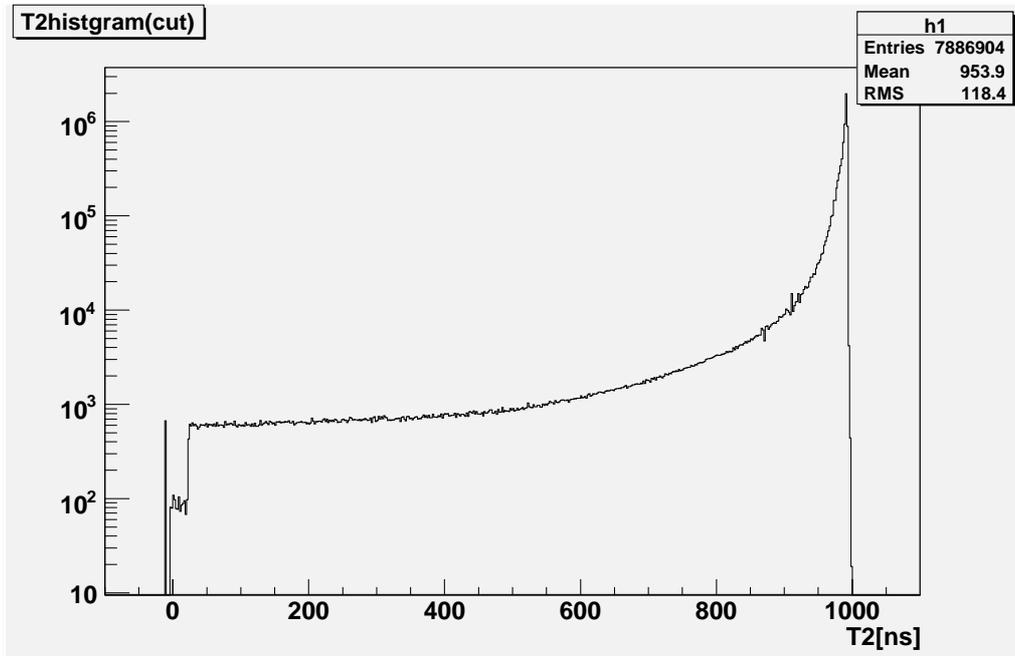


図 15: OkinaCut 後の TDC2

さて、ここで回路中の Latch について述べなければならないことがある。今実験の回路では、Latch は ADC の Gate のみ入っており、TDC には入っていない。したがって TDC に関しては stop の信号が入った直後に生じる可能性のある誤作動を防げず、通常入るはずのない範囲にデータが入ってきたと考えられる。そして実際、TDC にも Latch をいれて行ったテスト実験結果 (図 16) には TDC1=TDC2 のラインは存在しない。

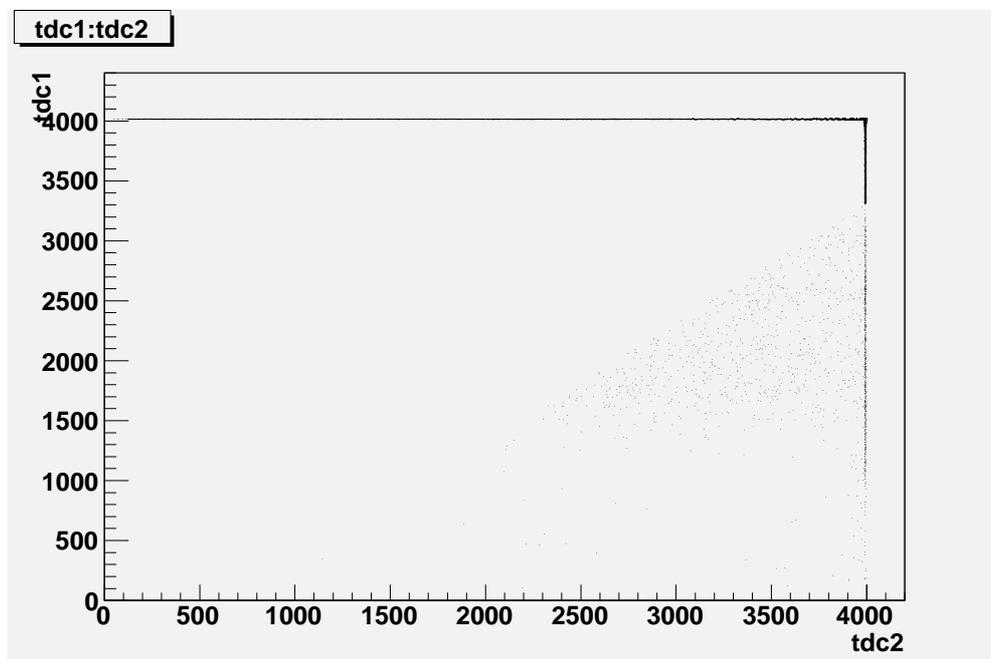


図 16: Latch を TDC にも入れた場合の TDC 分布

ただし、なぜ  $3200 < TDC < 3300$  のあたりに濃い分布が存在するのかの詳しい原因は特定できなかった。

#### 4.4 実験環境の変化

実験期間は約 6 日にわたったので、室温、湿度等の変化により、ADC, TDC の calibration 値の変化が十分考えられる。そこで、実験開始直後 1000000 個までのデータと、実験終了前の 1000000 個を、それぞれのデータの ADC, TDC 分布を確認した。結果を図 17~22 に示す。

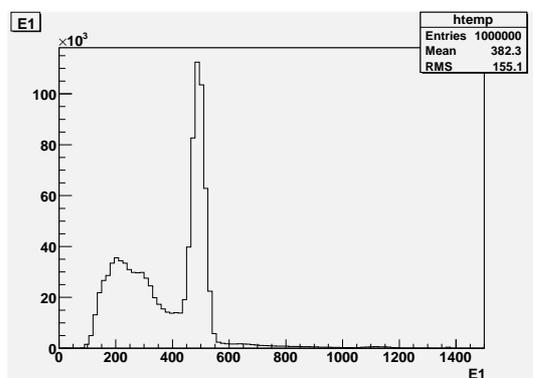


図 17: 実験開始直後の Energy

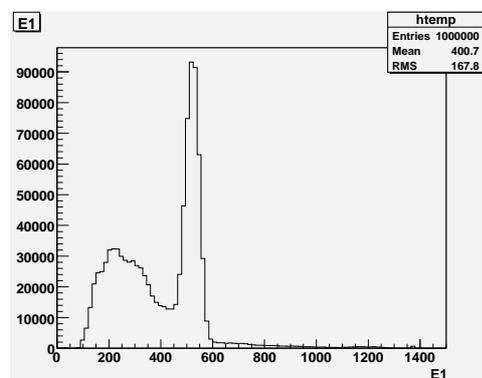


図 18: 実験終了直前の Energy

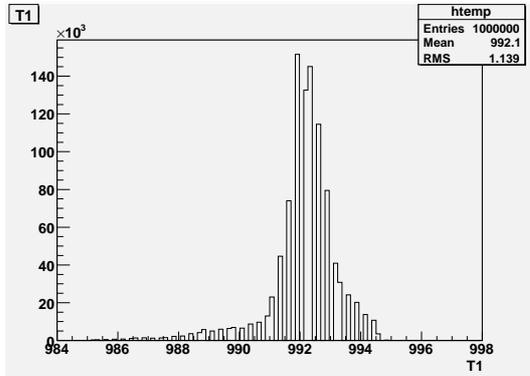


図 19: 実験開始直後の T1

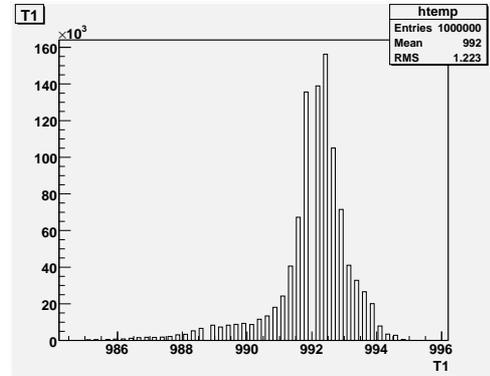


図 20: 実験終了直前の T1

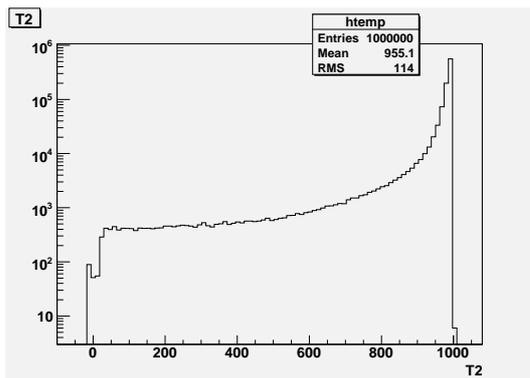


図 21: 実験開始直後の T2

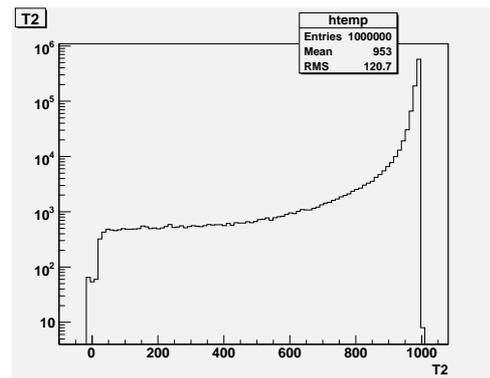


図 22: 実験終了直前の T2

#### 4.5 崩壊時間 $t$ の fitting 範囲

今実験で最終的に使用した fitting 範囲は  $t = 40 \sim 900[\text{ns}]$  であるが、プロの実験になるとこの範囲は  $\sim$  数  $\mu\text{s}$  にも及ぶ [1]。

#### 4.6 一歩進んだ実験のために

- pick off の評価法  
学生実験でも可能な pick off の評価法を考える。
- back ground を減らすために、より強度の弱い線源を使用する ( $3\gamma$  崩壊のイベント数は強度に比例する一方、back ground はプラスチックシンチレータと NaI それぞれの検出確率が強度に比例するので coincidence をとっている実験データにかかわってくる back ground は強度の二乗に比例する)
- 環境変化の評価法を確立する

## 関連図書

- [1] 「束縛系 QED における高次補正検証実験」陣内修, 浅井祥仁, 小林富雄, 高エネルギーニュース (2000 年)
- [2] 2009 年度後期 A2 レポート
- [3] グレン・F・ノル著, 木村逸郎訳「放射線計測ハンドブック」, 日刊工業新聞社

## 謝辞

実験にあたり, ご指導して下さった中家先生, TA の河崎さん, 平木さんに感謝いたします。