

# オルソポジトロニウムの 寿命測定

京都大学理学部

2008年度前期 課題演習A1

池田 達彦

片倉 正一郎

鈴木 大二郎

松岡 佳大

村瀬 健太

# 目次

## 1. イントロダクション

- 1.1 オルソポジトロニウムとは
- 1.2 実験目的
- 1.3 実験方法

## 2. セットアップと実験原理

- 2.1 検出器のセットアップ
- 2.2 電子回路のユニットの配線
- 2.3 実験原理

## 3. キャリブレーションと補正

- 3.1 ADC のキャリブレーション
- 3.2 TDCのキャリブレーション
- 3.3 t-Q 補正
- 3.4 接続

## 4. 実験結果と解析

- 4.1 実験データ
- 4.2 解析と考察
  - (a) 1 hit event
  - (b) 2 hit event
  - (c) 3 hit event

## 5. 結論

- 5.1 結論
- 5.2 改善点等

## 6. Appendix(誤差の評価)

- 6.1 概略
- 6.2 誤差伝播の規則
- 6.3 ヒストグラムのエントリー数の誤差
- 6.4 ADC 及び TDC のキャリブレーションと t-Q 補正の誤差
- 6.5 時間の誤差
- 6.6 横軸の誤差の fitting の誤差への伝播

## 参考文献

# 1 イントロダクション

## 1.1 オルソポジトロニウムとは

ポジトロニウム(Ps)とは、電子と陽電子が電磁相互作用で束縛された系のことである。これは水素原子の原子核(陽子)が陽電子に置き換わったもので、水素原子と似た性質をもつ。

基底状態の Ps には、電子と陽電子のスピンの反平行で全スピンの0のパラポジトロニウム(p-Ps)と、電子と陽電子のスピンの平行で全スピンの1のオルソポジトロニウム(o-Ps)がある。これらのエネルギー差は  $8.4 \times 10^{-4}$  eV で、p-Psの方が低いが、Psの形成は通常およそ1MeV以上と、このエネルギー間隔が無視できるほど高いエネルギーで起きる。ゆえに生成確率は状態数  $2S + 1$  (Sはスピン量子数)に支配されることになり、p-Psとo-Psの生成比は1:3となる。また保存則より、p-Psは主に2光子( $2\gamma$ )へと崩壊し、o-Psは主に3光子( $3\gamma$ )へと崩壊する。理論計算から、真空中では、p-Psの寿命は約123psec、o-Psの寿命は約140nsecであることがわかっている。

物質中では、o-Psは物質との反応のために真空中よりも寿命が短くなる。この反応には、ピックオフ消滅、スピン交換反応、化学反応がある。ピックオフ消滅は、Psが他の原子と衝突したとき、Ps中の陽電子と物質中の電子の反応。スピン交換反応は、物質を構成する分子が不対電子を持つ場合にPs中の電子が物質中に含まれる電子とスピンを入れかえることがあるが、これによりo-Psはp-Psになり、p-Psの短い寿命で崩壊する反応。化学反応は、Psが水素原子と似た構造をしていることから起きる酸化反応や化合物生成などの反応。

## 1.2 実験目的

本実験の目的は o-Ps の真空中の(平均)寿命を求めることである。さらには、QED(量子電磁力学)から予測される寿命と比較することで、理論の検証を試みることである。

ここでの寿命  $\tau$  は、 $N$  を時刻  $t$  での o-Ps の数、 $N_0$  を測定開始時刻( $t_0 = 0$ )での o-Ps の数としたときに次式に出てくる  $\tau$  である。

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.1)$$

## 1.3 実験方法

$^{22}\text{Na}$  の  $\beta^+$  崩壊によって出てくる陽電子をシリカパウダー(主成分:  $\text{SiO}_2$ )と反応させて Ps を生成する。Ps が発生した時刻を知るために  $\beta^+$  崩壊によって出てきた陽電子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 の崩壊によって出てくる  $\gamma$  線を NaIシンチレータで検出する。これらの検出時刻の差から Ps の崩壊までにかかった時間を求め、イベント数をためることにより、式(1.1)での  $t$  と  $N$  の関係を統計的に求め、o-Ps の寿命  $\tau$  を求める。ただし、NaIシンチレータで検出する  $\gamma$  線は o-Ps からだけでなく、p-Ps から生成されるものもふくまれるため、それらを正確に見分けることが o-Ps の寿命  $\tau$  を求めることの鍵となる。詳しくは実験原理や解析のところで説明する。

## 2 セットアップと実験原理

### 2.1 検出器のセットアップ

放射線検出器は、図 2-1 のように設置した。

図 2-1 の写真中央にある透明な容器は、図 2-2 に単体で取り出したものを写してある。これは、図 2-3 で示されているように、放射線源 ( $^{22}\text{Na}$ )、遮蔽用の鉛(ドーナツ状)、シリカパウダーを入れて、内部を真空にするための容器である。シリカパウダーは、線源 ( $^{22}\text{Na}$ ) から出た  $\beta^+$  を減速させ、Ps を生成するために設置してある。遮蔽用鉛は、線源 ( $^{22}\text{Na}$ ) から出る  $\beta^+$  がシリカパウダーを通過せずに直接検出器に入ることがないようにするために設置してある。容器の中を真空にするのは、我々の目的が真空中での o-Ps の寿命を求めることであるからである。

図 2-4 は、図 2-1 の矢印の方向からみたものである。図 2-4 の①～⑧は放射線検出器で、①～⑦はNaIシンチレータである。⑧はプラスチックシンチレータからの光を感知する PMT であり、すべて Negative-HV に接続した。各シンチレータにかけた電圧は下の表 2-1 にまとめた。

表 2-1 設定電圧

シンチレータ番号	③	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
設定した電圧 (V)	-1050	-1040	-1115	-1100	-1200	-1175	-1160	-1300

①～⑦のNaIシンチレータは o-Ps 崩壊後に生成する  $\gamma$  線を検出することが目的である。Ps の持つエネルギーは、511keV (電子・陽電子の静止エネルギー)  $\times$  2 程度なので、エネルギーと運動量の保存則より、3  $\gamma$  のそれぞれが持つエネルギーは 511keV 以下になる。ゆえに、511keV 以下の  $\gamma$  線が良く検出されるようにシンチレータにかけの電圧を設定した。具体的には、511keV に対応した波高がオシロスコープでみて 24.0mV となるように決めた。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おり、さらに成分中の原子番号 Z が大きく、密度が高いため  $\gamma$  線スペクトル測定用として優れているからである。加えて比較的安価なため。

⑧のプラスチックシンチレータからの光を感知する PMT は  $\beta^+$  がプラスチックシンチレータを過した際に発生する光を検出することが目的である。プラスチックシンチレータを用いたのは、時間応答がよく、 $\beta$  線スペクトル測定用として有用であるから。しかしプラスチックシンチレータの出す光は極めて微弱なため余計な光があるとうまく測定ができない。そこでプラスチックシンチレータのすぐそばに⑧の PMT を置き、余計な光がこの PMT に入らないように、検出装置全体を図 2-5、図 2-6、図 2-7 に示すように、暗箱、暗幕、暗幕(分厚いカーテン)に入れて外部からの光をさえぎった。



图 2-1 放射線検出器



图 2-2 真空容器

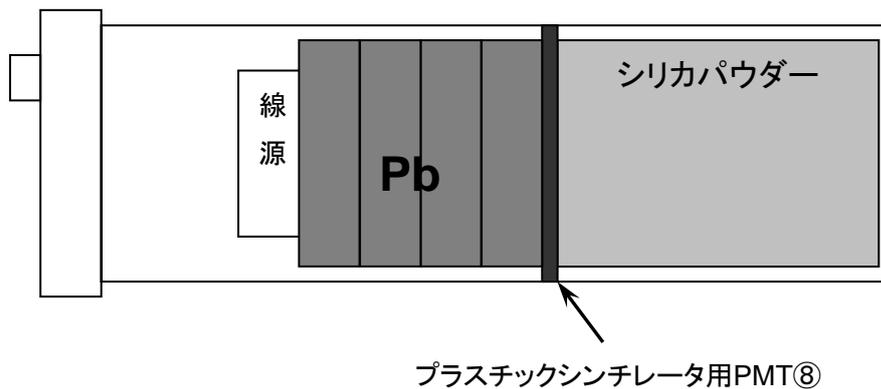


図 2-3 真空容器の中身

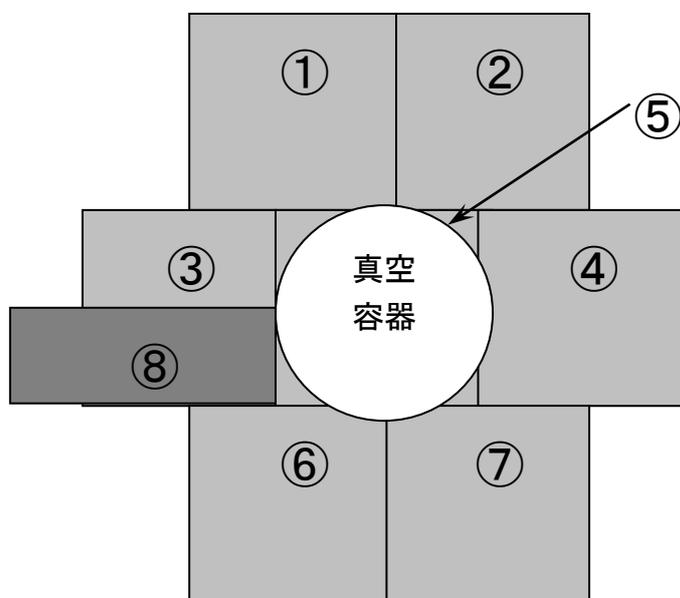


図 2-4 横から見た検出器の配置図



图 2-5 暗箱



图 2-6 暗幕



図 2-7 暗幕(分厚いカーテン)

## 2.2 電子回路ユニットの配線

図 2-1は、実験の回路図である。以下で各装置の役割をこの回路図に即して説明する。

- **Divider** …入力信号を2つに分配して出力する。  
我々の実験では、NaIシンチレータからの信号を ADC 用と TDC 用とに分配するのに用いた。
- **Discriminator** …リニア入力パルスの先端部の波高が、設定した閾値を超えたときだけロジック出力パルスが発生する。  
我々の実験では、閾値を 8.4mV に設定した。設定可能値の下限よりすこし手前に設定した。
- **Coincidence** …入力端子の1つにパルスが到達してから一定時間内に、他のすべての入力端子にパルスが現れた場合に、ロジックパルスを出力する。  
我々の実験では、7 個の各NaIシンチレータからの信号のうちどれか 1 つの信号とプラスチックシンチレータからの信号の同時計測に使った。
- **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。  
我々の実験では、ゲートパルスの幅はTDCへの入力に対しては600nsec、ADCへの入力に対しては 1000nsec に設定した。
- **Fan In/Out (or 回路)** …2つ以上の入力端子の少なくとも1つにロジックパルスの入力があった場合に、ロジックパルスを出力する。  
我々の実験では、DiscriminatorとCoincidenceの間では7個のNaIシンチレータからの信号に

対して用い、Discriminator と or の間では⑥と⑦のNaIシンチレータからの信号に対して用いた。

- ・ADC …ゲートパルスが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を入力を受け入れ、その波高の積分値に線形に関係した数字(デジタルコード)を出力する。

我々の実験で使用したのは12ビットの ADC なので、コード数は $2^{12} = 4096$ であり、0 から4095 の数字が出力される。これと較正結果とを比べてパルスの波高を求めた。

我々の実験では、NaIシンチレータで検出した $\gamma$ 線のエネルギーを測定するために用いた。

- ・TDC …com start にパルスが入力してから、他のそれぞれの端子にパルスが入力があるまでの時間に線形に関係した数字(デジタルコード)を出力する。

我々の実験で使用した TDC は12ビットなので、出力されるのは 0 から 4095 の数字で、これを較正結果と比べて時間に変換した。ゆえに、stop の信号がない場合や stop の信号が遅すぎる場合は、4095 が出力されることになる。

我々の実験では、Ps の崩壊時間の測定に用いた。

- ・Delay …種類としては、単純にケーブル(同軸ケーブル)によって信号を遅らせるアナログの Delay と、回路によりデジタルなパルス信号を遅らせるデジタルの Delay がある。

我々の実験での使用は以下のようにになっている。

#### (1)Divider と ADC の間の Delay

ADC にゲートパルスが入力があった後にNaIシンチレータからの信号が ADC に入るように、NaIシンチレータからの信号を遅らせるためのもので、同軸ケーブルを用いた。なお、図 2-1 に書かれた遅延時間は、オシロスコープで測定した。

#### (2)Discriminator と TDC の間の Delay

Coincidence からの信号が TDC の com start に入力した後で、NaIシンチレータからの信号が TDC に入るようにNaIシンチレータからの信号を遅らせるためのもので、Fixed Delay を使用した。

#### (3) Gate Generator と TDC の間の Delay

Coincidence からの信号が TDC の com start に入力した後で、Gate Generator からの信号が TDC に入るようにプラスチックシンチレータからの信号を遅らせるためのもので、Fixed Delay を使用した。2つあるのは、TDC の性能上測定できない長い時間を測定できるようにし、実験の精度をあげるための工夫で、単に装置の性能を補うためのものであまり本質的ではない(より高性能の TDC があれば不要のもの)。

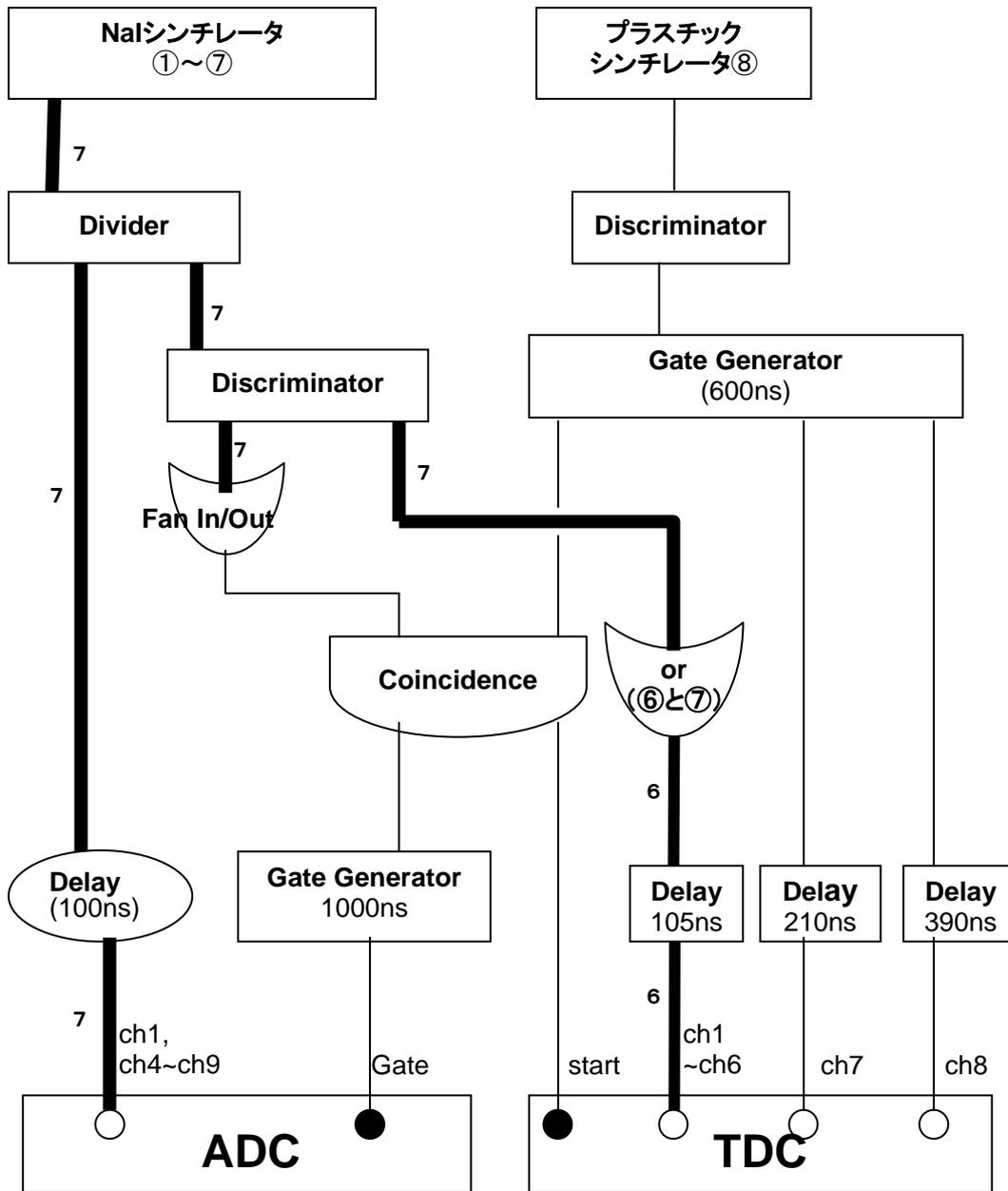


図 2-8 回路図

注：太線は複数のケーブル、細線は一本のケーブルを表す。複数本は、主に7本で、orとdelayの間と、delayとTDCの間のみ6本である。図中では、太線の横に数字で本数を書いてある。

## 2.3 実験原理

いかにして o-Ps の寿命を求めていくかを順に説明する。

### (1) Ps が生成されてから崩壊するまでにかかった時間 $\Delta t$ の求め方

まず、Ps が生成してから崩壊するまでにかかった時間  $\Delta t$  が TDC で測定された時間とどう関係しているか説明する。

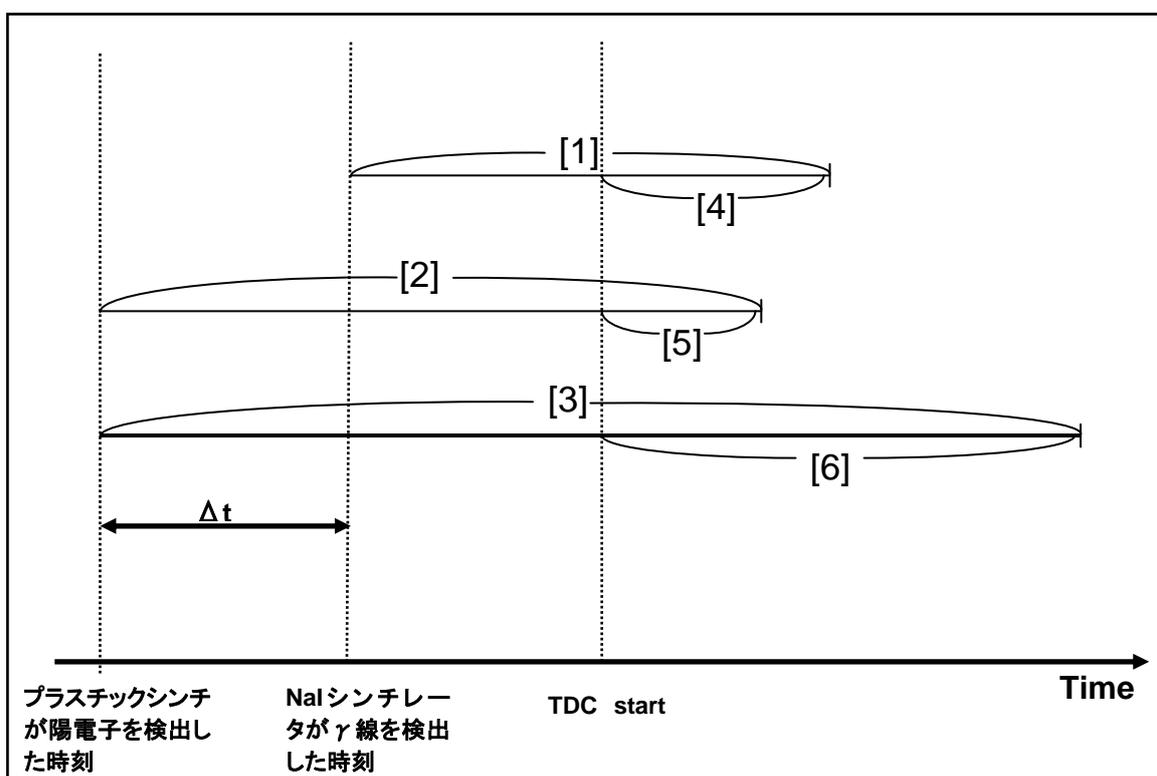


図 2-9

図 2-9 では、 $\Delta t$  を NaI シンチレータが  $\gamma$  線を検出した時刻とプラスチックシンチレータが陽電子を検出した時刻の差としているが、これは陽電子がプラスチックシンチレータを通過してから Ps を精製するまでの時間や、Ps が崩壊してから NaI シンチレータが  $\gamma$  線を検出までの時間は、予想される o-Ps の寿命に比べて十分に短いので、図 2-9 では同時とみなして書いてある。TDC start は TDC が測定を開始した時刻を表し、NaI シンチレータが  $\gamma$  線を検出した時刻 (Ps の崩壊時間) に依存する。

- ・[1]: ①~⑦の NaI シンチレータのうち  $\gamma$  線を検出した NaI シンチレータからの信号が Divider → Discriminator → (or →) Delay を通って TDC に入るまでの時間。  
完全に回路の組み方だけによるもので、固定された値。
- ・[2]: ⑧のプラスチックシンチレータからの信号が Discriminator → Gate Generator → Delay(210nsec) を通って TDC に入るまでの時間。  
完全に回路の組み方だけによるもので、固定された値。
- ・[3]: ⑧のプラスチックシンチレータからの信号が Discriminator → Gate Generator →

Delay(390nsec)を通過して TDC に入るまでの時間。

完全に回路の組み方だけによるもので、固定された値。

- ・[4]: 各 NaI シンチレータからの信号に対する TDC の Ch.1~Ch.6 の出力値に対応した時間。信号を出さなかった NaI シンチレータに対しては TDC はタイムアウトとなり、今回使用した TDC では 4095 を出力する。

自分自身あるいはほぼ同時に反応した他の NaI シンチレータが start を作っているため、固定された値 (TDC が 3000 程度の値を出力するように Delay を調節してある)。ただし、信号がない場合はタイムアウトで TDC は 4095 を出力してしまい正確な時間がわからないため考えない。

- ・[5]: 210nsec の Delay を通ったプラスチックシンチレータからの信号に対する TDC の Ch.7 の出力値に対応した時間。Ps の崩壊に時間がかかったときに TDC start の時刻が遅れるため、stop の信号が start の信号よりも先に TDC に入ることがあるが、その場合はこの[5]の時間は存在しないことになる。

- ・[6]: 390nsec の Delay を通ったプラスチックシンチレータからの信号に対する TDC の Ch.8 の出力値に対応した時間。

[5]の時間が存在しないほど Ps の崩壊にかかった時間が長い場合でも、時間測定ができるようにする工夫。

よって、[1]、[2]、[3]、[4]は固定された値で、補正の必要性を無視すれば[5]、[6]は崩壊時間  $\Delta t$  に線形に依存する値である。ここで、[4]はその有無でどの NaI シンチレータが信号を出したかを知るために用い、[5]と[6]は  $\Delta t$  を変数としたとき傾き 1 の一次関数であるから寿命を求めることに使える。

図からもわかるように、Ps の崩壊にかかった時間  $\Delta t$  は、 $\Delta t$  が小さい場合、

$$\Delta t = [2] + [4] - [1] - [5] \quad (2.1a)$$

であり、 $\Delta t$  が大きい場合、

$$\Delta t = [3] + [4] - [1] - [6] \quad (2.1b)$$

である。

## (2)Ps の寿命 $\tau$ の求め方

寿命  $\tau$  が式(1.1)を満たすものであることから、寿命  $\tau$  を知るには崩壊時間  $\Delta t$  とその時間で崩壊した Ps の数  $N$  の相関からその変化の様子さえ知ればよい。特に、 $\Delta t$  と  $N$  の関係をグラフにした場合、Ps の数  $N$  の方の軸を対数的にしたときグラフの傾きさえ知ればよい。ゆえに、 $\Delta t$  が定数だけシフトしたところでそれは変わらないので、

$$\Delta t' (= \Delta t - [2] - [4] + [1]) = -[5] \quad (2.2a)$$

または

$$\Delta t' (= \Delta t - [3] - [4] + [1]) = -[6] \quad (2.2b)$$

と  $N$  との関係を知れば十分であることがわかる。式(1.1)より、定数シフトの影響は定数倍されることにとどまる。さらに  $\Delta t'$  の符号を変えても、グラフを描くときの軸の向きが逆になるだけで、これ

も寿命を求めることに影響はない。

結局[5]、[6]は、測定によって知ることができる TDC の Ch.7、Ch.8 の出力値に対応しているので、細かな補正や o-Ps と p-Ps を見分けることを除けば、我々のこの実験によって Ps の寿命を測定できることがわかる。

まとめると、[5](または[6])の値と  $N$  との関係を片対数グラフにして、その傾きの逆数を求めることで寿命  $\tau$  が得られるということ。

### (3)Ps がいくつの光子に崩壊したかの判断方法

TDC の Ch.1~Ch.6 の出力値が適度な値(我々の設定では 3000 程度)である場合にその channel とつながった NaI シンチレータが  $\gamma$  線を検出したと判断する。(ただし、NaI シンチレータ⑥と⑦に対しては、TDC の Ch.6 に入る前に or をとっているので、ADC の値も判断材料に使う。)これによりイベント毎にどの NaI シンチレータが  $\gamma$  線を検出したか知ることができる。Ps の生成されるシリカパウダーの周りをほとんど視覚なく NaI シンチレータで囲んでいるので、各イベントで  $\gamma$  線を検出した NaI シンチレータの個数を知ることができる。この個数を Ps が崩壊して出てきた光子数と大雑把に等しいとする。ただし、可能性としては小さいが(適当な閾値を決めることで取り除けるものもある)、1つの光子がいくつかの NaI シンチレータに入ったり、1つの NaI シンチレータに複数の光子が入ったり、NaI と反応しなかった光子があったりなどのために必ずしも等しいわけではない。

### (4)補正について

(1)で時間  $\Delta t'$  を求める際に問題点がある。それは実際の時間間隔[5]や[6]と、TDC の出力値をキャリブレーションして時間に直した後の値がずれてくると言うことである。

まず、原因は、生のアナログの信号を Discriminator でデジタルの信号に変えるときに、ノイズなどを取り除くために閾値を設定しているが、そこから来る。NaI シンチレータなどの検出器は放射線を検出して信号を出す、その信号(波)はすぐにピークに達するわけではなく、立ち上がりにある程度の時間がかかる。しかもこの立ち上がり方が入射する放射線から検出器に吸収されるエネルギーによって異なる。(図 2-10 を参照)ゆえに、閾値を設定すると、実際に放射線を検出した時刻とデジタルの信号が出始める時刻の間には、放射線の吸収されるエネルギーに依存した関係がある。図 2-10 に概略図を描いた。図では、同時に発生して同時にピークを持つエネルギーの異なる2つの信号を Discriminator に通した場合の、デジタル信号の出始めに対応する部分がどのようにずれてくるかを示してある。

このような「ずれ」が影響してくるのは、図 2-9 での「TDC start」の部分である。なぜなら、TDC の start は NaI シンチレータからの信号が作っている、NaI シンチレータからの信号は  $\gamma$  線のエネルギーに依存した「ずれ」を受けるとその「ずれ」がそのまま「TDC start」をずらすからである。この「ずれ」は NaI シンチレータからの信号が実際より遅くなることから「TDC start」が遅れるほうにはたらく。TDC の start は遅れるが TDC の stop は変わらないので、TDC の出力値である図 2-9

の[5]や[6]が小さくなる。[5]と[6]は寿命を求めることに使われるので、これらに対する「ずれ」は補正してやらねばならない。

この補正は、どの NaI シンチレータかとそれが検出する  $\gamma$  線のエネルギーに依存してくる。以下この補正のことを t-Q 補正と呼ぶことにする。

t-Q 補正の仕方について説明する。(2)で我々の寿命の求め方から崩壊時間  $\Delta t$  を定数分シフトしても結果に影響がないことを述べたが、そのことから、基準となる NaI シンチレータで基準となる  $\gamma$  線の吸収エネルギーに比べて、各 NaI シンチレータに対して様々なエネルギーごとに「ずれ」がどれくらいなのかを、別の実験で求めたデータをもとに適当な関数で fit して得る。それを本実験のデータに補正として使う。

基準となる NaI シンチレータとしては、新しく別の NaI シンチレータとして、murakami(シンチレータ名)を用いた。基準となる  $\gamma$  線の吸収エネルギーとしては、同時に起きるイベントとして多いことと我々の関心のある Ps の 3 $\gamma$  崩壊で各光子のエネルギーは 511keV より小さいことから、511keV のエネルギーを選んだ。別の実験としては、線源として  $^{22}\text{Na}$  を用い、Ps の 2 $\gamma$  崩壊を利用する。この実験では主に 511keV のエネルギーの  $\gamma$  線が出てくるのだが、NaI シンチレータでの検出の際に光電吸収のほかにもコンプトン散乱をするため、511keV より小さいエネルギーに対応する信号を出すことがある。これを使って補正用のデータを集めることができる。

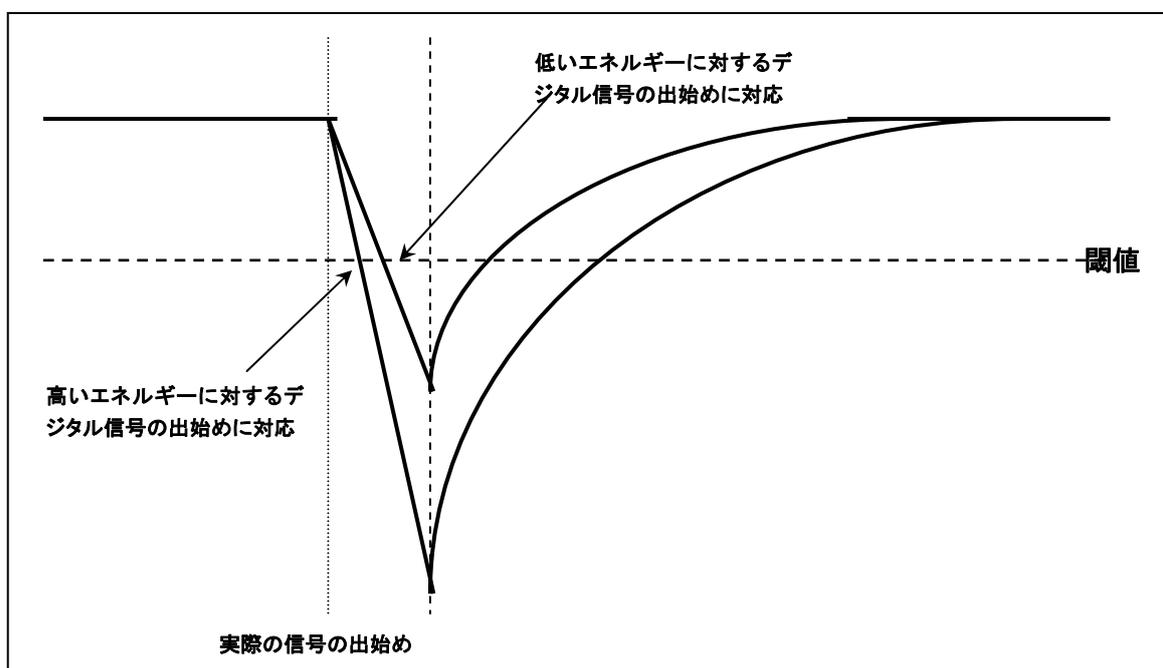


図 2-10 エネルギーによる立ち上がりの違い

#### (5) [6]が必要な理由と接続方法

我々が使った TDC は 12 ビットで 0~4095 の値を出力する。4095 に対応する実際の時間は channel ごとの差はあるが、約 220nsec である。このままでは o-Ps の寿命約 142nsec の 1.5 倍

ほどの時間しか測定できない。これでは崩壊が5分の1程度 ( $e^{-\frac{220}{142}}$ ) までにしか進まず、精度がよくない。最低でも寿命の3倍程度は測定できるようにしたいので、TDCのCh.8に入る信号のDelayをCh.7に入る信号よりさらに約180nsec多くした。これにより、Ch.7だけの場合よりも約180nsec近く多く測定できる。実際はキャリブレーションによって少しずれて195nsecになる。

TDCのCh.7とCh.8に入る信号のDelayの差を220nsecより小さい180nsecにしてあるので、TDCのCh.7とCh.8の両方が4095でない値を出力することがある。それを下にこれらの2次元プロットをする。式(2.2a)や(2.2b)より、実際の時間の向きとTDCの出力値の増加の向きが異なるので、接続はCh.7の出力値0側とCh.8の出力値4095側で行われる。図2-11を参照。Ch.7の出力値が0ときのCh.8の出力値を外挿して得ることで、接続の位置が決まる。

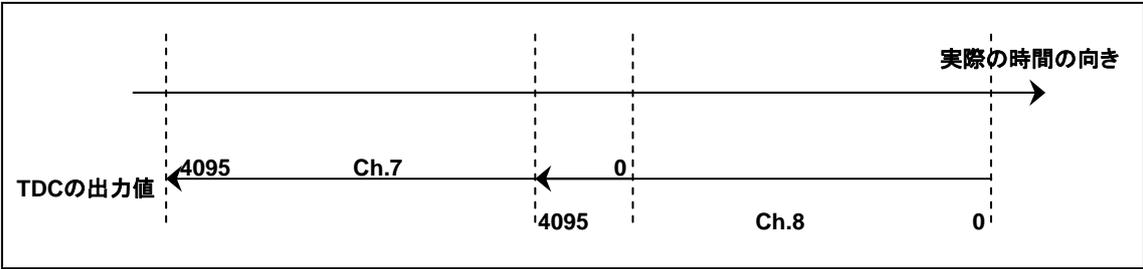


図 2-11 接続のイメージ

(6)解析の基本方針

Psの生成段階でp-Psだったものがほぼ完全に崩壊しきるほど十分時間が経過した状況を考える。解析の要は、o-Psが物質との反応のために正常な3光子崩壊をしなかったイベントをどう見極め除くかである。1章で紹介したように、o-Psの物質中での主な反応にはスピン交換反応とピックオフ消滅反応があったが、前者は2γ崩壊をする反応で、後者は2γ崩壊の方が圧倒的に多い反応である。物質中での反応は2γ崩壊をおこすと考えてよい。すると、今回の我々の実験の解析ではこれら2つの反応を区別する必要がないので、以下ではまとめてpick-off反応と呼ぶことにする。

そもそも式(1.1)は次の微分方程式から求められる。(Nはo-Psの個数)

$$\frac{dN}{dt} = -\Gamma N = -\frac{N}{\tau} \tag{2.1}$$

ここでΓは崩壊率で実験の状況によって内容が変わってくる(τも同様)。Psの生成段階でp-Psだったものはある程度時間が経過した後ではほとんど崩壊しきっているので、主な内容は、o-Psが3光子の崩壊する率Γ<sub>3γ</sub>と、pick-offの影響でo-Psがp-Psになって2光子に崩壊する率Γ<sub>pick</sub>である。(accidentalが影響してくるほど長い時間を考えてはいない。)完全な真空中では、Γ<sub>pick</sub>がなくなりほとんどΓ<sub>3γ</sub>だけがきいてくるので、理想的な場合、式(2.1)は、

$$\frac{dN}{dt} = -\Gamma_{3\gamma} N \tag{2.2}$$

となり、 $N$ と $t$ の関係から単純に o-Ps の寿命  $\tau_{3\gamma}$  が求められる。しかし実際の実験では、完全な真空は実現できないために  $\Gamma_{\text{pick}}$  (測定の間、真空度が変化しなかったのであれば定数とみなせる) の影響が出てくるので、我々の実験では式(2.1)の詳細は、

$$\frac{dN}{dt} = -(\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{\text{pick}})N = -\Gamma_{\text{total}}N \quad (2.3)$$

となる。そのためこの状況での寿命は、

$$\tau_{\text{total}} = \frac{1}{\Gamma_{\text{total}}} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{\text{pick}}} \quad (2.4)$$

であり、 $\Gamma_{\text{pick}}$  の分だけ真空中での o-Ps の寿命より小さくなる。それゆえ、 $\Gamma_{\text{pick}}$  の影響を取り除かねばならない。我々が測定できるのは、Ps の崩壊によって出てくる  $\gamma$  線を NaI シンチレータが検出したイベントである。ゆえに崩壊が起きても NaI シンチレータに検出されない場合があるので、装置やシンチレータの検出効率を考える必要がある。以下に各確率を定義する。

一回のイベントで反応した NaI シンチレータの数をヒット数と呼ぶことにする。3 光子崩壊から  $n$  ヒットする確率を  $P_{3\gamma \rightarrow n}$  とし、2 光子崩壊から  $n$  ヒットする確率を  $P_{2\gamma \rightarrow n}$  とする。これらは、検出器のセットアップと NaI シンチレータの検出効率から決まってくる。ただし、検出効率に関しては検出される光子が3光子崩壊由来か2光子崩壊由来かによらずどちらに対しても等しくかかってくるので、今回は考慮しない。また、検出効率の NaI シンチレータごとの個体差や入射光子のエネルギーによる違いも考慮しないことにする。

これらの記号を使うと、崩壊時刻  $t$  から  $t + \Delta t$  の微小な時間間隔  $\Delta t$  において測定されるイベント数は、

$$(P_{3\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{\text{pick}})N(t)\Delta t \times C \quad (2.5)$$

である。ここで  $C$  は 3 光子崩壊と 2 光子崩壊の両方の検出効率にかかってくる因子である。 $N(t)$  は、式(2.3)、(2.4)から求められる o-Ps の個数で、

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{total}}}\right) \quad (2.6)$$

に従う。補正後のデータで、我々の測定できるイベントの件数と崩壊時間のヒストグラムを、横軸を崩壊時間、縦軸をイベント数の対数軸として描く。これを fitting したときのグラフの傾きの逆数の大きさは、式(2.5)において  $N(t)$  以外は定数扱いなので、 $\tau_{\text{total}}$  となる。(実際は、fitting は指数関数で行うので slope の逆数の大きさが  $\tau_{\text{total}}$  ということ。)つまり、我々は補正後のデータに対して fitting をうまくしてやることで、すぐに  $\tau_{\text{total}}$  は求められる。しかし、この  $\tau_{\text{total}}$  が求めたいわけではないので、求めたい寿命  $\tau_{3\gamma}$  を求められるように pick-off の影響を見積もってやらねばならない。以下に pick-off の見積もり方を説明する。

o-Psの3光子崩壊からの測定されたイベント数を求められれば、すぐに求めたい寿命が得られるのだが、それは困難なため次のように間接的に求める。測定の間、真空度が変化しなかったのであれば、 $\Gamma_{\text{pick}}$  は定数とみなせる。もともと $\Gamma_{3\gamma}$  は定数なので、生成段階で p-Ps だったものがほぼ完全に崩壊しきった後の時間において瞬間瞬間で測定できたイベント数のうち、測定された総イベント数と pick-off の影響の 2 光子崩壊からの測定されたイベント数の比は  $P_{3\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  と  $P_{2\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  の比に等しくなっている。(ここで pick-off の影響で 2 光子崩壊し測定されるイベントには、511keV のエネルギーのまま光電吸収されるものとおよそ 100keV~400keV あたりでコンプトン散乱によって吸収されるものがある。)これから、 $P_{3\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{3\gamma}$  と  $P_{2\gamma \rightarrow n} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  の比がすぐに求められる。さらに  $P_{3\gamma \rightarrow n}$  と  $P_{2\gamma \rightarrow n}$  の比さえ分かれば(これはセットアップからわかる)、 $\Gamma_{3\gamma}$  と  $\Gamma_{\text{pick}}$  の比が求められる。こうして、

$$\tau_{3\gamma} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma}} = \frac{\Gamma_{\text{total}}}{\Gamma_{3\gamma}} \tau_{\text{total}} = \left( 1 + \frac{\Gamma_{\text{pick}}}{\Gamma_{3\gamma}} \right) \tau_{\text{total}} \quad (2.7)$$

に従って、求めたい真空中での o-Ps の寿命を求めることができる。

### 3 キャリブレーションと補正

#### 3.1 ADC のキャリブレーション

ADC から得られる値は 12 ビットの 0~4095 までの整数である。これは実際のエネルギーとは対応はしているものの等しいわけではないので、そのままでは使えない。そこで、実際のエネルギーとの対応を知る必要がある。NaI シンチレータの直線性の良さから、この対応は線形とみなしてよい。つまり、 $a$ 、 $b$  を定数として、

$$(energy[keV]) = a \times (\text{ADCの出力値}) + b \quad (3.1)$$

なる関係がある。この定数  $a$ 、 $b$  を NaI シンチレータやセットアップや ADC の Ch. によって変わってくる。セットアップや ADC の Ch. は変えないので、各 NaI シンチレータごとに  $a$ 、 $b$  を知ればよいことになる。

この  $a$ 、 $b$  の値は 2 種類以上の実際のエネルギーがわかっている  $\gamma$  線を NaI シンチレータで検出し、ADC の出力値との対応をみれば求まる。我々の実験では、今回  $\beta^+$  を得るためにも使った  $^{22}\text{Na}$  から得る 511keV と 1275keV の  $\gamma$  線を利用する。各 NaI シンチレータごとに、キャリブレーション用に測定をし、データを histogram にする。そのグラフの 511keV と 1275keV のエネルギーに対応する光電ピークの部分を見つけ、統計誤差を考慮し、gaussian で fit することでより正確なピークの位置を求める。こうして得られた値が 511keV と 1275keV のエネルギーに対応する ADC の出力値であるから、2 組分を使って、 $a$ 、 $b$  の値を決定できる。

実際に決定した結果を表 3-1 にまとめた。

表 3-1 ADC のキャリブレーション

NaI scintillator No. (ADC channel)	① (Ch.1)	② (Ch.4)	③ (Ch.5)	④ (Ch.6)	⑤ (Ch.7)	⑥ (Ch.8)	⑦ (Ch.9)
$a$	0.847	0.757	0.851	0.830	0.821	0.868	0.804
$b[\text{keV}]$	-130	-125	-103	-108	-150	-187	-104

#### 3.2 TDC のキャリブレーション

TDC から得られる値は 12 ビットの 0~4095 までの整数である。これは実際の時間とは対応はしているものの等しいわけではないので、そのままでは使えない。そこで、実際の時間との対応を知る必要がある。NaI シンチレータの応答の個体差は無視できるとして考えると、この対応は、TDC のチャンネルによって決まる。

我々が必要としているのは図 2-8 での [5] と [6] であるから、これらと TDC の出力値の対応を知る必要がある。この対応は線形なので、定数  $a$ 、 $b$  を用いて、

$$(time[ns]) = a \times (\text{TDCの出力値}) + b \quad (3.2)$$

と関係付けられる。TDC のチャンネルごとの定数  $a$ 、 $b$  の値を知ればよい。

この  $a$ 、 $b$  の値は、1 つの start 信号とそれに対して 2 種類以上の実際の時間間隔がわかっている信号を用意し、その時間間隔と TDC の出力値を対応させればよい。実際の時間間隔はオシ

ロスコープで測定する。我々はこの時間間隔として 72nsec、128nsec、188nsec を使った。各チャンネルごとにキャリブレーション用の測定をし、この固定した時間間隔と TDC の出力値を対応させる。それを基に各チャンネルごとに、3つの時間間隔のうち2つの時間間隔ごとに  $a$ 、 $b$  の値を求め、平均を取って、各チャンネルごとの  $a$ 、 $b$  の値を決める。

実際に決定した  $a$ 、 $b$  の値を表 3-2 にまとめた。

表 3-2

TDC channel (Scintillator No.)	Ch.1 (①)	Ch.2 (②)	Ch.3 (③)	Ch.4 (④)	Ch.5 (⑤)	Ch.6 (⑥or⑦)	Ch.7 (⑧,delay 210ns)	Ch.8 (⑧,delay 390ns)
$a$	0.05256	0.05320	0.05215	0.05239	0.05292	0.05239	0.05307	0.05272
$b$ [nsec]	9.159	9.464	9.140	9.120	9.161	8.941	9.300	8.678

### 3.3 t-Q 補正

各 NaI シンチレータに対して時間の「ずれ」をエネルギーの関数として求めた。このとき、補正用の実験データのエネルギーと時間の「ずれ」の関係を次の関数  $f(E)$  で fit した。

$$f(E) = \frac{a}{E - b} + d \quad (3.3)$$

ここで、 $f(E)$  は「ずれ」を表す関数で、 $E$  は NaI シンチレータが出す信号に対応したエネルギー、 $a, b, d$  は NaI シンチレータごとに異なる定数(パラメータ)である。上のような関数で fit したのは、我々の関心がある Ps の  $3\gamma$  崩壊で出てくる光子の主なエネルギーの範囲(約 250keV から約 400keV)と基準の 511keV 付近でうまく fit でき、正のエネルギー領域で発散をしないからである。fit の様子を図 3-1-1 から図 3-1-7 にまとめた。(ただし、図の NaI7 は NaI シンチレータ⑥に、NaI8 は NaI シンチレータ⑦に対応している。)

各 NaI シンチレータごとの定数  $a, b, d$  の値を表 3-3 にまとめた。

表 3-3

Scintillator No.	③	②	③	④	⑤	⑥	⑦
$a$ [ns · keV]	25945.5	29622.9	29992.2	36284.0	24083.1	29873.5	23826.7
$b$ [keV]	-55.8954	-42.1327	-17.2691	-62.9251	-16.6534	-14.5558	-7.66782
$d$ [ns]	-54.2371	-61.4161	-64.3347	-64.9076	-54.356	-67.9005	-52.8855

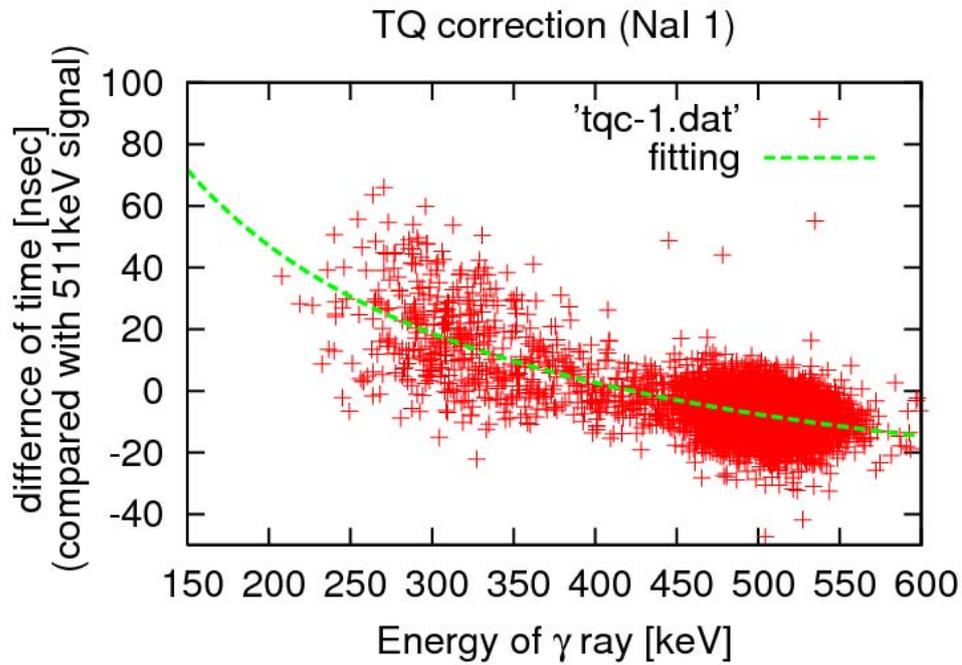


図 3-1-1 NaI シンチレータ①の t-Q 補正の fit の様子

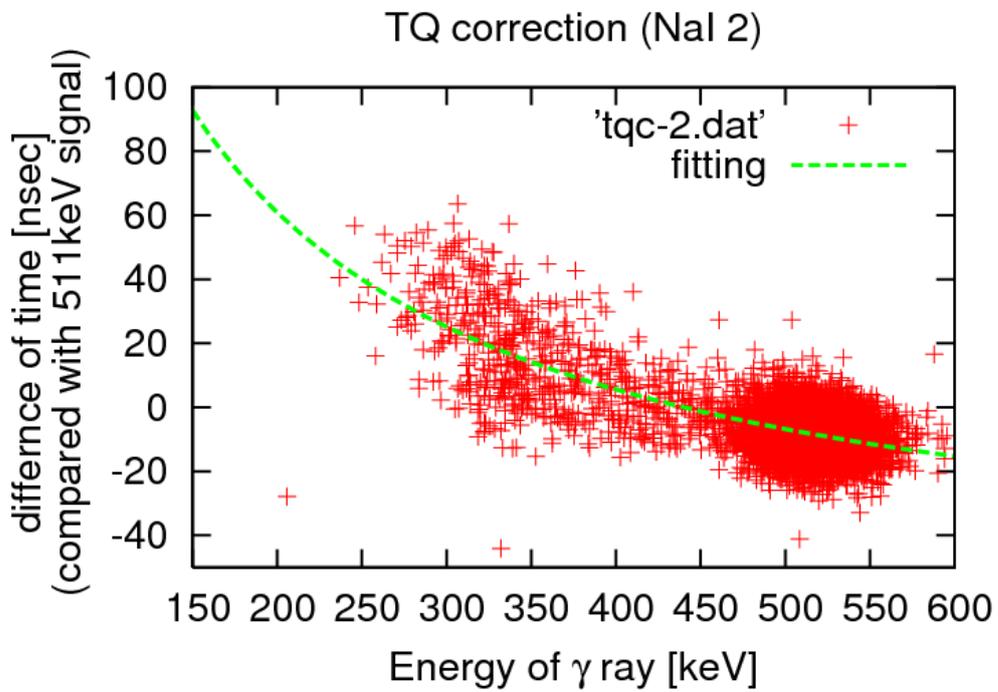


図 3-1-2 NaI シンチレータ②の t-Q 補正の fit の様子

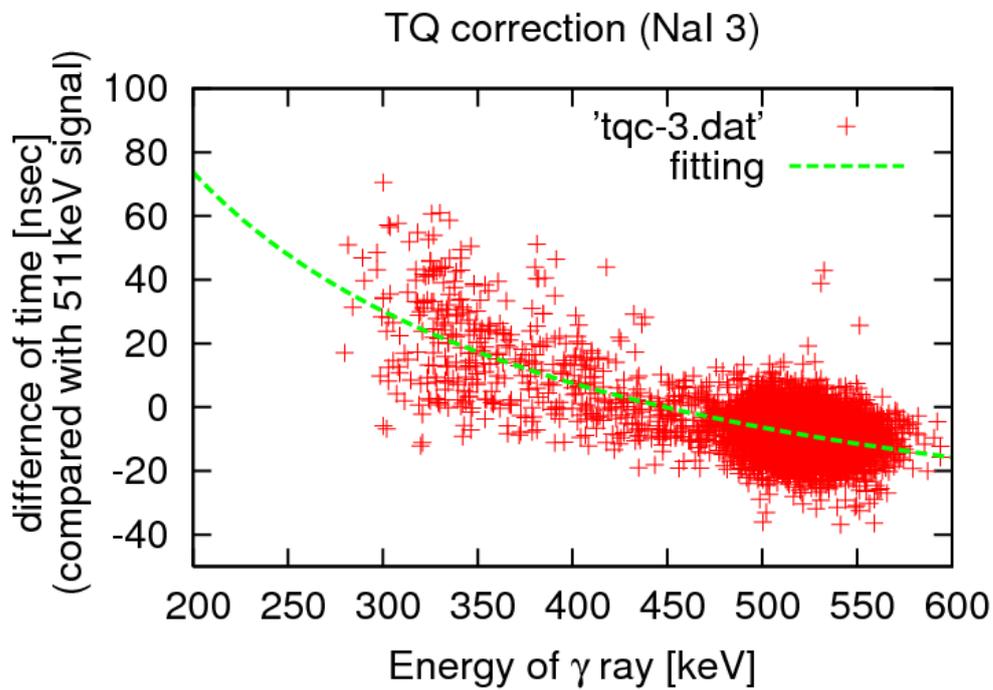


図 3-1-3 NaI シンチレータ③の t-Q 補正の fit の様子

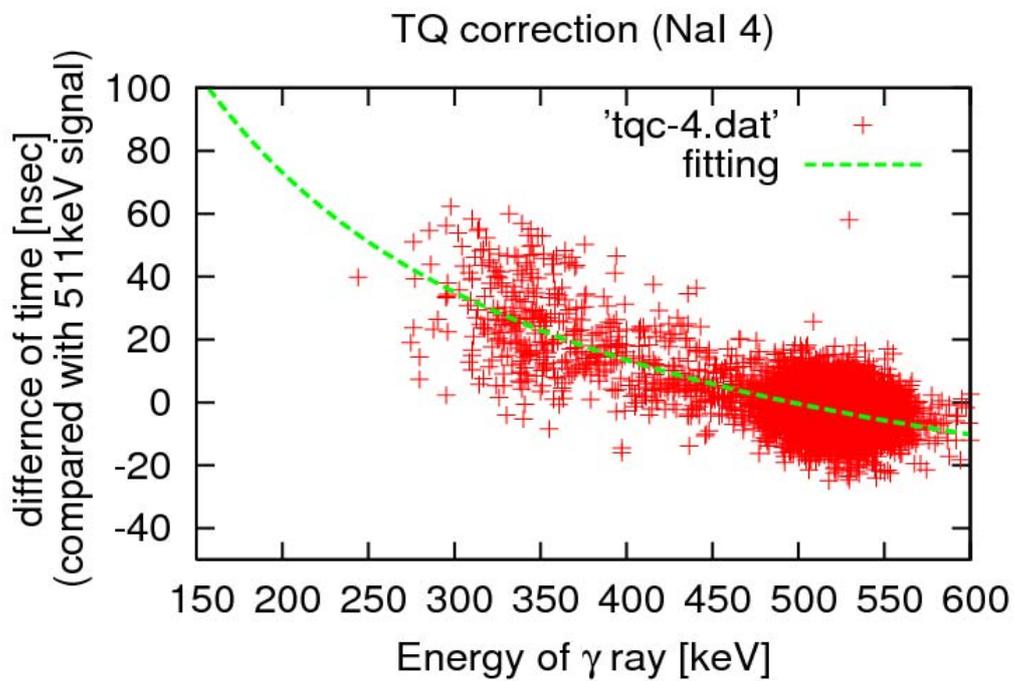


図 3-1-4 NaI シンチレータ④の t-Q 補正の fit の様子

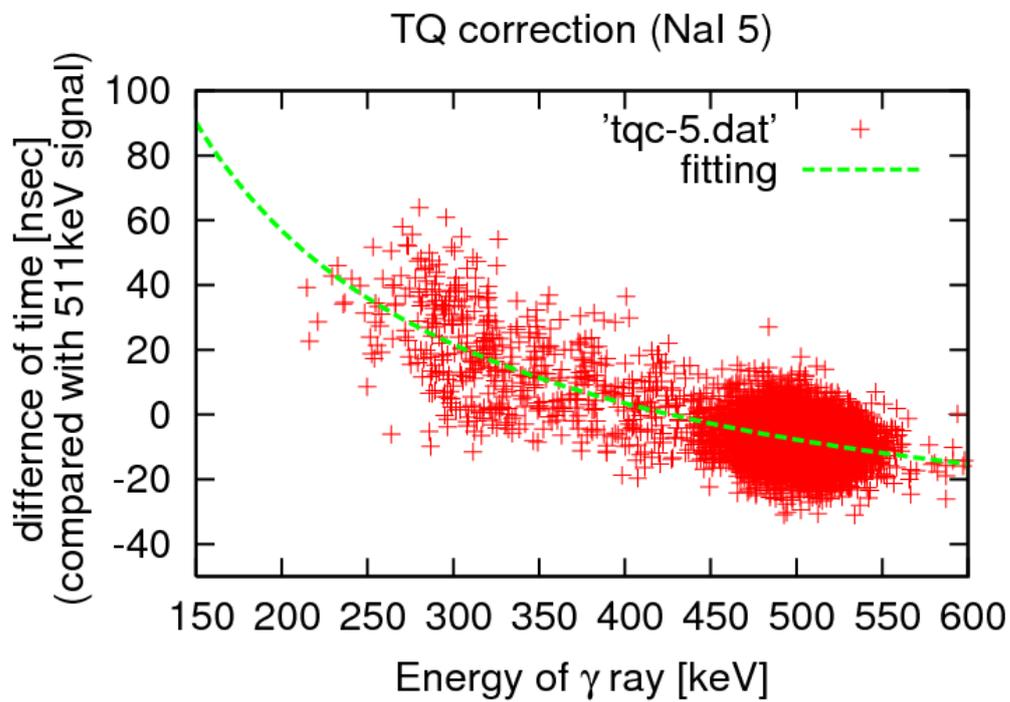


図 3-1-5 NaI シンチレータ⑤の t-Q 補正の fit の様子

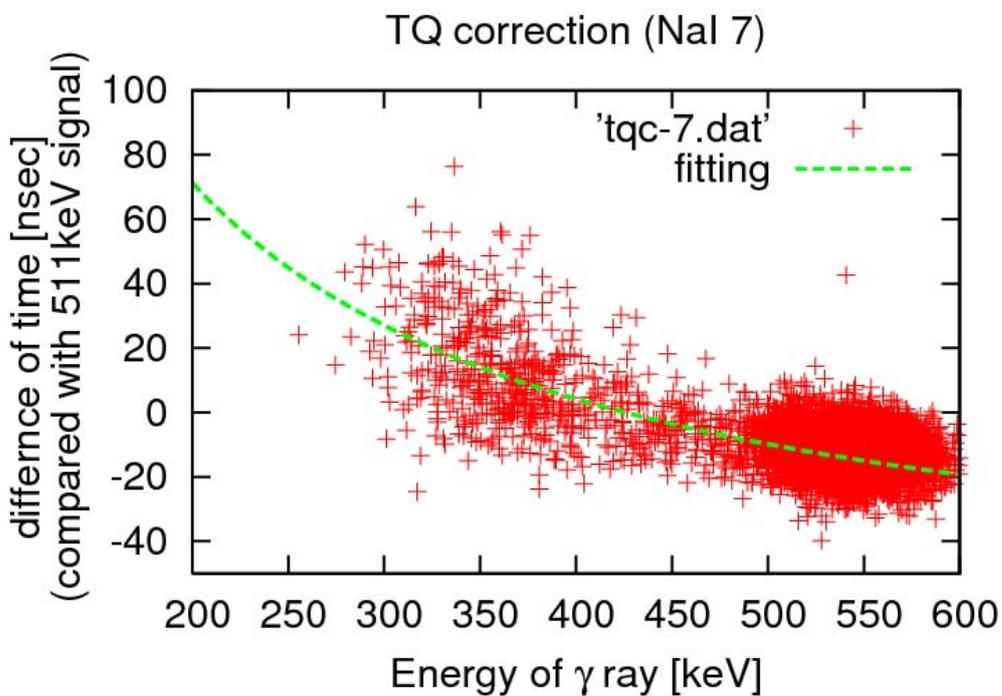


図 3-1-6 NaI シンチレータ⑥の t-Q 補正の fit の様子

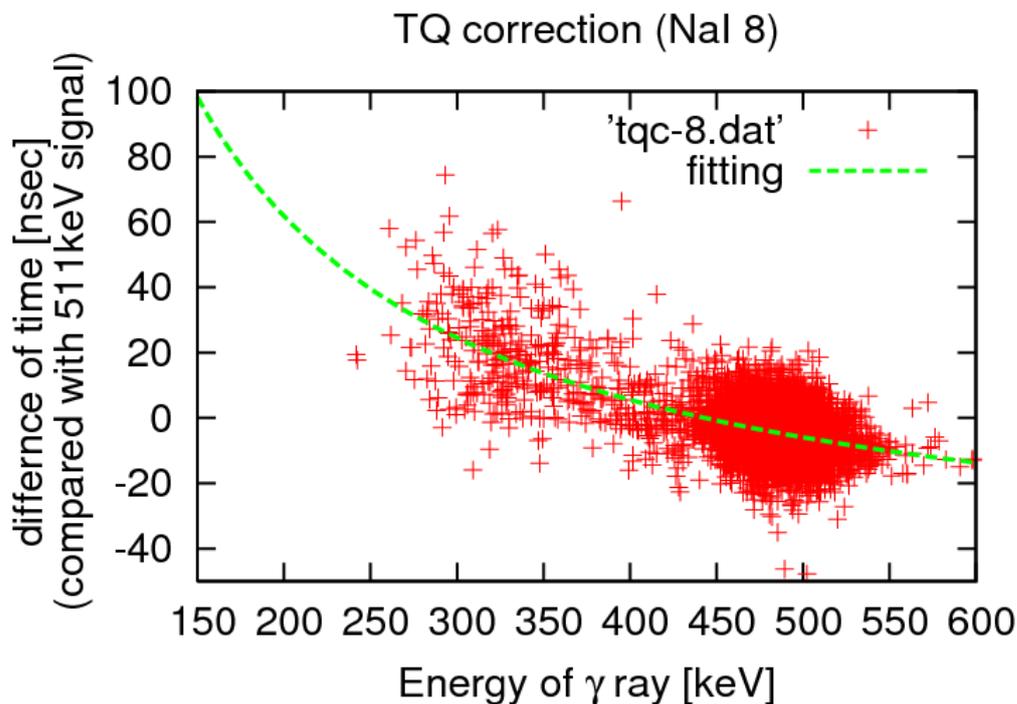


図 3-1-7 NaI シンチレータ⑦の t-Q 補正の fit の様子

### 3.4 接続

TDC の Ch.7 と Ch.8 の 2 次元プロットにおいて、Ch.7 の出力値が 0 ときの Ch.8 の出力値を外挿して得た。そのキャリブレーション後の値は 194.175nsec である。よって、図 2-11 からわかるように Ch.7 の出力値に対応する時間(逆向き)に 194.175nsec を加えてやれば、Ch.8 の出力値に対応する時間(逆向き)とうまくつなげることができ、Ch.7 の出力値が 4095 以外のデータと Ch.8 の出力値が 4095 以外のデータを接続し、データをまとめて扱うことができる。

TDC の Ch.7 と Ch.8 の 2 次元プロットでの外挿の様子を図 3-2 に表した。図の t7 と t8 はそれぞれ TDC の Ch.7 と Ch.8 の出力値に対応している。

ここで、図 3-2 において、Ch.7 に対しては 0 から 400 あたりの数値を示すとき Ch.8 が 4095 の出力値を示す場合があるが、これは本来は期待されていないものである。TDC の CH.7 と Ch.8 に入る信号は図 2-8 の回路図において Gate Generator を出るまでは同じ信号だったので、万台があるとすれば Gate Generator から TDC までの間である。

我々の行ったいくつかの大きな測定 of データに対して、"soku1"と"soku2"についてはこの現象は見られなかった。一部ケーブルの抜き差しなどを行った後(channel などを変えていない)の"soku3"と"soku4"に対してはこの現象が見られた。ゆえに原因としては、Gate Generator の out や Delay でケーブルの差込がゆるかったなどが考えられる。

もっともこれらの期待されていない部分のエネルギー分布に異常はなく、そのイベント数は考えている領域の総イベント数に対して割合的に何桁も小さかったのでほぼ影響はないと思われる。

t7:t8 {t7<500&&t8>3500}

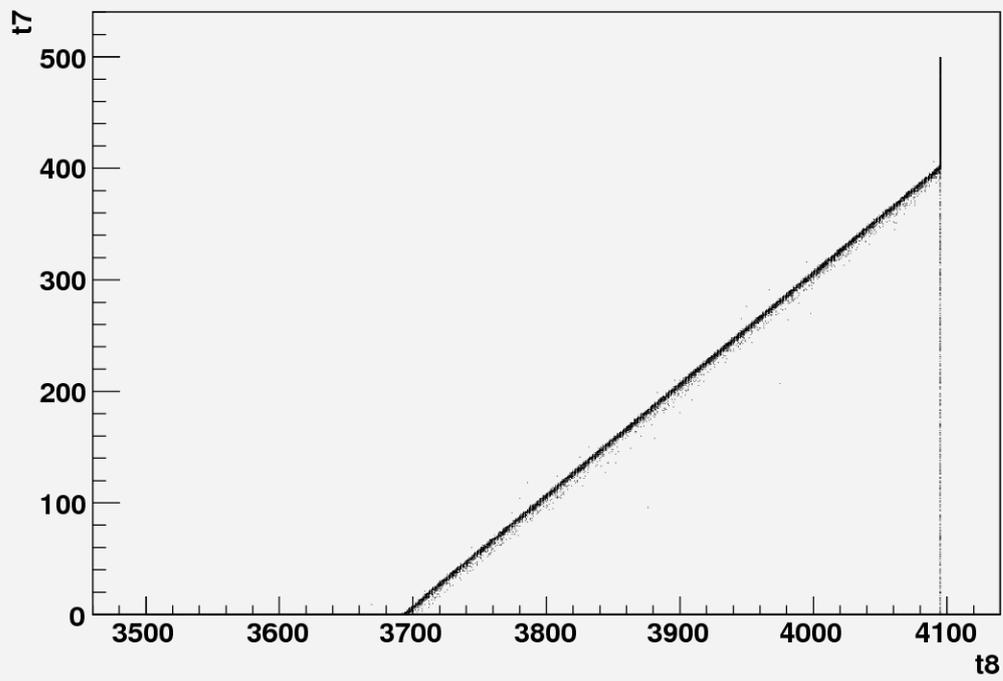


図 3-2 TDC の Ch.7 と Ch.8 の出力値の接続の様子

## 4. 実験結果と解析

### 4.1 実験データ

いくつか実験データのうち、真空度がほとんど変化しなかったと思われる測定データ"soku4"を解析に使うことにする。"soku4"のイベント数は 5500000 である。真空度の判断は、メータがなかったので、測定中およそ1時間おきに1分間にたまるイベント数を scaler で数えてやり、その変化があまりないかどうかで判断する。実際"soku4"の測定では、5日間の測定の間で1分間あたりのイベント数(およそ 900)はほとんど変わらなかった。

### 4.2 解析と考察

解析は、光子を検出した NaI シンチレータの数(hit 数)ごとに行う。具体的には、1 hit event、2 hit event、3 hit event で別々の解析をする。"soku4"のデータ 5500000 イベントを各イベントに振り分けてやると、1 hit event は 4792773 イベント、2 hit event は 636569 イベント、3 hit event は 28794 イベント、それ以外は 41864 イベントあった。

1 hit event は、データ数が圧倒的に多く、統計的に精度がよいという利点がある。2 hit event は、2 $\gamma$ 崩壊のイベントが割合的に多く、pick-off の影響が見積もりやすいと思われる。3 hit event は、3 $\gamma$ 崩壊のイベントの割合が多く、pick-off の影響があまりないという利点がある。

各 hit 数ごとに、寿命の計算に使うエネルギーと崩壊時間の範囲を定め、 $\Gamma_{3\gamma}$  と  $\Gamma_{\text{total}}$  の比を求め、寿命を求める。

各データにおいて、 $\gamma$ 線を検出した NaI シンチレータの吸収したエネルギーの値を、シンチレータ番号(①~⑦)が若い順から E1、E2、E3 に割り当てていく。1 hit event に対しては E1 しか存在せず、2 hit event では E1、E2 が存在し、3 hit event では E1、E2、E3 が存在する。TDC の Ch.7 の Ch.8 出力値に対応する時間(軸の向きは逆)は解析の中では、tdcpl と呼ぶことにする。

#### (a) 1 hit event

補正も条件設定もしていない生データを図 4-1-1 に載せた。横軸は tdcpl の値で縦軸はカウント数である。o-Ps の寿命に比べて p-Ps の値は非常に短いため 300~430nsec にかけて p-Ps の崩壊によるなだれこみがみられる。

t-Q 補正後のデータを図 4-1-2 に載せた。t-Q 補正の影響で 0~90nsec のデータが削れてしまったが、300nsec から続いていたなだれこみを数十ナノ横にスライドさせることができた。なだれこみがうまく消えていて、分布が生成段階で p-Ps だったものの崩壊の部分と生成段階で o-Ps だったものの崩壊の部分にきれいに分かれていることがわかる。

データが削れた様子を図 4-1-3、図 4-1-4 に示した。順に t-Q 補正を加える前と後のグラフである。縦軸に tdcpl、横軸に E1 をとってある。

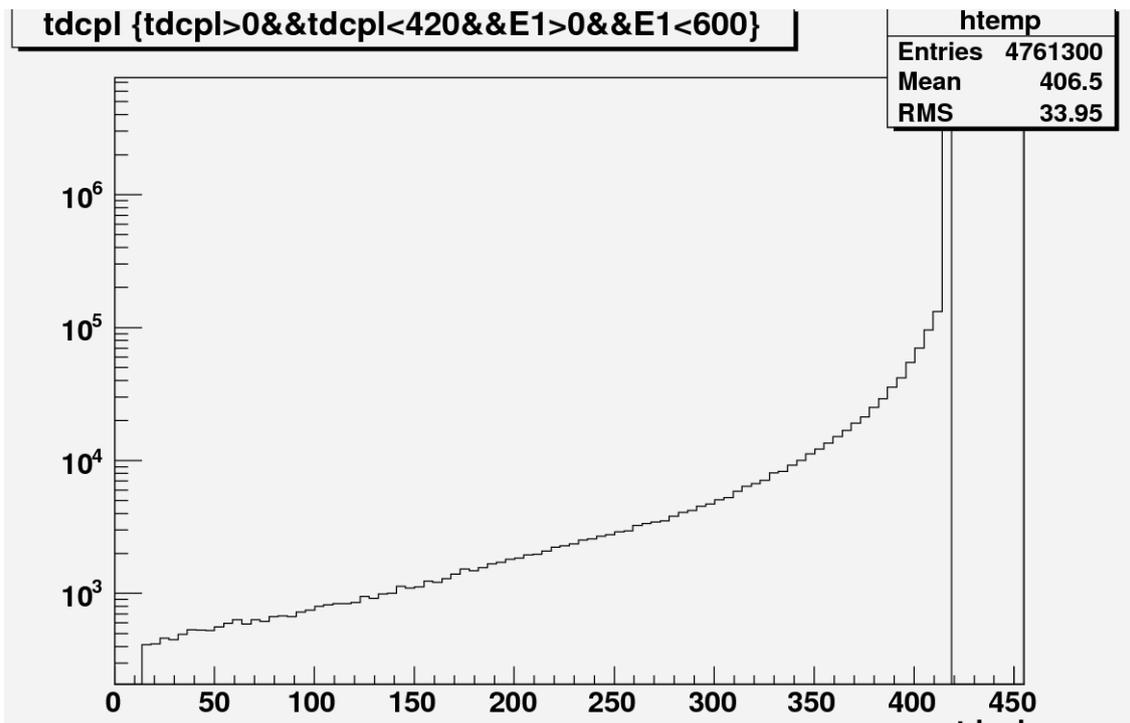


図 4-1-1 生データ

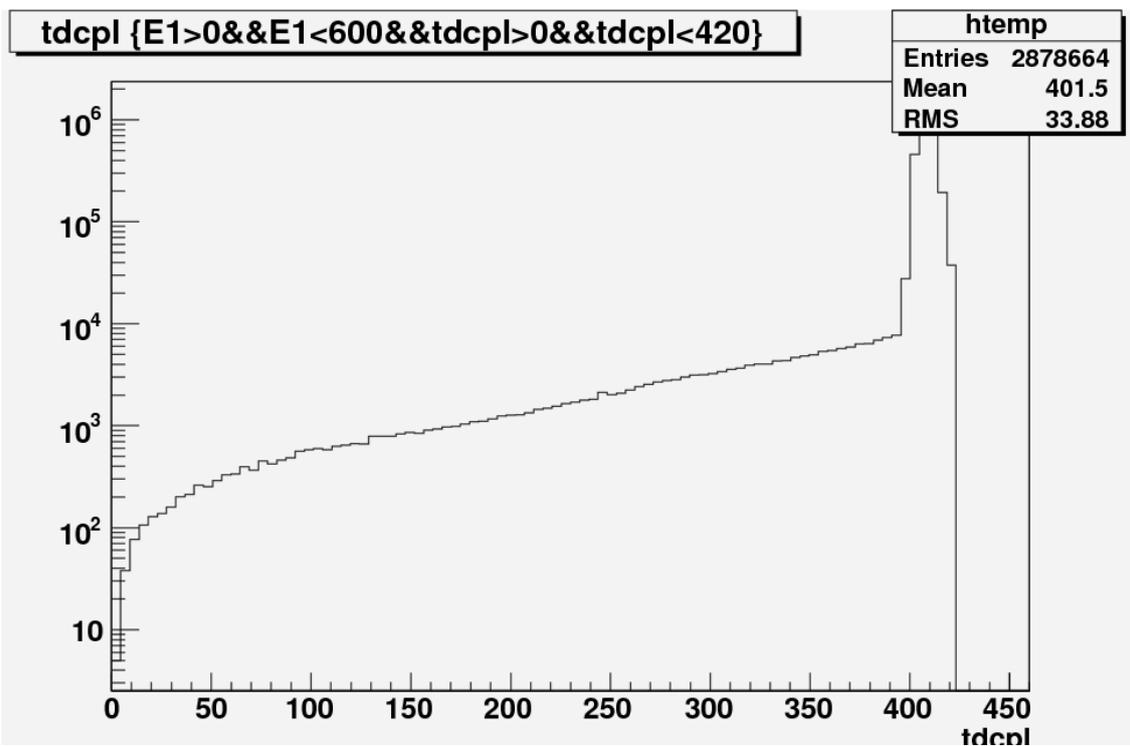


図 4-1-2 t-Q 補正後のデータ

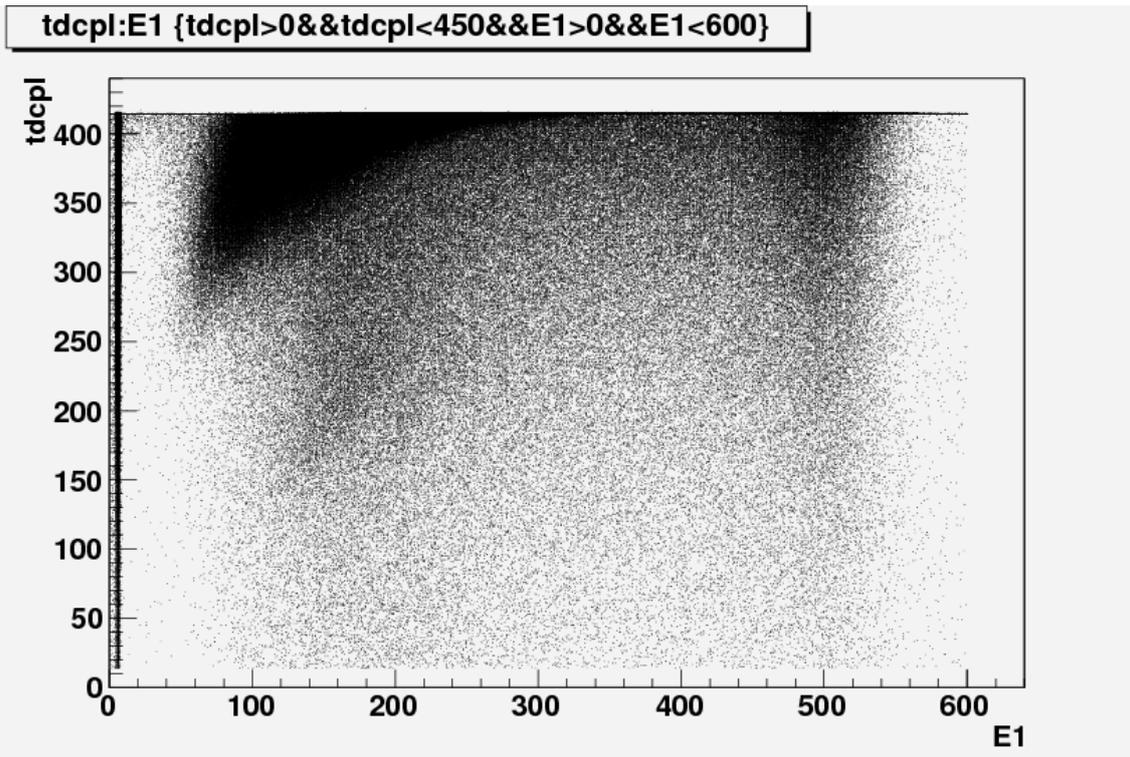


図 4-1-3 t-Q 補正前の E1 と tdcpl の 2 次元プロット

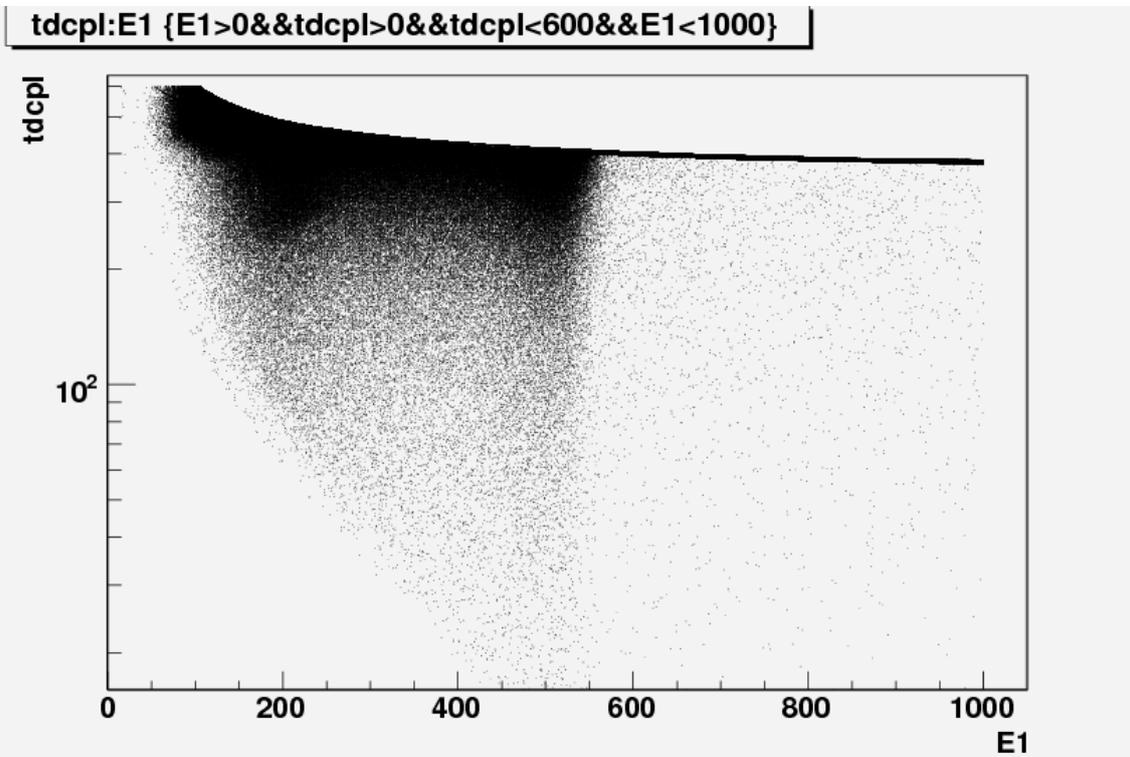


図 4-1-4 t-Q 補正後の E1 と tdcpl の 2 次元プロット(片対数)

次にどの範囲で tdcpl を fitting するかを考える。エネルギーの範囲については、p-Ps、o-Ps の pick-off 消滅などに由来する 511keV 付近のエネルギーを持つ  $\gamma$  線をカットするためにエネルギーの上限を 390keV に設定した。下限は t-Q 補正後の tdcpl-E1 グラフにおいてデータが存在する範囲を考慮して 150keV に設定した。時間の範囲については、t-Q 補正後の tdcpl グラフ、tdcpl-E1 グラフをみてデータ数ができるだけ多くなるような範囲およそ 100~350nsec に設定した。図 4-1-5 に tdcpl グラフを上記の範囲で fitting したグラフを示した。

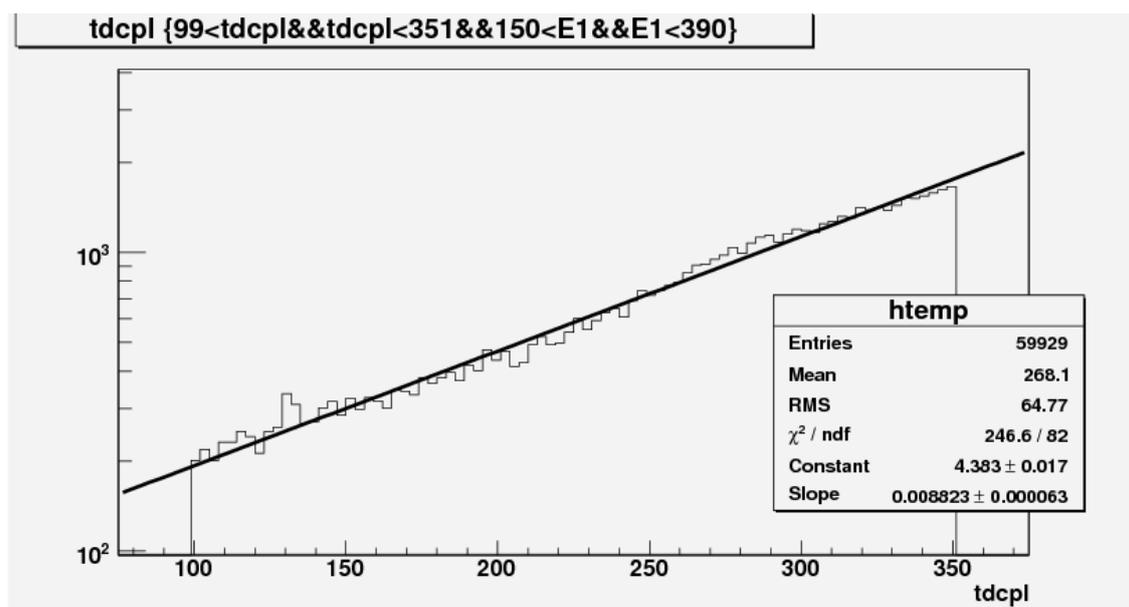


図 4-1-5 fitting の様子

$\Gamma_{\text{total}} = 0.008823 \pm 0.000063$  [/nsec] が得られる。逆数を取り、諸々の誤差を評価しやると、

$$\tau_{\text{total}} = 113.3 \pm 6.6 \text{ [nsec]} \quad (4.1)$$

が得られる。

ここからは先は本来は 2hit、3hit のイベントでセットアップがうまくいって、イベント数も多く、目的にあったデータがうまく取れていればそちらに任せていた部分 (pick-off の影響の見積もり) を、代わりに行う。ここからは一部精密さを欠いている。

次に今考えている時間の範囲での pick-off の影響を見積もる。エネルギーの範囲についてはノイズと宇宙線や線源からの 1274keV の  $\gamma$  線を除けるようにさえすればいいので、100keV ~ 600keV とする。入射  $\gamma$  線が 511keV のときの吸収されるエネルギーの分布を知ることにより、 $P_{3\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数のうちどれだけが  $P_{2\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数であるかを判断し、あとは  $\Gamma_{3\gamma}$  と  $\Gamma_{\text{pick}}$  の比を求めていく。

そのために、まずは検出効率を求めておく。今回は 3 光子崩壊から 1 ヒットする確率  $P_{3\gamma \rightarrow 1}$  と 2 光子崩壊から 1 ヒットする確率  $P_{2\gamma \rightarrow 1}$  の比を求める。検出器のセットアップから全立体角のうちほ

ほぼ半分が NaI シンチレータで囲まれていることがわかる。Ps のシリカパウダー中の平均的な崩壊位置が上で言う半分のちょうど境界とし、3 光子崩壊は平均的一様な角度分布で起き、NaI シンチレータを通過した  $\gamma$  線はおよそ 21% ( $p = 0.21$ ) で検出されると仮定する。(遮蔽率を利用して求めた NaI シンチレータの平均反応率 84% (セットアップの関係上立体角は稼げない分厚みはある) と PMT の効率約 25% の積。) すると、これらの比は近似的なものとして比較的単純に求められ、次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{3\gamma \rightarrow 1} : P_{2\gamma \rightarrow 1} &= \left( \left( 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) p + \frac{\sqrt{3}}{2} p(1-p) \right) : p \\ &= \left( 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} p \right) : 1 \\ &= 0.8181 : 1 \end{aligned} \quad (4.2)$$

共通する因子は一部省いてある。1 や  $\sqrt{3}/2$  は幾何的な因子からくる。

$P_{3\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数は、今考えている範囲内の総カウント数である。これは図 4-1-6 の Entries より 109951 である。 $P_{2\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数は、今考えている範囲内での pick-off によって  $2\gamma$  崩壊してできた 511keV の  $\gamma$  線のうち検出されたもののカウント数である。これを今から見積もる。

$P_{2\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数を見積もるために、入射  $\gamma$  線のエネルギーが p-Ps の崩壊によって出てくる  $\gamma$  線のエネルギーであるおよそ 511keV の場合のエネルギー分布を調べる。それからおよそ 511keV より大きいエネルギーで光電吸収によって検出される  $\gamma$  線の数と総数の比を調べ、その比に先ほどの fitting の時間範囲におけるおよそ 511keV より大きいエネルギーで吸収された  $\gamma$  線の数をかけることによって  $P_{2\gamma \rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数を見積もる。およそ 511keV より大きいエネルギーで吸収される  $\gamma$  線の数を利用するのは、このエネルギー範囲で検出される  $\gamma$  線はほとんど p-Ps からの  $2\gamma$  崩壊由来のものであるからである。およそ 511keV より大きなエネルギーがあるのは統計的なものでガウス分布してしまうからである。およそ 511keV より大きなエネルギーを数えるのは、この領域はほとんどおよそ 511keV で入射した  $\gamma$  線が光電吸収されたものを表しているからである。

入射  $\gamma$  線のエネルギーがおよそ 511keV の場合のエネルギー分布を調べるには、出てくる  $\gamma$  線のうち p-Ps 由来のものがほとんどである時間領域を利用すればよい。Ps 生成直後では、p-Ps の方が寿命が圧倒的に短いので、この時間範囲ではほとんどが p-Ps の崩壊によって生成された  $\gamma$  線である。具体的には、 $414\text{nsec} < tdcpl < 416\text{nsec}$  でのエネルギー分布(図 4-1-7)を利用すればよい。この範囲の総カウント数は 3912469 である。この範囲は図 4-1-1 と図 4-1-2 から判断された。

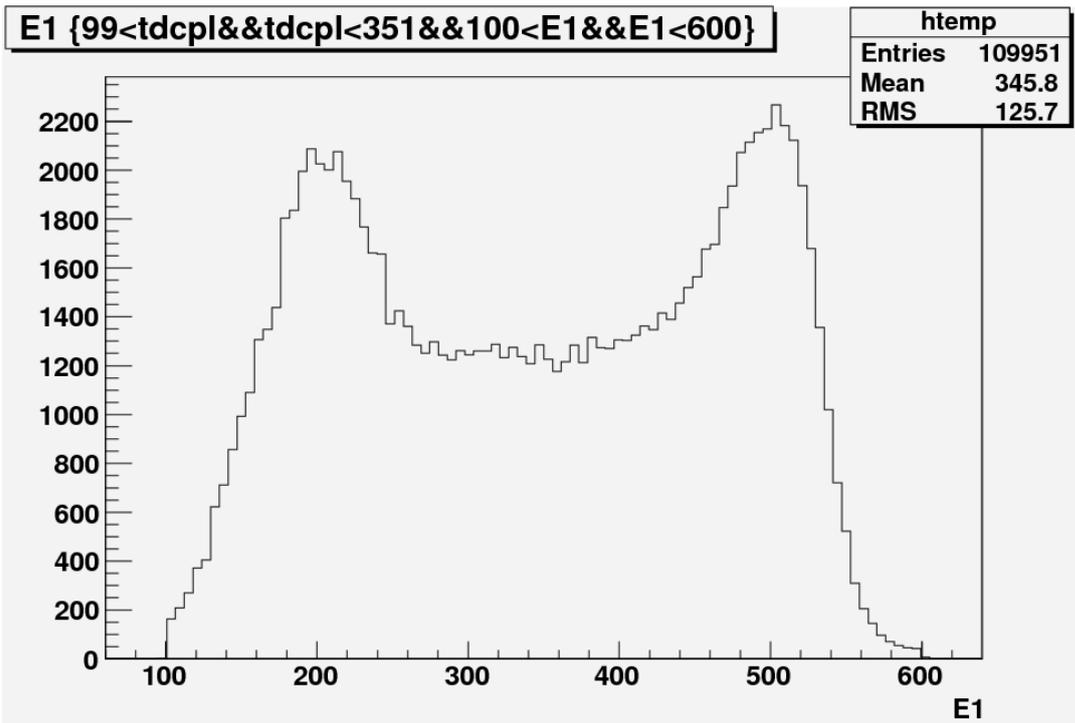


図 4-1-6 fitting の時間範囲での総カウント数 109951

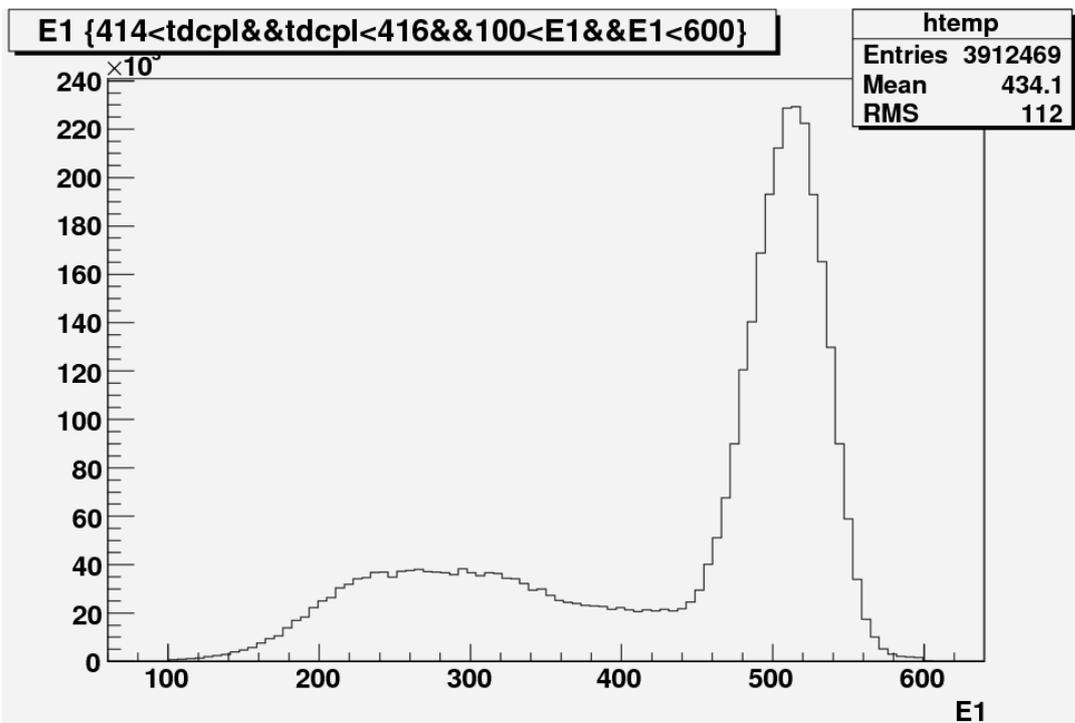


図 4-1-7 Ps 生成直後に検出された  $\gamma$  線のエネルギー分布。カウント数は 3912469。

上で何度かおよそ 511keV より大きいという言葉が出てきたが、1つの NaI シンチレータのエネルギー分布でないためキャリブレーションのずれなどもあるので正確なピークの位置を見つけておく必要がある。図 4-1-8 に gauss fit の様子を示してある。これからピークは 509.9keV であることがわかる。つまり約 511keV の光電吸収のピークより右側を数えるときはピークが含まれるように 509keV より大きい範囲をとってやることにする。

図 4-1-9 に Ps 生成直後での 2 $\gamma$  崩壊からの光電吸収の山の右側のカウント数が示してある。これによると、カウント数は 1302751 である。

あとは今考えている時間範囲(99nsec~351nsec)の 509keV より上で 2 $\gamma$  崩壊由来のものがどれだけあるか見積もってやるだけである。図 4-1-10 よりこの範囲のカウント数は 11633 である。目分量だが図 4-1-6 と図 4-1-7 の比較から 3 $\gamma$  崩壊由来の分が 10%に少し足りないくらい含まれているように思われる。以下の計算では 8%としておく。

図 4-1-6 の範囲で  $P_{2\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数は、 $11633 \times 0.92 \times 3912468/1302751 \doteq 32142$  である。 $P_{3\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数が 109951 であったから、 $P_{3\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma}$  に対応するカウント数は  $109951 - 32142 = 77809$  である。これらと式(4.2)から、

$$\frac{\Gamma_{\text{pick}}}{\Gamma_{3\gamma}} = \frac{32142}{77809} \times \frac{P_{3\gamma\rightarrow 1}}{P_{2\gamma\rightarrow 1}} \cong 0.3379 \quad (4.3)$$

となる。(ずいぶん多い?)これから式(2.7)に従って寿命を求めてやると、

$$\tau_{3\gamma} = 151.58 \pm 8.8[n\text{sec}] \quad (4.4)$$

となる。ここでの誤差は諸々の誤差を考慮してある。(詳細は 6 章で。)

結果を見てみると、o-Ps の寿命の理論値 142nsec と比較してしまうと、我々の求めた寿命は長い。原因は式(4.3)を求める段階までにあると思われる。考えられる主な可能性としては、

1.  $P_{2\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数の見積もりが多すぎる。
2.  $P_{3\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma} + P_{2\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{\text{pick}}$  に対応するカウント数のうちの  $P_{3\gamma\rightarrow 1} \cdot \Gamma_{3\gamma}$  に対応するカウント数が削られてしまっている。
3. 3 光子崩壊から1ヒットする確率  $P_{3\gamma\rightarrow 1}$  と 2 光子崩壊から1ヒットする確率  $P_{2\gamma\rightarrow 1}$  の比を見積もるときに、幾何学的に正確でない、または NaI シンチレータの検出効率が違う。
4. 単純に見積もり方が違う。
5. t-Q 補正が実はうまくいっていない。

などがある。1. については図 4-1-6 と図 4-1-7 からほとんどないように思われる。2. についてはノイズと思って切った 100keV 以下の影響としてある可能性がある。3. についてはシミュレーションを行っていないので大いに可能性がある。(ただシミュレーションを時間をかけてするぐらいなら、もっといいセットアップにすべきだったと思う。)4. と 5. についてはどうしようもない。

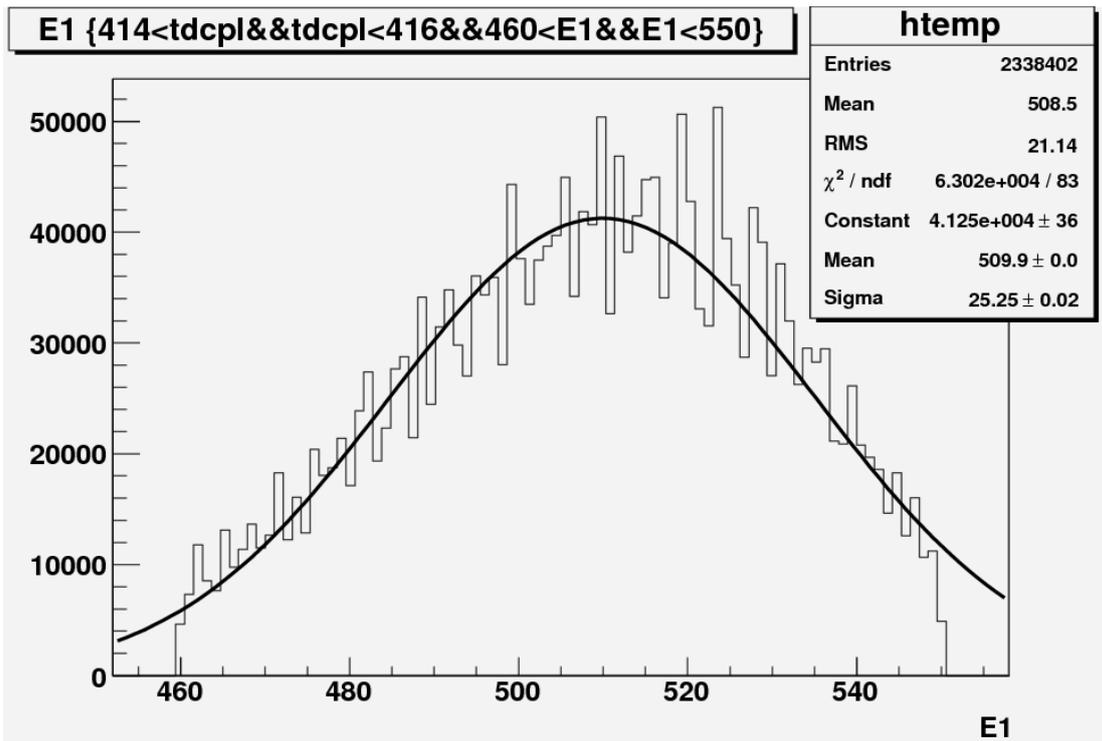


図 4-1-8 ピークの位置の決定

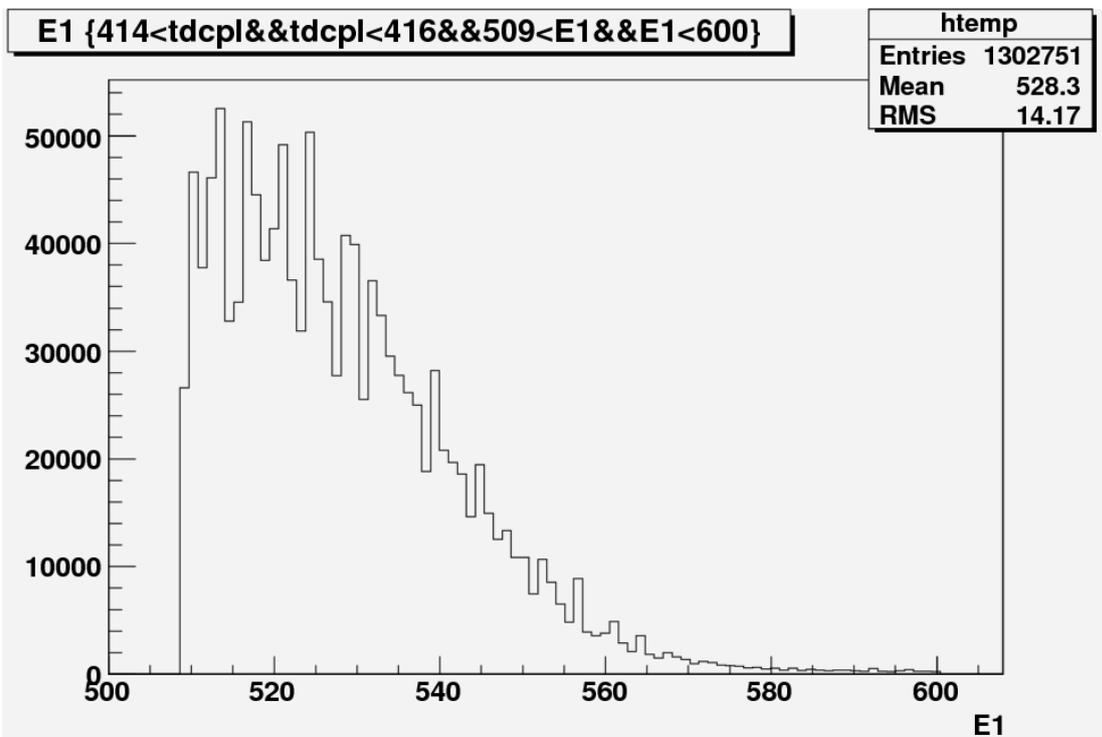


図 4-1-9 Ps 生成直後での  $2\gamma$  崩壊からの光電吸収の右側のカウント数 1302751

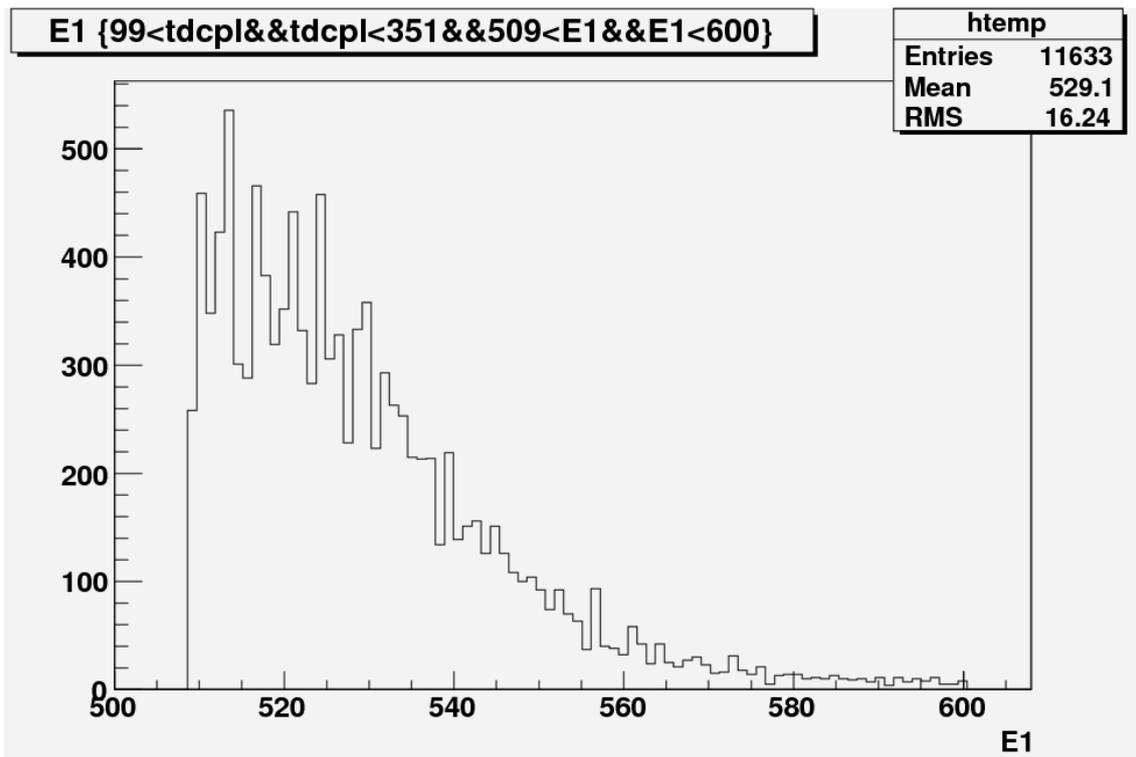


図 4-1-10 2 $\gamma$ 崩壊由来のカウント数の見積もり 11633

### (b) 2 hit event

t-Q 補正後の E1 と E2 のエネルギー分布は図 4-2-1 と図 4-2-2 のようになる。これから 2hit イベントでは、E1、E2 とともに 511keV と 250keV あたりにピークが見られる。ところが 511keV のピークの方が明らかに小さい。本来 2hit イベントは p-Ps の 2 $\gamma$ 崩壊が一番検出されやすく、511keV で入射した $\gamma$ 線の光電吸収される割合とコンプトン吸収される割合がおおよそ 2:1であるから、511keV のピークの方が大きいはずである。にもかかわらず 511keV のピークが小さいということは、p-Ps が 2 $\gamma$ 崩壊からの 2つの $\gamma$ 線を 1つずつ NaI シンチレータで検出しているわけではなく、1つの $\gamma$ 線がコンプトン散乱で 2つの NaI シンチレータを反応させたことになる。そのため 2hit イベントで行った pick-off の見積もり(511keV で入射してきた $\gamma$ 線の光電吸収される割合とコンプトン吸収される割合の見積もり)はまずできないことになる。純粋に 2 $\gamma$ 崩壊由来の $\gamma$ 線だけならば、1hit の解析で行った Ps 生成段階(ほとんどが p-Ps の崩壊による $\gamma$ 線)でのエネルギー分布を利用するよりも正確に pick-off の影響が見積もれたであろう。

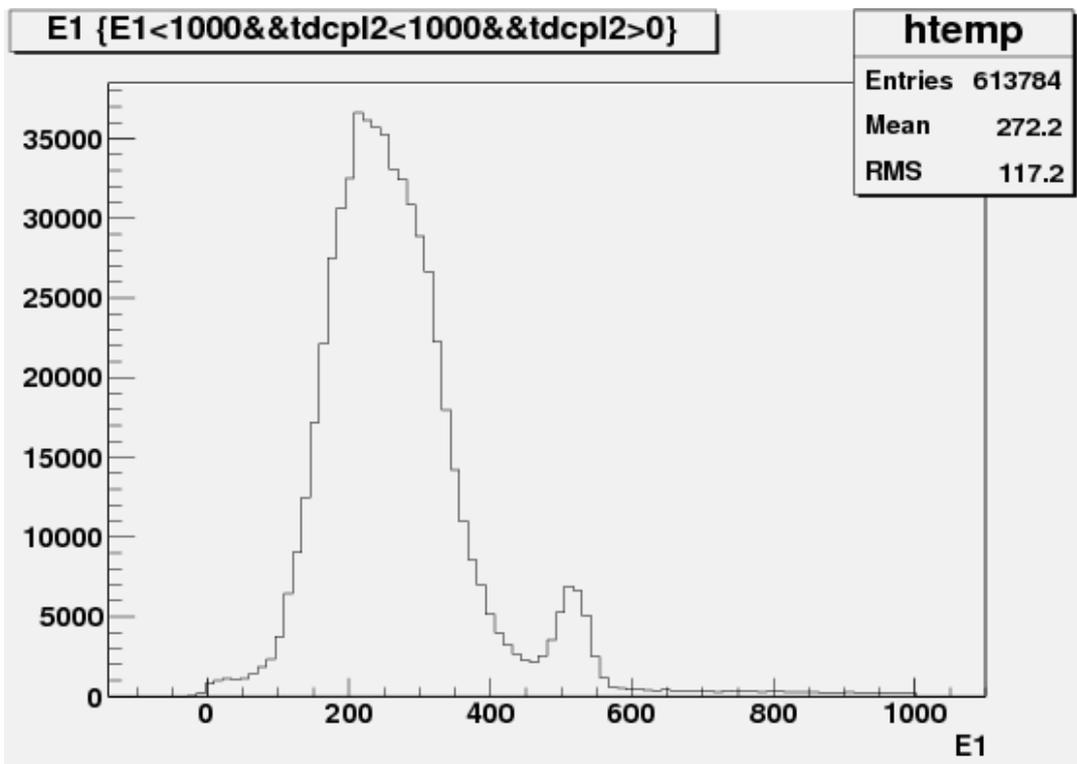


図 4-2-1 E1 のエネルギー分布

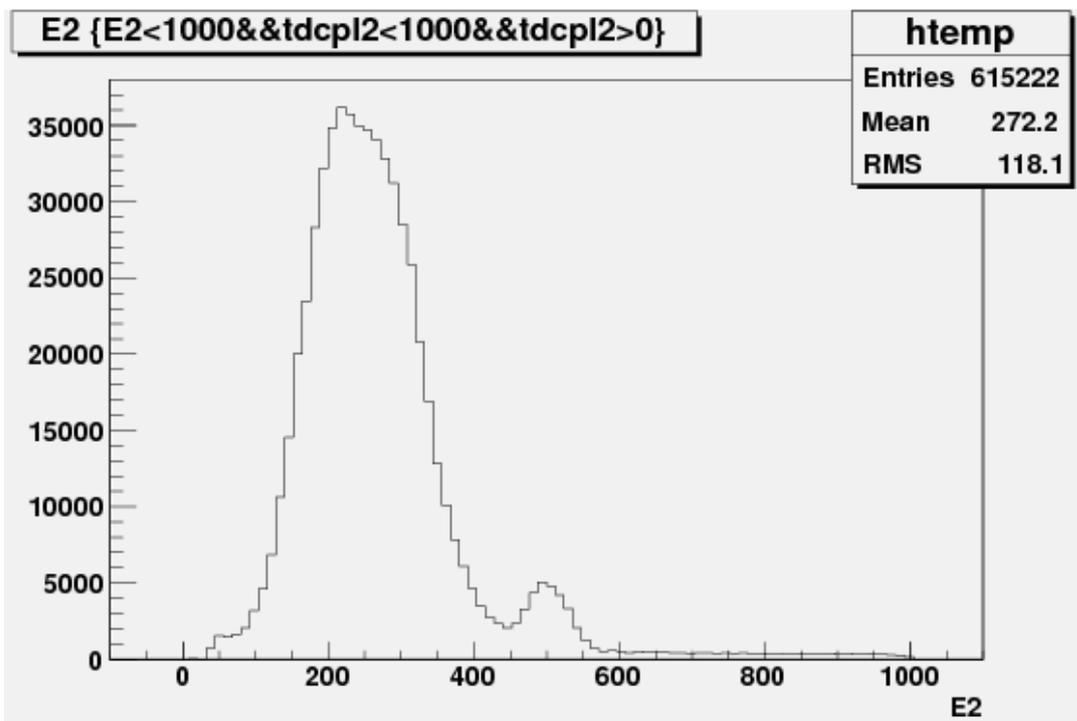


図 4-2-2 E2 のエネルギー分布

代わりといっは何だが、2hit イベントでも寿命を求めてみることにする。まず  $3\gamma$  崩壊のイベントが多いと思われるエネルギー領域 ( $100\text{keV} \sim 400\text{keV}$ ) での時間分布をしてみる(図 4-2-3)。

これから fitting の範囲としては、広い範囲で直線的である  $200\text{nsec} < \text{tdcpl2} < 380\text{nsec}$  を選ぶ。式(2.5)と式(2.6)によると、これから得られる寿命は  $\tau_{\text{total}}$  のはずであり、1hit イベントの解析とほとんど同じ結果が出るはずである。但し考えている時間の範囲がことなるので少し値はずれてくると思われる。

図 4-2-4 に fitting の様子を示した。それより、 $\tau_{\text{total}}$  は、

$$\tau_{\text{total}} = 106.54 \pm 2.01[\text{nsec}] \quad (4.5)$$

となる。ここでの誤差は fitting の際の誤差だけである。式(4.1)の  $113.3\text{nsec}$  と比べると諸々の誤差を考慮してやると大体近い値であることがわかりそうである。

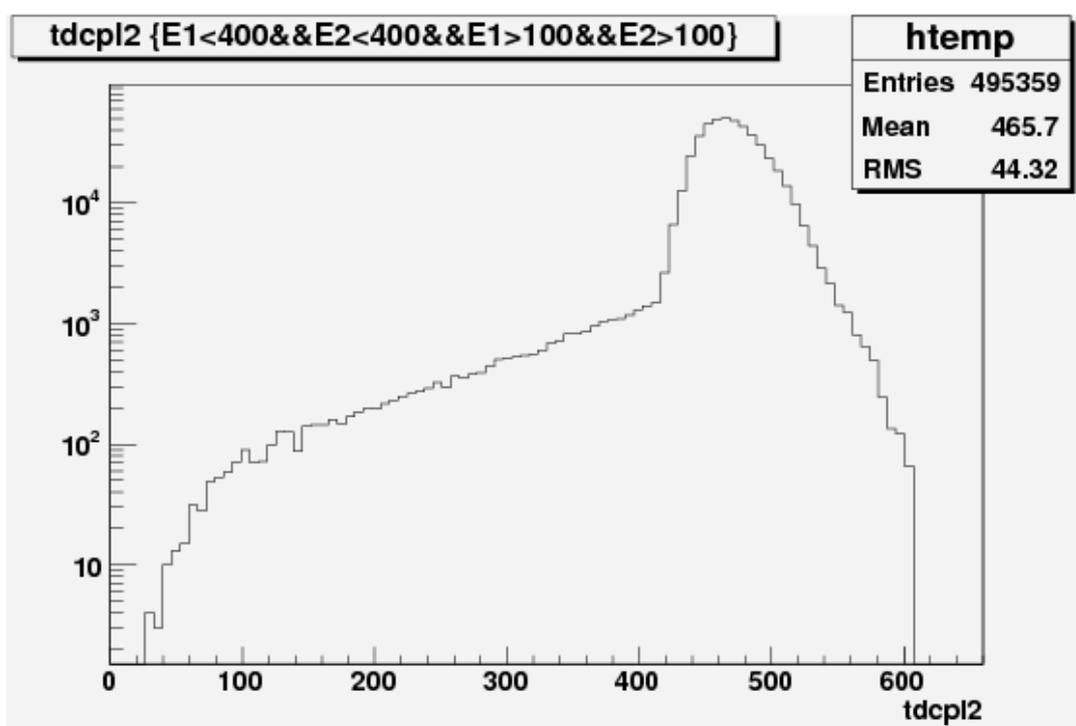


図 4-2-3  $100\text{keV} \sim 400\text{keV}$  での時間分布

※tdcpl2 は t-Q 補正後の崩壊時間に対応する。tdcpl2 が大きいところでなだらかになっているのや小さいところでデータががたがたしているのは t-Q 補正の影響であるが今はその時間範囲は寿命を求めるのに使わないのであまり重要ではない。

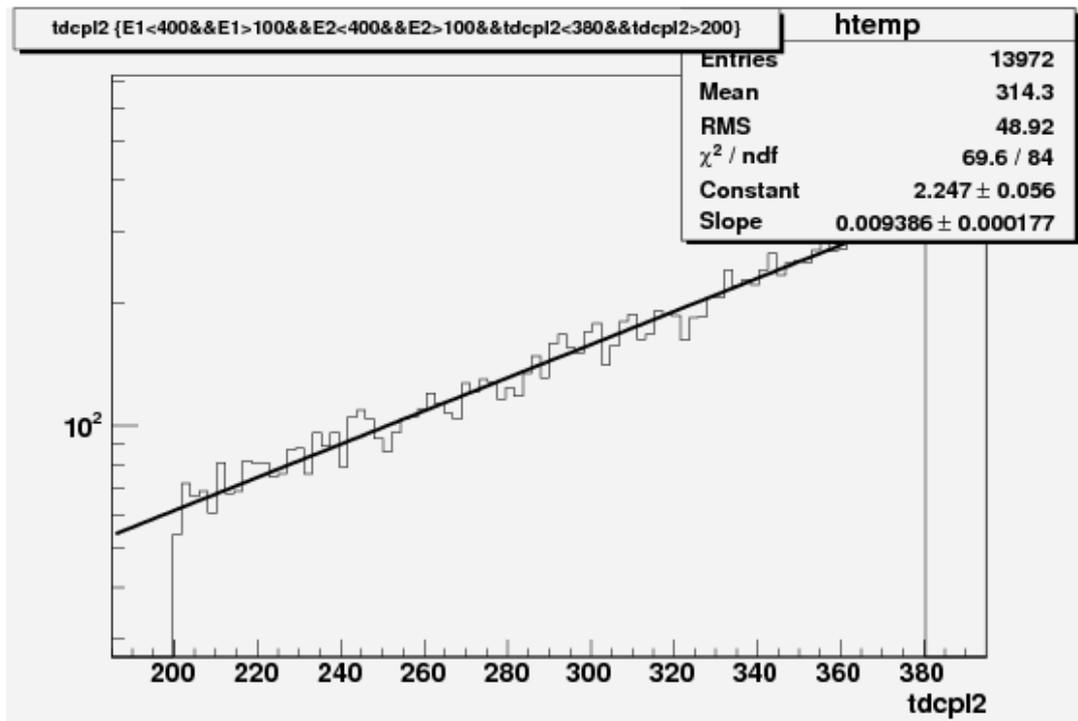


図 4-2-4 fitting の様子

### (c) 3 hit event

まずは生データのプラスチックシンチレータの反応時間 tdcpl を見てみる(図 4-3-1)。1hit・2hit の場合に比べ、p-Ps からの  $2\gamma$  の検出率が下がるため、400nsec 以降はすでに傾きが一定になっている。しかし、先に述べたように、セットアップの関係から立体角を考慮すると、o-Ps からの  $3\gamma$  すべてがシンチレータを反応させる確率は極めて低く、図 4-3-1 のデータはのほとんどは他の物であると思われる。

そこで本当にそうなのかみるために、エネルギー分布を見てみることにする。図 4-3-2、図 4-3-3、図 4-3-4 に順に E1、E2、E3 のエネルギー分布を示す。

ここで、E1・E2・E3 はそれぞれ、反応したシンチレータの番号が小さい順に分類されているため、E1 には Na1~5、E2 には Na2~6、E3 には Na3~7 のエネルギーでしか分類されないようになっている。そのため、セットアップの説明時に述べたように、Na6 と Na7 のシンチレータの反応の有無については、反応時間(TDC の出力値)だけでは or 回路でつながっているため判断できず、エネルギー(ADC の出力値)がある程度以上で反応したと判断しているため、エネルギー値に低いもの(約 100keV 以下)のものがみられるため、E2 と E3 の分布は E1 とエネルギーが低いところで異なって見える。

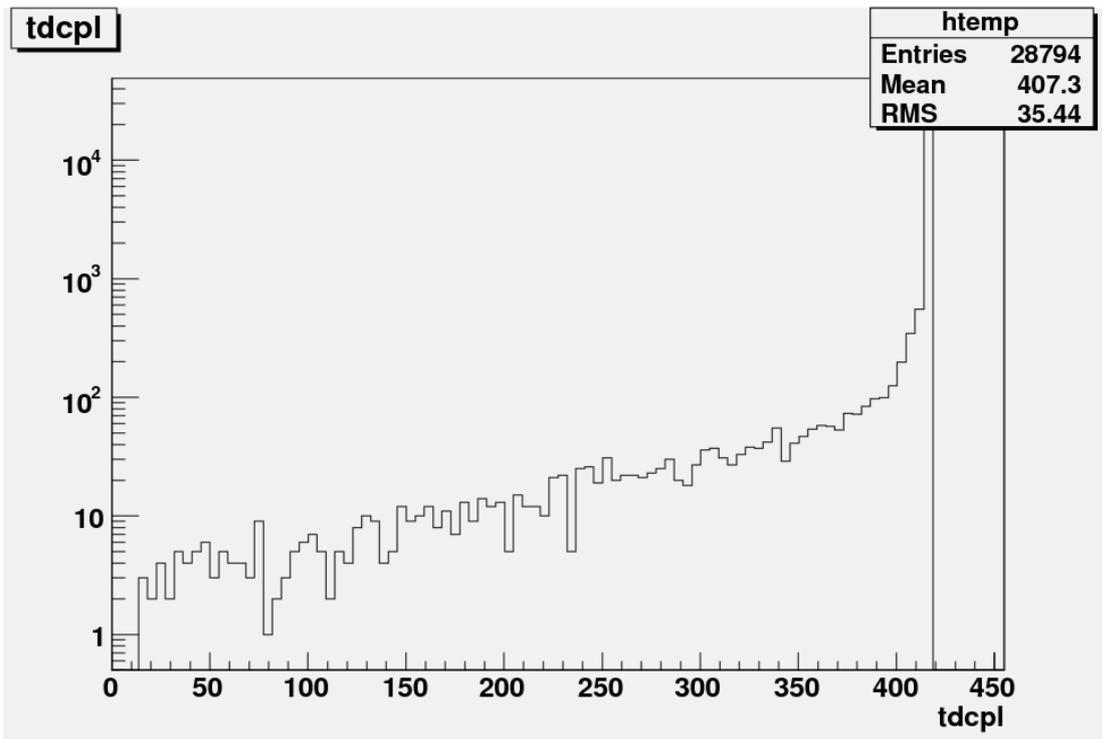


図 4-3-1 3hit の生データ

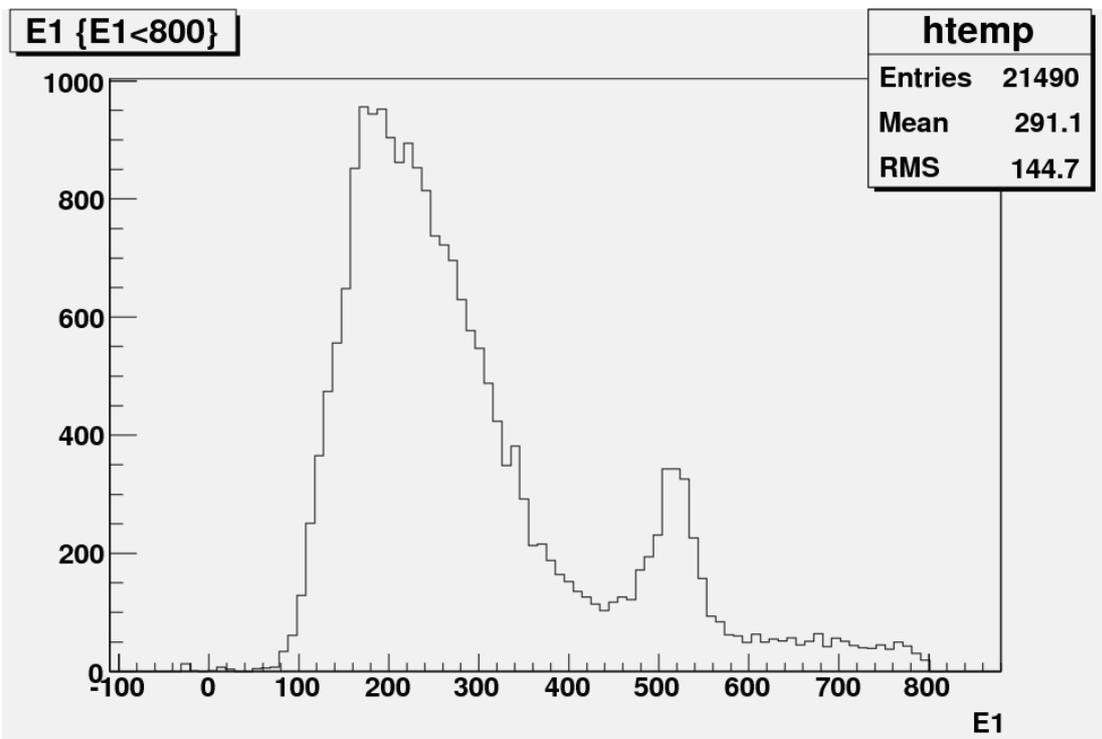


図 4-3-2 E1 のエネルギー分布

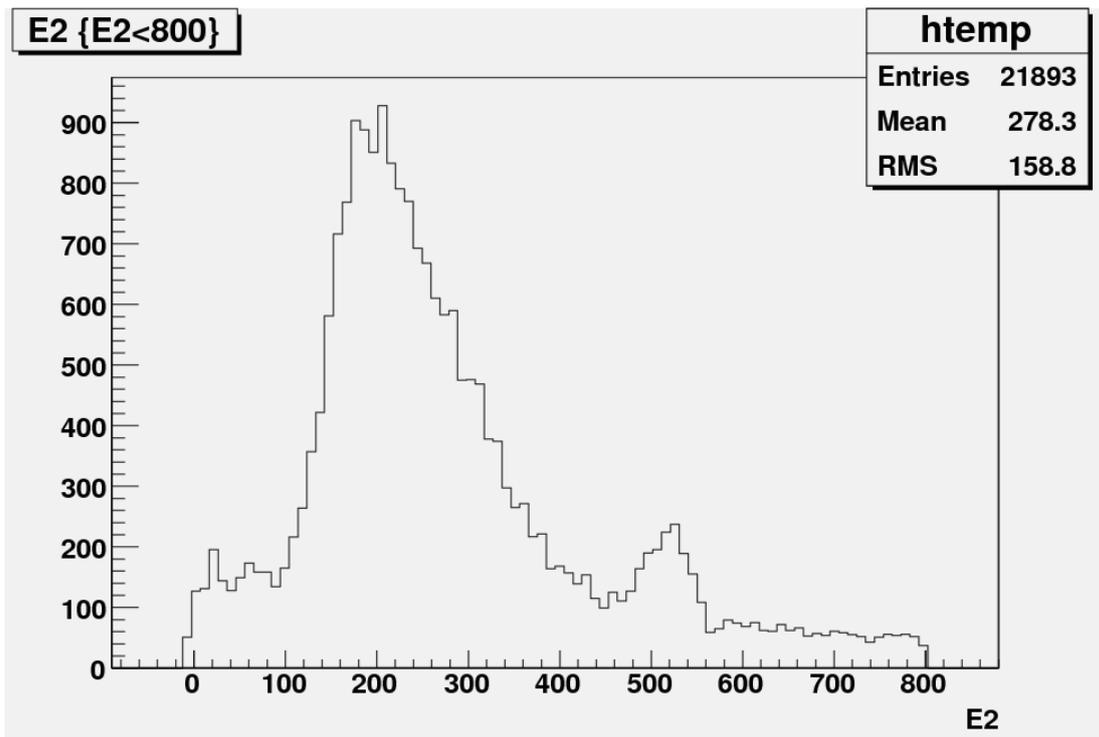


図 4-3-3 E2 のエネルギー分布

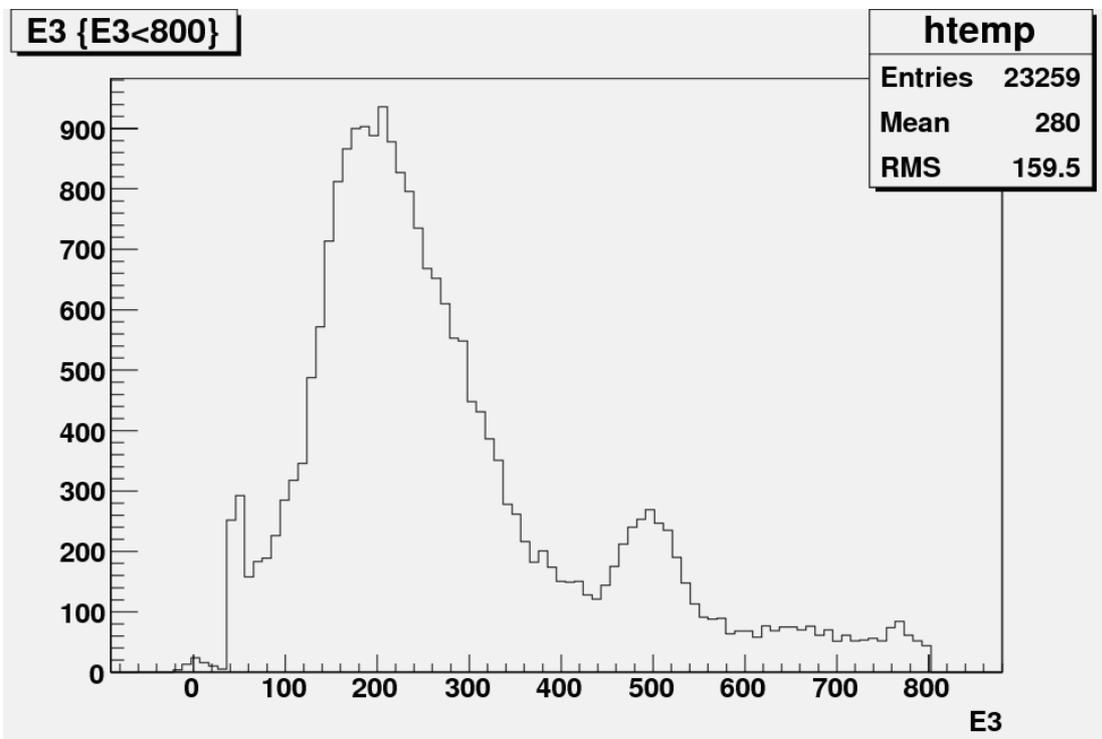


図 4-3-4 E3 のエネルギー分布

これらのエネルギーのうち、3 $\gamma$ 崩壊からの $\gamma$ 線のエネルギーは、511keV より小さいものであるため、各シンチレータのエネルギーが150keV~400keVのデータのエネルギーの総和のグラフは図4-3-5のようになる。

理想的には、3つの $\gamma$ 線のエネルギーの和が1022keVであるデータから寿命を解析してやればよい。しかしながら、図4-3-5からわかるように、1000keV付近にはピークが見られなかった。これは先に述べたように、セットアップ関係上立体角的に、o-Psからの3 $\gamma$ やp-Ps・pick offの2 $\gamma$ からの3hitは測定されにくかったためである。

また逆に約540keVにピークが見られる。これは、パラポジトロニウムなどからの511keVのエネルギーを持つ $\gamma$ 線がコンプトン散乱した結果、3つのシンチレータで反応したものである。つまり1つの光子が2つ以上のNaIシンチレータを反応させた場合が多いことを示している。エネルギーが511keVより高くなっているのは、低エネルギーでのキャリブレーションの線形性のずれから、小さいエネルギーが大きくなってしまっているためだと思われる。

また、3つのエネルギーの和とE1+E2を2次元プロットすると図4-3-6のようになる。こちらの方でも、E1+E2の値が511keV付近が濃くなっており、511keVのコンプトン吸収で検出されたイベントが多く測定されていることがわかる。

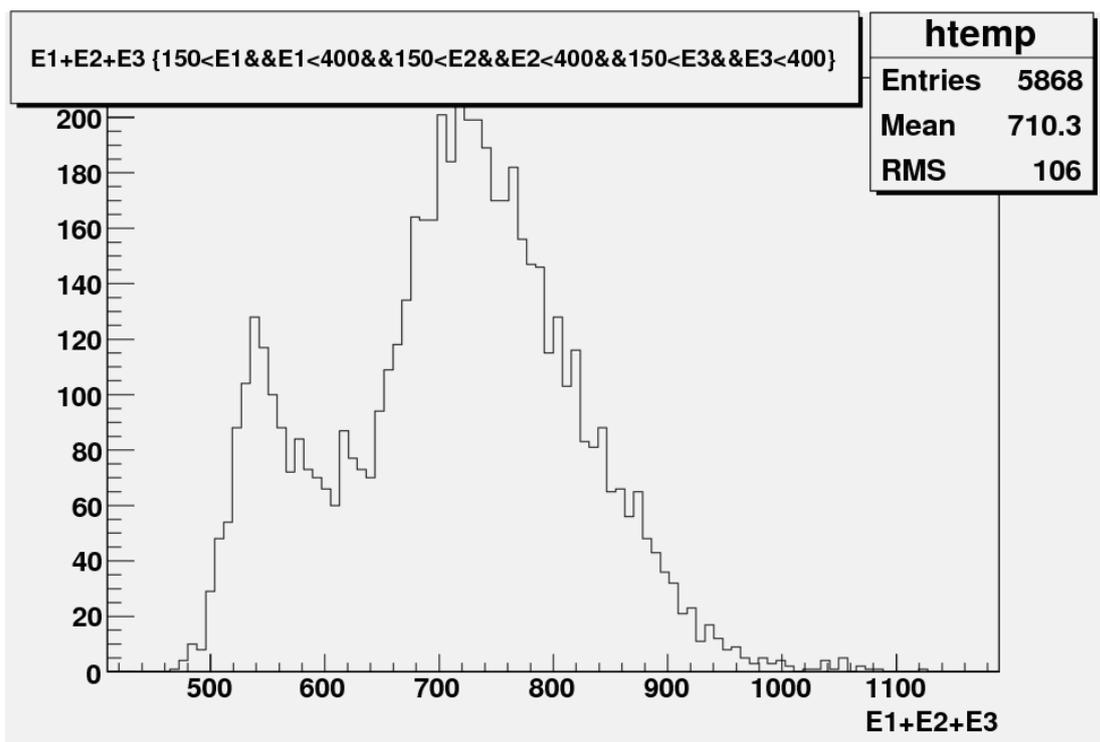


図 4-3-5 E1+E2+E3 の分布

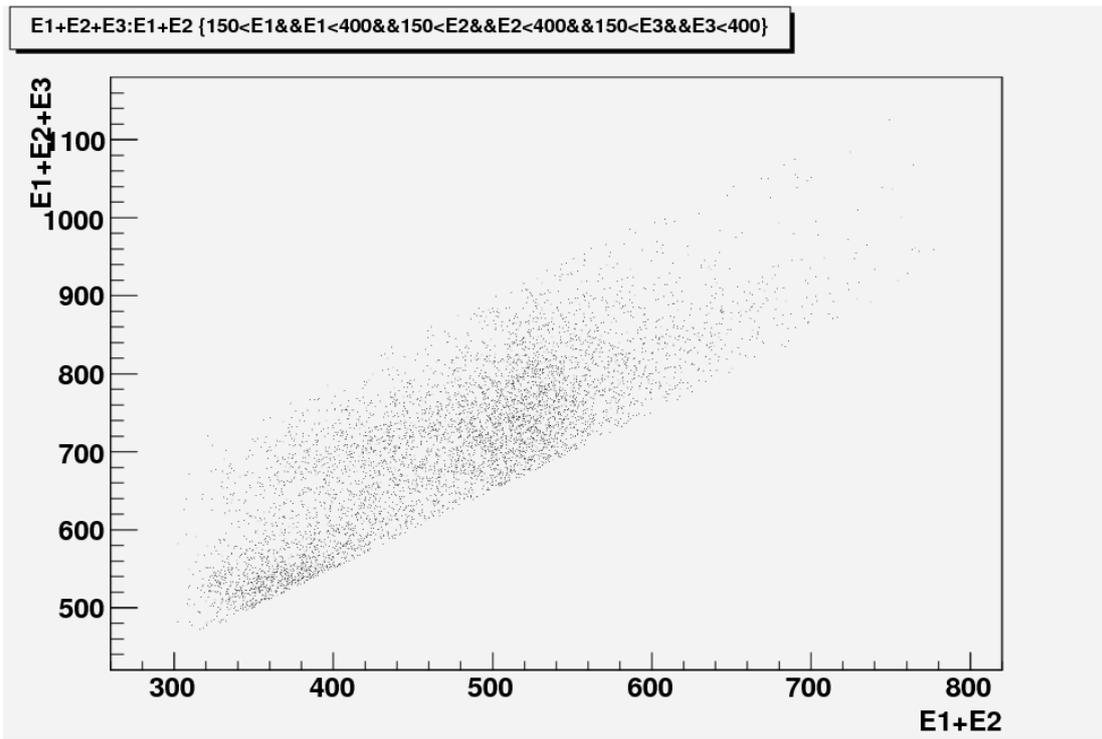


図 4-3-6 E1+E2+E3 と E1+E2 の 2 次元プロット

これらのパラポジトロニウムのデータを除くために、反応時間 tdcpl に 350nsec 以下という制限をつけると、図 4-3-7、図 4-3-8 のようになる。図 4-3-7 からは、511keV ピークの消失が見られる。しかし、二次元プロットでも 511keV ピークは消失しているのだが、データ不足から本当に消えているのかの判断は難しかった。

ここで、そもそも 3hit で観測されうる現象について考えると、

- 1、3 $\gamma$
- 2、3 $\gamma$  中 2 つ
- 3、3 $\gamma$  中 1 つ
- 4、p-Ps による 2 $\gamma$
- 5、p-Ps による 2 $\gamma$  中 1 つ
- 6、pick-off による 2 $\gamma$
- 7、pick-off による 2 $\gamma$  中 1 つ

主に上の 1~7 が光電吸収、もしくはコンプトン散乱され、3 つのシンチレータで観測されたものであると考えられる。そのうち、1・4・6 についてはセットアップの立体角の関係、3・5・7 についてはエネルギーが合計で 511keV を超えないことなどの理由で、先ほどまでのエネルギー・時間の範囲でほぼ測定されなかったと思われる。

しかしながら、この時点のデータの主なものは、3 $\gamma$  中 2 つが入ってコンプトン散乱で検出されたものであると思われるので、この段階でほぼ 2 の 3 $\gamma$  中の 2 つがコンプトン散乱と光電吸収で観

測されたものと思われる。

このデータから反応時間に関して、今考えている範囲で fitting を行くと、図 4-3-9 のようになり、傾き  $0.008308 \pm 0.000615$  [1/nsec] が得られ、それから寿命

$$\tau = 120.4 \pm 8.9 \text{ [nsec]} \quad (4.)$$

を得る。ただし誤差は fitting の際の誤差のみ伝播させてある。(よくよく考えてみると式(2.5)が正しいとするとここでの寿命には余り意味がないように思える。)

1hit の場合のように pick-off の影響を見積もり、除くことをしたかったが、3hit は我々のセットアップの関係上イベント数が少ないためできなかった。また本来 3hit の解析でしたかった  $3\gamma$  崩壊由来の検出された  $\gamma$  線の全体に対する割合は、3hit イベントの数が少ない上に、2hit でも数が少なく pick-off からの  $\gamma$  線の全体に対する割合が見積もれなかったために求められなかった。

つくづくセットアップの段階でもっとうまく(シリカパウダー全体を囲めるように)しておくべきだったと思う。

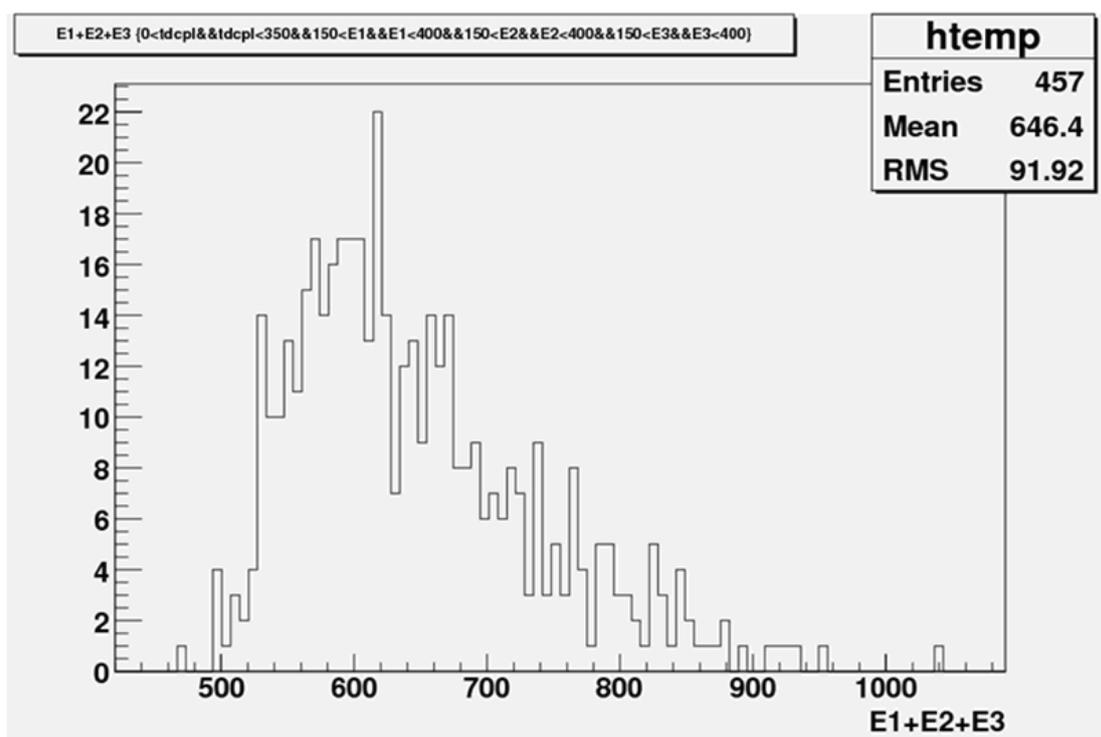


図 4-3-7 制限をつけた後の E1+E2+E3 の分布

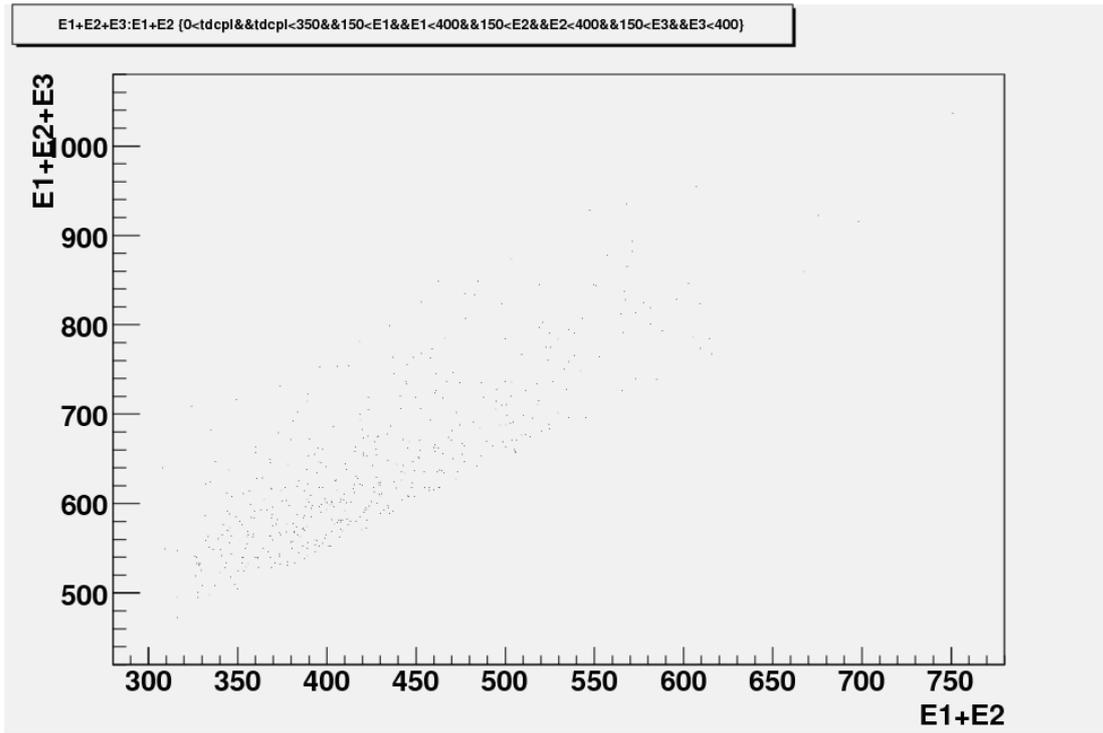


図 4-3-8 制限を解けた後の E1+E2+E3 と E1+E2 の 2 次元プロット

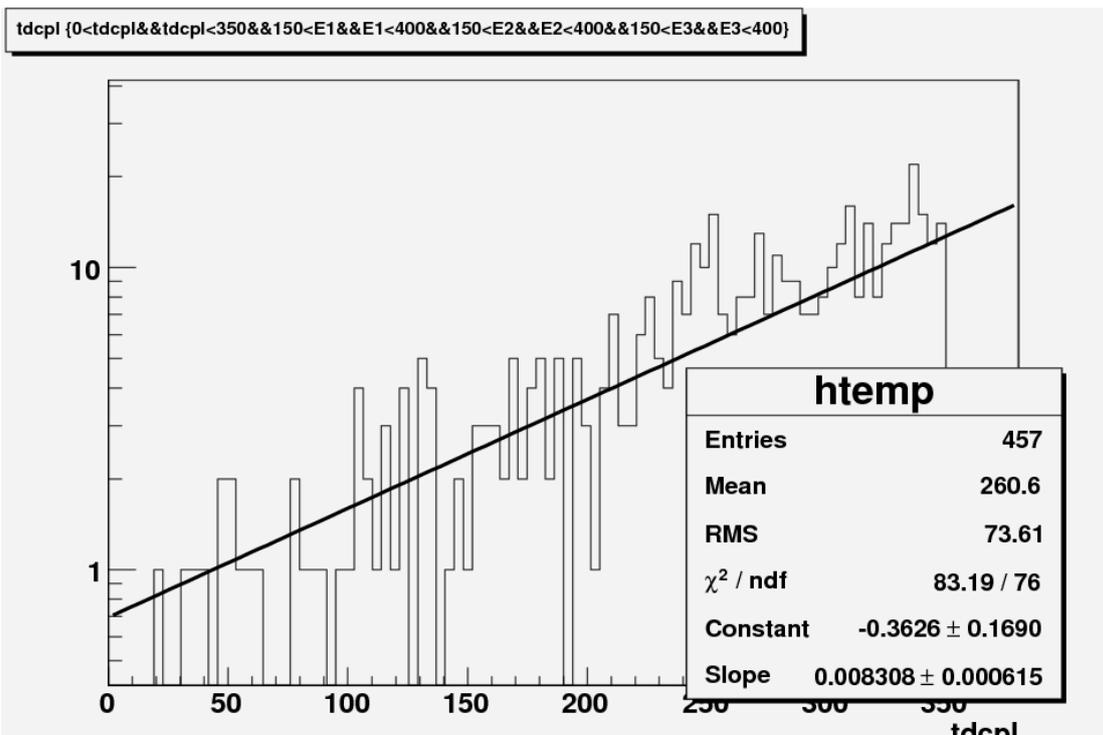


図 4-3-9 fitting の様子

## 5. 結論

### 5.1 結論

我々のこの実験では、我々の実現した真空度(測るメーターはなかったのが具体的にはわからない)における o- $\text{Ps}$  の寿命は、およそ 113.3nsec であると求められた。ここでおよそと書いたのは、解析の際に色々と fitting の時間の範囲を試していたのだが、求められた寿命としては様々で短いものではおよそ 105nsec、長いものではおよそ 130nsec とずいぶんと差があったからである。そんな中で 113.3nsec を選んだのは、一番うまく fitting ができたためである。

結論として、我々の実験の結果(1hit)を書く。

$$\tau_{\text{total}} = 113.3 \pm 6.6[\text{nsec}] \quad (5.1)$$

また、本来は 2hit と 3hit のイベントを利用して行うはずだった pick-off の影響の見積もりだが、それを 1hit で試みた結果をまとめると、以下のようになる。

$$\tau_{3\gamma} = 151.58 \pm 8.8[\text{nsec}] \quad (5.2)$$

ただしこれは理論的な 142nsec と比べるあまり良い値とは思えない。pick-off の影響の見積もりが多すぎたように思われる。

### 5.2 改善点等

改善点や反省点などをまとめる。

1 つ目は、検出器のセットアップをもっとよくしてやるべきだった。どうしたものか明らかに幾何学的に良くない(もったいない)NaI シンチレータの配置をしていた。このために 2hit や 3hit でのイベントが本来の目的である pick-off の影響の見積もりなどに利用できなかった。代わりに行った 1hit での見積もりは時間やセットアップの関係上シミュレーションもしにくく、ずいぶんいい加減なものになってしまった。

2 つ目はもう少し性能の良い TDC モジュール(我々の使った TDC の 2、3 倍の時間が測定できるもの。あるいは channel 数がもう少し多いもの)があった方が良かったということである。そのような TDC があれば、NaI シンチレータ⑥と⑦からの信号を or 回路でつなぐ必要もなく、簡単に反応した NaI シンチレータの番号を知ることができ、TDC の CH.7 と Ch.8 の出力値をつなぐ必要がなく、余計な問題は起きなかった。

3 つ目はこれまであまり触れなかったが、キャリブレーションやデータに対する信頼、補正についてである。ADC のキャリブレーションについては、Na 線源以外にも使うべきだった。2 点で行っているため結果としては誤差など少なくきれいだが、信頼度はあまりないかもしれない。データに対する信頼については、TDC の CH.7 と Ch.8 の出力値をつなぐ接続の部分でのデータに一部問

題があった点である。結果あまり影響はなかったが、解析に使う実験データを選ぶ際にそのことも考慮して判断しても良かったかもしれない。t-Q 補正については、fitting があれでも良かったのか疑わしい部分がある。基準となる 511keV の近くのエネルギーについてはうまくいっているのはなだれこみがほぼなくなったことからわかるがそれ以外のエネルギー領域では、本来ありえないほど補正がきいてしまっていて良くない。もう少しうまく fitting ができる関数などが見つけられれば良かったかもしれない。

4つ目は諸々の実験に対してシミュレーションをするべきだった。実験結果を予測したり、実験によって得られたデータがいいか悪いかの判断に使うこともできるからだ。ただし、シミュレーションは時間のかかる作業であるので、時間に余裕があると良かった。

5つ目は真空度を測るメータか何かがあった方が良かったということである。完全な真空を実現することはほぼ不可能なので、あえて真空度が異なるデータを順にとっていき、真空度がゼロの場合に外挿してやることで比較的簡単に pick-off の影響を見てやり、除くことができるからである。(シリカパウダーの影響は別で求める必要がある。これはこの手のどの実験にも言えることである。)もちろん pick-off の影響がどう真空度と関係しているかは知る必要がある。ただ  $\Gamma_{\text{pick}}$  はほとんど真空度に比例すると考えて良いと近似してやれば簡単だろう。

6つ目は実験内容に関することではないが、外部の人間の意見を取り入れることと本番の発表の前に中間発表をすることである。実験をしていると、実験をしているメンバーとしか意見を交わさないことが多く、間違いに気づかなかったり、いいアイデアが得られなかったり、余計な時間を食ったりしてしまうからだ。

などなどとまだいくらでも出てきそうだがこのくらいにしておく。

## 6. Appendix(誤差の評価)

### 6.1 概略

測定した値は ADC と TDC の値であり、これらは整数なので±1程度の誤差があると見積もれる、これらを用いて行ったキャリブレーションにこの誤差が伝播する。解析においてはヒストグラムのエントリー数を数えたが、それについては $\sqrt{N}$ 程度の誤差が生じる。一方、fitting を行う際、ヒストグラムの縦軸の $\sqrt{N}$ 程度の誤差に関しては解析ソフト ROOT が自動的に計算してくれたが、横軸にもキャリブレーションに由来する誤差が生じており、これを加味した。その他、誤差付の量を用いて別の量を求める際には誤差を適切に伝播させた。

### 6.2 誤差の伝播の規則

ある量  $f(\{x_i\})$  が  $x_i (i=1,2,\dots,n)$  の関数であり、各  $x_i$  には  $\sigma_i$  程度の誤差があるとする。このとき  $f(\{x_i\})$  の誤差  $\sigma_f$  は、次の式で与えられる

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad (6.1)$$

### 6.3 ヒストグラムのエントリー数の誤差

各 bin の高さ  $N$  には  $\sqrt{N}$  の誤差がある。  $m$  個の bin の高さをそれぞれ  $N_i (i=1,2,\dots,m)$  とする。このとき  $M = \sum_{i=1}^m N_i$  につく誤差  $\sigma_M$  は式(6.1)に従うと、

$$\sigma_M = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\sqrt{N})^2} = \sqrt{M} \quad (6.2)$$

となる。なおこの結果は bin の幅に依存しない。

### 6.4 ADC 及び TDC のキャリブレーションと t-Q 補正の誤差

ADC キャリブレーションについては、以前に説明した通りに求めた、解析ソフト ROOT によるフィッティングを行い、表示された誤差を  $a, b$  の誤差とした。なおキャリブレーションに用いたガンマ線のエネルギー511keV と 1274keV の誤差については非常に小さいので無視した。

TDC キャリブレーションについては、オシロスコープにおいて目で確認した時間(72nsec、128nsec、188nsec)については最小目盛りが 4nsec であり、その半分程度まで読み取れたため、誤差を 2nsec とした。対応する3つの TDC の値については 10000 件のデータを取り、その平均値を用いた。傾き  $a$  と切片  $b$  は、3点に対し最小二乗法を用いたので、

$$a = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_j}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.3a)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum y_j^2}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (6.3b)$$

で求めた。これらに対して式(6.1)の誤差伝播を計算した。

$a, b, tdc$  の3つの値の誤差が決まったので、式(6.1)を用いてキャリブレーションした時間に伝播する誤差を計算した。

$$\sigma_{tdc} = 6.191 \quad (6.4)$$

t-Q 補正については、3章で説明したように、直角双曲線で fitting したため、式(6.1)によって誤差を伝播させた。なお、 $a, b, d, x$  の値には誤差  $\sigma_{iqcor}$  が最大になる値を用い、 $a, b, d$  の誤差は fitting の誤差を解析ソフト(gnuplot)に表示された値を用いた。

$$\sigma_{iqcor} = 26.00 \quad (6.5)$$

## 6.5 時間の誤差

キャリブレーションによって時間を  $t$ [nsec] ではかる事が出来るようになったが、その誤差は、式(6.4)と式(6.5)より、次のように求まる。

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{tdc}^2 + \sigma_{iqcor}^2} = 26.72 \quad (6.6)$$

## 6.6 横軸の誤差の fitting の誤差への伝播

o-Ps の寿命を求める方法は横軸を時間、縦軸を崩壊数とするヒストグラムを指数関数で fitting することである。t-Q 補正を用いないとすれば、崩壊率の誤差は縦軸の  $\sqrt{N}$  に起因する fitting の誤差、および TDC キャリブレーションの傾き  $a$  の誤差が伝播するのであるが、t-Q 補正を用いた場合非常に複雑になる。そこで、私(池田)は厳密ではないが概ね妥当と思われ、かつ容易に計算出来る方法を開発した。以下それを説明する。

図 6-1 のように横軸の  $t$  に誤差があると、 $t$  でのヒストグラムの高さは、黄色で塗られた部分を含んでいる可能性がある。fitting の関数が指数関数  $y = a \exp(bt)$  であれば、黄色の部分の面積は、

$$\begin{aligned} S &= \int_{t-\sigma_t}^{t+\sigma_t} a \exp(bt) dt \\ &= \left[ \frac{a}{b} \exp(bt) \right]_{t-\sigma_t}^{t+\sigma_t} \\ &= \frac{a}{b} \exp(bt) [\exp(b\sigma_t) - \exp(-b\sigma_t)] \\ &= \frac{2y}{b} \sinh(b\sigma_t) \end{aligned} \quad (6.7)$$

と求められる。いま、 $t$  でのヒストグラムへの黄色の部分の影響が、面積の平方根  $\sqrt{S}$  で与えられ

るとする。すると高さ  $N$  の bin はその位置  $t$  によらず、誤差は、

$$\sqrt{N} + \sqrt{\frac{2N}{b} \sinh(b\sigma_t)} = \left(1 + \sqrt{\frac{2 \sinh(b\sigma_t)}{b}}\right) \sqrt{N} = C\sqrt{N} \quad (6.8)$$

と変更を受ける事になる。

指数関数による fitting は最小二乗的に行われ横軸の誤差は全て縦軸に押し付けたので、fitting parameter  $a$  への誤差  $\sigma_a$  は、 $t$  の誤差を考慮せず fitting した時の  $a$  の誤差  $\sigma_{a0}$  と以下の関係にある。

$$\sigma_a = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial a}{\partial y_i}\right)^2 (C\sqrt{N_i})^2} = C \sqrt{\sum \left(\frac{\partial a}{\partial y_i}\right)^2 (\sqrt{N_i})^2} = C\sigma_{a0} \quad (6.9)$$

これによって t-Q 補正の誤差を含めた  $t$  の誤差を fitting parameter に伝播させた。

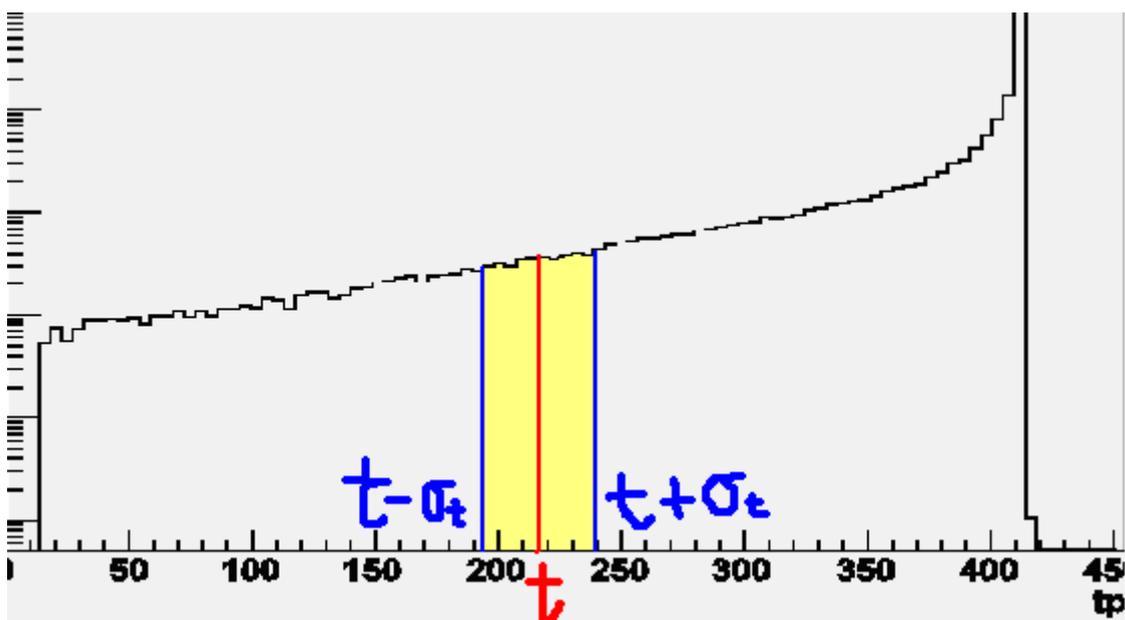


図 6-1 横軸の誤差の影響で、 $t$  での高さが影響を受けることの説明。その影響の大小は黄色で塗りつぶした面積の大小に一致するはずである。

## 参考文献

- [1] ノル, グレン・F.【著】 木村逸郎・阪井英次【訳】:『放射線計測ハンドブック』(第2版) (日刊工業新聞社, 1991)