

# オルソポジトロニウムの 寿命の測定

2003年度後期A1

木村 知哉

棚橋 典大

三木 貴博

2004年4月14日

## 目次

1. 序	2
1.1 ポジトロニウムの性質	2
1.2 実験の目的	3
1.3 実験方法	3
2. 実験の方法と原理	4
2.1 検出器のセットアップ	4
2.2 電子回路ユニットの配線	8
2.3 実験原理	11
3. 実験結果	12
3.1 行った実験	12
3.2 ADC, TDC の calibration	12
3.3 各実験の結果	16
3.4 解析：3 $\gamma$ event の抽出方法	22
3.5 解析結果	24
(i) データ収集について	24
(ii) o-Ps の寿命測定結果	24
(iii) 3つの $\gamma$ 線のエネルギーの和	31
(iv) 各実験の効率の比較	34
3.6 課題と反省	35
4. 結論	36

# 1. 序

## 1.1 ポジトロニウムの性質

ポジトロニウムとは電子と陽電子が電磁相互作用により束縛された系である。これは水素原子の陽子が陽電子と替わったものと考えられ、実際、水素原子と似た性質を持つ。

基底状態のポジトロニウムには電子と陽電子のスピンの反平行な一重項状態のパラポジトロニウムと、電子と陽電子のスピンの平行な三重項状態のオルソポジトロニウムとがある。これらのエネルギー差は  $8.4 \times 10^{-4}$  eV であり、パラポジトロニウムのほうが低いが、ポジトロニウムの形成は通常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こるので、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、パラポジトロニウムとオルソポジトロニウムの生成比は 1 : 3 となる。また、パリティの保存則から、パラポジトロニウムは 2 光子消滅をし、オルソポジトロニウムは 3 光子消滅をする。真空中でのパラポジトロニウムの寿命は 123 ps、オルソポジトロニウムの寿命は 140 ns である。

物質中では、特にオルソポジトロニウムは物質と反応して真空中の寿命より短い寿命で消滅する。この反応には、ピックオフ消滅、スピン交換反応、化学反応が知られている。

ピックオフ消滅：ポジトロニウムは、物質中ではまわりの原子と衝突を繰り返しながら動き回っている。その衝突の際に、たまたま陽電子と原子を構成している電子との間に重なりが生ずると、両者の対消滅が起こる。物質中の自由空間の体積が小さいほどピックオフ消滅は早くなる。

スピン交換反応：ポジトロニウムが不対電子を持つ分子と電子のスピンを交換する反応で、オルソポジトロニウムはパラポジトロニウムになり、123 ps の寿命で自己消滅する。特に大気中の実験では、酸素が不対電子対を持つがためにこの反応が起きやすい。

化学反応：ポジトロニウムは水素原子の構造に近いので、酸化反応、付加反応、置換反応などがある。酸化反応の場合、ポジトロニウムは酸化され裸の陽電子になる。この陽電子は自由な状態となって消滅する。

## 1.2 実験の目的

本実験ではオルソポジトロニウムの平均寿命（下式の  $\tau$  の値）を測定する。

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

ただし

$N$  : 時刻  $t$  でのオルソポジトロニウムの数

$N_0$  : 測定開始時刻 ( $t=0$ ) でのオルソポジトロニウムの数

## 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エアロジェルと反応させてオルソポジトロニウムを生成する。このオルソポジトロニウムの崩壊によって出てくる  $\gamma$  線を NaI シンチレータが捕らえた時刻をオルソポジトロニウムの崩壊した時刻、また  $\beta^+$  崩壊時に陽電子とほぼ同時に出てくる 1275 keV の  $\gamma$  線を BGO シンチレータが捕らえた時刻をオルソポジトロニウムの生成した時刻として寿命を測定する。

## 2. 実験の方法と原理

### 2.1 検出器のセットアップ

放射線検出器は、図 2-1、2-2 のように設置した。図 2-3 は、図 2-2 と同じ方向からみたものである。図 2-3 の①～④は放射線検出器で、

- ① NaI 検出器 Negative-HV に接続して、 $-839\text{V}$  に設定
  - ② NaI 検出器 Negative-HV に接続して、 $-760\text{V}$  に設定
  - ③ NaI 検出器 Negative-HV に接続して、 $-882\text{V}$  に設定
  - ④ BGO 検出器 Negative-HV に接続して、 $-1600\text{V}$  に設定
- となっている。

①～③はオルソポジトロニウム崩壊後に生成する 3 本の  $\gamma$  線 ( $3\gamma$ ) を検出する。ポジトロニウムの持つエネルギーは、 $511\text{keV}$  (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  $511\text{keV}$  以下になる。よって、 $511\text{keV}$  以下の  $\gamma$  線が良く検出されるように、Negative-HV を設定した。

④は  $^{22}\text{Na}$  が崩壊して  $\beta^+$  線を出した後に、残った  $^{22}\text{Ne}$  が基底状態になるときに放出する  $1275\text{keV}$  の  $\gamma$  線を検出する。よって、これより低いエネルギーの  $\gamma$  線があまり検出されないように、Negative-HV を設定した。なお④だけシンチレーターに BGO を使っているのは、BGO の高エネルギー  $\gamma$  線の検出効率が NaI のそれよりも高いために、 $1275\text{keV}$  の  $\gamma$  線検出により適しているからである。

⑤の位置にエアロジェル (密度約  $0.2\text{g}/\text{cm}^2$ ) を置く。エアロジェルは電子の媒体となるので、ここに  $\beta^+$  線が飛び込むとポジトロニウムを生成し、さらに  $\gamma$  線に崩壊する。

我々はまず予備実験として、図の点線で囲んだ上下 2 つの位置の一方にのみエアロジェルを置き、それぞれの位置について測定を行った。ポジトロニウムにはオルソとパラの 2 種類があり、後者は崩壊すると 2 本の  $\gamma$  線 ( $2\gamma$ ) になり、back to back に放射されるが、エアロジェルを上にした場合には、下にした場合よりも多くの  $2\gamma$  が観測されると考えられる (図 2-4)。この実験で  $2\gamma$  は不要なので、下にエアロジェルを置くと、よりきれいな測定結果が得られると思われる。実際、この予備実験で、下にエアロジェルをおいた場合には測定される  $2\gamma$  の数は減少し、 $3\gamma$  の数はエアロジェルを上にした場合の 1.5 倍になったので、それ以後の実験は、エアロジェルを下に置いて行った。ただし下にエアロジェルを置いて実験を行うと、単位時間あたりに観測されるイベント数が減少して、①、②、③全ての検出器の信号を Coincidence に入力して行う実験の場合には時間がかかり過ぎる。そのためこの実験はエアロジェルを上にした状態でも行い、どちらのほうが効率良くデータ収集できるのか比較した。

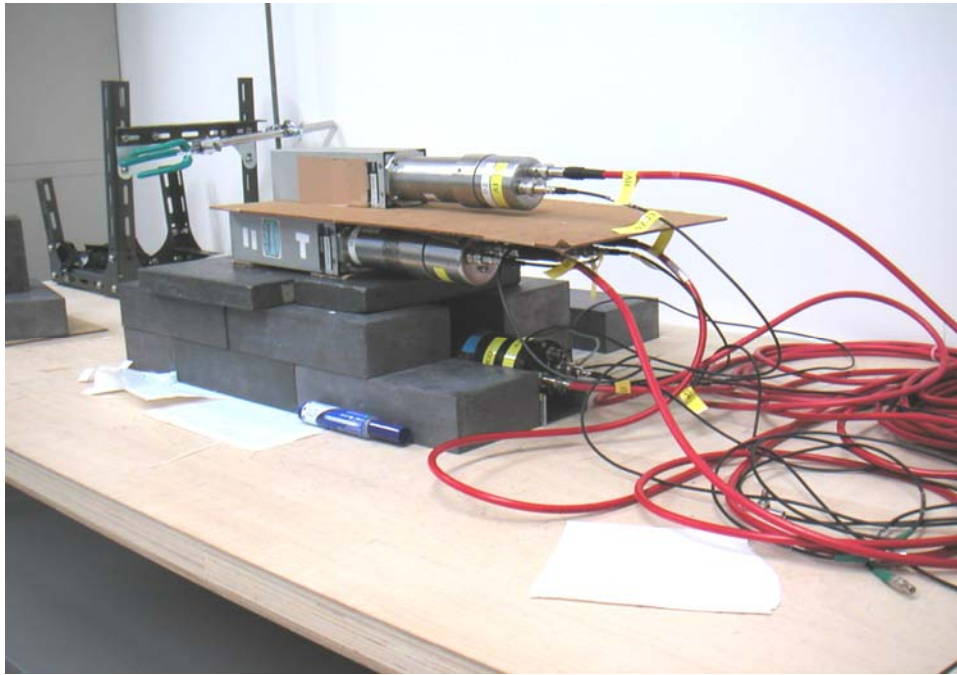


図 2-1 本実験での検出器の配置 (1)



図 2-2 本実験での検出器の配置 (2)

実験は、写真中央少し上のNaIに囲まれた空間に、エアロジェルを挿入して行う。

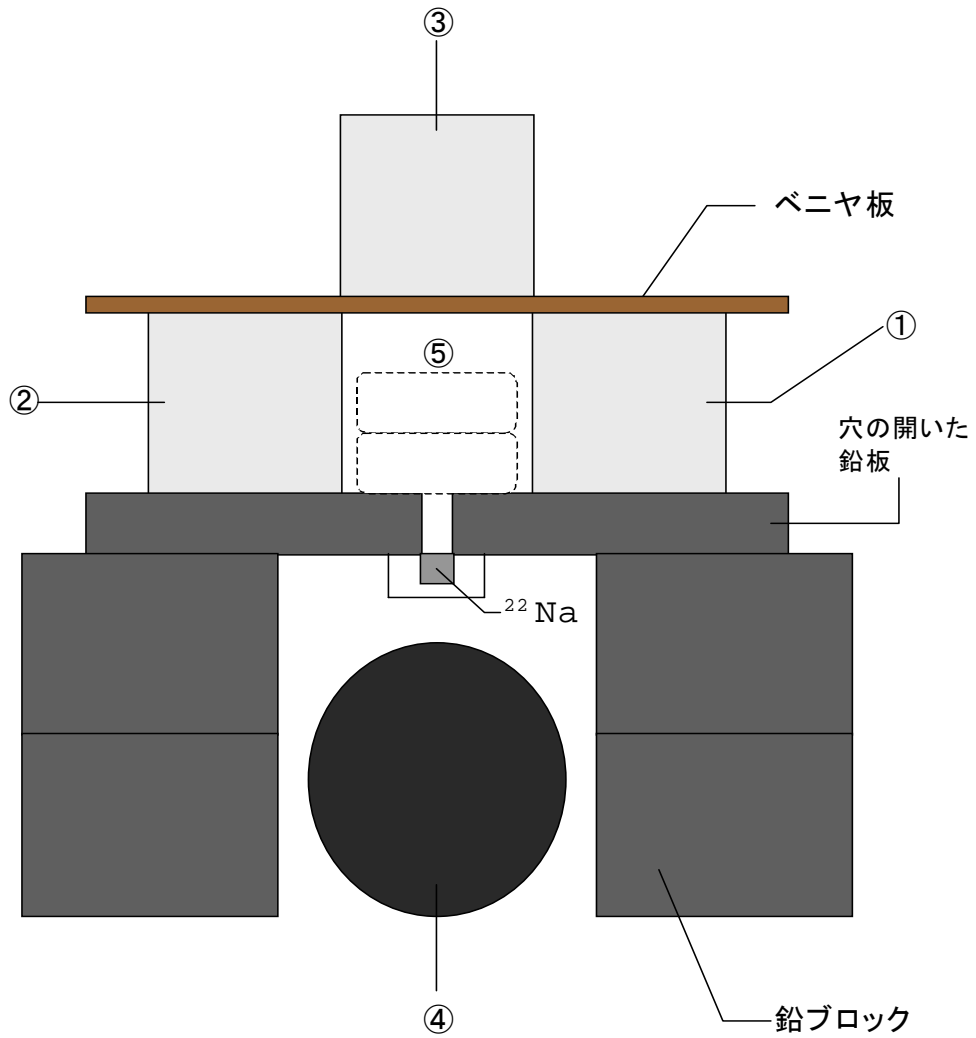


図 2-3 線源と検出器の配置

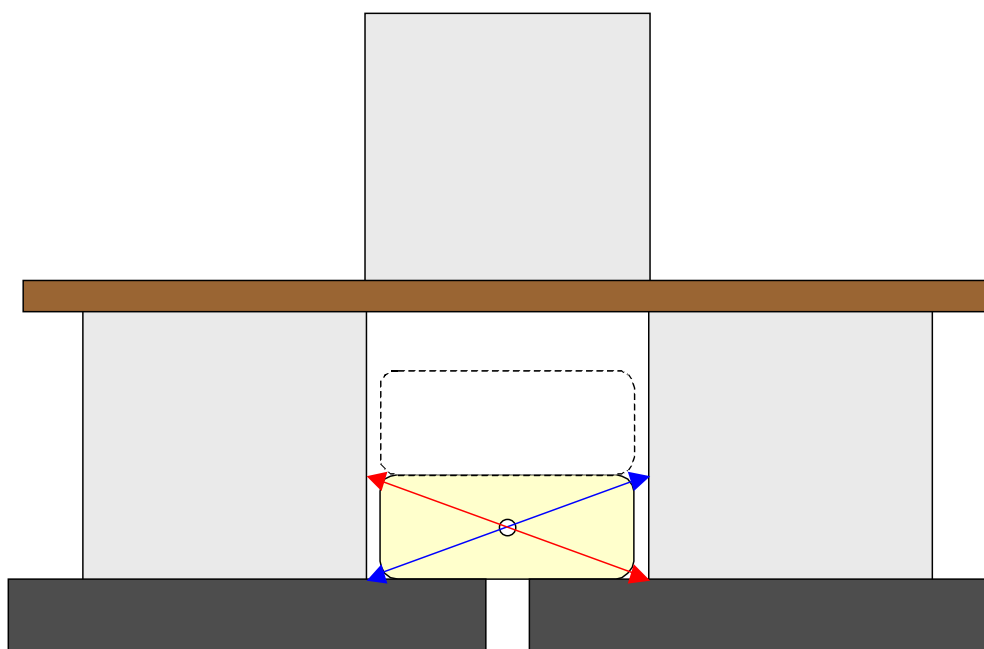
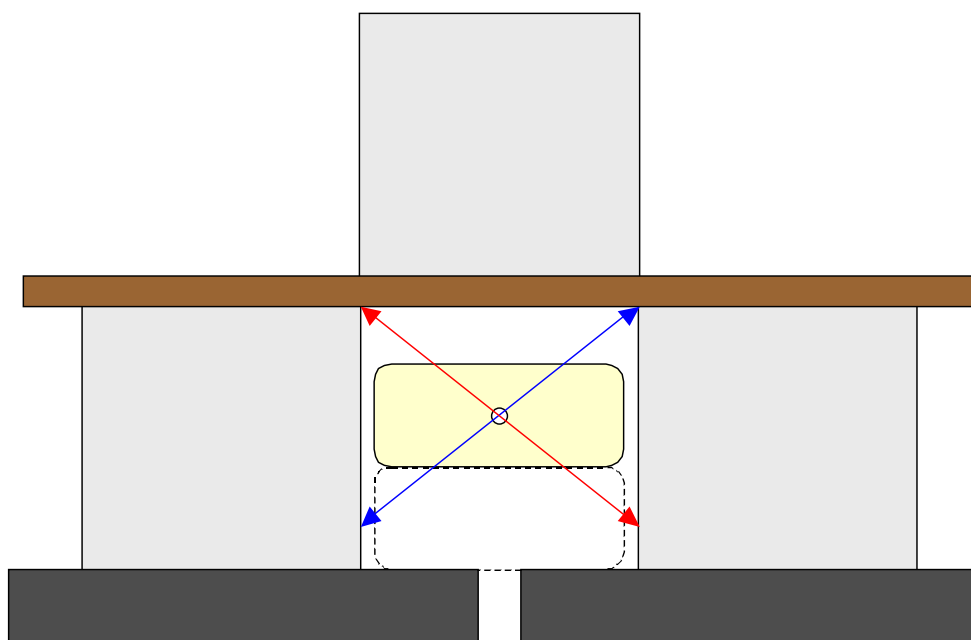


図 2-4 エアロジェルの位置の違いによる  $2\gamma$  の検出量の違い



## 2.2 電子回路ユニットの配線

図 2-5 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。

- **Amplifier** …放射線検出器からの弱い出力信号を 10 倍に増幅する。
- **Divider** …入力信号を 2 つに分配して出力する。
- **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を発生する。今回の実験では、その閾値を設定可能最低値である 12.3mV 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。
- **Scaler** …スタートスイッチを入れてから切るまでの間に入力されるロジックパルスの数を数える。
- **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。なお、この実験では、ゲートパルスの幅は 500 ns に設定した。
- **Fan In/Out** …2 つ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。
- **ADC** …ゲートパルスの入力がありゲートが開いている場合のみ、他の端子からのパルスの入力を受け入れ、その波高の積分値に比例した数字（デジタルコード）を出力する。こ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。
- **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の入力があるまでの時間に比例した数字（デジタルコード）を出力する。この実験では 12 ビットの TDC を使用したので、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。
- **Delay** について

### (i) Amplifier（または Divider）と ADC の間の Delay

ADC にゲートパルスの入力があった後に検出器からの信号が ADC に入るように、検出器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、図に書かれた遅延時間は、オシロスコープで測定した。

### (ii) 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、検出器からの信号が TDC に入るように検出器からの信号を遅らせるためのもの。Fixed Delay ユニットを使用した。

### (iii) Discriminator と Coincidence の間の Delay（検出器①からの信号のみ）

<sup>22</sup>Na の崩壊によって Coincidence に到達する信号の中で最も早いのは、検出器④からの信号であり、その後で、検出器①～③の信号は、ほぼ同時刻に到達すると考えられる。よって、検出器①からの信号にのみ、わずかに Delay をかけた場合、この信号

が最後に到着する可能性が高くなり、Coincidence から信号が出力される場合のトリガーとして働くことになる。

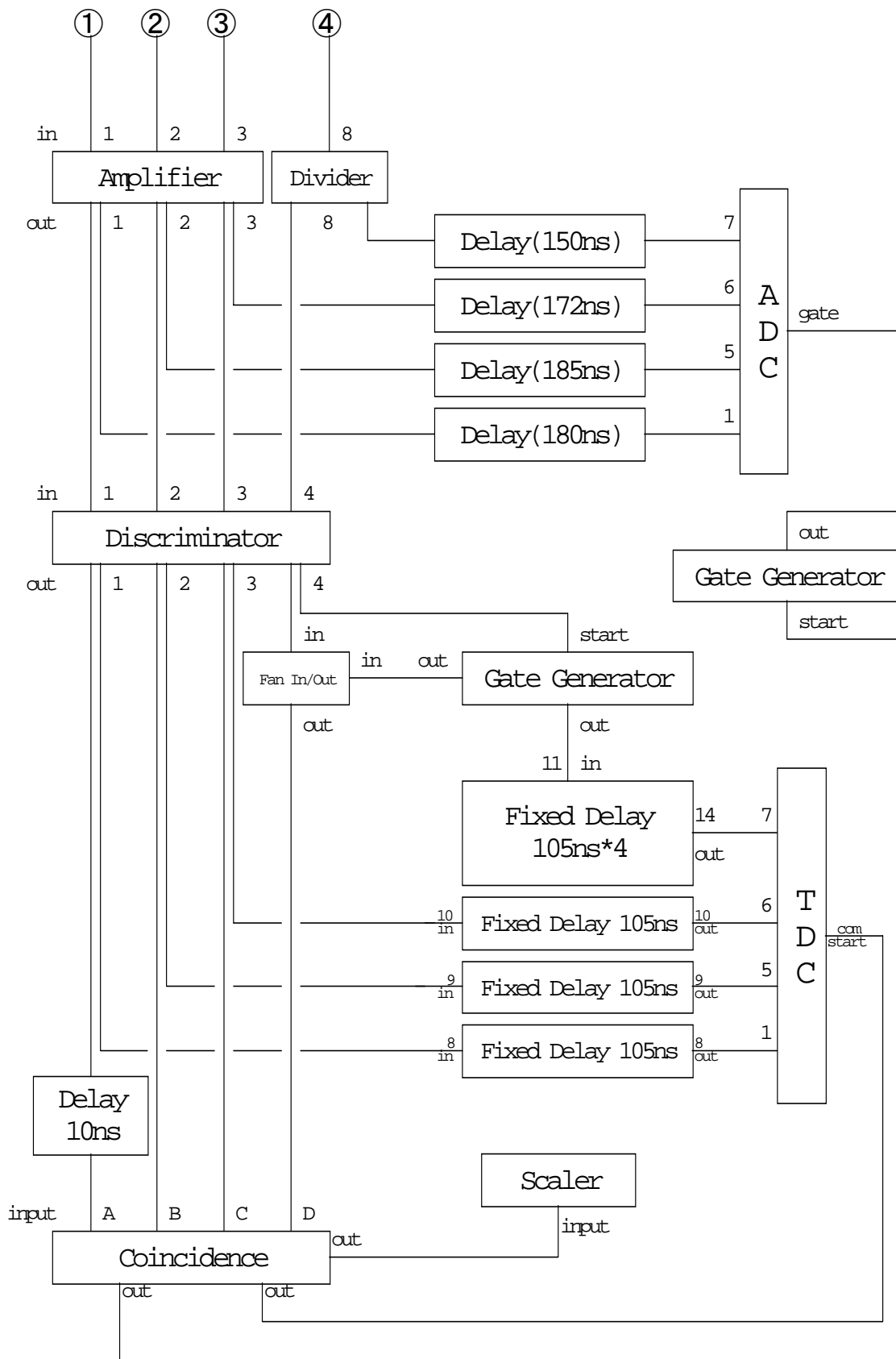


図 2 - 5 実験の回路図

## 2.3 実験原理

オルソポジトロニウムの寿命  $\Delta t$  の計算方法

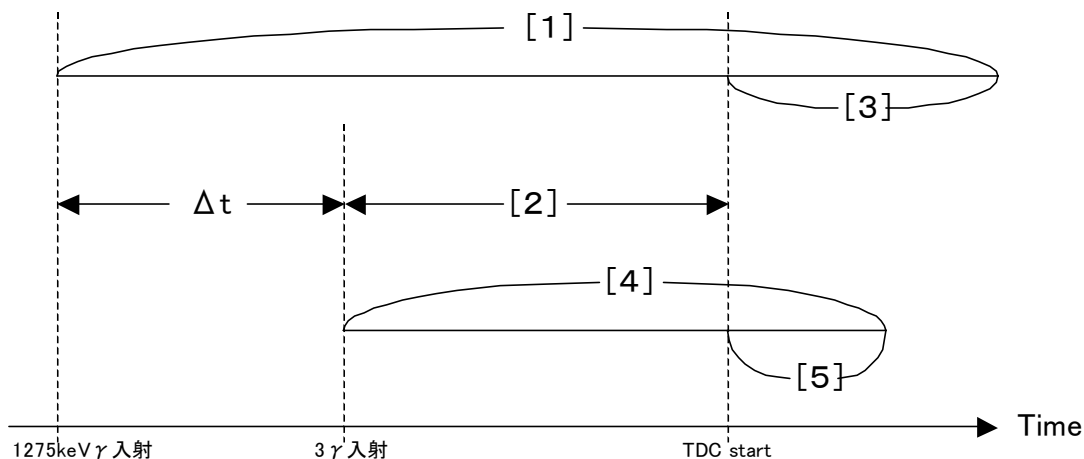


図 2-6  $\Delta t$  と時間の関係

図 2-6 のように、横軸に時刻をとる。ここで、[1] ~ [5] は次のようなものである。

- [1] … 検出器④に 1275keV の  $\gamma$  線が入射してから、Divider→Discriminator→Gate Generator→Fixed Delay を通って TDC に信号が入るまでの時間
- [2] … (検出器①からの信号が Coincidence のトリガーの役目を果たしているときに) 検出器①に 3  $\gamma$  が入射してから、Amplifier→Discriminator→Delay(10ns)→Coincidence を通って TDC に信号が入り、TDC がスタートするまでの時間
- [3] … TDC がスタートしてから、検出器④の信号が TDC に入るまでの時間
- [4] … 検出器①、②、③に 3  $\gamma$  が入射してから、それぞれの信号が Amplifier→Discriminator→Fixed Delay を通って TDC に入るまでの時間の平均
- [5] … TDC がスタートしてから、検出器①、②、③の信号のそれぞれが TDC に入るまでの時間の平均

このとき、図 2-6 より、次のことがわかる。

$$[1] = \Delta t + [2] + [3], \quad [4] = [2] + [5]$$

$$\text{よって、} [1] = \Delta t + [3] + [4] - [5]$$

オシロスコープと Gate Generator を使って測定すると、

$$[1] = 549\text{ns}, \quad [4] = 149\text{ns}$$

と分かったので、

$$\Delta t = [1] - [4] - [3] + [5] = 400 - [3] + [5] \text{ (ns)}$$

TDC の値より [3] と [5] はわかるから、 $\Delta t$  が求められる。

[2] は約 50nsec だったので、この実験方法で 0nsec から約 400nsec の範囲の  $\Delta t$  が測定できることになる。

### 3. 実験結果

以下では、実験に用いた NaI 検出器①、②、③および BGO 検出器④をそれぞれ Ch.1, Ch.2, Ch.3, Ch.4 と表す。また、オルソポジトロニウムを o-Ps、パラポジトロニウムを p-P と略記する。

#### 3.1 行った実験

実験は以下の組の Ch.について coincidence をとることで行った。

- ・実験 1 : NaI Ch.1, 2, 3 & BGO Ch.4 : エアロジェルは下の位置に配置
- ・実験 2 : NaI Ch.1, 3 & BGO Ch.4 : エアロジェルは下の位置に配置
- ・実験 3 : NaI Ch.3 & BGO Ch.4 : エアロジェルは下の位置に配置
- ・実験 4 : NaI Ch.1, 2, 3 & BGO Ch.4 : エアロジェルは上の位置に配置

各実験データのそれぞれから o-Ps の寿命を求めた。

また、Ch.1, 2, 3 すべてを用いた実験 1, 4 については、3つの NaI に入射した  $\gamma$  線のエネルギーの和が 1022keV に等しくなっているか確かめた。

最後に、各実験を比較し、o-Ps の寿命を求めるためのデータを最も効率よく集めるためにはどの実験を行うべきか検討した。

#### 3.2 ADC, TDC の calibration

(i) ADC について :

各実験を行う前後に一回ずつ、3種類の標準線源 ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) を用いて各 Ch. の単独測定を行った。一例として図 3-1、3-2 に Ch.1 及び Ch.4 の生データを示す。グラフを見ると、Ch.1 では約 400ch.、Ch.4 では約 350ch.よりも下の ch.にほとんど data が存在していないことがわかる。これは Discriminator によって低 energy の event が排除されているためである。

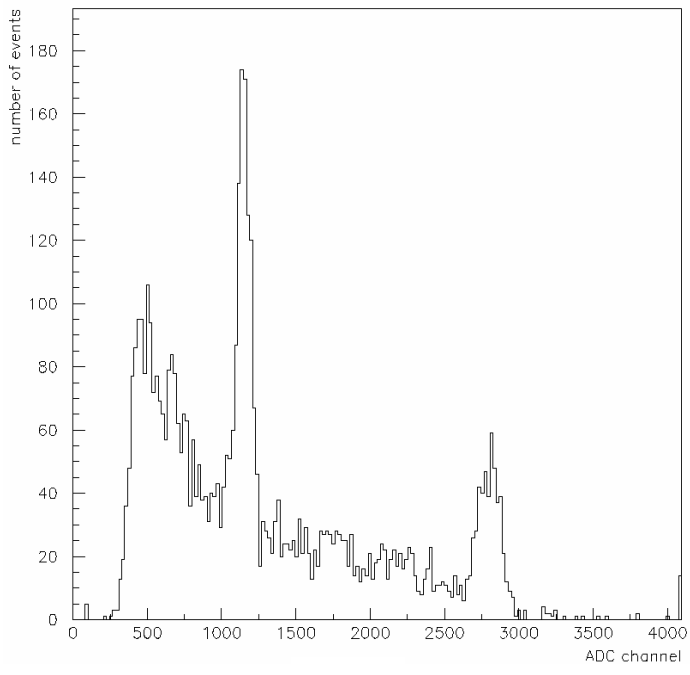
得られたエネルギースペクトルの光電ピークの部分を gaussian で fit して、その中央値を  $\gamma$  線の energy に対応する ADC の出力 Ch.とした。

その対応の関係式として、

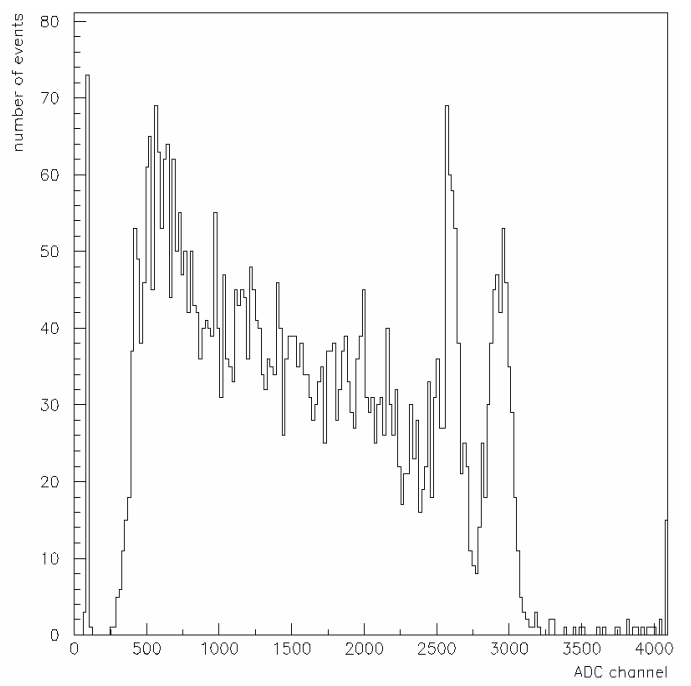
$$(ADC \text{ Ch.}) = a \times (\text{energy} [keV]) + b \quad (a, b \text{ は定数})$$

を仮定した。各実験前後のデータをあわせたデータをこの式で fit し、定数  $a, b$  を求めた。表 3-1 にその結果を示す。なお fitting の誤差は Ch.1,2,3 で  $\pm 0.5\%$ 、Ch.4 で  $\pm 10\%$  程度であった。エネルギー分解能は FWHM で Ch.1,2,3 で 70keV 程度、Ch.4 で 140keV 程度であった。

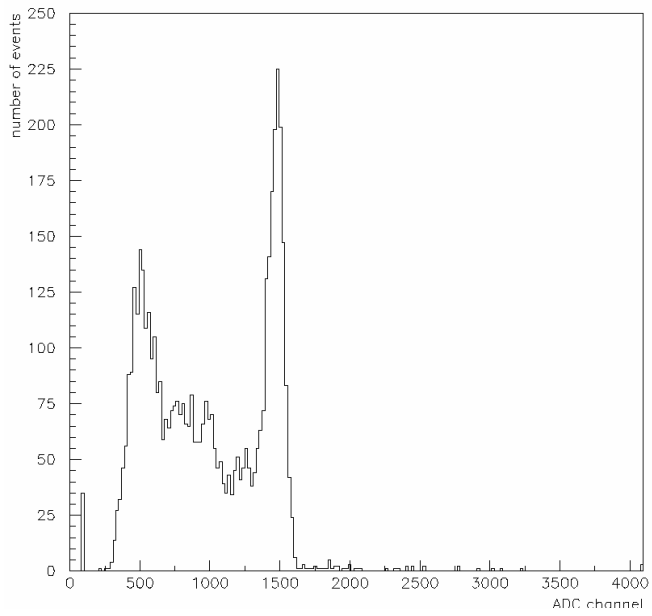
各 Ch.のグラフ及び求められた関係式から、今回の実験のセットアップで測定可能なエネルギー範囲は Ch.1,2,3 で 200keV~2000keV、Ch.4 で 500keV~8000keV と分かる。



$^{22}\text{Na}$

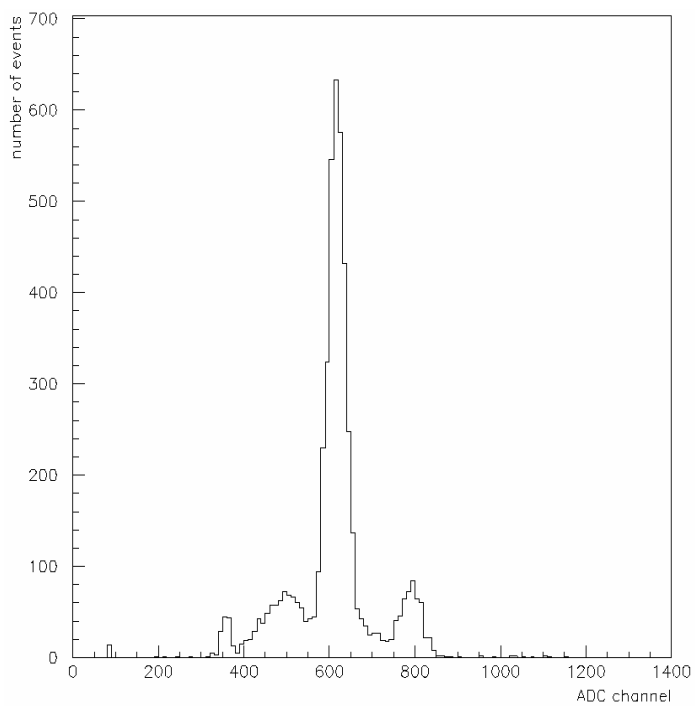


$^{60}\text{Co}$

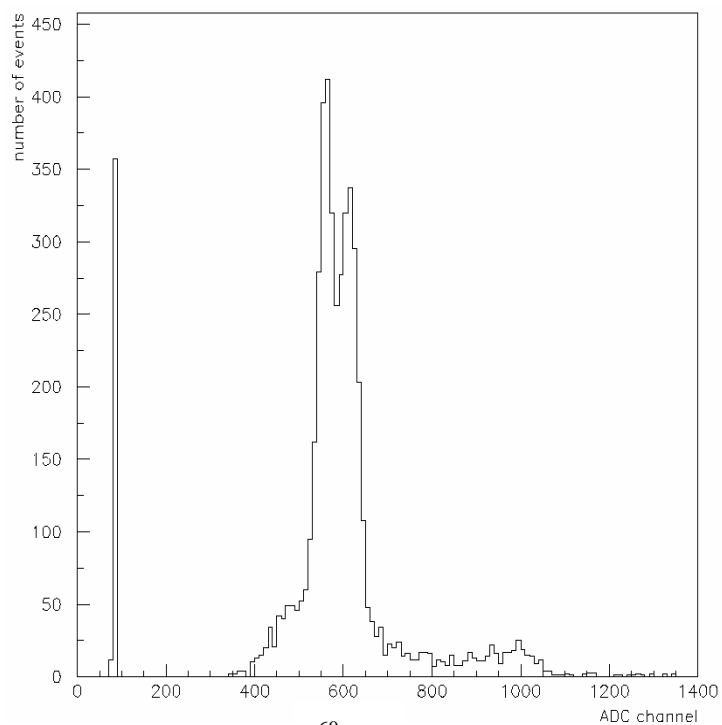


$^{137}\text{Cs}$

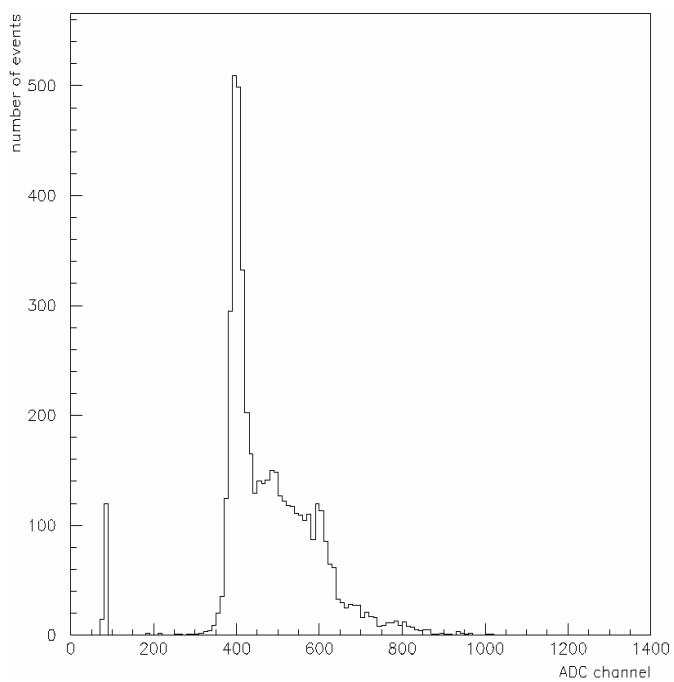
図 3-2-1 : Ch.1 単独測定時のエネルギースペクトル



$^{22}\text{Na}$



$^{60}\text{Co}$



$^{137}\text{Cs}$

図 3-2-2 : Ch.4 単独測定時のエネルギースペクトル  
1400ch.以上にはほとんど data が存在していなかったため、  
グラフでは 1400ch.以下の部分だけを表示している。

		Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
実験 1	<i>a</i>	2.160	2.363	2.445	0.322
	<i>b</i>	41.7	49.2	-23.0	180
実験 2	<i>a</i>	2.158	2.365	2.430	0.336
	<i>b</i>	43.8	51.0	-18.8	170
実験 3	<i>a</i>	2.152	2.365	2.430	0.337
	<i>b</i>	44.9	51.0	-22.3	170
実験 4	<i>a</i>	2.165	2.367	2.439	0.339
	<i>b</i>	38.7	52.9	-26.2	170

表 3-2-1 : 各実験の解析に用いた ADC の calibration 結果。関係式は

$$(ADC\ Ch.) = a \times (energy[keV]) + b.$$

(ii) TDC について :

TDC の start と各 Ch. にパルス波を入射させたとき、各 Ch. に入射させるパルス波に与えた Delay の値に対して、TDC の Ch. がどのように変化するかを記録した。Delay の値はオシロスコープを用いて計測した。

関係式として

$$(Delay [n\ sec]) = a \times (TDC\ Ch.) + b \quad (a, b \text{ は定数})$$

を仮定し、得られたデータをこの式で fit して *a, b* の値を求めた。表 3-2 にその結果を示す。

なお、Delay の値のオシロスコープによる読みとりに伴い ±6nsec の系統誤差がある。また直線性からのずれは 1 % 以下であった。

	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
<i>a</i>	0.2043	0.2083	0.2029	0.2032
<i>b</i>	24.7	18.6	26.0	26.9

表 3-2-2 : 各 Ch. の TDC の calibration 結果。



### 3.3 各実験の結果

各実験で得られた生データを図 3-3-1～3-3-4 に示す。ただし横軸の目盛の単位は keV ないし nsec に直してある。縦軸はイベント数である。

実験 1 と実験 4 の各 Ch. で得られた energy spectrum を比較すると、エアロジェルを上の方に配置した実験 4 では主として 2 $\gamma$ 崩壊に由来すると考えられる 511keV のピークが顕著に表れているのに対して、エアロジェルを下の方に配置した実験 1 ではそれが抑制されているのが分かる。

また、energy と時刻との間に相関がないかを見るために、実験 1 の Ch.1～4 について、横軸を energy、縦軸を時刻とするグラフを作成した。このグラフを図 3-3-5 に示す。

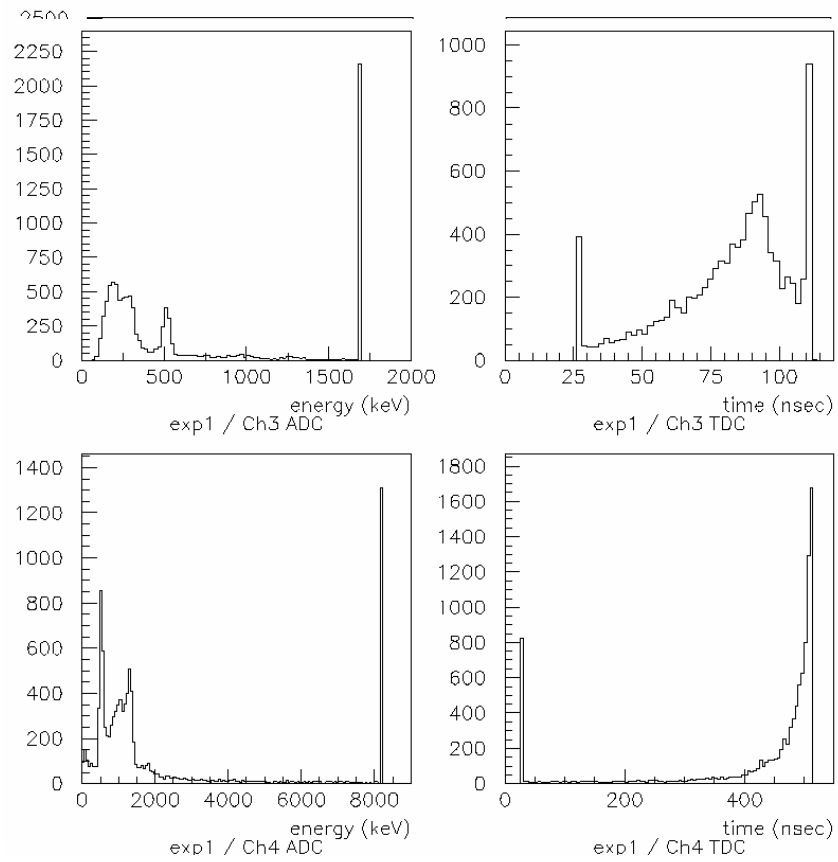


図 3-3-1 : 実験 1 各 Ch.の生データ

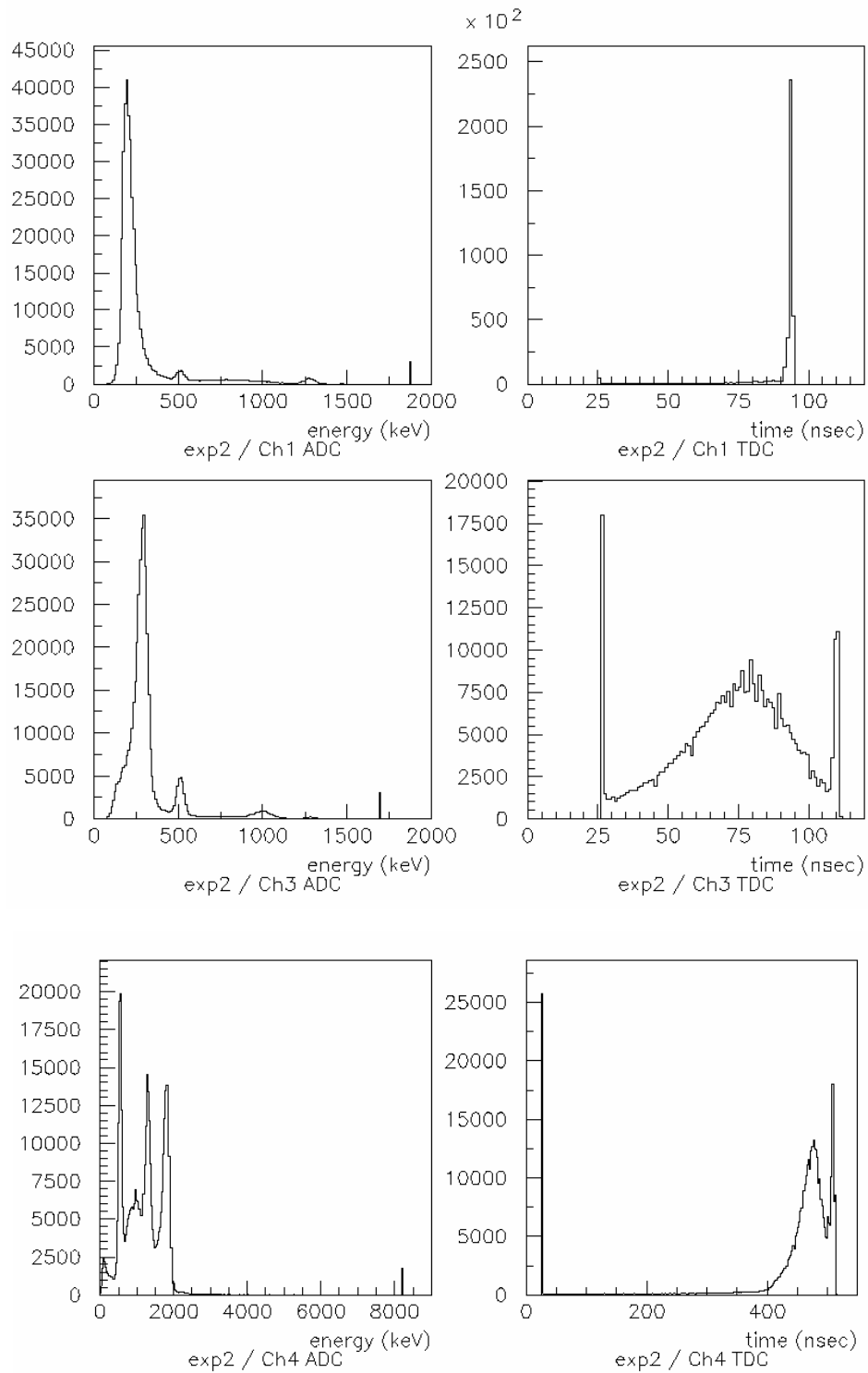


図 3-3-2 : 実験 2 各 Ch.の生データ

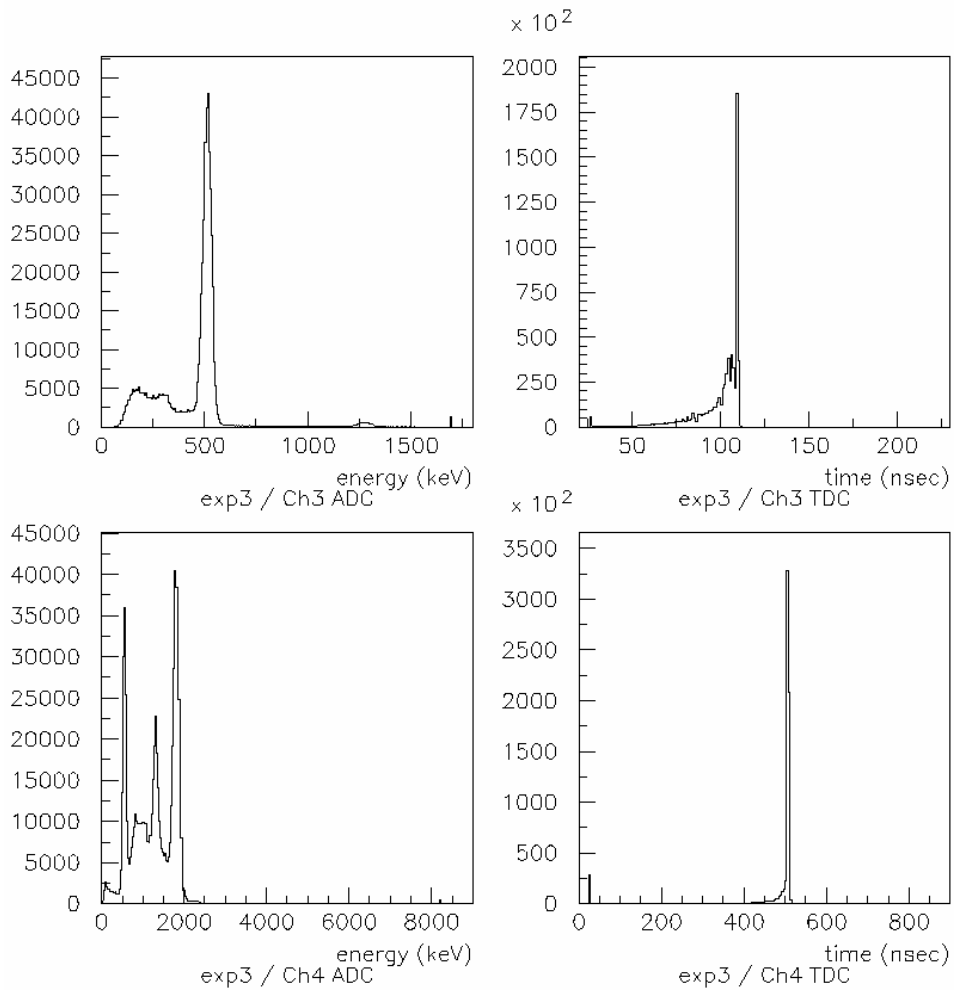


図 3-3-3 : 実験 3 各 Ch.の生データ

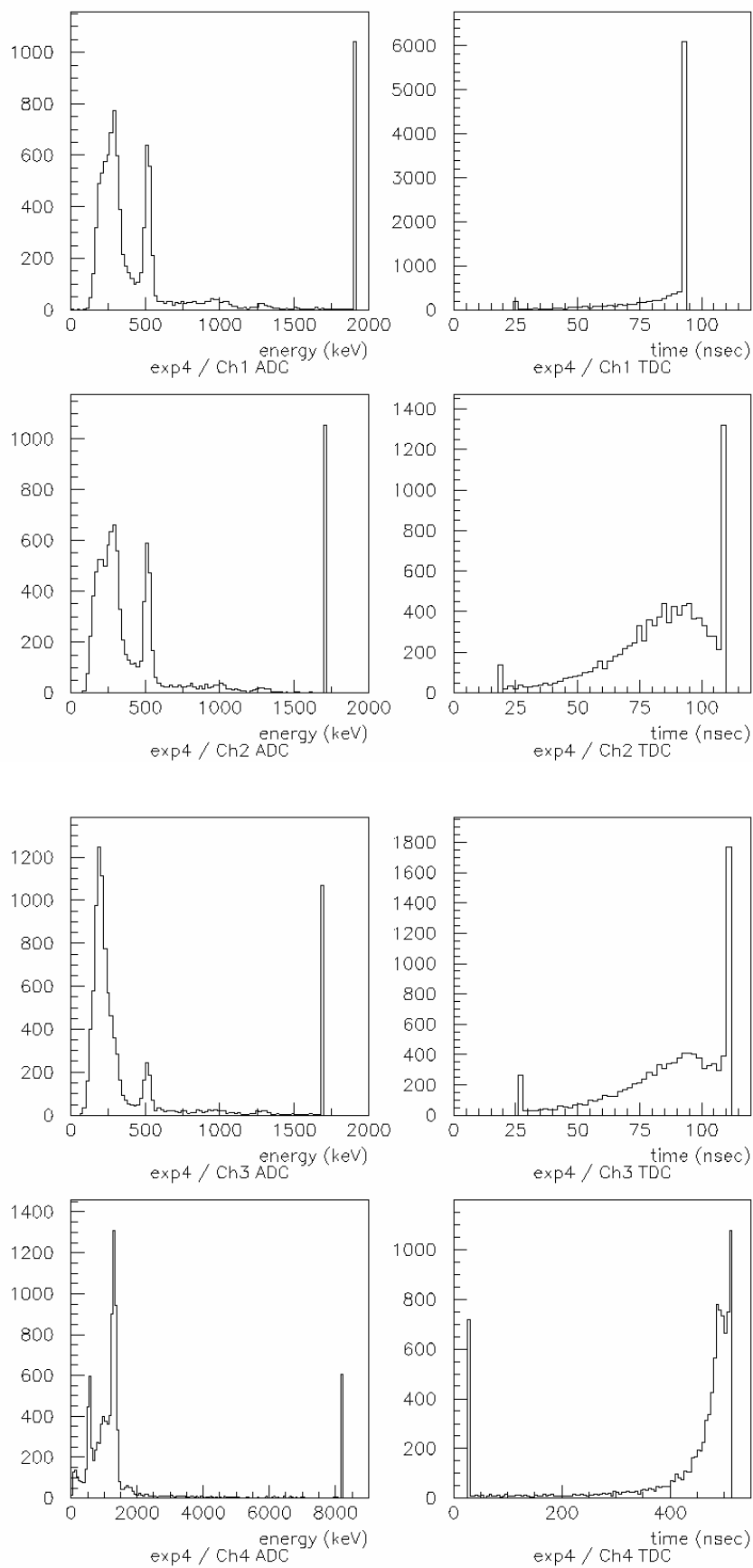


図 3-3-4 : 実験 4 各 Ch.の生データ

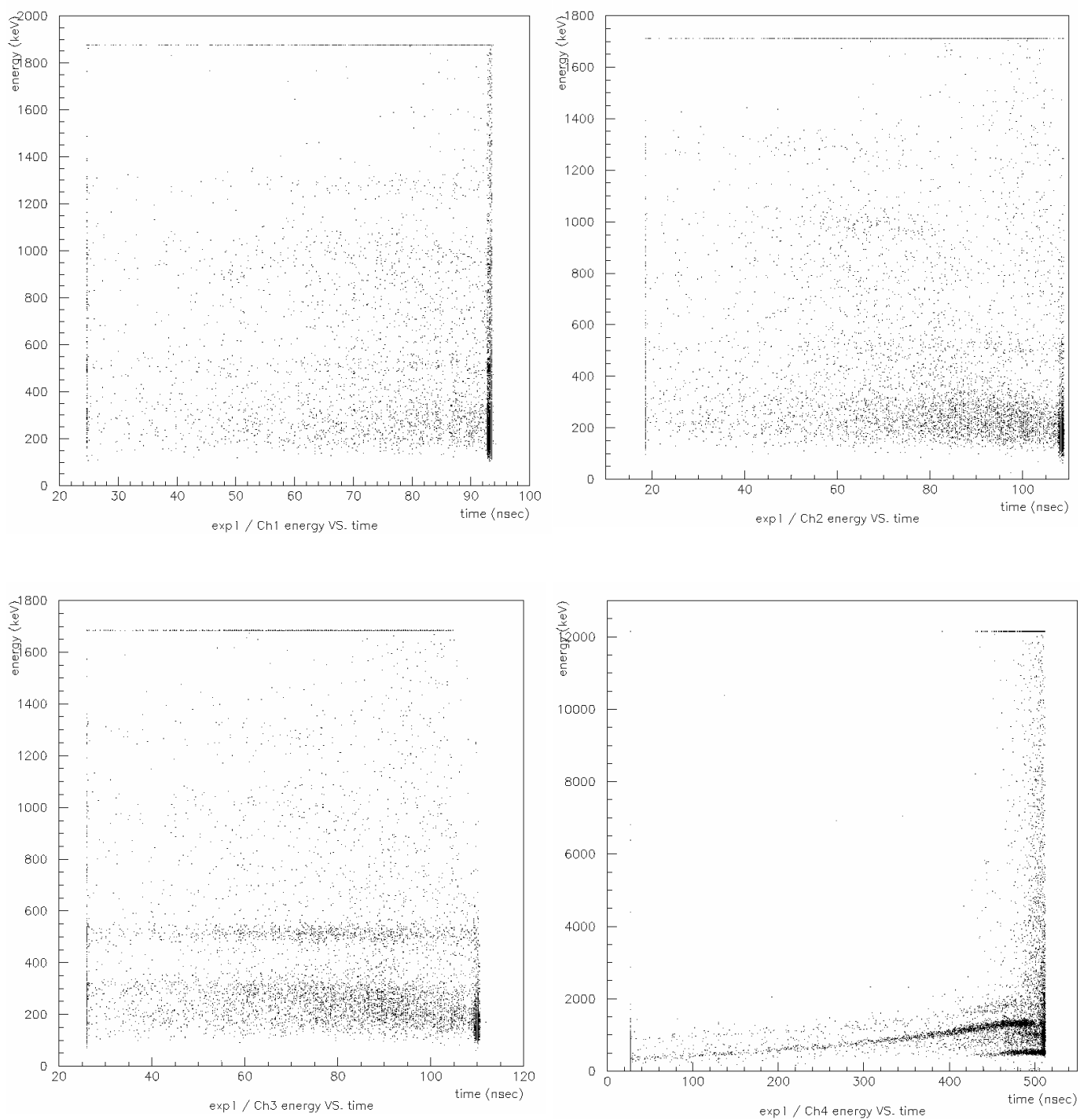


図 3-3-5 : 実験 1 各 Ch.の時刻-energy グラフ

### 3.4 解析：3 $\gamma$ event の抽出方法

実験で得られたデータの中には  $\alpha$ -Ps の 3  $\gamma$  崩壊によるもの以外に、back ground や p-Ps の 2  $\gamma$  崩壊によるものが混ざっている。3  $\gamma$  崩壊によるデータだけを抽出するために、以下の条件(1)~(5)を満たすデータのみを採用した。

- (1) Ch.1, 2, 3 で観測された  $\gamma$  線の energy が 480keV 以下：

3  $\gamma$  崩壊により発生する  $\gamma$  線の energy は 511keV 以下である。この cut により 2  $\gamma$  崩壊由来の  $\gamma$  線を多く含む 511keV の光電ピークが切り捨てられる。

- (2) Ch.1 の時刻>90nsec: ピークに含まれるデータのみを採用する

- (3) Ch.4 の時刻>30nsec: pedestal を切り落とす

この二つの cut により、BGO の方が先に、NaI の方が後に鳴り、かつその両者の時間差がきちんと計れているデータだけを採用できる。

- (4) Ch.2, 3 の時刻が 30nsec 以上 105nsec 以下: pedestal 及び 105nsec 以降に立っているピークを切り落とす

3つの NaI がほぼ同時刻に鳴ったときのデータだけを採用する。

- (5) Ch.4 で 1275keV の  $\gamma$  線が観測される

Ch.4 の 1275keV ピークは、図 3-3-5 の Ch.4 のグラフに見られるように、時刻に沿って指数的に増加している。これは、Ch.4 から ADC に信号を送るケーブルにかける Delay が不十分だったために、Ch.4 からの信号パルスが ADC の観測時間から外れてしまっていたためであると考えられる。

Ch.4 の energy-時刻グラフから、cut をかけるための条件式を

$$2.4 < \log_{10}(\text{energy [keV]}) - (\text{時刻 [nsec]})/800 < 2.65$$

と求めた。この cut をかける前後の Ch.4 のグラフを図 3-4-1、3-4-2 に示す。

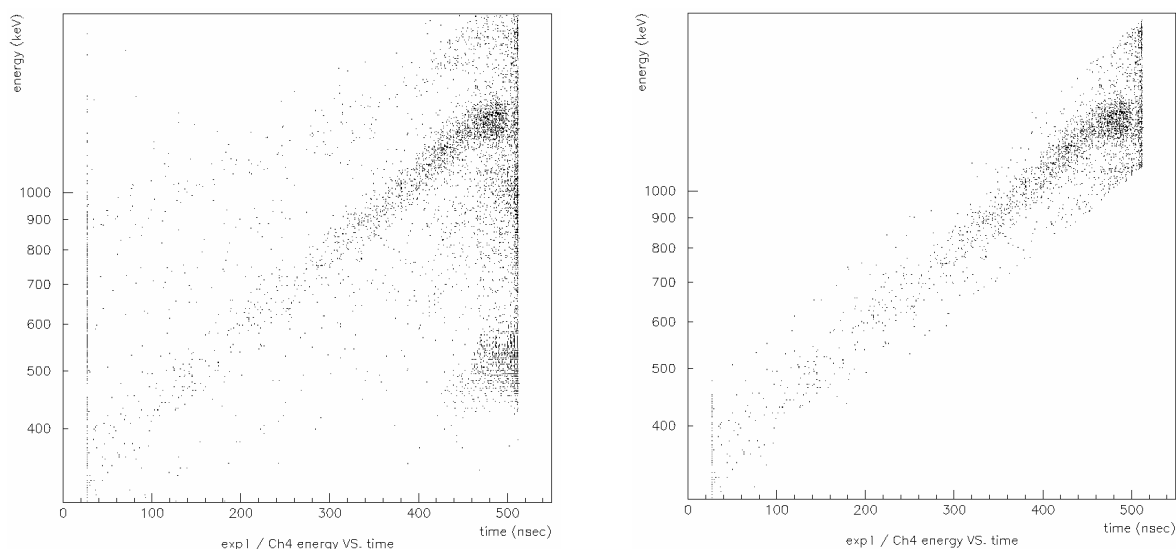


図 3-4-1：実験 1 Ch.4 の時刻-energy グラフ。左：生データ、右：cut 後。  
縦軸は対数目盛となっている。

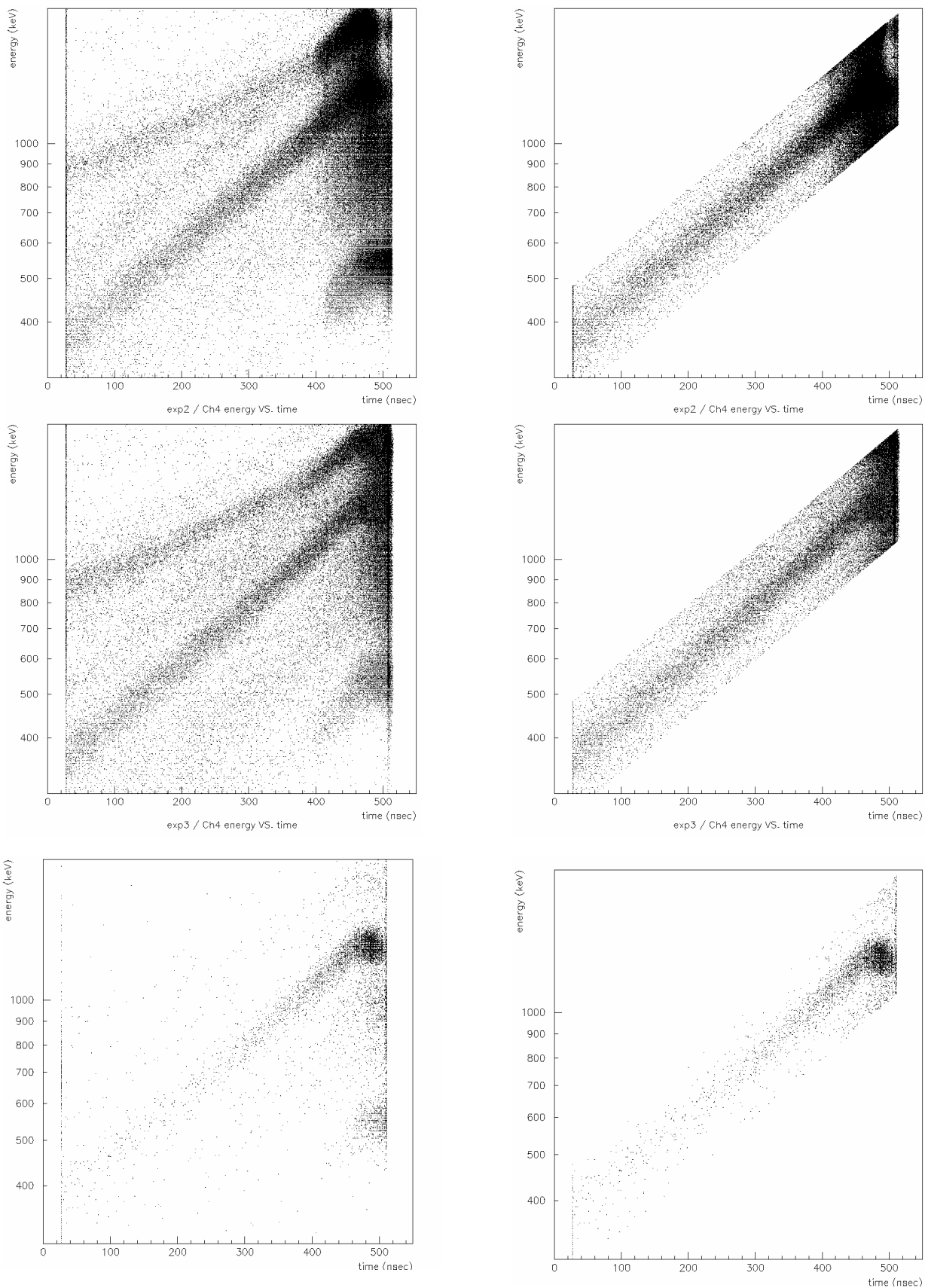


図 3-4-2 : Ch.4 の時刻-energy グラフ。左 : 生データ、右 : cut 後。  
 上から順に実験 2, 3, 4 のグラフである。  
 縦軸は対数目盛となっている。



### 3.5 解析結果

#### (i) データ収集について

各実験について event rate (Scaler で計った Coincidence 作動頻度)、データ収集の速さ、全データ数、3.4 の条件を満たすデータの数を表 3-5-1 にまとめて示す。

同じ Ch.にたいして coincidence をとった実験 1 と 4 で event rate が異なるのは、エアロジェルの位置が両実験の間で異なる (実験 1 では下の位置、4 では上の位置) ことによると考えられる。

event rate とデータ収集の速さが実験 3 で異なっているのは、event rate が大きすぎるために、コンピュータのデータ収集が追いつかなかったためである。

	event rate	データ収集の速さ	条件を満たすデータ数/全データ数 (割合)
実験 1 (Ch.1,2,3,4)	0. 05 h z	0. 05 h z	1, 189 / 10, 000 (11.9%)
実験 2 (Ch.1,2,4)	2. 7 h z	2. 7 h z	116, 995 / 400, 000 (29.2%)
実験 3 (Ch.3,4)	98 h z	24 h z	118, 396 / 700, 000 (16.9%)
実験 4 (Ch.1,2,3,4)	0. 11 h z	0. 11 h z	1, 600 / 10, 000 (16.0%)

表 3-5-1 : event rate、データ収集の速さ、4 の条件を満たすデータの数/全データ数

#### (ii) o-Ps の寿命測定結果

4 に述べた条件を満たすデータだけを用いて、o-Ps の崩壊曲線を作成した。これを図 3-5-1~3-5-4 に示す。

各実験より得られた o-Ps の寿命  $\Delta t$  のグラフを、関数

$$f(t) = \exp(C_1 + \Gamma \times \Delta t) + C_2 \quad (C_1, C_2, \Gamma \text{ は定数})$$

で fit し、崩壊定数  $\Gamma$ 、バックグラウンド  $C_2$  と各々の標準偏差を求めた。

なおこの  $\Gamma$  は、fitting を行う時間範囲によって変化する。そこで、いくつかの異なる時間範囲について fitting を行った。以下にその結果として  $\Gamma$ 、 $C_2$ 、1 自由度あたりの  $\chi^2$  を表 3-5-2~3-5-5 に示す。

各グラフには、2  $\gamma$  崩壊や pick-off 消滅に対応するピークが 0nsec の位置に立ち、それに引き続いて、時刻に従って指数的に減少する回数の 3  $\gamma$  崩壊を表す直線が現れるはずである。

どの実験についても、大体その予想通りの形を持つグラフが得られた。とくに実験 2 のグラフには 0nsec のピーク及び引き続く直線部が顕著に現れている。各グラフで直線部が曲がっているのは back ground のためであると考えられる。

崩壊定数  $\Gamma$  についてだが、データ数が 1000 個程度と少ない実験 1, 4 では、統計誤差

が50%程度と非常に大きくなっている。

実験2では統計誤差15%程度と、比較的精度良く求められている。各 fitting 範囲に対する $\Gamma$ の値のグラフを図3-5-5に示す。この fitting 結果を標準偏差 $\sigma$ で重み付けして定数で fit した結果、 $\Gamma = 1.45 \times 10^{-2}$ となった。また $\sigma$ の平均値は $0.22 \times 10^{-22}$ であった。この値から o-Ps の平均寿命 $\tau$ を求めると

$$\tau = 69 \pm 11 \text{ nsec}$$

となる。

実験3では、fitting 範囲を変えると $\Gamma$ の値が統計誤差を越えて変化してしまう。これはデータから2 $\gamma$ 崩壊のデータ及びバックグラウンドを除去しきれなかったために、減衰速度の異なる複数の成分がグラフに現れているためであると思われる。

ところで、実験1,2,4のグラフには o-Ps の寿命 $\Delta t$ の値が負であるデータがいくらか見られる。一方で実験3ではそのようなデータはほとんど存在しない。このことから、 $\Delta t$ の値は各実験で正しく求められており、グラフの横軸は o-Ps の寿命を正しく表示していると考えられる。 $\Delta t$ の値が負であるデータは、ノイズで Ch.1~3 の NaI が Ch.4 の BGO よりも先に鳴ってしまったときのデータが、除去しきれずに残ったものであると考えられる。

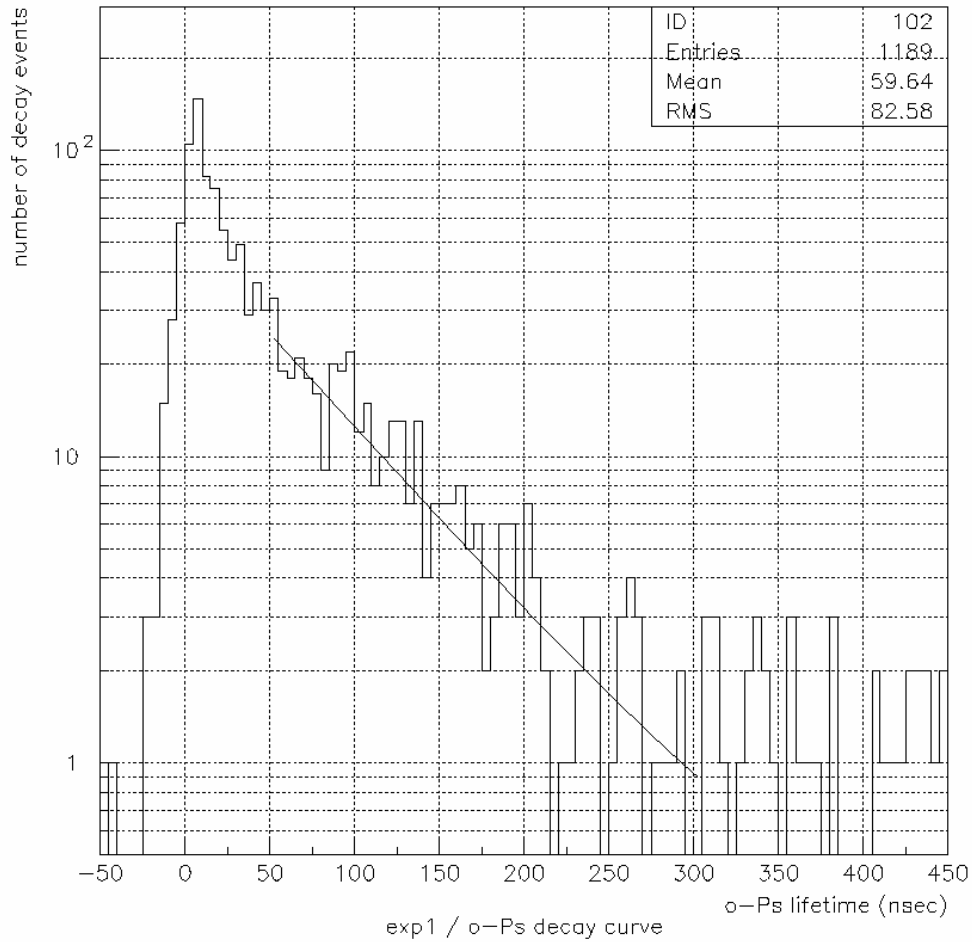


図 3-5-1： 実験 1 o-Ps の崩壊曲線。縦軸は対数目盛である。  
 グラフ中の実線は範囲 50~300nsec の fitting 結果を表す。

開始時刻(nsec)	終了時刻(nsec)	150	200	250	300
50	$\Gamma(\times 10^{-2} n \text{ sec}^{-1})$	$0.91 \pm 0.59$	$1.32 \pm 0.76$	$1.18 \pm 0.54$	$1.41 \pm 0.69$
	$C_2$	$-5.3 \pm 8.6$	$0.0 \pm 4.4$	$-1.3 \pm 3.0$	$0.2 \pm 2.0$
	$\chi^2$	1.36	1.18	1.04	0.984
100	$\Gamma(\times 10^{-2} n \text{ sec}^{-1})$	$0.59 \pm 0.41$	$2.1 \pm 1.3$	$1.33 \pm 0.65$	$1.74 \pm 0.89$
	$C_2$	$-13.9 \pm 5.1$	$2.2 \pm 2.2$	$-0.74 \pm 2.1$	$0.7 \pm 1.2$
	$\chi^2$	1.12	0.968	0.841	0.797

表 3-5-2： 実験 1 各 fitting 範囲に対する  $\Gamma \pm \sigma, C_2 \pm \sigma, \chi^2$

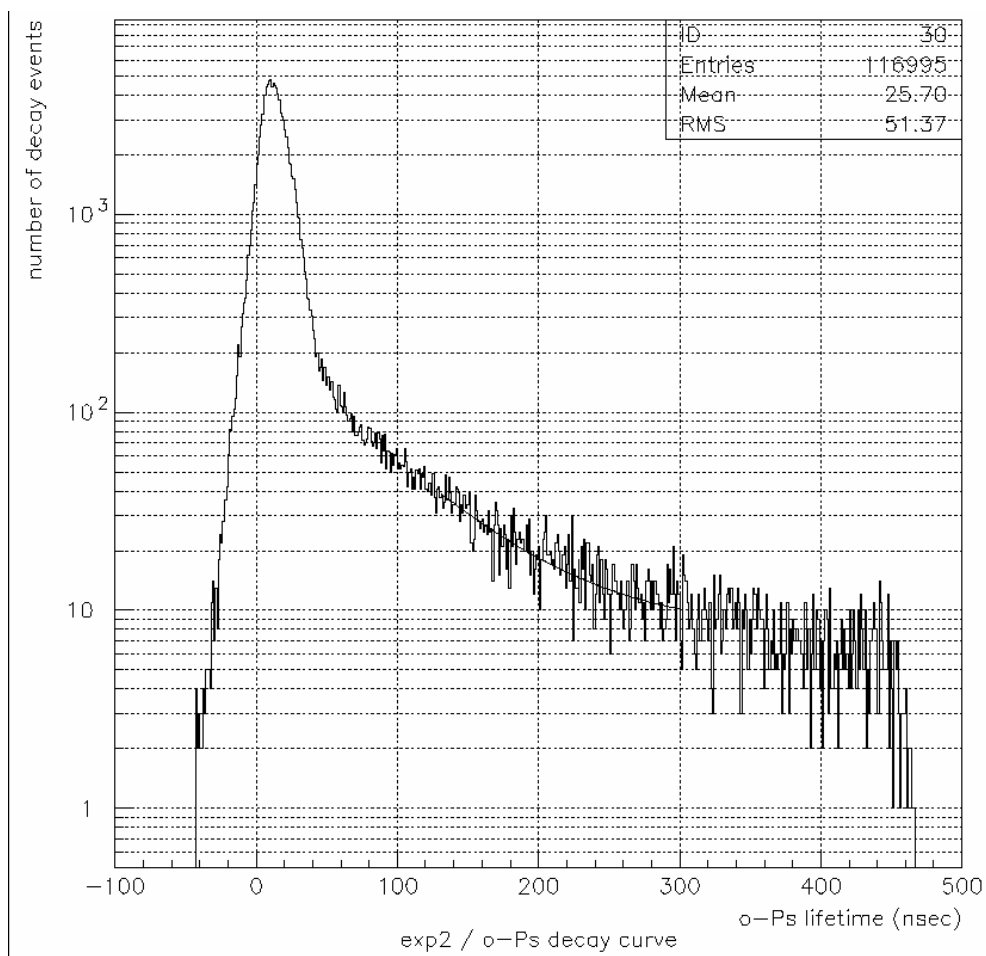


図 3-5-2 : 実験 2 o-Ps の崩壊曲線

グラフ中の実線は範囲 130~300nsec の fitting 結果を表す。

開始時刻(nsec)	終了時刻(nsec)	200	250	300	350	400
80	$\Gamma(\times 10^{-2} nsec^{-1})$	$1.53 \pm 0.22$	$1.54 \pm 0.20$	$1.54 \pm 0.20$	$1.44 \pm 0.18$	$1.35 \pm 0.17$
	$C_2$	$7.3 \pm 3.3$	$7.9 \pm 2.2$	$7.9 \pm 1.6$	$6.6 \pm 1.2$	$5.58 \pm 0.99$
	$\chi^2$	0.959	1.16	1.08	1.15	1.15
130	$\Gamma(\times 10^{-2} nsec^{-1})$	$2.16 \pm 0.37$	$1.58 \pm 0.26$	$1.59 \pm 0.24$	$1.35 \pm 0.20$	$1.19 \pm 0.17$
	$C_2$	$11.9 \pm 2.1$	$8.1 \pm 1.7$	$8.1 \pm 1.2$	$6.1 \pm 1.1$	$4.9 \pm 1.0$
	$\chi^2$	1.16	1.36	1.21	1.25	1.23

表 3-5-3 : 実験 2 各 fitting 範囲に対する  $\Gamma \pm \sigma, C_2 \pm \sigma, \chi^2$

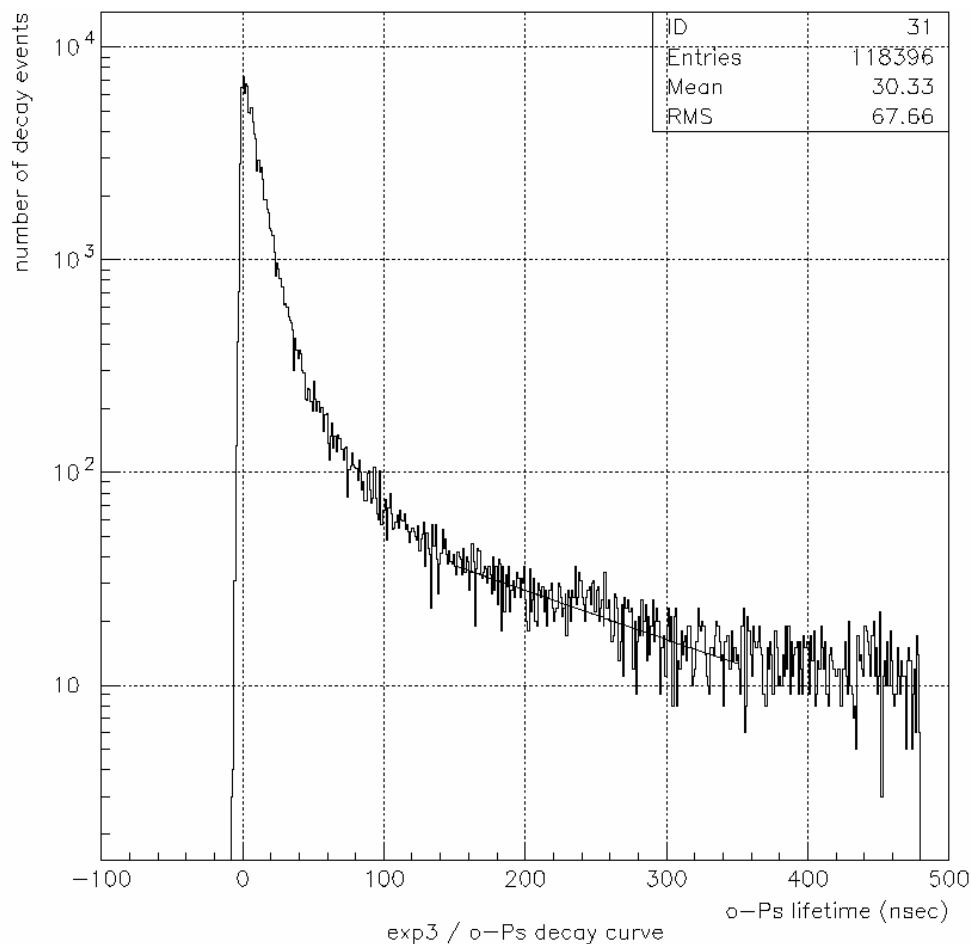


図 3-5-3 : 実験 3 o-Ps の崩壊曲線

グラフ中の実線は範囲 150~350nsec の fitting 結果を表す。

開始時刻(nsec)	終了時刻(nsec)	250	300	350	400
100	$\Gamma(\times 10^{-2} nsec^{-1})$	$2.22 \pm 0.37$	$1.37 \pm 0.22$	$1.10 \pm 0.17$	$1.08 \pm 0.16$
	$C_2$	$22.5 \pm 1.6$	$14.7 \pm 2.0$	$10.6 \pm 1.8$	$10.3 \pm 1.5$
	$\chi^2$	1.14	1.30	1.28	1.27
150	$\Gamma(\times 10^{-2} nsec^{-1})$	$0.35 \pm 0.82$	$0.34 \pm 0.67$	$0.55 \pm 0.13$	$0.80 \pm 0.14$
	$C_2$	$24.1 \pm 0.95$	$-14.0 \pm 3.15$	$0.7 \pm 4.8$	$7.6 \pm 1.7$
	$\chi^2$	1.03	1.22	1.20	1.21

表 3-5-4 : 実験 3 各 fitting 範囲に対する  $\Gamma \pm \sigma, C_2 \pm \sigma, \chi^2$

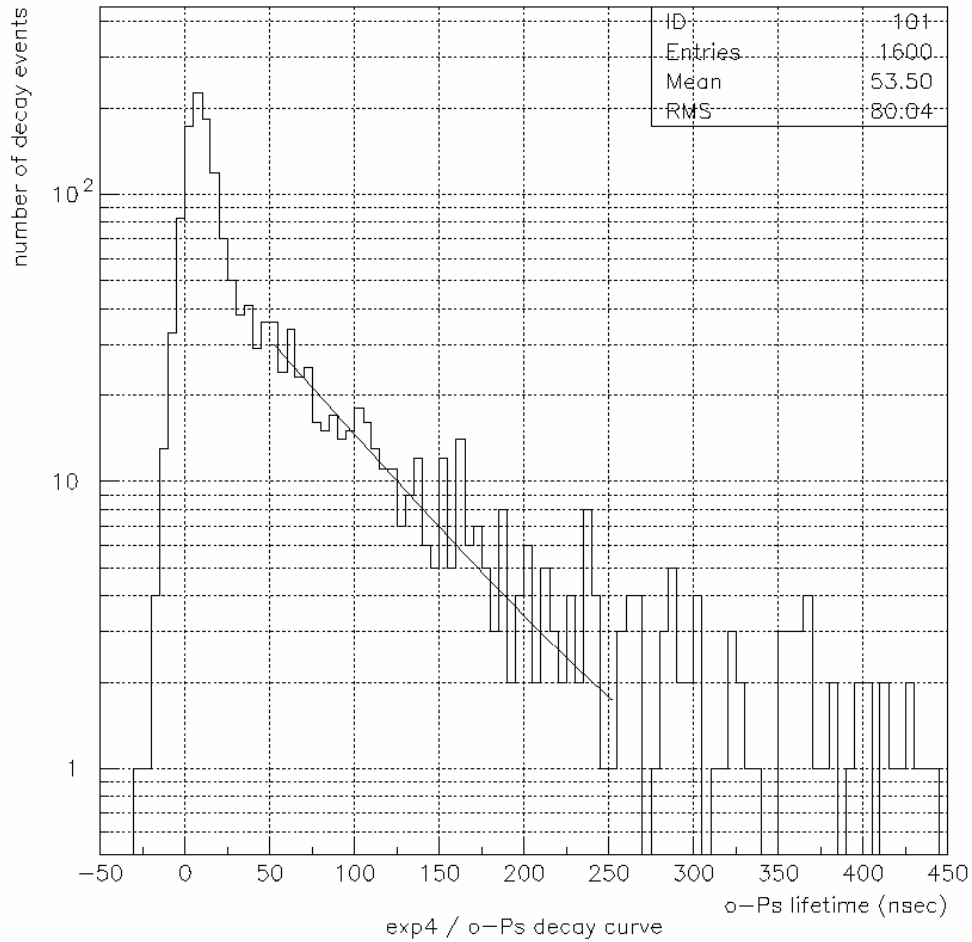


図 3-5-4： 実験 4 o-Ps の崩壊曲線

グラフ中の実線は範囲 50~250nsec の fitting 結果を表す。

開始時刻(nsec)	終了時刻(nsec)	150	200	250	300
50	$\Gamma(\times 10^{-2} n \text{ sec}^{-1})$	$2.2 \pm 1.3$	$1.76 \pm 0.91$	$1.54 \pm 0.70$	$1.78 \pm 0.85$
	$C_2$	$3.9 \pm 5.1$	$1.6 \pm 3.6$	$0.36 \pm 2.48$	$1.46 \pm 1.64$
	$\chi^2$	0.764	0.897	0.905	0.896
100	$\Gamma(\times 10^{-2} n \text{ sec}^{-1})$	$6.5 \pm 2.8$	$2.8 \pm 1.4$	$1.68 \pm 0.79$	$2.3 \pm 1.1$
	$C_2$	$6.6 \pm 1.6$	$3.1 \pm 1.7$	$0.5 \pm 1.7$	$1.8 \pm 0.9$
	$\chi^2$	0.704	0.988	0.975	0.932

表 3-5-4： 実験 4 各 fitting 範囲に対する  $\Gamma \pm \sigma, C_2 \pm \sigma, \chi^2$

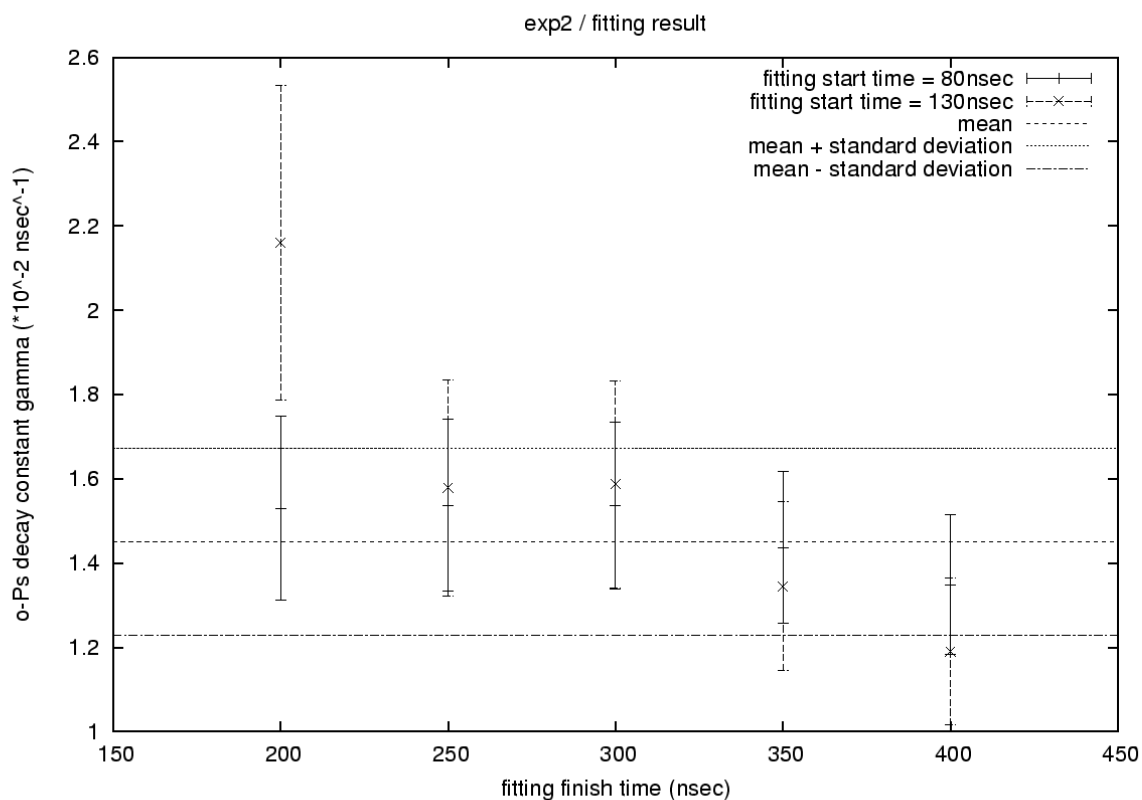


図 3-5-5 : 実験 2 fitting 結果。縦軸は o-Ps の崩壊定数  $\Gamma$ 、横軸は fitting の終了時刻である。二種類の各データ点はそれぞれ fitting 開始時刻が 80nsec, 130nsec のときに得られた  $\Gamma$  の値及びその標準偏差  $\sigma$  を表す。グラフ中の点線はこの fitting 結果を標準偏差  $\sigma$  で重み付けして定数で fit した結果  $\Gamma = 1.45 \times 10^{-2}$  を表す。その上下の平行線は、その  $\Gamma$  の値から  $\sigma$  の平均値  $0.22 \times 10^{-22}$  だけ離れた値を表す。

(iii) 3つの $\gamma$ 線のエネルギーの和

Ch.1,2,3 で同時に観測された $\gamma$ 線の energy の和のグラフを、実験1と4のデータについて、生データ及び3.4の条件を満たすデータ各々から作成し、図3-5-6, 3-5-7に示す。

実験1, 4のどちらから得られたグラフにも、1022keVのピークは現れなかった。

生データに見られる1022keVピークについてだが、このピークを構成するデータの約65%が、Ch.1とCh.2のどちらかで511keVの、Ch.1~3のうち残りの2Ch.に合計で511keVのenergy入射が起こったものであることが分かった。このことから、この1022keVピークは基本的には2 $\gamma$ 崩壊に由来するものであって、Ch.1とCh.2に入射した2つの $\gamma$ 光子がコンプトン散乱によってCh.3でも観測されたものと分かる。

本実験で、3 $\gamma$ 事象について1022keVピークが得られなかった原因は不明である。観測の過程で $\gamma$ 線のenergyの一部が失われるようなことは起きていないか、またほかのenergy測定実験の際に得られたデータに異常は見られないか調べてみたが、特に何も見つけることができなかった。また得られたデータ数が1000events分程度と非常に少なく、詳細なことを調べづらかった。

もしこの解析結果が正しければ、実験1及び4では3 $\gamma$ 崩壊事象が正しく観測できていなかったことになる。このことの真偽の判定を行うためには、実験1及び4をより長時間にわたって行い、多くのデータを集積する必要があると思われる。



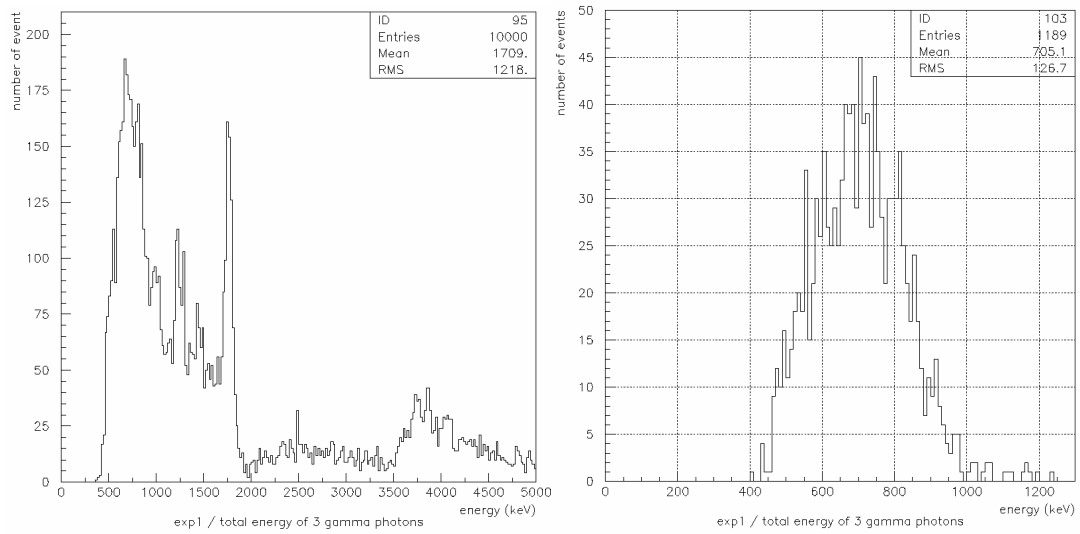


図 3-5-6： 実験 1 Ch.1,2,3 で同時に観測された  $\gamma$  線の energy の和の spectrum.  
 左が生データ、右は cut 後のデータのもの。

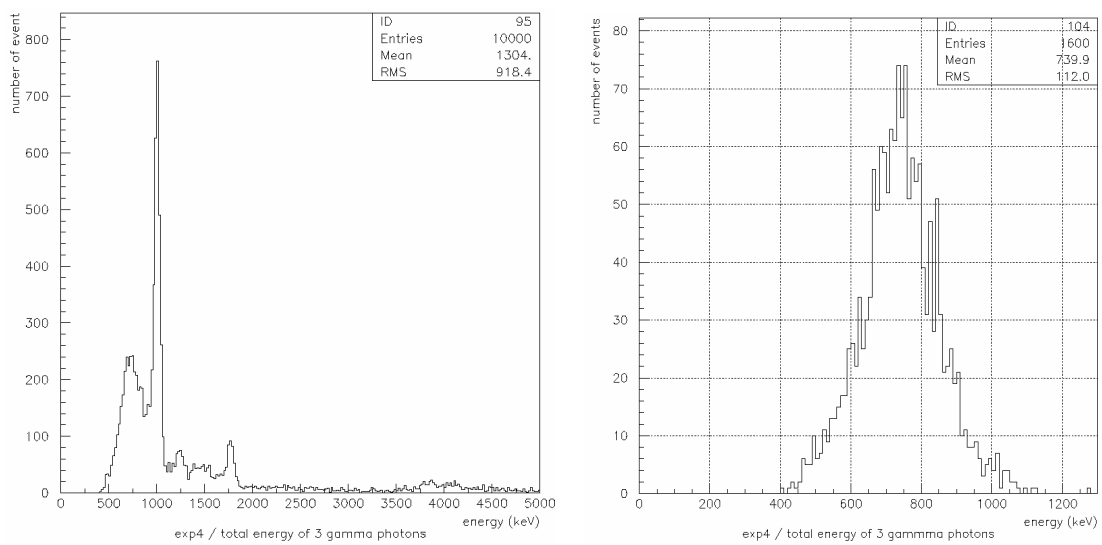


図 3-5-6： 実験 4 Ch.1,2,3 で同時に観測された  $\gamma$  線の energy の和の spectrum.  
 左が生データ、右は cut 後のデータのもの。

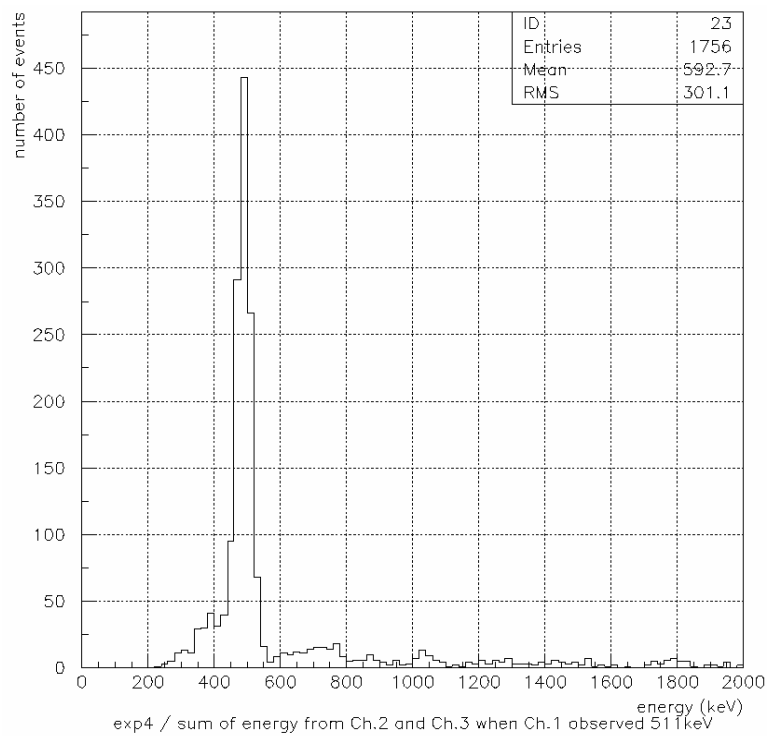


図 3-5-7 : Ch.1 で 511keV の  $\gamma$  線が観測されるのと同時に Ch.2 及び 3 で観測された  $\gamma$  線の energy の和の spectrum. 511keV にピークがあるのがわかる。

(iv) 各実験の効率の比較

3 $\gamma$ 崩壊事象のデータ収集の速さは、表 3-5-1 において

$$(\text{データ収集の早さ}) \times (3\gamma \text{ 事象の割合}) \quad [\text{hz}]$$

として求められる。表 3-5-5 にその値をまとめる。

	3 $\gamma$ 崩壊事象のデータ収集の速さ
実験 1	0.006 hz
実験 2	0.79 hz
実験 3	4.1 hz
実験 4	0.018 hz

表 3-5-5: 3 $\gamma$ 崩壊事象のデータ収集の速さ

表 3-5-5 より、3.4 の条件 (3 $\gamma$ 事象を抽出するための条件) を最も速く集められるのは実験 3 であることが分かる。しかし(ii)で解析した通り、実験 3 のデータには 2 $\gamma$ 崩壊由来のデータや back ground が除去できない形で混ざってしまうため、o-Ps の寿命測定のための実験としては不適當である。

次に速くデータ収集が出来る実験 2 では、ノイズも比較的少なくきれいな解析結果を得ることが出来た。このことから o-Ps の寿命測定の実験としてはこの実験 2 が最適であると考えられる。

実験 1 と 4 は、実験 2 の 1/50~1/100 の速さでしかデータ収集ができず、大量のデータ集積が困難である点で実験 2 に劣る。しかし o-Ps 崩壊で発生する 3 つ全ての $\gamma$ 線の energy を測定することが出来るという利点があり、その点においては有用と言える。

ここで表 3-5-1 を見ると、エアロジェルの配置が異なる実験 1 と実験 4 とで、全データに対する 3 $\gamma$ 事象のデータの割合は実験 4 のほうが少し多いことが分かる。これは、エアロジェルを下の位置に置いた実験 1 では、2 $\gamma$ 崩壊事象のデータ収集が抑制されるのと同時に 3 $\gamma$ 崩壊事象のそれも同程度に抑制されてしまっていたからであると考えられる。このことから、3 つ全ての $\gamma$ 線について測定を行う実験としては実験 4 のほうが優れていると考えられる。

### 3.6 課題と反省

まず実験精度を高めるための改善点を挙げる。

- ・ 時間がかかりデータ数の集めづらい Ch.1, 2, 3, 4 coincidence の実験にもっと時間を割くべきである。全体的に集めるデータが少なすぎて、統計誤差を抑えることが出来なかった。
- ・ TDC の systematic error をもっと丁寧に調べるべきである。
- ・ Ch.4 の energy 測定を正確に行う必要がある。これは Ch.4 からの信号にもっと Delay をかけて ADC に入射させることで可能になる。Ch.4 で energy の測定値が時刻依存してしまっているのは、こちらが意図していなかったことであり実験ミスである。このことに気づいたのが4月に入ってからであったため、データ解析にかなりの遅れが出ってしまった。きちんと energy 測定を行えていたとすれば、1275keV  $\gamma$  事象を取り出すための cut をより正確にかけられたはずである。また、このことが実験結果にどれだけ影響しているかは不明である。

その他の反省点を以下に挙げる。

- ・ 初期の実験では、実験を行う際の室温に気を配っていなかった。しかし、実験が冬の寒い時期であったこともあって、暖房をかけた状態とかけない状態では室温に相当の差があった。実験結果がこのことに相当の影響を受けていたようで、実際に暖房をかけたときとかけなかったときで energy 測定値が最大7%くらいずれていたことがあった。このため相当の時間を使って集めた初期の実験データを破棄せざるを得なかった。
- ・ 実験を行うたびにエアロジェルがどんどん壊れていってしまっていた。実験結果への影響は不明である。エアロジェルを取り扱うのは初めてのことであったとはいえ、もっと初期から扱いに気を付けるべきだった。
- ・ 3 $\gamma$ 崩壊で発生した $\gamma$ 線の energy の和の spectrum に 1022keV ピークが立たなかった理由は、結局原因不明のままであった。このことが分かったのも4月に入ってからであったため、追加実験を行うなどの対処ができなかった。時間がもっとあればデータ数をためて調べなおしたいところであった。
- ・ 最終的には真空中での o-Ps の寿命測定へとつなげたい。これを今回と類似の実験装置で行うならば、target であるエアロジェルの密度を変化させて実験を行うのが適当であろう。ところで、エアロジェルを target として本実験と類似の実験装置で o-Ps の寿命測定を行った 2003 年度 P1 の報告によると、エアロジェルの密度を二倍程度変化させても o-Ps の寿命の測定値には有意な変化が現れなかったそうである。もしエアロジェルの密度を変化させる実験を行うならば、この報告を参考にして密度を適切に選ぶ必要があると思われる。

## 4. 結論

本実験の結論をまとめておく。

・  $^{22}\text{Na}$  を  $\beta^+$  線のソースとし、エアロジェル（密度約  $0.2\text{g}/\text{cm}^2$ ）を target にして o-Ps の平均寿命  $\tau$  を測定したところ

$$\tau = 69 \pm 11(\text{statistic error}) \pm 7(\text{systematic error}) \text{ nsec}$$

と求められた。

- ・ o-Ps の寿命を求めるためには、target に対して  $90^\circ$  程度の角度をおいて配置した二つの検出器（本実験の「実験 2」）で測定を行うのが効率が良い。
- ・ o-Ps から発生する 3 つの  $\gamma$  線全ての energy を測定する実験としては、本実験の「実験 4」のような、エアロジェルを 3 つの検出器の中央付近において実験を行うべきである。

## 参考文献

- [1] 加藤貞幸 『放射線計測』 新物理シリーズ 26 (培風館)
- [2] ニコラス・ツルファニデス 『放射線計測の理論と演習 上巻・下巻』 (現代工学社)
- [3] S. Asai, O. Jinnouchi and T. Kobayashi, Proceedings of positronium physics ETH (May 2003)