

オルソポジトロニウムの寿命測定

2008年度後期課題演習A1

川本 道久
中村 悠介
野村 紘一
比田勝 翔
平木 貴宏

2009年3月31日

目次

- 1 イントロダクション
 - 1-1 ポジトロニウムとは
 - 1-2 実験目的
 - 1-3 実験方法
- 2 実験の原理
 - 2-1 オルソポジトロニウムの生成と陽電子、 γ 線の検出方法
 - 2-1-1 装置とその配置図
 - 2-1-2 装置とそのセットアップ
 - 2-2 崩壊時間を測定するための回路
 - 2-2-1 装置とその設定、配置
 - 2-2-2 回路の動作、及び崩壊に要した時間の求め方
 - (1) ADC によるエネルギー測定
 - (2) TDC による時間測定
 - 2-3 実験装置の較正
 - 2-3-1 ADC のキャリブレーション
 - 2-3-2 TDC のキャリブレーション
 - 2-3-3 $t \cdot Q$ 補正
 - 2-4 寿命の求め方
- 3 測定データを用いた解析
 - 3-1 ADC の calibration
 - 3-2 TDC の calibration
 - 3-3 $T \cdot Q$ calibration
 - 3-4 本実験の解析
- 4 結論
- 5 誤差の評価
 - 5-1 統計誤差
 - 5-2 TQ 補正による誤差
 - 5-3 TQ 補正の誤差の伝搬
 - 5-4 TDC 校正からの誤差
 - 5-5 ADC:TDC カットの範囲による誤差
 - 5-6 Fitting の範囲による誤差
 - 5-7 まとめ

1 イントロダクション

ポジトロニウムとは

物質中でエネルギーを失った e^+ は十分低速で e^- に捕獲されて束縛状態を形成する。この e^+e^- の束縛状態が**ポジトロニウム**であり、気体や液体など電子の密度があまり大きくない物質中ではよくつくられる。

ポジトロニウムは水素原子とよく似た構造を持つが、最終的に e^+e^- の対消滅によって崩壊するという点が水素原子と大きく異なっている。

ポジトロニウムは一般にどのような物質に対しても形成されるわけではなく、金属など電子密度が非常に大きい物質中では形成されない。これは e^+ の周りに分極した e^- が集り、束縛状態を作るのに十分なクーロン力が得られないからである。

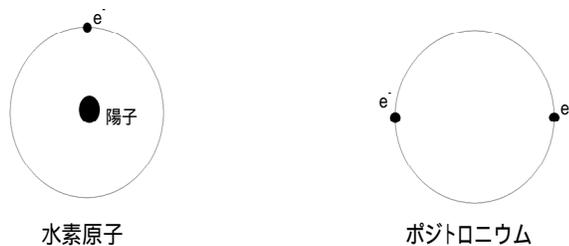


図1 水素原子とポジトロニウムの古典的モデル

形成されたポジトロニウムは不安定で短い時間で対消滅をする。このときポジトロニウムの持つスピンの状態によって選択則が働き、

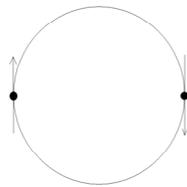
放出される光子の数の制限が付く。

ポジトロニウムの全角運動量は e^+ と e^- の持つスピンのヘリシティ（運動方向へのスピン成分）によって決められる。

したがってポジトロニウムは全スピン 0 を持つものと 1 を持つものに分けられる。

一方、光子はスピン 1 を持つが質量を持たないためにヘリシティが 1 か -1 しか取れず、0 の状態を取ることが出来ない。そのために次のような崩壊のモードが存在する。

・全スピン0[singlet(スピン対)]・・・パラポジトロニウム

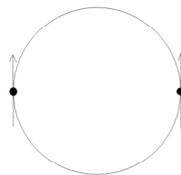


2 (偶数本)

ヘリシティを保存するためヘリシティ状態が 1 と -1 の光子が同数出て行く

図 2 パラポジトロニウムの崩壊

・全スピン1[triplet(スピン平行)]・・・オルソポジトロニウム



3 (奇数本)

ヘリシティ+1 の光子・・・偶(奇)数本に対し
ヘリシティ、- 1 の光子・・・奇(偶)数がでていく

図 3 オルソポジトロニウムの崩壊

発生する光子数が2つ増えると微細構造定(約 $1/137$)の2乗のオーダーで崩壊率が減少していく為、 p -Ps は大多数が2光子消滅、 o -Ps は大多数が3光子消滅することになる。

1.2 実験の目的

量子電磁力学(QED)は現在まで、幅広い範囲のエネルギースケールで精密実験が行われ、物理学の他の分野では類を見ないほどの高精度な理論であることがわかっている。そのため、QEDはすでに確立され、十分に検証されつくした理論であると考えられがちである。しかし実際には、束縛状態にある粒子系のQEDは理論的にも、実験的にも、十分な理解も検証も得られていない。

そこで本実験では、束縛系のQEDの検証を目指すことにし、直接測定が可能な数少ない例であるオルソポジトロニウムの寿命測定を行うこととした。オルソポジトロニウムは、理論的にも簡潔な束縛系で比較的扱いやすく、QEDの摂動計算により寿命の理論値は、最低次で139ns、2次補正までで142nsであることが分かっている。

よって、本実験の目的は、オルソポジトロニウムの寿命を測定し、理論値142nsと比較して束縛系QEDの検証を行うことである。

1.3 実験方法

Na22線源から放出される陽電子をシリカパウダーと反応させ、オルソポジトロニウムを生成させる。またこのとき、陽電子をプラスチックシンチレータに通して検出しておく。続いて、オルソポジトロニウムの崩壊によって生じた γ 線をNaIシンチレータで検出し、この二つの検出信号の時間差から崩壊に要した時間を求める。この崩壊時間のイベント数を多数集め、得られたヒストグラムを統計的に処理して、オルソポジトロニウムの寿命を求める。ただし、このままでは、測定された寿命は大気の影響を受けて、実際よりも短く評価されてしまう。そこで、さらに、気圧を変えて実験を繰り返し、得られた寿命を真空側へ外挿して、最終的に真空中におけるオルソポジトロニウムの寿命を求める。

2.実験の原理

2.1 オルソポジトロニウムの生成と

陽電子、線の検出方法

2.1.1 装置とその配置図

実験装置としては、以下のものを用いた。

また、配置図及びその様子を図2.2.1(A)に示す。

・Na22線源

崩壊によって陽電子を放出する。

本実験において、ポジトロニウムを生成するための陽電子の供給源として用いた。

また、崩壊によって生じた陽電子は運動エネルギーが0の場合、線源内の電子と対消滅を起こし、線を放出する。電子と陽電子の静止質量は511keV(自然単位)なので、対消滅の結果、511keVの線が2本放出される。この線は、本実験において、ADCのキャリブレーションに用いた。また、この線源は1274keVの線も放出するが、本実験には関係しない。

・Cs線源

622keVの線を放出する。

本実験において、ADCのキャリブレーションに用いた。

・シリカパウダー

二酸化ケイ素を細かく粉末状にしたもの。

粉末の密度は、大気の密度に比べて非常に小さい。

仕事関数が小さいため構成原子の電子がはがれやすく、陽電子と反応して比較的容易にポジトロニウムが生成される。

本実験においては、陽電子を減速させ、ポジトロニウムを生成させる目的で用いた。また、密度が小さいことから、シリカパウダー自身のポジトロニウムとの反応は考えなかった。ただし、二酸化ケイ素は水分を含みやすく、その水分子がポジトロニウムと反応する可能性があったので、実験前に加熱し水分をとばしておいた。

・プラスチックシンチレータ

荷電粒子が通過すると微弱な光を発する。

本実験において、Na22線源からの陽電子を検出するために用いた。

プラスチックシンチレータが発する光は微弱なために、その光を検出するのに感度のよい光電子増倍間が必要となる。また、外部からの光も十分に遮断する必要がある。

- ・ **光電子増倍管 (PMT)**

光を検出し、光電効果を利用し強度を増して信号を出力する。

本実験において、プラスチックシンチレータが発する微弱な光を検出するために用いた。

光に敏感なため、外部からの光を完全に遮断しなければ壊れる。

- ・ **NaI シンチレータ**

光電子増倍管があらかじめ取り付けられていて、 γ 線を検出し信号を出力する。

検出された γ 線に対して、出力されるアナログ信号の波高は、非常によく制度で線形に対応する。

本実験では、ポジトロニウムの崩壊によって放出された γ 線の検出に用いた。

- ・ **Negative high voltage**

光電子増倍管に電圧をかける。設定については回路の項で述べる。

- ・ **コリメータ**

円柱形に加工された銅の塊で、中心部も円柱状にくりぬかれている。

本実験では、Na22 線源からの γ 線で直接 NaI シンチレータにはいるものの数を減らす目的で用いた。

- ・ **真空容器**

密閉することが可能な容器で、内部の気圧を一定に保つことが出来る。

本実験では、気圧を変えて実験を繰り返す目的で用いた。

実験の最中、真空容器の空気漏れ等は確認されなかった。

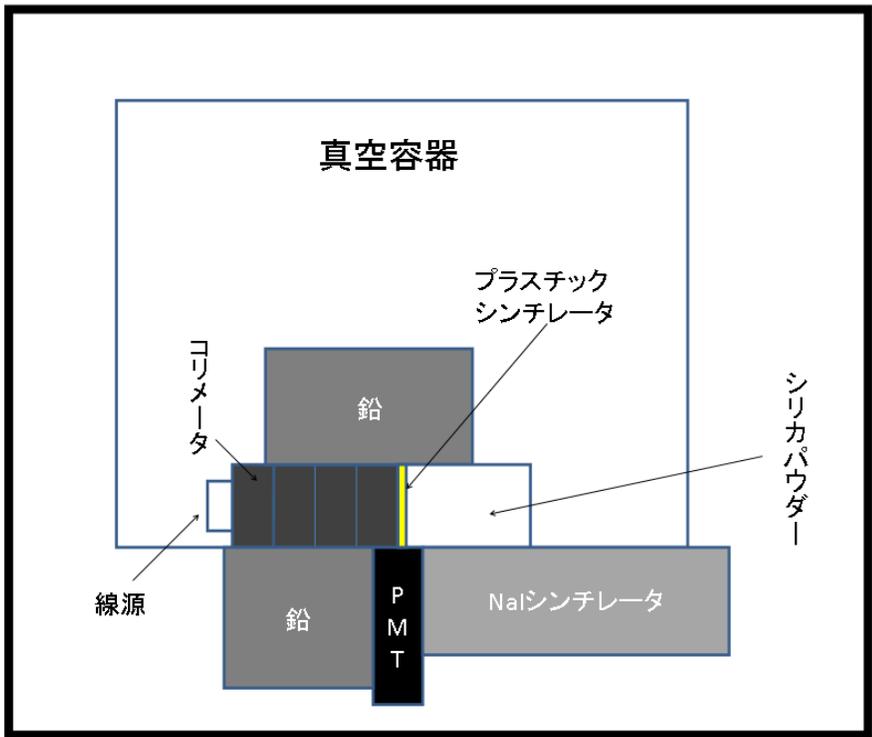
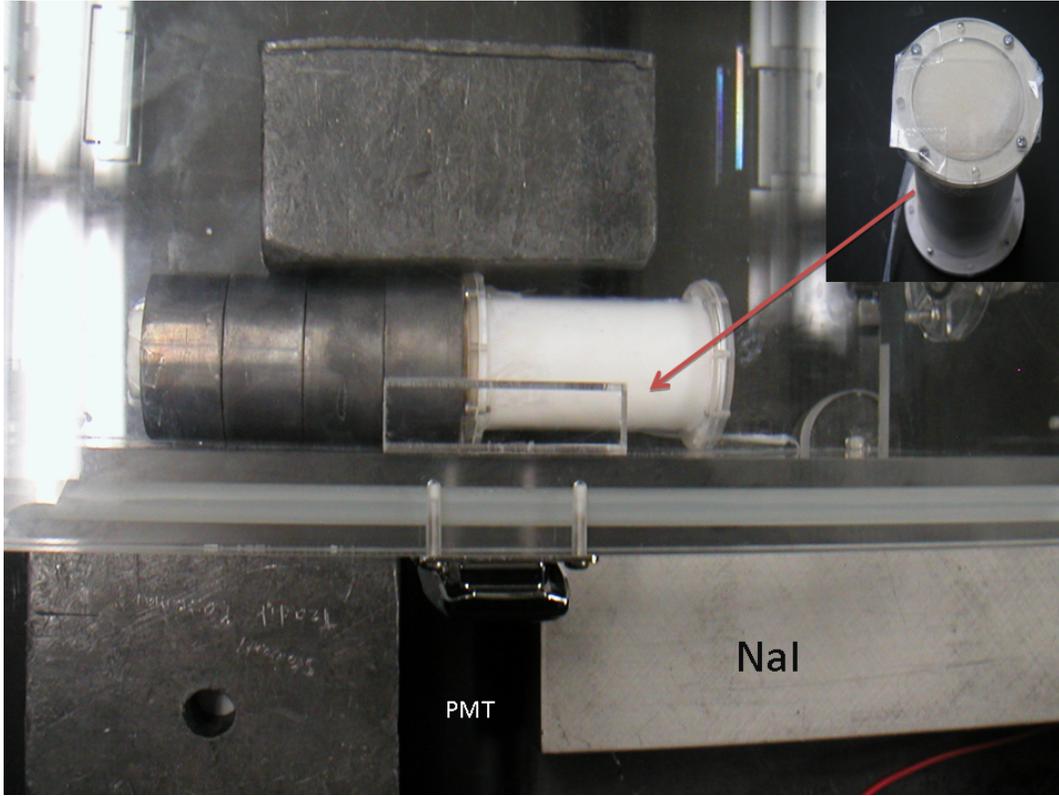
- ・ **真空ポンプ**

真空容器内の空気を抜くのに用いた。

- ・ **暗箱、黒布、カーテン**

外部の光を遮断する目的で用いた。

まず、実験装置全体を暗箱の中に入れ、さらに遮光性を上げるために、暗箱を黒布で覆いその上からカーテンをかけた。この様子を図 2 . 1 . 1 (B) に示す。



暗箱

図 2 . 1 - 1 (A)





図2.1.1(B)

一枚目の写真は、暗箱の蓋をしめた状態。
二枚目の写真は、その上に黒布をかぶせた状態。
三枚目は、さらにカーテンをかけた状態。

2.1.2 装置のセットアップとその動作

装置の配置図は図2.1.1(A)にすでに示している。ここでは、このように配置された装置がどのように働くか述べる。

本実験の目的は、オルソポジトロニウムの寿命を測定することであるため、まず、ポジトロニウムを構成するための陽電子を供給してやる必要がある。そのために、Na22線源から放出される陽電子を用いた。放出された陽電子は、コリメータによって方向を揃えられ、その中心部に円柱状にくりぬかれた穴に沿って進み、プラスチックシンチレータを通過してシリカパウダーの入った容器内に達する。プラスチックシンチレータは薄く作られているため、陽電子は容易に通過することができて、この瞬間にシンチレータは微弱な光を発する。この光を検出し、検出時刻をポジトロニウムの生成時刻と考えるが、発する光は非常に弱いので、プラスチックシンチレータのすぐ傍にPMTを配置し、実験装置全体を暗箱、黒布、カーテンによって十分に遮光した。

シリカパウダーに達した陽電子は、衝突によって減速し、電子に束縛されてポジトロニウムを形成する。シリカパウダーを用いた理由は、電子がはがれやすくポジトロニウムの生成が容易であることと、密度が小さいためにピックオフ反応(後述)等への寄与が非常に小さいためである。

シリカパウダー内で生成したポジトロニウムはやがて崩壊し線を放出する。この線を検出し、ポジトロニウムの崩壊時刻とするために、シリカパウダーの入った容器の横にNaIシンチレータを設置した。この時、Na22線源から直接NaIシンチレータに入射する

線が多数あると、測定の精度が下がるので、コリメータはこの線の数減らす目的も兼ねて設置した。また、電子と陽電子の静止質量はともに511keV(自然単位)なので、放出される線のエネルギーは511keV以下となる。NaIシンチレータにかかる電圧や回路の各種設定は、このエネルギー範囲内の線がうまく検出できるように行った。

ところで、図2.1.1(A)にも示しているように、本実験ではNaIシンチレータをひとつしか用いていないため、ポジトロニウムの崩壊を全て検出できるわけではない。そのために、陽電子が検出されても、その陽電子から構成されたポジトロニウムが放出した線は検出されなかった、という崩壊過程も数多く存在する。よって、崩壊過程の検出にあたって、本実験では、NaIシンチレータでの線の検出時刻を基準に測定が行われるように回路を組んだ。

2.2 崩壊時間を測定するための回路

2.2.1 装置とその設定、配置

測定用の回路に用いられる装置には以下のものを用いた。

回路図は、図 2.2.1 に示す。

- **Negative high voltage**

光電子増倍管に電圧をかける。

本実験では、NaI シンチレータ側を 948V に、プラスチックシンチレータ側を 1100V に設定した。

- **Amp**

入力信号を、10 倍に増幅し出力する。

- **Discriminator**

ノイズ除去の目的でスレッシュホールドをかけ、入力されたアナログ信号がその閾値をこえた時、デジタル信号を返す。

本実験では、スレッシュホールドを 50mV に設定した。

- **Gate generator**

入力されたロジックパルスに対して、ゲートパルスを出力する。また、ロジックパルスを遅らせることもできる。

本実験では、三つの Gate Generator を用いたために、図中では Gate1、Gate2、Gate3 と略記し区別している。

各々の本実験での設定は下表のようにした。

	delay	width
Gate1	1.05 μ s	60ns
Gate2	through	1 μ s
Gate3	through	1 μ s

ただし、Gate1 の delay には入力信号が Gate1 を通過することによる遅れも含まれ、Gate2 と Gate3 の delay は設定上 thro であるが、実際にはモジュールの通過による信号の遅れがそれぞれ、58.4ns、20.8ns あった。

- **Coincidence**

ふたつのロジックパルスを同期させる。

本実験では、Coincidence を二つ用いたので、図中では Coincidence1、Coincidence2 として区別した。

- **Fixed delay**

信号を遅らせる。

本実験では、回路中 2 箇所 で Fixed delay を用いたため、図中では Delay1、Delay2 と略記し区別している。Delay1、Delay2 による遅れはそれぞれ、105ns、224ns に設定した。

Delay1 は、Gate2 を通過した信号の遅れを取り戻すために設置した。

- **ADC**

ゲートパルスが入力されている間、他端氏から入力された信号の波高の積分値に線形に対応した数値を返す。

本実験では、NaI シンチレータを通過した 線のエネルギー測定のために用いた。

ADC が返す値は、線のエネルギーに線形に対応していると考えて差し支えない。

- **TDC**

Start 信号が入力されてから、stop 信号が入力されるまでの時間間隔に線形に対応した数値を返す。

本実験では、オルソポジトロニウムの崩壊に要した時間の測定、つまり、陽電子がプラスチックシンチレータで検出されてから、線が NaI シンチレータで検出されるまでの時間間隔を測定するのに用いた。

ただし、適切な信号を選び出すために、NaI シンチレータからの信号を start 信号にいった。

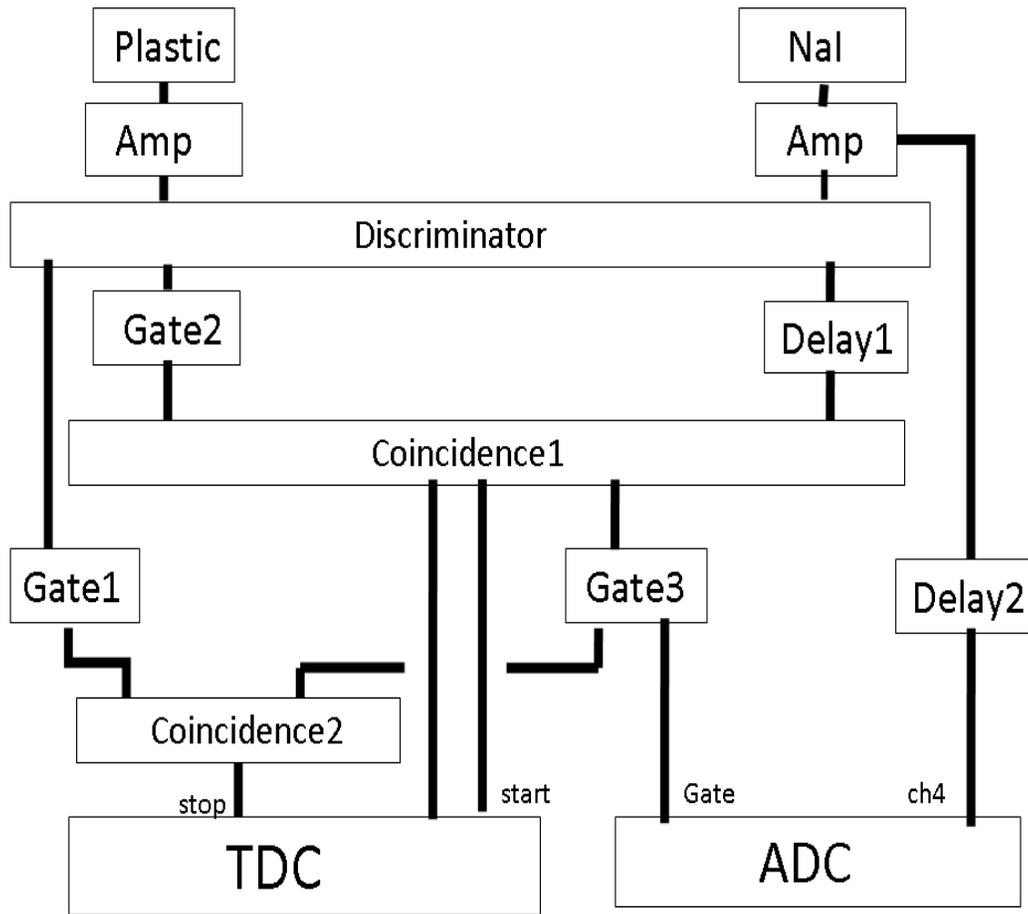


図 2 . 2 . 1 回路図

注意 : Plastic はプラスチックシンチレータと光電子増倍管をまとめて表し、
 NaI は NaI シンチレータとその光電子増倍管があらかじめひとまとまりになった
 装置を表している。
 Gate3 から Coincidence2 へと伸びるケーブルは、図中では図を見やすくするため切
 れているが、実際には切れていない。

2.2.2 回路の動作、及び崩壊に要した時間の求め方

(1) ADC によるエネルギー測定

ADC は NaI シンチレータを通過した 線のエネルギーを測定するために用いられる。

本実験の目的は、オルソポジトロニウムの寿命を測定することであるため、エネルギーを測定する必要のあるガンマ線は必ず、プラスチックシンチレータを通過した陽電子を伴うはずである。そこで、余分な 線の信号を落とすために、図 2.1.1 中の Gate2 を用いて陽電子からの信号のゲートを開き、 線からの信号と Coincidence1 で同期させる。

オルソポジトロニウムの寿命の理論値は 142ns であるため、Gate2 の width は 1 μ s あれば十分である。ただし、Gate2 を通過することによる信号の遅れが 58.4ns あるため Coincidence1 で二つの信号を同期させる段階で、ポジトロニウムの崩壊によって生成した 線の信号が、そのポジトロニウムの生成に寄与した陽電子による信号に先行する可能性がある。このままでは、Coincidence1 で同期させた後に出力される信号はタイミングが陽電子側にあってしまい目的に合わない。また、後で述べるように、これは TDC にさらに大きな悪影響を及ぼす。この問題に対処するため、Delay1 を用いて 線からの信号を遅らせる。Gate2 による遅れは 58.4ns なので、Delay1 では 105ns 遅らせれば十分である。

結果として、Coincidence1 から出力された信号は、本実験で有用な 線からの信号と考えるとよいので、この信号を Gate3 に入れ ADC のエネルギー測定用にゲートを開き、ADC の Gate へと入力する。合わせて、NaI シンチレータからのアナログ信号も、ADC に入力される段階では、Gate へ入るロジックパルス内に収まるように、Delay2 を用いて適度に遅らせる。

このようにして、ポジトロニウムの崩壊によって生成された 線のエネルギーは測定される。

(2) TDC による時間測定

TDC は、陽電子がプラスチックシンチレータを通過した時刻と、その陽電子がポジトロニウムを生成し崩壊して放出された 線が、NaI シンチレータを通過した時刻との時間間隔を求めるために用いられる。

実際のポジトロニウムの崩壊過程では、プラスチックシンチレータで陽電子が検出された後、NaI シンチレータで 線が検出されるため、陽電子による信号を TDC の start に、 線からの信号を stop に用いるのが自然に思われる。

しかし、プラスチックシンチレータで陽電子が検出されたからといって、必ずしも続いて NaI シンチレータで 線が検出されるわけではない。実験装置の配置図からもわかるように、NaI シンチレータで検出できるのは崩壊によって生じた 線の一部のみである。よって、陽電子の検出信号を start に、 線の検出信号を stop にとった場合、集めたデータには、異なる崩壊過程に属するはずの、陽電子の検出時刻と 線の検出時刻の差が多く含まれることとなり、実験の精度が悪くなってしまう。

そこで、本実験では、NaIシンチレータで線が検出された信号を TDC の start に、プラスチックシンチレータで陽電子が検出された信号を stop へ入れることにした。

そのために、まず、図 2.2.1 中の Coincidence1 からの出力信号を TDC の stop 信号として用いる。このとき、Coincidence1 の出力信号は、タイミングが線側にあっていなければならないが、Delay1 がこれを保障している。Delay1 がなければ、陽電子からの信号が Gate2 を通過する際の遅れのために、Coincidence1 の出力信号は陽電子側にタイミングがあってしまい、TDC の start、stop 信号ともに陽電子からの信号となってしまう可能性が高くなる。

つぎに、プラスチックシンチレータからの陽電子の検出信号を stop 信号とするために、Gate1 を用いて陽電子からの信号を遅らせる。さらに、同じ崩壊過程による、陽電子と線が検出されるように、Gate1 の出力信号を、Gate3 で開いたゲートパルスと Coincidence2 で同期させ、その出力信号を TDC の stop 信号とする。Gate1 による遅れは、Gate3 の width が $1\mu\text{s}$ であること、Delay 1 の遅れが 105ns であること、そして、線からの信号が陽電子からの信号に先行して TDC に入力されなければならないことを考慮して、 $1.05\mu\text{s}$ あれば十分である。

回路の時間的な流れを図 2.2.2 に示す。

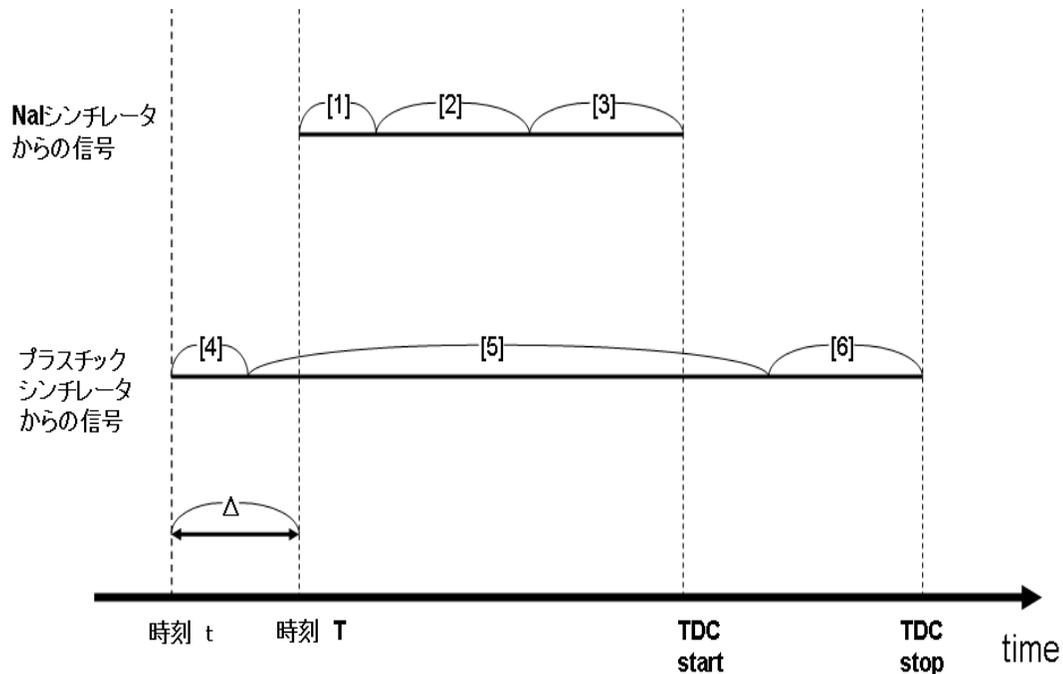


図 2.2.2

図中ではそれぞれ、

- ・時刻 t : プラスチックシンチレータが陽電子を検出した時刻。
- ・時刻 T : NaI シンチレータが γ 線を検出した時刻。
- ・ $\tau = T - t$: ポジトロニウムの崩壊に要した時間。
- ・ [1] : NaI シンチレータでの γ 線の検出信号が、Amp、Discriminator を通過するのに要した時間。
- ・ [2] : 図 2 . 2 . 1 中の Delay1 による遅れ、105ns。
- ・ [3] : γ 線の検出信号が Coincidence1 を通過し TDC の stop に入るのに要した時間。
- ・ [4] : プラスチックシンチレータでの陽電子の検出信号が、Amp、Discriminator を通過するのに要した時間。
- ・ [5] : Gate 1 による遅れ、1.05 μ s。
- ・ [6] : 陽電子の検出信号が、Coincidence2 を通過し TDC の stop に入るのに要した時間。

をあらわしている。

Amp、Discriminator、Coincidence は同一規格のものを用いているので、[1]=[4]、[3]=[6] と考えてよい。すると、TDC によって測定される時間間隔は、

$$\begin{aligned}(\text{TDC stop}) - (\text{TDC start}) &= (t + [4] + [5] + [6]) - (T + [1] + [2] + [3]) \\ &= \tau - (T - t) + [5] - [2] \\ &= \tau - \tau + 1.05 \mu\text{s} - 105\text{ns}\end{aligned}$$

となり、TDC の測定値からポジトロニウムが崩壊に要した時間 τ を求めることができる。

2.3 実験装置の較正

2.3.1 ADCのキャリブレーション

ADCは線のエネルギー測定に用いられるが、ADCが実際に返す値は、入力された信号の波高の積分値に線形に対応した数値であり、エネルギー値そのものではない。そのため、実験の前に、ADCのキャリブレーションを行う必要がある。本来ならば、ADCのキャリブレーションを行うにあたって、線エネルギーと、NaIシンチレータの検出信号の波高の対応関係も知る必要がある。しかし、この実験の範囲内ではNaIからの検出信号の波高は線のエネルギーに非常に高い精度で線形に対応しているため、NaIシンチレータ等とADCをまとめて較正してしまえば十分である。

つまり、線のエネルギー値と、ADCの出力値との間に

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

という線形な関係があるとみなして、ふたつの定数をもとめてやればよい。

そのために、あらかじめエネルギーの分かっている線をNaIシンチレータで検出し、ADCの出力値と対応させて各定数を求め、出力値を線のエネルギー値に直す。定数を求めるには、まず、それぞれのエネルギーの線に対して、ADCの測定値とそのカウント数のヒストグラムをガウス型の指数関数でfitし、カウント数がピークとなる測定値を求める。そして、そのピークとなる測定値の値をADCの出力値と考えて、この出力値と線のエネルギー値をさらに直線でfitしてやればよい。定数は2つあるので最低2種類の線が用意できればキャリブレーションが可能だが、精度を上げるためにはできるだけ多く、異なるエネルギーの線を用意したい。しかし、本実験では、Ampを用いているため、あまり強いエネルギーの線をキャリブレーションで使うことが出来ず、2種類の線と、バックグラウンド(線を入れない状態)の3点でキャリブレーションを行った。キャリブレーションで用いた線はNa22線源からの511keVの線と、Cs線源からの622keVの線だった。

線のエネルギー値と、対応したADCの出力値を以下の表2.3.1に示しておく。キャリブレーションの結果は、データ解析の項で述べる。

	バックグラウンド	511keV	622keV
ADCの出力値	50.02	2683	3628

表2.3.1

2.3.2 TDCのキャリブレーション

TDCはポジトロニウムの崩壊に要した時間の測定に用いられ、start信号が入力されてからstop信号が入力されるまでの時間を計る。しかし、TDCもADCと同様に、測定された時間間隔そのものではなく、時間間隔に線形に対応した数値を返すため、実験前にキャリブレーションが必要である。

TDCの出力値は実際の時間間隔と線形に対応することがわかっているので、

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

という関係があるとみなして、ふたつの定数を求めてやればよい。

そのために、あらかじめ時間間隔のわかっているロジックパルスを入力し、TDCの出力値と対応させて定数を求める。定数を求めるには、TDCの出力値と、それに対応した実際の時間間隔の値を直線でfitしてやる。

本実験では、ロジックパルスとして0ns、118ns、580ns、932nsの間隔を持つものを用いた。

各時間間隔と、TDCの出力値の関係を表2.3.2に示す。

キャリブレーションの結果は、データ解析の項で述べる。

time(ns)	0	118	580	932
TDC出力値	40	525	2392	3795

表 2.3.2

2.3.3 t-Q補正

(Discriminatorでのデジタル信号の立ち上がり時間のずれに関する補正)

ノイズを除去するため、Discriminatorでは閾値をかけているが、このために、入力されたアナログ信号の波高(検出された粒子のエネルギーに線形に対応)に応じてデジタル信号の立ち上がり時間に遅れが生じてくる。この様子を図に示すと、下の図2.3.3のようになる。

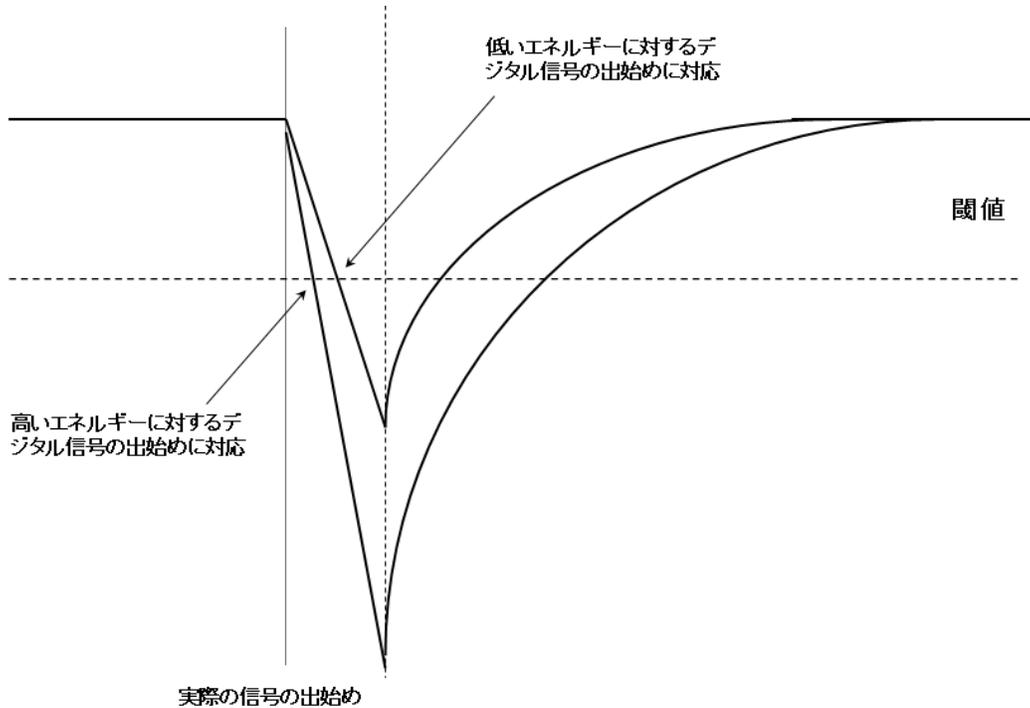


図2.3.3

図2.3.3では、同一時刻に発生し、同じ時刻でピークを持つが、異なる波高(エネルギー)の信号を示している。一般に、シンチレータで粒子が検出された時、出力された信号はただちにピークに達するわけではなく、ピークに至るのに少し時間がかかる。そのため、図2.2.3に示すように信号の波高(エネルギー)によってデジタル信号の立ち上がりに時間差が生じてしまう。

このような、Discriminatorでの、入力信号のエネルギーに依存した時間の遅れは、崩壊時間の測定に悪影響を及ぼし、測定精度が下がってしまうので補正する必要がある。

補正にあたって本実験では、ピークに至るまでのアナログ信号を第一次近似として直線で近似し、時間差の補正式として、

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

という形の式を用いた。

具体的な補正方法としては、測定にかかったパラポジトロニウムの崩壊を利用した。

パラポジトロニウムの寿命はオルソポジトロニウムの寿命に比べて非常に短く、また、コンプトン散乱の効果でエネルギーが上限値以下の範囲で広く分布する。そのため、測定によって得られた ADC-TDC 散布図中で、パラポジトロニウムの崩壊に対応したイベントは時間 0 あたりで濃く帯状に分布する。この分布帯は、パラポジトロニウムの崩壊によるものであるため、本来は TDC 軸に平行に直線状に分布するはずである。しかし、Discriminator での、エネルギーによるデジタル信号の立ち上がり時間の違いの影響で、分布帯は曲線を描く。この曲線を上述の、

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

の形の関数で fit し、fit 関数を用いて分布帯が直線状になるように補正を行なった。

実際の補正結果は、データ解析の項で述べる。

2.4 寿命の求め方

一般に、オルソポジトロニウムの寿命 τ は、以下の式で定義される。

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

ここで $N(t)$ は、時刻 0 において、相互作用しない多数の粒子を用意した場合の、時刻 t における粒子の残存数をあらわしている。

また、この式は、 Γ の逆数 τ を用いて、

$$N(t) = N_0 \exp(-\Gamma t)$$

と書くこともできる。 Γ は、粒子ひとつあたり、単位時間あたりの崩壊確立と解釈することができる。

本実験では TDC を用いて、ポジトロニウムが崩壊に要した時間の測定を繰り返し、イベント数をためるといった手法をとったが、これは、時刻 0 に多数の相互作用しないポジトロニウムを集め、各時刻での粒子の崩壊数を測定したのと同じことである。

時刻 t と、わずかに時間がたった後の時刻 $t + \Delta t$ の間の粒子の崩壊数は上式を用いて、

$$\begin{aligned} N(t) - N(t + \Delta t) &= N_0 \Gamma \exp(-\Gamma t) \Delta t \\ &= \Gamma N(t) \Delta t \end{aligned}$$

とあらわすことができ、また、 Δt は TDC によって決まる定数なので、崩壊時間とイベント数のヒストグラムを指数関数で fit してやれば寿命を求めることができる。

しかし実際には、純粋な真空をつくることは不可能であるためにオルソポジトロニウムの寿命は短く見積もられてしまう。寿命の測定に悪影響を与える主な要因は次のようなものがあげられる。

- ・ピックオフ反応：ポジトロニウムが他の原子と衝突した際に、ポジトロニウムを構成する陽電子が、ポジトロニウム外の電子と対消滅を起こし γ 線を放出する反応。
生成されたポジトロニウムをとりまく自由空間の体積が小さいほどピックオフ反応の確立は高くなる。
- ・スピン交換反応：ポジトロニウム内の電子や陽電子が、外部の原子の対電子とスピンを交換する反応。
この反応でオルソポジトロニウムはパラポジトロニウムへと変化し短い時間で崩壊してしまう。

- ・ 化学反応：ポジトロニウムの構造が水素原子に似ているために起こる、酸化反応や化合物の合成反応。
酸化反応の場合、ポジトロニウムは自由陽電子となり、他の電子と対消滅を起こす。

これらの影響があると、前に述べた崩壊数の式は、

$$\begin{aligned} N(t) - N(t + \Delta t) &= (\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{extra}) N(t) \Delta t \\ &= (\Gamma_{total}) N(t) \Delta t \end{aligned}$$

となってしまう。ただし、純粋にオルソポジトロニウムによる項には 3 の添字を、他のピックアップ等からくる項にはまとめて extra の添字を付け区別している。

これに、伴い $N(t)$ 自体も、

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

となり、ヒストグラムの fit で得られるオルソポジトロニウムの寿命も純粋な寿命ではなく、それよりも短い、

$$\tau_{total} = \frac{1}{\Gamma_{total}} = \frac{1}{\Gamma_{3\gamma} + \Gamma_{extra}}$$

でしかない。

extra 項の影響を全て除くためには、完全な真空を実現させる必要があるが、現実的には不可能である。そこで本実験では、真空容器を用いて真空度を変えて実験を繰り返し、各真空度の下での寿命をそれぞれ求めて、真空側へ外挿することで純粋な寿命を求めた。

3 . 測定データを用いた解析

これ以下ではデータの解析には Root (解析ソフト) を用いた。

3 . 1 A D C の calibration

ADC の calibration の結果は以下ようになった。

$$\text{Energy(keV)} = (\text{ADC の示す値} \cdot 49.48) \times 0.1882$$

3 . 2 T D C の calibration

TDC の calibration の結果は以下ようになった。

$$\text{Time(ns)} = 908.4 \cdot \text{TDC の示す値} \times 0.2482$$

3 . 3 T · Q calibration

T · Q calibration の結果は以下ようになった。

$$\text{TDC (補正後)} = \text{TDC (補正前)} + 185914 / \text{ADC}$$

3 . 4 本実験の解析

本実験では、真空度を以下のように変更して測定を行った。

真空度 (大気中との比)	カウント数
2 %	5 0 8 3 1 3
1 0 %	6 0 0 0 0
2 0 %	8 5 0 0 0
5 0 %	2 4 0 0 0 0
8 0 %	6 0 0 6 7
1 0 0 %	4 9 7 4 4

表 3 · 1 : 各気圧におけるカウント数

以下では、真空度（大気中との比）が2%の時のデータを用いていくつかの図を載せ、解析の説明

を行う

まず、生のデータの、エネルギーとカウント数のヒストグラムを載せる。

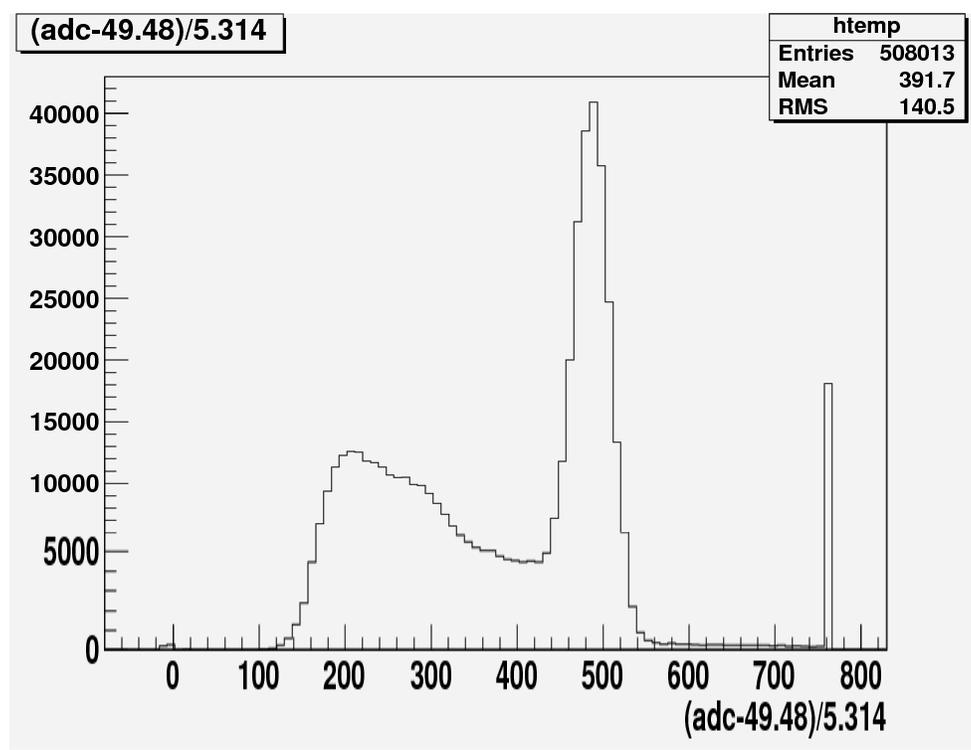


図3・1：エネルギーとカウント数のグラフ（横軸の単位は keV）

これを見ると、ポジトロニウムが2 に崩壊する時に出る 511keV の所にピークが表れている。150~400keV あたりに3 崩壊の線が出ている。760keV あたりにピークが表れているが、これは ADC の性能の限界のためである。

次に時間とカウント数のヒストグラムを載せる。

まず、T・Q calibration する前のヒストグラムを載せる。

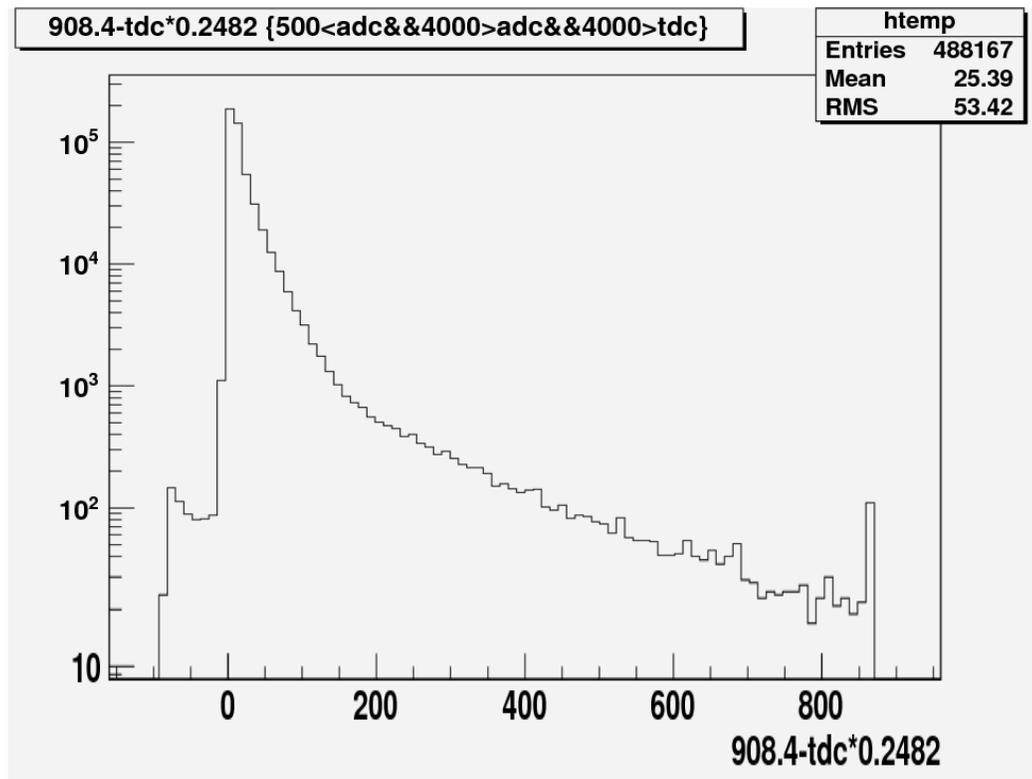


図3・2：時間とカウント数のグラフ (横軸の単位は ns)

横軸はパラポジトロニウムの崩壊する時間を 0 ns としている。870ns のあたりにピークが現れているがこれは TDC の性能の限界のためである。次に T・Q calibration した後のヒストグラムを載せる。

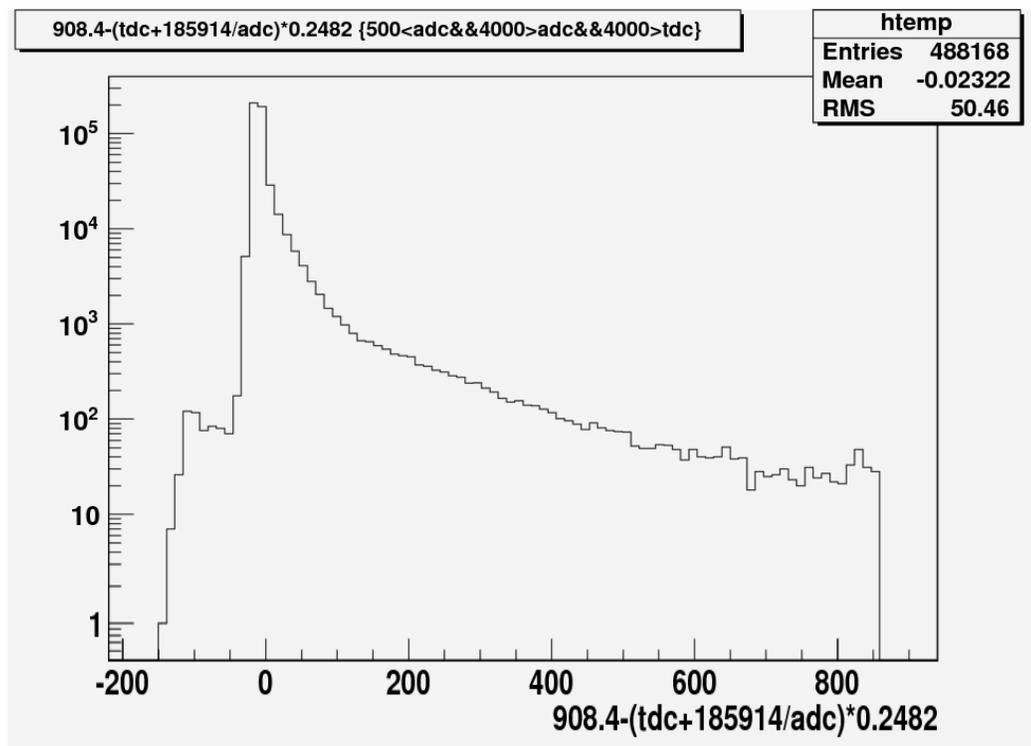


図 3・ 3 : 補正後の時間とカウント数のグラフ (横軸の

単位は ns)

これを補正前の図と比べると 0 ns のピークが太くなっている。

次はエネルギーと時間の 2 次元プロットを載せる。

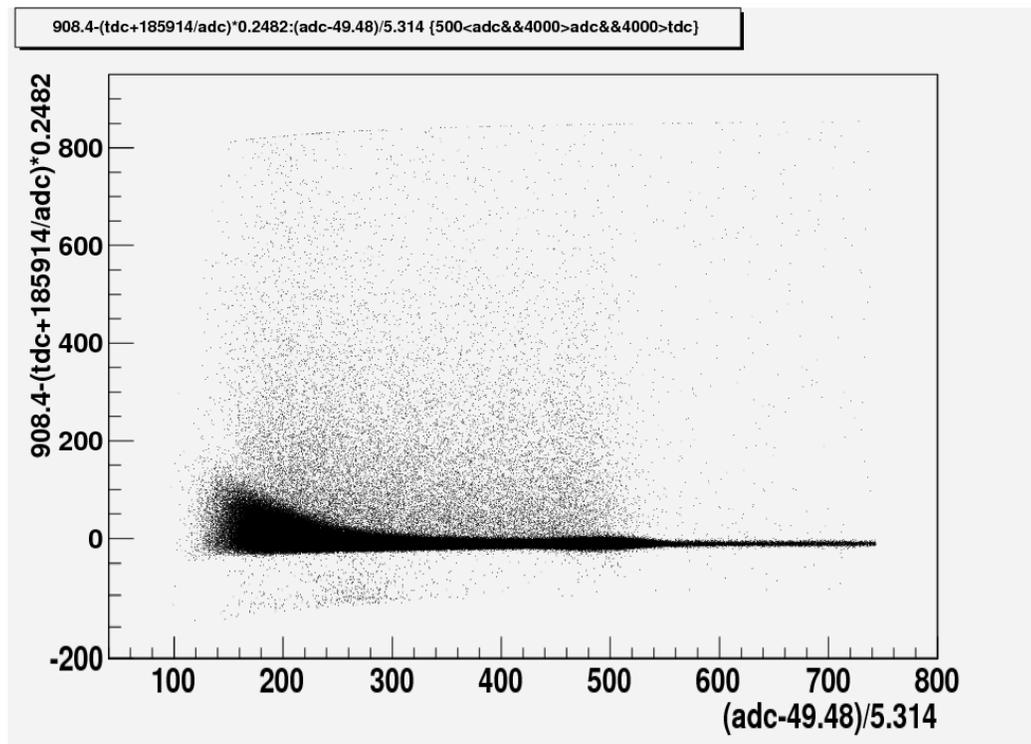


図 3 . 4 : エネルギーと時間のグラフ (横軸の単位は keV 縦

軸の単位は ns)

図の 0 ns 辺りに濃く出ているのがパラポジトロニウムから出る 線である。そこで

次の図のようにカットをしてオルソポジトロニウムから出る 線のものを採る。

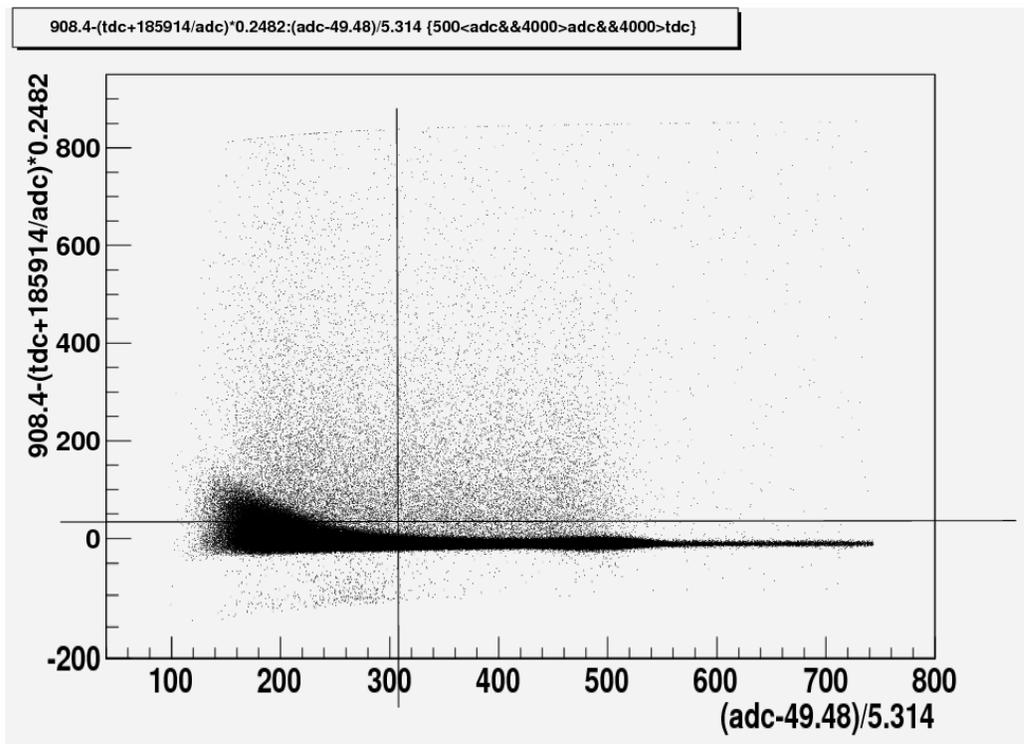


図 3・ 5 : エネルギーと時間のグラフのカット (横軸の単位は keV 縦軸の単位は ns)

今回の実験では ADC の値が 1 5 0 0 以上かつ TDC の値が 3 4 0 0 以下の

領域 (約 273 keV 以上、約 40 ns 以上の領域) を使用した。次に各圧力でのカット後のカウ

ント数を載せる。

真空度（大気中との比）	カット後のカウント数
2 %	1 0 1 5 7
1 0 %	1 1 2 5
2 0 %	1 7 2 5
5 0 %	5 5 6 2
8 0 %	1 2 3 2
1 0 0 %	1 1 0 0

表 3 - 2 : 各気圧におけるカットした後のカウント数

以下にカット後の時間とカウント数のヒストグラムを載せる。

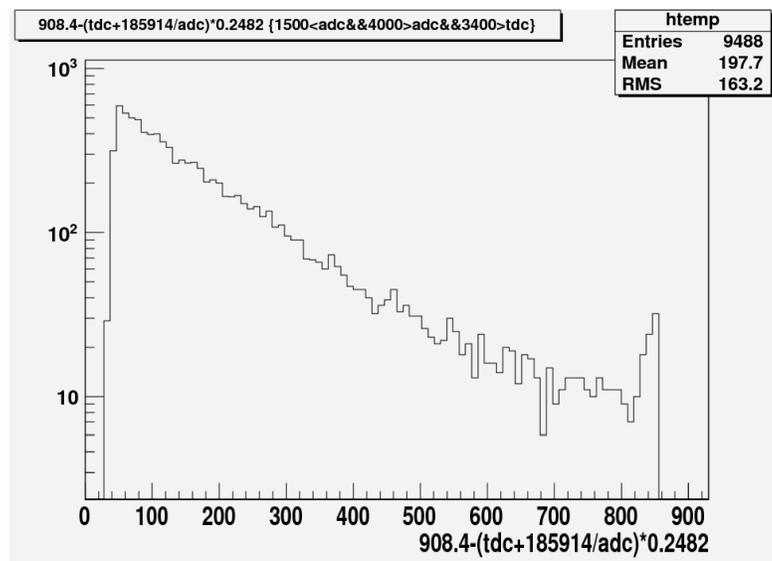


図3・6：カット後の時間とカウント数のグラフ (横軸の

単位は ns)

この図から Root を使ってフィットを行う。フィットの範囲は

80・820 ns、フィット関数は $\exp(-p[0]x + p[1]) + p[2]$ である。

p[0],p[1],p[2]がパラメータである。p[2]はバックグラウンドの項を表している。そして、

p[0]の逆数が寿命となる。

4 . 結論

解析の結果オルソポジトロニウムの寿命は以下ようになった。

真空度 (大気中との比)	寿命 (ns)	誤差 (ns)
2 %	1 3 7 . 9 8	3 . 3 2
1 0 %	1 1 1 . 5 8	8 . 2 2
2 0 %	1 1 2 . 0 1	6 . 2 2
5 0 %	9 8 . 4 6	2 . 8 5
8 0 %	8 3 . 1 4	6 . 0 7
1 0 0 %	7 7 . 9 9	5 . 5 8

表4・1：各気圧における寿命及び誤差

この表から Root を使い真空におけるオルソポジトロニウムの

寿命を求めると $137.2 \pm 3.3(\text{ns})$ となった。

寿命の誤差の考察は5章で詳しく行う。

理論値は 142.04ns なので本実験で求めた値とややずれる。

その原因としては、シリカパウダーを毎回実験するごとに焼いて入れ直していたので密

度が変わっていたことや密度が一様でなかったこと、温度を一定に保たなかったこと、

とったデータの数が少なかったことなどが考えられる。

5 . 誤差の評価

真空の寿命の得るまでに何度か近似曲線を引いたり、実験値を用いたり、してきた。そのたびに、多少の誤差がつくはずであり、それがどの程度最終的な真空の寿命に影響を与えるかを調べる。本実験では誤差を次の6つに分けて考察した。

統計誤差

T Q補正による誤差（再現性の問題）

T Q補正の誤差の伝搬

TDC 校正からの誤差

ADC:TDC カットの範囲による誤差

fitting の範囲による誤差

5 . 1 . 統計誤差

圧力 寿命のグラフで出した真空の寿命についている誤差が統計誤差である。これは、データ数を増やすほど小さくなる。下図（図5 . 1）では、136.9[ns] が真空の寿命、 ± 2.8 [ns]が統計誤差。

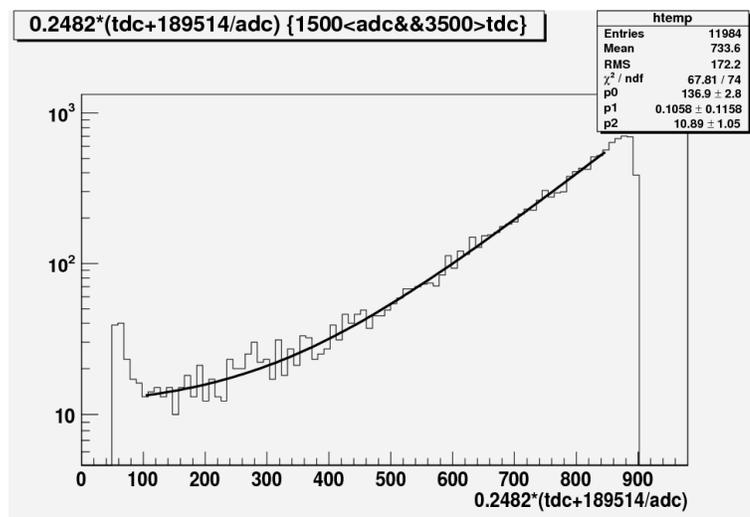


図5 . 1

5 . 2 . T Q補正による誤差

真空の2%のデータ二つに対してT Q補正を行ったところ、それぞれ、189514 と184417であった。（図5 . 2、図5 , 3）

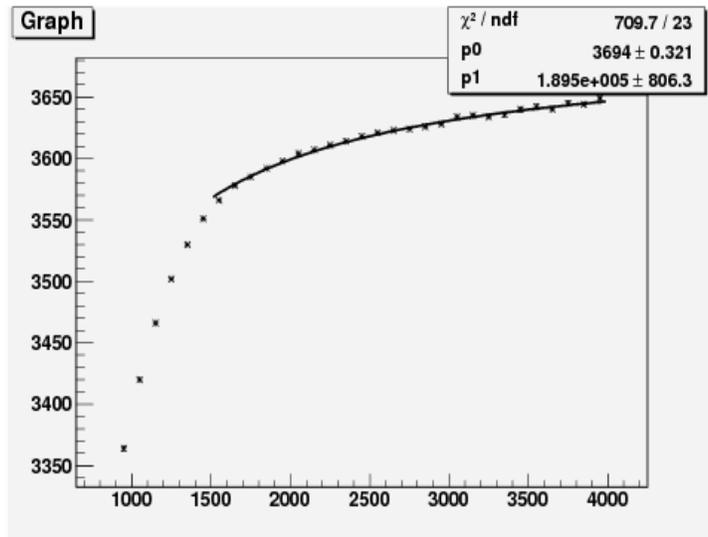


図 5 . 2

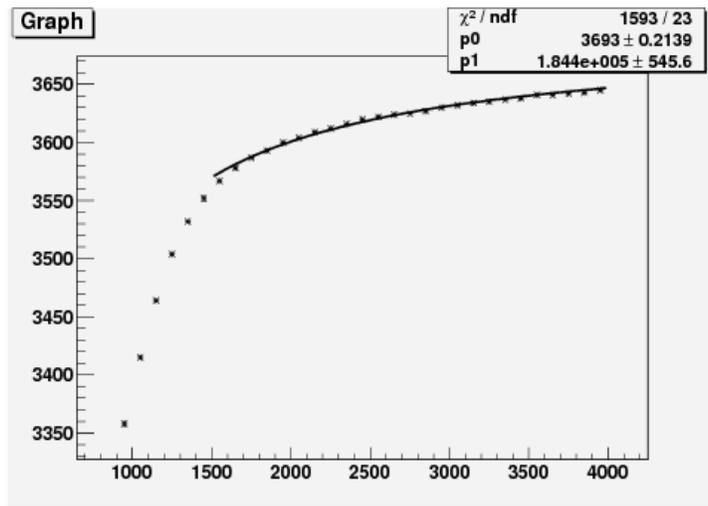


図 5 . 3

この二通りの値でT Q補正を行い、それぞれの寿命を比較した。

189514 でT Q補正した場合の各圧力における寿命(表 5 . 1)

P(圧力/大気圧)	(寿命)[nsec]	P の誤差	の誤差[nsec]
0.02	140.3	0.001	4.5
0.1	118.4	0.001	7.0
0.2	114.7	0.001	5.3
0.5	96.59	0.001	2.33

0.8	87.61	0.001	4.53
1.0	79.39	0.001	4.90
0.0(真空)	136.89	0.001	3.97

184417 で T Q 補正した場合の各圧力における寿命 (表 5 . 2)

P(圧力/大気圧)	(寿命)[nsec]	P の誤差	の誤差[nsec]
0.02	140	0.001	4.5
0.1	117.4	0.001	6.9
0.2	116.4	0.001	5.4
0.5	96.57	0.001	2.31
0.8	88.25	0.001	4.55
1.0	79.19	0.001	4.83
0.0(真空)	136.78	0.001	3.96

真空の寿命に対して~0.1nsec 程度影響する。上の表をまとめてグラフにすると下図(図 5 . 4) のようになる。赤線が 189514 , 黒線 184417 である。

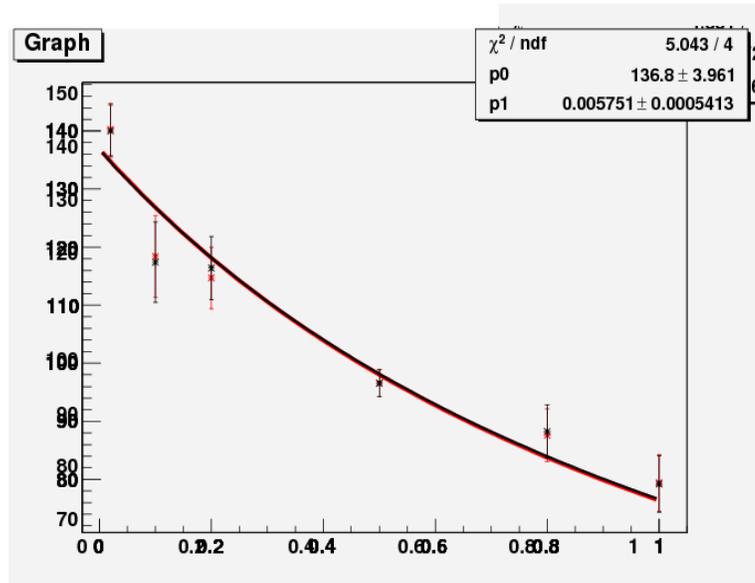


図 5 . 4

5 . 3 . T Q 補正の誤差の伝搬

T Q 補正の誤差とは図 5 . 3 で言うと、806.3nsec であり、T Q 補正の値 189514 の誤差である。これが真空の寿命に与える影響は、~0.01nsec 程度であり今回は無視してよい。

5 . 4 . TDC 校正からの誤差

TDC 校正(図 5 .)の結果、以下の式で、デジタル信号である TDC をアナログ信号の Time に変換できるが、誤差がついている。

$$\text{Time}[\text{nsec}] = (0.2482 \pm 0.001542) * \text{TDC}$$

しかし、十分小さいので今回は無視してよい。

5 . 5 . ADC:TDC カットの範囲による誤差

寿命を求める過程で、ADC:TDC グラフ(図 5 . 5) から検証したいオルソポジトロニウムのデータ部分を選択するために「TDC<3500,1500<ADC」という範囲でカットを行った。(図 5 . 6) この範囲は妥当だろうか？範囲を「TDC<3400,1600<ADC」に変え、比較する。(表 5 . 3、表 5 . 4)

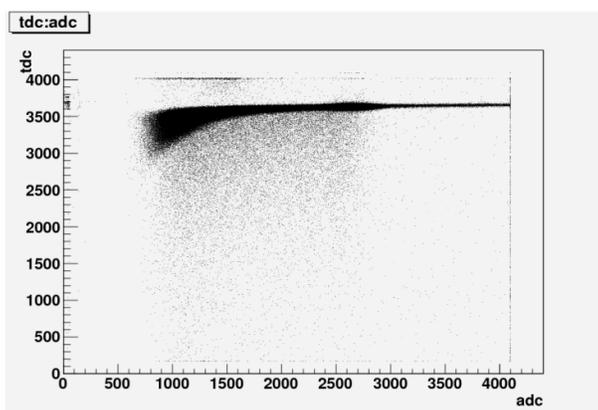


図 5 . 5

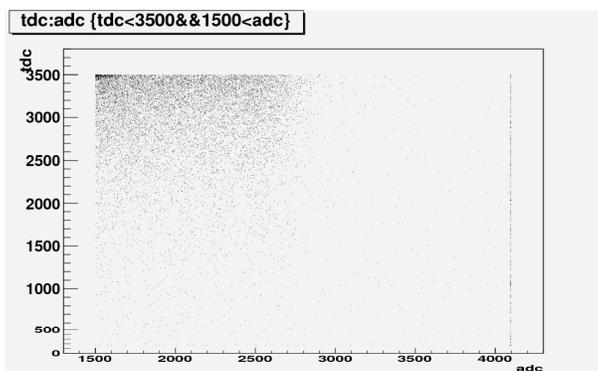


図 5 . 6

TDC<3500,ADC<1500 の各圧力における寿命(表 5 . 3)

P(圧力/大気圧)	(寿命)[nsec]	P の誤差	の誤差[nsec]
0.02	136.9	0.001	2.8
0.1	118.4	0.001	7.0
0.2	114.7	0.001	5.3

0.5	96.59	0.001	2.33
0.8	87.61	0.001	4.53
1.0	79.39	0.001	4.90
0.0(真空)	136.9	0.001	3.97

TDC<3600,ADC<1600 の各圧力における寿命 (表5.4)

P(圧力/大気圧)	(寿命)[nsec]	P の誤差	の誤差[nsec]
0.02	136.0	0.001	2.2
0.1	112.5	0.001	7.3
0.2	108.5	0.001	5.4
0.5	98.77	0.001	2.60
0.8	87.74	0.001	5.21
1.0	79.80	0.001	5.10
0.0(真空)	136.0	0.001	2.24

真空の寿命に対して~1nsec 程度の影響を与える。

5.6. Fitting の範囲による誤差

図5.1で見ると、TDC の値で 100~850 の範囲で指数関数の近似曲線を引き各圧力における寿命を求めている。この fitting start の値を 100,125,150 と変化させ寿命を比較し、その影響を調べる。(表5.3(100~850)、表5.6(125~850)、表5.7(150~850))

125~850fitting での各圧力における寿命 (表5.6)

P(圧力/大気圧)	(寿命)[nsec]	P の誤差	の誤差[nsec]
0.02	137.0	0.001	2.9
0.1	118.0	0.001	7.2
0.2	114.5	0.001	5.4
0.5	96.46	0.001	2.40
0.8	87.31	0.001	4.60
1.0	79.25	0.001	4.96
0.0(真空)	136.9	0.001	2.839

150~850fitting での各圧力における寿命 (表5.7)

P(圧力/大気圧)	(寿命)[nsec]	P の誤差	の誤差[nsec]
0.02	137.1	0.001	3.0
0.1	119.0	0.001	7.4
0.2	115.5	0.001	5.5

0.5	96.12	0.001	2.39
0.8	87.47	0.001	4.63
1.0	79.5	0.001	4.93
0.0(真空)	137.1	0.001	2.936

~0.1nsec 程度の影響があることが見てとれる。

5・7.まとめ

以上の結果をまとめると最終的な真空の寿命に対して統計誤差 2.8nsec + 系統誤差~1.0nsec 程度がつくと考えられる。