

平成 26 年度

卒業論文

オルソポジトロニウムの寿命測定

神戸大学 理学部物理学科

山口 遥奈

長島 駿

四ツ永 直輝

谷岡 凌
長谷川 大晃

目次

1	オルソポジトロニウムの崩壊原理と寿命測定 of 原理 (担当: 山口 遥奈)	1
1.1	ポジトロニウムとは	1
1.2	ポジトロニウムの崩壊	1
1.3	γ 線のエネルギー	2
1.4	パラポジトロニウムの寿命	2
1.5	オルソポジトロニウムの寿命	3
1.6	ポジトロニウムの寿命測定	4
1.7	測定原理	5
1.8	background	5
2	オルソポジトロニウムの寿命測定 of 実験装置 (担当: 長島 駿)	7
2.1	Set Up	7
2.2	Calibration	11
2.3	ScintiS	12
2.4	Circuit	13
2.5	Threshold	14
2.6	Rate Count	15
2.7	Sammary	16
2.8	Glossary	16
3	オルソポジトロニウムの崩壊 of モンテカルロによる評価 (担当: 四ツ永 直輝)	17
3.1	シミュレーション of モチベーション	17
3.2	シミュレーション of 準備	17
3.3	geant4	20
3.4	シミュレーション of 内容と結果	22
3.5	まとめ	26
4	オルソポジトロニウムの寿命測定 of 実験の背景事象 (担当: 谷岡 凌)	27
4.1	データ解析	27
4.2	全 cut 後のヒストグラム	33
4.3	まとめ	34
5	結果 (担当: 長谷川 大晃)	35
5.1	解析概要	35
5.2	時間分布	35
5.3	β の決定	36
5.4	Fitting	36
5.5	測定値について	37

5.6	bin 幅と結果の関係	39
5.7	Fit 範囲と結果の関係	39
5.8	結果	40
6	考察と対策 (担当:長谷川 大晃)	41
6.1	考察	41
6.2	対策	41

1 オルソポジトロニウムの崩壊原理と寿命測定の方法 (担当: 山口 遥奈)

1.1 ポジトロニウムとは

陽電子と電子から成る、電磁相互作用により束縛された系である。ちょうど水素原子の陽子を陽電子で置き換えた状態に相当する。また、ポジトロニウムには軌道主量子数 $n = 1$ において2つの基底状態が存在する。パラポジトロニウム (1S_0) とオルソポジトロニウム (3S_1) であり、パリティ P はともに $P = -1$ である。
($2^s + 1L_j$: s = スピン、 L = 軌道角運動量指数、 j = 全角運動量)

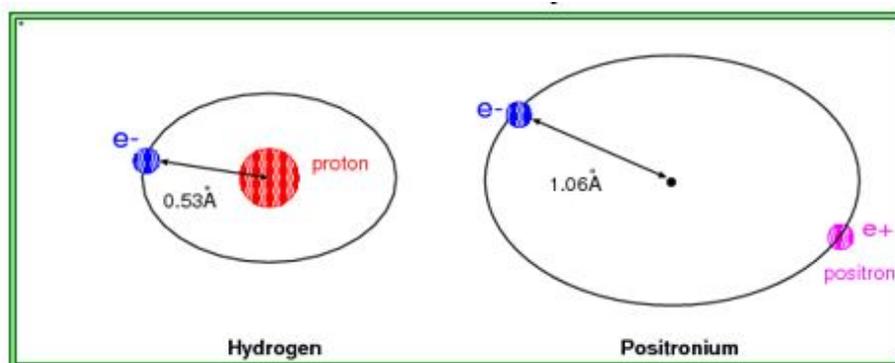


図 1

1.2 ポジトロニウムの崩壊

ポジトロニウムを形成する電子と陽電子は対消滅して γ 線を放出する。
パラポジトロニウムは軌道角運動量 $L=0$ 、スピン $S=0$ なので始状態の C パリティは

$$C = (-1)^{L+S} = 1 \quad (1)$$

N 個のフォトンの C パリティは

$$C = (-1)^N \quad (2)$$

パリティ保存より式 (1) = 式 (2) が成り立たなければならないので $N =$ 偶数になる。したがってパラポジトロニウムは偶数個の γ 線を放出する。放出する γ 線の数が増えると微細構造定数 ($1/137$) の 2 乗のオーダーで崩壊率が減少するのでパラポジトロニウムは 2 γ 崩壊をする。

同様に考えると、軌道角運動量 $L=0$ 、スピン $S=1$ のオルソポジトロニウムの始状態 C パリティは

$$C = (-1)^{L+S} = -1 \quad (3)$$

パリティ保存より式 (2) = 式 (3) が成り立たなければならないので $N = \text{奇数}$ になる。したがってパラポジトロニウムは奇数個の γ 線を放出する。放出する γ 線の数が増えると微細構造定数 (1/137) の 2 乗のオーダーで崩壊率が減少するのでパラポジトロニウムは 3 γ 崩壊をする。

1.3 γ 線のエネルギー

電子と陽電子はそれぞれ 511keV のエネルギーを持つ。

2 γ 崩壊の場合、運動量保存則とエネルギー保存則を満たすために back-to-back に崩壊するので γ 線もそれぞれ 511keV のエネルギーを持つ。

3 γ 崩壊の場合も運動量保存則とエネルギー保存則を満たさなければならないのでそれぞれの γ 線は 0~511keV のエネルギーを持って崩壊する。したがってエネルギー ω_1, ω_2 を決めると、エネルギー保存則によってエネルギー ω_3 を求めることができ、運動量保存則によって図 2 の角度 θ, ϕ を求めることができる。

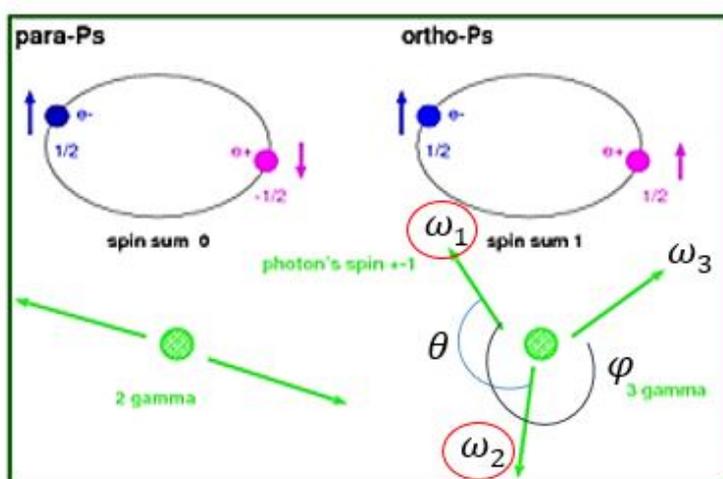


図 2

1.4 パラポジトロニウムの寿命

(式 (4) ~ (9)、(12) はすべて文献 [1] からの抜粋であり、自然単位系で表されている)

パラポジトロニウムは 2 γ 崩壊をするのでバーテックスを 2 つ持つファインマンダイアグラムが書ける。(図 (3))

まず、ポジトロニウムが対消滅したとしてその後 2 γ 崩壊する確率、つまり 2 γ の反応断面積を求める。飛んでくる電子の静止質量 m は 511 keV のエネルギーを持つ。微細構造定数 α は、

$$\alpha = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137} \quad (4)$$

と e^2 に比例しているので 2γ の反応断面積は e^4 に比例することになる。したがって、

$$\sigma_{2\gamma} = \pi \left(\frac{e^2}{m}\right)^2 \frac{1}{v} \quad (5)$$

と書ける。

ここで、パラポジトロニウムの状態数は1つなのでパラポジトロニウムが 2γ 崩壊する確率つまり平均崩壊確率 $\bar{w}_{2\gamma}$ は 2γ の崩壊確率 w_0 を用いて

$$\bar{w}_{2\gamma} = \frac{1}{4} w_0 \quad (6)$$

と表すことができる。したがってパラポジトロニウムの崩壊確率は

$$w_0 = 4 |\psi(0)|^2 (v \sigma_{2\gamma})_{v \rightarrow 0} \quad (7)$$

と書ける。

$$\psi(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi} a^3} e^{-\frac{r}{a}} \quad (8)$$

$$a = \frac{2\hbar^2}{m e^2} \quad (9)$$

なので

$$|\psi(0)|^2 \propto a^{-3} \propto e^6 \quad (10)$$

また、

$$\sigma_{2\gamma} \propto e^4 \quad (11)$$

なので、パラポジトロニウムの寿命 τ は

$$\tau_0 = \frac{2}{m a^5} = (123 ps) \quad (12)$$

と求められる。

1.5 オルソポジトロニウムの寿命

パラポジトロニウムと同様に考える。(式 (13) ~ (18)、(21) はすべて文献 [1] からの抜粋であり、自然単位系で表されている)

オルソポジトロニウムは 3γ 崩壊をするのでバーテックスを3つ持つファインマンダイアグラムが書ける。(図 (4))

まず、ポジトロニウムが対消滅したとしてその後 3γ 崩壊する確率、つまり 3γ の反応断面積を求める。飛んでくる電子の静止質量 m は 511 keV のエネルギーを持つ。微細構造定数 α は、

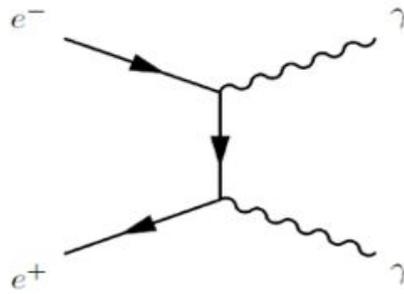


図 3: パラポジトロニウムのファインマンダイアグラム

$$\alpha = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137} \quad (13)$$

と e^2 に比例しているので 3γ の反応断面積は e^6 に比例することになる。したがって、

$$\sigma_{3 \gamma} = \frac{4e^6}{3vm^2} 3 \int_0^m \int_{m-\omega_1}^m \frac{(\omega_1 + \omega_2 - m)^2}{\omega_1^2 \omega_2^2} d\omega_1 d\omega_2 \quad (14)$$

$$\int_0^m \int_{m-\omega_1}^m \frac{(\omega_1 + \omega_2 - m)^2}{\omega_1^2 \omega_2^2} d\omega_1 d\omega_2 = \frac{\pi^2 - 9}{3} \quad (15)$$

と書ける。

ここで、オルソポジトロニウムの状態数は 3 つなのでオルソポジトロニウムが 3γ 崩壊する確率つまり平均崩壊確率 $\bar{w}_{3 \gamma}$ は 3γ の崩壊確率 w_1 を用いて

$$w_1 = \frac{4}{3} |\phi(0)|^2 (v \bar{\sigma}_{3 \gamma})_{v \rightarrow 0} \quad (16)$$

式 (8)~(10) と

$$\sigma_{3 \gamma} \propto e^6 \quad (17)$$

より、オルソポジトロニウムの寿命は

$$\tau_1 = \frac{9 \pi}{2(\pi^2 - 9)} \frac{1}{m \alpha^6} = (140ns) \quad (18)$$

と求められる。

1.6 ポジトロニウムの寿命測定

ポジトロニウムの寿命 τ は

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau} \quad (19)$$

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (20)$$

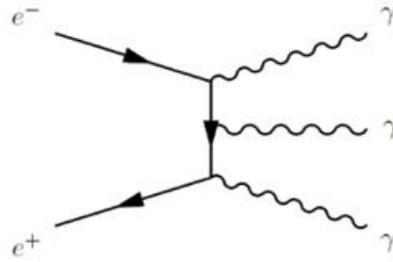


図 4: オルソポジトロニウムのファインマンダイアグラム

で定義される。今回の実験では、崩壊時間 t とその時間での崩壊数 $-dN$ を計測しそのヒストグラムを指数関数で fitting することによってオルソポジトロニウムの寿命 τ を測定する。

1.7 測定原理

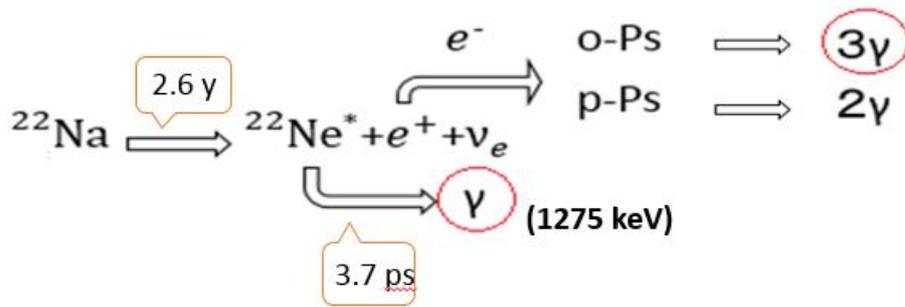


図 5

β^+ 線源として ^{22}Na を用いた。 ^{22}Na は β 崩壊をして $^{22}\text{Ne}^*$ 、 e^+ 、及びニュートリノを放出する。 $^{22}\text{Ne}^*$ は励起状態にあり、基底状態に戻るときに 1275keV の γ 線を放出する。 γ 線が放出されるまでの時間は 3.7ps とオルソポジトロニウムの寿命よりとても短いのでこの時間は無視できる。 e^+ はまわりの物質中の e^- とくっついてパラポジトロニウムかオルソポジトロニウムを生成し、それぞれが 2 γ 、3 γ 崩壊をする。本実験では 1275 keV の γ 線が線源から放出された時間を start とし、オルソポジトロニウム由来の γ 線を検出することでオルソポジトロニウムの寿命を求める。

1.8 background

オルソポジトロニウムが生成されても、単純な 3 γ 崩壊をしない場合がある。

- スピン交換反応

生成されたオルソポジトロニウムがまわりの電子と反応してパラポジトロニウムに変化する。

- pick-off 反応

ポジトロニウムが他の原子と衝突した際、自身の電子ではなく相手の電子と対消滅する。このとき 2γ 崩壊する可能性が生じる。

実験で実際に求められる寿命を τ_{eff} 、オルソポジトロニウムの寿命を τ_0 、スピン交換反応を起こしたときの寿命を τ_{ex} 、pick-off 反応を起こしたときの寿命を τ_p とすると、式 (19) は式 (21) と表せる。

$$-\frac{dN}{dt} = \frac{N}{\tau_{eff}} = \frac{N}{\tau_0} + \frac{N}{\tau_{ex}} + \frac{N}{\tau_p} \quad (21)$$

τ_{eff} の値を τ_0 の値に近づけるためにはスピン交換反応と pick-off 反応を減らさなければならない。

これらの反応を減らすためにはポジトロニウム生成後にまわりの物質が希薄である必要がある。しかし、そもそもポジトロニウムの生成には電子（物質）が必要なので標的として多孔質体か金属表面を使用する。今回は表面積が大きく密度が小さいシリカゲルを用いた。

2 オルソポジトロニウムの寿命測定の実験装置 (担当:長島 駿)

2.1 Set Up

セットアップは図6の様になっている。

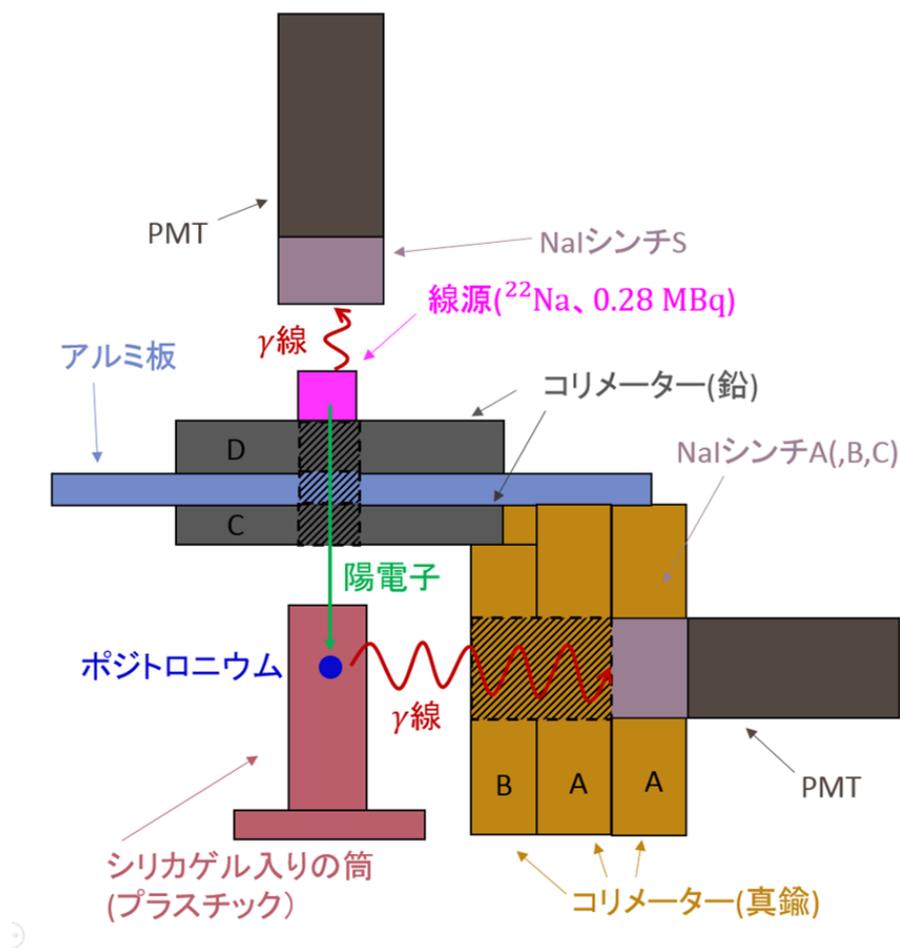


図6: set up

線源の ^{22}Na から上方に 1275 keV の γ 線が放出されて、下方に陽電子が出たときのイベントを4つの NaI(Tl) シンチレーターを使って検出する。1275 keV の γ 線はシンチ S に入る。下方に出た陽電子は、シリカゲル中の電子と反応してポジトロニウムが生成される。ポジトロニウムはシリカゲル中を殆ど移動せず、 γ 線に崩壊する。今回の測定対象は、3本の γ 線に崩壊するオルソポジトロニウムである。そして、コリメーターを通った γ 線はシンチ A、又は B、或いは C に入る。図7a から図12 までに出てくる長さの単位は、全て mm である。図7a から図8b までは、コリメーターの図である。

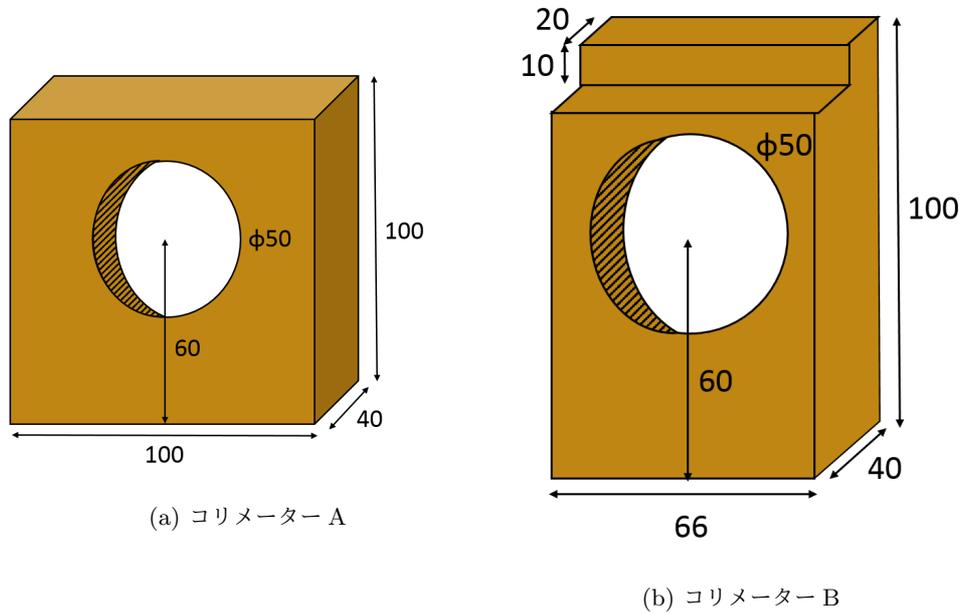


図 7: 真鍮製のコリメーター

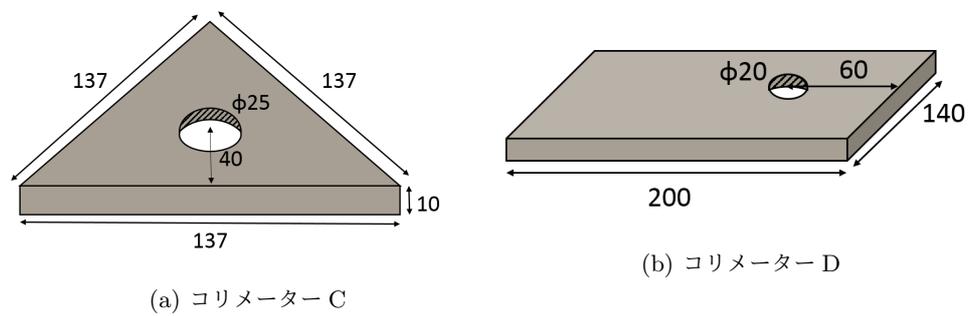


図 8: 鉛製のコリメーター

コリメーターをつけている理由は、後の解析のために γ 線が入ってくる方向を限定する事と、線源とは無関係なところからくる放射線を検出するのを避ける事である。

次に、図 9 はシンチの図である。

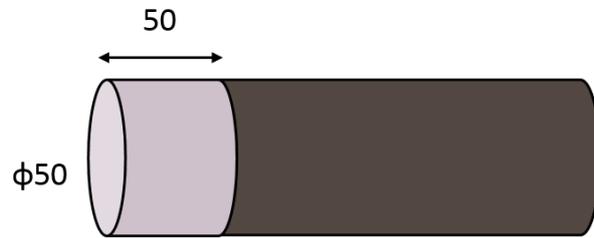


図 9: 4 つの NaI シンチレーターと PMT

4 つのシンチは、全て同じ型番のものを用いた。シンチレーターの製造会社は SCIONIX 社、型番は 51C51、形は円筒状である。PMT の製造会社は浜松ホトニクス、型番は R3290-02 である。

図 10 にある筒はシリカゲルの粒で満杯にした。

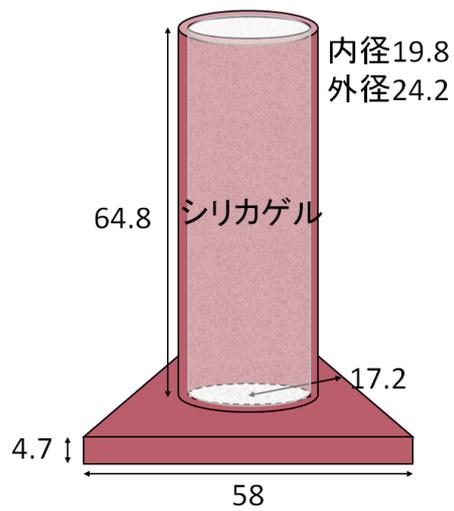


図 10: シリカゲル入りの筒

図 6 ではシンチ B,C を省略して描いてあるが、現物は図 11 の様に 120° ずつの角度で 3 つのシンチが固定されている。

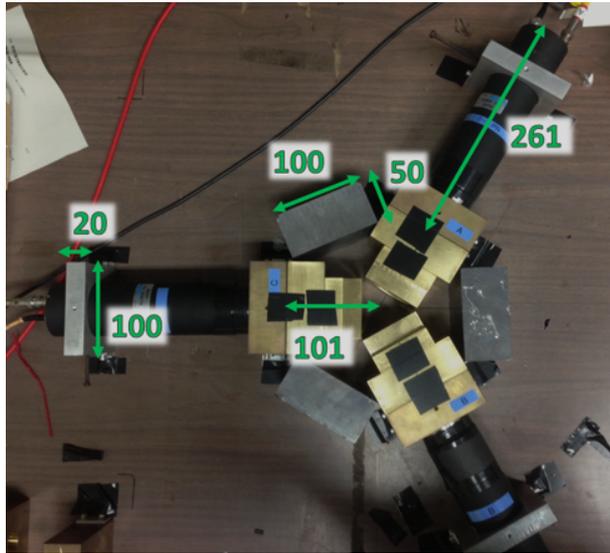


図 11: シンチ A,B,C の俯瞰図

3つのシンチを等方的に置いた理由は、シンチ A,B,C が対等になるためそれらのシンチからのデータを単純に比較する事が出来るからである。

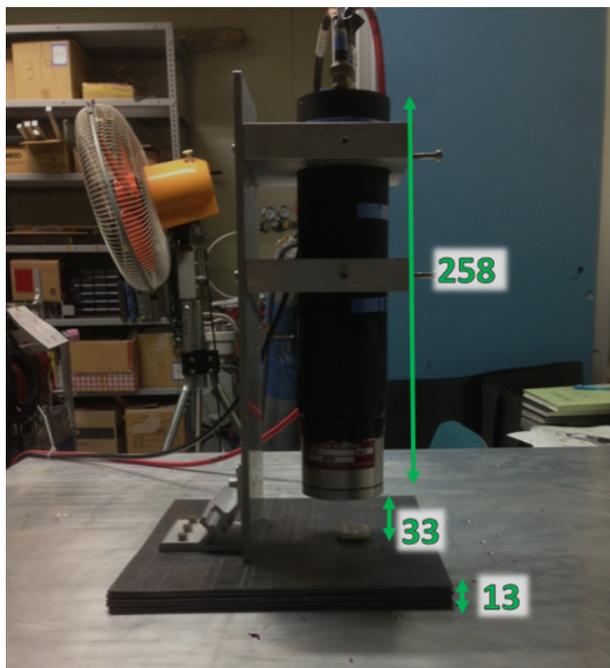


図 12: シンチ S

2.2 Calibration

生データのキャリブレーションの話に入る。シンチ A で検出したイベントの ADC 分布は、図 13 の様になった。

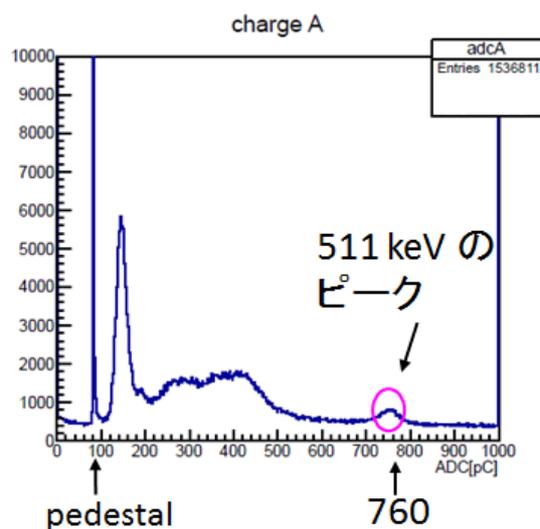


図 13: シンチ A での ADC 一次元ヒストグラム

ピンクの丸で囲っているものは、光電効果が起きた時の 511 keV のエネルギースペクトルに相当する。そして 80 pC 辺りにある細いピークは、ペDESTAL である。各シンチにはある程度以上の大きさの信号しか入らないようにスレッシュホールドをかけている。そのため、一見ペDESTAL は入って来ないように思えるが、今回の測定方法では、実はそうではない。なぜなら、シンチ A,B,C のうち 1 つ以上にスレッシュホールドを超えた信号が来ればイベントをとるようにしているからである。そのため、例えばシンチ A に γ 線が入っていればシンチ B,C には入ってなくてもそれらのシンチもイベントを取り、その時にペDESTAL が記録される。その集積が、図 13 でのペDESTAL のピークとして表れている。ADC がこのペDESTAL 値のとき、シンチにエネルギーは入っていない。結局、以上に挙げた 2 ヶ所のピークを用いて ADC 値から keV へ変換する一次式を以下の様に立てた。

$$E_A = (0.7674 \times ADC_A - 62.89) \text{ keV}$$

$$E_B = (0.7111 \times ADC_B - 51.97) \text{ keV}$$

$$E_C = (0.7625 \times ADC_C - 54.22) \text{ keV}$$

また、各シンチにかけていた印加電圧は表 1 の通りである。

シンチ A	シンチ B	シンチ C	シンチ S
2120 V	2120 V	2080 V	1900 V

表 1: 各シンチにかけた印加電圧

図 14 は、シンチレータに入って来た信号を PMT で増幅した信号の波形である。

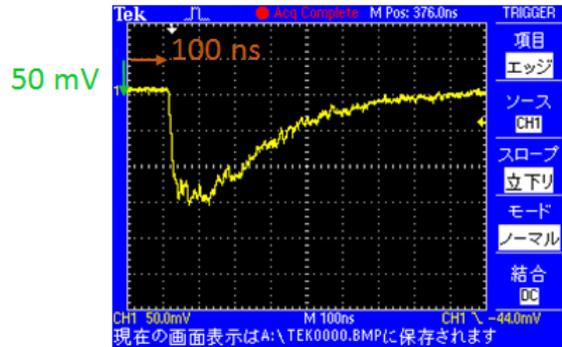


図 14: オシロスコープでの波形

電圧が上がる時は直線的であり傾きが急だが、下がる時は直線的でなく傾きは緩やかである。図 14 を見ると、40 nsec 程度でピークに達している。また、信号はピークに達した後は指数関数的に減少している。信号がピークの半分の値になるまでの時間は約 180 nsec である。ここで、シンチレータの時定数は 230 nsec である。その場合、信号が半分になるまでの時間は $230 \text{ nsec} \times \log 2 = 160 \text{ nsec}$ となる。この値は図 14 から見て取った 180 nsec という値に近く、一貫性がある。

2.3 ScintiS

装置上方に取り付けたシンチ S の説明に移る。因みに、シンチ S の S というのは start の略で、シンチ S の、low の信号が入った時刻を時間の基準としている。

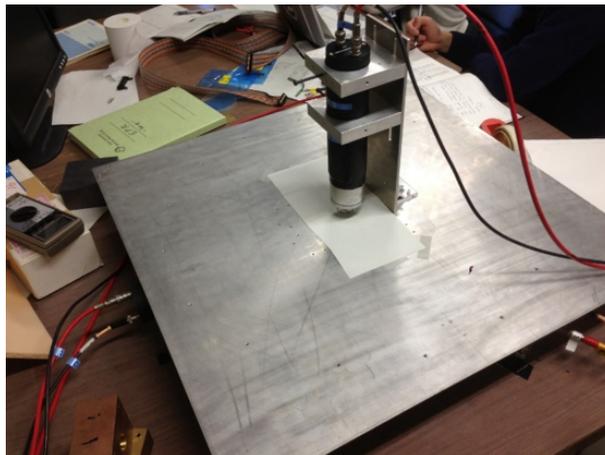


図 15: シンチ S の画像

このシンチ S から続く回路では他のシンチよりも high でのスレッシュホールド値を高く設定して、1275 keV の γ 線だけを取るようにした。シンチ S からの回路は図 16 のようになっている。

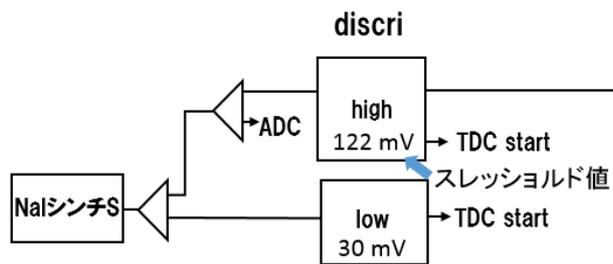


図 16: 回路の一部

2.4 Circuit

回路の全体像は、図 17 のようになっている。

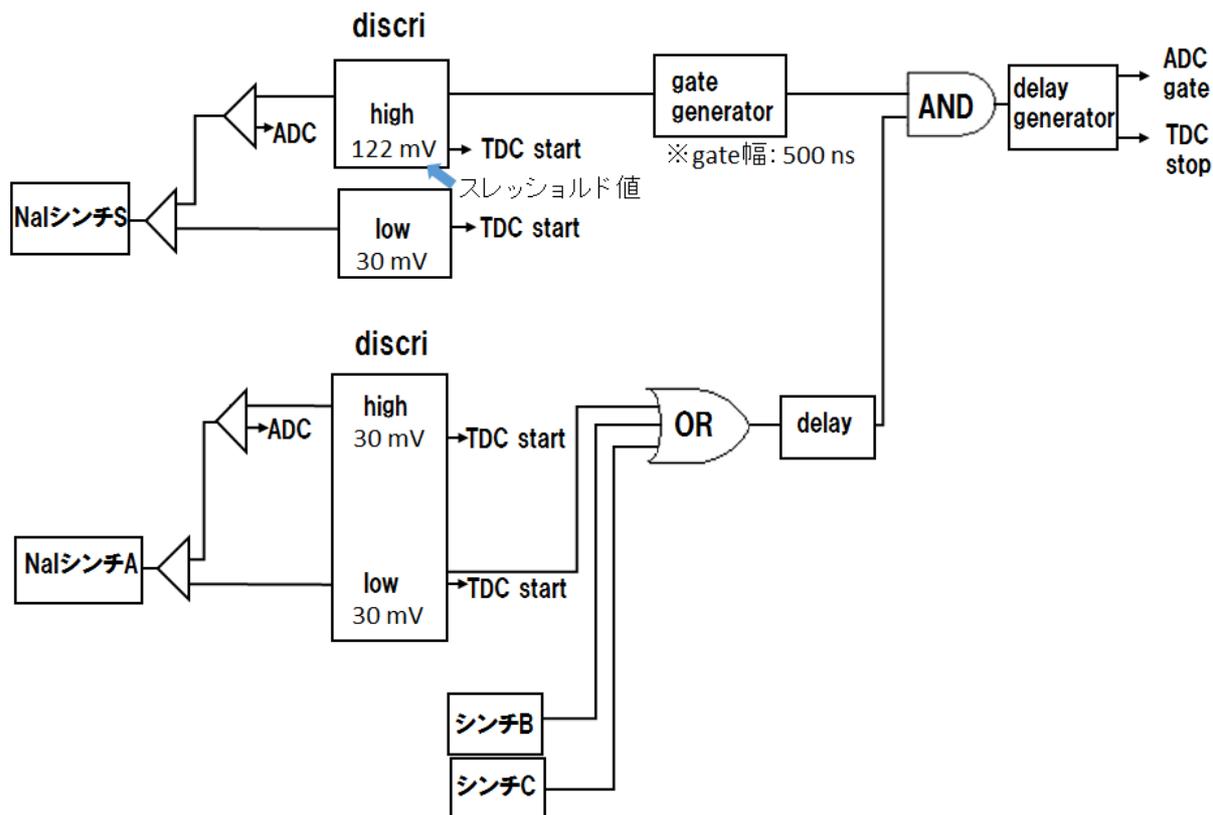


図 17: 回路

また、ADCの製造会社は豊伸電子であり、型番はV005である。TDCの製造会社はREPIC、型番はTMCである。ここで、回路の一部は省略している。シンチB,Cも、シンチAと同様の回路を通る。シンチSに信号が入ると、ディスクリでスレッシュホールドにかけられ、それを通った信号はゲートジェネレーターで500 nsの矩形波になる。シンチAかBかCに信号が入ったときは、信号はORの回路を通過してディレイによって遅

らされる。この二つが AND 回路に入り、二つが同時に鳴ったとき、イベントとして検出される。OR 回路の直後にディレイ回路がある理由は、シンチ A(B,C) からの信号をある程度遅らせなければ、シンチ S とシンチ A(B,C) とにほぼ同時に信号が入った場合に、シンチ A(B,C) からの信号の一部が矩形波からはみ出てしまうからである。AND を通った信号はまたディレイ回路によって遅らされ、コンピュータに繋がってデータが記録される。low と書かれた部分と high と書かれた部分がある。ディスクリミネーターの前の部分で、ディバイダーを通して大きさが元の半分になった信号が low の部分に、更にもう一回半分になった信号が high の部分に入っている。このようにしたのは信号が入った時刻を求めるためである。どのようにしてそれを求めるかは、次に説明する。

2.5 Threshold

図 18 には、図 17 での回路の一部が描いてある。

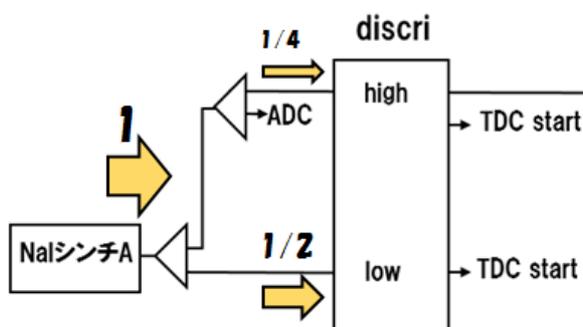


図 18: ディスクリミネーターに入る信号の図解

ディスクリミネーターでは、どちらも同じ値のスレッシュヨルドが設定されている。ディスクリミネーターに入る信号の模式図を図 19 に示した。

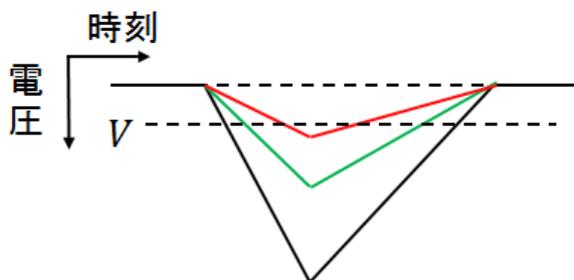


図 19: high 信号と low 信号 1

元の信号の波形は黒線で表している。low 信号と high 信号はそれぞれ、緑線と赤線である。スレッシュヨルドは点線で表している。high 信号の高さは low 信号の半分になっているため、high 信号にかかるスレッシュヨルドは low 信号のものの 2 倍である。図 20 は、low 信号、high 信号を元の信号の高さに拡大して両者でのスレッシュヨルドも併せて拡大した図である。low 信号がスレッシュヨルドを超える時刻を t_1 、high 信号がスレッシュ

しヨルドを越える時刻を t_2 とし、ディスクリミネーターに信号が入り始めた時刻を t_0 とする。この t_0 が、データとして求めたい値である。

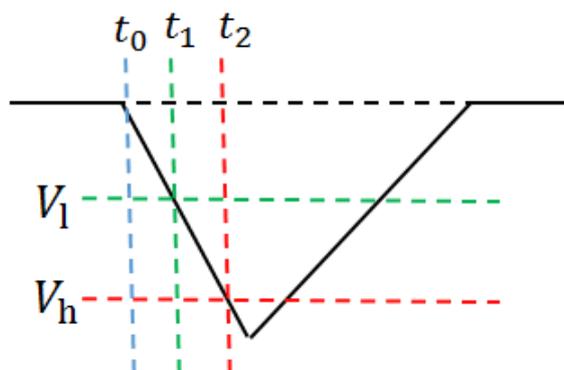


図 20: high 信号と low 信号 2

ここで縦と横の長さの比から、 t_0 はこの様に表せる。

$$t_1 - t_0 : t_2 - t_0 = V_l : V_h (= 1 : 2)$$

$$\implies t_0 = 2t_1 - t_2$$

2.6 Rate Count

レート測定の話に入る。下の表には、シンチ A,B,C に入ったイベントの頻度を書いてある。

シンチ	イベント数	ノイズ数
A	18400 ± 43(10 sec)	2630 ± 16(10 sec)
B	15800 ± 40(10 sec)	2570 ± 16(10 sec)
C	17300 ± 42(10 sec)	1860 ± 14(10 sec)

ノイズは、線源とは別のものが原因でカウントされたイベントである。そのため、線源を外した上で測定したレートをノイズとした。図 2.6 は OR と AND それぞれに信号が入ったレート、そして Trigger でのレートである。

部分	測定前	測定終了直後
OR	55000 ± 74(10 sec)	51800 ± 72(10 sec)
AND	67 ± 2(20 sec)	48 ± 2(20 sec)
Trigger	47 ± 2(20 sec)	34 ± 1(20 sec)

Trigger は、コンピュータでイベントをカウントしたレートになっている。これらのレートは、測定開始前や測定を終了した時、また測定を中断した時に測るようにした。

2.7 Summary

今回のセットアップの狙いは、スタートの信号を取る役目のシンチ S では 1275 keV の γ 線のみを取るようにした。シンチ A,B,C のいずれかに信号が入ったとき、信号が入った時刻とそのエネルギーを計測する。回路では、ディスクリミネーターのスレッシュホールドを超えた時刻を測定する事で、信号の鳴った時刻を求めた。そして、回路を通った電荷量をキャリブレーションして、入ってきた γ 線のエネルギーを測定した。今回の実験で測定したかったのは寿命であるが、エネルギーを測ることで、後の解析でカットすべきイベントを判定できる。

2.8 Glossary

これからの解析等で使う用語の解説をする。

timeS シンチ S に γ 線が入った時刻。イベントの開始を表す。

time-h high 信号がスレッシュホールドを超えた時刻。

time-l low 信号がスレッシュホールドを超えた時刻。

timeI(I=A,B,C) シンチ I に γ 線が入った時刻。

$E_I(I=A,B,C)$ シンチ I に入った γ 線のエネルギー。これは、キャリブレーション済みの数値を指す。

3 オルソポジトロニウムの崩壊のモンテカルロによる評価 (担当:四ツ永 直輝)

3.1 シミュレーションのモチベーション

本実験ではバックグラウンドを減らすためにコリメーターを使用する。そこでコリメーターの有無また材質によりバックグラウンドの量がどう変化するかを見積もりコリメーターの最適化をはかる。また前章においてポジトロニウムはオルソポジトロニウムとパラポジトロニウムがありそれぞれ崩壊において γ 線のエネルギー分布が変化する。本実験で観測すべきオルソポジトロニウム由来の γ 線のデータを選択するためにそれぞれの崩壊から生成される $2\gamma, 3\gamma$ のエネルギーをシミュレーションし、そのデータからバックグラウンドとなりうるデータを選別しデータ解析に最適化をはかる。さらに、本実験の装置においてオルソポジトロニウムの崩壊により生成された 3γ が NaI シンチレータに入るアクセプタンスを見積もる。シミュレーションを行う上で導入したソフトウェアは「geant4」である。

3.2 シミュレーションの準備

3.2.1 ^{22}Na の β 崩壊による陽電子

文献 [2] から ^{22}Na の β 崩壊による陽電子を放出する確率は

$$P(p)dp \propto (\sqrt{m^2 + p_{Max}^2} - \sqrt{m^2 + p^2})^2 p^2 dp \quad (22)$$

となっている。またこの陽電子の持ちうる最大の運動量 p_{Max} は

$$p_{Max} = 543 \text{ keV}/c \quad (23)$$

である。この (22) 式をモンテカルロでシミュレーションしたものが図 21 となる。

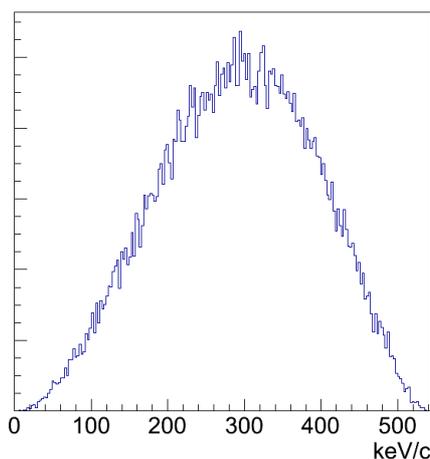


図 21: シミュレーションによる ^{22}Na の β 崩壊による陽電子の運動量分布

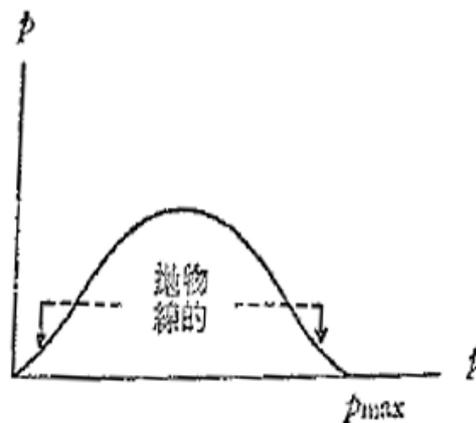


図 22: 文献による ^{22}Na の β 崩壊による陽電子の運動量分布 (出典:[2])

この結果が図 22 と一致するのを確認し、一致したのでこのプログラムを陽電子のシミュレーションに使用した。またこのプログラムを使い geant4 のシミュレーションから陽電子の止まる位置を見積もると図 23 となる。

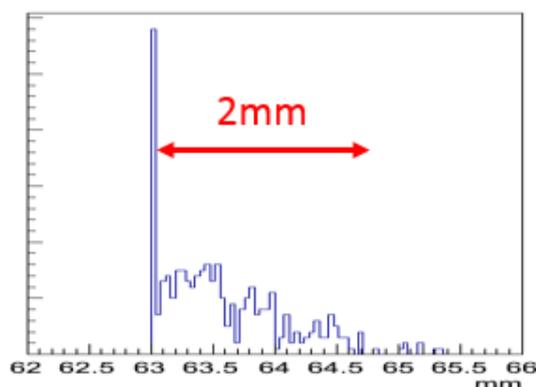


図 23: 陽電子の止まる位置

図 23 での分布の始まりがシリカゲルを詰め始めた位置に対応していて、ピークは図 21 で低いエネルギーをもつ陽電子がシリカゲルに衝突し止まったものである。ここで分布は 2 mm 続いており、ここから陽電子はシリカゲルに衝突するとすぐ止まることがわかる。この結果から筒に入れるシリカゲルの高さを決定した。

3.2.2 3γ の発生の仕方

ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 θ を図 24 のように定義する。

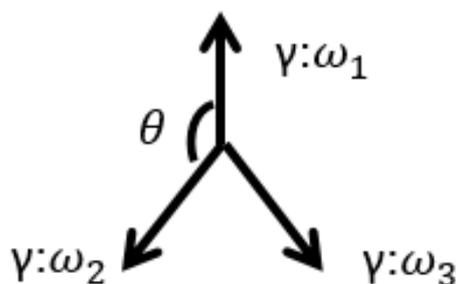


図 24: ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 θ の定義

文献 [1] からオルソポジトロニウムになる反応断面積は

$$\int_0^m \int_{m-\omega_1}^m \frac{(\omega_1 + \omega_2 - m)^2}{\omega_1^2 \omega_2^2} d\omega_2 d\omega_1 \quad (24)$$

に比例し、 $\omega_1 + \omega_2 > m$ に入るものを選択し、 ω_1 、 ω_2 を式 (24) においてモンテカルロ法で計算した結果が図 25、27 である。

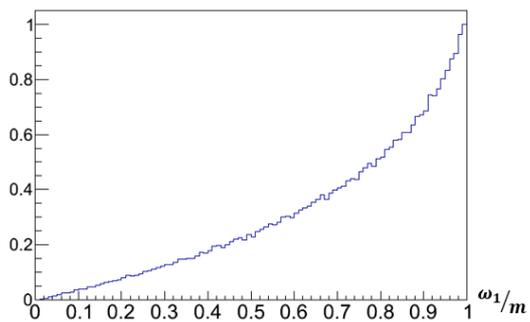


図 25: シミュレーションによる ω_1 の分布

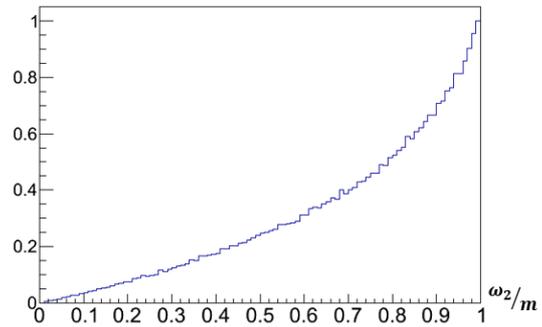


図 26: シミュレーションによる ω_2 の分布

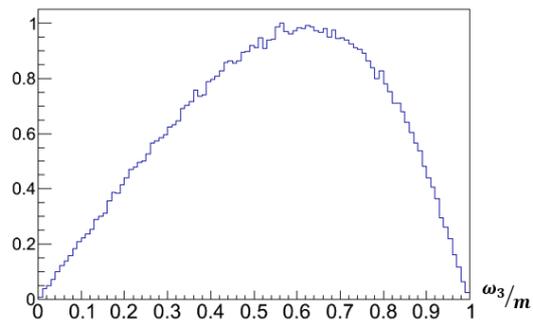


図 27: シミュレーションによる ω_3 の分布

また θ の角度分布の結果が図 28 である。

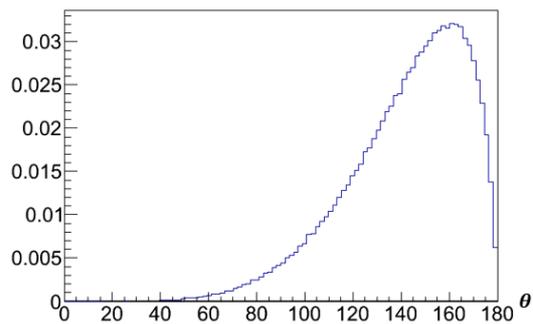


図 28: シミュレーションによる θ の角度分布

このプログラムを geant4 に使用した。

3.3 geant4

3.3.1 geant4 とは

geant4 は素粒子が物質中で起こす複雑な反応を乱数を用いて計算するモンテカルロ法に基づいてシミュレーションすることのできるソフトウェアである

3.3.2 γ 線の物質との反応

γ 線と物質との反応には光電効果、コンプトン効果、電子対生成の 3 つの反応がある。

■**光電効果** γ 線が物質に入射すると、軌道電子に全てのエネルギーを与え、その結果電子が原子から飛び出す。この現象を光電効果という。光電効果のおこる確率は、原子核との結びつきの強い電子ほど大きいので、実際 K 電子によって起こる。光子のエネルギーを E 、物質の原子番号を Z とすると、光電効果のおこる確率 τ は

$$\tau \propto Z^n/E^3 \quad (25)$$

となる。ここで n はエネルギーの低い時 3、高い時 5 となる。したがって光電効果は吸収物質の原子番号が大きく γ 線のエネルギーが小さいほど大きい。

■**コンプトン効果** 光子のエネルギーが高くなると軌道電子の束縛エネルギーが無視できるようになり、光子が吸収物質の電子と弾性散乱を起こす。この現象をコンプトン散乱という。光子のエネルギーを E 、物質の原子番号を Z とすると、コンプトン散乱のおこる確率 τ は

$$\tau \propto Z/E \quad (26)$$

となる。したがってコンプトン散乱は吸収物質の原子番号が大きく γ 線のエネルギーが小さいほど大きい。

■**電子対生成** γ 線のエネルギーが 1.02 MeV より大きい場合、それらが原子核の電場と相互作用して消滅し、その場から一対の電子-陽電子が生まれることが可能になる。この現象を電子対生成という。

3.3.3 シミュレーションにおける set up

前章の装置の情報を geant4 に入れた。以下はシミュレーションにおける実験装置*1の立体図である。

*1 ここでのコリメーター C、D は真鍮

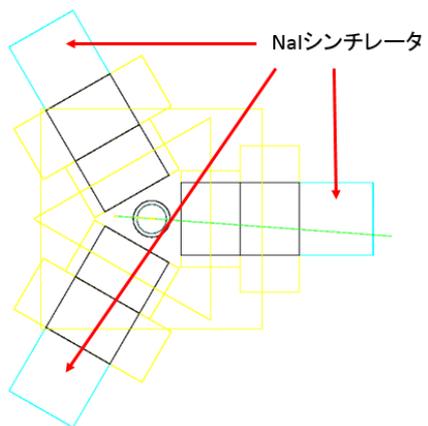


図 29: 上方向からの俯瞰図 (wire)

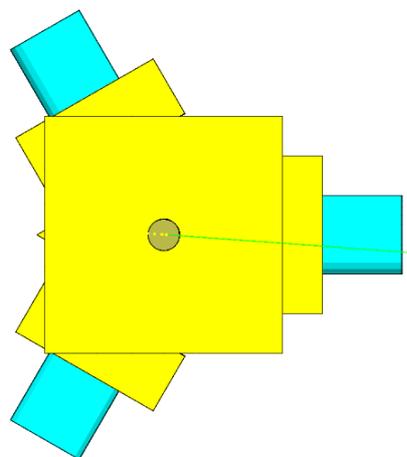


図 30: 上方向からの俯瞰図

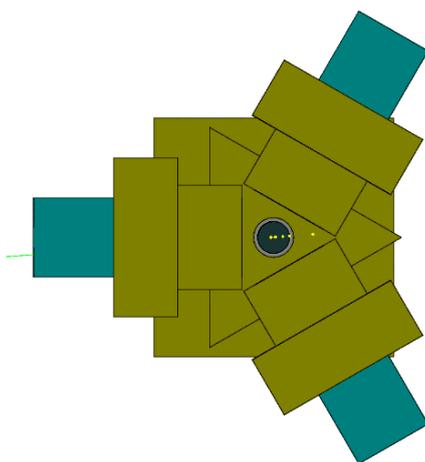


図 31: 下方向からの俯瞰図

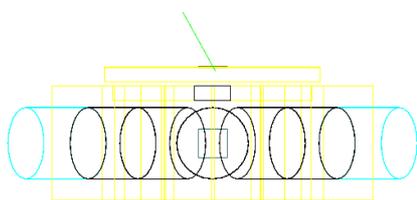


図 32: 横方向からの俯瞰図 (wire)

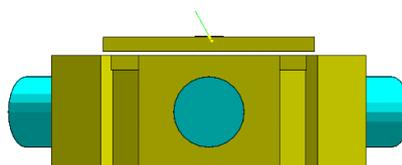


図 33: 横方向からの俯瞰図

3.4 シミュレーションの内容と結果

以下はエネルギー分解 $\sigma = 5.75 \times 10^2 / \sqrt{E} [keV]$ を考慮した場合の γ 線が NaI シンチレータに落としエネルギーのシミュレーション結果のエネルギースペクトルと、 γ 線が NaI シンチレータに入ったアクセプタンスのシミュレーション結果である。

3.4.1 コリメーターの有無によるバックグラウンドの変化

コリメーターがあるとき (C、D:真鍮)、ないときでそれぞれ 511 keV、1275 keV の γ 線を線源から下方向に 10 万イベント発生させた。

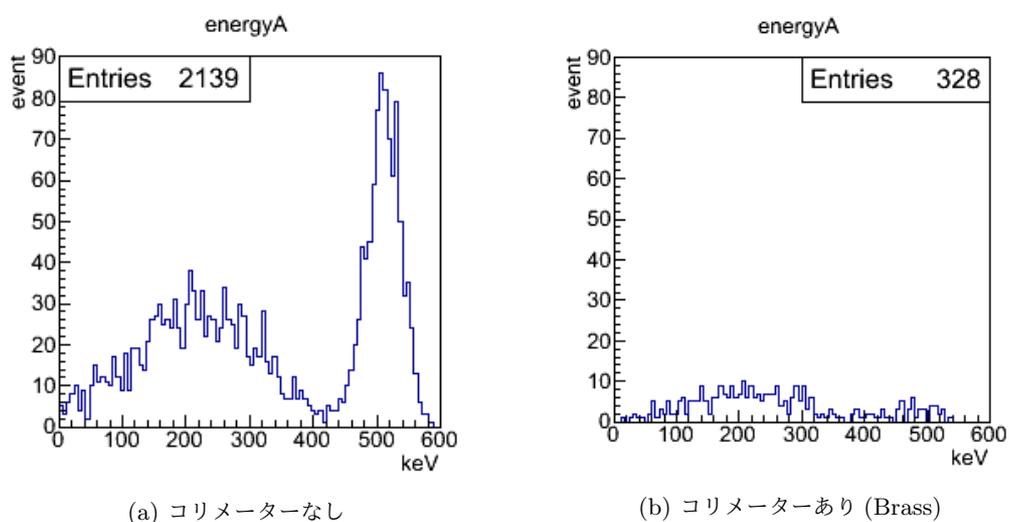


図 34: 511 keV の γ 線

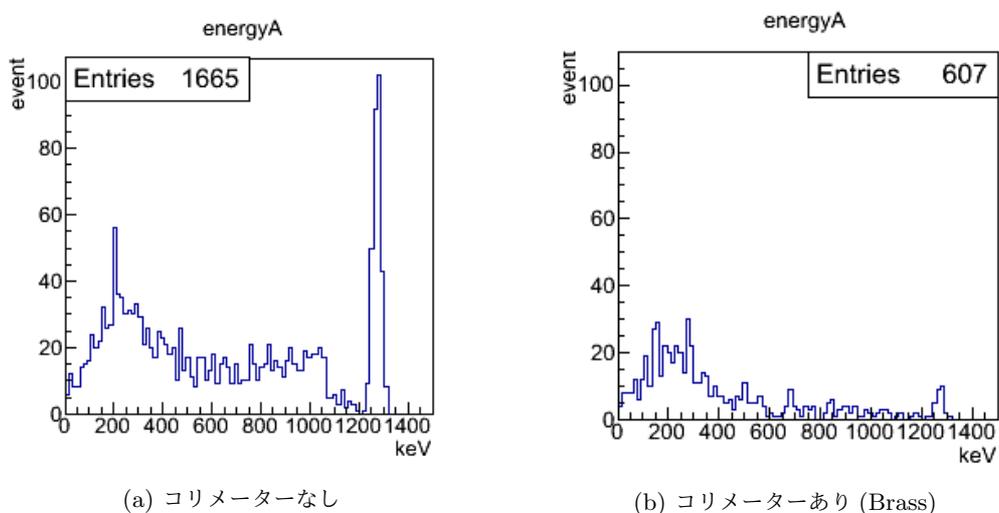


図 35: 1275 keV の γ 線

	なし	あり (Brass)
511 keV	2.1 %	0.3 %
1275 keV	1.7 %	0.6 %

表 2: コリメーターの有無によるアクセプタンス

上図、表よりコリメーターには効果があることがわかった。

3.4.2 コリメーターの材質によるバックグラウンドの変化

コリメーター C、D が真鍮のとき、鉛のときでそれぞれ 511 keV、1275 keV の γ 線を線源から下方向に 10 万イベント発生させた。

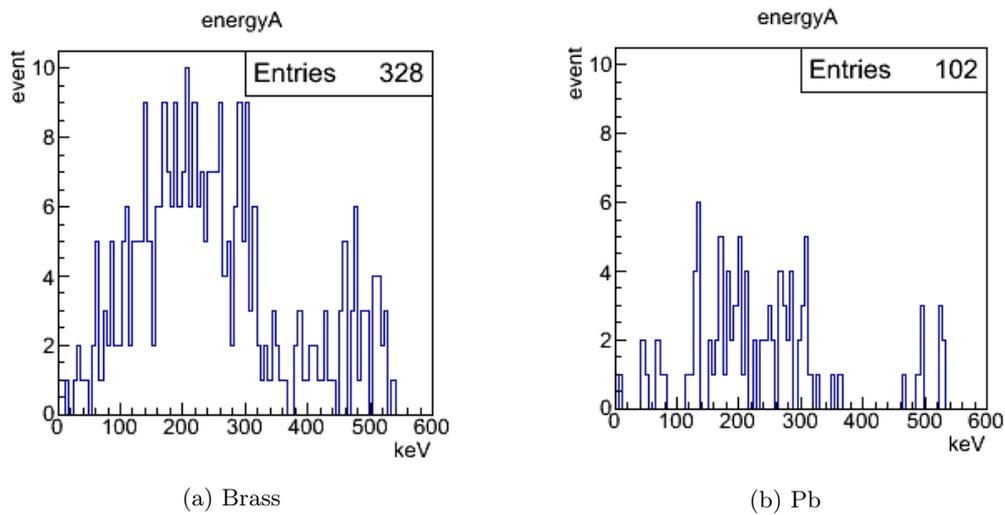


図 36: 511 keV の γ 線

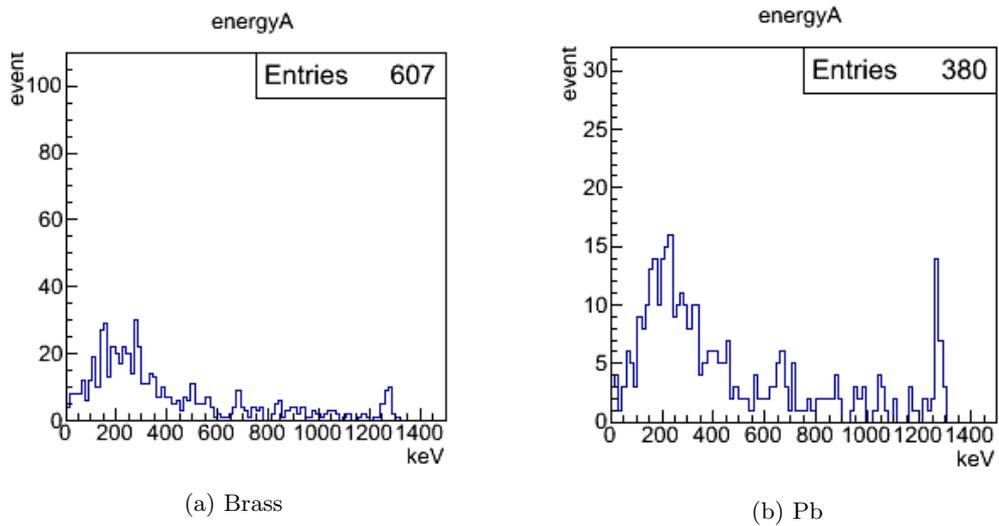


図 37: 1275 keV の γ 線

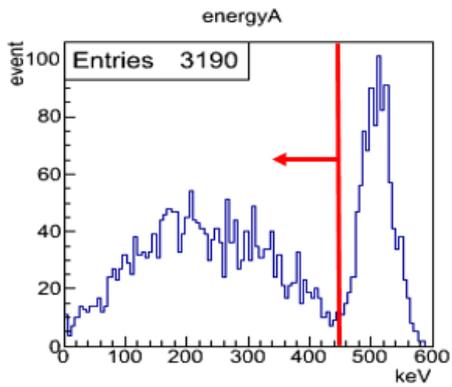
	Brass	Pb
511 keV	0.3 %	0.1 %
1275 keV	0.6 %	0.4 %

表 3: コリメーターの材質によるアクセプタンス

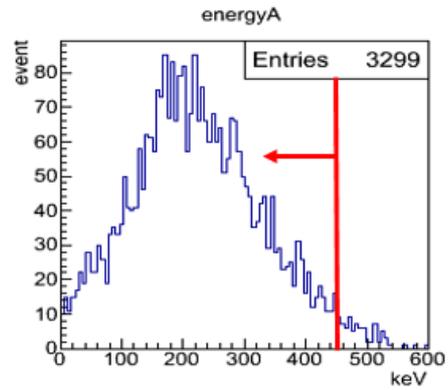
上図、表より真鍮に比べ鉛のほうが効果があることがわかった。

3.4.3 ポジトロニウムのシミュレーション

シリカゲルから 2γ と 3γ をそれぞれ 10 万イベント発生させた。



(a) パラポジトロニウムの崩壊



(b) オルソポジトロニウム

図 38: ポジトロニウムの崩壊

上図からオルソポジトロニウムの崩壊では 511 keV のピークは見られないのでこの部分に cut をかけることができる。

3.4.4 3γ の同時計測

シリカゲルから 3γ を 10 万イベント発生させた。

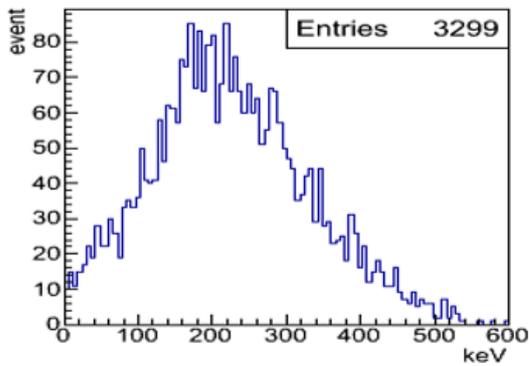


図 39: single-fold

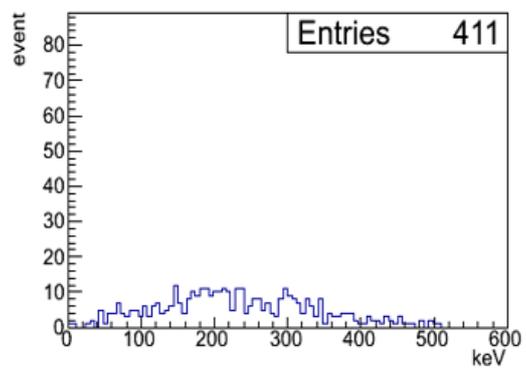


図 40: 2fold

single-fold	2fold
3.3 %	0.4 %

表 4: 3γ のアクセプタンス

上の表から single-fold に比べ 2fold ははるかにアクセプタンスが小さいので本実験では single-fold を観測することとした。

3.5 まとめ

- バックグラウンドとなる 511 keV、1275 keV の γ 線はコリメーターがない場合アクセプタンスはそれぞれ 2.1 %、1.7 %、ある場合それぞれ 0.3 %、0.6 % となりコリメーターは効果があることが分かった。
- バックグラウンドとなる 511 keV、1275 keV の γ 線は材質が真鍮のときそれぞれ 0.3 %、0.6 %、鉛のとき 0.1 %、0.4 % となり、材質を鉛にすることでコリメーターを最適化できた。
- 2γ 、 3γ のグラフからデータ解析の最適化をはかることができ、 3γ が NaI シンチレータにはいるアクセプタンスが 3.3 % となった。

4 オルソポジトロニウムの寿命測定実験の背景事象 (担当:谷岡 凌)

4.1 データ解析

解析をするにあたり、得られたデータから、オルソポジトロニウムの崩壊による γ 線を捉えたと思われる事象を選別する。本実験で得られたデータは図 41 の通りである。

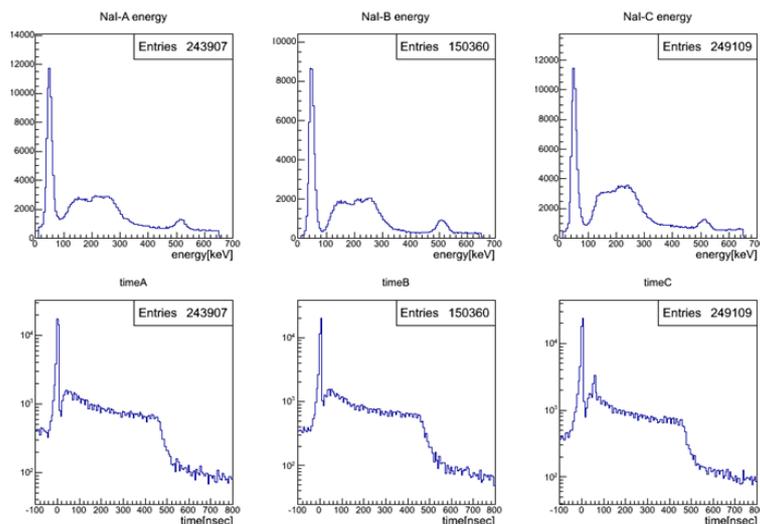


図 41: no cut のヒストグラム

上の図は NaI シンチ A,B,C の、それぞれのエネルギーの分布を表してあり、どのシンチレータにも 511 keV のあたりにピークが立っているのが確認できる。下の図は NaI シンチ A,B,C それぞれに γ 線が飛来してきた時間を表している。本実験では、NaI シンチ S の high 信号によって開かれる gate 幅が 500 nsec であるので、500 nsec で大幅にイベント数が下がっている。

この結果から、バックグラウンドと思われるイベントを除去し、正しいと思われるイベントを選別していく。

4.1.1 geant4 によるエネルギー領域の決定

まずは前章で geant4 を用いたシミュレーションから、今回解析するためのエネルギーの領域を決定する。図 42 は、シリカゲルから直接、それぞれ 3 γ と 2 γ を放射したエネルギー分布のシミュレーション結果である。

この結果から、3 γ 崩壊のときは、2 γ 崩壊のときとは異なり、511 keV のエネルギーピークが立たないことがわかる。そのためこのピークは 3 γ 崩壊によるものではないため除去する。

除去するためのエネルギーの範囲は、2 γ の山が十分になくなるように、得られたデータから上限値を 450 keV に決定した。

また図 41 には、エネルギーが低い領域にピークが立っている。しかし、シミュレーションにはそのようなものは見られない。これは、シンチレータにノイズがなったものだと考えられる。このノイズも十分に除去するために、測定したエネルギー分布から 100 keV 未満を除去した。

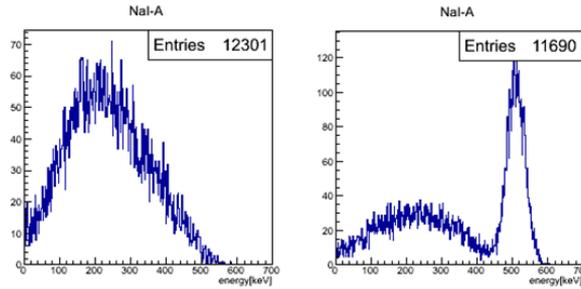


図 42: geant4 でのシミュレーションによるエネルギー分布 (左:3 γ 、右:2 γ)

4.1.2 時間によるデータの除去

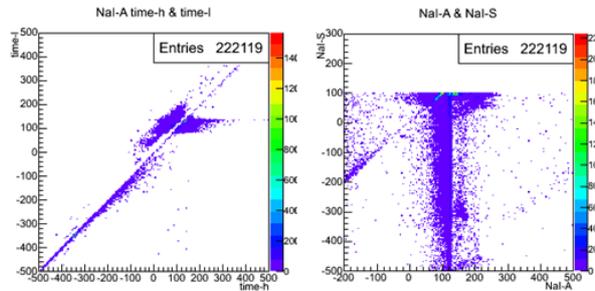


図 43: 左:time-h と time-l の分布
右:シンチ A とシンチ S の時刻の分布

図 43 の二つのヒストグラムは、左がシンチ A に信号が入ったときの二次元ヒストグラムで、横軸が time-h、縦軸が time-l のヒストグラムである。time-l と time-h の定義から、本来は low の信号が入ってから、high の信号が入らなければならない。よって、high 信号の入った時刻が low 信号の入った時刻より早いものを今回は除去する。右のヒストグラムは、横軸はシンチ A で信号になった時刻、縦軸はシンチ S で信号になった時刻をそれぞれ示している。本実験ではシンチ S で 1275 keV の γ 線を捉えてから、シンチ A,B,C でオルソポジトロニウム由来の γ 線を捉えることを目的としているので、シンチ S より先にシンチ A,B,C に信号が入ったデータを除去する。

そして、シンチ A,B,C の 3 つのうち、2 つに同時に信号が入っているデータについても調べたものが図 44 である。二つ信号が入った時の、先に信号が入ったシンチでの時間が横軸、そのあとで信号が入ったシンチでの時間が縦軸である。このヒストグラムをみると、2 つのシンチに信号が入った時に、その 2 つのシンチの信号に時間差があるデータが存在していることがわかる。このようなデータは、オルソポジトロニウムの崩壊を正しく捉えられていないのでこれを除去する。今回は、同時の時間を 20 nsec として、一つ目の信号が入ってから、20 nsec 以上時間が入ってからなった二つ目の信号を排除する。

この 3 つの cut を行うことによるエネルギー、時間のヒストグラムの変化を図 45 に示す。

次に、ADC の測定方法について考える。今回、シンチ S の high 信号によって送られる gate generator からの信号とシンチ A,,B,C の low 信号の OR の信号が同時に送られたとき、AND から信号がでる。この信号

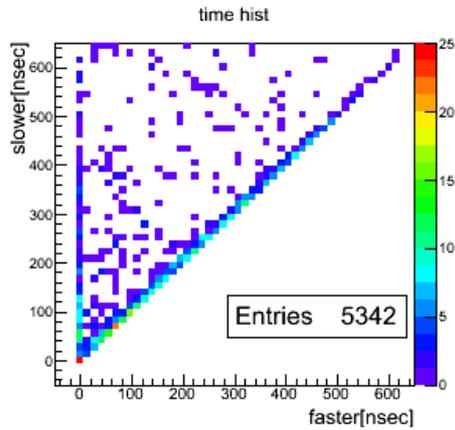


図 44: 2 fold のヒストグラム

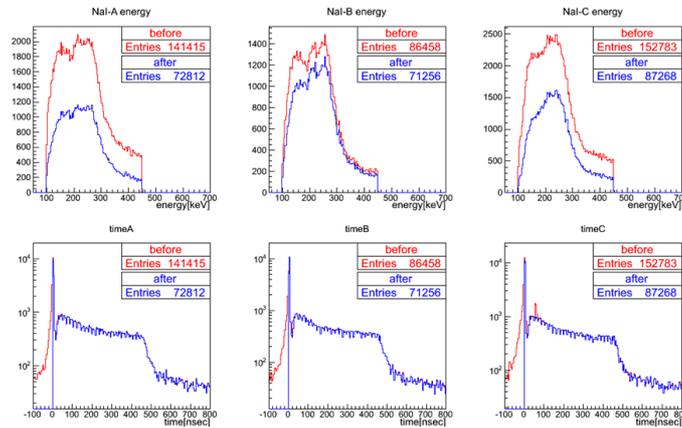


図 45: 時間による cut によるヒストグラムの変化 (赤:cut 前、青:cut 後)

が ADC を測定するための gate の信号となる。たとえば、図 46 のように、シンチ S から high の信号が送られ、それにより gate generator から信号が送られる。そこから少し時間がたってから、シンチ A で信号がなったとき、シンチ A の low 信号が出る。これによって AND の信号が出る。この場合、AND 信号、つまり ADC gate の信号の基準になるのはシンチ A である。

しかし、図 47 のようにシンチ S で信号がなったものとほぼ同時、あるいはそれより早くシンチ A で信号がなった場合、AND の信号は、シンチ S による gate 信号がでた時間にあわせて出てしまう。このような場合、ADC の gate がシンチ S が基準となって出てしまい、このときシンチ A,B,C のエネルギーや時間が正しく測定できなくなってしまう。

図 48 は、シンチ S の high の信号がなった時刻とシンチ A の low の信号がなった時刻との相関を表している。ヒストグラムに現れるシンチ A,B,C の low 信号の時刻が 120~140 nsec のあたりの横線は、シンチ A,B,C が ADC gate の基準になっている。しかし、シンチ S の high 信号の時刻が 140~160 nsec のあたりの縦線は、シンチ S が ADC gate の基準となっているので、この部分を除去する。

除去した結果、0 nsec の山がなくなり、確かに同時に信号が入っていたものを取り除けた。(図 49)

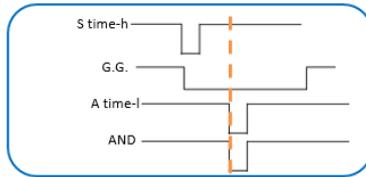


図 46: ADC1

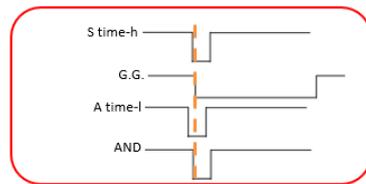


図 47: ADC2

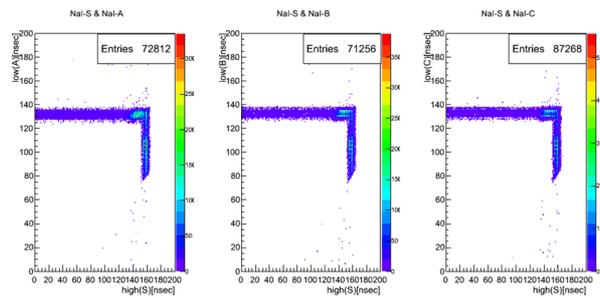


図 48: シンチ A,B,C の time-l とシンチ S の time-h の相関

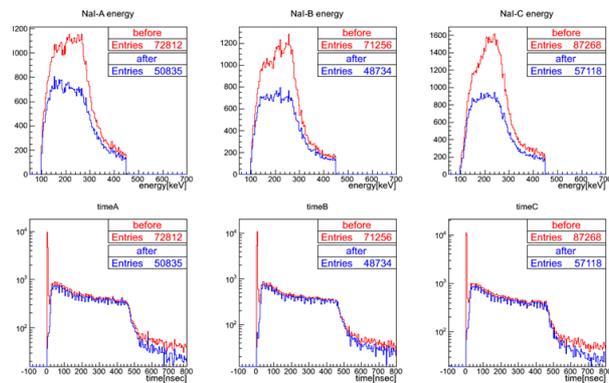


図 49: gate の cut によるヒストグラムの変化

4.1.3 シンチ S の解析

次に、シンチ S のデータから、シンチ S が正しく 1275 keV の γ 線を捉えていると思われるデータを選別する。図 50 は、横軸にシンチ S の信号の ADC 値、縦軸にシンチ S の time-h と time-l の時間差をそれぞれ示している。今回、シンチ S には、1275 keV のエネルギーが ADC で 800 pC に相当するように印加電圧を設定してある。このことを考慮すると、横軸が 800 pC のあたりのデータが正しく 1275 keV の γ 線をとらえていると考えられる。ADC の値が低い領域では、シンチ S が、511 keV の γ 線をとらえてしまった可能性がある。また、1275 keV の γ 線をとらえているならば、波形はほとんど一定であるはずなので、time-h と time-l の時間差はほぼ一定であると考えられる。

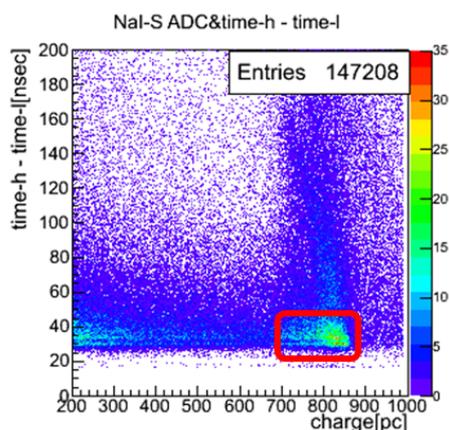


図 50: シンチ S の ADC と time-h と time-l の時間差の相関

以上を考慮して、このヒストグラムの、図の赤い四角で囲んだ部分のみを選んでヒストグラムの変化をみた(図 51) この領域のみを取り出した結果、イベント数が大幅に変化し、100~300 nsec の領域にオルソポジトロンウムのもと思われる寿命直線が見えた。

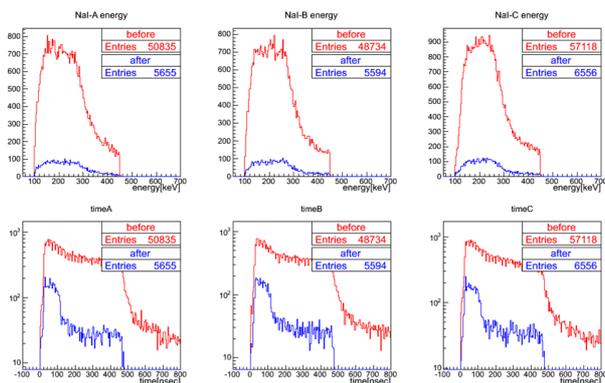


図 51: シンチ S の cut によるヒストグラムの変化

4.1.4 シンチ A,B,C の解析

time-h と time-l の時間差について、シンチ A,B,C でも調べてみる。図 52 において、左の図は横軸をエネルギー、縦軸を time-h と time-l の時間差にとったもので、右の図は横軸を時間、縦軸を time-h と time-l の時間差にとったものである。

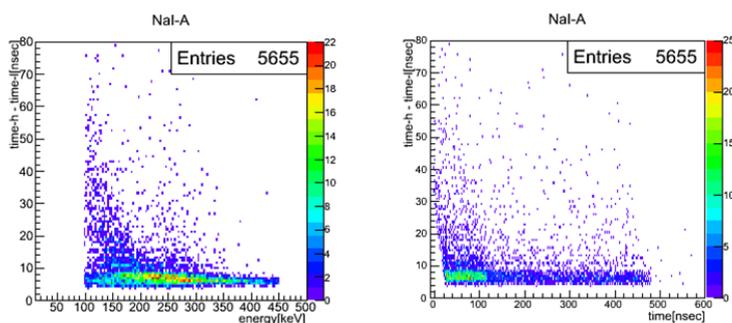


図 52: 左:エネルギーと time-h、time-l の時間差
右:時間と time-h、time-l の時間差

この二つのヒストグラムから、time-h と time-l の時間差が大きい領域ではエネルギーが低い領域に存在することが多く、時間も 0~100 nsec に存在することが多い。崩壊による γ 線のエネルギーは、崩壊までの時間に依存しないので、この領域を除去する。

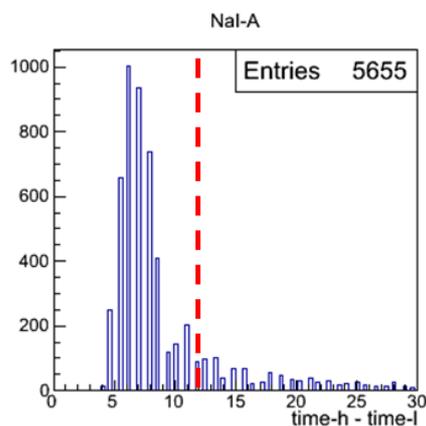


図 53: シンチ A の time-h と time-l の時間差の分布

除去する方法として、time-h と time-l の時間差の 1 次元ヒストグラム (図 53) から除去する領域を決定する。今回、分解能のために 12 nsec のあたりのピークも除去せずに残した。時間差が大きいものを取り除いたところ、確かにエネルギーの低い領域が減ったことが確認できる。(図 54)

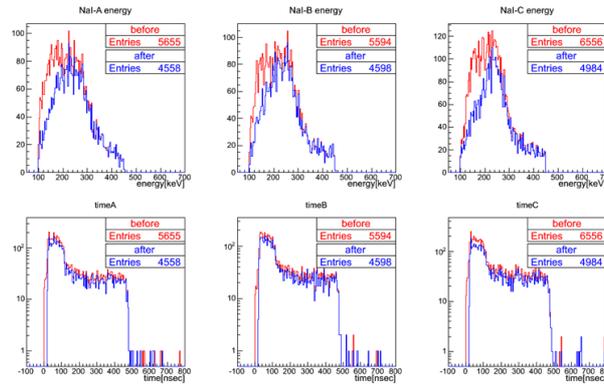


図 54: time-h と time-l の時間差による cut による変化

4.2 全 cut 後のヒストグラム

このすべての cut を行った結果、ヒストグラムは図 55 のようになった。

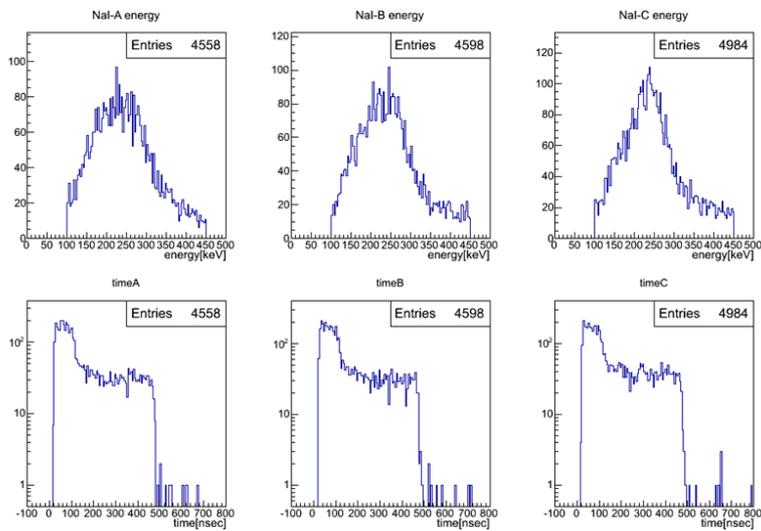


図 55: 全て除去を行った後のヒストグラム

エネルギーの分布は、geant4 での 3γ のシミュレーションの分布に近い形となっている。時間の分布では、100~300 nsec の領域にオルソポジトロニウムの寿命があると考えられ、300~500 nsec の領域は accidental である。

4.3 まとめ

それぞれの cut によるヒストグラムの変化を表にまとめた。

cut	シンチ A	シンチ B	シンチ C
no cut	243907	150360	249109
エネルギー	141415	86458	152783
時間の cut	72812	71256	87268
ADC gate	50835	48734	57118
シンチ S の cut	5655	5594	6556
time-h と time-l の時間差	4558	4598	4984

表 5: cut によって選別されるイベント数

5 結果 (担当:長谷川 大晃)

5.1 解析概要

- 解析方法

background を削減したイベントサンプルから得た NaI-A,B,C の時間分布を足し合わせて得た分布において以下の Fitting 関数を用いて fit する。

- Fitting

Fitting 関数は以下である。

$$N(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \beta \quad (27)$$

β はアクシデンタルを考慮してのものである (図 56)

5.2 時間分布

A,B,C の時間分布をすべて足し合わせたものは以下のようなものである

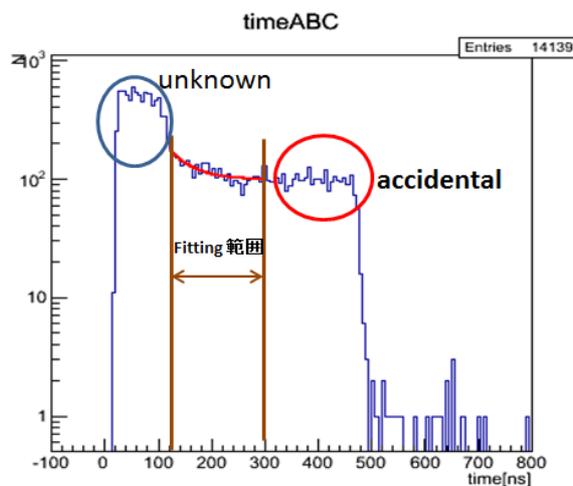


図 56: timeABC

- $0 \text{ [ns]} \leq \text{timeABC} \leq 100 \text{ [ns]}$ の領域については詳しいことはわからないが、時間に関して一定に入力された信号が分解能の為、ガウシアンで落ちていると考えている。
- $300 \text{ [ns]} \leq \text{timeABC}$ の領域についてはアクシデンタルであると考えている。これは以下の原因が考えられる。今回用いた線源 ^{22}Na が 0.28 [MBq] であることから、計数率が大きく、例えばシンチレータ S に 1275 [keV] の γ が入ったがシンチレータ A,B,C には γ が入らなかった事象 X の次に、その事象とは別な事象 Y による γ が A,B,C に入った場合、X で開かれたゲート内で Y が捉えられてしまうことが考えられる。これらは全く相関のない事象なので、そのときの時間分布はランダムになる。このような原因で平らな分布になっていると考えられる。

- $100 \text{ [ns]} \leq \text{timeABC} \leq 300 \text{ [ns]}$ の領域において今回測定対象とするオルソポジトロニウムの decay-line が見える。

以上から fitting 範囲は以下のように決定した。

$$120 \text{ [ns]} \leq \text{timeABC} \leq 300 \text{ [ns]}$$

5.3 β の決定

β の決定は accidental を fit することで得た。^{*2}A,B,C それぞれの β の値は以下のようになった。

表 6: β の値

NaI	β [/bin]
A	30.2 ± 1.4
B	28.8 ± 1.3
C	35.4 ± 1.5

これを用いて fit していく。なお [/bin] の意味は $-100 \text{ [ns]} \sim 800 \text{ [ns]}$ の範囲で bin 数を 150 にしたときの β の値という意味である。^{*3}

5.4 Fitting

fit した結果は以下のようになった。

表 7: fit 結果

fit-parameter	value
N_0	97.9 ± 44.5
τ [ns]	48.4 ± 7.0

次に β の誤差を考慮するが、A,B,C の β 全てが 1σ 大きくなった場合と、A,B,C の β 全てが 1σ 小さくなった場合について述べる。結果は以下のようにまとまった。

この時の系統誤差 σ_β について考える。A,B,C の β 全てが 1σ 大きくなった場合の測定値を $\tau_{\beta+1\sigma}$ とし、A,B,C の β 全てが 1σ 小さくなった場合を $\tau_{\beta-1\sigma}$ とすると、以下のように定義した。

$$\sigma_\beta \equiv \frac{|\tau - \tau_{\beta+1\sigma}| + |\tau - \tau_{\beta-1\sigma}|}{2}$$

これより

$$\sigma_\beta = 9.1 \text{ [ns]} \tag{28}$$

^{*2} β を free parameter にしても結果はあまり変わらなかったが、この場合 β が accidental よりやや小さくなった

^{*3} 例えば、bin 数を半分にしたならば β の値は 2 倍になるということ

表 8: β の誤差込みの結果

β	lifetime[ns]
$\beta + 1\sigma$	40.0 ± 6.2
β	48.4 ± 7.0
$\beta - 1\sigma$	58.2 ± 7.9

5.5 測定値について

オルソポジトロニウムの理論値は 140 [ns] であったが今回得られた測定値はそれよりも小さい。そこでここで測定値を吟味することにする。その方法と目的を以下に述べる。

1. 比較実験

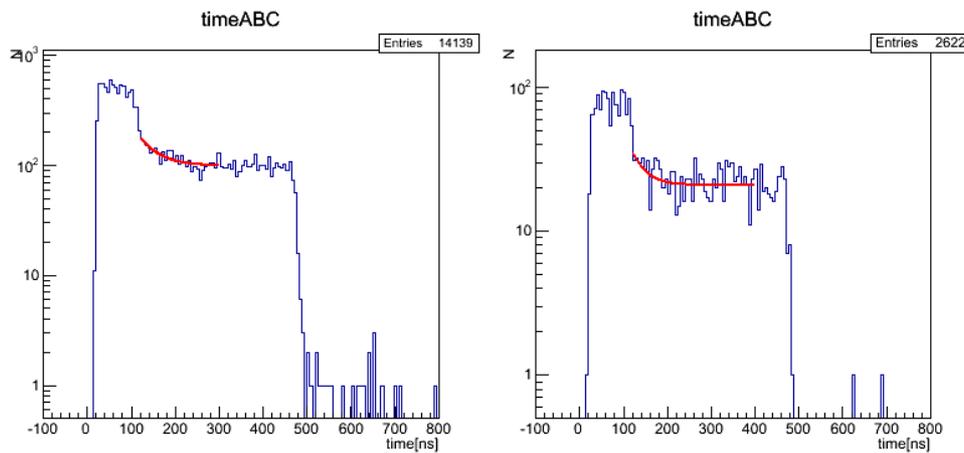
目的：確かにシリカゲル設置による、崩壊現象を見ているかどうかの検証

2. A,B,C ごとの fit

目的：A,B,C のどれか 1 つが測定値に影響している可能性はないかの検証

5.5.1 比較実験

シリカゲルの入った筒を取り除いて行った実験との比較をする。シリカゲルのある場合とない場合^{*4}の時間分布は以下のようなものである。



(a) シリカゲル有りの場合

(b) シリカゲル無しの場合

また fit の結果は以下となった。

これよりシリカゲルのある場合は 2σ 以内で有意に崩壊現象があると言え、また前章の selection において 3γ のエネルギー領域を選択しているため、この崩壊現象はオルソポジトロニウムによるものだと考えられる

^{*4} シリカゲルがない場合は統計量が少なく β を決定することができなかったため、 β を freeparameter にして、100[ns]~400[ns] の範囲で fit した。また測定日数はシリカゲル有りが 14 日間、シリカゲル無しが 10 日間である。

表 9: 比較実験

シリカゲル	N_0	τ [ns]
有り	97.9 ± 44.5	48.4 ± 7.0
無し	1029 ± 2585	28.4 ± 15.0

ことがこの比較実験で分かった。シリカゲルのない場合は有意に崩壊現象があるということができなかった。

5.5.2 A,B,C ごとの fit

A,B,C それぞれの fit 結果は以下ようになった

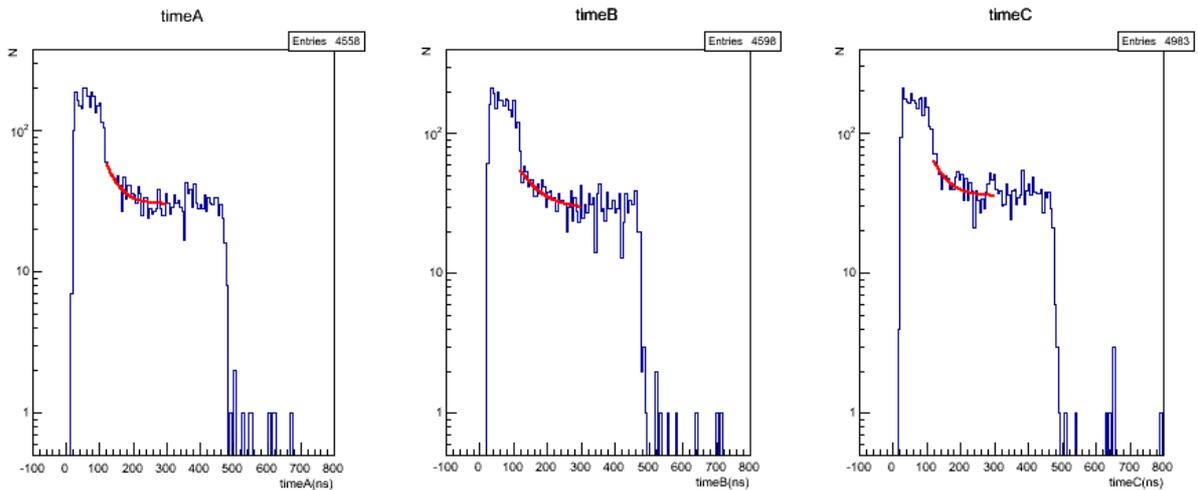


図 58: A,B,C それぞれの fit

表 10: A,B,C ごとの fit 結果

NaI	N_0	τ [ns]
A	787 ± 742	36.5 ± 8.7
B	213 ± 127	57.2 ± 12.4
C	565 ± 632	40.2 ± 12.4

これより A,B,C 全てにおいて測定値は理論値より低く出ている。これらを平均して、また β の誤差を考慮しても 5.4 の結果と誤差内で変わらない (表 11)

このことから A,B,C どれか 1 つが測定値に対して影響していることはなかった。

表 11: β の誤差込の結果

β	lifetime[ns]
$\beta + 1\sigma$	37.3±18.0
β	44.6±19.6
$\beta - 1\sigma$	53.4±21.9

5.6 bin 幅と結果の関係

ここでは時間分布における 1bin の幅を変えたときに結果がどのようなようになるかについて論じる。これまでにある時間分布では 1bin を 6 [ns] としていたが、それを以下のように変化させる。

bin 幅 : 3 , 4.5 , 6 , 9 , 18 [ns]

すると結果は以下のようになった。

表 12: bin 幅と fit 結果

bin 幅 [ns]	lifetime[ns]
3	43.0±6.0
4.5	45.5±6.6
6	48.4±7.0
9	43.4±5.4
18	45.6±5.7

このときの系統誤差 σ_{bin} について述べる。上記の測定値の平均値を $\bar{\tau}$ とし 1bin 幅の幅を変えていないとき (6 [ns]) の測定値を τ としたとき以下のように定義する。

$$\sigma_{bin} \equiv |\tau - \bar{\tau}|$$

これより

$$\sigma_{bin} = 3.2 \text{ [ns]} \quad (29)$$

5.7 Fit 範囲と結果の関係

最後にここでは Fit 範囲の下限値を変化させたときの、測定値について述べる。これは 5.2 で見た $0 \text{ [ns]} \leq \text{timeABC} \leq 100 \text{ [ns]}$ の領域からの影響を考慮してのものである。

下限値は $120 \text{ [ns]} \leq \text{timeABC} \leq 160 \text{ [ns]}$ の範囲*⁵で 10 [ns] ごとに変えた。すると以下のような結果が得られた。

*⁵ 160 [ns] より大きくすると N_0 が誤差内で 0 を含むようになってきた。これは accidental 領域に漸近していることを意味する。よってここまでとした。

表 13: fit 範囲の下限值と fit 結果

下限値 [ns]	lifetime[ns]
120	48.4±7.0
130	49.9±8.1
140	53.9±10.8
150	47.6±11.6
160	52.5±14.6

このときの系統誤差 σ_{fit} を σ_{bin} と同様にする。つまり、下限値 120 [ns] の時の測定値を τ 、すべての平均を $\bar{\tau}$ として、

$$\sigma_{fit} \equiv |\tau - \bar{\tau}|$$

と定義する。

するとこれより、

$$\sigma_{fit} = 2.1 \text{ [ns]} \quad (30)$$

5.8 結果

(28),(29),(30) より、互いに相関がないとして二乗和を取り、今回の実験の系統誤差 σ_{sy} とする。

$$i.e. \quad \sigma_{sy} \equiv \sqrt{\sigma_{\beta}^2 + \sigma_{bin}^2 + \sigma_{fit}^2} \quad (31)$$

すると結果は以下ようになった。

$$\tau = 48.4 \pm 7.0 \pm 9.9 \text{ [ns]}$$

ここで第 2 項は統計誤差で、第 3 項は系統誤差である。よって今回得た結果は、オルソポジトロニウムの理論値 140 [ns] とは一致しないという結論となった。

6 考察と対策 (担当:長谷川 大晃)

6.1 考察

寿命が理論値と異なる理由を考える。定量的なことは言えないが、測定はじめと測定終わりの trigger rate に注目すると、

表 14: 測定はじめと終わりの trigger rate

測定	trigger rate(20s)
はじめ	47±7
終わり	34±6

上のようになっていたので、実験の途中で何か時間的に変化したものがあると考え、シリカゲルが水を吸収して変わってしまった可能性があると思われた。もしそうならば本実験の energy cut においては、 2γ のコンプトン散乱の影響を完全に cut することは難しいので、pick-off 反応や spin exchange 反応が無視できず、寿命は理論値よりも短くなってしまふ。

6.2 対策

1. timeABC の時間分布における 0[ns]~100[ns] の山について解明を進める
2. シリカゲルに到達する陽電子の rate を上げるために磁場をかけて陽電子輸送装置を作る

6.2.1 0[ns]~100[ns] の解明

前述しているように 0[ns]~100[ns] に不明な山があり、今のところ何が原因なのか分かっていない。ただし、fit 範囲変更の考察から、測定寿命にはあまり影響していないと思われる。

6.2.2 陽電子輸送装置

本実験の set up でシミュレーションを使って線源から出た陽電子がシリカゲルにどれだけ入るか見積もったところ、10 万発中、393 個で約 0.4% であった。これを上げるために線源からシリカゲルに向かう方向に磁場をかけることを提案する。ここではそのために必要な磁場の大きさを見積もる。またそれを銅線で作ったコイルで実現しようとする場合、銅線の長さや太さ、および抵抗とそれによる発熱量を定式化する。

磁場中 $B[\text{T}]$ に磁場に垂直な運動量成分 $p[\text{GeV}/c]$ を持った粒子が、ローレンツ力により半径 R の円運動をするとき、相対論的な関係式は以下である。

$$p = 0.3BR$$

シミュレーションと同じように、磁場に入る前に線源とシリカゲルを結ぶ直線からの陽電子が持つ運動量の角度に制限をつけると、

$$\cos\theta > \frac{10}{17} \quad (32)$$

となるようにしている。また前章でもふれてあるが線源から放出される陽電子の運動量の最大値は

$$p_{max} = 543[\text{keV}] \quad (33)$$

なので、本実験で生じうる半径の最大値 R_{max} は

$$R_{max} = \frac{p_{max} \cos\theta}{0.3B}$$

この R_{max} の 2 倍がシリカゲルを入れたシリンダーの内径 r より小さいことを要求すれば、必要最小限の磁場の強さを求められる。

$$i.e. \quad B > \frac{2p_{max} \cos\theta}{0.3r} \quad (34)$$

(32),(33),(34) かつシリンダーの内径が $r = 19.8$ [mm] であることから、具体的な磁場の強さの条件は、

$$B > 0.1 [\text{T}]$$

となった。

ところでコイルの磁束密度は、真空透磁率を μ_0 、1m あたりの巻き数を n [/m]、電流を I [A] とすると、

$$B = \mu_0 n I$$

である。これより上記の磁束密度を実現するためには、仮に $I = 10$ [A] とすると 1 [m] あたり 10^4 回巻けばよく、1ヶ所に m 回巻なら、必要なコイルの長さを h 、半径を c とすると銅線の長さ l は

$$l = 2\pi c h \times 10^4 [\text{m}]$$

銅線の太さ a は

$$a = \frac{m}{10^4} [\text{m}]$$

このときのコイル全体の抵抗 R_{coil} は銅の体積抵抗が 1.68×10^{-8} [$\Omega \text{ m}$] なので以下のようになった。

$$R_{coil} = 1.68 \times 10^{-8} \times \frac{l}{\pi a^2} [\Omega]$$

仮に銅線の太さを $a = 1$ [mm] とすると、抵抗の発熱量 q は

$$q = 0.5 [\text{J/s}]$$

参考文献

- [1] ヴェ・ペレステッキー、イエ・リフシツ著、「相対論的量子力学」、東京図書株式会社、1969年
- [2] フェルミ著、「FERMI 原子核物理学」、吉岡書店、1954年

謝辞

本研究にあたり、指導教員の藏重教授には装置設計、プログラミングによる解析等ご丁寧に指導して頂きましたので、この場を借りてお礼申し上げます。

また、身内准教授、山崎教授、越智助教には、経過報告の度に的確な御指導を頂きまして、深く感謝しております。竹内教授、原准教授、鈴木助教にも、研究室ミーティングでの発表練習の際に的確な御指導を頂きました。

博士後期課程の岸本さん、細川さん、岡さん、博士前期課程の大西さん、竹本さん、陳さん、長谷川さん、矢ヶ部さん、山口さん、山根さん、木戸さん、橋本さん、藤田さん、山内さんには、気さくに接して頂き、研究室での過ごし方や root の使い方等を丁寧に教えて頂きました。たくさんの方のご協力のおかげで、本研究が進められたことを深く感謝いたします。