

平成 27 年度

修士学位論文

ポジトロニウムの 5 光子崩壊検出実験における
検出装置と解析手法の改良

1 月 8 日 提出

首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻

学修番号 13879313

氏名 神田 泰地

指導教員：角野 秀一

ポジトロニウムの 5 光子崩壊検出実験における検出装置 と解析手法の改良

ポジトロニウムは電子と陽電子の電磁相互作用による束縛状態の水素様原子である。レプトン系であり、その崩壊過程は低エネルギー現象であることから強い相互作用や弱い相互作用の影響が小さい。よってポジトロニウムは量子電気力学 (QED) の検証に適している。トータルスピン 1 のスピン 3 重項状態はオルソポジトロニウムと呼ばれる。荷電共役不変性により、オルソポジトロニウムは奇数本の γ 線に崩壊する。ただし、運動量保存則により 1 本の γ 線への崩壊は禁止される。ポジトロニウムの 5 光子崩壊事象はクーロン束縛の影響を無視すると QED の $O(\alpha^5)$ 過程であり、5 光子崩壊事象の検出により高次 QED 過程の検証が可能である。

2001 から 2014 年まで行われた実験では 3 光子崩壊事象などからの BG (バックグラウンド) 事象が非常に大きいことが分かった。測定されたエネルギーや運動量を利用して BG を排除するセレクションをした後に、5 光子崩壊事象の期待値は 0.035 個、S/N 比 = 1.5×10^{-3} となると見積もられた。

そこで 5 光子崩壊検出のために実験装置と解析手法の改良案を考案し、改良により得られる成果を評価した。現状の課題として、ポジトロニウムの生成量の少なさ、5 光子崩壊の検出効率の低さ、BG 事象の多さの 3 点がある。これらの課題に対してポジトロニウム生成量増大のために「陽電子線源を中心部に配置するポジトロニウム生成部の改良」、5 光子崩壊事象の検出効率を上げるために「5 光子崩壊において 1 光子を取りのぞいた 4 ヒットイベントの利用」、BG 事象を減らすために「鉛コリメーターの延長」および「3 光子崩壊による BG 事象を排除する新たな解析手法」を考案した。

検出効率の評価は GRACE と Geant4 を使用したモンテカルロシミュレーションで行った。GRACE は、ファインマンダイアグラム及び不変振幅の自動生成、崩壊率のモンテカルロ積分を行い、発生粒子の 4 元ベクトルを生成する。Geant4 は、粒子と物質の相互作用をシミュレーションするソフトフェアであり、GRACE で生成したイベントを元に実際の検出器上でのシミュレーションを可能とする。

改良の複合的な効果により、5 ヒットイベントにおいては S/N 比 = 10 程度で年間約 6 イベント、4 ヒットイベントにおいては S/N 比 = 0.1 程度と BG を多く含むものの年間約 400 イベントの 5 光子崩壊事象を検出することが期待出来ることが判った。

キーワード： 修士論文、ポジトロニウム、Geant4

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	ポジトロニウムの性質	1
1.3	ポジトロニウムの多光子崩壊	3
1.4	陽電子と物質の相互作用	5
1.5	γ 線と物質の相互作用	6
第2章	これまでの研究状況	10
2.1	UNI 実験	10
2.2	UNI 検出器	11
2.3	陽電子線源	13
2.4	陽電子磁場輸送部	16
2.5	ポジトロニウム生成部	19
2.6	γ 線検出部	19
2.7	データ収集システム	21
2.8	TimeWalk	21
2.9	イベントセレクション	24
2.10	2014年までの成果	27
第3章	本研究の課題と目的	29
3.1	5光子崩壊事象検出のための課題	29
3.2	本研究の目的	29
3.3	鉛シールドの強化によるBGの排除	29
3.4	線源およびポジトロニウム生成部の改良による生成量の増大	29
3.5	4ヒットイベントの利用による検出効率の向上	31
3.6	アクシデンタルBG	31
第4章	シミュレーション手法	33
4.1	シミュレーション手法について	33
4.2	陽電子エネルギースペクトルのシミュレート	33
4.3	陽電子の消滅点分布	35
4.4	ポジトロニウムの多光子崩壊	35
4.5	γ 線シミュレーション	37
第5章	鉛シールド強化の評価	39
5.1	アクセプタンスの低下	39
5.2	3光子崩壊BGの低下	40
第6章	Plastic Scintillatorと陽電子線源の一体化によるPs生成部の改良と評価	43
6.1	ビームパイプを使用した場合の陽電子トリガー数	43
6.2	陽電子線源	44
6.3	Plastic Scintillator 光量測定	46
6.4	シリカエアロゲルでの陽電子の停止確率	52

6.5	中心部構造	52
第7章	4ヒットイベントの利用	53
7.1	運動量和とエネルギーの関係	53
7.2	エネルギー再構成	55
7.3	3光子崩壊由来の4ヒットイベント	55
第8章	BGの見積もり	58
8.1	実験パラメーター	58
8.2	各種物理事象のレート	59
8.3	陽電子トリガーにおけるマルチヒットイベントカット	60
8.4	その他のアクシデンタルBG	62
8.5	2光子を利用した3光子崩壊BGの排除	64
第9章	新手法による5光子崩壊事象検出効率の評価	67
9.1	各種物理事象の検出効率	67
9.2	1年間で得られる成果	71
第10章	結論	73
10.1	グレードアップにより期待される成果	73
10.2	今後のUNI実験について	73
	謝辞	75
	参考文献	76
付録A	各プログラム	77
A.1	Na22:陽電子エネルギー生成プログラム	77
A.2	陽電子の消滅点分布生成プログラム	77
A.3	GRACEプログラム	79
A.4	多光子崩壊シミュレーションプログラム	79
A.5	イベントセレクションプログラム	80

目 次

1.1	水素原子とポジトロニウム	1
1.2	オルソポジトロニウムの3光子崩壊過程の最低次のファインマンダイアグラム	3
1.3	オルソポジトロニウムの3光子崩壊過程の $O(\alpha^5)$ のファインマンダイアグラム	4
1.4	オルソポジトロニウムの5光子崩壊過程の最低次のファインマンダイアグラム	4
1.5	γ 線の質量減衰係数(空気)	7
1.6	γ 線の質量減衰係数(NaI)	8
1.7	γ 線の質量減衰係数(鉛)	9
2.1	サッカーボール構造(32面体構造)のUNI検出器	11
2.2	サッカーボール構造(32面体構造)のUNI検出器(2)	12
2.3	UNI検出器断面図	12
2.4	^{22}Na 崩壊図	14
2.5	^{68}Ge 崩壊図	14
2.6	密封線源	15
2.7	密封線源断面図	15
2.8	密封線源用容器	16
2.9	ビームパイプ断面図	17
2.10	ビームパイプ	17
2.11	ビームパイプ中心部	18
2.12	ラジアル異方性に配向された円筒形ネオジウム磁石	18
2.13	ネオジウム磁石による磁場	19
2.14	ポジトロニウム生成部の断面図	19
2.15	ポジトロニウム生成部	20
2.16	γ 線検出器	20
2.17	回路図(1)[13]	22
2.18	回路図(2)[13]	22
2.19	Time Walk	23
2.20	エネルギー(横軸)と時間(縦軸)の関係[13]	23
2.21	エネルギー(横軸)と時間(縦軸)の関係; TimeWalk補正後[13]	24
2.22	NaIシンチレータの配置	26
2.23	実験結果 横軸は検出した5光子のトータルエネルギー、矢印で囲まれたレンジに24イベント	27
2.24	3光子崩壊事象のコンプトン散乱によるBG	28
3.1	小さい鉛コリメーター	30
3.2	大きい鉛コリメーター	30
3.3	5光子崩壊事象	31
3.4	3光子崩壊& β 崩壊	32
4.1	^{22}Na 由来の β 線の <i>KuriePlot</i> [8]	34

4.2	^{22}Na 由来の陽電子エネルギースペクトル (質量エネルギーを含む)	34
4.3	ポジトロニウム生成部	35
4.4	陽電子の消滅点分布 ()	36
4.5	陽電子の消滅点分布 (シリカエアロゲル内)	36
4.6	4 ヒットしたイベントにおいて γ 線の最初の方向が検出器に向いている数	38
5.1	短い鉛コリメーターの寸法	39
5.2	長い鉛コリメーターの寸法	40
5.3	短い鉛	41
5.4	イベントセレクションは NaI ヒット数=5 のみ 縦軸は陽電子トリガー=12kHz を仮定したときの evets/year	41
5.5	長い鉛 (先端から 3.76cm を切断)	42
5.6	イベントセレクションは NaI ヒット数=5 のみ 縦軸は陽電子トリガー=12kHz を仮定したときの evets/year	42
6.1	1MBq の線源を使用した際のトリガーレート 磁場輸送部を使用	43
6.2	PlasticScintillator BC400 0.15mm 厚	44
6.3	ポリイミド製陽電子線源 ^{22}Na (^{22}Na は中心部で直径 5mm 程度に広がっている)	44
6.4	ポジトロニウム生成部断面図	45
6.5	シミュレーション; 陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー (1) 赤い斜線: Plastic Scintillator を通過してシリカエアロゲル内で対消滅 (2) 青い斜線: シリカエアロゲルに到達せず PlasticScintillator 内で対消滅 (3) 緑の斜線: シリカエアロゲルに到達したがシリカエアロゲル以外で対消滅 (4) 白抜き: 上記 3 つの和	46
6.6	チタン製陽電子線源 ^{22}Na	47
6.7	チタン製陽電子線源 ^{22}Na 寸法	47
6.8	陽電子による Plastic Scintillator の発光量測定実験のセットアップ	48
6.9	陽電子による Plastic Scintillator の発光量測定実験のセットアップ_概略図	48
6.10	陽電子による Plastic Scintillator の発光量測定実験の回路図	49
6.11	実験結果; 陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー (1) PMT01 と 02 のコインシデンスでトリガー	50
6.12	実験結果; 陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー (2) 3 つの PMT のコインシデンスでトリガー	51
6.13	実験結果; 陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー (3) PMT03 でトリガー	51
6.14	中心部構造概略図	52
7.1	5 光子崩壊 5 ヒット: 運動量和とエネルギー	53
7.2	3 光子崩壊 5 ヒット: 運動量和とエネルギー	54
7.3	5 光子崩壊 4 ヒット: 運動量和とエネルギー	54
7.4	3 光子崩壊 4 ヒット: 運動量和とエネルギー	55

7.5	5 光子崩壊 4 ヒット:再構成エネルギー	56
7.6	3 光子崩壊 4 ヒット:再構成エネルギー	56
7.7	3 光子崩壊:back to back イベント	57
7.8	3 光子崩壊:制動放射による 4 ヒットイベント	57
8.1	5 光子崩壊	60
8.2	マルチヒットカットでも落とせないイベント:3 光子崩壊& β 崩壊	61
8.3	マルチヒットカットでも落とせないイベント:3 光子崩壊&3 光子崩壊	61
8.4	e^+ \times (2 光子崩壊+遷移 γ 線)	62
8.5	e^+ \times (2 光子崩壊+遷移 γ 線) \times (2 光子崩壊+遷移 γ 線)	63
8.6	3 光子崩壊 \times (2 光子崩壊+遷移 γ 線)	64
8.7	(3 光子 \times (2 光子+遷移 γ 線))4 ヒットイベント;6つの組のうち最も 1022 keV に近い再構成エネルギー	65
8.8	5 光子崩壊事象 4 ヒットイベント;6つの組のうち最も 1022 keV に近い再構 成エネルギー	65
8.9	3 光子崩壊再構成エネルギーで排除出来るイベント:3 光子崩壊 \times (2 光子崩 壊+遷移 γ 線)	66
8.10	3 光子崩壊再構成エネルギーで排除出来ないイベント:3 光子崩壊 \times (2 光子 崩壊+遷移 γ 線)	66
9.1	5 ヒットイベント;500kBq で 1 年間で期待される検出数	72
9.2	4 ヒットイベント;500kBq で 1 年間で期待される検出数	72
9.3	4 ヒットイベント;100kBq で 1 年間で期待される検出数	72

表目次

1.1	パラポジトロニウムとオルソポジトロニウム	2
2.1	β^+ 崩壊をする代表的な放射性同位元素	13
2.2	バックグラウンド事象	24
2.3	崩壊点を含む同一平面上に位置する NaI 番号	26
4.1	トータルスピンのヘリシティの関係	36
5.1	NaI シンチレーターのアクセプタンス	39
6.1	Plastic Scintillator;BC400 の性能	45
6.2	各 PMT の印加電圧とディスクリレベル (PM AMP(10 倍) 後)	47
8.1	バックグラウンド事象	58
8.2	物理事象のレート	60
8.3	3 光子崩壊×別の物理事象のアクシデンタル BG のレート	62
8.4	その他のアクシデンタル BG のレート	63
9.1	各種物理事象	67
9.2	5 ヒットイベント;3 光子崩壊事象と 5 光子崩壊事象のイベントセレクションによる残存率	69
9.3	5 ヒットイベント;アクシデンタル BG のイベントセレクションによる残存率 (1)	69
9.4	5 ヒットイベント;アクシデンタル BG のイベントセレクションによる残存率 (2)	69
9.5	4 ヒットイベント;3 光子崩壊事象と 5 光子崩壊事象のイベントセレクションによる残存率	70
9.6	4 ヒットイベント;アクシデンタル BG のイベントセレクションによる残存率 (1)	70
9.7	4 ヒットイベント;アクシデンタル BG のイベントセレクションによる残存率 (2)	71
9.8	イベントセレクション (オフライン) 後の BG レート	71
10.1	シンチレータ性能比較 [18]	74

第1章 序論

1.1 背景

1930年にディラックの空孔理論により陽電子の存在が予言され [1]、1933年に Anderson によって陽電子が発見された [2]。1934年に Mohorovicic が電子と陽電子の束縛状態であるポジトロニウムの存在を予言し [3]、1951年には Deutsch が初めてガス中でポジトロニウムを生成する事に成功した [4]。1990年代にはポジトロニウムの寿命が実験値と理論値で明らかにズレており、「ポジトロニウムの寿命問題」として注目を集めていた。現在は物質効果による系統誤差の正確な見積もりにより解決している。本実験は1990年代に盛んに行われたポジトロニウムの寿命測定実験に起因した実験である。ポジトロニウムの5光子崩壊という世界でも未だに検出されていない稀崩壊物理事象の観測を目指す実験である。

1.2 ポジトロニウムの性質

ポジトロニウムは、電子と陽電子の電磁相互作用による束縛状態であり、水素原子によく似ている。換算質量とエネルギー順位は水素原子の半分である。水素原子のイオン化ポテンシャルは 13.6eV、ボーア半径は 0.053 nm であるのに対して、ポジトロニウムはそれぞれ 6.8 eV、0.106 nm である。模式図を図 1.1 に示す。

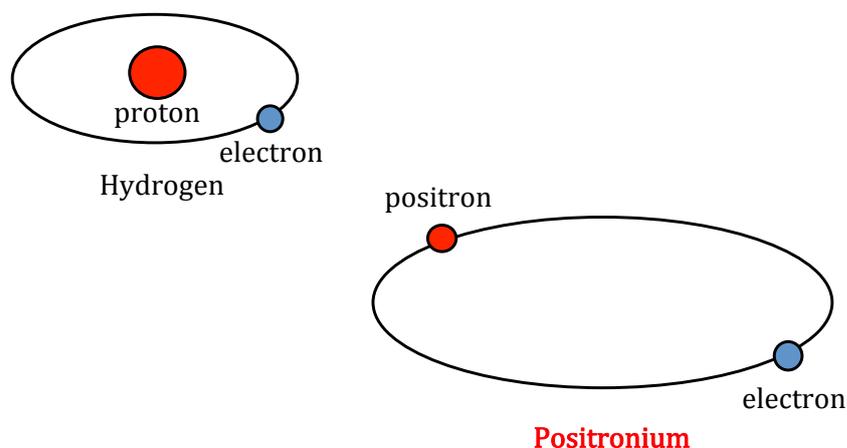


図 1.1: 水素原子とポジトロニウム

量子電磁力学 (QED) は光子と荷電粒子間の相互作用を記述する。ポジトロニウムはレプトン系であり、その崩壊質量は 1022eV と低エネルギーなので強い相互作用や弱い相互作用の寄与が小さい。したがって、ポジトロニウムは QED の検証に適している。ポジトロニウムはスピン状態によりパラポジトロニウムとオルソポジトロニウムに分けられる。トータルスピン 0 のスピン 1 重状態のものをパラポジトロニウム、トータルスピン 1 のスピン 3 重状態のものをオルソポジトロニウムと呼ぶ。

$$\Psi_T(m=1) = \uparrow\uparrow \quad (1.1)$$

$$\Psi_T(m=1) = \downarrow\downarrow \quad (1.2)$$

$$\Psi_T(m=0) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow) \quad (1.3)$$

$$\Psi_S(m=0) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow) \quad (1.4)$$

ここで、 \uparrow 、 \uparrow はそれぞれ電子と陽電子のスピンを表し、 m はスピンの量子化軸への射影を表す。QED 計算では真空中でのパラポジトロニウムの寿命は 125.164ps、オルソポジトロニウムの寿命は 142.005ns である [5]。ポジトロニウムは固有値 $(-1)^{l+s}$ の荷電共役変換 C の固有状態である。

$$\hat{C}\Psi(n, l, s) = (-1)^{l+s}\Psi(n, l, s) \quad (1.5)$$

ここで n は主量子数、 l は相対軌道角運動量、 s はトータルスピンである。また、 N 個の光子は固有値 $(-1)^N$ の荷電共役変換の固有状態である。荷電共役変換の保存により、パラポジトロニウムは偶数個の γ 線に崩壊し、オルソポジトロニウムは奇数個の γ 線に崩壊する。ただし運動量保存則により 1 個への崩壊は禁止される。表 1.1 にパラポジトロニウムとオルソポジトロニウムの性質の違いを示す。

表 1.1: パラポジトロニウムとオルソポジトロニウム

	パラポジトロニウム	オルソポジトロニウム
スピン	1 重項	3 重項
崩壊光子数	偶数個	奇数個 (1 個は禁止)
寿命	125.164ps	142.005ns

オルソポジトロニウムの真空中の寿命はパラポジトロニウムに比べ 1000 倍程度長いですが、物質中では下記に示す反応により真空中より短い寿命で消滅する。

(1) ピックオフ消滅

ポジトロニウムは物質中では周りの原子と衝突を繰り返しながら動き回っている。衝突の際に、周りの原子を構成している電子と対消滅を起こすことがある。物質中の自由空間の体積が小さいほどピックアップ消滅の確率は増大する。この反応が物質中でのオルソポジトロニウムの寿命決定に大きく関与している。

(2) スピン交換

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。オルソポジトロニウムはより寿命の短いパラポジトロニウムになり崩壊する。大気中では酸素が不対電子を持つためこの反応が起きやすい。

(3) 磁気クエンチング

磁場中では、磁気量子数 $m=0$ のオルソポジトロニウムとパラポジトロニウムが混合し、オルソポジトロニウムの寿命が短くなる。

1.3 ポジトロニウムの多光子崩壊

1.2節で示したようにパラポジトロニウムは偶数個の γ 線に崩壊し、オルソポジトロニウムは奇数個の γ 線に崩壊する。3光子崩壊は QED の $O(\alpha^3)$ 過程である。図 1.2 に 3光子崩壊過程の最低次のファインマンダイアグラムを示す。終状態の光子の交換によりダイアグラムは 6 個に増える。実際にはより高次の摂動が加わる。 $O(\alpha^5)$ のファインマンダイアグラムを図 1.3 に示す。5光子崩壊過程は QED の $O(\alpha^5)$ 過程であり、より高次の QED を直接検証することができる。図 1.4 に 5光子崩壊過程の最低次のファインマンダイアグラムを示す。

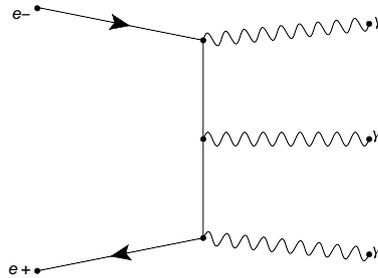


図 1.2: オルソポジトロニウムの 3光子崩壊過程の最低次のファインマンダイアグラム

最低次 $O(\alpha^3)$ のオルソポジトロニウムの 3光子崩壊率の QED 理論値を式 1.6 に示す。

$$\lambda_{o-Ps \rightarrow 3\gamma}(\text{lowest order}) = \frac{2}{9\pi} \alpha^6 \frac{m_0 c^2}{\hbar} (\pi^2 - 9) = 7.21117 \mu s^{-1} \quad [7] \quad (1.6)$$

高次の補正を含めると式 1.7 になる。

$$\lambda_{o-Ps \rightarrow 3\gamma}(\text{higher order}) = 7.0420 \mu s^{-1} \quad [7] \quad (1.7)$$

最低次 $O(\alpha^5)$ の 5光子崩壊分岐比は最低次 $O(\alpha^3)$ の 3光子崩壊過程の比として式 1.8 で表される [13]。

$$\frac{\lambda_{5\gamma}}{\lambda_{3\gamma}} = (0.9591 \pm 0.0008) \times 10^{-6} \quad [13] \quad (1.8)$$

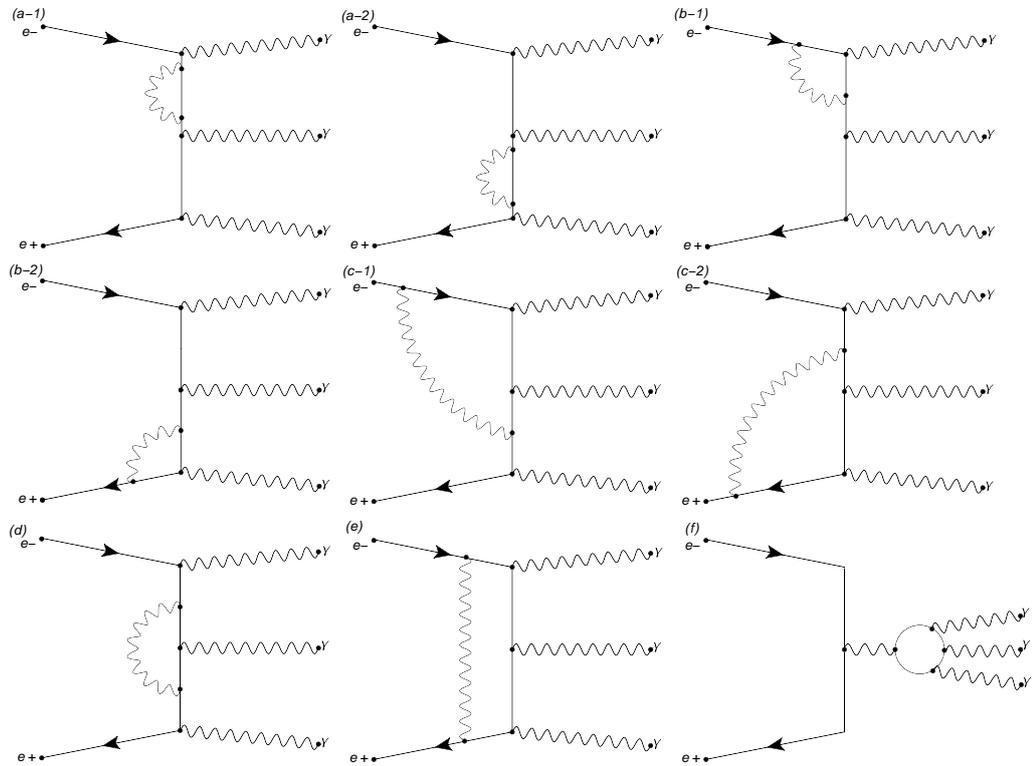


図 1.3: オルソポジトロニウムの 3 光子崩壊過程の $O(\alpha^5)$ のファインマンダイアグラム

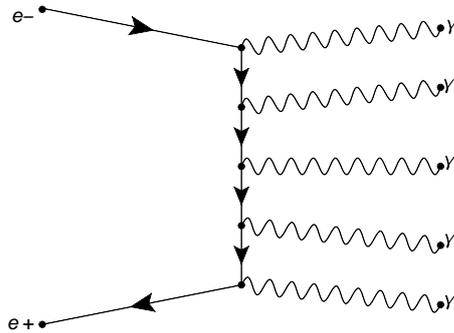


図 1.4: オルソポジトロニウムの 5 光子崩壊過程の最低次のファインマンダイアグラム

オルソポジトロニウムの崩壊率は式 1.9 で表され、各複数本の γ 線への崩壊率の和で表される。

$$\lambda_{o-Ps} = \lambda_{3\gamma} + \lambda_{5\gamma} + \lambda_{7\gamma} + \dots \quad (1.9)$$

N 光子崩壊のファインマンダイアグラムの不変振幅は α^N の割合で減少し、位相空間積分を考慮すると N が 2 つ増える毎に崩壊率は約 10^{-6} 倍となる。 $\lambda_{5\gamma}$ が $\lambda_{3\gamma}$ に対して非常に小さいことからオルソポジトロニウムの寿命 (LifeTime) は 3 光子崩壊への崩壊寿命として近似できる (式 1.10)。

$$LifeTime[ns] = \frac{1}{\lambda_{o-Ps}} = \frac{1}{\lambda_{3\gamma}} = \frac{1}{7.0420[\mu]} = 142.005[ns] \quad (1.10)$$

1.4 陽電子と物質の相互作用

ポジトロニウムの生成に必要な陽電子と物質の相互作用について記述する。陽電子は電子の反粒子であり、その性質は電子の静止質量と同質量、同じスピン、反対符号の正電荷を持つ。陽電子を放出する線源としては主に ^{22}Na (半減期=2.602years)、 ^{68}Ge (半減期=288days) 等が存在する。陽電子は物質に入射すると原子あるいは軌道電子と散乱を繰り返しながら急速にエネルギーを熱エネルギー程度まで失い、その後 10~100 μ m 程度の深さまで拡散し、周囲の電子と対消滅する。ポジトロニウムを形成してから対消滅する場合と形成せずに対消滅する場合がある。電荷が反対符号であることと最終的に電子と対消滅を起こす以外の相互作用は電子と同様である。主に下記の相互作用がある。

- (1) 原子核との弾性散乱
- (2) 原子中の電子との弾性散乱
- (3) チェレンコフ放射
- (4) 制動放射

(1) 原子核との弾性散乱

静止質量 m_0 、速度 $v = \beta c$ 、質量 $m = m_0/\sqrt{1 - \beta^2}$ 、電荷 $ze = +e$ 、の陽電子が電荷 $+Ze$ の原子核の近くを通過して、クーロン力により散乱される場合を考える。量子力学計算によると、この散乱の微分断面積 $d\sigma(\theta)/d\Omega$ は

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \xi_0(\theta)R(\beta, Z, \theta) \quad (1.11)$$

ここで $\xi_0(\theta)$ は Rutherford 散乱断面積で

$$\xi_0(\theta) = \frac{Z^2}{4} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2 \left(\frac{1 - \beta^2}{\beta^4} \right) \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (1.12)$$

で与えられる。また、式 (1.6) の $R(\beta, Z, \theta)$ は β, Z, θ の複雑な関数で解析的にあらわせない因子であるが、McKinley-Feshbach[6] によると αZ のべきで展開され $\beta \simeq 1$ 、 $\alpha Z \leq 0.2$ 程度 (ニッケルより軽い核) の場合には、

$$R(\beta, Z, \theta) \simeq 1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} - \pi \beta \alpha Z \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2} \quad (1.13)$$

電子の場合は式 1.11 の右辺第 3 項中の Z が $-Z$ に置き換わるので電子の場合の断面積は陽電子の場合よりも大きくなる。

(2) 原子中の電子との弾性散乱

陽電子は原子を構成している電子との弾性散乱を行う。入射エネルギーがある程度以上に高ければ、軌道電子の結合エネルギーを無視できる。散乱断面積は近似的に式 1.14 で表される。

$$\xi_{Mott}(\theta) = \frac{Z}{4} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right) \left(\frac{1}{\beta^4} \right) \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \left[(1 + \tan^4 \theta - \tan^2 \theta) \frac{\cos \theta}{\cos^4(\theta/2)} \right] \quad (1.14)$$

(1)、(2) によるエネルギー損失について。運動エネルギー E 、質量 M の粒子と弾性散乱を行ったとすると、運動量とエネルギーの保存則から、相対論的な場合、式 1.15 に示すエネルギーを失う。

$$E = \frac{(1 + 2m_0 c^2/E) \cos^2 \phi}{1 + (m_0 + M)^2 c^2 / 2ME + (E/2Mc^2 + m_0/M)(1 - \cos^2 \phi)} \quad (1.15)$$

原子核のように M が大きい粒子との散乱ではエネルギー損失は小さく、電子との散乱によるエネルギー損失が支配的である。マクロな物質中での多重散乱によるエネルギー損失は原子番号 Z に依存した値（阻止能）として種々の物質で求められている。

(3) チェレンコフ放射

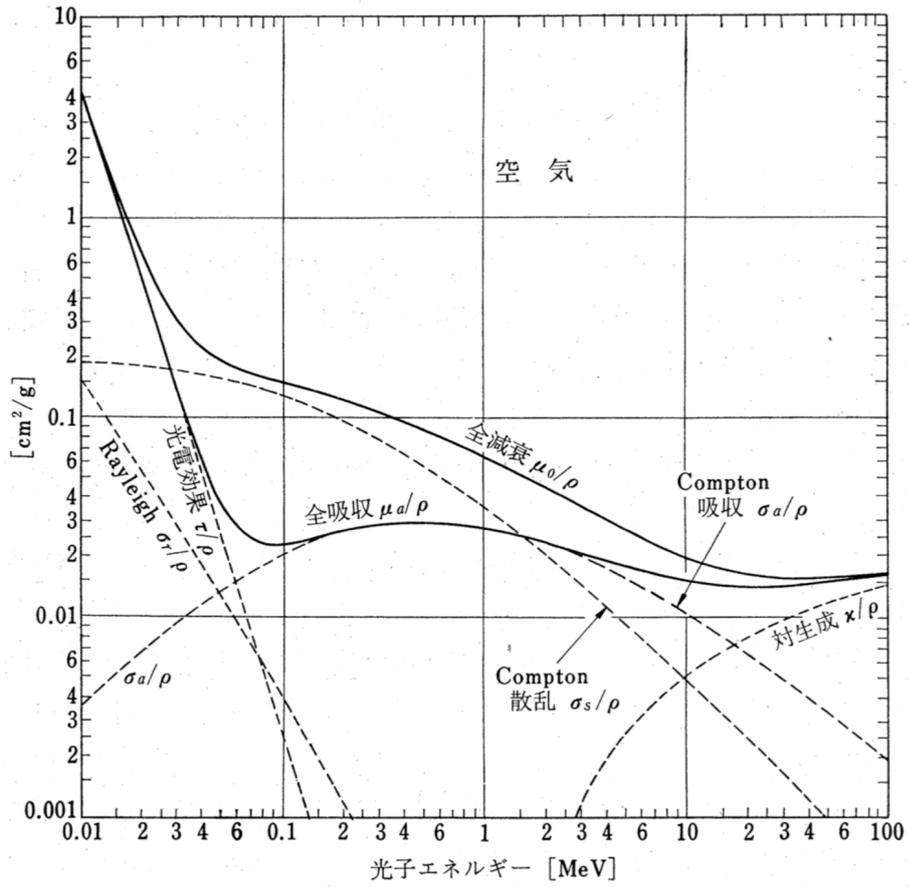
陽電子が屈折率 n の物質中の光の速度 c/n を超える場合、青白い光を放射する。チェレンコフ放射によるエネルギー損失は無視できるほど小さい。

(4) 制動放射

陽電子のように質量の小さいものは原子核の電場によって加速度を受けエネルギーの一部を電磁放射する。物質特有の臨界エネルギーを超えると原子との散乱による電離損失に比べ放射損失はかなり大きなものになる。本実験では各物質の臨界エネルギーよりも十分小さい 1MeV 以下の陽電子を扱うものの制動放射によって発生する γ 線がポジトロニウムの崩壊 γ 線のバックグラウンド事象になることがある。

1.5 γ 線と物質の相互作用

ポジトロニウムの崩壊により発生した γ 線を検出する上での γ 線と物質の相互作用について記述する。 γ 線と物質の相互作用は、物質中の電子（あるいは原子核）と量子化された光子の間との電磁的相互作用であり、量子電磁力学で取り扱われる。 γ 線と物質の主要な効果として、光電効果、コンプトン効果、電子対生成がある。光電効果は γ 線がもつ全てのエネルギーを物質中の電子に与える現象で 0.1MeV 前後の比較的低いエネルギーの γ 線に対して重要である。コンプトン効果は γ 線のエネルギーの一部を物質中の電子に与えて散乱する現象で 0.1MeV ~ 2MeV の中間エネルギーの γ 線に対して重要である。電子対生成は 2MeV 以上の高エネルギーの γ 線に対して重要である。これらの現象の他に、電子によるコヒーレント散乱、核による非弾性散乱および吸収や核子のまわりの中間子場による吸収などがあるが、いずれの断面積もさきの 3つの効果に比べて小さい。主な物質の γ 線に対する質量減衰係数を図 1.5、図 1.6、図 1.7 に示す [10]。質量減衰係数は物質を通過した際の相互作用しやすさの指標を物質の密度で割った値である。



空気 (0°C, 760 mmHg, $\rho=0.001293 \text{ g/cm}^3$)

図 1.5: γ 線の質量減衰係数 (空気)

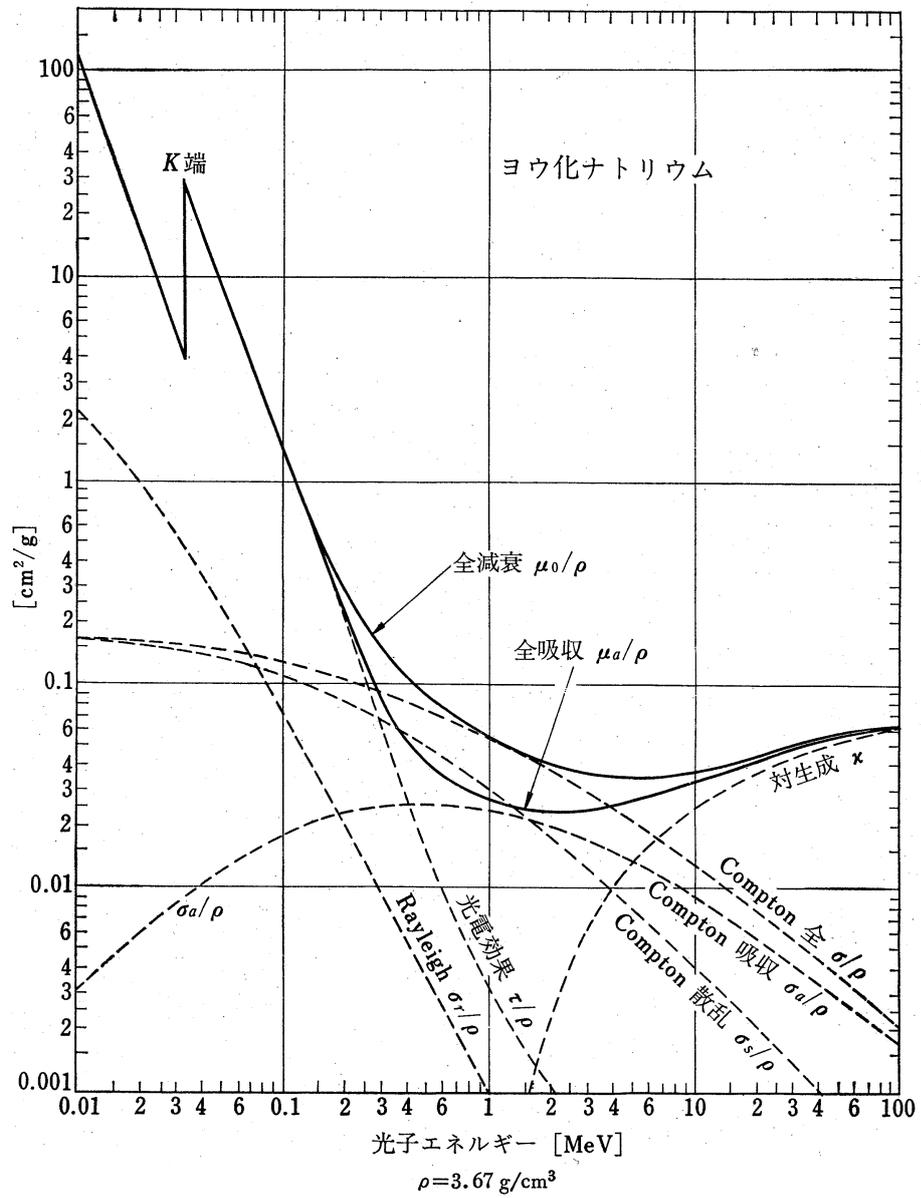


図 1.6: γ 線の質量減衰係数 (NaI)

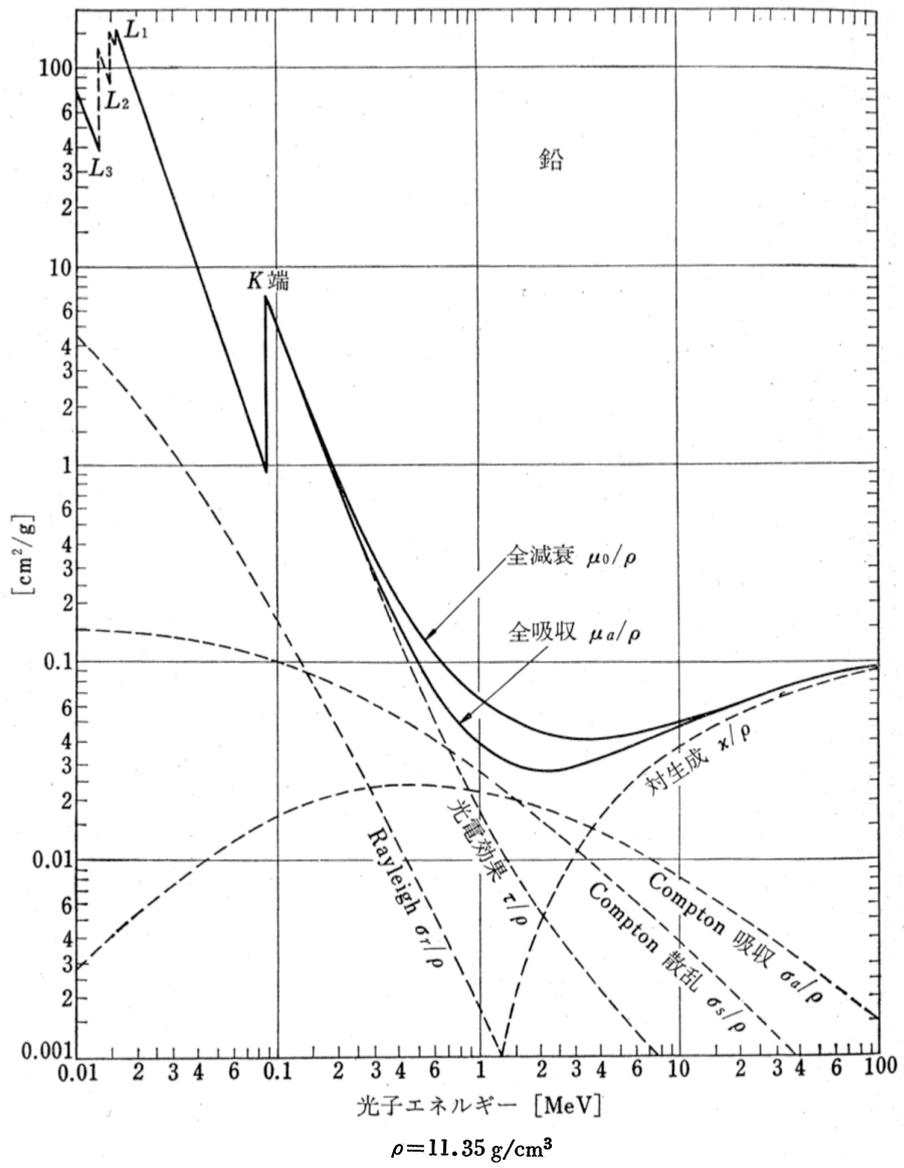


図 1.7: γ 線の質量減衰係数 (鉛)

第2章 これまでの研究状況

本章では本論文で記述する実験装置および解析手法の改良点を理解していただくために、これまでの研究状況について記述する。実験装置全体の概要としても理解いただきたい。

2.1 UNI実験

次節に示す検出器の形状から UNI 実験と呼ばれる本実験の目的は、ポジトロニウムの崩壊事象を測定することにより、高次 QED 過程の検証を行うことである。ポジトロニウムの 5 光子崩壊事象はファインマンダイアグラムの $O(\alpha^5)$ 過程である。3 光子崩壊事象と 5 光子崩壊事象の比をとることでファインマンダイアグラムの高次 QED 過程の直接検証が可能である。

$$\frac{o-Ps \rightarrow 5\gamma}{o-Ps \rightarrow 3\gamma} = \frac{N_{5\gamma} \times \frac{1}{\epsilon_{5\gamma}}}{N_{3\gamma} \times \frac{1}{\epsilon_{3\gamma}}} \quad (2.1)$$

ここで、 $N_{5\gamma}$ は UNI 検出器で検出した 5 光子崩壊事象数、 $\epsilon_{5\gamma}$ は 5 光子崩壊事象の検出効率、 $N_{3\gamma}$ 、 $\epsilon_{3\gamma}$ は 3 光子崩壊事象の検出事象数と検出効率である。それぞれの検出効率は 4 章で記述するシミュレーションにより求めている。QED 理論値のポジトロニウムの分岐比を以下に示す。

$$\frac{\lambda_{4\gamma}}{\lambda_{2\gamma}} = (1.4796 \pm 0.0006) \times 10^{-6} \quad [11] \quad (2.2)$$

$$\frac{\lambda_{5\gamma}}{\lambda_{3\gamma}} = (0.9591 \pm 0.0008) \times 10^{-6} \quad [13] \quad (2.3)$$

我々は UNI 実験において式 2.2、式 2.3 の分岐比を 10% の精度で測定することを目標としている。1990 年に、スピン 1 重状態の電子・陽電子対消滅実験を行い、世界で初めて 4 光子崩壊事象の分岐比を実験的に求めた。その結果は

$$\frac{\lambda_{4\gamma}}{\lambda_{2\gamma}} = [1.30 \pm 0.26(stat.) \pm 0.16(syst.)] \times 10^{-6} \quad (2.4)$$

であり、誤差の範囲内で QED 理論値と一致した [11]。1994 年にも測定を行い、

$$\frac{\lambda_{4\gamma}}{\lambda_{2\gamma}} = [1.19 \pm 0.14(stat.) \pm 0.22(syst.)] \times 10^{-6} \quad (2.5)$$

を得た [12]。また 5 光子崩壊事象の測定も行い 1 イベントの 5 光子崩壊事象を検出した。その後、5 光子崩壊事象をより多く検出するためのアップグレードを繰り返している。

2.2 UNI 検出器

検出器は切隅 20 面体の 32 面、各面上に中心を向いた直径 3 インチ、長さ 4 インチの 30 個の NaI シンチレータ (γ 線検出器) で構成されている (図 2.1、図 2.2)。その形状から UNI 検出器と呼んでいる。対角線上の面間距離は 32cm である。30 平面の各中心に NaI シンチレータが配置されており、その後方に光電子増倍管 (PMT) がある。残りの 2 平面にはビームパイプが設置され、陽電子磁場輸送部が設置されている。ポジトロニウムの 5 光子崩壊は非常に稀な事象だが、UNI 検出器の幾何学的配置により莫大なバックグラウンドの中から 5 光子崩壊事象を選別が可能である。

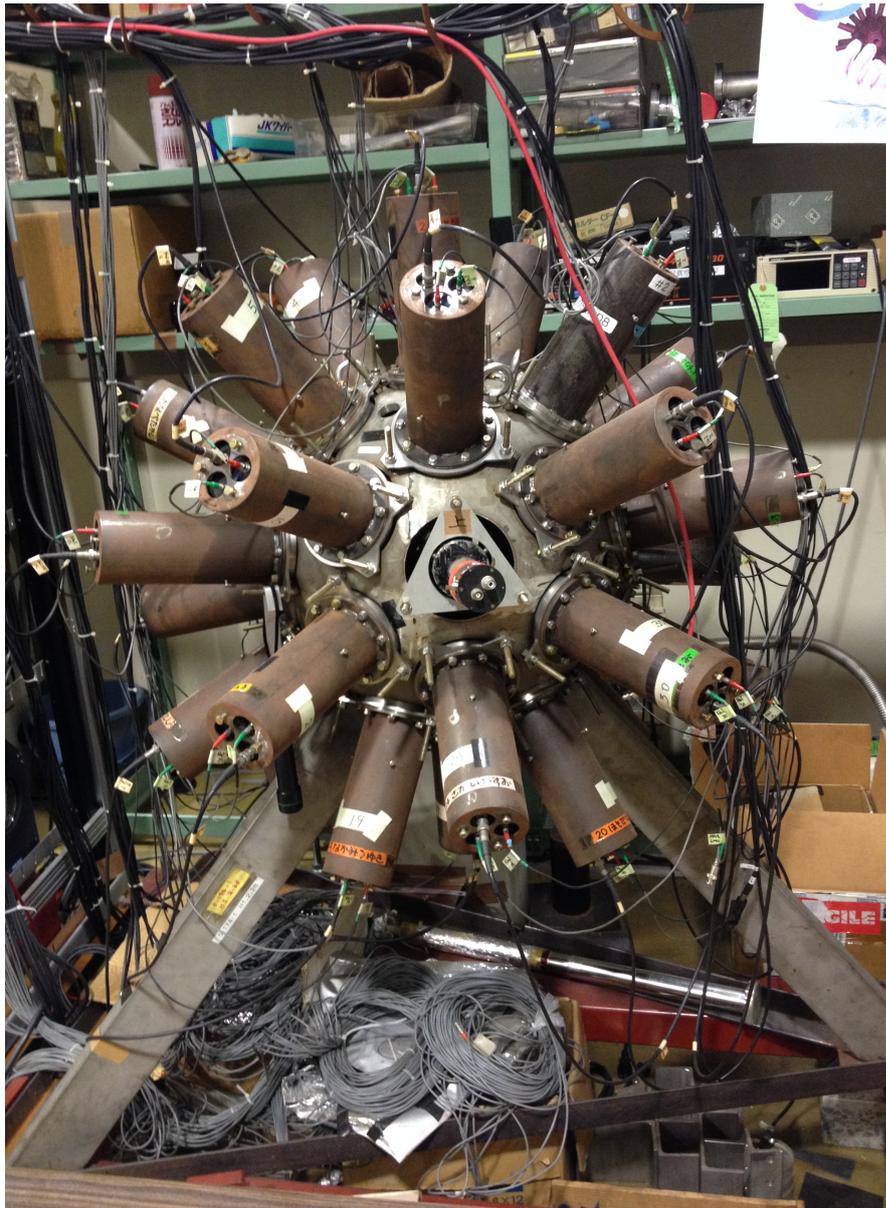


図 2.1: サッカボール構造 (32 面体構造) の UNI 検出器

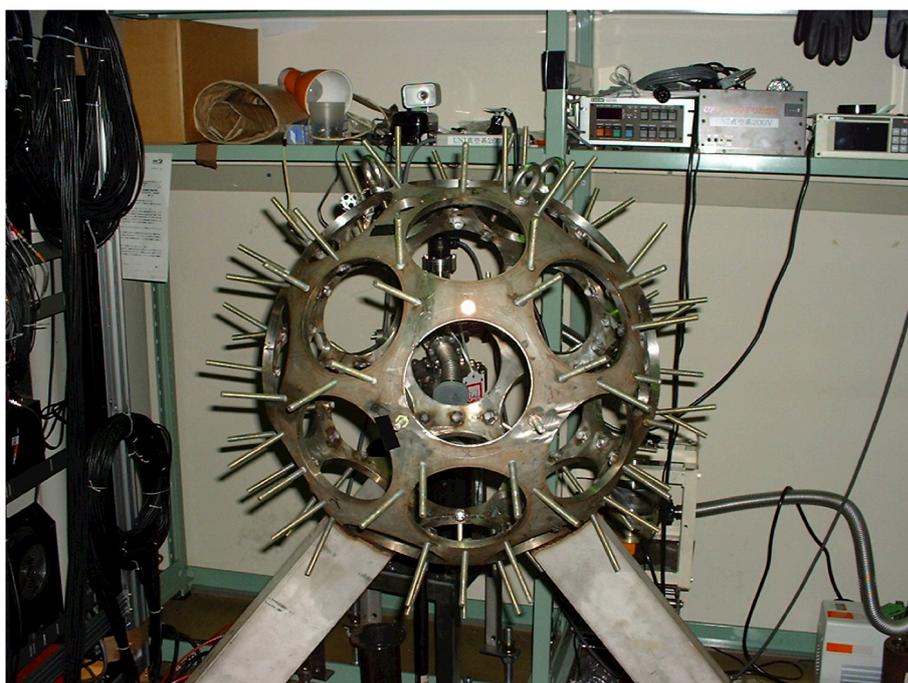


図 2.2: サッカーボール構造 (32 面体構造) の UNI 検出器 (2)

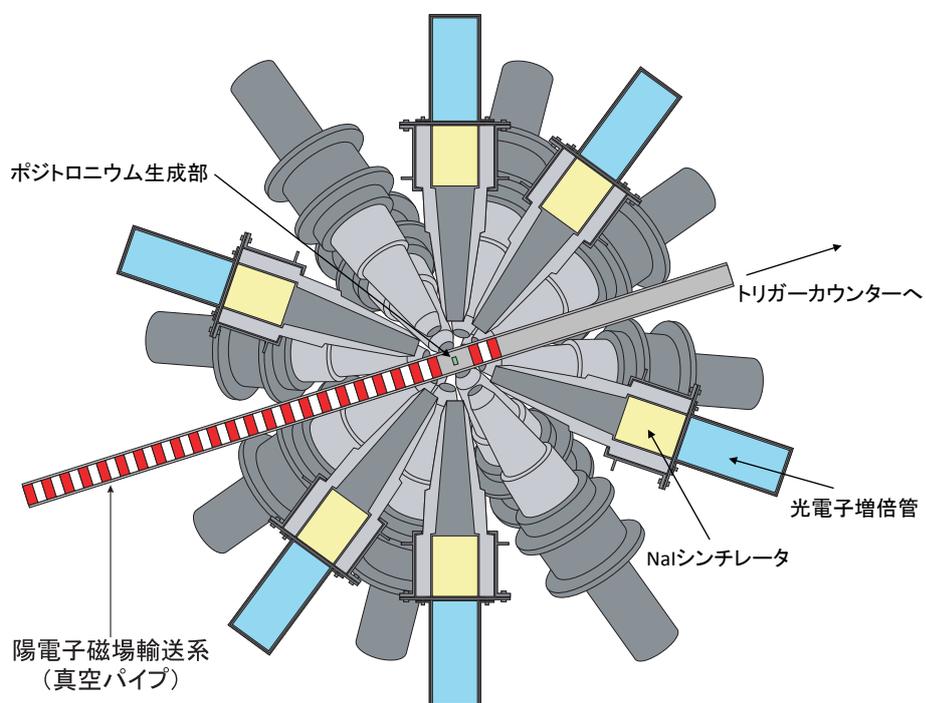


図 2.3: UNI 検出器断面図

2.3 陽電子線源

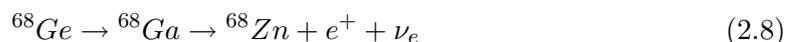
本実験ではポジトロニウム生成のために放射性同位体が β^+ 崩壊する際に放出する陽電子を用いる。陽電子を放出する代表的な線源を表 2.1 に示す。

表 2.1: β^+ 崩壊をする代表的な放射性同位元素

	半減期	β^+ 崩壊の割合	e^+ (MeV)	遷移 γ 線 (MeV)	遷移 γ 線/ β^+ 崩壊 (%)
^{22}Na	2.6 年	0.90	0.545	1.275	99.9
^{68}Ge	288 日	0.89 + 0.013	1.899 or 0.77	— or 1.077	0 or 1.4
^{64}Cu	12.7 時間	0.19	0.657	—	0
^{58}Co	70.8 日	0.15	0.475	0.811	100
^{55}Co	17.5 時間	0.77	1.5	0.931 _(注)	75

(注: 遷移 γ 線が複数ある場合は最も割合の高いものを記している。)

UNI 実験では半減期が長く β^+ 崩壊の割合が高い ^{22}Na 、 ^{68}Ge の 2 つの線源を使用してきた。 ^{22}Na は ^{22}Ne に β^+ 崩壊する際に最大 545keV のエネルギーを持った陽電子を放出する (式 2.6)。その際 ^{22}Ne が遷移 γ 線 1.275MeV を放出する (式 2.7)。この γ 線はバックグラウンドになり得る。 ^{68}Ge は式 2.8 に示すように原子核による電子捕獲 (EC) により ^{68}Ga を経て β^+ 崩壊を起こし最大 1899keV のエネルギーを持った陽電子を放出する。 β^+ 崩壊を起こす際、1.4%の割合で陽電子放出と同時に 1077keV の遷移 γ 線を放出する (表 2.1)。図 2.4、図 2.5 に ^{22}Na と ^{68}Ga の崩壊図を示す。2003 年以降の研究においては 2 つの線源の内 e^+ の最大エネルギーが小さい ^{22}Na を使用している。2013 年 12 月の強度は $3.57 \times 10^4 \text{Bq}$ である。



2003 年以降に使用している ^{22}Na 密封線源の外形は直径 12.7mm、高さ 9.7mm である (図 2.6)。前面は厚さ $5\mu\text{m}$ のチタンウィンドウ、後面はベリリウムバックキングとなっている (図 2.7)。ベリリウムバックキングにより後方に放出された陽電子はほとんど反射しないが、これは偏極陽電子源用として作られたためである。タングステンバックキングを用いるとすると、前方に反射する陽電子数は約 30%増加する。線源は密封線源用容器に装着してビームパイプ内部の端に設置している (図 2.8)。

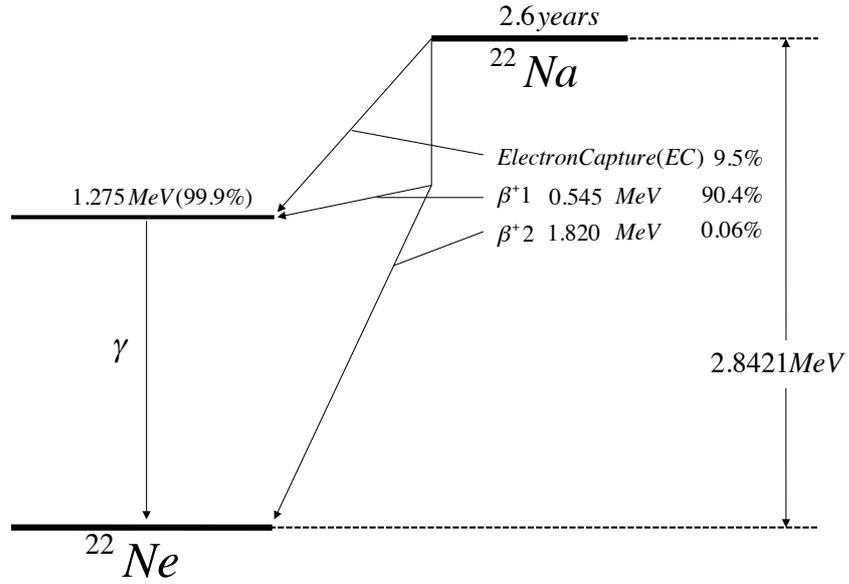


图 2.4: ^{22}Na 崩壊図

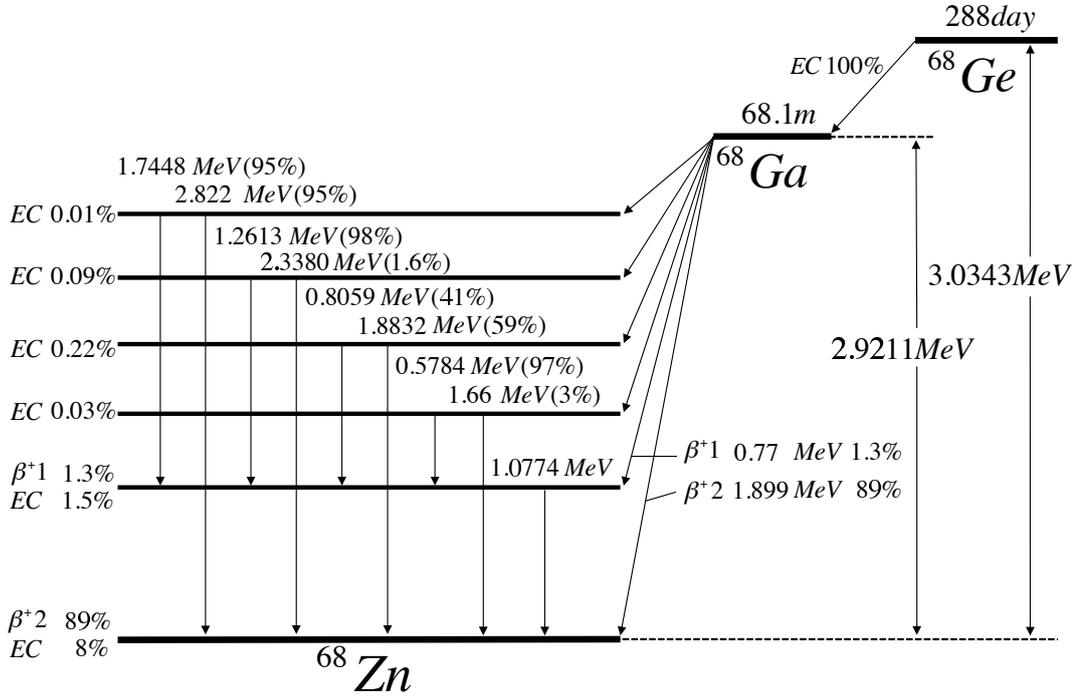


图 2.5: ^{68}Ge 崩壊図



図 2.6: 密封線源

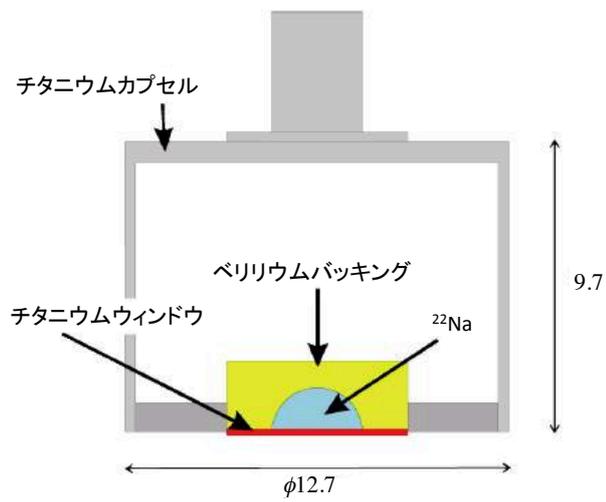


図 2.7: 密封線源断面図



密封線源は中心に装着してある。
真空をひきやすくするために容器に穴を空けている。

図 2.8: 密封線源用容器

2.4 陽電子磁場輸送部

陽電子磁場輸送部は永久磁石を用いたビームパイプで構成される。図 2.9 に陽電子磁場輸送部の模式図を示す。ビームパイプには非磁性ステンレスを使用している。UNI 検出器の対面する 2 面にビームパイプが配置されている (図 2.10)。このために 32 面体に設置される PMT は 30 本になっている。ビームパイプの内部は真空 (10^{-5} Torr) になっている。放射線源がビームパイプの一端に設置されており、もう一端には後述するトリガーカウンターが設置されている。放射線源部から UNI 検出器中心部までは約 700mm である。これによりバックグラウンドとなり得る ^{22}Na から放出される 1275keV の γ 線を除去出来る。崩壊 γ 線のコンプトン散乱を減らすため検出器中心部付近はパイプの厚さを薄く ($200 \mu\text{m}$) してある。また磁場をビームパイプ内に閉じ込め、内部の磁束密度を高めるために、ビームパイプは軟鉄のヨークで覆われている。

永久磁石には円筒形のネオジウム磁石を用い、ネオジウム磁石は円筒の半径方向 (ラジアル異方性) に着磁されている (図 2.12)。ビームパイプでは逆方向に着磁されたネオジウム磁石が交互に約 1cm の間隔で軸方向に配置されている (図 2.13)。ビームパイプの中心部分に磁束密度の高低 ($\pm 1.3 \text{ kG}$, 0 kG) が周期的に現れる事により陽電子が発散収束を繰り返し、ターゲット部へと輸送される。放射線源部から後述のポジトロニウム生成部の立体角 Ω の割合を式 2.9 に示す。

$$\frac{\Omega}{4\pi} \simeq \frac{\pi \times 10^2}{4\pi \times 700^2} \simeq 5.102 \times 10^{-5} \simeq 0.005102\% \quad (2.9)$$

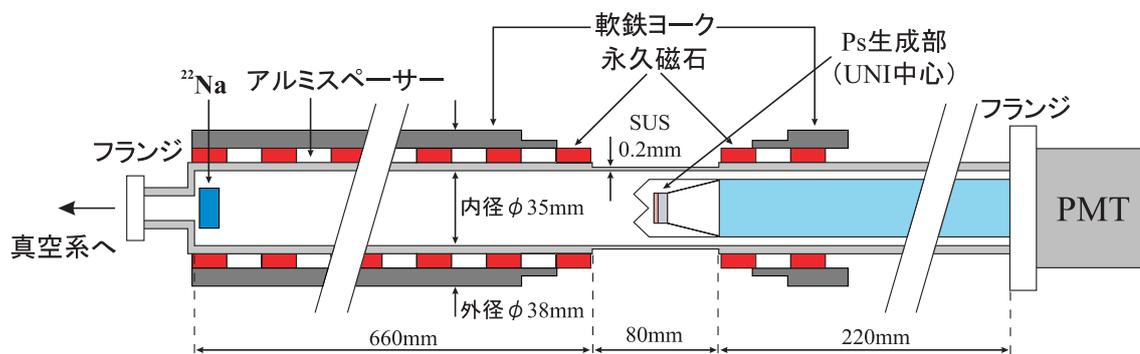


図 2.9: ビームパイプ断面図

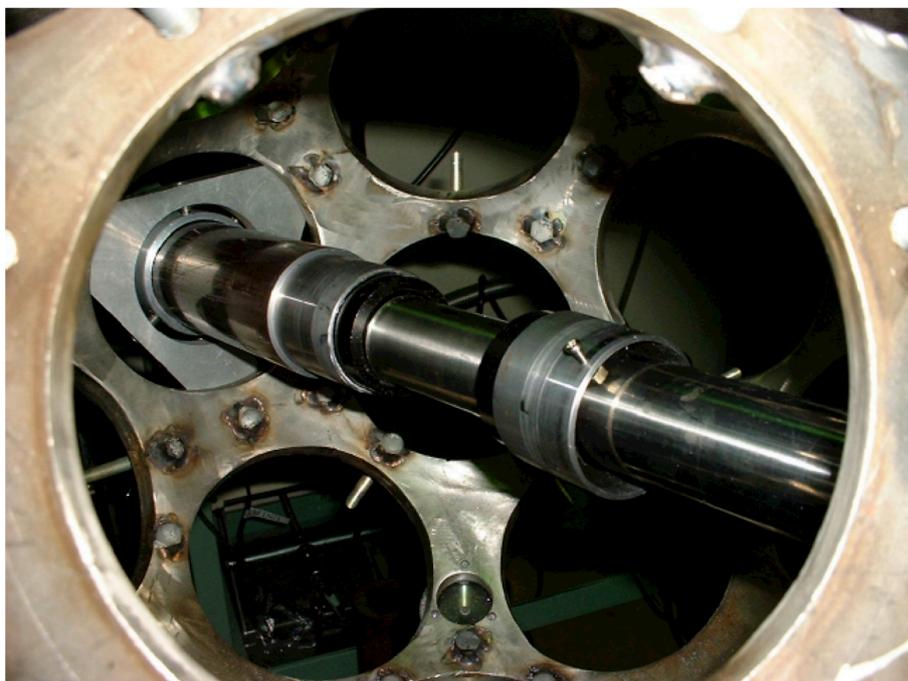


図 2.10: ビームパイプ

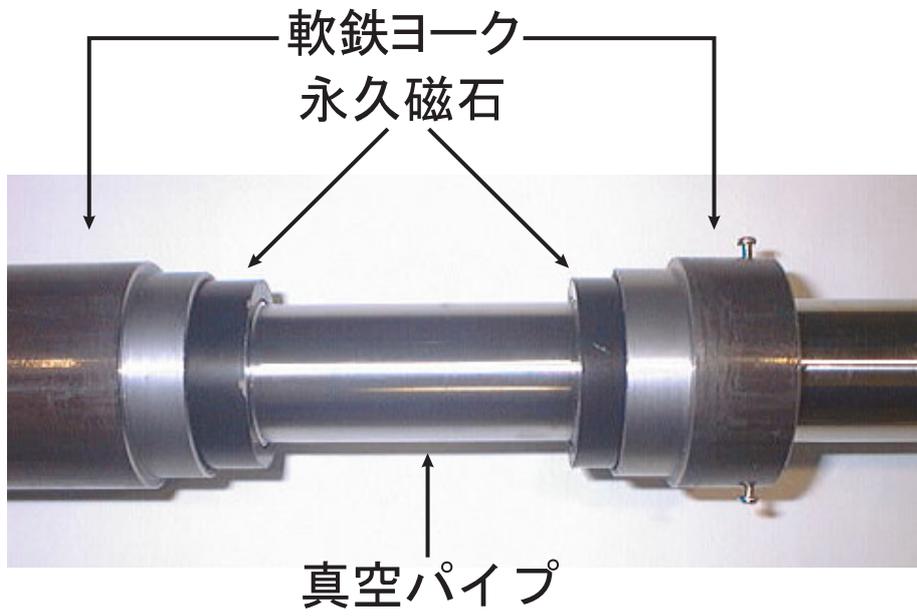


図 2.11: ビームパイプ中心部

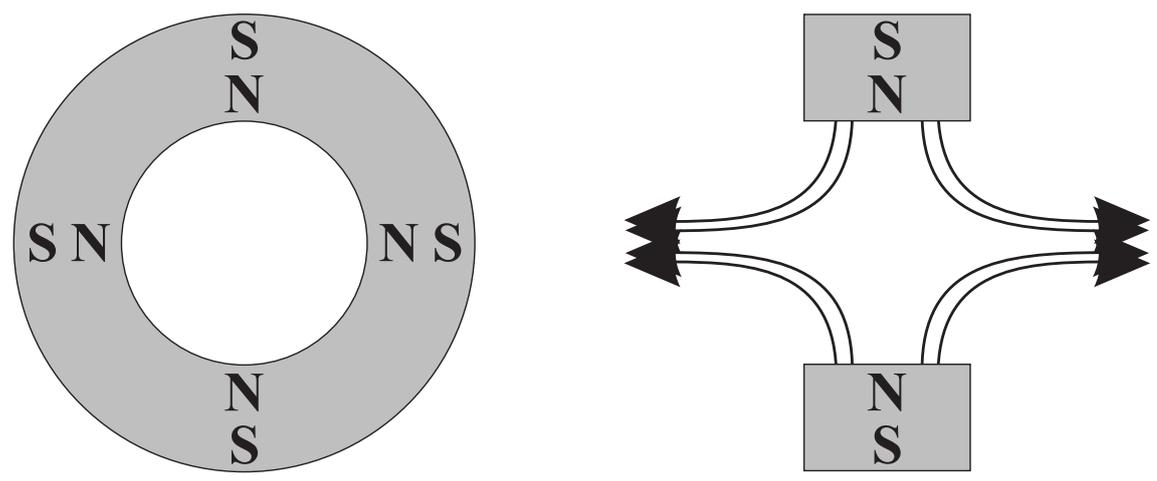


図 2.12: ラジアル異方性に配向された円筒形ネオジウム磁石

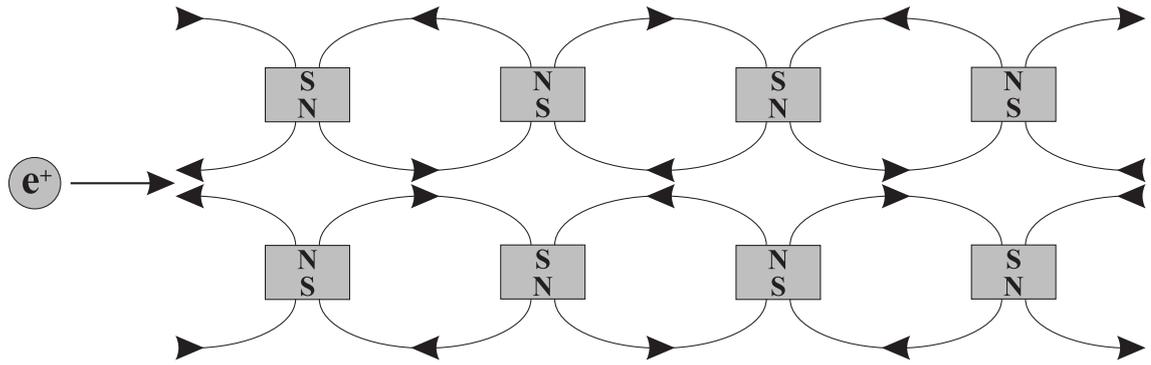


図 2.13: ネオジウム磁石による磁場

2.5 ポジトロニウム生成部

ポジトロニウム生成部について記述する。ターゲット部は放射線源部から 700mm 離れた場所に位置している。ターゲット部はプラスチックシンチレータ (Nucler Enter Prise 社 NE102A) とシリカエアロゲルより構成される。プラスチックシンチレータは直径 20mm、厚さ 0.1mm であり、シリカエアロゲルは直径 20mm、厚さ 7mm、密度 0.13 g/cm^3 である。ターゲット部は4本のアクリル棒 (直径 1mm) で支えられ、アクリルライトガイドとターゲット部を覆った光反射材のアルミナイズドマイラーにより効率的に PMT で光を検出する。

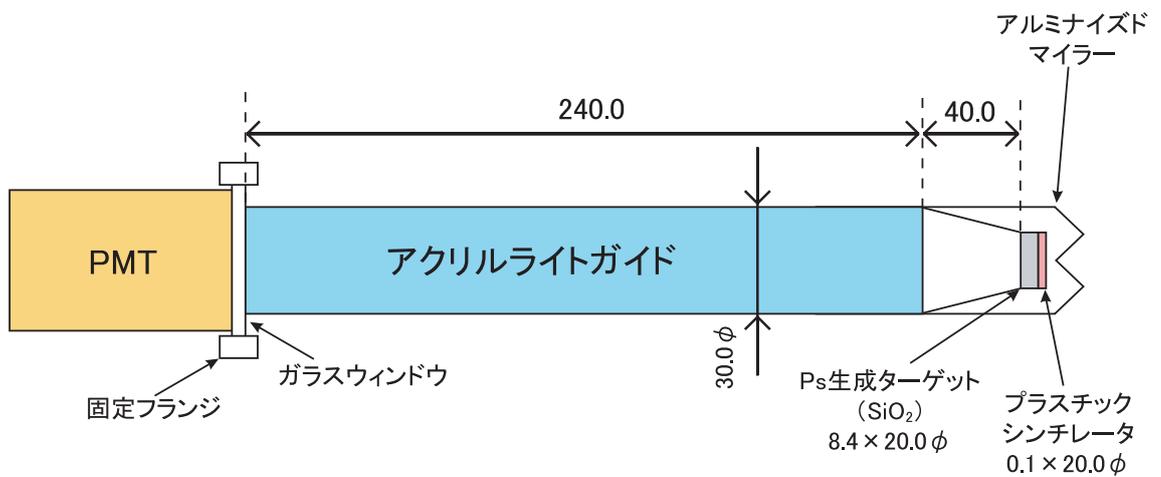


図 2.14: ポジトロニウム生成部の断面図

2.6 γ 線検出部

γ 線検出部はそれぞれ 30 個の NaI(Tl) シンチレータ (堀場製作所、 $\phi 3$ インチ \times 4 インチの円筒形) と光電子増倍管 (PMT、浜松ホトニクス、R1911、 $\phi 3$ インチ) より構成される。切隅 20 面体の 32 面のうち、ビームパイプを除いた 30 平面の各中心に配置されており、すべて検出器の中心から等距離 (160mm) に位置している。シンチレータは、放射線が入射し

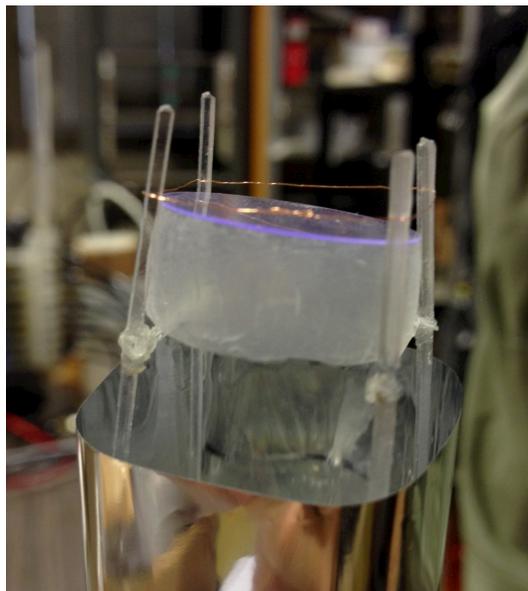


図 2.15: ポジトロニウム生成部

た際にシンチレーション光を放出する。 γ 線がNaI(Tl)結晶に入射すると荷電帯から伝導帯へと電子を励起し、荷電帯に正孔が作られる。Tlを含んでいると、禁止帯中にエネルギー準位が作られる。正孔は不純物原子を励起させ、励起状態から基底状態へ遷移する際に高効率でシンチレーション光を放出する。NaI(Tl)結晶は光量が高く、残光時間が $230ns$ ほどあるがエネルギー分解能が高いため本実験に適している。シンチレーション光はPMTに入射する。光電効果によりPMTの光電面から光電子が放出され、PMT内部で増幅され、電気信号として後述のデータ収集システムに送られる。 γ 線がNaI内部でコンプトン散乱をして他のNaIに入射する事を防ぐため、NaIの周りは厚さ $8mm$ の鉛で囲ってある。

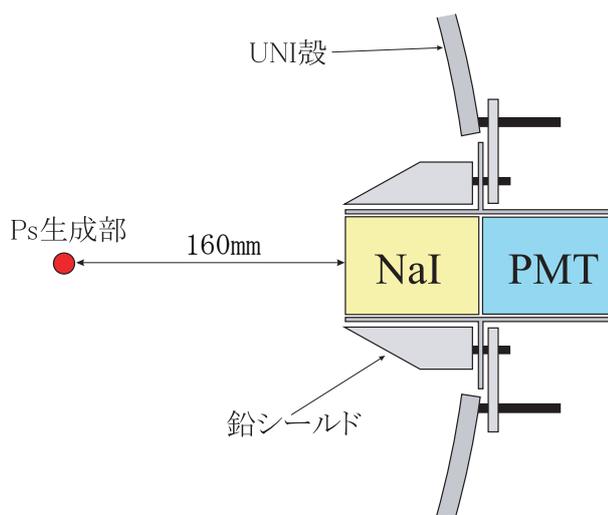


図 2.16: γ 線検出器

2.7 データ収集システム

本実験に使用されるデータ収集システムについて記述する。データ収集システムは、NIM規格や CAMAC 規格により構成されている。回路図を図 2.17、図 2.18 に示す。

まず、トリガーカウンター部以外の PMT30 本からの信号は 2 つに分けられ、一方は DelayCable(約 600ns) を経て CAMAC Analog-to-Digital Converter(ADC、電荷積分型、ト豊伸電子 C009) に送られる。もう一方は Discriminator(豊伸電子、NO19-1、Wide Width) に送られる。この Discriminator の出力波形の幅を $1 \mu\text{s}$ と広くすることで、NaI の長い残光時間によって生成される 2 つ以上のパルスを除去する。なお、Discriminator のスレッシュホールド電圧は γ 線エネルギー約 75 keV 相当に設定されている。Discriminator(Wide Width) の出力は Discriminator(Narrow Width) に送られる。この Discriminator(Narrow Width) の出力波形の幅は約 200 ns であり、出力信号はここで 2 つに分けられる。一方は Fixed Decay 回路(約 600 ns, 豊伸電子 N009) を通って CAMAC Time-to-Digital Converter(TDC, REPIC RPC-060,061) の停止信号へ、もう一方は 32 ch Input Multiplicity Logic(REPIC RPN-130) へ送られる。Multiplicity Logic は、ロータリースイッチで選択された数以上の信号が同時に入力された際に NIM レベルの信号を出力する。Multiplicity Logic からの出力は Discriminator を通って Coincidence 回路(豊伸電子 NO17) に送られる。この Coincidence 回路では、トリガーカウンター部の PMT からの信号を Discriminator に通した信号と同期を取る。これによりトリガー信号ではない光電子増倍管のノイズによるバックグラウンドの除去を行う。Coincidence 回路の出力は 3 つに分けられ、Gate Generator(豊伸電子 NO14)、Discriminator(豊伸電子 HEN008)、CAMAC Scaler(KAIZU 3122) へ送られる。Gate Generator からの出力信号は ADC で使用するゲート信号となる。Discriminator からの出力信号は再びトリガーカウンター部の PMT からの信号と同期を取るために Coincidence 回路へ送られる。Coincidence 回路からの出力信号は Quad Logic FANOUT(KAIZU 490) モジュールへ送られる。FANOUT モジュールからの出力信号は 4 つに分けられ、それぞれ TDC のスタート信号へ送られる。ADC、TDC、Scaler からのデータは CAMAC Crate Controller を通って 12 bit 信号として PC へ送られる。PC が 1 イベント分のデータを受け取ると、全ての CAMAC モジュールをクリアする。

2.8 TimeWalk

信号の大きさにより、スレッシュホールド電圧を超えるタイミングが異なる。信号が小さいほど検出される時間が遅くなるため、エネルギーによる補正を行う。図 2.19 に模式図を示す。Timewalk 補正の方法を次に示す。

- エネルギーを分割 (250 keV までは 25 keV ごと、250 keV 以降は 50 keV ごと)
- 各領域で時間を変数としたガウス関数をフィッティングにより求める。
- mean 値をプロットする
- $t = \frac{a}{\sqrt{E} + \frac{b}{E} + C}$ (t: 時間 [ns] E: エネルギー [keV] a,b,c: フィットパラメーター)
- フィットした関数を用いて補正

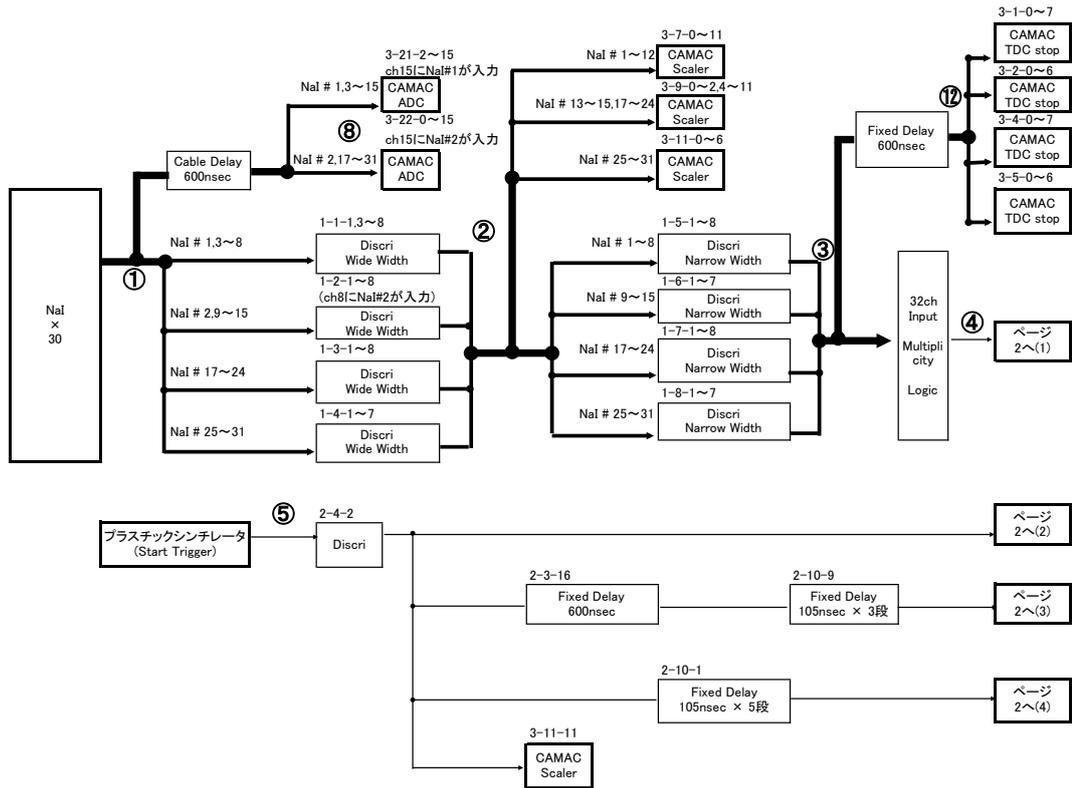


図 2.17: 回路図 (1)[13]

モジュールの見方

番地名表記:	1	1	1	番地名	入力	出力	ケーブル30本	ケーブル複数本
1:上段, ニムクレート1	ステーションNo.	ch No.		モジュール名			→	→
2:中段, ニムクレート2							→	→
3:下段, CAMACクレート							→	→

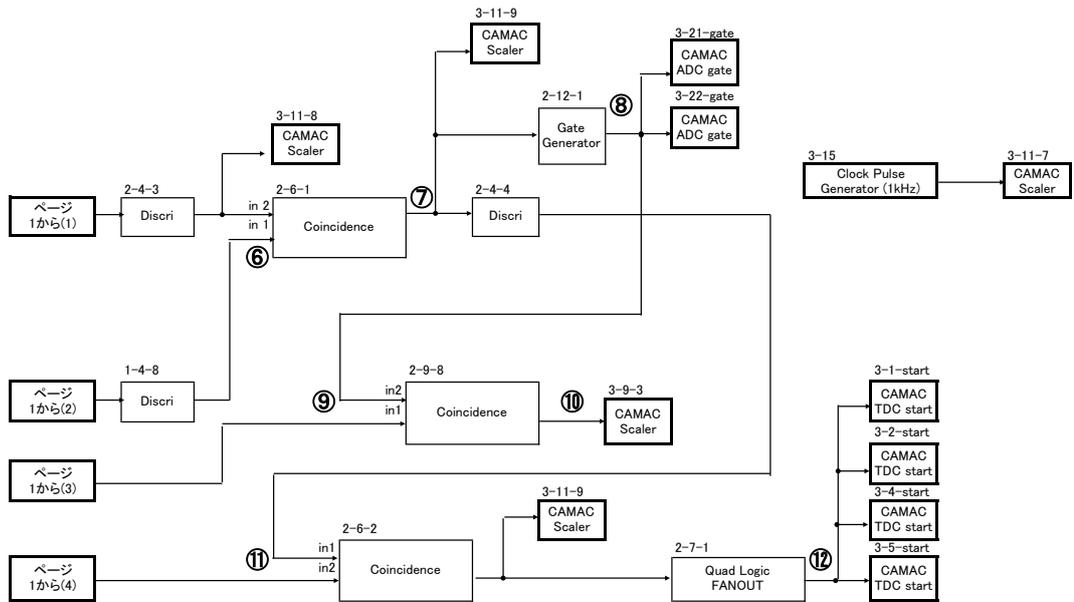


図 2.18: 回路図 (2)[13]

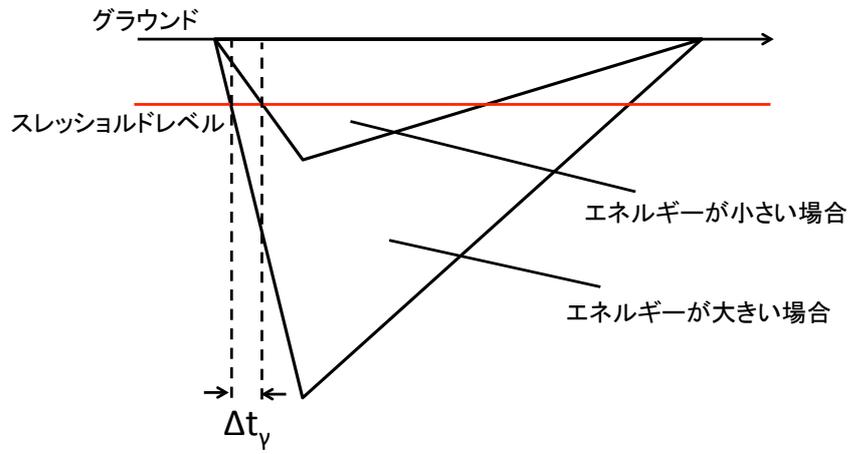


図 2.19: Time Walk

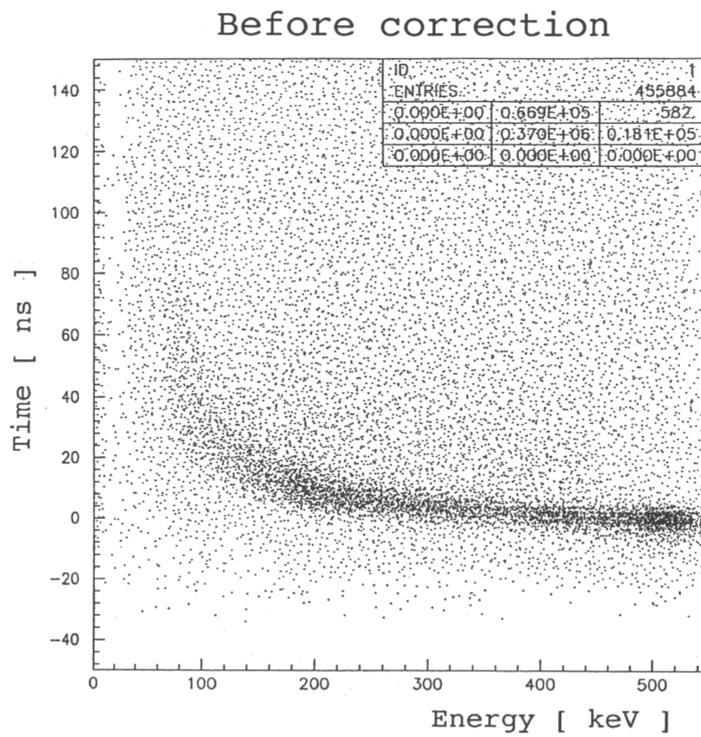


図 2.20: エネルギー (横軸) と時間 (縦軸) の関係 [13]

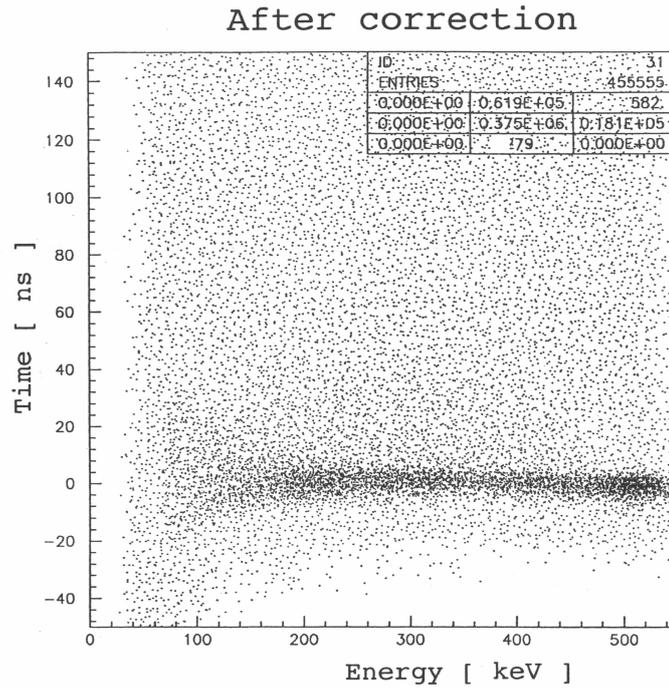


図 2.21: エネルギー (横軸) と時間 (縦軸) の関係 ; TimeWalk 補正後 [13]

2.9 イベントセレクション

・バックグラウンド事象

頻度の多い BG(バックグラウンド) 事象として表 2.2 の 6 つが考えられる。第 8 章でもより詳細に記述する。

表 2.2: バックグラウンド事象

バックグラウンド事象
BG1 ; 2 光子崩壊+遷移 γ 線
BG2 ; 3 光子崩壊
BG3 ; Accidental BG2 \times BG1
BG4 ; Accidental BG2 \times BG2
BG5 ; Accidental e^+ \times BG1
BG6 ; Accidental e^+ \times BG1 \times BG1

BG1 ; 2 光子崩壊+遷移 γ 線

2 光子崩壊と β^+ 崩壊による遷移 γ 線は時間的に分離出来ない。オルソポジトロニウム の平均寿命が約 142ns であることから陽電子発生後の時間を利用して BG1 は時間的に排除が可能である。

BG2 ; 3 光子崩壊

3 光子崩壊による BG は 5 光子崩壊と同じくオルソポジトロニウムを経る崩壊のために時間情報以外のエネルギーやヒット数などを利用して排除を行う。5 光子崩壊の約 10×10^6 の頻度で発生するために非常に大きい BG 事象となっている。

BG3 ; Accidental BG2 × BG1

アクシデンタルに BG1 と BG2 が同時に発生する事象である。

BG4 ; Accidental BG2 × BG2

3 光子崩壊が 2 つ同時に発生する事象である。

BG5 ; Accidental e^+ × BG1

陽電子トリガーに検出された陽電子とは別の β 崩壊によりアクシデンタルにオルソポジトロニウムの寿命程度離れた時間差で 2 光子崩壊+遷移 γ 線が発生する事象。

BG6 ; Accidental e^+ × BG1 × BG1

陽電子トリガーに検出された陽電子とは別の β 崩壊によりアクシデンタルにオルソポジトロニウムの寿命程度離れた時間差で (2 光子崩壊+遷移 γ 線) × 2 が発生する事象。

BG を排除のためのイベントセレクションの手法について記述する。なお実験データではエレクトロニクスの段階で 1 本あたりのエネルギーが 75 keV 以下の γ 線が含まれるイベントは排除されている。解析手法の改良により変更した部分も多いのでここでは定性的な内容に留める。

・ ヒット数による選択

NaI に入射した光子の数を選擇する事により、選出したい任意の数の光子への崩壊事象の選擇を行う

・ 直線ヒット排除

主なバックグラウンドである 2 光子崩壊事象は、同一直線上に 2 光子が放射される。したがって、同一直線上の NaI に光子が入射した事象を排除し、2 光子崩壊事象の排除を行う。

・ 平面ヒット排除

3 光子崩壊事象も主なバックグラウンドである。3 光子崩壊事象は崩壊点を含む任意の平面上に崩壊する。サッカーボール構造に配置された 32 本の γ 線検出器はそれぞれ 8 個、15 組の平面を持つ (図 2.22、表 2.3)。1 つの平面で 3 つ以上の γ 線検出器にヒットしたイベントを排除し、3 光子崩壊事象の排除を行う。

・ シングルエネルギーカット

式 2.10 を全ての γ 線に対して行う。

$$75 \leq E_i \leq 350[\text{keV}] \quad (2.10)$$

・ 運動量和による選択

ポジトロニウムは生成時に熱エネルギー程度のエネルギーしか持たないので、Na に入射した光子が全てポジトロニウムの多光子崩壊由来ならば、その運動量和は 0 となるはずである。ただし γ 線検出器の位置分解能を考慮して式 2.11 の選擇を行う。

$$|\sum_{i=1}^3 P_i| \leq 90[\text{keV}/c] \quad (2.11)$$

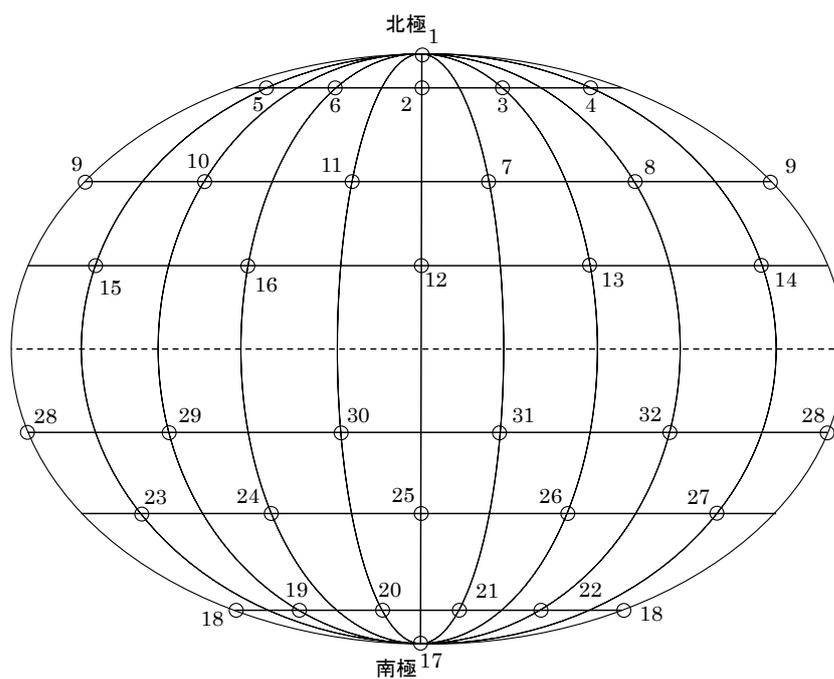


図 2.22: NaI シンチレータの配置

表 2.3: 崩壊点を含む同一平面上に位置する NaI 番号

NaI 番号
1, 2, 9, 12, 17, 18, 25, 28
1, 3, 10, 13, 17, 19, 26, 29
1, 4, 11, 14, 17, 20, 27, 30
1, 5, 7, 15, 17, 21, 23, 31
1, 6, 8, 16, 24, 17, 22, 32
7, 11, 13, 16, 23, 27, 29, 32
3, 4, 7, 9, 19, 20, 23, 25
2, 6, 7, 10, 18, 22, 23, 26
7, 8, 12, 14, 23, 24, 28, 30
4, 5, 8, 10, 20, 21, 24, 26
2, 3, 8, 11, 18, 19, 24, 27
8, 9, 13, 15, 24, 25, 29, 31
5, 6, 9, 11, 21, 22, 25, 27
9, 10, 14, 16, 25, 26, 30, 32
10, 11, 12, 15, 26, 27, 28, 31

・エネルギー和による選択

ポジトロニウムの多光子崩壊事象により放出された光子のエネルギー和は 1022keV となるはずである。したがって式 2.12

$$962 \leq \sum_{i=0}^n E_i \leq 1082[\text{keV}] \quad (2.12)$$

2.10 2014年までの成果

図 2.23 に 8 年間の実験結果を示す。全ての選別条件を適用すると 24 個の 5 光子崩壊事象らしきイベントを検出した。エネルギー分布から BG とみられるピークをフィットして差し引くと約 14 イベントの 5 光子崩壊事象らしきイベントを検出した。しかし 2014 年の論文 [15] において BG を排除するための各種イベントカットを行うと 5 光子崩壊事象の検出効率は 3.6×10^{-6} 、8 年間の実験における期待値は 0.035 個と見積もられ、3 光子崩壊事象による BG が 20 個と見積もられた。検出された 24 個のイベントは全て BG とみなして矛盾がないことがわかった。5 光子崩壊事象の検出効率、統計量の向上が求められる。

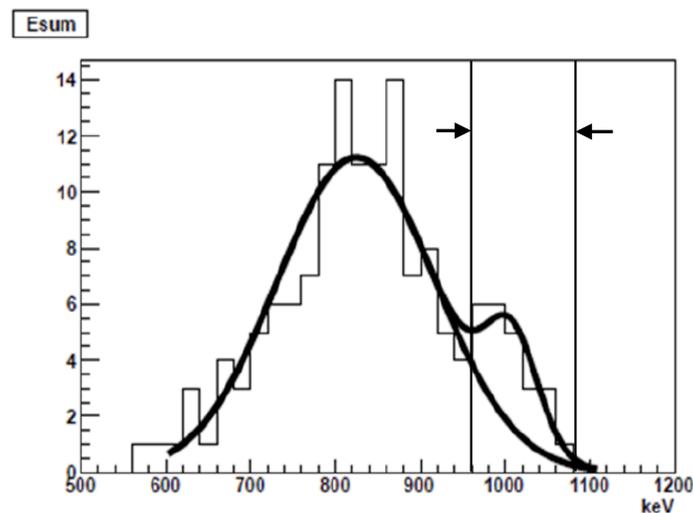


図 2.23: 実験結果

横軸は検出した 5 光子のトータルエネルギー、矢印で囲まれたレンジに 24 イベント

3 光子崩壊事象のコンプトン散乱による BG

3 光子崩壊によって発生した γ 線が最初にヒットした NaI シンチレーター内でコンプトン散乱を起こし、違う NaI シンチレーターにもヒットすることがある。これにより本来 3 光子崩壊である事象を 5 光子崩壊としてしまう BG がある (図 2.24)。3 光子崩壊は 5 光子崩壊と同様に平均寿命 142ns の $o\text{-Ps}$ を経た物理過程であるため、崩壊時間による排除が出来ず γ 線検出器のエネルギーや運動量和を利用して排除するしか方法がない。5 光子崩壊事象は運動量和がゼロに等しくなるので、それを利用して大部分を排除することが出来るのだが、偶然運動量和がゼロになる場合もある上に 3 光子崩壊の頻度は 5 光子崩壊の約 10^6 倍程度あるため大きな BG となっている。

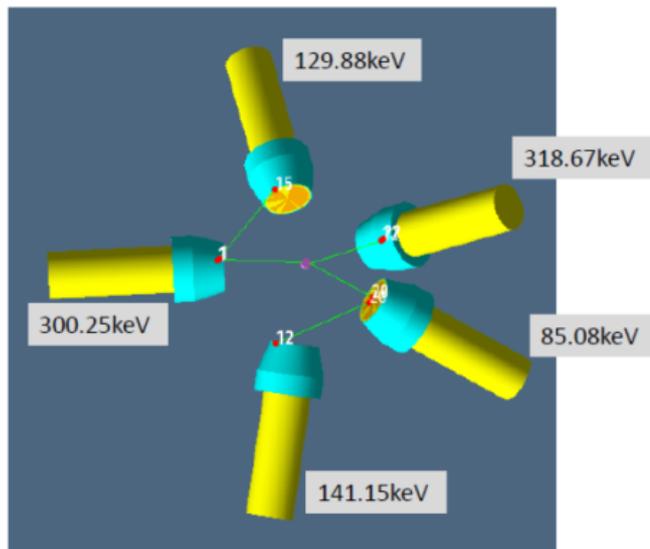


図 2.24: 3 光子崩壊事象のコムプトン散乱による BG

第3章 本研究の課題と目的

第3章では本研究が解決すべき課題を示した上で、それを解決するための手法について記述する。これまでの経緯を踏まえた上で、主に研究方法を選んだ背景について記述する。研究手法の詳細については後の章で記述する。

3.1 5光子崩壊事象検出のための課題

5光子崩壊事象検出のための大きな課題として次の4つが挙げられる。

- 3光子崩壊事象のコンプトン散乱によるBG
- 5光子崩壊事象の統計量
- 5光子崩壊事象の検出効率
- アクシデンタルBG

3.2 本研究の目的

これらの課題に対して効果的な改良を行った場合に期待される成果を見積もることが本研究の目的である。

3.3 鉛シールドの強化によるBGの排除

3光子崩壊によるBGを減らすために2000年以前に使用していた鉛のコリメーターを再度使用する。過去の実験においては図3.2に示すように長い鉛コリメーターを使用していたが、2001年以降の実験ではNaIシンチレーターを中心に近く設置して検出効率を上げるために小さい鉛コリメーターを導入していた(図3.1)。この長いコリメーターを再度使用して図2.24のようなBGを排除する。

3.4 線源およびポジトロニウム生成部の改良による生成量の増大

統計量を増やす手法としてポジトロニウム生成部の改良を行う。現状の磁場輸送部を使用したポジトロニウム生成には陽電子線源である Na^{22} が陽電子と同時に出す遷移 γ 線1275keVの γ 線の影響を減らせるメリットがある。しかし放射線管理区域外で利用が許される1MBqの線源を使用してもトリガーレート10kHz程度が限界である。そこで陽電子線源を中心部に設置し発生した陽電子をより効率利用してポジトロニウムを生成する改良を加える。

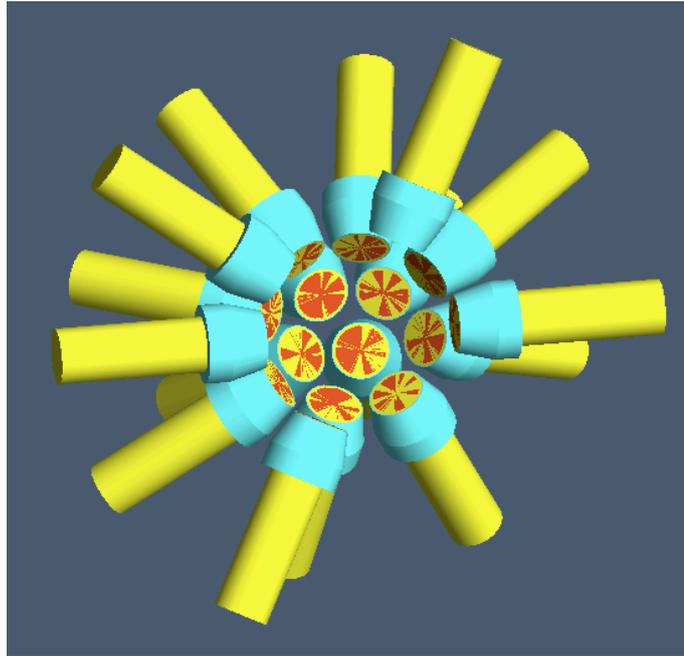


図 3.1: 小さい鉛コリメーター

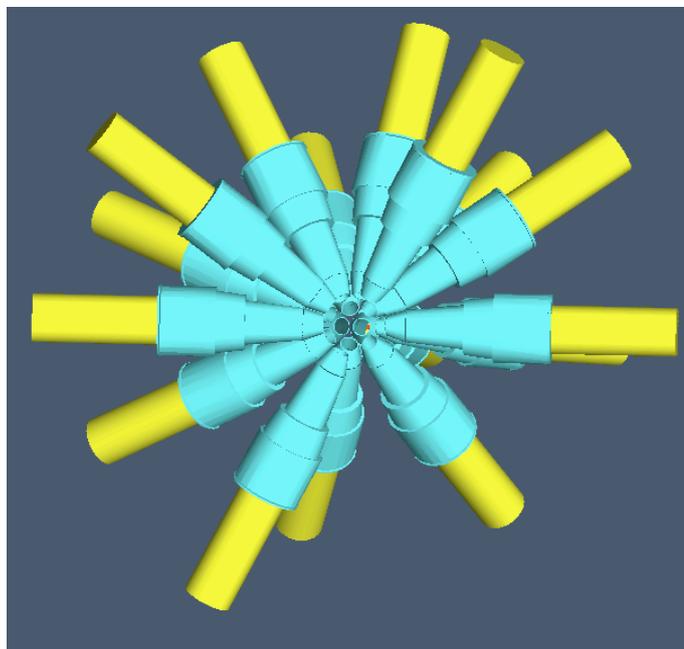


図 3.2: 大きい鉛コリメーター

3.5 4 ヒットイベントの利用による検出効率の向上

5 光子崩壊事象の検出効率を上げるためにこれまで利用していなかった 4 ヒットイベントを利用する。5 光子崩壊により発生した 5 本の γ 線の内 1 本を取りのぞいたイベントはトータルエネルギーと運動量和に大きな相関を持つ。これを利用して 5 光子崩壊事象の検出効率を向上させる。詳細は 7 章に記述する。

3.6 アクシデンタル BG

統計量増大のために中心部に線源を設置するが、線源強度は使用限界の 1MBq が適切とは限らない。5 光子崩壊や 3 光子崩壊のシングルレートは線源強度に比例するがアクシデンタルレートは線源強度の 2 乗に比例するためである。アクシデンタル BG を見積もり適切な線源強度を見積もる必要がある。アクシデンタル BG 排除のために陽電子トリガーにおいてマルチヒットイベントカットを導入する。オルソポジトロニウムは陽電子発生→オルソポジトロニウム生成後、平均 142ns で崩壊する。主なアクシデンタル BG は図 3.4 のようにオルソポジトロニウムの 3 光子崩壊の際に β 崩壊による遷移 γ 線と陽電子対消滅による 2 光子崩壊の 3 本の γ 線が γ 線検出器の時間分解能以下の時間差で発生したイベントである。陽電子トリガーにおいて 1 つのトリガー信号を得て γ 線検出器が γ 線を検出する間に次のトリガー信号が発生した場合にそのイベントを排除する。マルチヒットイベントカットを行うことでアクシデンタル BG の排除を目指す。

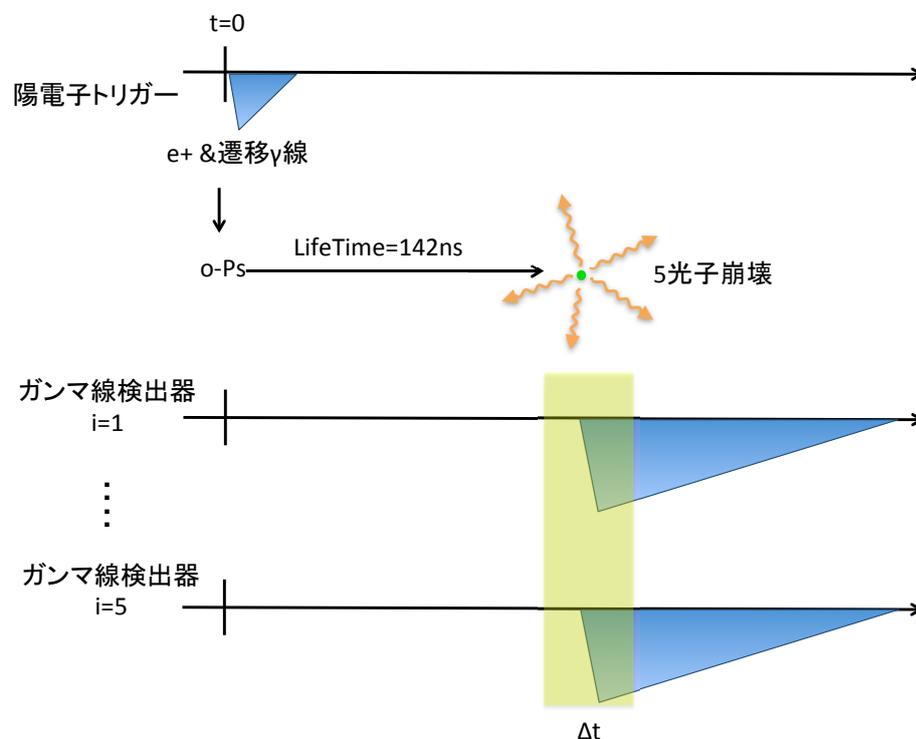


図 3.3: 5 光子崩壊事象

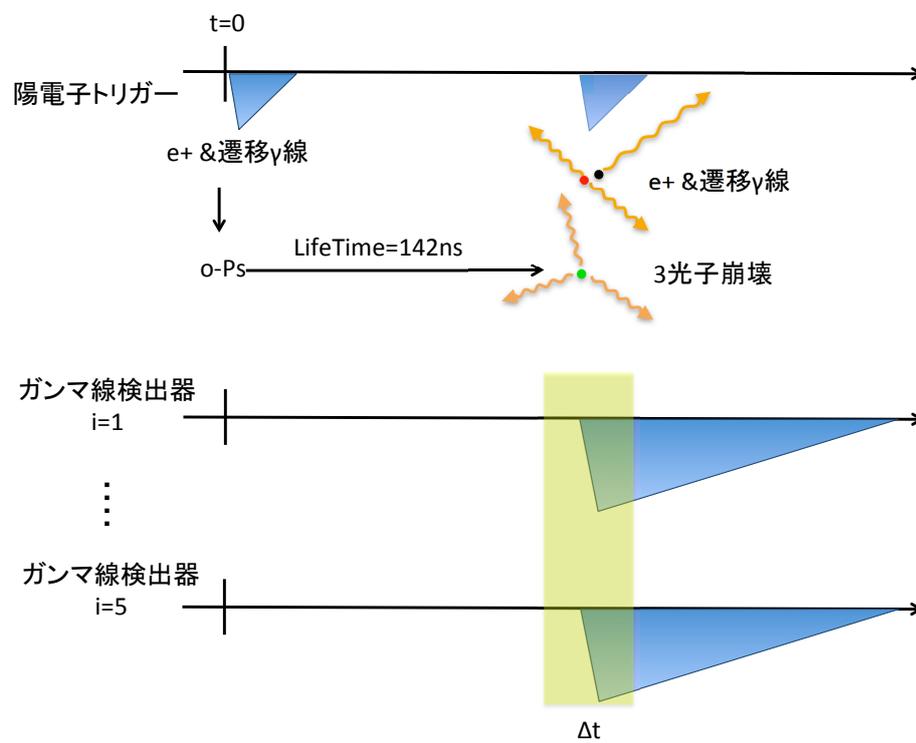


図 3.4: 3 光子崩壊 & β 崩壊

第4章 シミュレーション手法

4.1 シミュレーション手法について

ポジトロニウムの崩壊シミュレーションの手法について記述する。4つの過程で別々にシミュレーションを行っている。

- (1) 陽電子エネルギースペクトル
- (2) 陽電子の消滅点分布
- (3) ポジトロニウムの多光子崩壊
- (4) γ 線シミュレーション

4.2 陽電子エネルギースペクトルのシミュレート

^{22}Na から発生する陽電子のエネルギースペクトルのシミュレート手法について記述する。 β 崩壊により発生する陽電子のエネルギースペクトルは Fermi の理論に従い、エネルギー ϵ の電子を放出する確率は次の式で表される。

$$\omega(\epsilon) = \frac{g^2 m_2^5 c^4}{2\pi^3 \hbar^7} |M|^2 F(Z, \epsilon) (\epsilon_0 - \epsilon)^2 \epsilon \sqrt{\epsilon^2 - 1} \quad (4.1)$$

電子のエネルギー ϵ は質量を含み、電子の質量 $m_e c^2$ を単位としている。 ϵ は β 崩壊の Q 値と次式の関係にある。

$$Q = \epsilon_0 - 1 \quad (4.2)$$

M は原子核の行列要素であり $F(Z, \epsilon)$ は陽電子の波動関数が、原子核が作るポテンシャルによるクーロン場の補正因子である。式 4.1 を変形すると式 4.3 のように直線になる。

$$K(\epsilon) = \left[\frac{\omega(\epsilon)}{\epsilon \sqrt{\epsilon^2 - 1} F(Z, \epsilon)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{g^2 m_2^5 c^4}{2\pi^3 \hbar^7} \right]^{\frac{1}{2}} |M| (\epsilon_0 - \epsilon) \quad (4.3)$$

[8] の実験により測定された ^{22}Na の KuriePlot を図 4.1 に示す。クーロン場の補正因子 $F=1$ を仮定し、式 4.3 より陽電子のエネルギースペクトルを得る。(図 4.2)

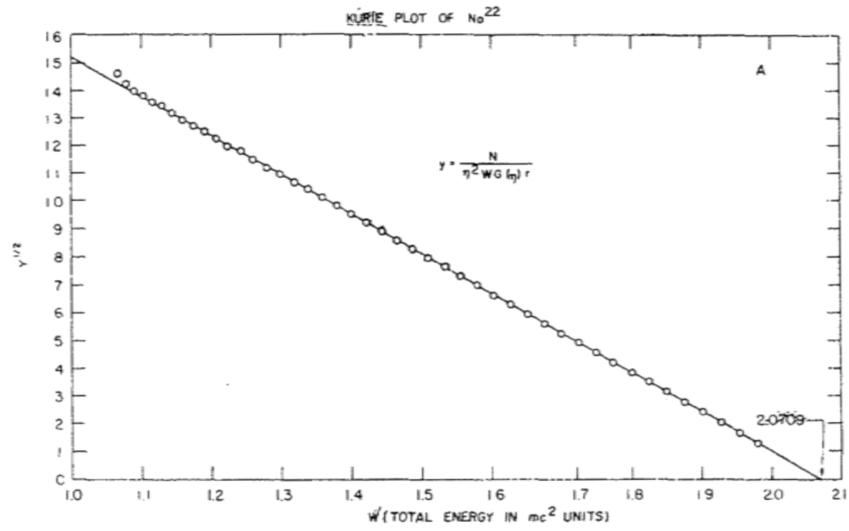


図 4.1: ^{22}Na 由来の β 線の KuriePlot[8]

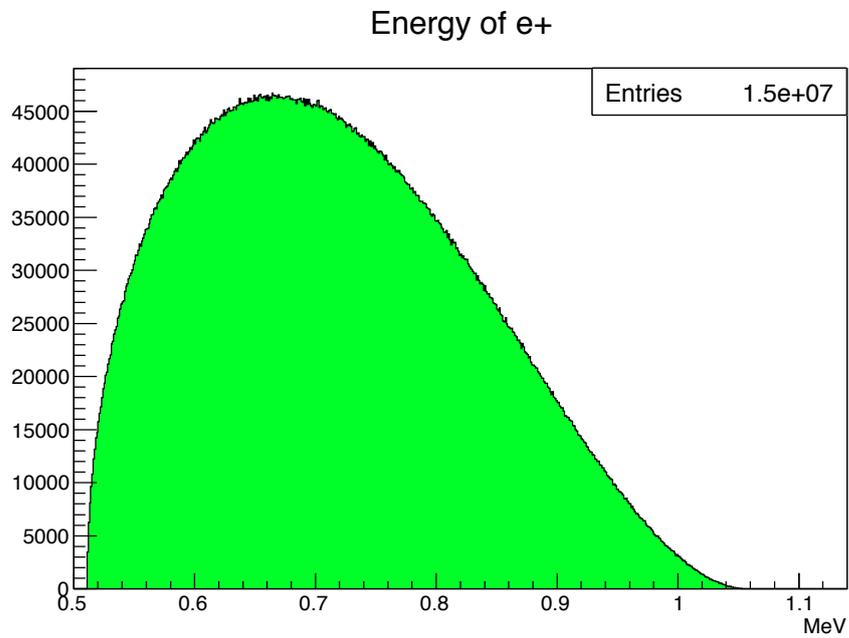


図 4.2: ^{22}Na 由来の陽電子エネルギースペクトル (質量エネルギーを含む)

4.3 陽電子の消滅点分布

(1) で得られたエネルギー分布にしたがって 4π 方向にランダムに陽電子を発生させる。シミュレーションツールとして Geant4[17] を使用している。Geant4 は、粒子と物質の相互作用をシミュレートするソフトウェアである。検出器の構造や構成物質を再現し、粒子の振る舞いをシミュレーションすることが出来る。6 章で示されるポジトロニウム生成部における消滅点分布を図 4.4、図 4.5 に示す。実際は電子とすぐに対消滅を起こす場合とポジトロニウムを形成して平均寿命程度、物質中を移動してから対消滅を起こす場合の 2 種類がある。最も寿命の長いオルソポジトロニウム (142ns) を形成した場合は物質中を 1mm 程度動くこともあるがシミュレーションはポジトロニウムは移動しないと仮定して行っている。図 4.5 で得られた分布を 3次元ヒストグラムにして次のステップのシミュレーションに使用する。3次元ヒストグラムは x, y, z 軸方向それぞれに -10mm 10mm を 0.05mm 幅のビンで分けている。

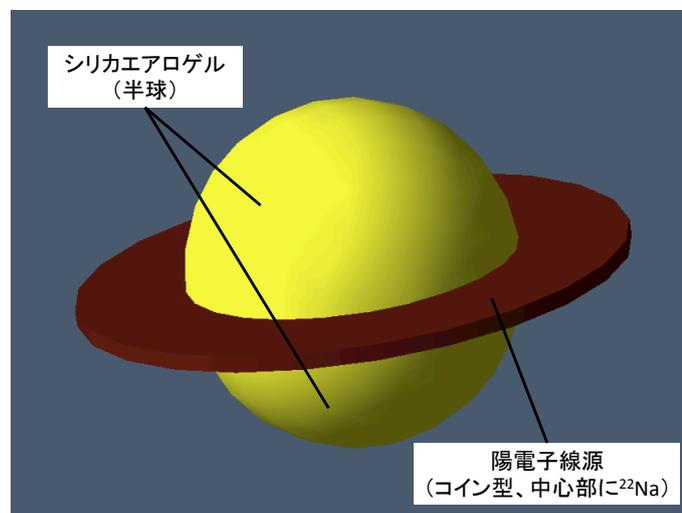


図 4.3: ポジトロニウム生成部

4.4 ポジトロニウムの多光子崩壊

ポジトロニウムの多光子崩壊は GRACE[16] というツールを使用してシミュレーションを行う。GRACE は、ファインマンダイアグラム及び不変振幅の自動生成、崩壊率のモンテカルロ積分を行い、発生粒子の 4 元運動量を生成する物である。GRACE でのポジトロニウムの崩壊事象のイベント生成は、運動エネルギー 1eV の電子と陽電子を衝突させて光子を発生させる。ヘリシティを設定することによりスピンの変更が可能である。ヘリシティの設定の組み合わせは 4 通り存在し、ヘリシティの状態によってトータルスピン S_z が異なる。粒子の進行方向を量子化軸にとる。表

$S_z = \pm 1$ はすべてオルソポジトロニウムであり、 $S_z = 0$ はオルソポジトロニウムとパラポジトロニウムが 1 対 1 で混合していると考えられる。 $S_z = \pm 1$ と $S_z = 0$ を 2:1 で混合したイベントを崩壊 γ 線の 4 元運動量として使用する。

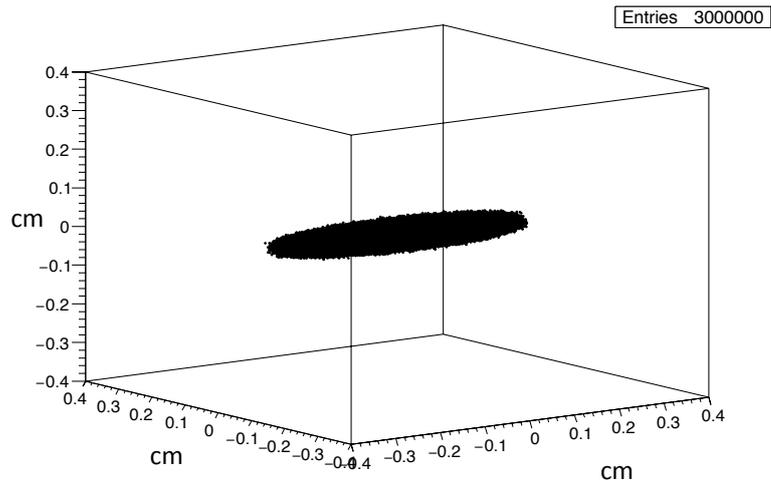


図 4.4: 陽電子の消滅点分布 ()

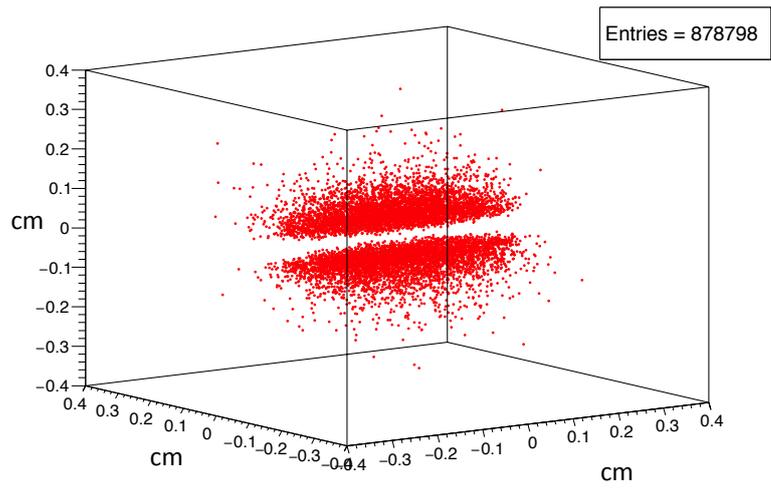


図 4.5: 陽電子の消滅点分布 (シリカエアロゲル内)

表 4.1: トータルスピンのヘリシティとの関係

トータルスピン	電子のヘリシティ	陽電子のヘリシティ
$S_z=+1,-1$	+1	-1
	-1	+1
$S_z=0$	+1	-1
	-1	-1

4.5 γ 線シミュレーション

(2)、(3)で作成した崩壊点分布と4元運動量をもとに γ 線シミュレーションを行う。シミュレーションツールとしてGeant4を使用している。検出器の構造や構成物質を再現し、 γ 線の振る舞いをシミュレーションし γ 線検出器が検出するエネルギーを

Randomize

シミュレーションを行う際に、統計量を増やすことはGRACEのイベント数を増やすことと同義である。しかし擬似乱数生成ルーチンの限界でGRACEで生成出来るイベント数は 10^8 程度である。5光子崩壊の100万倍の頻度で発生する3光子崩壊のシミュレーションにはイベント数が足りない。そこで実際には 10^8 イベントの3光子の4元運動量を発生させ、運動学的関係を保ったまま 4π 方向にランダムに回転させて 10^{11} イベントのシミュレーションを行っている。

PrimaryCut

3光子崩壊のシミュレーションは 10^{11} 個程度行うために非常に時間がかかる。そこでシミュレーションの高速化を行った。(2)、(3)をもとに検出器を再現した空間に γ 線を発生させる際に、最初の3本の γ 線が向いている向きによってイベントを排除する。2本以上の γ 線が γ 線検出器を向いている場合のみGeant4で γ 線をシミュレーションし、1本以下の場合にはBGにはならないとしてGeant4による粒子と物質のシミュレーションを行わずにイベント数としてはカウントする。図4.6に最初の γ 線の方向が検出器を向いていた数とBG量の関係を示す。イベント数は 3.276×10^{10} イベント、イベントセレクションは検出器ヒット数 ≥ 4 である。1本以下のイベントを排除することによりBGの量を1.4%低く見積もることになる。他のイベントセレクションを適用した場合1.4%という数値は正確な数値ではないがそれを確かめるには時間がかかり過ぎてしまう。この手法を使うことでシミュレーションに要する時間は約1/10になった。

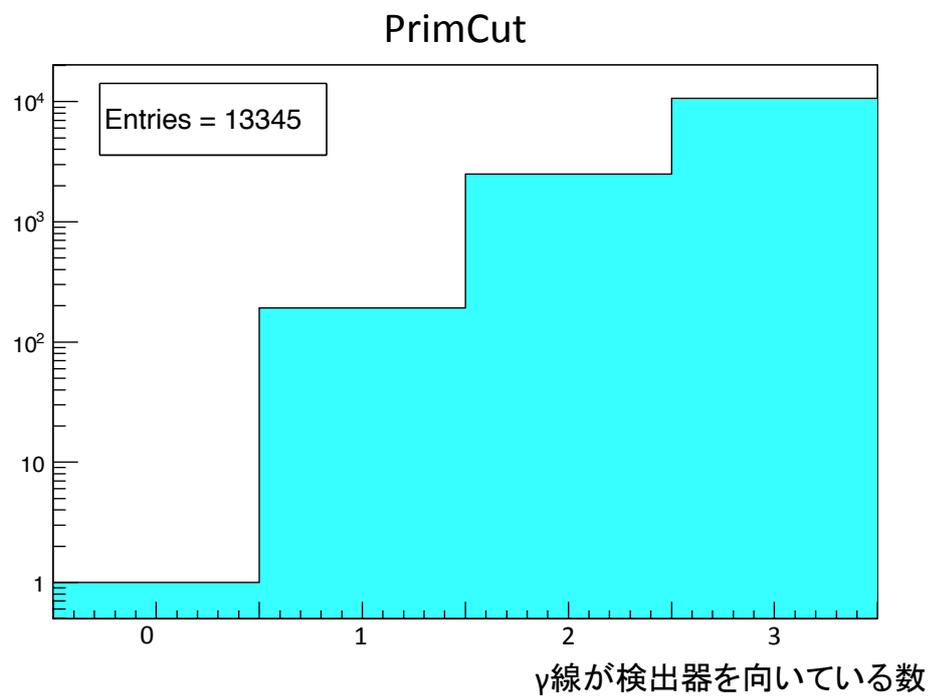


図 4.6: 4 ヒットしたイベントにおいて γ 線の最初の方向が検出器に向いている数

第5章 鉛シールド強化の評価

2000年以前はより長い鉛コリメーターを使用していたが検出効率を向上するために2001年以降は短い鉛コリメーター(図5.1)を導入するという経緯があった。導入の際には5光子崩壊の検出効率向上の評価はなされていたが、導入によるBGの増加についての評価はなされていなかった。この章ではシミュレーションを用いて、使用する鉛コリメーターの違いによる5光子崩壊に対する検出効率、3光子崩壊によるBGについて記述する。

5.1 アクセプタンスの低下

長い鉛を使用すると γ 線検出器のポジトロニウム生成部からの距離が長くなりアクセプタンスの低下により検出効率がさがる。表5.1にアクセプタンスと中心部からの距離の関係を示す。

表 5.1: NaIシンチレーターのアクセプタンス

中心からの距離	16cm	18cm	21cm	24cm	26cm
NaI 1つの立体角占有率 (%)	1.42	1.12	0.82	0.63	0.54
NaI30本の立体角占有率 (%)	42.528	33.602	24.687	18.901	16.105

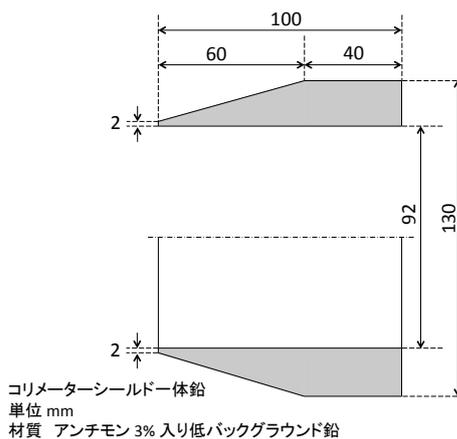


図 5.1: 短い鉛コリメーターの寸法

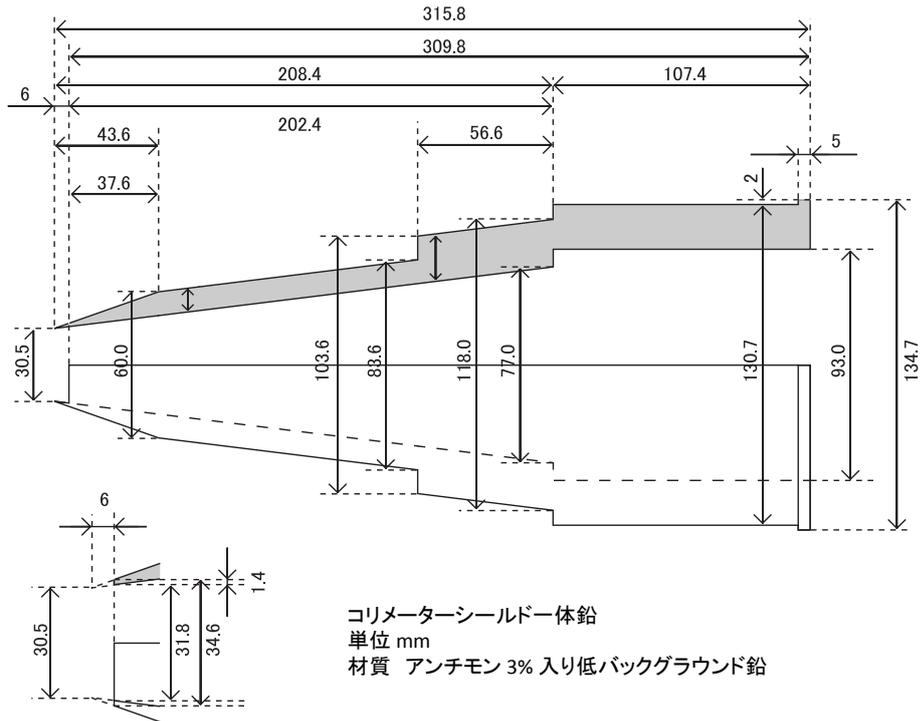


図 5.2: 長い鉛コリメーターの寸法

5.2 3光子崩壊BGの低下

短い鉛を使用した際の Geometry を図 5.2 に示す。その場合の 3 光子崩壊による BG と 5 光子崩壊検出数を図 5.4 に示す。縦軸は陽電子トリガーの生成レート=12kHz を仮定した際に 1 年間で得られるイベント数である。鉛の変更による影響を比較するためにイベントセレクションはヒット数=5 のみを適用している。3 光子崩壊事象による BG が 5 光子崩壊事象の 10^4 倍ある。

次に長い鉛 (図 5.2) を使用した際と比較するのだが、磁場輸送部があると長い鉛をいれることが出来ない。そこで鉛の先端から 3.76cm を切断したものをシミュレーションで再現した。この鉛を使用した際の Geometry を図 5.2 に示す。その場合の 3 光子崩壊による BG と 5 光子崩壊検出数を図 5.6 に示す。 γ 線検出器の距離が 16cm から 26cm に離れたことで 5 光子崩壊事象の検出期待値が 10^{-1} 倍程度になったが 3 光子崩壊 BG が 10^{-5} 倍程度と、非常に効果的な BG 排除が可能となることがわかった。

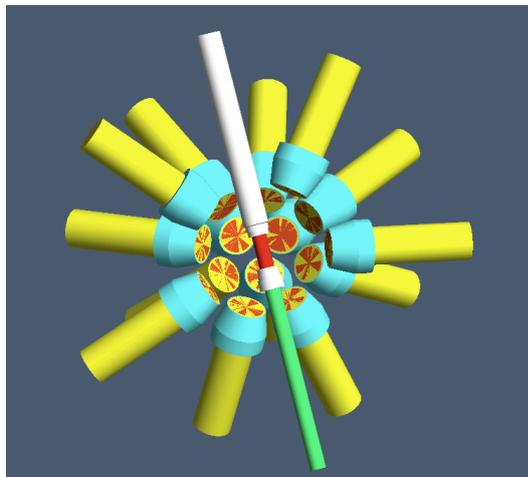


図 5.3: 短い鉛

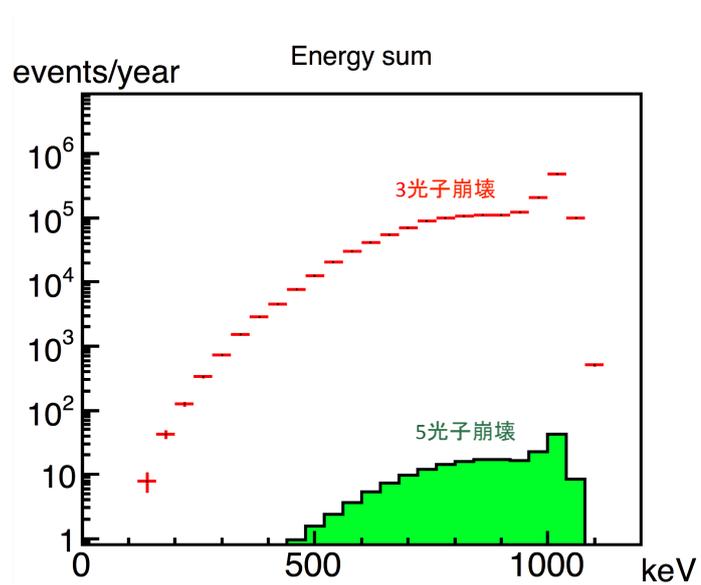


図 5.4: イベントセレクションは NaI ヒット数=5 のみ
縦軸は陽電子トリガー=12kHz を仮定したときの evets/year

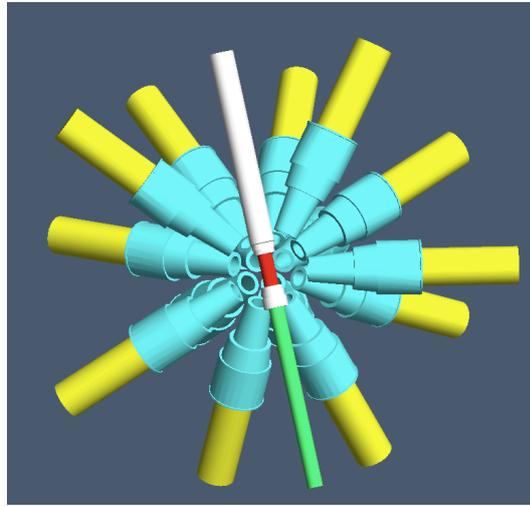


図 5.5: 長い鉛 (先端から 3.76cm を切断)

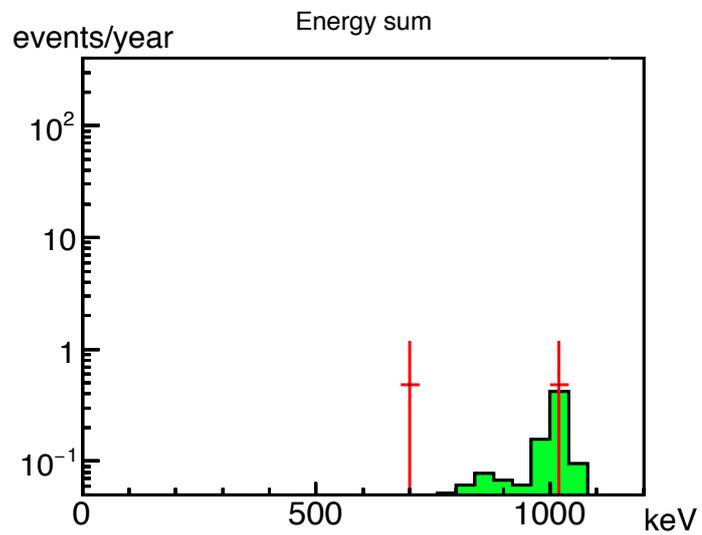


図 5.6: イベントセレクションは NaI ヒット数=5 のみ
縦軸は陽電子トリガー=12kHz を仮定したときの evets/year

第6章 Plastic Scintillator と陽電子線源の一体化による Ps 生成部の改良と評価

6.1 ビームパイプを使用した場合の陽電子トリガー数

これまで利用してきた真空管を利用した Ps 生成部。線源を 1MBq に上げた場合のスレッシュホールドスキャンの実験結果を図 6.1 に示す。横軸がトリガー PMT の閾値電圧レベル、縦軸がトリガーレートである。磁場輸送部によりトリガーレートは向上しているものの 1MBq の陽電子線源を利用して得られる陽電子トリガーは 12kHz 程度と陽電子の利用効率としては 1.2% 程度である。[15] を参考にポジトロニウムの生成率が 8% と仮定すると 5 光子崩壊事象は年間 3×10^4 個である。検出効率がこれまでの解析において 10^{-6} 程度と非常に低いこともあり、5 光子崩壊事象検出のために統計量を上げる必要がある。より強度の高い陽電子線源を利用する手段もあるが、放射線管理区域外で許される最大強度が 1MBq であり、それ以上の陽電子線源を利用する場合は RI 棟内の管理区域で実験を行う必要がある。我々は陽電子線源を中心部に配置することで統計量を上げる手段をとる。ポジトロニウムの 4 光子崩壊検出実験の際には ^{68}Ge を中心に配置して実験を行っていた。その際には 0.5MBq 程度の線源を用いてもアクシデンタルレートが大きすぎたために非常に困難な実験となった。しかし 5 光子崩壊は平均寿命 125ps で崩壊するパラポジトロニウム \rightarrow 4 光子崩壊に対して、平均寿命 142ns で崩壊するオルソポジトロニウム \rightarrow 5 光子崩壊であり大量に生まれる 2 光子崩壊の BG を時間的に排除できる。

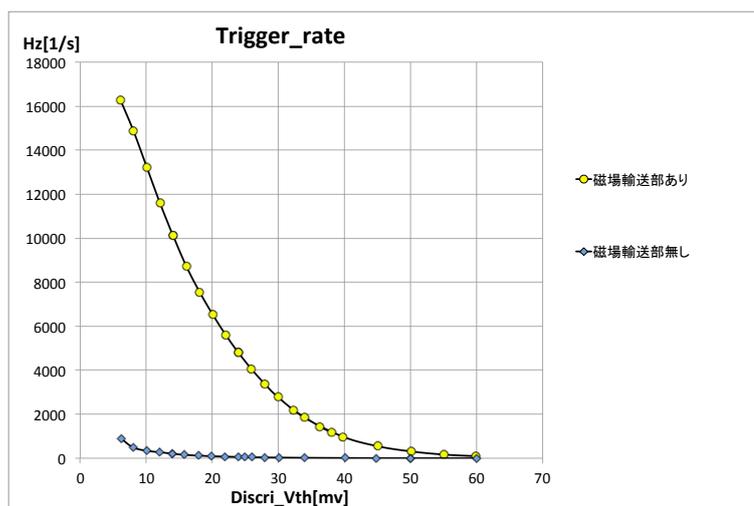


図 6.1: 1MBq の線源を使用した際のトリガーレート磁場輸送部を使用

6.2 陽電子線源

理想的には極薄の Plastic Scintillator で直接放射性物質を密封した陽電子線源を使いたい。Saint Gobain 社製 Plastic Scintillator BC400 直径 12.7mm、0.15mm 厚 (図 6.2) をドイツの Eckert & Ziegler 社と日本アイソトープ協会に送り、試作を依頼した。しかし強度と接着剤の問題により製作は困難であることがわかった。そこで質量が少なく薄い線源としてポリイミド製陽電子線源 ^{22}Na (日本アイソトープ協会製 NA351) の使用を想定する (図 6.3)。出来る限り質量の少ない構造にするため図 6.4 のような構造を想定する。陽電子線源の薄膜部に反射材として 15um 厚のアルミナイズドマイラー、その外側に陽電子の発生を検出するための 0.15mm 厚 Plastic Scintillator、その外側にオルソポジトロニウムを効率よく生成するためのシリカエアロゲル (半径 6mm 半球) を設置。Plastic Scintillator の性能を表 6.1 に示す。



図 6.2: PlasticScintillatorBC400 0.15mm 厚

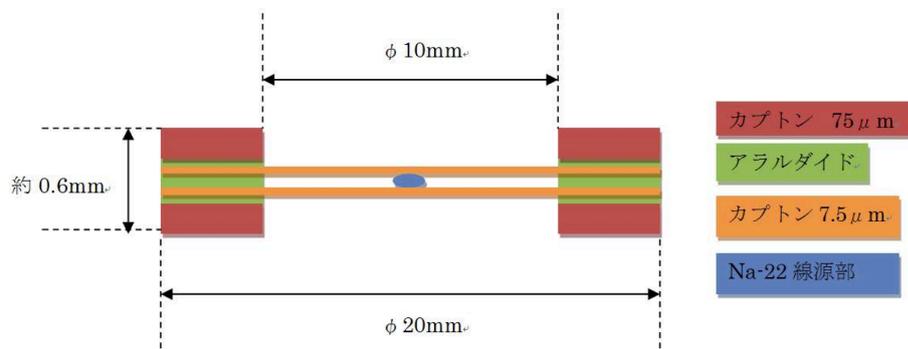


図 6.3: ポリイミド製陽電子線源 ^{22}Na (^{22}Na は中心部で直径 5mm 程度に広がっている)

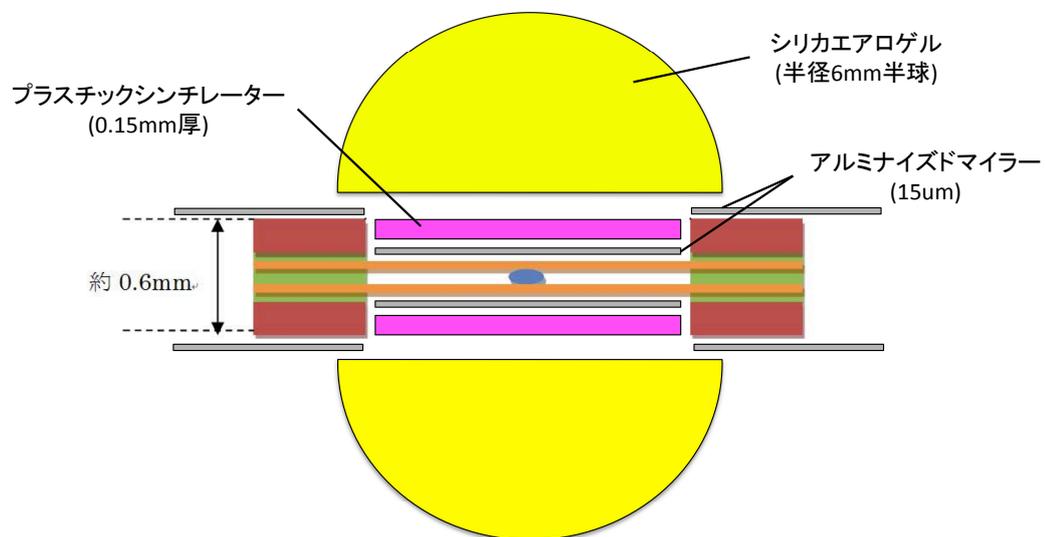


図 6.4: ポジトロニウム生成部断面図

表 6.1: Plastic Scintillator;BC400 の性能

Scintillator	発光量 [/keV]	発光波長 [nm]	DecayTime[ns]	減衰長 [cm]	密度 [g/cm^3]
BC400	約 13 個	423	2.4	250	1.032

陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー

図 6.4 のポジトロニウム生成部において線源部分から陽電子を図 4.2 のエネルギー分布で 3×10^6 イベント発生させたときに Plastic Scintillator に落とすエネルギーを図 6.5 に示す。エネルギーを全く落とさなかった 17.3% のイベントはグラフには加えていない。赤い斜線部分がオルソポジトロニウムを生成するときに Plastic Scintillator に落とされたエネルギーである。最小で 18keV、最頻値で 45keV のエネルギーになる。BC400 の発光量は NaI シンチレーターのおよそ 1/4 であり、1keV あたり約 13 個の光子が発生する。発生する数百個程度の光子を光電子増倍管で検出できる構造である必要がある。

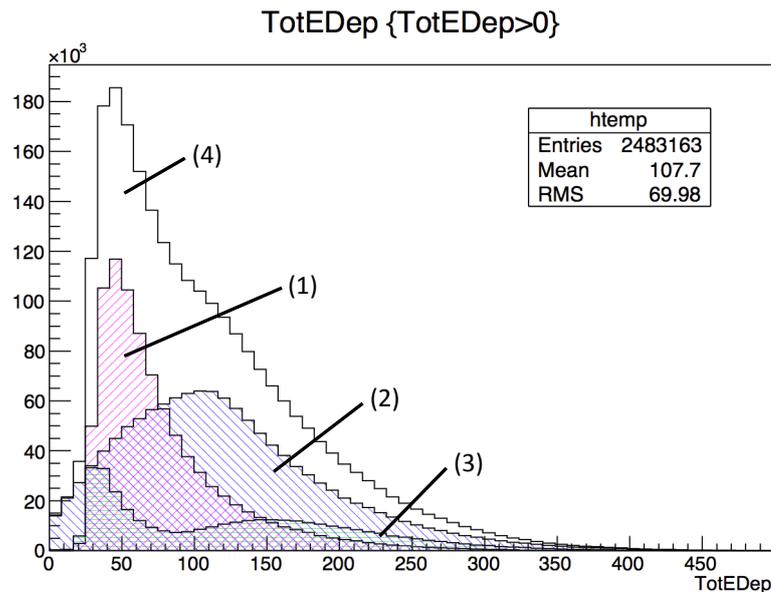


図 6.5: シミュレーション；陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー
(1) 赤い斜線：Plastic Scintillator を通過してシリカエアロゲル内で対消滅
(2) 青い斜線：シリカエアロゲルに到達せず Plastic Scintillator 内で対消滅
(3) 緑の斜線：シリカエアロゲルに到達したがシリカエアロゲル以外で対消滅
(4) 白抜き：上記 3 つの和

6.3 Plastic Scintillator 光量測定

BG 事象を減らすために中心部の物質量は出来る限り少なくしたい。その上で陽電子のトリガーが十分にとれる構造が実現出来るのかを Saint Gobain 製 Plastic Scintillator BC400 を使用して実験を行った。陽電子線源はポリイミド製線源ではなく、すでに研究室にあるチタン製陽電子線源 ^{22}Na を使用した (図 6.6、図 6.7)。想定されるジオメトリーにおいて直径 12.7mm、0.15mm 厚の Plastic Scintillator を使用して陽電子トリガーをとれるかを確認する。先に述べたように Plastic Scintillator を通過して、シリカエアロゲル内でポジトロニウムを生成する場合ほど陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギーが小さい。測定実験の概略を図 6.8、図 6.9 に、回路図を図 6.10 に各 PMT の印加電圧とディスクリレベルを表 6.2 示す。中心部からトリガー PMT を 4cm 離して設置し、その後ろにもう 1 枚同じサイズの Plastic Scintillator を設置し、陽電子が通過した際の光量を光電子増倍管が十分に検出できるかを確認する。



図 6.6: チタン製陽電子線源 ^{22}Na

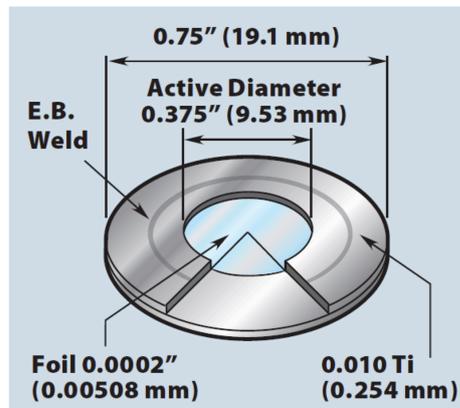


図 6.7: チタン製陽電子線源 ^{22}Na 寸法

表 6.2: 各 PMT の印加電圧とディスクリレベル (PM AMP(10 倍) 後)

PMT	印加電圧 [V]	Vth[mV]
PMT_01	1750	70.8
PMT_02	1750	70.8
PMT_03	1650	99.3



図 6.8: 陽電子による Plastic Scintillator の発光量測定実験のセットアップ

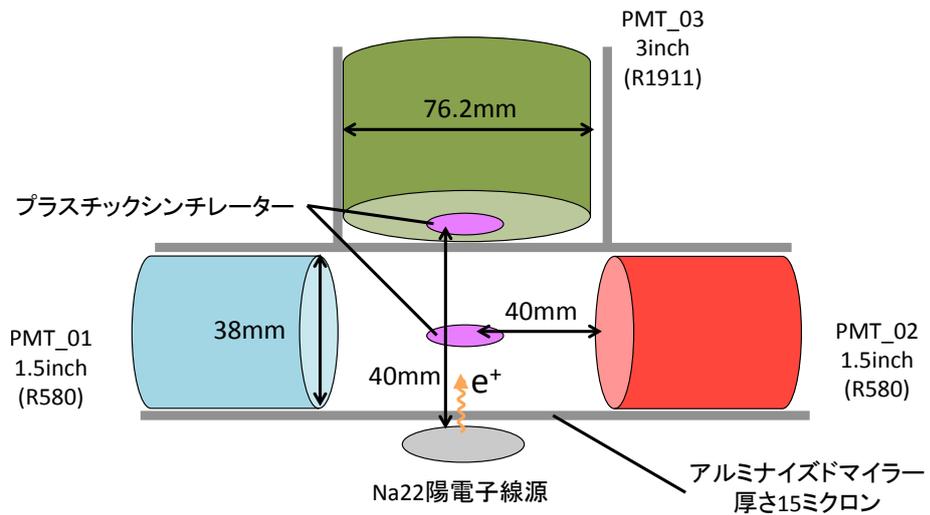


図 6.9: 陽電子による Plastic Scintillator の発光量測定実験のセットアップ_概略図

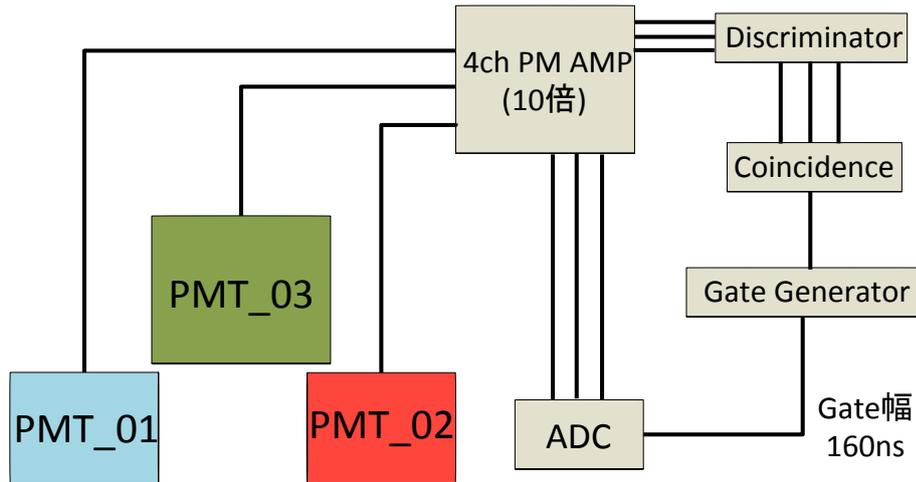


図 6.10: 陽電子による Plastic Scintillator の発光量測定実験の回路図

以下の 3 つの条件における実験結果を (1) ; 図 6.11、(2) ; 図 6.12、(3) ; 図 6.13 に示す。

(1) 両側の検出器 *PMT_01* と *PMT_02* のコインシデンスでトリガー

実際の測定ではこの方法でトリガーを得る。手前の Plastic Scintillator が発光した場合、つまり陽電子が 1 枚目の Plastic Scintillator で陽電子が停止した場合も含まれる。

(2) 3 つの検出器のコインシデンスでトリガー

陽電子が 1 枚目の Plastic Scintillator を通過して 2 枚目の Plastic Scintillator でも発光した場合。

(3) *PMT_03* でトリガー

2 枚目の Plastic Scintillator の発光でトリガー。

3 つあるヒストグラムの内、中央が *PMT_03* (2 枚目の Plastic Scintillator の発光量)、下の 2 つのヒストグラムが *PMT_01* と *PMT_02* (1 枚目の Plastic Scintillator の発光量) を示している。横軸は ADC カウントであり、検出した光量つまり陽電子が Plastic Scintillator に落としたエネルギーに比例した値を示している。薄い Plastic Scintillator であるためにエネルギー校正は行っていないが図 6.5 の横軸に比例した値である。縦軸はカウント数である。(1) の条件における図 6.11 の *PMT01* と *PMT02* のヒストグラムは図 6.5 における白抜きの部分のエネルギー分布に対応する。陽電子が Plastic Scintillator を通過せず、シリカエアロゲルに到達しないためオルソポジトロニウムを生成しない場合が含まれる。次に陽電子が Plastic Scintillator を通過してシリカエアロゲル内でオルソポジトロニウムを生成する際のエネルギー分布 (図 6.5 における赤い斜線のエネルギー分布) を十分に検出できるかを確認する。2 枚目の Plastic Scintillator の発光を条件にしている (2)、(3) の実験結果 (図 6.12、図 6.13) によって陽電子が Plastic Scintillator を通過する際の発光量を十分に検出できることを確認した。

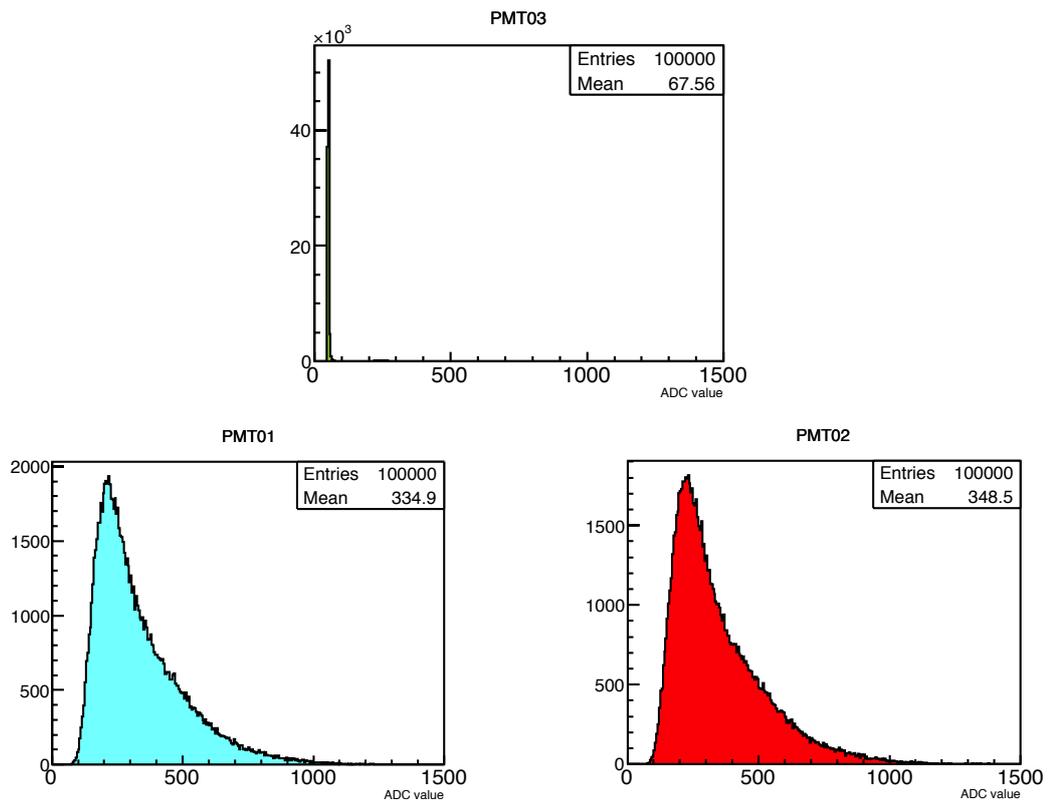


図 6.11: 実験結果；陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー
(1) PMT01 と 02 のコインシデンスでトリガー

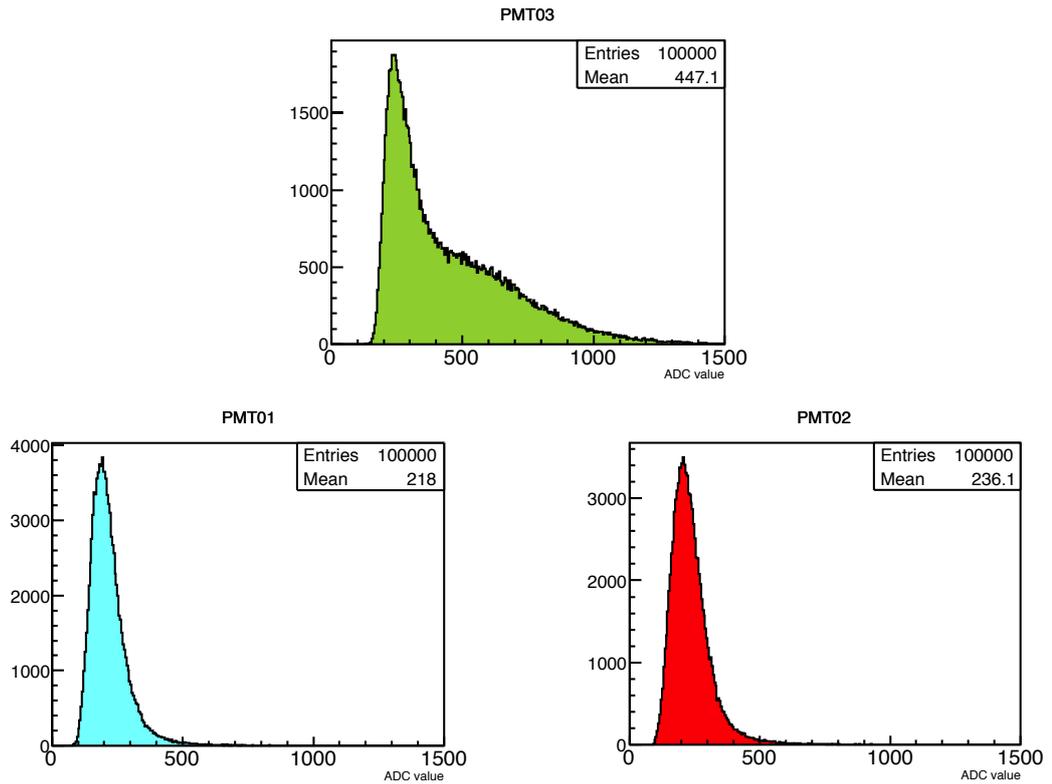


図 6.12: 実験結果；陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー
(2) 3つの PMT のコインシデンスでトリガー

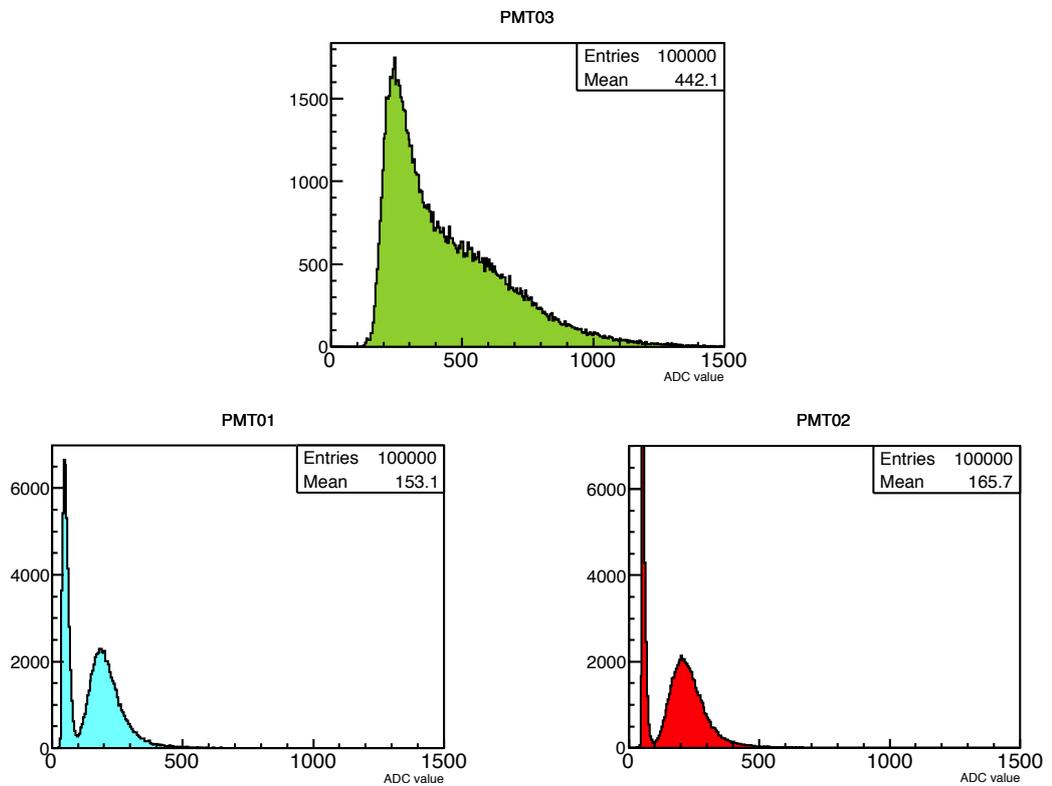


図 6.13: 実験結果；陽電子が Plastic Scintillator に落とすエネルギー
(3) PMT03 でトリガー

6.4 シリカエアロゲルでの陽電子の停止確率

シリカエアロゲルは多孔質であることからオルソポジトロニウムが生成しやすく、また物質中の電子とのピックオフ消滅が少ない。シリカエアロゲル以外で陽電子が停止すると多くの場合オルソポジトロニウムを生成してもすぐに物質中の他の電子と対消滅をしたり、あるいはスピン交換などによってパラポジトロニウムになって崩壊してしまう。シリカエアロゲルでの陽電子の停止確率がオルソポジトロニウム生成量に関わってくる。図 6.5 の結果より停止確率を得た。

$$\text{シリカエアロゲルで陽電子が停止する確率} = 29.29\% \quad (6.1)$$

Geant4 によるシミュレーションで再現出来るのは陽電子のエネルギーが一定以下 (数 keV) にまで低下したところまでであり、停止する確率がポジトロニウム生成率と等しくはならない。実際にはその後の電子や原子との相互作用によりオルソポジトロニウムの生成率が決定する。今までの実験で熱エネルギーまでエネルギーを落とした陽電子がポジトロニウムを生成する確率はおよそ 8% である [15]。

6.5 中心部構造

図 6.5 の中心部を支える構造としてカーボンロッドとアルミナイズドマイラーを使用した物質量の少ない中心部構造を想定する。2つの PMT を中心から 4cm ずつ離して設置し、切隅 20 面体の 32 面の 2 面を使用して支持する構造を想定する。空気中の酸素によるピックオフを無くするための窒素ガス供給部など、構造の改良に多くの余地を残しているが、 γ 線検出器から鉛コリメーターを通して見える部分の構造は大きく変わることはないのでこの構造でシミュレーションを行った。

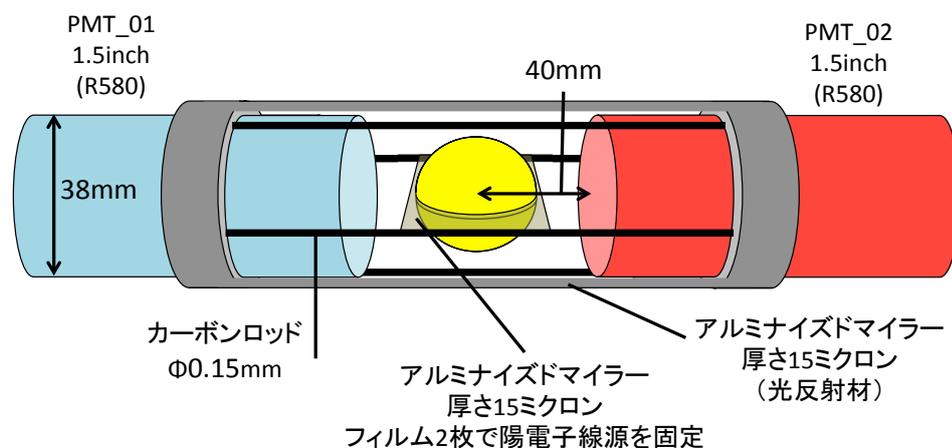


図 6.14: 中心部構造概略図

第7章 4ヒットイベントの利用

7.1 運動量和とエネルギーの関係

5光子崩壊事象と3光子崩壊事象それぞれの5ヒットイベントにおける運動量和とトータルエネルギーの2次元ヒストグラムを図7.1、図7.2に示す。トータルエネルギー=1022keV(ポジトロニウムの静止質量エネルギー)、運動量和 = 90 付近のイベントを利用して5光子崩壊事象の検出を目指しているが鉛を拡張し γ 線検出器を遠ざけた影響で検出効率の減少が見込まれる。そこで利用していなかった4ヒットイベント解析により5光子崩壊事象の検出効率の向上を目指す。5光子崩壊事象と3光子崩壊事象それぞれの4ヒットイベントにおける運動量和とエネルギーの2次元ヒストグラムを図7.3、図7.4に示す。5光子崩壊事象の4光子検出イベントには運動量和とトータルエネルギーの間に強い相関が見られる。

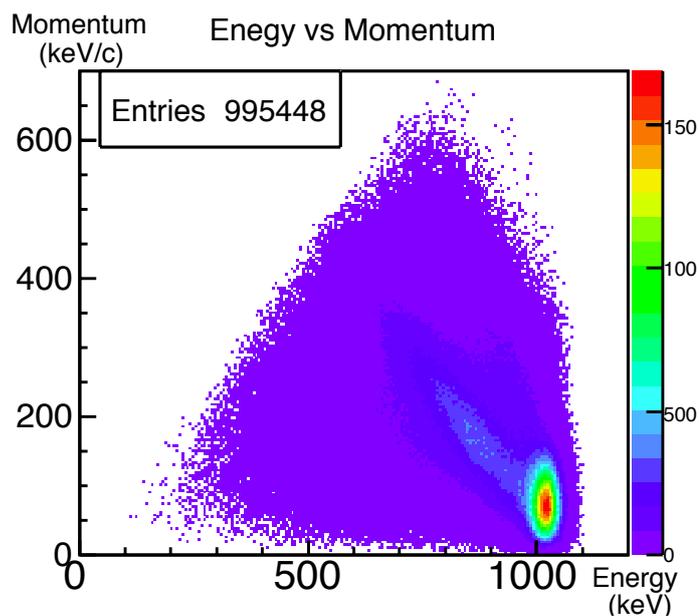


図 7.1: 5光子崩壊5ヒット:運動量和とエネルギー

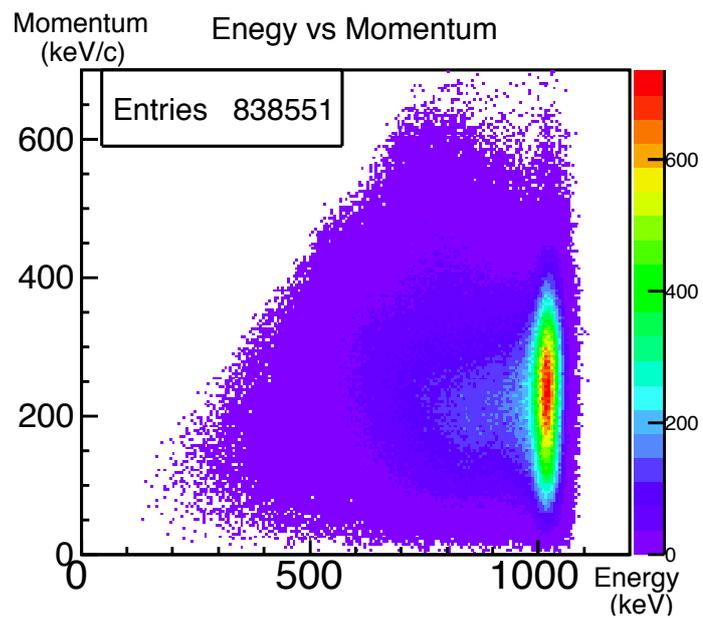


図 7.2: 3 光子崩壊 5 ヒット:運動量和とエネルギー

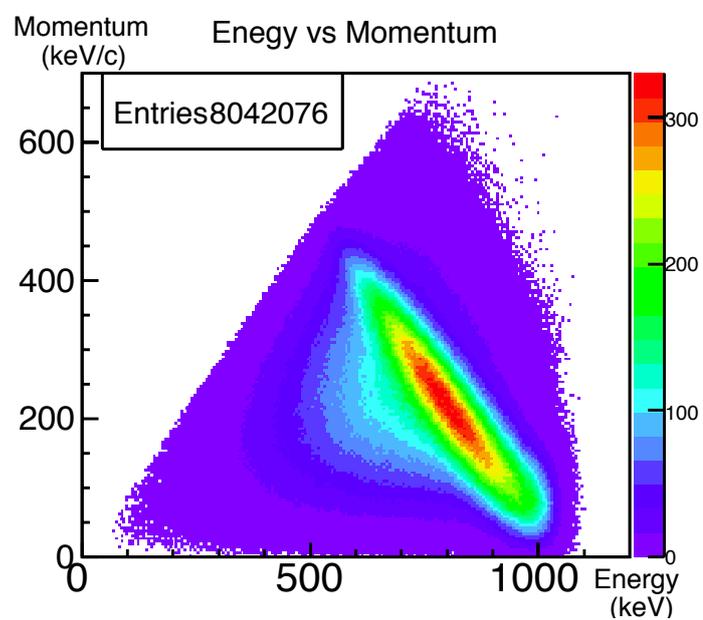


図 7.3: 5 光子崩壊 4 ヒット:運動量和とエネルギー

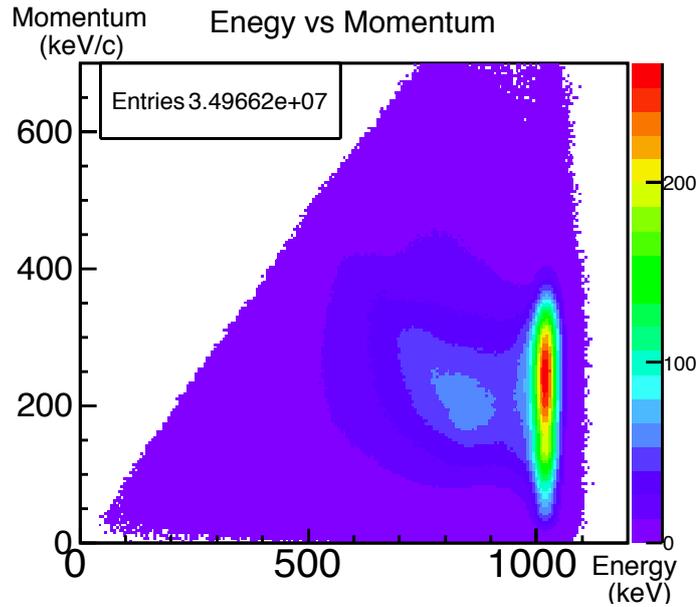


図 7.4: 3 光子崩壊 4 ヒット:運動量和とエネルギー

7.2 エネルギー再構成

5 光子崩壊事象の 4 光子検出事象におけるエネルギーと運動量和の相関は NaI シンチレータで検出されなかった粒子 (Missing γ) によるものである。検出出来なかった光子が存在し、それが 1 本の場合、エネルギーの 1022keV からのズレと運動量和の 0keV/c からのズレは等しくなる。故に 4 ヒットイベントから 5 光子崩壊事象のエネルギーを再構成することが可能である。再構成エネルギーの求め方を式 7.1 に示す。

$$\text{再構成エネルギー} = \sum_{i=1}^4 E_i + |\sum_{i=1}^4 \vec{P}_i| \quad (7.1)$$

5 光子崩壊事象 4 ヒットイベントにおいて再構成したエネルギーヒストグラムを図 7.5 に示す。本来の消滅光子の総エネルギー 1022keV にピークが立つ。3 光子崩壊による 4 ヒットイベントの同様のヒストグラムを図 7.6 に示す。1022keV にピークは持たないことがわかる。

7.3 3 光子崩壊由来の 4 ヒットイベント

back to back イベント

3 光子崩壊由来の 4 ヒットイベントの多くはコンプトン散乱により 1 つの γ 線が複数の検出器にヒットするイベントである。鉛を追加したことにより対面に位置する γ 線検出器以外へのコンプトン散乱は排除されている。15 対ある対面同士の γ 線検出器が光子を検出したイベントを排除することで 3 光子崩壊由来の 4 ヒットイベントの多くは排除することが可能である。

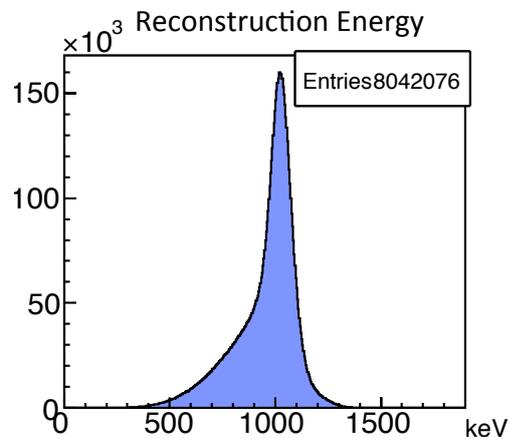


図 7.5: 5 光子崩壊 4 ヒット:再構成エネルギー

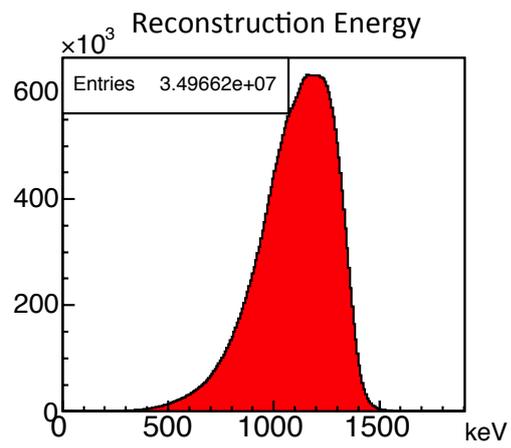


図 7.6: 3 光子崩壊 4 ヒット:再構成エネルギー

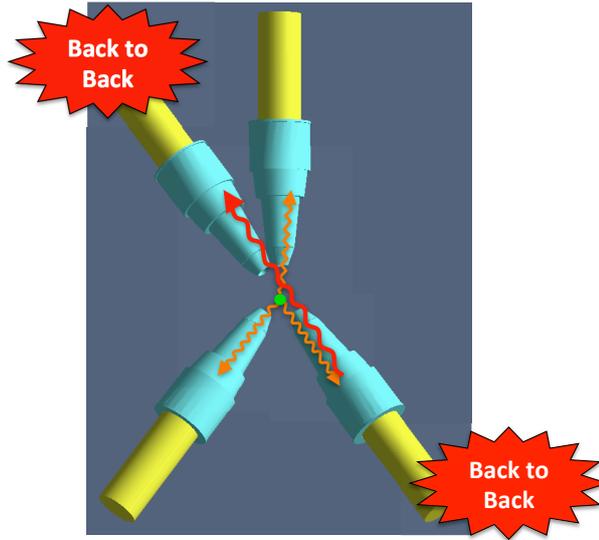


図 7.7: 3 光子崩壊:back to back イベント

制動放射による 4 ヒットイベント

γ 線がポジトロニウム生成部の物質とコンプトン散乱を起こし、はじかれた電子から制動放射により γ 線が発生することがある。制動放射により発生した γ 線は他の γ 線との間に方向依存性はなく、ランダムに γ 線検出器にヒットする。制動放射による BG は中心の物質質量に依存していて、この BG を減少させるには低物質質量のポジトロニウム生成部を作成する必要がある。

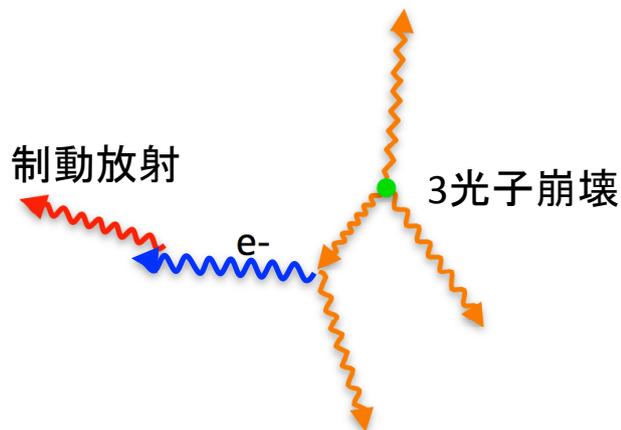


図 7.8: 3 光子崩壊:制動放射による 4 ヒットイベント

第8章 BGの見積もり

2014年までの研究において、3光子崩壊によるBGが多すぎる事が判った。しかしアクシデンタルBGの見積もりはされていなかった。アクシデンタルBGとは複数の陽電子が偶然同時に対消滅を起こすBGでありトリガーレートの2乗に比例する。ポジトロニウム生成部の改良によりトリガーレートが増加するためアクシデンタルBGの増大が見込まれる。本章ではBGを排除するための実験装置と解析手法の改良を加えた場合に予想されるBG量を見積もる。今回見積もったBGを表8.1に示す。

表 8.1: バックグラウンド事象

バックグラウンド事象
BG1 ; 2光子崩壊+遷移 γ 線
BG2 ; 3光子崩壊
BG3 ; Accidental BG2 \times BG1
BG4 ; Accidental BG2 \times BG2
BG5 ; Accidental e^+ \times BG1
BG6 ; Accidental e^+ \times BG1 \times BG1

8.1 実験パラメーター

以下の仮定のもとアクシデンタルBGを見積もる。

- (1) 線源強度 = 500kBq
- (2) オルソポジトロニウム生成率 = 8%
- (3) γ 線検出器の時間分解能 $\Delta t_\gamma = 6\text{ns}$
- (4) 陽電子トリガーの検出効率 $\epsilon_{e^+ \rightarrow 2\gamma} = 80\%$
- (5) シリカゲル内で陽電子が崩壊する際の陽電子トリガーの検出効率 $\epsilon_{e^+ \rightarrow 3\gamma} = 98\%$
- (6) 陽電子トリガーの時間分解能 $\Delta t_{e^+} = 10\text{ns}$
- (7) 陽電子トリガーと γ 線検出器のコインシデンス幅 = 500ns

(1) アクシデンタルBGを考慮して管理区域外で許される限界の1MBqではなく500kBqを仮定した。(2) 磁場輸送部を使用した過去の実験 [15] より

$$\begin{aligned}
 \text{3光子崩壊事象検出効率} &= (5.13 \pm 0.02) \times 10^{-3} \\
 \text{3光子崩壊事象の検出数} &= (3.08 \pm 0.18) \times 10^4 \\
 \text{陽電子のトリガー数} &= (7.55) \times 10^7
 \end{aligned}$$

オルソポジトロニウム生成率は3光子崩壊事象検出効率、3光子崩壊事象のイベント数、陽電子トリガー数から式8.1で求められる。実験装置の改良後、同様の方法で生成率を測定しなおす必要があるが、8%を仮定してBGを見積もる。

$$\text{オルソポジトロニウム生成率} = \frac{\text{3光子崩壊事象の検出数}}{\text{3光子崩壊事象検出効率} \times \text{陽電子トリガー数}} \simeq 8\% \quad (8.1)$$

(3)TimeWalkによる時間補正後の γ 線検出器の時間分解能 = 6ns

(4)陽電子の消滅点分布シミュレーションより陽電子 3×10^6 イベントにおいて17.2%がPlastic Scintillatorにエネルギーを落とさずに消滅することがわかった。これをもとに陽電子の検出効率を80%と仮定する。シリカエアロゲル以外での陽電子の対消滅は2光子崩壊:3光子崩壊 = 372:1でほぼ2光子に崩壊する。 $\epsilon_{e^+ \rightarrow 2\gamma} = 80\%$ と仮定する。

(5)図6.5より、シリカエアロゲル内で消滅する際にはPlastic Scintillatorに最低でも18keV以上のエネルギーを落とす。使用しているSaint Gobain製BC400 Plastic Scintillatorの性能を考えると数百個の光子が発生する。この光量は十分な光量だとしてシリカエアロゲル内で陽電子が消滅する場合の陽電子検出効率 = 98%を仮定する。

(6)陽電子トリガーにおけるマルチヒットイベントカットの時間分解能はPlastic ScintillatorのDecayTimeが2.4nsと十分に短いことより、ディスクリミネーターの出力幅に依存するとして時間分解能 = 10nsを仮定する。

(7)使用しているTDC(TimeDesitalConverter)の性能限界より、陽電子トリガー後500ns以降の多光子崩壊は検出できない。

8.2 各種物理事象のレート

式3.2~3.6に実験に関する物理事象を示す。

$$\beta \text{崩壊} \rightarrow e^+ + \text{遷移}\gamma \quad 500kHz \quad (8.2)$$

$$e^+ \rightarrow 2 \text{光子崩壊} (Ps \text{を經由しない}) \quad (8.3)$$

$$\rightarrow 3 \text{光子崩壊} (Ps \text{を經由しない}) \quad (8.4)$$

$$\rightarrow p - Ps \xrightarrow{\text{LifeTime}=125[ps]} 2 \text{光子崩壊 or } 4 \text{光子崩壊} \quad (8.5)$$

$$\rightarrow o - Ps \xrightarrow{\text{LifeTime}=142[ns]} 3 \text{光子崩壊 or } 5 \text{光子崩壊} \quad (8.6)$$

式8.4は式8.3の1/372の確率であり、式8.5において4光子崩壊は2光子崩壊の約100万分の1の確率で起こる。式8.3~8.5の物理事象は陽電子トリガー後の時間で排除ができ、アクシデンタルレートにしか影響が無い。レートの見積もりにおいては $o - Ps$ を生成しない場合は全て2光子崩壊するものとしてレートを見積もる。 $o - Ps$ 生成率を8%と仮定し、QEDの理論計算(式1.8)より5光子崩壊は3光子崩壊の 0.9591×10^{-6} の頻度で発生するので

$$e^+ \rightarrow 2 \text{光子崩壊} \quad 460kHz \quad (8.7)$$

$$\rightarrow o - Ps \xrightarrow{142[ns]} 3 \text{光子崩壊} \quad 40kHz \quad (8.8)$$

$$\rightarrow o - Ps \xrightarrow{142[ns]} 5 \text{光子崩壊} \quad 0.039Hz \quad (8.9)$$

2光子崩壊と β 崩壊による遷移 γ 線が時間的に区別出来ないことを考慮すると起こる物理事象のレートは表8.2となる。

表 8.2: 物理事象のレート

物理事象	レート [Hz]
BG1 ; 2 光子崩壊+遷移 γ 線	460000
BG2 ; 3 光子崩壊	40000
5 光子崩壊	0.039

8.3 陽電子トリガーにおけるマルチヒットイベントカット

実験において検出器の時間的な関係を図 8.1 に示す。BG を排除するために崩壊時間、NaI 相互の同時ヒット選択として式 8.10 を適用している。

$$NaI\text{hit time} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\Delta t_\gamma}\right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta t_\gamma}\right)} \geq 10[ns] \quad , \quad \Delta t = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{(t_i - \tau)^2}{(\Delta t_\gamma)^2}} \leq 1.5 \quad (8.10)$$

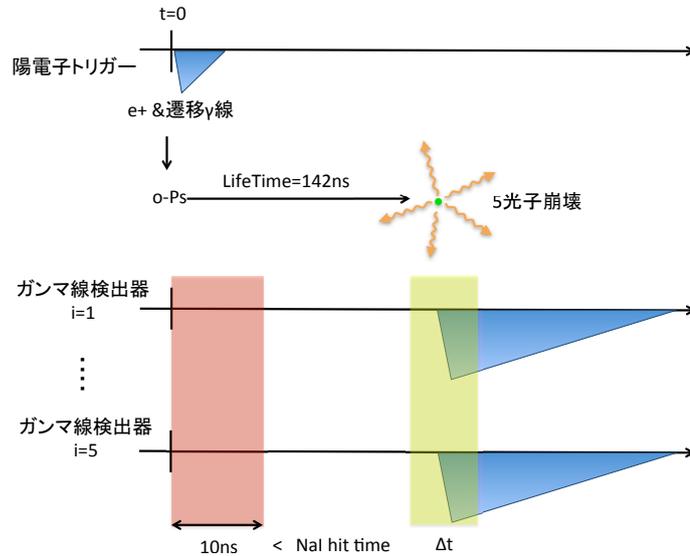


図 8.1: 5 光子崩壊

γ 線検出器の時間のみを利用してはアクシデンタル BG を排除するために新たに陽電子トリガーの情報を利用する。陽電子トリガーで 2 つ以上のイベントを検出したイベントを排除する。ただし陽電子トリガーの検出効率と時間分解能に依存して取り除けないイベントも存在する。アクシデンタルに発生した陽電子を検出出来ない場合 (図 8.2) と時間分解能以下の時間差で陽電子が 2 つ発生する場合 (図 8.3) である。

3 光子 \times (2 光子 + 遷移 γ 線) イベントは時間分解能以上離れたイベントなのでアクシデンタルレートは次のようになる。

$$Rate_{3\gamma \times (2\gamma + \text{遷移}\gamma)} = Rate_{3\gamma} \times Rate_{2\gamma + \text{遷移}\gamma} \times 2\Delta t_\gamma \times (1 - \epsilon_{e^+ \rightarrow 2\gamma}) \quad (8.11)$$

3 光子 \times 3 光子イベントは時間分解能の効果 considering アクシデンタルレートは次のよう

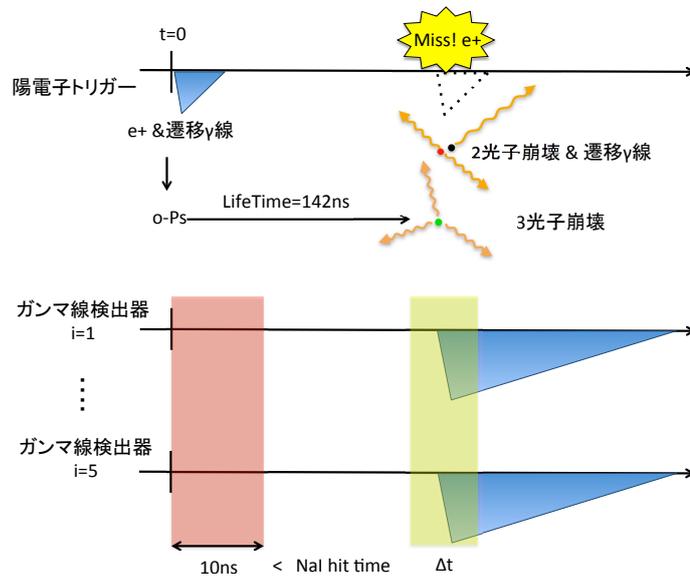


図 8.2: マルチヒットカットでも落とせないイベント：3 光子崩壊& β 崩壊

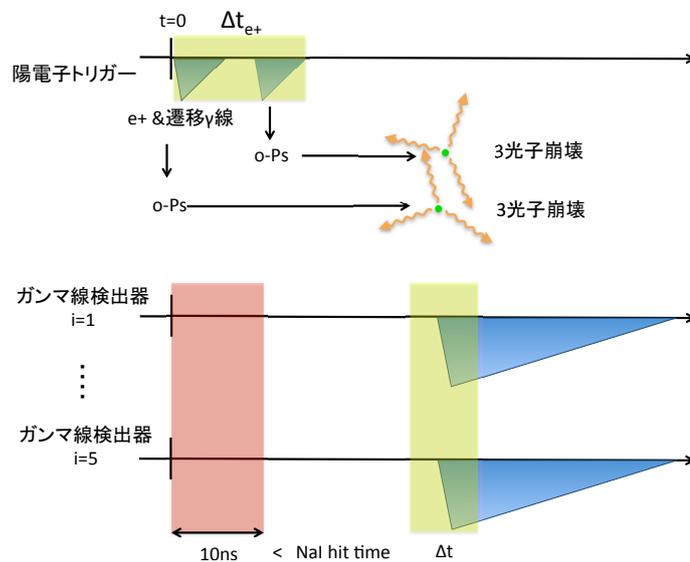


図 8.3: マルチヒットカットでも落とせないイベント：3 光子崩壊&3 光子崩壊

になる。

$$Rate_{3\gamma \times 3\gamma} = (Rate_{3\gamma})^2 \times 2\Delta t_\gamma \times [P(\Delta t_{e^+}, \Delta t_\gamma) + (1 - P(\Delta t_{e^+}, \Delta t_\gamma))(1 - \epsilon_{e^+ \rightarrow 3\gamma})] \quad (8.12)$$

ここで $P(\Delta t_{e^+}, \Delta t_\gamma)$ は Δt_γ の時間差で崩壊を起こす2つのオルソポジトロニウムの発生時間差が Δt_{e^+} 以下である確率である。モンテカルロシミュレーションにより求めることが可能で、 $\Delta t_{e^+} = 10 \text{ ns}$ 、 $\Delta t_\gamma = 6 \text{ ns}$ において $P(\Delta t_{e^+}, \Delta t_\gamma) = 6.77\%$ である。表 8.3 に3光子崩壊×別の物理事象のアクシデンタル BG のレートを示す。

表 8.3: 3光子崩壊×別の物理事象のアクシデンタル BG のレート

物理事象	レート [Hz]
BG3 ; 3光子×(2光子+遷移 γ 線)	48
BG4 ; 3光子×3光子	1.658

8.4 その他のアクシデンタル BG

3光子崩壊×別の物理事象以外のアクシデンタル BG も存在する。 β 崩壊によって陽電子トリガーで検出されて2光子崩壊を起こし、10ns 以上離れてアクシデンタルに陽電子トリガーで検出されずに β 崩壊が発生する場合である。アクシデンタルに β 崩壊が1つ発生する場合 (図 8.4) と2つ発生する場合 (図 8.5) についてレートを見積もった。 $\epsilon_{e^+ \rightarrow 2\gamma} = 80\%$ 、陽電子トリガーと γ 線検出器のコインシデンス幅 = 500 ns としてアクシデンタル BG のレートを表 8.4 に示す。

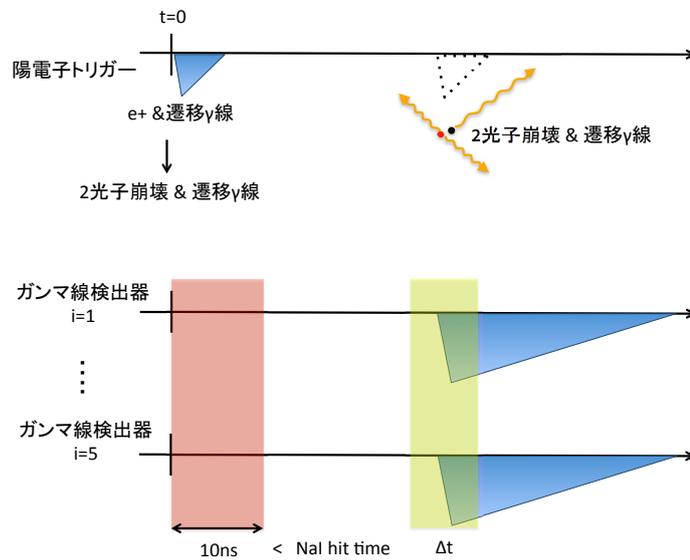


図 8.4: $e^+ \times (2 \text{ 光子崩壊} + \text{遷移 } \gamma \text{ 線})$

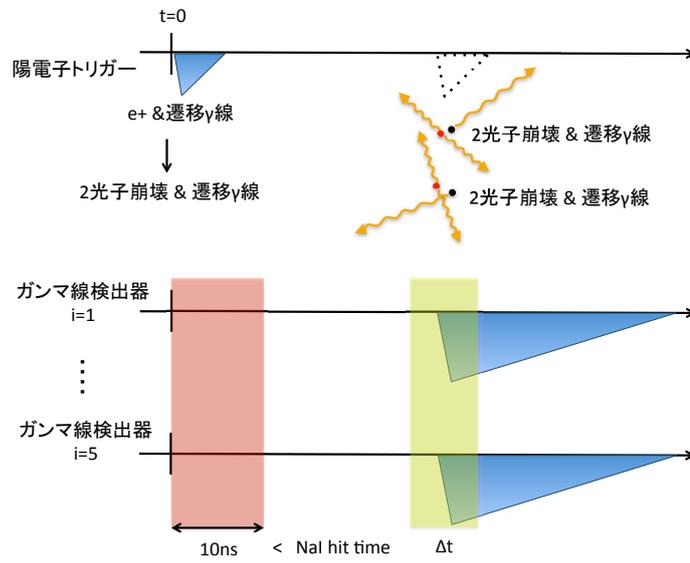


図 8.5: $e^+ \times (2 \text{光子崩壊} + \text{遷移} \gamma \text{線}) \times (2 \text{光子崩壊} + \text{遷移} \gamma \text{線})$

表 8.4: その他のアクシデンタル BG のレート

物理事象	レート [Hz]
$e^+ \times \text{BG1}$	25000
$e^+ \times \text{BG1} \times \text{BG1}$	30

8.5 2光子を利用した3光子崩壊BGの排除

アクシデンタルBGにおいて2光子崩壊は直線ヒット排除(2章9節)によって大部分を排除出来る。図8.6のようなイベントにおいて2光子崩壊(511keV)と遷移 γ 線(1275keV)の γ 線のエネルギーの一部分のみを検出した場合、シングルエネルギーカットで落とせない。このイベントが大きなBGとなっている。

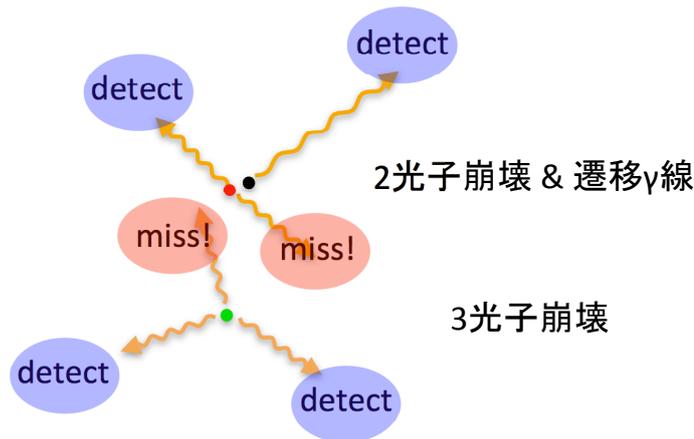


図 8.6: 3光子崩壊×(2光子崩壊+遷移 γ 線)

そこで3光子崩壊×別の物理事象のアクシデンタルBGを排除するために新しいイベントセレクションを考案した。手法としては5光子崩壊事象を4ヒットイベントで検出することと同様であり、ある2つの光子の組み合わせが3光子崩壊由来かどうか全ての組み合わせにおいて確認するというものである。2つの光子が3光子崩壊由来の光子である場合、2光子のエネルギーと運動量和から3光子崩壊のエネルギー1022keVを再構成することができる。3光子崩壊の再構成エネルギーの求め方を式8.13に示す。全ての組み合わせで式8.13を計算し、最もポジトロニウムの静止エネルギー1022keVに近いエネルギーを3光子崩壊の再構成エネルギーとする。

$$3 \text{光子崩壊の再構成エネルギー} = E_i + E_j + |\vec{P}_i + \vec{P}_j| \quad (i \neq j) \quad (8.13)$$

「3光子×(2光子+遷移 γ 線)」の4ヒットイベントにおいて $({}_4C_2=)$ 6つの組み合わせで再構成エネルギーを計算し、最も1022keVに近い再構成エネルギーをFillしたものを図8.7に示す。図8.8に5光子崩壊事象における同様のヒストグラムを示す。3光子崩壊を含んだBGでは1022keVのエネルギーを再構成出来る組み合わせが存在するが5光子崩壊ではそうはならない。ただ図8.9のように2本以上の γ 線の全エネルギーを検出すれば3光子崩壊のエネルギーを再構成出来るが、図8.10のように3光子崩壊由来の γ 線のエネルギーの全エネルギーを2本以上検出できない場合は排除することが出来ない。

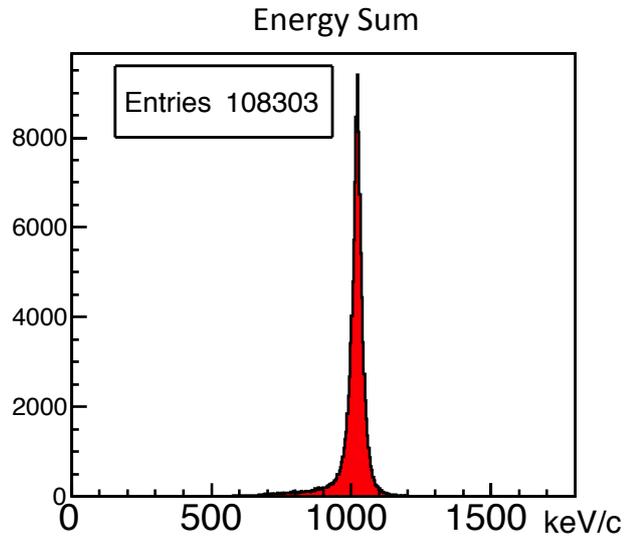


図 8.7: (3 光子 \times (2 光子 + 遷移 γ 線))4 ヒットイベント ; 6 つの組のうち最も 1022 keV に近い再構成エネルギー

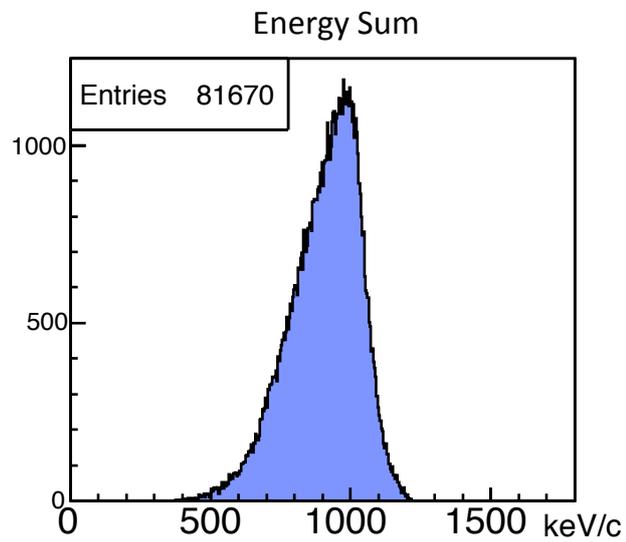


図 8.8: 5 光子崩壊事象 4 ヒットイベント ; 6 つの組のうち最も 1022 keV に近い再構成エネルギー

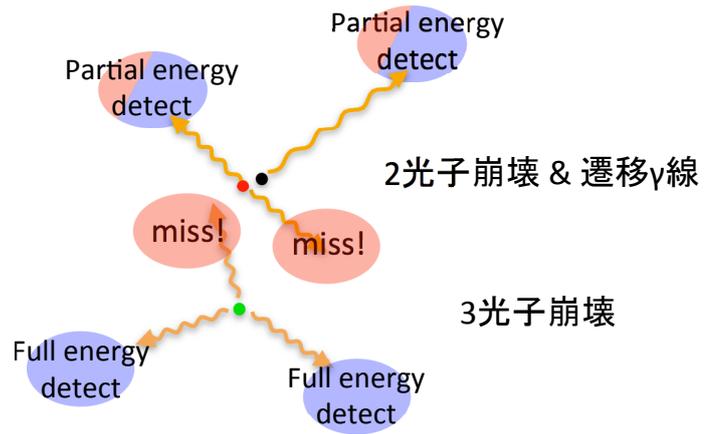


図 8.9: 3 光子崩壊再構成エネルギーで排除出来るイベント: 3 光子崩壊 \times (2 光子崩壊 + 遷移 γ 線)

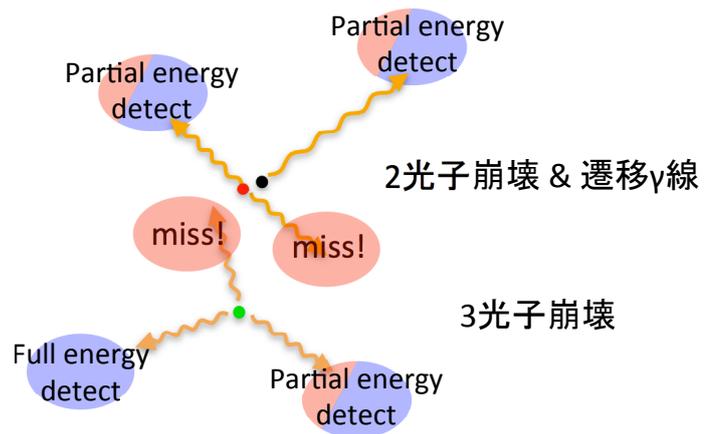


図 8.10: 3 光子崩壊再構成エネルギーで排除出来ないイベント: 3 光子崩壊 \times (2 光子崩壊 + 遷移 γ 線)

第9章 新手法による5光子崩壊事象検出効率の評価

以下の改良、すべてを適用して期待される成果について

- 実験装置の改良
 - 鉛の拡張
 - ポジトロニウム生成部の改良
 - ー 陽電子輸送部→中心線源に変更
 - ー 陽電子トリガーによるマルチヒットイベントカットを導入
- 解析手法の改良
 - ー 4ヒットイベントの利用
 - ー 3光子崩壊再構成エネルギーによる排除

9.1 各種物理事象の検出効率

表 9.1 に示す物理事象の検出効率を求める。BG1 に関しては陽電子トリガーと NaI シンチレータのヒットタイムを利用してすべて落とせるとしてしている。

表 9.1: 各種物理事象

物理事象	レート [Hz]
Signal ; 5 光子崩壊	0.039
BG1 ; 2 光子崩壊+遷移 γ 線	460000
BG2 ; 3 光子崩壊	4000
BG3 ; Accidental BG2 \times BG1	48
BG4 ; Accidental BG2 \times BG2	1.658
BG5 ; Accidental e^+ \times BG1	25000
BG6 ; Accidental e^+ \times BG1 \times BG1	30

イベントセレクション

実験では各 γ 線のエネルギー 75keV に相当する PMT からの信号をスレッシュホールドレベルに設定しているため、シミュレーションにおいて 75keV より小さいエネルギーのヒットはヒットとしてカウントしていない。

- ヒット数カット
NaI に入射した光子の数を選擇する事により、選出したい任意の数の光子への崩壊事象の選擇を行う。5 ヒットイベントに加えて4 ヒットイベントを新たに利用する。
- 直線ヒットカット
主なバックグラウンドである 2 光子崩壊事象は、同一直線上に 2 光子が放射される。したがって、同一直線上の γ 線検出器に光子が入射した事象を排除し、2 光子崩壊事象の排除を行う。
- $E_{\text{sin}} \leq 450 \text{keV}$
全ての γ 線に対して式 9.1 を適用する。

$$75 [\text{keV}] \leq E_i \leq 450 [\text{keV}] \quad (9.1)$$

- 運動量和カット
5 ヒットイベントに対しては式 9.2

$$|\sum_{i=1}^5 \vec{P}_i| \leq 90 [\text{keV}/c] \quad (9.2)$$

- エネルギーカット
5 ヒットイベントに対して式 9.3 を適用する。

$$962 [\text{keV}] \leq \sum_{i=1}^5 E_i \leq 1082 [\text{keV}] \quad (9.3)$$

- REof3gCut (Reconstructed Energy of 3gamma Cut)
ヒットした γ 線から全ての 2 つの組み合わせ (${}_5C_2$ or ${}_4C_2$) について 3 光子崩壊事象のエネルギーを再構成し、もっとも 1022keV に近いものを *REof3g* として式 9.4 を適用する。

$$RE \text{ of } 3\gamma \leq 962 [\text{keV}], 1082 [\text{keV}] \leq RE \text{ of } 3\gamma \quad (9.4)$$

- REof5gCut (Reconstructed Energy of 5gamma Cut)
4 ヒットイベントに対して 5 光子崩壊事象のエネルギー *REof5g* を再構成し、式 9.5 を適用する。エネルギーの範囲はシミュレーションにおけるガウス分布の 2σ を目安に決定している。

$$952[\text{keV}] \leq RE \text{ of } 5g \leq 1092[\text{keV}] \quad (9.5)$$

5 ヒットイベント解析

アクシデンタル BG は実験装置の時間分解能の向上により改善出来る可能性がある。時間分解能を高くしても大きなリダクションが望めない 3 光子崩壊 BG に対するイベントセレクションの効果を表 9.2 に示す。

次にアクシデンタル BG に対するイベントセレクションの効果を表 9.3 と表 9.4 に示す。

5 ヒットイベントにおいては鉛を拡張したことで 3 光子崩壊による BG は大きく排除出来ている。またアクシデンタル BG に大しては運動量和 ≤ 90 と REof3gCut が効果的に BG を排除している。

表 9.2: 5 ヒットイベント；3 光子崩壊事象と 5 光子崩壊事象のイベントセレクションによる残存率

選別条件	3 光子崩壊事象 (3 γ)		5 光子崩壊事象	
	残存イベント数	残存率	残存イベント数	残存率
なし	4.35×10^{11}	1	1.5×10^8	1
ヒット数=5	2	4.6×10^{-12}	3599	2.4×10^{-5}
直線ヒットカット	0	$< 2.3 \times 10^{-12}$	1515	1.0×10^{-5}
$E_{\sin} \leq 450 \text{keV}$	0	$< 2.3 \times 10^{-12}$	1508	1.0×10^{-5}
運動量和 ≤ 90	0	$< 2.3 \times 10^{-12}$	1047	6.9×10^{-6}
REof3gCut	0	$< 2.3 \times 10^{-12}$	959	6.4×10^{-6}
EnergyCut	0	$< 2.3 \times 10^{-12}$	905	6.0×10^{-6}

表 9.3: 5 ヒットイベント；アクシデンタル BG のイベントセレクションによる残存率 (1)

選別条件	$3 \gamma \times 3 \gamma$		$3 \gamma \times (2 \gamma + \text{遷移 } \gamma)$	
	残存イベント数	残存率	残存イベント数	残存率
なし	9.75×10^8	1	2.43×10^9	1
ヒット数=5	204307	2.1×10^{-4}	1825305	7.5×10^{-4}
直線ヒットカット	83909	8.6×10^{-5}	24526	1.02×10^{-5}
$E_{\sin} \leq 450 \text{keV}$	58293	5.9×10^{-5}	2665	1.1×10^{-6}
運動量和 ≤ 90	422	4.3×10^{-7}	16	4.1×10^{-9}
REof3gCut	44	4.5×10^{-8}	1	4.1×10^{-10}
REof5gCut	16	1.6×10^{-8}	1	4.1×10^{-10}

表 9.4: 5 ヒットイベント；アクシデンタル BG のイベントセレクションによる残存率 (2)

選別条件	$e^+ \times \text{BG1}$		$e^+ \times \text{BG1} \times \text{BG1}$	
	残存イベント数	残存率	残存イベント数	残存率
なし	4.51×10^{11}	1	2.55×10^8	1
ヒット数=5	140	3.1×10^{-10}	551330	2.1×10^{-3}
直線ヒットカット	0	$< 2.2 \times 10^{-12}$	146	5.7×10^{-7}
$E_{\sin} \leq 450 \text{keV}$	0	$< 2.2 \times 10^{-12}$	2	7.8×10^{-9}
運動量和 ≤ 90	0	$< 2.2 \times 10^{-12}$	0	$< 3.9 \times 10^{-9}$
REof3gCut	0	$< 2.2 \times 10^{-12}$	0	$< 3.9 \times 10^{-9}$
REof5gCut	0	$< 2.2 \times 10^{-12}$	0	$< 3.9 \times 10^{-9}$

4 ヒットイベント解析

次に3光子崩壊と5光子崩壊の4ヒットイベントに対するイベントセレクションの効果を表9.5に示す。3光子崩壊によるBGは直線ヒットカットとREof3gCutが効果的にBGを排除している。アクシデンタルBGのもとを表9.6、表9.7に示す。4ヒットイベントにおけるアクシデンタルBGは運動量和によるカットができないために、5ヒットイベントと比べてアクシデンタルBGの残存率が高い。

表 9.5: 4 ヒットイベント；3光子崩壊事象と5光子崩壊事象のイベントセレクションによる残存率

選別条件	3光子崩壊事象		5光子崩壊事象	
	残存イベント数	残存率	残存イベント数	残存率
なし	4.35×10^{11}	1	1.5×10^8	1
ヒット数=4	75659	1.7×10^{-7}	142405	9.5×10^{-4}
直線ヒットカット	607	1.4×10^{-9}	82140	5.5×10^{-4}
$E_{\sin} \leq 450 \text{keV}$	535	1.2×10^{-9}	81670	5.4×10^{-4}
REof3gCut	158	3.6×10^{-10}	75159	5.0×10^{-4}
REof5gCut	63	1.4×10^{-10}	58280	3.9×10^{-4}

表 9.6: 4 ヒットイベント；アクシデンタルBGのイベントセレクションによる残存率 (1)

選別条件	$3\gamma + 3\gamma$		$3\gamma + (2\gamma + \gamma)$	
	残存イベント数	残存率	残存イベント数	残存率
なし	9.75×10^8	1	2.43×10^9	100
ヒット数=4	3698666	3.8×10^{-3}	20604191	8.5×10^{-3}
直線ヒットカット	1945611	2.0×10^{-3}	1139523	4.7×10^{-4}
$E_{\sin} \leq 450 \text{keV}$	1347140	1.4×10^{-3}	213789	8.8×10^{-5}
REof3gCut	129630	1.3×10^{-4}	25497	1.0×10^{-5}
REof5gCut	26833	2.8×10^{-5}	5116	2.1×10^{-6}

表 9.7: 4 ヒットイベント ; アクシデンタル BG のイベントセレクションによる残存率 (2)

選別条件	$e^+ \times \text{BG1}$		$e^+ \times \text{BG1} \times \text{BG1}$	
	残存イベント数	残存率	残存イベント数	残存率
なし	4.51×10^{11}	1	2.55×10^8	1
ヒット数=4	1410430	3.1×10^{-6}	3251020	1.3×10^{-2}
直線ヒットカット	4088	9.1×10^{-9}	15630	6.1×10^{-5}
Esin<450keV	539	1.2×10^{-9}	314	1.2×10^{-6}
REof3g<950keV	219	4.9×10^{-10}	77	3.0×10^{-7}
REof5gCut	32	7.1×10^{-11}	13	5.1×10^{-8}

想定する事象のレートと検出効率

全てのセレクションを適用した場合の各事象の検出レートを表 9.8 に示す。

表 9.8: イベントセレクション (オフライン) 後の BG レート

物理事象	レート [Hz]	5 ヒットイベント		4 ヒットイベント	
		検出効率	検出レート [Hz]	検出効率	検出レート [Hz]
Signal	0.039	6.0×10^{-6}	2.3×10^{-7}	3.9×10^{-4}	1.5×10^{-5}
BG2	40000	$< 2.3 \times 10^{-12}$	$< 9.2 \times 10^{-8}$	1.4×10^{-10}	5.8×10^{-6}
BG3	48	$< 4.1 \times 10^{-10}$	$< 2.0 \times 10^{-8}$	2.1×10^{-6}	1.0×10^{-4}
BG4	1.658	1.6×10^{-8}	2.7×10^{-8}	2.8×10^{-5}	4.6×10^{-5}
BG5	25000	$< 2.2 \times 10^{-12}$	$< 5.5 \times 10^{-8}$	7.1×10^{-11}	1.8×10^{-6}
BG5	30	$< 3.9 \times 10^{-9}$	$< 1.2 \times 10^{-7}$	5.1×10^{-8}	1.5×10^{-6}

9.2 1 年間で得られる成果

半減期 2.6 年の ^{22}Na 陽電子線源を 1 年間使用して得られる検出数を見積もる。500kBq の線源を利用した場合、線源が弱まることも考慮して 1 年間で期待される 5 ヒットイベント解析のイベント数を図 9.2 に示す。横軸がトータルエネルギー、縦軸が期待値である。赤い BG は非常に少ないので足し合わせずに重ね合わせでヒストグラムをのせている。4 ヒットイベント解析で期待されるイベント数を図 9.2 に示す。アクシデンタル BG である BG3(2 光子崩壊 \times 3 光子崩壊) と BG4(3 光子崩壊 \times 3 光子崩壊) が非常に大きな BG になっている。アクシデンタル BG は線源強度を落とせば、その 2 乗で減少する。図 9.3 に線源強度 100kBq を使用した際の期待される成果を示す。イベント数は減少するが S/N が高くなることわかる。

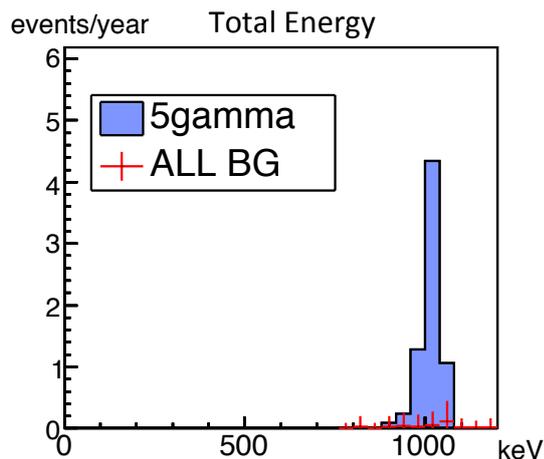


図 9.1: 5 ヒットイベント ; 500kBq で 1 年間で期待される検出数

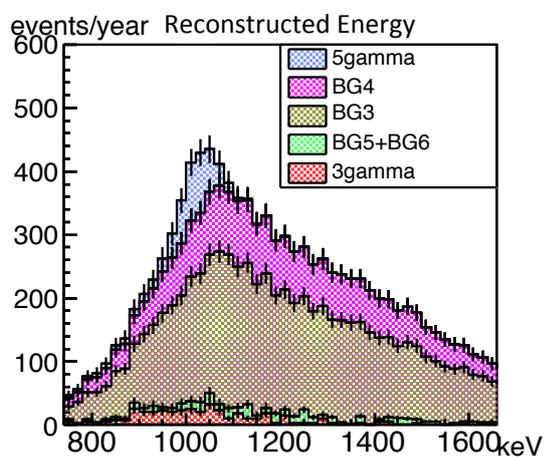


図 9.2: 4 ヒットイベント ; 500kBq で 1 年間で期待される検出数

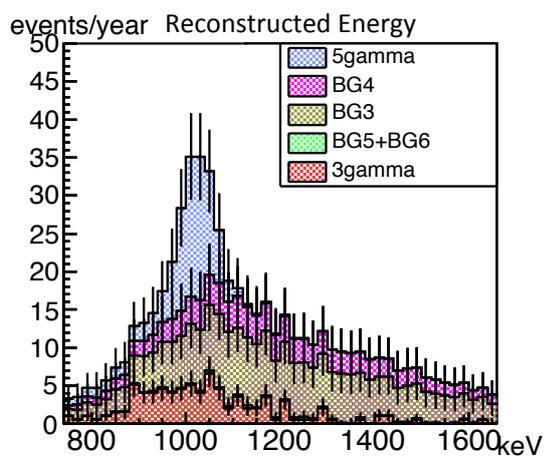


図 9.3: 4 ヒットイベント ; 100kBq で 1 年間で期待される検出数

第10章 結論

10.1 グレードアップにより期待される成果

500kBa の ^{22}Na 陽電子線源を使用して1年間実験を行うことで得られる成果を見積もった。5ヒットイベント解析で5光子崩壊エネルギー (図 9.1) に対して式 10.1 の選別を行って得られる成果は式 10.2 となる。

$$962[\text{keV}] \leq \text{Total Energy} \leq 1082[\text{keV}] \quad (10.1)$$

$$\text{期待値} = 6.4 \pm 2.5, \quad S/N = 9.9 \pm 4.4 \quad (10.2)$$

4ヒットイベント解析で再構成した5光子崩壊エネルギー (図 9.2) に対して式 10.3 の選別を行って得られる成果は式 10.4 となる。

$$952[\text{keV}] \leq \text{Reconstructed Energy} \leq 1092[\text{keV}] \quad (10.3)$$

$$\text{期待値} = 413 \pm 20 \quad S/N = 0.19 \pm 0.01 \quad (10.4)$$

S は少ないが S/N の良い5ヒットイベント解析と、S/N は悪いが S の多い4ヒットイベント解析の2つのデータが得られる。2014年までの期待値 = 0.035、 $S/N = 1.5 \times 10^{-3}$ に比べて大幅な改良が得られる。

10.2 今後の UNI 実験について

今後は想定した実験装置の改良を実装する。ポジトロニウム生成部の改良に必要な陽電子線源、プラスチックシンチレータ、シリカエアロゲルはあるが強度や窒素ガス供給部などの課題は多く、試作が必要である。本研究で仮定した改良だけでも大幅な改善が見込まれるが、ここではその先の改良について触れる。アクシデンタルBGが4ヒットイベント解析における大きなBGになっていることから検出器の時間分解能が向上すれば4ヒットイベント解析の S/N の向上が期待される。時間分解能を向上させる改良の1つとして γ 線検出器に使用している NaI シンチレータをより性能の良いシンチレータへ変更する方法がある。シンチレータの性能比較を表 10.1[18] に示す。より時間分解能の良い LaBr_3 や LYSO を使用すれば時間分解能の向上が期待出来る。ただしどちらも高価であり改良に非常にコストがかかるデメリットがある。2つ目として現在使用している積分型の ADC から電気信号の波形まで記録できる FADC に変更することがある。波形フィットを導入することで2ns以下の時間分解能を目指すことも可能である。 γ 線検出器の時間分解能を $6\text{ns} \rightarrow 2\text{ns}$ に向上すれば S/N は3倍向上されることが期待できる。

表 10.1: シンチレータ性能比較 [18]

シンチレータ	NaI NaI:Tl	LaBr ₃ LaBr ₃ :Ce	LYSO Lu _{1.8} Y _{0.2} SiO ₅ :Ce
密度 (g/cm^3)	3.67	5.08	7.1
発光量 (/keV)	38	63	32
蛍光減衰時間 (ns)	250	16	41
F.O.M. ($\sqrt{\text{減衰時間}/\text{発光量}}$)	2.6	0.5	1.1
発光波長 (nm)	415	380	420
自己放射性	なし	あり	あり

謝辞

本論文を執筆するにあたり多くの方々に助力をいただきましたこと、ここに深く感謝の意を申し上げます。住吉孝行教授には UNI 実験に携わる機会をいただき、研究や発表に関する多くの助言をいただきましたこと感謝致します。指導教官の角野秀一准教授には研究手法におけるアドバイスのみならず研究生活において特段の理解と配慮をしていただきました。千葉雅美客員助教授には多くの実験的な知識を教えてくださいました。汲田哲郎助教授には研究方針について多くの助言をいただきました。浜津良輔客員准教授にはシミュレーションに関する多くの知識と助言をいただきました。皆様のご指導により本論文を執筆することが出来ました。心より感謝致します。

松原綱之特任准教授、今野智之特別研究員には他グループでありながら、解析において多くの助言やご指導を頂きました。心より感謝致します。

高エネルギー実験研究室の岩田修一氏には研究生活における多くのアドバイスをいただきました。同期の梶原春香氏、柿崎正貴氏とは共に支え合い、高め合いながら研究生活を送ることが出来ました。後輩の伊藤氏、幡谷氏、町田氏、米永氏、市川氏、小田木氏、野口氏、松田氏には研究室を盛り上げていただきました。

最後になりますが研究生活において関わった全ての方々に心からの感謝の気持ちと御礼を申し上げて、謝辞にかえさせていただきます。

参考文献

- [1] Dirac,P.A.M. ,1930,Proc.R.Soc.London Ser.A 126.360
- [2] Anderson Phys.Rev43 1933
- [3] Mohorovicic,S. ,1934,Astron.Nachr.253,94
- [4] Deutsch,M. Phys.Rev.82.455 1951
- [5] A.Rich , Rev. Mod. Phys. 53(1981) 127
- [6] W.A.McKinley and H.Feshbach Phys.Rev.74(1948)1759
- [7] A.Ore and J.L. Powell, Phys. Rev. 75(1949) 1696
- [8] Robert Ted Nichols Small order shape factors in beta spectra 1960
- [9] G.P.Lapage et al., Phys.Rev.A.28,3090 1983
- [10] 山崎文男 編, 実験物理学講座 26(全 33 卷) 「放射線」 共立出版
- [11] S.Adachi et al.1990 Phys.Rev.,2634,2637
- [12] S.Adachi et al.1994 Phys.Rev.,3201,3208
- [13] 松本利広 博士論文
- [14] 津川天祐 修士論文
- [15] 山見仁美 修士論文
- [16] 南建屋グループ <http://minami-home.kek.jp>
- [17] Geant4 <http://geant4.cern.ch>
- [18] SAINT-GOBAIN BrilLanCeTMSintillators Performance Summary 2009

付録A 各プログラム

A.1 Na22:陽電子エネルギー生成プログラム

4章に示した陽電子エネルギースペクトルの生成プログラムについて簡単に使用方法を示す。研究室の解析サーバにおいて

```
/data/user/kanda/UNI/Na22_BetaEnergy/Program/ において
```

```
root -l make_beta_energy_byKaryplot.C
```

を実行すると質量エネルギーを含んだ陽電子のエネルギー、x方向の運動量、y方向の運動量、z方向の運動量の4つの情報が書き込まれたテキストファイルと同じ情報が書き込まれたrootファイルを生成する。make_beta_energy_byKaryplot_1275G.C や byKaryplot_1275G_3g.Cなどのファイルは β 崩壊の遷移 γ 線や3光子崩壊事象の γ 線を混ぜ込んだファイルを生成するためのファイルである。

A.2 陽電子の消滅点分布生成プログラム

陽電子の消滅点分布生成プログラムでは Geant4 を使用するので環境変数の設定が必要である。

```
/home/user/kanda/.bashrc
```

```
/home/user/kanda/UNI/G4set.sh
```

それぞれを source コマンドで実行して環境変数数を設定。その後ポジトロニウム生成部シミュレーションプログラム用の環境設定として

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/TTTarget/AnnihiVtx/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03/
```

```
TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm
```

において

```
source setup.sh
```

を実行。

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/TTTarget/AnnihiVtx/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03/
```

```
TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/src/
```

内のファイルがシミュレーションの詳細を設定している。主なファイルについてだけ説明をする。

```
UniDetectorConstruction.cc
```

ジオメトリーを設定

```
UniPrimaryGeneratorAction.cc
```

陽電子エネルギースペクトルファイルの読み出しや陽電子が発生する場所などを設定。

Randomize や PrimaryCut などはこちらで行っている。

UniEventBulder.cc

シミュレーションの結果を保存する場所などのいくつかの情報をデータベースに書き込む。

UniSteppingAction.cc

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/TTTarget/AnnihiVtx/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/Event/
```

内のファイルと連動してシミュレーションのステップ毎にどのような情報を保存するのかを設定している。

これらを設定後、

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/TTTarget/AnnihiVtx/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/Build/
```

に移動し、

make install

を実行して

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/work/bin/Linux-g++
```

に実行プログラムを作る(場所は最初に設定した環境変数に依存)。その後、

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/TTTarget/AnnihiVtx/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/Production
```

に移動する。run.mac、Uni.go、myjob_TTarget_Tuni.sh のファイルについて記述する。

run.mac

いくつかのシミュレーションの設定をする。ここで設定した情報はデータベースに書き込まれる。どの陽電子エネルギースペクトルファイルを使用したか、どのようなジオメトリーで行ったか (geometry_id として識別できるように自分で設定する、60327 が本研究で使用した geometry_id にあたる。)、シミュレーション結果の保存場所、イベント数などを設定できる。

http://heal1.phys.se.tmu.ac.jp/hamatsu/Uni_G4Analysis/Uni_macro_commands.html に詳細が記述されている。

Uni.go

run.mac を読み込んだ上で指定した実行プログラムを実行する。ここで先ほど make install したファイルを指定する。

myjob_TTarget_Tuni.sh

グリッドシステムに job を投げるためのファイル

まず Production ディレクトリにおいて

```
./Uni.go
```

を実行する。シミュレーション結果は run.mac で指定した場所の保存される、現状では

```
/data/user/kanda/UNI/TTTarget_ROOTFiles/AnnihiVtx/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03/6mm/Data
```

に保存される。

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/TTTarget/AnnihiVtx/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03/TTTarget_AnnihiVtx_Type03_Poly03.6mm/KndAnalysis/Ana/uni_annihivtx
```

に移動する。ここでデータベースを確認して目的の条件におけるシミュレーション結果

を3次元ヒストグラムにする。Ana_annihivtx_InSilica.cc はシリカエアロ内での崩壊点を、Ana_annihivtx_2g.cc は全ての場所での崩壊点を3次元ヒストグラムに書き込むファイルである。保存されたroot ファイルをジオメトリーに従って以下の場所に移動させる。

```
/data/user/kanda/UNI/TTarget_ROOTFiles/AnnihiVtx/  
TTarget_Annihivtx_Type03_Poly03/6mm/ROOTFiles/
```

多光子崩壊シミュレーションにおいて、この場所を指定してファイルを読み込む。これで陽電子の消滅点分布の手順は終わりである。

A.3 GRACE プログラム

GRACE プログラムの詳細については私自身は関わっていないので生成されたファイルの場所だけを示す。

```
/data/user/kanda/UNI/GRACE
```

に3光子崩壊、5光子崩壊、3光子崩壊と2光子崩壊や陽電子が混ざったものがある。ファイルは全エネルギー、x方向の運動量、y方向の運動量、z方向の運動量の順で書き込まれている。

A.4 多光子崩壊シミュレーションプログラム

本研究のジオメトリーでの多光子崩壊シミュレーションプログラムについて記述する。

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/Tuni3_PrimCut/Tuni3_LonPb/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03.6mm
```

に移動する。...for2g や...for3g などは2光子崩壊や3光子崩壊などのシミュレーションプログラムである。3光子崩壊のほぼ全てがシリカエアロゲル内でしか発生しないのに対して2光子崩壊はどの場所でも起こるのでシミュレーション毎に違う陽電子崩壊点分布を使用する必要がある。それぞれに対応した GRACE ファイルと陽電子崩壊点分布ファイルを使用する。シミュレーションには Geant4 を使用していて、基本的には陽電子消滅点分布生成プログラムと同様である。一例として3光子崩壊×(2光子崩壊+遷移 γ 線)のシミュレーション手法について記述する。

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/Tuni3_PrimCut/Tuni3_LonPb/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03.6mm/TuniN02C_for3gBetaDecay
```

に移動して source setup.sh を実行する。どの陽電子消滅点分布ファイルを読み込むかは src ディレクトリ内の UniPrimaryGeneratorAction.cc で対応したファイルを指定する。Build ディレクトリ内で make install を行って実行プログラムを作成。

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/Tuni3_PrimCut/Tuni3_LonPb/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03.6mm/KndDev_rdm_3gBetaDecay/worker_grid
```

に移動する。Make_Production、Production、job のディレクトリを使用する。Production ディレクトリ内に 200 個の Production_000~Production_199 のディレクトリが作成されている。シミュレーションの量が膨大なので最大 200 個のプログラムを同時にグリッドシステムに投げられるようにしている。

まず Make_Production ディレクトリに移動する。run.mac 内の情報、geometry_id と comments などの記述でどのようなシミュレーションなのかが区別出来るようにしておく。後の

解析の際にデータベースに書き込まれた情報をもとに解析を行うために、同じ情報の間違っ
たファイルが混入すると区別するのが困難になるので注意が必要である。Uni.go 内で実行
したいプログラムを指定する。make.sh ファイルはここで設定した run.mac と Uni.go を先
ほどの 200 個の Production にコピーするシェルスクリプトである。source mase.sh で実行。
次に job ディレクトリに移動するここでは 10 個ずつプログラムを同時にグリッドシステムに投
げられる。myjob00 ディレクトリに移動する。myjob00 は Production_000~Production_009
までのシミュレーションプログラムを同時に実行するディレクトリである。myjob000、myjob001...
がそれぞれの Production_000、Production_001 を実行するシェルスクリプトで
source start_myjob00.sh を実行することで 10 個のプログラムを同時にグリッドシステムに
投げる。

A.5 イベントセレクションプログラム

まずデータベースに保存された情報を利用して欲しい条件のシミュレーション結果を 1 つ
のファイルにまとめる。

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/Tuni3_PrimCut/Tuni3_LonPb/Tuni3_LonPb26.16cm_Type  
03_Poly03/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03_6mm/KndAnalysis/Ana/Ana_Esin75Reject  
に移動する。Ana3gBetaDecay_Esin75Reject.cc でデータベースを読み込んで 1 つのファ  
イルにまとめる。この際 75keV 以下のヒットはヒットしていないとみなして排除している。  
make コマンドで実行プログラムを作成。myjob_AnaDB.sh 内で実行プログラムを指定して  
qsub myjob_AnaDB.sh で実行。生成したファイルは以下の場所に移動してイベントセレク  
ションの際に読み込む。
```

```
/data/user/kanda/UNI/Analysis_ROOTFiles/LongPb_PrimCut/LonPb_Ty  
pe03_Poly03/6mm/ROOTFiles/
```

シンボリックリンクが以下の場所にあり、イベントセレクションの際に読み込んでいる

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/Tuni3_PrimCut/Tuni3_LonPb/Tuni3_LonPb26.16cm_Ty  
pe03_Poly03/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03_6mm/KndAnalysis/Ana/ROOTFiles  
次に以下の場所に移動する。
```

```
/home/user/kanda/UNI/myG4/Tuni3_PrimCut/Tuni3_LonPb/Tuni3_LonPb26.16cm_Ty  
pe03_Poly03/Tuni3_LonPb26.16cm_Type03_Poly03_6mm/KndAnalysis/3g_and_BetaDecay  
ここでイベントセレクションを行う。kanda.h と kanda_selection.C でセレクションを行う。  
kanda.h 内で、先ほどの 1 つにまとめたファイルを指定する。kanda_selection.C 内で選別条  
件を指定。
```

```
qsub kanda_selection.sh
```

でプログラムをグリッドに投げる。rootfiles_Esin75Reject_2new162 ディレクトリ内に選別
条件適用後の root ファイルを作成する。3 光子崩壊 × (2 光子崩壊 + 遷移 γ 線) のシミュレ
ーション手法は以上である。