

光学シミュレーションを用いた
球形液体シンチレータ中性子検出器の性能評価

横浜国立大学 理工学部
数物電子情報系学科 物理工学 EP
学籍番号 1664192
長村篤芳

2023年2月14日

概要

液体シンチレータ中性子検出器の容器中に含まれる放射性同位体の放射性崩壊によって検出器内部に発生する α 粒子が中性子測定のバックグラウンドとなり、中性子の測定を困難にしている。本研究では、液体シンチレータで満たされた球の中でシンチレーション光を発生させる光学シミュレーションをモンテカルロシミュレーションフレームワーク Geant4 を用いておこなった。6面に設置された光検出器で検出されたシンチレーション光の光量からイベント発生位置の再構成し、中性子検出器としての各種性能を評価した。

目次

第 1 章	中性子と α 線	2
1.1	放射線	2
1.2	中性子	2
1.3	α 線	2
第 2 章	シンチレータ	3
2.1	概要	3
2.2	有機シンチレータ	3
2.2.1	発光原理	4
2.3	有機シンチレータの応答	5
2.3.1	発光量	5
2.3.2	時間特性	6
2.4	有機液体シンチレータ	7
2.4.1	液体シンチレータ BC-501A	8
第 3 章	Geant4	9
3.1	概要	9
3.2	シミュレーションの作成方法	9
3.3	光学光子	10
3.3.1	シンチレーション過程	10
第 4 章	球形液体シンチレータ検出器の光学シミュレーション	11
4.1	球形液体シンチレータ検出器の構造	11
4.2	Physics List	13
4.3	Primary Generator	13
4.4	シミュレーションの流れ	13
4.4.1	光量重心	15
4.5	結果	16
4.5.1	定位置から発生したイベントのシミュレーション	16
4.5.2	バックグラウンド除去効率	20
4.5.3	信号選択効率	26
第 5 章	結論	33

第1章 中性子と α 線

1.1 放射線

放射性物質から放出される粒子や電磁波のことを放射線という。放射線にはいくつかの種類があり、ヘリウム ${}^4\text{He}$ の原子核からなる α 線、高速の電子からなる β 線、極めて波長の短い電磁波からなる γ 線、中性子線などが存在する。

1.2 中性子

中性子は電荷がないので、クーロン力によって物質と相互作用しない。中性子の相互作用は、原子核との間で行われる。全ての中性子検出器は、入射中性子を何らかの形で 2 次荷電粒子に変換し、この変換された荷電粒子を直接検出する。

中性子のエネルギーに応じて支配的な相互作用チャンネルが変化する。そのため、約 0.5 eV を境界として高速中性子と低速中性子の 2 種類に分類する。

1.3 α 線

放射性同位体の原子核が α 線を放出して起こす崩壊のことを α 崩壊とよび、その過程は次の式で表現される。



ここで X を崩壊前の親核、Y を崩壊後の娘核である。

第2章 シンチレータ

2.1 概要

電離作用を持つ放射線の入射により蛍光や燐光を発生する物質をシンチレータという。蛍光は可視光の即発的放出である。一方、燐光は蛍光より波長の長い光であり、一般に発光の時定数がずっと長い。シンチレータには、無機シンチレータ、有機シンチレータ、ガスシンチレータなどの種類がある。

理想的なシンチレーション材料が保有すべき性質として以下のようなものがある。

- 荷電粒子の運動エネルギーを高いシンチレーション効率でシンチレーション光に変換できること。
- 落とされた荷電粒子のエネルギーと発光量に比例性があること。
- シンチレーション光の発光の時定数が短いこと。
- シンチレーション光に対して光学的に透明な材料であり、十分に大きい検出器を製作できること。
- 光の屈折率が光検出器の窓材 (ガラスや石英など) に近いこと。

これらの条件全てを満足するような材料は存在しないため、これらの実験条件に応じて適切なシンチレータを選択する必要がある。光電子増倍管 (PMT) や光ダイオード (PD) などの光検出器とシンチレータを組み合わせたシンチレータ検出器は、素粒子物理学分野における粒子検出実験では最も広く用いられている検出器の一つである。そのほかにもセキュリティ、医療分野など幅広い用途で応用されている。

2.2 有機シンチレータ

有機シンチレータは一般的に発光の時定数が短いが発光量は少ないという特性を持つ。代表的な有機シンチレータとしては、純粋有機結晶、有機液体、プラスチック、薄膜などのシンチレータが知られている。

有機シンチレータは水素を含むので、本研究で開発する中性子検出機に広く用いられている。

2.2.1 発光原理

有機物質中の蛍光過程は π 電子構造として知られている対称的な性質を持った有機分子に由来する。

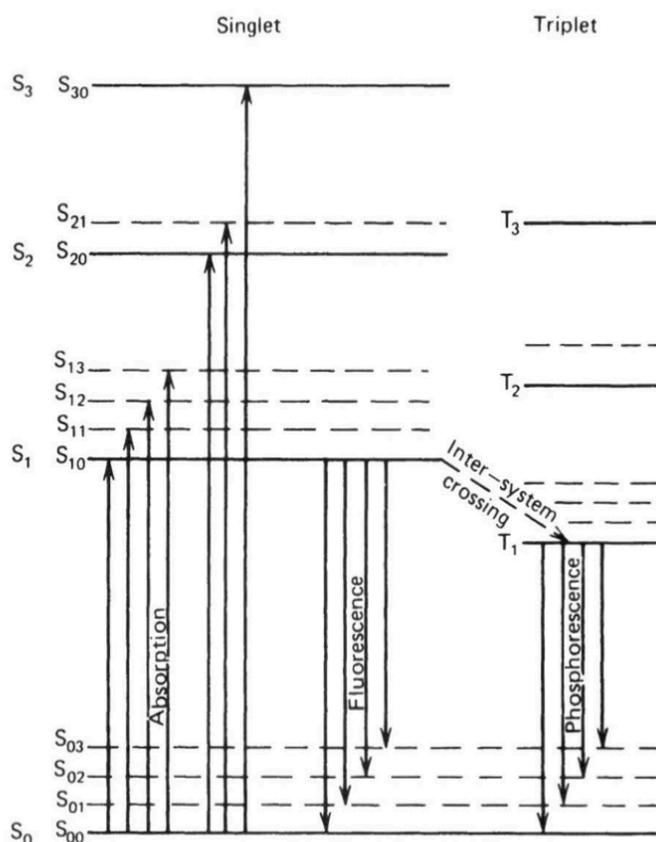


図 2.1: π 電子構造をもつ有機分子のエネルギー準位 [2]

π 電子構造の電子のエネルギー準位は、図 2.1 に示したとおり、スピン 0 のシングレット状態の系列 (S_0, S_1, S_2, \dots) とスピン 1 のトリプレット状態の系列 (T_0, T_1, T_2, \dots) で表される。基底状態 S_0 と第一励起状態 S_1 間のエネルギー間隔は 3~4 eV である。これらの電子配列は分子の振動状態に対応してより細かい間隔に分離されており、 $S_{00}, S_{01}, S_{02}, \dots$ というように第二の添字で区別される。これらの準位の間隔は 0.15 eV 程度であり、これは、室温の平均熱エネルギー (0.025 eV) よりも大きいため、室温ではほとんどの分子が基底状態 (S_{00}) にある。

荷電粒子の運動エネルギーにより励起された高いシングレット電子状態は放射を伴わない内部転換により数 ps 程度の高速で S_1 電子状態に移移する。また、 S_{11}, S_{12}, S_{13} に励起された分子も近傍の電子と熱平衡にないので、短時間で振動エネルギーを失い S_{10} 状態になり、これらが基底状態 S_0 へ遷移することによって主要なシンチレーション光である即発蛍光が発生する。

また、系間遷移と呼ばれる遷移を経て幾つかのシングレット励起状態からトリプレット励起状態 T_1 へと遷移することがある。これは即発蛍光に対して数ミリ秒と長い時間をかけて基底状態 (S_0) へと遷移する。この時放出される放射線は燐光と呼ばれる。加えて、トリプレット状態 T_1 にある時、いくつかの分子は熱的に励起されて S_1 に戻され、その結果通常の蛍光として遷移する遅発蛍光と呼ばれる蛍光も存在する。燐光や遅発蛍光の寄与が小さく即発蛍光の寄与が大きいものが良いシンチレータである。

2.3 有機シンチレータの応答

2.3.1 発光量

有機シンチレータ中で荷電粒子が運動エネルギーを失うと、失ったエネルギーのごく一部が蛍光エネルギーに変換され、残りは光とならず、主に熱の形で費やされる。その時に発生するシンチレーション光の強度、すなわち発光量は粒子の種類とそのエネルギーに依存する。電子のようにエネルギー損失が小さい場合、発光量は約 125 keV 以上でエネルギーに対して直線的に変化する。一方、陽子やアルファ粒子のようなエネルギー損失が大きい重荷電粒子の場合には、励起電子の飽和などにより、クエンチングと呼ばれる現象が起きる。

有機シンチレータの荷電粒子に対する応答は、単位飛程長あたりに放出される蛍光エネルギー dL/dx と荷電粒子の被エネルギー損失 dE/dx の間の関係式で説明できる。この式は Birks の式と呼ばれ、クエンチングがない場合、発光量はエネルギー損失に比例するという仮定をすると、

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx} \quad (2.1)$$

と表される。クエンチングによってシンチレーション効率の低下を招くという仮定をした時、クエンチングを考慮した Birks の式は

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (2.2)$$

となる。S は通常のシンチレーション効率を表し、積 kB は特定のシンチレータに対する実験データに合うように調整されるパラメータである。

高速電子で励起された場合、エネルギー損失 dE/dx は十分大きな E の値に対して小さくなり、Birks の式は次のようになる。

$$\left. \frac{dL}{dx} \right|_e = S \frac{dE}{dx} \quad (2.3)$$

すなわち単位エネルギー損失あたりの発光量の増加分は一定となるので、この時の発光量は、

$$L \equiv \int_0^E \frac{dL}{dE} dE = \int_0^E S dE = SE \quad (2.4)$$

となり、入射粒子のエネルギー E に比例することになる。アルファ粒子の場合には dE/dx が非常に大きくなるため、Birks の式は次のようになる。

$$\left. \frac{dL}{dx} \right|_{\alpha} = \frac{S}{kB} \quad (2.5)$$

2.3.2 時間特性

有機シンチレータ中に入射した荷電粒子や放射線によるシンチレータの励起後時刻 t における即発蛍光の強度 I は次のように表される。

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.6)$$

ここで時定数 τ はシンチレーション光の減衰時間である。前述の通り、シンチレーション光にはシングレットの励起状態から放出される即発蛍光とトリプレットの励起状態に関係するである燐光、遅発蛍光が存在する。全体的な発光量曲線は速い成分 (即発蛍光) と遅い成分 (燐光、遅発蛍光) の和として表現でき、それぞれ I_f 、 I_s を定数、 τ_f 、 τ_s を時定数とすると、光出力の強度は次のように書くことができる。

$$I = I_f \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) + I_s \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \quad (2.7)$$

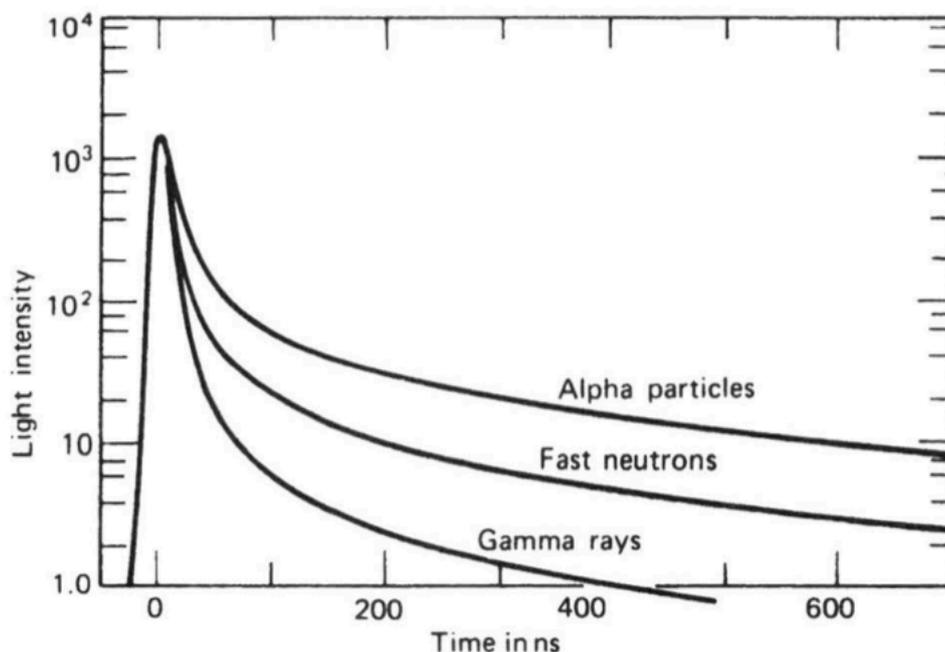


図 2.2: 異なる種類の放射線で励起したスチルベン中のシンチレーションパルスの時間依存性 [2]

図 2.2 はアルファ粒子、高速中性子およびガンマ線に対してスチルベンで観測されたシンチレーション光の違いを表している。エネルギー損失率の大きい粒子ほどトリプレット状態へ遷移する分子が増え、燐光や遅発蛍光からなる遅い成分が増加することで遅い時刻での発光量が大きいことがわかる。このように遅い成分に現れる光の割合が励起粒子に依存することを用いて、同じエネルギーを検出器に付与した異種の粒子を区別することができ、パルス波形弁別法と呼ばれ広く用いられている。

2.4 有機液体シンチレータ

有機溶媒中に有機シンチレーション物質となる蛍光剤を溶解させたものを有機液体シンチレータと呼ぶ。単に溶媒と蛍光剤の 2 つの物質からなる液体シンチレータと光電子増倍管のスペクトル応答によく合致するように波長変換剤を加える場合がある。有機液体シンチレータの溶媒には励起されやすい π 電子を持っている芳香剤化合物が利用される。代表的なものにトルエン、キシレン、プソイドクメン、ジオキサンなどがある。溶媒は溶質が出すシンチレーション光を吸収しない必要がある。一方で溶質として使用される蛍光剤や波長変換剤は高い溶解度や蛍光効率を持つ物質である必要がある。多くの液体において溶存酸素は強い消光剤として作用し、蛍光効率を実質的に下げってしまうため溶液を容器内に密封し酸素を追い出す必要がある。

液体シンチレータは固体構造を持たないので、強い放射線照射でも損傷を受けにくく、大体積のものを安価で製作できるという特徴がある。

2.4.1 液体シンチレータ BC-501A

BC-501A は優れた波形弁別能力を持つため γ 線照射化で中性子を検出するのに適した液体シンチレータであり、中性子検出器に広く利用されている。表 2.1 に BC-501A の主な特性を示す。

密度 (g/cm ³)	0.874
水素：炭素 比	1.212
水素原子数 (/cm ³)	4.82×10^{22}
炭素原子数 (/cm ³)	3.98×10^{22}
屈折率	1.505
光出力 (%アントラセン)	78
減衰時間 (ns)	3.16, 32.3, 270
最大放出波長 (nm)	425
引火点 (°C)	24

表 2.1: 液体シンチレータ BC-501A の主な特性 [3]

第3章 Geant4

3.1 概要

Geant4[4] は、高エネルギー物理学、原子核物理学、医学物理学などの様々な分野で使用されるモンテカルロシミュレーションフレームワークである。Geant4 は、主に CERN(European Organization for Nuclear Research) によって開発、維持されている C++ で記述されたオープンソースソフトウェアであり、現在も改良が続けられている。

3.2 シミュレーションの作成方法

シミュレーションを作成、実行するためには最低限以下の 3 つの初期情報を定義すると良い。

Detector Construction

Detector Construction はシミュレーションで使用する検出器の構造を記述するためのクラスである。このクラスには、検出器の構造や材料、物理プロセスなどの情報を記述する。このクラスは Geant4 の Geometry 構築の中心的な部分に該当し、ここでは以下のようなことが可能になる。

- 検出器のレイアウトを構築する
- 検出器の材質を定義する
- 検出器内にある物質の特性 (屈折率、吸収率など) を設定する

Geant4 には標準的な Detector Construction クラスが提供されているため、これを継承し独自の検出器の構造を実現できる。

Physics List

Physics List は、シミュレーションで使用する物理プロセスを定義するためのクラスにあたる。このクラスには、追跡する粒子の種類や物理相互作用などを定義する。Physics List も標準的なクラスが Geant4 で提供されているため、これを継承することで独自の物理プロセスを実現できる。

Primary Generator

Primary Generator は、シミュレーションにおいて最初に発生する粒子を定義するためのクラスにあたる。このクラスには粒子の種類、エネルギー、発生位置や方向などの情報を記述する。

このクラスはシミュレーションの最初に実行されるクラスとなり、放射源、加速器、実験装置などをシミュレーションする際に必要になる。

3.3 光学光子

光子は可視光から高エネルギー領域といった幅広い領域に属す。そのうち、光学光子は可視光や近赤外光などの光領域に属し、ガンマ線は高エネルギー領域に属すといったように区別される。Geant4 上で光学光子は G4OpticalPhoton クラス、ガンマ線は G4Gamma クラスを用いてエネルギーや方向、振る舞いなどを記述できる。Geant4 には光学光子による反射や屈折のシミュレーションを行うための API が提供されている。G4OpBoundaryProcess クラスを用いて光学光子が物質と衝突した際に反射率や屈折率などの物理量を計算し、それに基づいて光学光子の軌道を更新することができる。

3.3.1 シンチレーション過程

Geant4 において物質中のシンチレーション過程を扱うためには、前述の Physics List でシンチレーション過程を記述・定義し、Detector Construction で検出器の構造を設定する必要がある。シンチレーション過程において、シミュレーションに際して設定することができる物質の光学特性パラメータには次のようなものがある。

- 発光スペクトル

発生するシンチレーション光としての光子の波長のこと。単位は電子ボルト [eV] で記述する。

- 一次粒子の損失エネルギーあたりの光子発生量

ここで、一次粒子とはシンチレータに入射する荷電粒子や放射線が該当する。

- Birks 定数

- 減衰時間

式 2.7 における発光の速い成分と遅い成分に対応する時定数を設定できる。

シミュレーション時には、シンチレーション光の発生点は一瞬粒子の軌道上に分布し、そこから等方的に放射される。光はランダムな向きに直線偏光し、そのエネルギー (波長) は設定したエネルギースペクトルを基に決定される。上記のパラメータは発光量を正確に計算するために重要である。一回のイベントにおける発光量は、これらのパラメータを基に計算され、実際の発生数は計算された光子の平均発生数が 10 以下の場合にはポアソン分布から、それより多い場合にはガウス分布から決定される。シンチレーション光の時間応答は、速い成分と遅い成分についてそれぞれ設定した時定数を基にシミュレーションされる。

第4章 球形液体シンチレータ検出器の光学シミュレーション

液体シンチレータ中性子検出器は、放射線の時間変化やエネルギーなどの波形を利用して放射線の種類を判別する波形弁別法によって、中性子のシンチレーション反応による信号と γ 線や電子からのバックグラウンド信号を区別することができる。しかしながら、検出器材料中に含まれる放射性不純物の α 崩壊で放出される α 線バックグラウンドは波形弁別で除去できない。本研究では、液体シンチレータ中性子検出器の α 線バックグラウンドを、シンチレーション光のヒットパターンで低減することを目的に光学シミュレーションを行った。

4.1 球形液体シンチレータ検出器の構造

シミュレーションで作成した球形液体シンチレータ検出器の幾何学的構造、材料特性、及び空間配置について説明する。Geant4で定義したシンチレータ検出器を可視化したものとその概略図を図4.1と図4.2に示す。

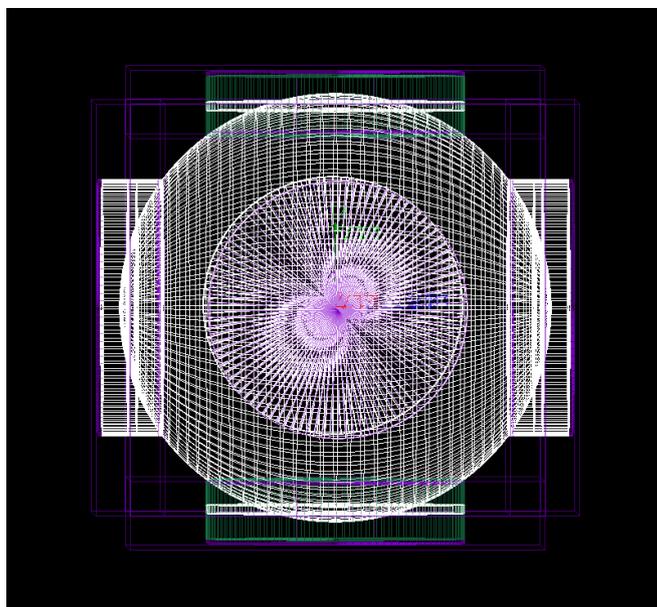


図 4.1: 液体シンチレータ検出器の構造

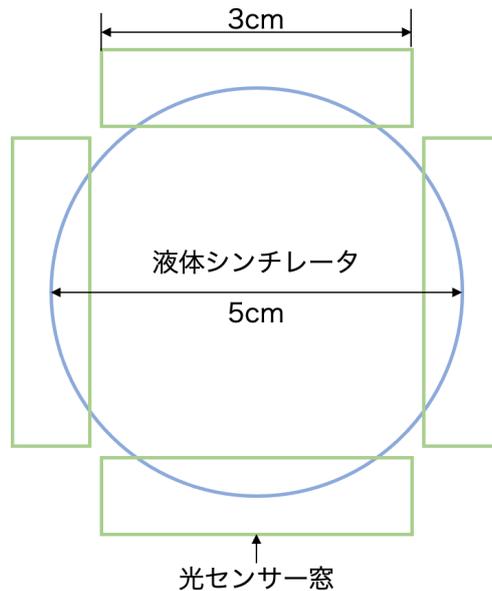


図 4.2: 液体シンチレータ検出器の断面図

球形の液体シンチレータ検出器は、外側の球形液体シンチレータ容器の 6 面に光センサーが取り付けられている。図 4.1 では、白の円筒が光センサーを表している。

- 容器

球形の容器は直径 5 cm のアルミニウム (Al) とした。

- 光センサー

球の 6 面に設置した窓は実際の検出器で使用される光電子増倍管 (PMT) の入射窓を想定している。光電子増倍管は、微弱な光を受けとった後、光子が電子を励起し、その電子が内部の電極に到達し、さらに電子を増幅することで、入力光の信号を増幅することで入力した光を電気信号に変換するために用いられる装置である。今回のシミュレーションでは、光を受けて電子を放出し、増幅させる機構を持つ部分は簡略化のために省略し、入射窓と光を吸収する受光面のみを作成した。今回のシミュレーションプログラムでは、光電子増倍管が光を検出し、その強度を電気信号として出力する機能をシンチレーション光発生時に各窓に入射した光子の数をカウントすることにより表現している。

- 液体シンチレータ

検出器の内部を占める液体シンチレータとして BC-501A を採用し、その物理的特性は、表 2.1 の値を定義した。容器の中の半径 2.5cm の球の内部に BC-501A が一様に満たされており、入射した荷電粒子が液体シンチレータに落としたエネルギーに対してシンチレーション光を発生させる。

液体シンチレータのシンチレーション過程及び、光子のトラッキングのシミュレーションにあたり設定した光学特性のパラメータを表 4.1 に示す。

シンチレータの屈折率	1.53
光子発生数 (/MeV)	14240
光電子増倍管の量子効率	0.25
クエンチングファクター	0.2
減衰時間 (ns)	3.16, 32.3
発生光子のエネルギー (eV)	2.917
吸収長 (m)	7.0
窓の屈折率	1.544
容器内側の反射率	0.0

表 4.1: シンチレーション過程と光子のトラッキングに関する設定データ

上記の液体シンチレータ検出器が空気で満たされた $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ の空間の中央に設置されている。シミュレーション空間は直交座標系を採用しており、検出器およびシンチレータの中心に原点が位置する。検出器の容器と光センサーのは座標系の x 、 y 、 z 軸と平行に配置されている。

4.2 Physics List

FTFP_BERT は、Geant4 に内蔵されている高エネルギー物理シミュレーション用の Physics List で、標準的な電磁相互作用とハドロン相互作用を扱うものである。G4OpticalPhysics は、Geant4 に内蔵されている Physics List でシミュレーションの際に光学光子を扱うために定義した。今回のシミュレーションでは、シンチレーション過程および発生させるシンチレーション光を扱うために定義した。この Physics List の設定に加えて、表 4.1 で示した各種パラメータの設定を行うことでシンチレーション光トラッキングのシミュレーションをおこなった。

4.3 Primary Generator

以下のように Primary Generator で発生させる一次粒子を定義し、シミュレーションを行った。

4.4 シミュレーションの流れ

図 4.3 にシミュレーション実行時の流れを示す。

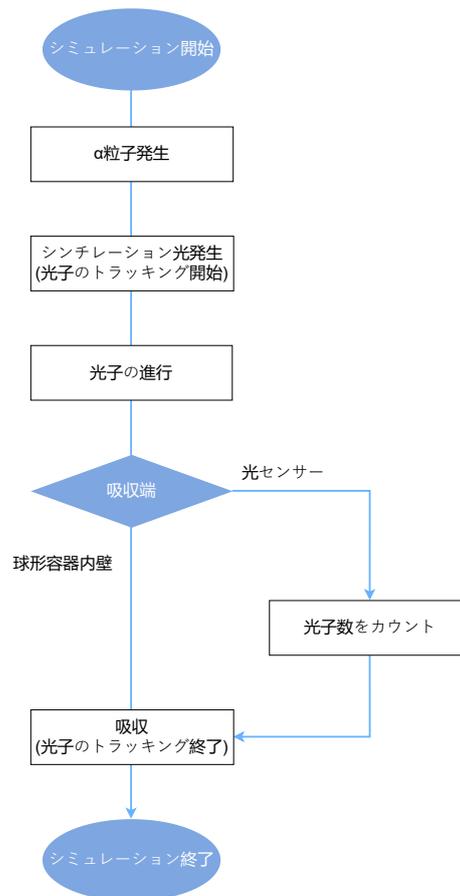


図 4.3: シミュレーションの流れ

1. Primary Generator によって液体シンチレータ内に α 粒子を発生させる。発生させた α 粒子の位置座標 (x, y, z) はファイルへ出力される。
2. 発生させた α 粒子が液体シンチレータ内で運動エネルギーを失い、シンチレーション光が発生する。
3. 放出されたシンチレーション光の光子が発生点から 4π 方向に進行し、トラッキングされる。
4. 光子が光センサーの窓に到達すると、6面に設置したセンサーは到達した光子の数をカウントし、ファイルへと出力する。

5. 光子は光センサーの窓か、球の表面に到達し、吸収されて進行を止める。トラッキングが終了する。

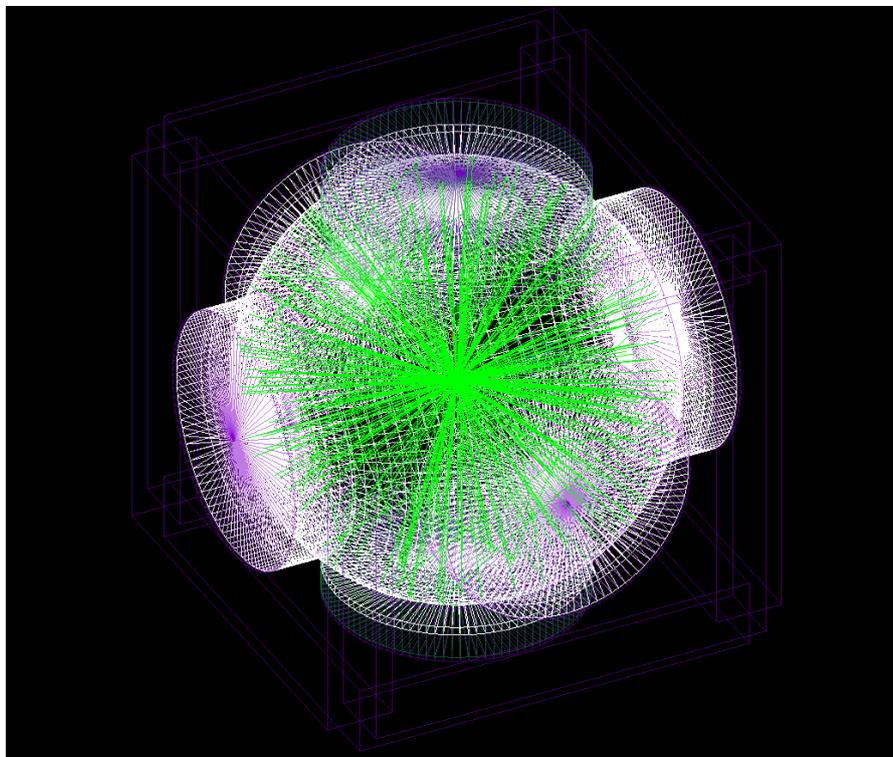


図 4.4: 検出器内でのシンチレーション光発生の様子

シミュレーションでは、液体シンチレータ内で α 粒子を 1 つ発生させ、それによって放出されるシンチレーション光の全ての光子が吸収され、トラッキングが終了するまでを 1 イベントとする。1 回のイベントごとに 6 つの光センサーのそれぞれの光子カウント数と、 α 粒子を発生させた位置情報 (x, y, z) が出力される。

4.4.1 光量重心

1 イベントにつき 6 つの窓でカウントされた光子数の光量重心からイベントの発生位置を再構成する。x 軸、y 軸、z 軸の光量重心から再構成された位置 $G(\text{cm})$ は、球の対面に設置された 2 つの窓の光子カウント数から式 (4.1) で計算される。

$$G = \frac{(2.0 \times W_1) + (-2.0 \times W_2)}{W_1 + W_2} \quad (4.1)$$

ここで、 W_1 と W_2 は対面の 2 つの窓の光子カウント数である。液体シンチレータで満たされた球の中身が原点の座標に対応し、光量重心を求める各軸上において対面する 2 つの窓は図 4.5 に示

すように、 ± 2.0 cm の位置にあるため、それぞれの光子カウント数に ± 2.0 の重みをかけることで窓に垂直な方向について再構成位置 $G(\text{cm})$ が求められる。3つの対になる窓についての上記の計算を行い、 x 、 y 、 z の3方向の光量重心を求めることによって、シンチレーション光の発生点である α 粒子の発生位置の再構成を行う。

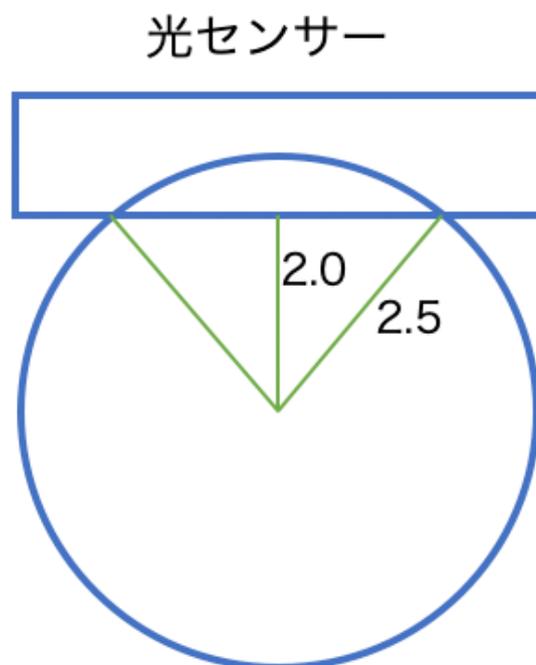


図 4.5: 検出器の窓までの距離の概略図

4.5 結果

4.5.1 定位置から発生したイベントのシミュレーション

液体シンチレータ中のある1点から α 粒子を 1000 回発生させるシミュレーションを行った。

まず $(0\text{cm}, 0\text{cm}, 0\text{cm})$ 、 $(0\text{cm}, 1.0\text{cm}, 0\text{cm})$ 、 $(0\text{cm}, 1.5\text{cm}, 0\text{cm})$ の3点から 5MeV の α 粒子を 1000 イベント発生させ、 y 軸の再構成位置を調べる。再構成された y 座標についての発生位置を以下の図 4.6 から図 4.8 に示す。

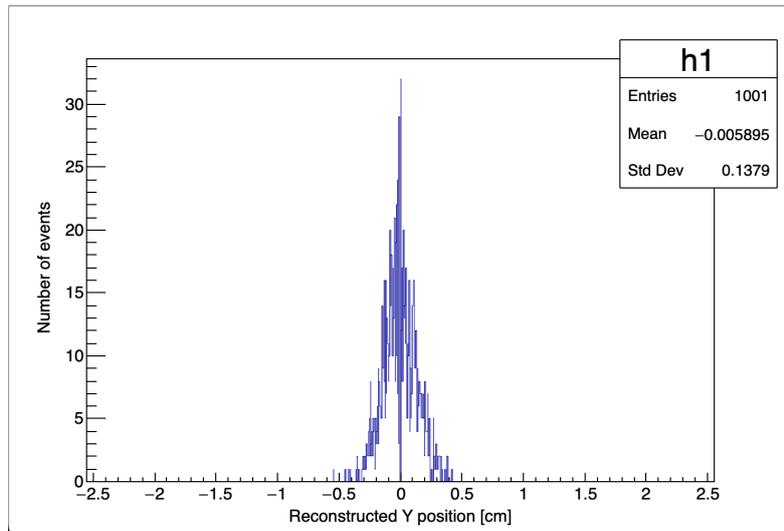


図 4.6: (0, 0, 0) の位置で α 粒子を発生させた時の y 軸上に再構成された発生位置

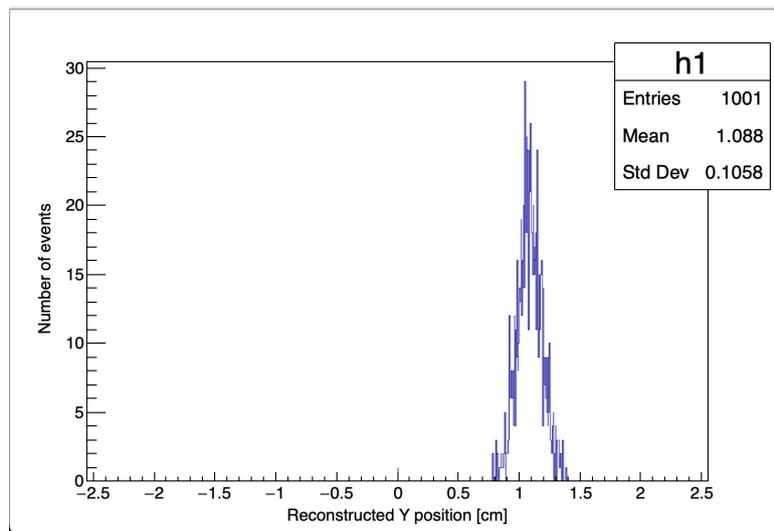


図 4.7: (0, 1.0, 0) の位置で α 粒子を発生させた時の y 軸上に再構成された発生位置

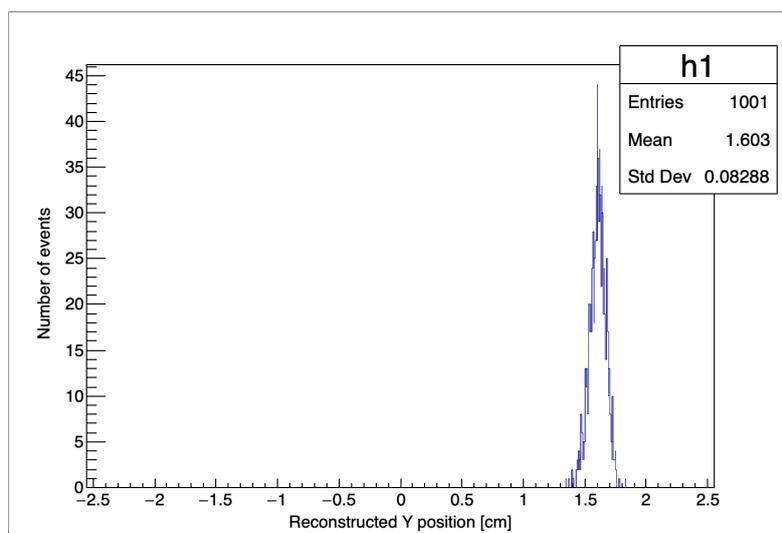


図 4.8: (0, 1.5, 0) の位置で α 粒子を発生させた時の y 軸上に再構成された発生位置

横軸は、検出された光量から再構成された y 軸上の位置に対応しており、 $\pm 2.5\text{cm}$ に球の表面、 $\pm 2.0\text{cm}$ に光センサーの窓がある。原点で α 粒子を発生させた場合の図 4.6 では、再構成された位置は実際の発生点を中心に位置していることがわかる。

発生点を y 軸上の 1.0cm と 1.5cm に変化させてシミュレーションを行った場合では、図 4.7 と図 4.8 からわかるように、イベントを発生させた位置よりも値の大きな位置に再構成されたピークが出現した。これは、図 4.9 に示す通り、シンチレーション光の発生点が光センサーの窓が近づくにつれて、発生したシンチレーション光は近い検出器では大きな角度成分のものも入射できるのに対し、遠い検出器では、小さな角度成分のものしか入射されないため、イベントが発生した位置よりも、近い検出器の外側に再構成されたと考えられる。図 4.9 の円はシミュレーションで使用した球に対応し、長方形の部分は光センサーに対応する。濃緑で示された三角形は、光センサーに入射しうる光に対応し、薄緑の三角形は反対に入射しうる光と同じ角度を持った光が到達しうる軌跡を表している。次に球の表面近傍 ($1.4\text{cm}, 1.4\text{cm}, 1.4\text{cm}$) でのシミュレーションを行った。 α 粒子の発生位置を図 4.10 に示す。中心からの距離は、 $\sqrt{(1.4)^2 + (1.4)^2 + (1.4)^2} \approx 2.425\text{ cm}$ であり、球の半径が 2.5 cm であることから球の表面に限りなく近いことがわかる。この位置から 5 MeV のエネルギーを持つ α 粒子を発生させるイベントを 1000 回行い、Y 軸上に再構成された位置を表したヒストグラムを図 4.11 に示す。

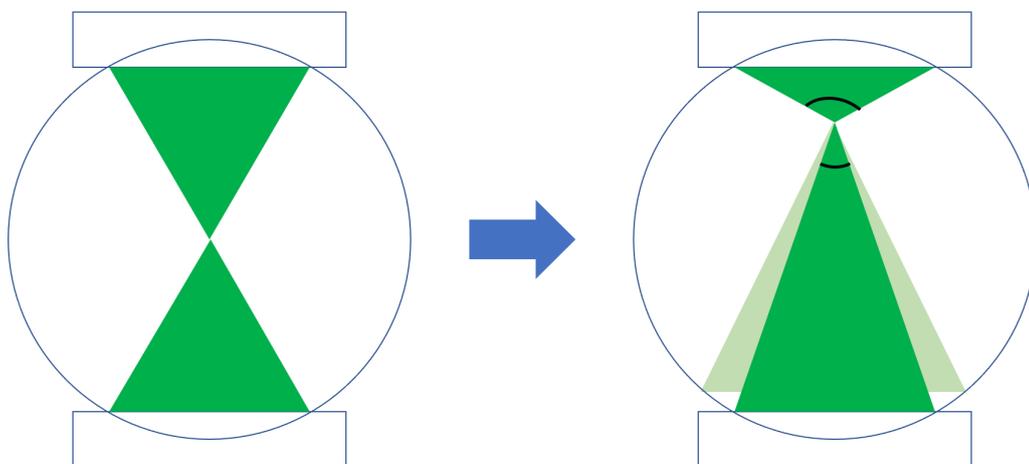


図 4.9: シンチレーション光の発生点と対面する検出器に入射する光量の角度依存性

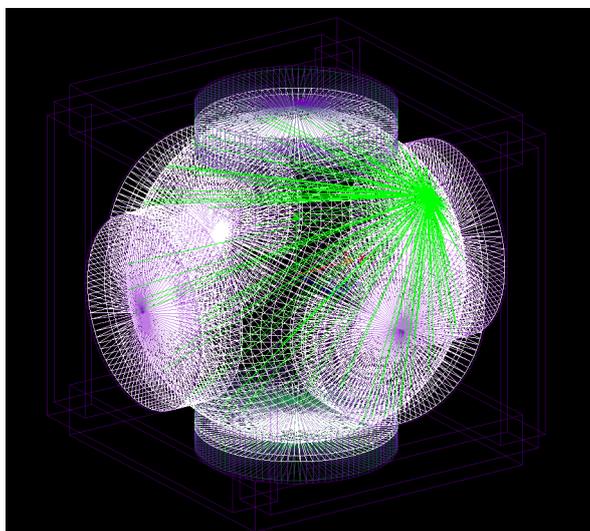


図 4.10: (1.4, 1.4, 1.4) の位置で α 粒子を発生させた時の様子

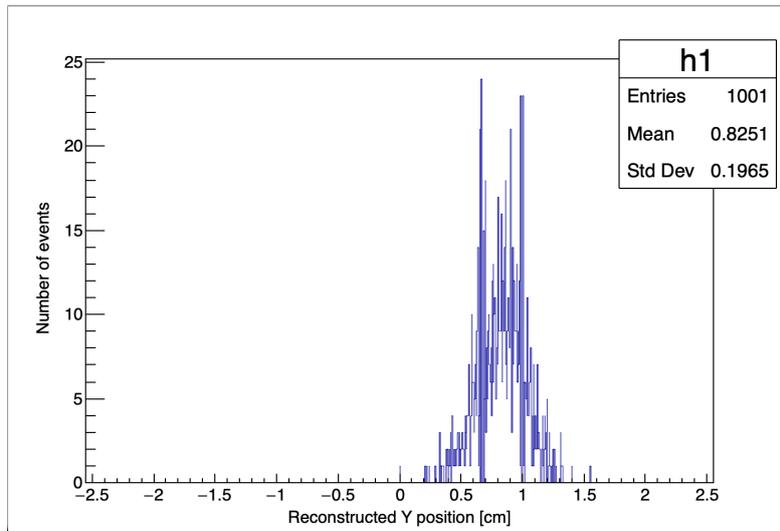


図 4.11: (1.4, 1.4, 1.4) の位置で α 粒子を発生させた時 y 軸上に再構成された発生位置

図 4.11 から再構成された位置は実際の位置である $Y=1.4$ cm よりも中心側にずれた。

4.5.2 バックグラウンド除去効率

球の表面近傍である (1.4 cm, 1.4 cm, 1.4 cm) から α 粒子を 10000 回発生させるシミュレーションをおこなった。まずはじめに 1MeV の α 粒子を発生させた場合に x 軸上で再構成された位置を図 4.12 に示す。y 軸、z 軸上でも同様の分布が得られた。

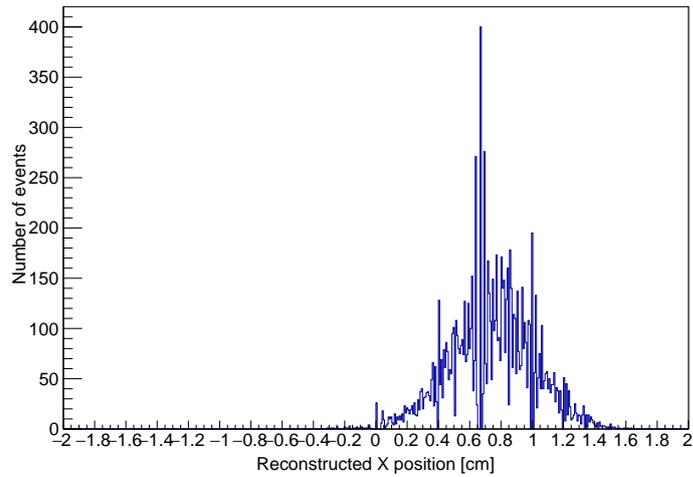


図 4.12: (1.4, 1.4, 1.4) の位置で 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時 x 軸上に再構成された発生位置

ここで、x、y、z、それぞれの光量重心を用いて、中心からの距離 r のヒストグラムを求める。具体的には、x 軸、y 軸、z 軸に対する光量重心をそれぞれ G_x 、 G_y 、 G_z とすると、

$$r = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} \quad (4.2)$$

と r を定義した。この時、球の表面付近である (1.4cm、1.4cm、1.4cm) の位置から 1MeV でアルファ粒子を 10000 イベント発生させた時の r 分布は図 4.13 のようになる。

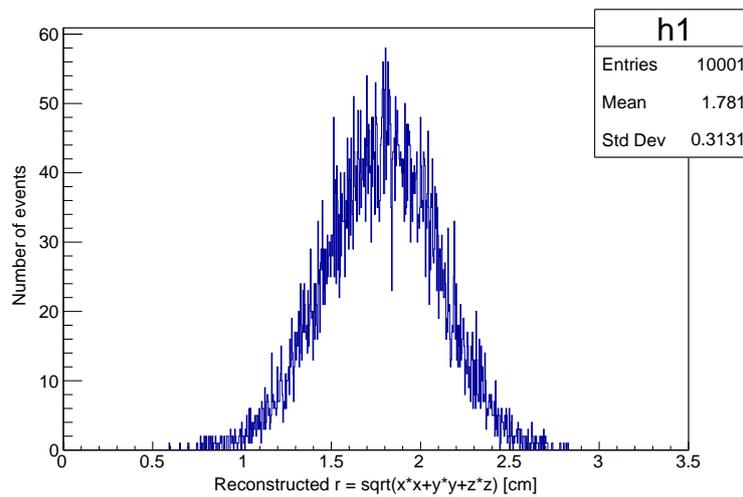


図 4.13: (1.4, 1.4, 1.4) の位置で 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時再構成された r 分布

バックグラウンドのカットポイントを $r = 1.0$ cm、 $r = 1.5$ cm、 $r = 2.0$ cm、として選択した場合の再構成された r 分布はそれぞれ図 4.14 から図 4.16 になる。

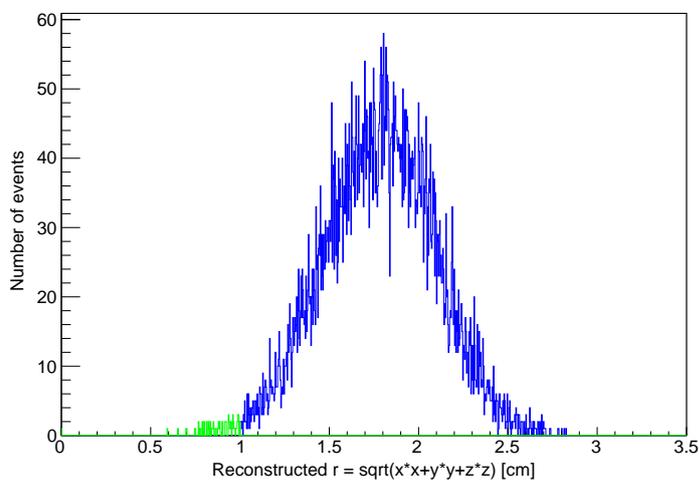


図 4.14: バックグラウンドのカットポイントを $r=1.0$ cm とした時の再構成された r 分布 ((1.4, 1.4, 1.4) の位置で 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時)

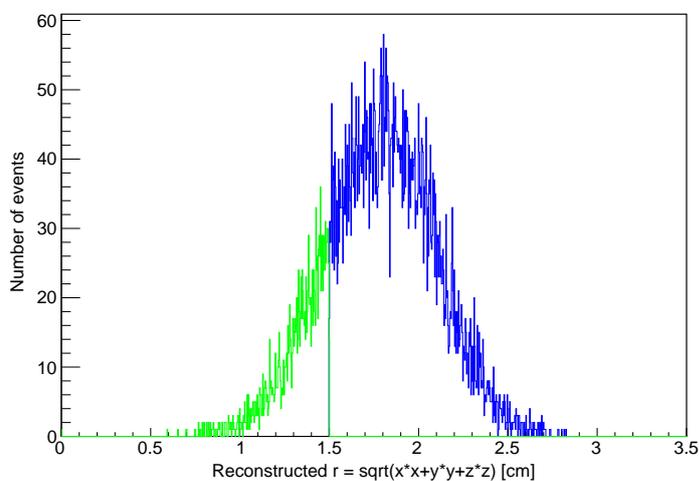


図 4.15: バックグラウンドのカットポイントを $r=1.5$ cm とした時の再構成された r 分布 ((1.4, 1.4, 1.4) の位置で 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時)

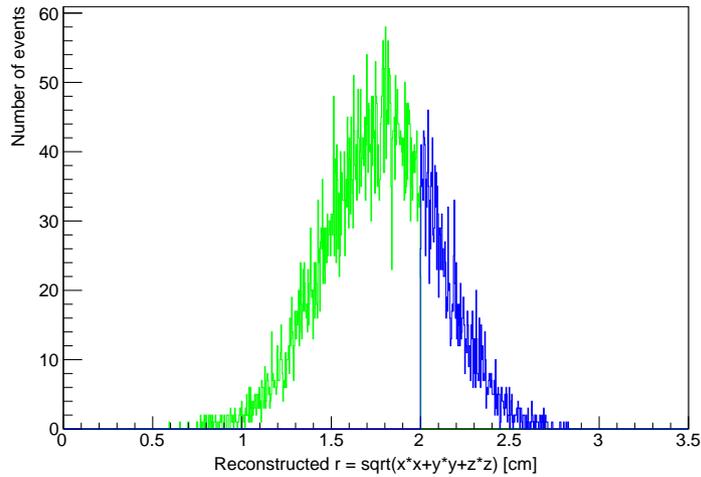


図 4.16: バックグラウンドのカットポイントを $r=2.0$ cm とした時の再構成された r 分布 ((1.4, 1.4, 1.4) の位置で 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時)

バックグラウンド除去効率を

$$\frac{\text{バックグラウンドのカットポイントより大きな } r \text{ に再構成されたイベント数}}{\text{発生イベント数}} \times 100$$

と定義する。図 4.14 から図 4.16 の青色の部分バックグラウンドのカットポイントより大きな r に再構成されたイベント数に対応している。

バックグラウンド除去効率は、表 4.2 の通りである。

r のカットポイント (cm)	バックグラウンド除去効率 (%)
1.0	99.3
1.5	81.5
2.0	24.8

表 4.2: 各バックグラウンドのカットポイントでのバックグラウンド除去効率

同様のシミュレーションを 5MeV のアルファ粒子に対してもおこなった。再構成された x 軸上での発生位置は図 4.17 で、再構成された r 分布は図 4.18 である。

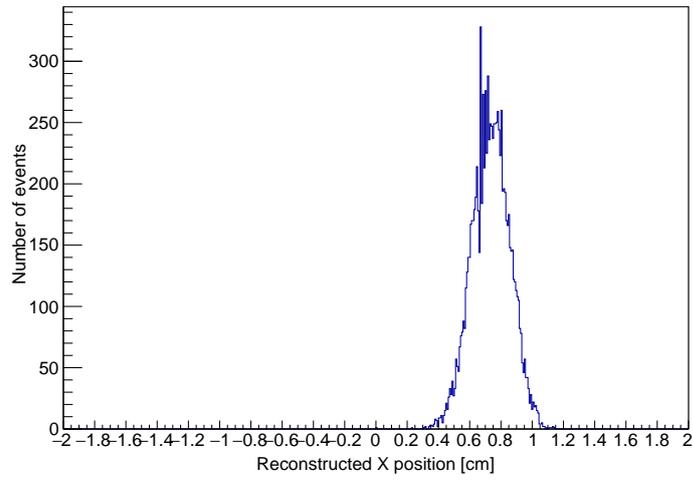


図 4.17: (1.4, 1.4, 1.4) の位置で 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時の x 軸上の再構成位置

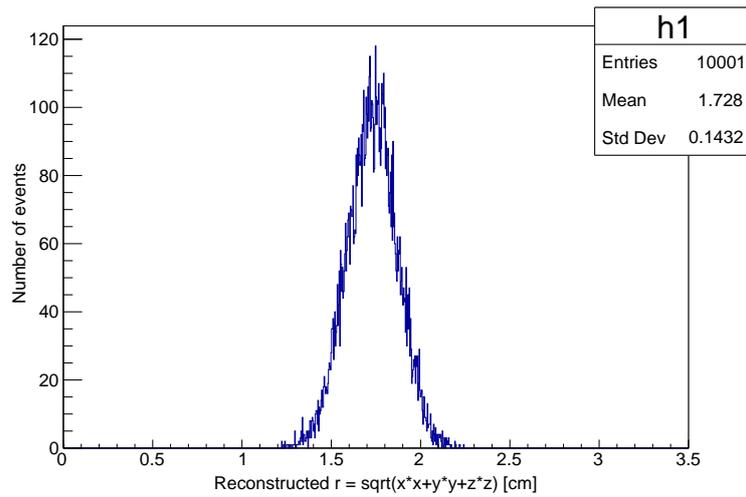


図 4.18: (1.4, 1.4, 1.4) の位置で 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時の再構成された r 分布

バックグラウンドのカットポイントを 1MeV の時と同様に $r = 1.0$ cm、 $r = 1.5$ cm、 $r = 2.0$ cm、として選択した場合の r 分布はそれぞれ図 4.19 から図 4.21 になる。

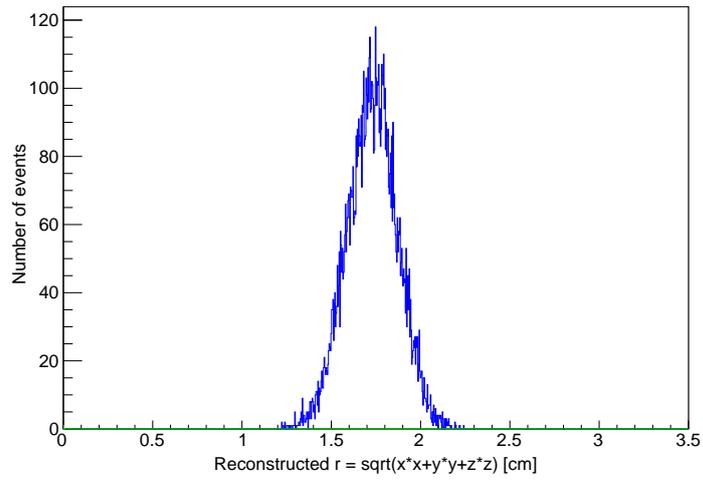


図 4.19: バックグラウンドのカットポイントを $r=1.0$ cm とした時の再構成された r 分布 ((1.4, 1.4, 1.4) の位置で 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時)

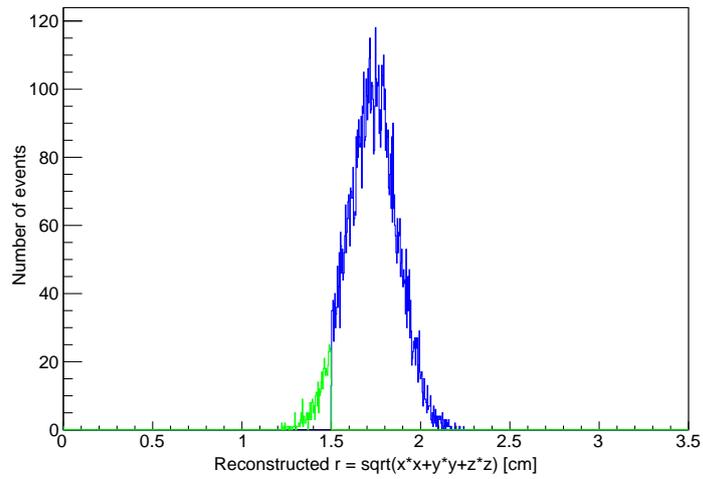


図 4.20: バックグラウンドのカットポイントを $r=1.5$ cm とした時の再構成された r 分布 ((1.4, 1.4, 1.4) の位置で 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時)

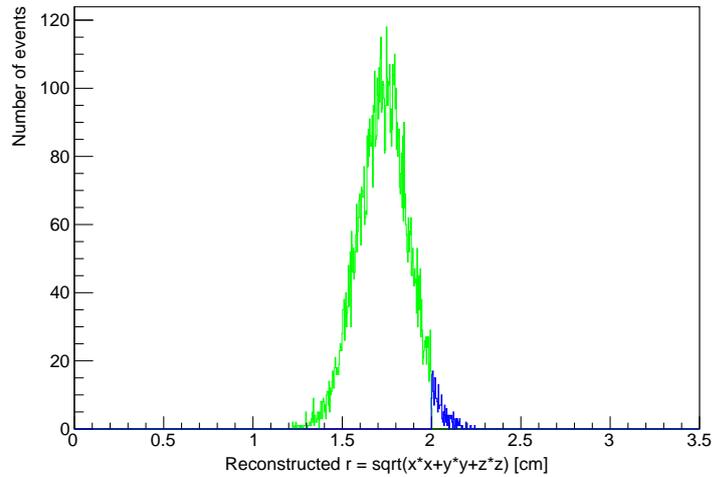


図 4.21: バックグラウンドのカットポイントを $r=2.0$ cm とした時の再構成された r 分布 ((1.4, 1.4, 1.4) の位置で 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時)

それぞれのカットポイントでのバックグラウンド除去効率は表 4.3 の通りである

r のカットポイント (cm)	バックグラウンド除去効率 (%)
1.0	100.0
1.5	94.6
2.0	2.6

表 4.3: 各バックグラウンドのカットポイントでのバックグラウンド除去効率

以上から高いエネルギーを持つ α 粒子を発生させるほど、小さなカットポイントでは高いバックグラウンド除去効率を示すのに対し、大きなカットポイントを選択すると急激にバックグラウンド効率が減少することがわかる。

4.5.3 信号選択効率

液体シンチレータ内の一様な場所から 1MeV、5MeV の α 粒子を発生させるシミュレーションを行った。信号選択効率を次のように定義する。

$$\text{信号選択効率} = \frac{\text{カットポイント未満の } r \text{ に再構成されたイベント数}}{\text{発生イベント数}} \times 100$$

1MeV の α 粒子を一様な場所から 10000 回発生させた時の x 軸上での再構成位置を図 4.22 に示す。 y 軸、 z 軸上でも同様の分布が得られた。また、 r 分布を図 4.23 に示す。

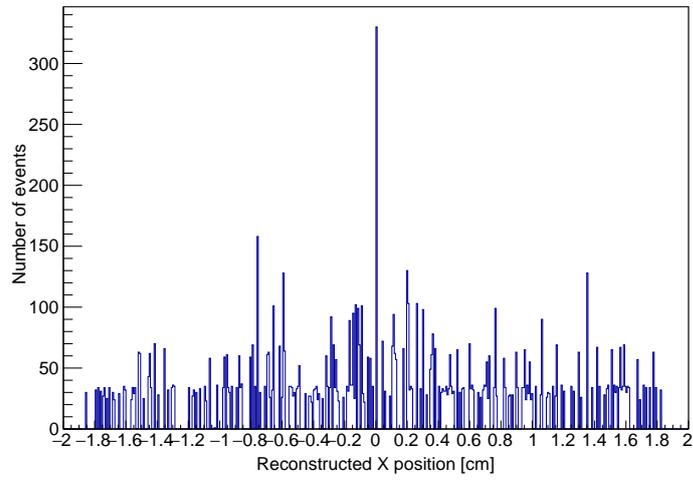


図 4.22: 検出器内の一様な位置から 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時の x 軸上の再構成位置

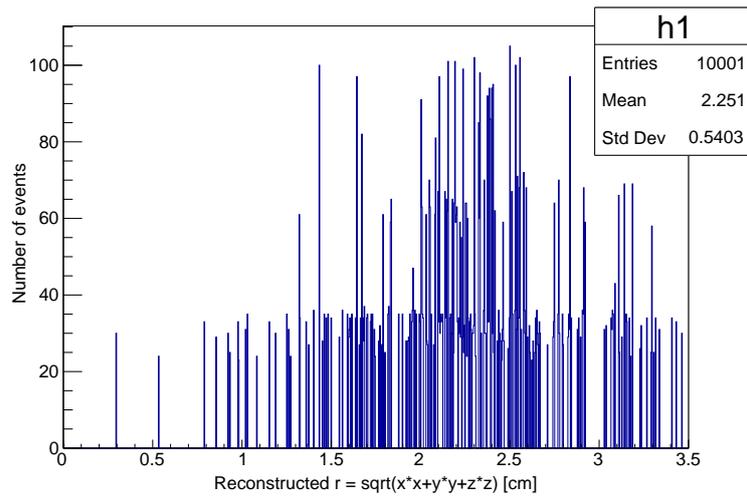


図 4.23: 検出器内の一様な位置から 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時の r 分布

$r = 1.0$ cm、 $r = 1.5$ cm、 $r = 2.0$ cm をカットポイントに設定した時の r 分布を図 4.24 から図 4.26 に示す。

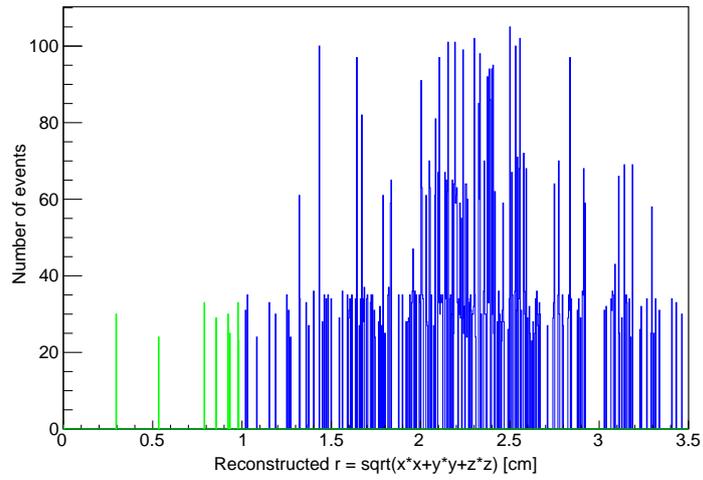


図 4.24: カットポイントを $r=1.0$ とした時の再構成された r 分布（検出器内一様な位置から 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時）

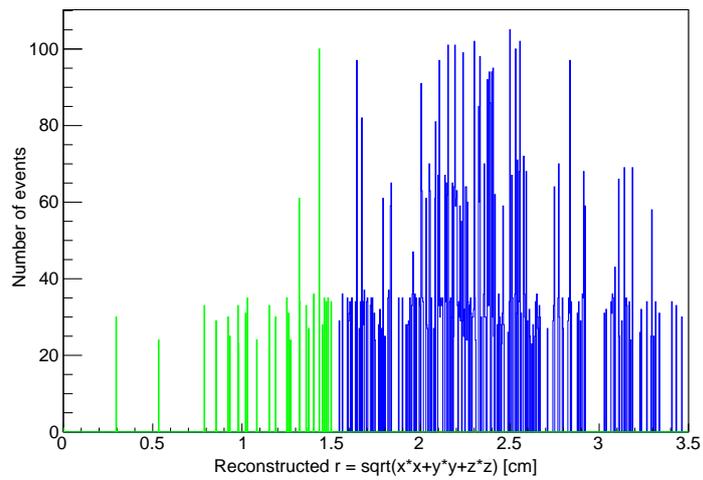


図 4.25: カットポイントを $r=1.5$ とした時の再構成された r 分布（検出器内一様な位置から 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時）

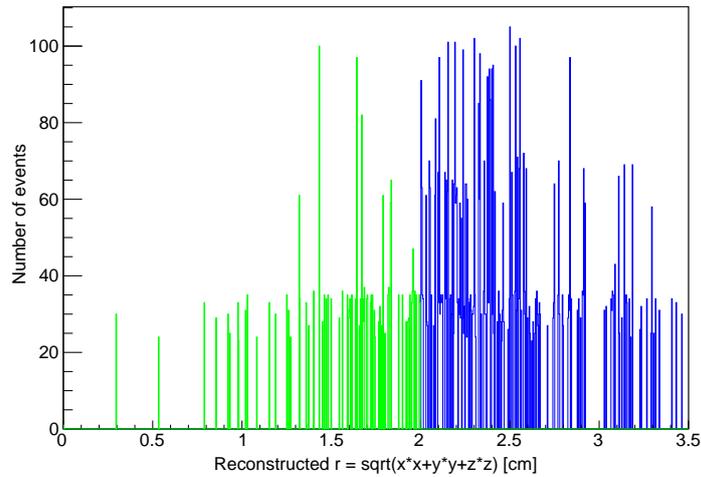


図 4.26: カットポイントを $r=2.0$ とした時の再構成された r 分布（検出器内一様な位置から 1MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時）

図 4.24 から図 4.26 の緑で示された部分が信号選択効率の定義式のカットポイント未満の r に再構成されたイベント数に対応する。1MeV の時の信号選択効率は、表 4.4 の通りである。

r のカットポイント (cm)	信号選択効率 (%)
1.0	2.3
1.5	9.3
2.0	25.7

表 4.4: 各カットポイントでの信号選択効率

同様のシミュレーションを 5MeV の α 粒子の場合にもおこなった。x 軸上での再構成位置と r 分布を図 4.27 と図 4.28 に示す。

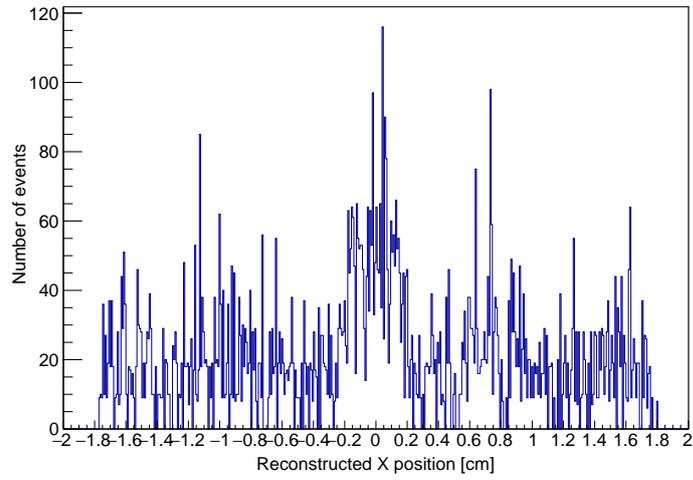


図 4.27: 検出器内の一様な位置から 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時の x 軸上の再構成位置

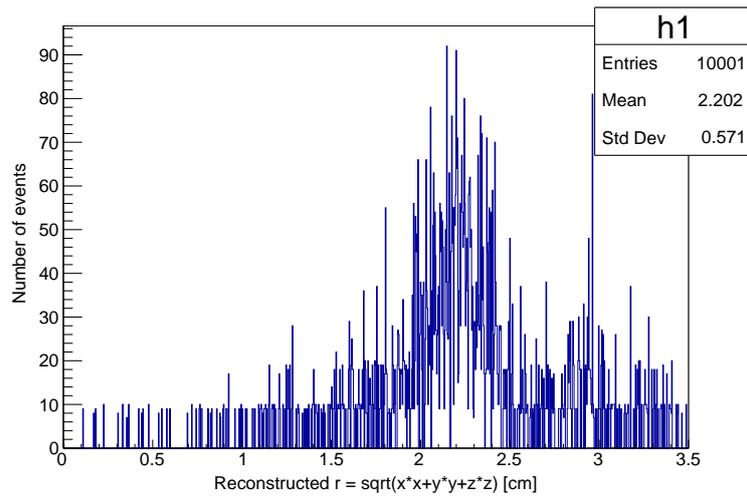


図 4.28: 検出器内の一様な位置から 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時の r 分布

$r = 1.0$ cm、 $r = 1.5$ cm、 $r = 2.0$ cm をカットポイントに設定した時の r 分布を図 4.29 から 4.31 に示す。

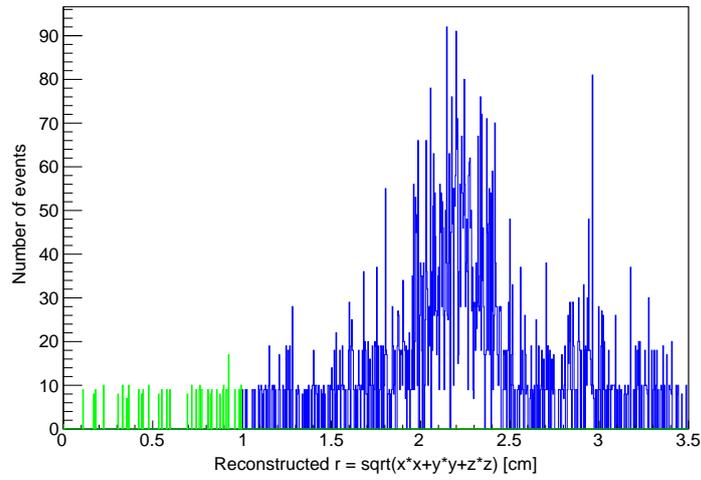


図 4.29: カットポイントを $r=1.0$ とした時の再構成された r 分布（検出器内一様な位置から 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時）

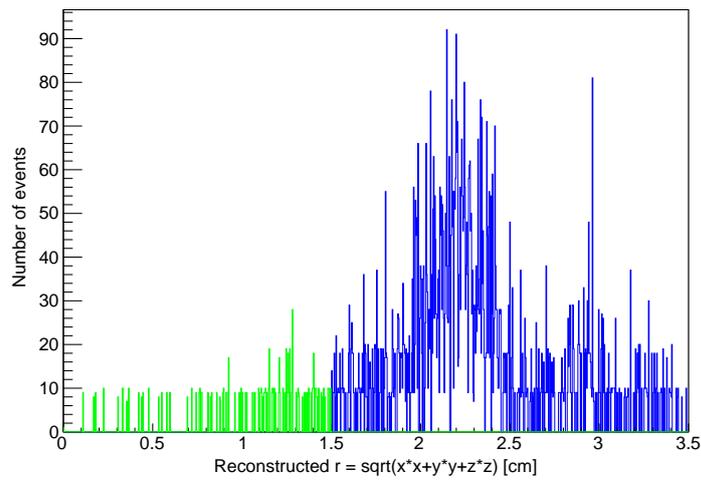


図 4.30: カットポイントを $r=1.5$ とした時の再構成された r 分布（検出器内一様な位置から 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時）

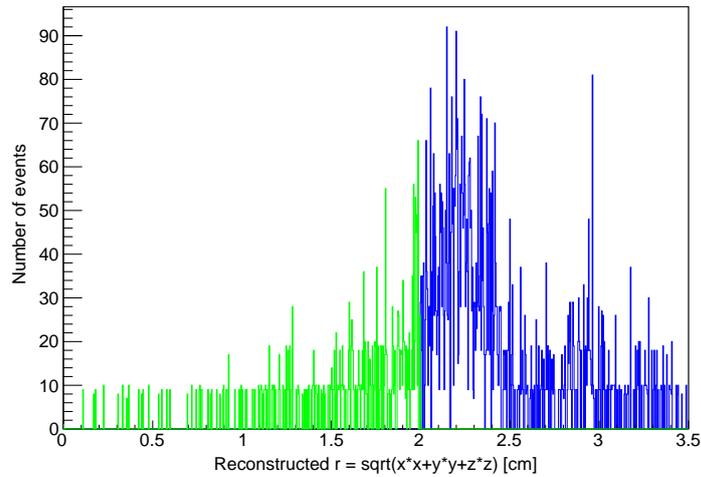


図 4.31: カットポイントを $r=2.0$ とした時の再構成された r 分布（検出器内一様な位置から 5MeV の α 粒子を 10000 回発生させた時）

5MeV の α 粒子を一様な位置から発生させた時の信号選択効率は、表 4.5 の通りである。

r のカットポイント (cm)	信号選択効率 (%)
1.0	3.5
1.5	9.6
2.0	27.8

表 4.5: 各カットポイントでの信号選択効率

エネルギーを変化させても信号選択効率にはほとんど影響しなかった。これは、再構成された r が球の半径 2.5 cm より大きいイベントが多数存在していることが影響していると考えられる。

第5章 結論

本研究では、球形液体シンチレータ中性子検出器の外周部で発生した α 線バックグラウンドを低減するため、球の6面に取り付けた光検出器で検出した光量の重心によってイベントの発生位置を再構成し、バックグラウンド除去効率と信号選択効率の性能評価を行った。

球の表面近傍(1.4 cm、1.4 cm、1.4 cm)から α 粒子を発生させた時、再構成された球中心からの距離 r の分布の幅が変化する。5 MeVの α 粒子を発生させた場合は、1 MeVの α 粒子を発生させた場合に比べ再構成された r 分布の広がり小さくなり、バックグラウンド除去効率はカットポイントの選択により大きな影響を受けた。 $r=1.0$ cmをカットポイントとした場合には、1 MeVの場合は99.3%、5 MeVの場合は100%という高いバックグラウンド除去効率を示した。 $r=1.5$ cmをカットポイントとした場合は、1 MeVの場合は81.5%、5 MeVの場合は94.6%というバックグラウンド除去効率を得た。またカットポイントを $r=2.0$ cmとした時には、1 MeV、5 MeVともにバックグラウンド除去効率が50%を下回り、カットポイントとして適さないことがわかった。

次に球の内部から一様に α 粒子を発生させて、球の中心からの距離 r によって、信号選択効率を計算した。まず $r=1.0$ cmをカットポイントとした時は、1 MeVの場合は、2.3%、5 MeVの場合は3.5%という信号選択効率を得た。次に $r=1.5$ cmをカットポイントとした時には、1 MeVの場合は、9.3%、5 MeVの場合は9.6%という信号効率を得た。最後に $r=2.0$ cmをカットポイントとした時は、1 MeVの場合は、25.7%、5 MeVの場合は、27.8%という信号選択効率を得た。

上記の結果からカット前後のS/N比を計算すると、1 MeVの場合、 $r=1.0$ cm、 $r=1.5$ cm、 $r=2.0$ cmをそれぞれカットポイントとした場合は、カット前に比べて3.3倍、0.5倍、0.34倍となった。5 MeVの場合、 $r=1.0$ cm、 $r=1.5$ cm、 $r=2.0$ cmをそれぞれカットポイントとした場合は、S/N比はカット前に比べて35倍、1.8倍、0.28倍となった。1 MeVの場合は、統計数とS/N比から $r<1.5$ cmの範囲内に最適なカットポイントが存在し、5 MeVの場合は $r<2.0$ cmの範囲内に最適なカットポイントが存在する。今後は、 r を細かくスキャンし、最適な r を求めたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、非常に多くの方々にご協力とご指導をしていただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

まず、担当教員である南野彰宏教授にはたくさんの研究に関する助言をいただきました。特に、卒業論文提出直前期の時間のない中にも関わらず、自分の理解の不十分な箇所を一つ一つ順を追って丁寧に教えていただきました。夏には、アメリカの高校生のジョジョくんと同期の伊藤くんと一緒にミュオンの測定実験の機会を与えていただき、素粒子実験に関する貴重な経験をさせていただきました。また、研究だけでなく、復学あけということもあり、事務手続きをはじめとした大学生活を送る上で困った場面に遭遇した時でも、適切な助言をいただき、円滑に1年を過ごすことができました。改めて感謝申し上げます。

東北大学的那須讓治准教授には、復学のタイミングでの研究室変更の際に面談の場を設けていただきました。感謝申し上げます。

また、研究室の同室のメンバーや、同期の方々にも感謝申し上げます。2年間の休学に加えて、元々所属していた研究室から所属が変わった影響で不安の多い年度はじめてでした。しかしながら、新入生向けのオリエンテーションで初めてお会いした同期や先輩方は全員優しく接してくださいました。実際に大学内でお話しするだけでなく、チャットツール上でもさまざまなお話をさせていただきました。M2の鈴木さんには、本研究で使用したGeant4に関する資料などを教えていただけだけでなく、漫画やアニメの話で楽しませていただきました。同期の近藤くんには、ゼミや研究に関してたくさんの質問をしていただき、自分の研究の理解を深めることができました。また、物事を学ぶ姿勢に多大な刺激をいただきました。同期の伊藤くん、島村さんとはたくさん会話させていただきました。趣味の話や好きなことの話聞くことで自分の知見を広げるきっかけになりました。特に今年は、ゼミナールの発表者があみだくじの結果決定する運用になっていて、自分含めこの3人が集中的に発表者に選ばれたため、ゼミナールの相談にたくさん乗っていただきました。研究室で同室だった天内さん、守山さんには、普段の他愛ない雑談だけでなく、金曜日の夜にご飯に行ったり、休日に遊びに行ったりといったたくさんの楽しい機会をつくっていただきました。感謝申し上げます。

改めてご協力いただいたすべての方々には深く御礼を申し上げます。研究を通して得た知見や経験をこれからの生活に活かしていきたいと思っております。

参考文献

- [1] 日本アイソトープ協会 『日本アイソトープ手帳』 第 10 版 (丸善出版,2001)
- [2] Radiation Detection and Measurement, 4th Edition(John Wiley & Sons, Inc.,2010)
- [3] Saint-Gobain, ” BC-501, BC-501A, BC-519 Liquid Scintillators ” , Data sheet.
- [4] Geant4 公式ページ
<https://geant4.web.cern.ch>