

2020 年度卒業論文
Geant4 シミュレーションによるプリシャワー検出
器の検討

奈良女子大学理学部
物理学コース
高エネルギー加速器研究室
今野つかさ

2020 年 5 月 7 日

概要

素粒子・原子核実験では、電磁カロリメータによって電子や γ 線のエネルギー測定を行う。Belle II 実験の電磁カロリメータはヨウ化セシウム (CsI) にタリウムをドーブした CsI(Tl) 結晶シンチレータと PIN フォトダイオードを用いた検出器を 8736 本配置している。 γ 線が検出器内で起こしたエネルギー損失は高精度で測定することができるが、その γ 線の到来方向に対する感度は高くない。バックグラウンド γ 線を低減するためには電磁カロリメータとして使われる CsI シンチレータの前にプリシャワー検出器と呼ぶ新しい検出器を導入し、これに γ 線の到来方向を測る機能を持たせることが考えられる。本研究では、BGO シンチレータとシリコン検出器からなるプリシャワー検出器のモデルについて Geant4 によるシミュレーションを行い、プリシャワー検出器中のエネルギー損失分布を調べて、機能や性能に対する原理的な制約を検討した。

目次

第1章 序論	4
1.1 SuperKEKB 加速器	4
1.2 Belle II 検出器	4
1.3 電磁カロリメータ	5
1.3.1 CsI(Tl) シンチレータ	5
1.3.2 光検出器 (PIN-PD)	5
1.4 プリシャワー検出器の動機	6
1.5 電磁シャワーの形成による γ 線の検出	6
第2章 Geant4 によるシミュレーション	7
2.1 Geant4 ソフトウェア	7
2.2 環境	7
2.3 シミュレーション設定	7
2.3.1 装置ジオメトリ	9
2.3.2 シミュレーション結果	9
第3章 まとめ	16
付録	17

目次

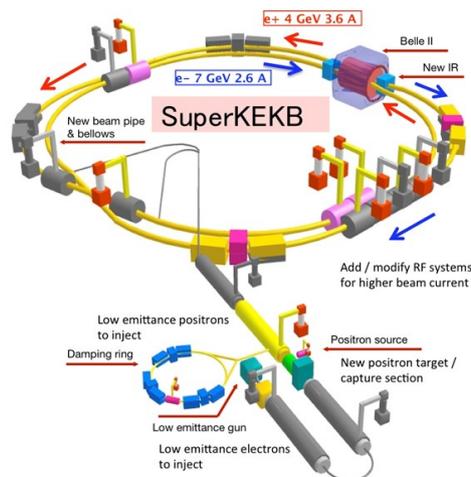
1.1	SuperKEKB 加速器の概観図	4
1.2	Belle I 加速器概観	5
2.1	検出器の材質や寸法 (ジオメトリ) を設定する <code>B4DetectorConstruct.cc</code> の抜粋。枠線はサンプルプログラム <code>B4a</code> のオリジナルから変更した点を示し、11.2 mm は BGO シンチレータ、0.3 mm は Si 検出器の厚みである。5.5 cm は縦と横の長さである。また、 <code>G4.BGO</code> や <code>G4.Si</code> は、それぞれ <code>Geant4</code> に付属するマテリアルデータベース中から BGO シンチレータ、Si を用いることを示している。	8
2.2	作成したプリシャワー検出器 (2 層) の装置ジオメトリ	8
2.3	3 層のプリシャワー検出器に 200 MeV の γ 線が入射した事情の例。緑線は γ 線、赤は相互作用を起こした点、黄色線は電子・陽電子の飛跡の動きを表す	9
2.4	図 2.3 と同一事情を横から見たもの。	9
2.5	50 MeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合	10
2.6	100 MeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合	11
2.7	200 MeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合	11
2.8	500 MeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合	11
2.9	1 GeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合	12
2.10	50 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	13
2.11	100 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	14
2.12	200 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	14
2.13	500 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	14
2.14	1 GeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	15
1	粒子を入射するための条件を記載したマクロファイル	24
2	50 MeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	25
3	100 MeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	25

4	200 MeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	26
5	500 MeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	26
6	1 GeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	26
7	50 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	27
8	100 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	27
9	200 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	27
10	500 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	28
11	1 GeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。	28
12	3 層、1 GeV の Eabs と Labs の関係。横軸を Labs(単位は mm)、縦軸は Eabs(単位は MeV) である。	29
13	3 層、1 GeV の E _{gap} と L _{gap} の関係。横軸を L _{gap} (単位は mm)、縦軸は E _{gap} (単位は MeV) である。	30

第1章 序論

1.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は 7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させ、B 中間子・反 B 中間子対を生成する非対称エネルギー衝突型円形加速器である。図 1.1 に外観を示す。電子は入射器最上流の RF 電子銃で作られた後、直線型加速器で加速され、HER (High Energy Ring) に入射されて図中の右回りに周回する。陽電子は、3.5 GeV まで加速された電子を金属標的に当てて作り出し、ダンピングリングでビームのエミッタンスを下げた後、LER (Low Energy Ring) に入射されて図中の左回りに周回する。各々のリングで加速された電子・陽電子は、Belle II 検出器が置かれた衝突点で交差する

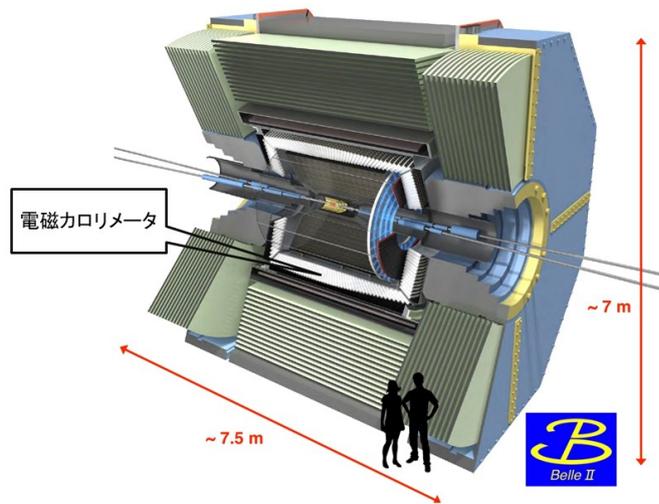


80

図 1.1: SuperKEKB 加速器の概観図

1.2 Belle II 検出器

SuperKEKB 加速器の衝突点に設置し、Belle II 検出器は異なる役割を持った 7 つの検出器で構成され、図 1.2 に示す部分、すなわち飛跡検出器と粒子識別検出器の外側で超電導ソレノイドのすぐ内側に γ 線を測定する電磁カロリメータ (Electromagnetic Calorimeter, ECL) が設置されている。以下、この電磁カロリメータについてももう少し詳しく述べる。



81

図 1.2: Belle I 加速器概観

1.3 電磁カロリメータ

Belle II 実験の電磁カロリメータは、光子と電子のエネルギー測定を行うとともに、トリガー情報の生成も行う。CsI(Tl) シンチレータと光検出器 (PIN フォトダイオード) を組み合わせたカウンターを 8736 本用いている。CsI(Tl) 結晶は長さ約 30 cm、前面が約 5.5 cm×5.5 cm の大きさである。シンチレータに入射した光子や電磁が電磁シャワーを作り、生じたエネルギー損失がシンチレーション光に変換され、PIN フォトダイオードで読み出すことにより、全エネルギーを測定する。

1.3.1 CsI(Tl) シンチレータ

シンチレータとは、粒子が入射してエネルギー損失を起こしたときに光を発する物質である。シンチレータは無機物質の結晶と有機物質に分けることができ、Belle II では無機物質である CsI 結晶に発光物質としてタリウムをドーピングした CsI(Tl) 結晶を採用している。CsI(Tl) は密度 4.53 g/cm³、発光減衰時間約 1000 ns、発光量は約 50000 光子/MeV である。無機シンチレータは有機シンチレータに比べ、原子番号の大きな元素を含み、密度も高いものが多いため、 γ 線を高検出率かつ高エネルギー分解能で検出できる。

1.3.2 光検出器 (PIN-PD)

CsI(Tl) シンチレータで発生したシンチレーション光を読み出す検出器であり、PN 接合した半導体であるダイオードに逆方向に電圧を付加して空乏化すると、そこに光が当たって電子・空孔対をつくった時に電気信号となる。光検出器としては PIN 接合といって p 型半導体と n 型半導体の

間に真性半導体のI層を挟んだ構造にすると、電場はほとんどI層にかかって、p層とn層にかかる電場が少なくなる結果、電極からのキャリア流入を抑えて暗電流を減らすことができる。また、両端にかける電圧を大きくなくても、空乏層を十分に大きくして量子効率を上げることができる。Belle IIの電磁カロリメータではCsI (TI) シンチレータ一個に1 cm×2 cmのPIN-PD2個を取り付けた構成にしている。集光効率は約10%であり、5000電子・正孔対/MeVの信号電荷を得る。

1.4 プリシャワー検出器の動機

Belle II実験の電磁カロリメータが検出する γ 線は衝突事象で発生したものだけでなく、ビームバックグラウンド起源のものもあり、そこで、電磁カロリメータの前にプリシャワー検出器と呼ぶ検出器を入れ、それに γ 線の到来方向に感度を持たせることが可能か検討することにした。

1.5 電磁シャワーの形成による γ 線の検出

γ 線が物質に入射したときに起こす相互作用はエネルギーの高さによって、光電効果、コンプトン散乱、電子・陽電子対生成と主な過程が変わる。Belle II実験のような電子・陽電子コライダーでは数十MeV以上の高エネルギーの γ 線が検出すべき対象であるため、物質中で最初に起こす相互作用は電子・陽電子対生成が支配的である。

電子・陽電子対生成とは電子質量の2倍である $0.511\text{ MeV}\times 2=1.022\text{ MeV}$ を越えるエネルギーを持つ γ 線が入射すると、物質の原子核近くで電子・陽電子を生成する反応のことである。数十MeV以上の γ 線が生成するの電子・陽電子は、物質中でクーロン場によって減速したエネルギーを γ 線として放出する制動放射を高い確率で起こすに十分な程度にエネルギーが高い。

制動放射を起こす確率は粒子の質量の二乗に反比例するため、主として軽い荷電粒子である電子や陽電子が起こす。多くの物質中でエネルギーが10 MeVを上回ると、電離や励起による電離損失よりも制動放射の方が大きくなる。また、制動放射で生じた γ 線が十分なエネルギーを持っていれば、さらに電子・陽電子対生成を起こす。

こうして、電子・陽電子対生成と制動放射の連鎖反応により、電子・陽電子・ γ 線の集団が形成される。これを電磁シャワーの形成と呼ぶ。電磁シャワーが形成されたとき、シンチレータでは、電子及び陽電子の電離損失をシンチレーション校に変換して読み出すことにより、エネルギー測定を行う。

第2章 Geant4によるシミュレーション

2.1 Geant4ソフトウェア

Geant4とはCERNを中心に高エネルギー物理学、天文学、医学の分野で利用できるように国際共同研究で開発された。粒子が物質中を通過するときに生じる相互作用や過程をシミュレーションするソフトウェア・パッケージである。Geant4はC++という言語で役割に応じて様々なクラスとして書かれており、C++クラスをまとめたパッケージのことをツールキットと呼ぶ。ユーザは各々の目的に応じて、ツールキットを使ってアプリケーション・プログラムを作り、シミュレーションを実行する。

2.2 環境

Geant4を動かすにあたり、WindowsのPCにVirtualBoxソフトウェアにより仮想環境を実行可能にして、その中でシミュレーションと解析を行った。OSはLinuxのCentOS8.1(x86_64)ディストリビューション上で、Geant4のバージョンは10.5.P1を使用した。また、CentOS7(x86_64)が稼働するPCサーバーにGeant4バージョン10.6をインストールしたものを併用した。

2.3 シミュレーション設定

Geant4のバージョン10.5または10.6は例題プログラムを含み、その中のサンプリングカロリメータの例題であるexampleB4a(以下B4a)を改変して使用した。今回検討するプリシャワー検出器はBGOシンチレータとシリコン検出器を交互に配置したサンドイッチ型のものである。オリジナルのB4aは鉛アブソーバーと液体アルゴンで構成されているところ、これらをBGOシンチレータとシリコン検出器に置換するため、図2.1のようにB4DetectorConstruction.ccの一部を書き換えた。1層のユニットの縦と横の長さを5.5cmとしたのは、前述した電磁カロリメータのCsI(Tl)カウンタのサイズにそろえるためである。BGOの厚みは11.2mmとし、 $1 X_0$ (放射長)に相当するようにした。ここで放射長とは、高エネルギー電子が入射して、制動放射によりエネルギーが初期の $1/e$ に減少するまでに通過する平均距離と定義されており、入射する物質によって異なる。また、シリコン検出器部分は一般的な厚みである0.3mmとした。

```

// Define Volumes.
G4VPhysicalVolume* B4DetectorConstruction::DefineVolumes()
{
  // Geometry parameters
  G4int nofLayers = 2; // Presampler.
  G4double absoThickness = 11.2*mm; // BGO 1X0.
  G4double gapThickness = 0.3*mm; // Si thickness.
  //G4double gapThickness = 10.*mm; // Si thickness.
  G4double calorSizeXY = 5.5*cm; // Same cross section as Belle Csl.

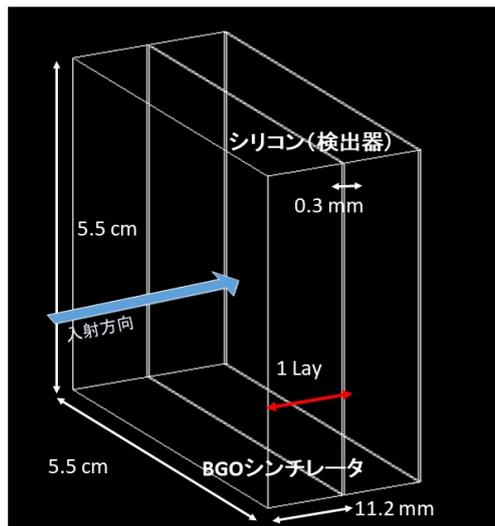
  auto layerThickness = absoThickness + gapThickness;
  auto calorThickness = nofLayers * layerThickness;
  auto worldSizeXY = 1.2 * calorSizeXY;
  auto worldSizeZ = 1.2 * calorThickness;

  // Get materials, should be consistent with DefineMaterials().
  auto defaultMaterial = G4Material::GetMaterial("G4_AIR");
  auto absorberMaterial = G4Material::GetMaterial("G4_BGO");
  auto gapMaterial = G4Material::GetMaterial("G4_Si");
  // Get materials (original example).
  // auto defaultMaterial = G4Material::GetMaterial("Galactic");
  // auto absorberMaterial = G4Material::GetMaterial("G4_Pb");
  // auto gapMaterial = G4Material::GetMaterial("liquidArgon");

```

87

図 2.1: 検出器の材質や寸法（ジオメトリ）を設定する B4DetectorConstruct.cc の抜粋。枠線はサンプルプログラム B4a のオリジナルから変更した点を示し、11.2 mm は BGO シンチレータ、0.3 mm は Si 検出器の厚みである。5.5 cm は縦と横の長さである。また、G4_BGO や G4_Si は、それぞれ Geant4 に付属するマテリアルデータベース中から BGO シンチレータ、Si を用いることを示している。



78

図 2.2: 作成したプリシャワー検出器（2層）の装置ジオメトリ

2.3.1 装置ジオメトリ

図 2.2 にプリシャワー検出器のジオメトリを示す。2層のものと3層の場合について、 γ 線の入射時のエネルギー損失を調べた。例として、3層のものに 200 MeV の γ 線が入射したイベントの例を図 2.3 (鳥瞰図) と図 2.4 (側面から見た図) に示す。

BGO シンチレータ

ゲルマニウム酸ビスマスは BGO と呼ばれ、酸化物無機結晶シンチレータの一種である。BGO シンチレータは粒子の入射によりエネルギー損失が生じると、ピーク波長 480 nm の緑色蛍光を発生する。密度 7.13 g/cm^3 、放射長 1.12 cm で、NaI(Tl) 比 21 % の発光量があり、発光の減衰時間は 300 ns である。既述した通り縦 5.5 cm、横 5.5 cm、幅 11.2 mm の直方体が 1 層の単位である。

Si 検出器

シャワー中の電子・陽電子の通過位置検出はシリコン検出器で行う想定で、縦 5.5 cm、横 5.5 cm、幅 0.3 mm のケイ素 (Si) の層を BGO シンチレータの後ろ側に貼り付けるように配置した。密度は 2.33 g/cm^3 である。

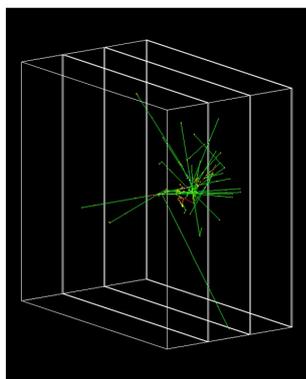


図 2.3: 3層のプリシャワー検出器に 200 MeV の γ 線が入射した事情の例。緑線は γ 線、赤は相互作用を起こした点、黄色線は電子・陽電子の飛跡の動きを表す

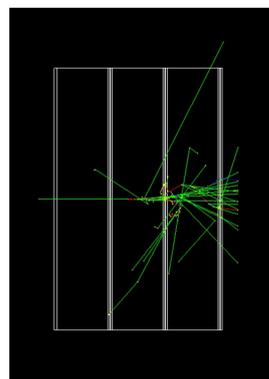


図 2.4: 図 2.3 と同一事情を横から見たもの。

2.3.2 シミュレーション結果

2層または3層のプリシャワー検出器に γ 線を入射して電磁シャワーを起こしたイベントについて、エネルギー損失の和 E (単位は MeV) と飛跡長の和 L (単位は mm) を、BGO シンチレータと Si 検出器に分けて Ntuple に出力した。以下、BGO シンチレータで起きたエネルギー損失の和を E_{abs} 、飛跡長の和を L_{abs} 、Si 検出器で起きたエネルギー損失の和を E_{gap} 、飛跡長の和を L_{gap} と呼ぶ。これらを計算するには、電磁シャワー中で、エネルギー損失は厳密には電子・陽電子が

起こすため、Geant4 シミュレーションでは粒子をステップ毎に進めてエネルギー損失を計算するところ、粒子の電荷がゼロでない場合に限ってそのステップのエネルギー損失と通過長を積算する。入射した γ 線のエネルギーが 50 MeV、100 MeV、200 MeV、500 MeV、1 GeV の場合についてそれぞれ 10000 イベントずつ行った。

プリシャワー検出器のエネルギー損失である、 E_{abs} 分布を、2 層と 3 層の場合について、入射 γ 線のエネルギーごとに、図 2.5 から図 2.9 に示す。

図 2.5 に示す 50 MeV、2 層では、0 MeV、つまりシャワーを起こすことなく検出器を通過したイベントが約 35 % に及ぶ。3 層に厚みを増すとシャワーを起こすことなく通過したイベントが約 25% になる。一方、 E_{abs} 分布の上端は 50 MeV に達しており、入射 γ 線のエネルギーをすべて吸収しているイベントも存在する。これはプリシャワー検出器内で電磁シャワーを形成する反応が終了し、電磁カロリメータに届いていないイベントが存在することを示している。

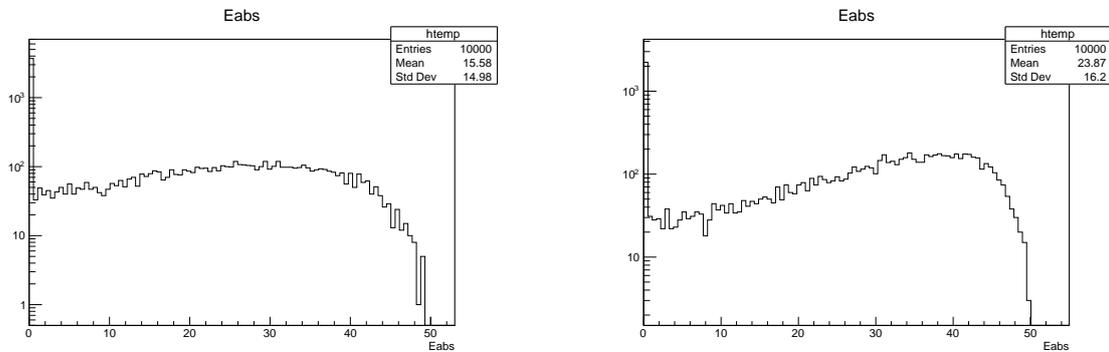


図 2.5: 50 MeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合

入射 γ 線のエネルギーが高くなると、 $E_{\text{abs}} = 0$ のイベントの割合はやや小さくなるが、1 GeV の γ 線が入射した場合に 3 層の構造でも約 11 % がある。また、高エネルギーの γ 線では、プリシャワー検出器で全吸収されるイベントはなくなり、200 MeV の γ 線が 3 層構造に入射した場合に E_{abs} 分布の上端が 170 MeV、1 GeV の γ 線では 500 MeV である。典型的なエネルギー損失の大きさは入射 γ 線のエネルギーに対して、2 層のとき約 5%~約 30%、3 層のときは約 13%~約 50% である。これは、プリシャワー検出器で、検出するエネルギーが入射 γ 線の相当な割合、特に低エネルギー γ 線では、全部になる場合もあることを示しており、BGO 部分でのエネルギー分解能を高いものにする工夫の必要性を示唆している。

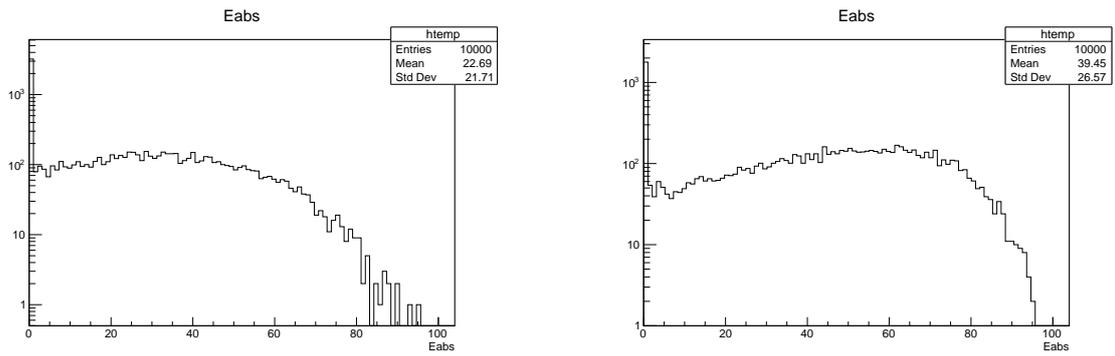


図 2.6: 100 MeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2層の場合、(右) 3層の場合

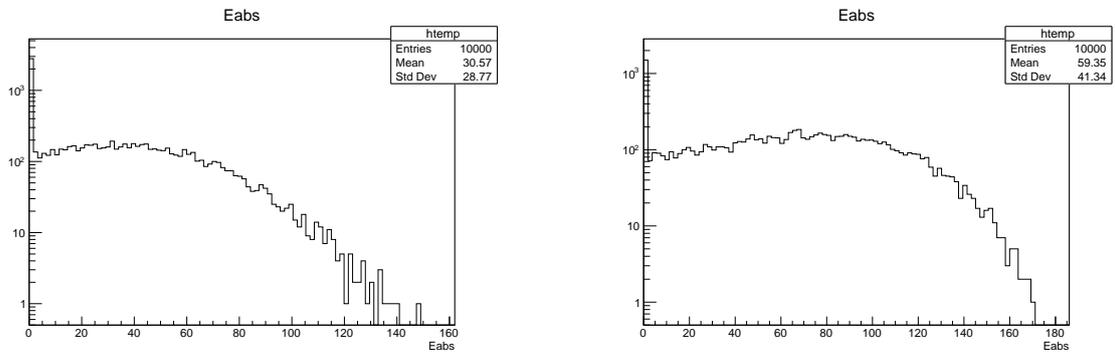


図 2.7: 200 MeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2層の場合、(右) 3層の場合

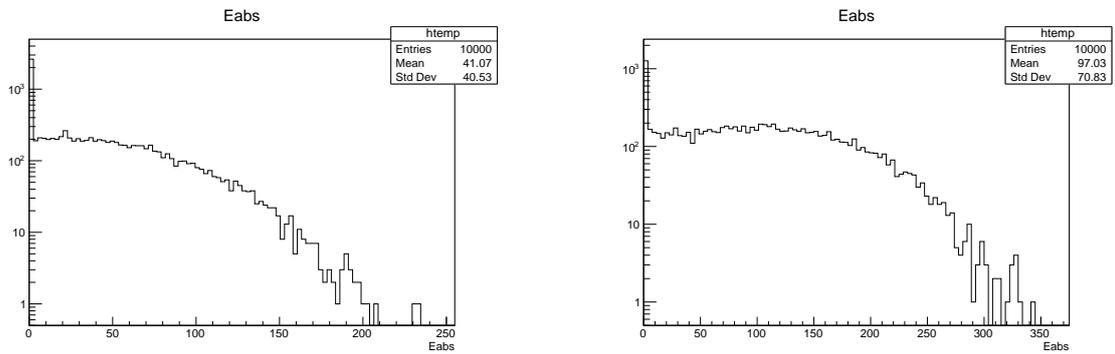


図 2.8: 500 MeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2層の場合、(右) 3層の場合

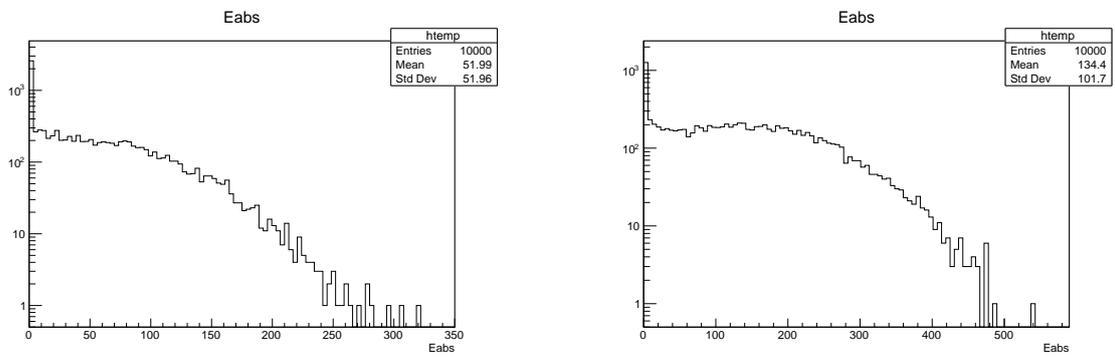


図 2.9: 1 GeV γ 線入射、BGO でのエネルギー損失の和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合

続いて、 γ 線の到来方向を求めるには、生成したシャワー中の電子または陽電子の通過位置を Si 検出器で測定する必要がある。そこで Si 検出器でのエネルギー損失和の分布をもとに電子または陽電子を検出する感度について考察した。素電荷を持つ荷電粒子が最小電離損失 (Minimum Ionizing Particle : MIP) となる運動量を持つとき、Si を通過する場合のエネルギー損失は $1.6 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$ である。したがって固体 Si の密度 2.33 g/cm^3 と今回の設定での厚さ 0.03 cm より、電子または陽電子 1 個が Si 検出器を通過するときのエネルギー損失の期待値は約 0.1 MeV である。

図 2.10 に 50 MeV の γ 線が中央に垂直に入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和 (E_{gap}) の分布を 2 層の場合と 3 層の場合について示す。平均値は 2 層と 3 層の場合でそれぞれ 0.18 MeV と 0.25 MeV であることから、Si 検出器で検出される電子または陽電子の数は平均 2~3 個である。このうち、対で生成した電子と陽電子が同じ層の Si 検出器に信号を生成し、他の層の Si 検出器では電子または陽電子の通過による信号が見出されない事象については γ 線の到来方向の決定は困難と考えられる。

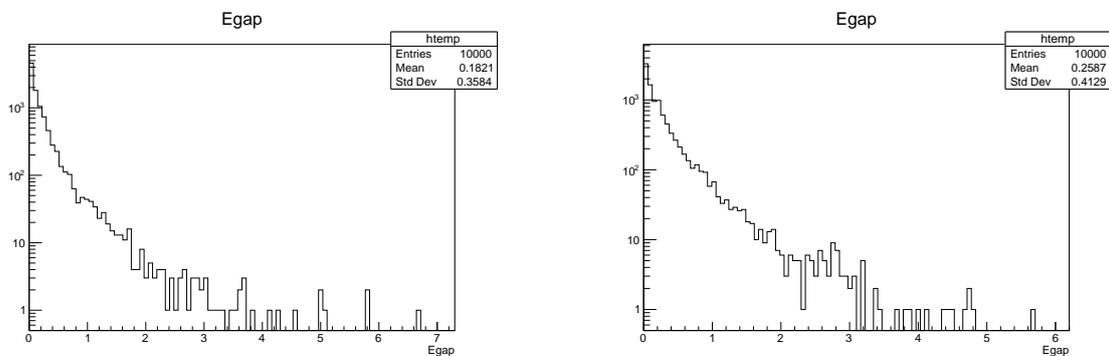


図 2.10: 50 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

Si 検出器を通過する電子・陽電子の数は、図 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 に示すように、入射する γ 線のエネルギーが高くなると増加し、 200 MeV の γ 線に対して 3 層の場合に平均 7 個、 1 GeV の γ 線に対して 3 層の場合に平均 17 個となる。これらの場合については、Si 検出器 1 層あたり数個の電子または陽電子が通過し、複数の層の Si 検出器に信号を見出す事象の割合が大半を占めると考えられる。したがって、これら Si 検出器で得た信号から、シャワーの方向、すなわち γ 線の到来方向を再構成するアルゴリズムの開発に着手する意義があると考えられる。

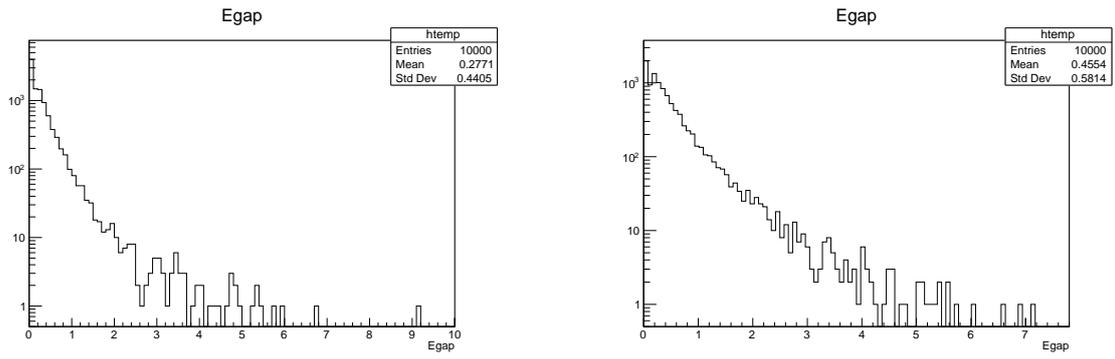


図 2.11: 100 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

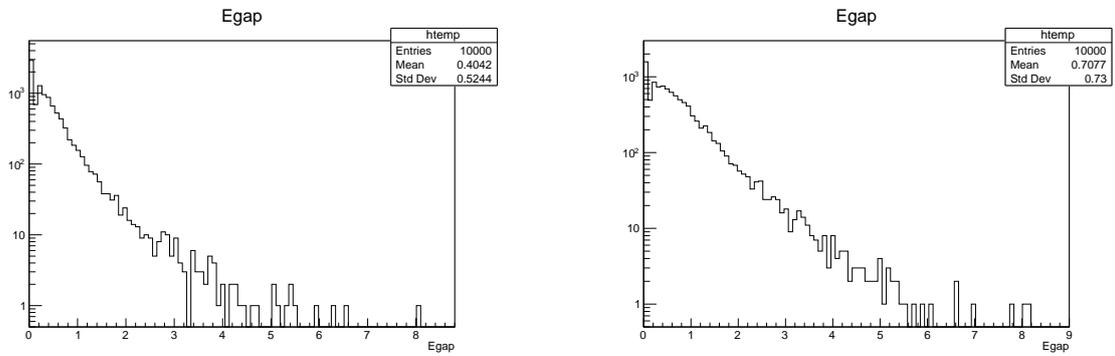


図 2.12: 200 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

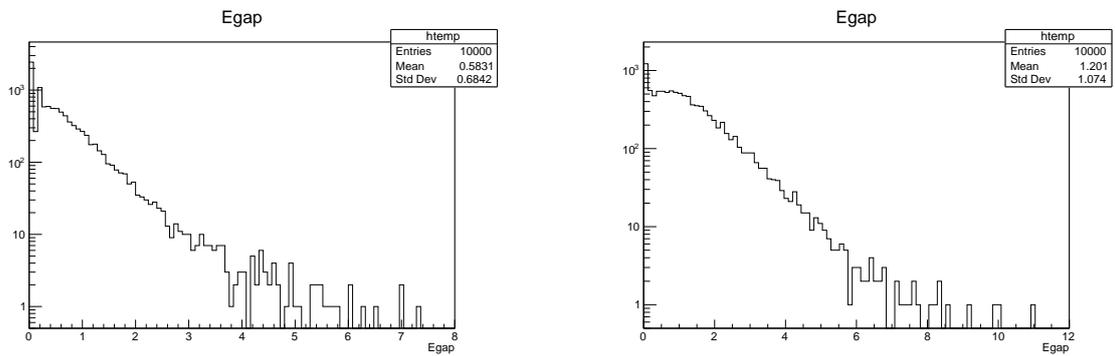


図 2.13: 500 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

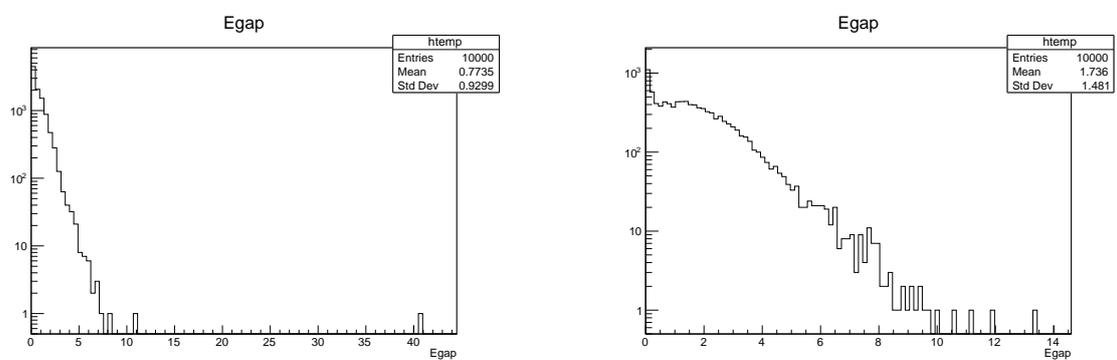


図 2.14: 1 GeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器におけるエネルギー損失和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

第3章 まとめ

Belle II 実験において、衝突事象で発生した γ 線だけを検出するために、電磁カロリメータの前にプリシャワー検出器を導入するためのシミュレーションに着手した。その結果、BGO シンチレータ内では、50 MeV、2 層では約 35%、1 GeV、3 層では約 11% のイベントがシャワーを起こすことなく検出器を通過したことがわかった。逆にエネルギーの低いとプリシャワー検出器内で反応が終わるイベントも存在したことがわかった。また、Si 検出器内では、50 MeV で 2~3 個、1 GeV で 15~20 個程度の電子または陽電子が通過し、検出することができた。これらより、 γ 線の到来方向を再構成するアルゴリズムが必要であることが言える。

謝辞

本研究にあたり、終始ご指導いただいた指導教官の宮林謙吉教授に心より感謝申し上げます。Geant4 の環境設定から使い方に至るまで、サポートしてくださり、また、グラフの見方やデータの取り方等間違った見方考え方をしたときに正しく導いてくださいました。また、ミーティングの時などに意見をいただいた林井久樹教授、下村真弥助教、蜂谷崇助教にも感謝申し上げます。短い期間で、Geant4・ROOT の使い方から、研究内容の深い理解、そして、実験を行うことができたのも本研究に携わってくださった方々のおかげです。感謝の意を持って謝辞にかえさせていただきます。

付録

プログラム

1. 装置ジオメトリを設定する `B4DetectorConstruct.cc`。Geant4 の例題プログラムである `exampleB4a` から改変したもの。

```

/// B4DetectorConstruction.cc
/// brief Implementation of the B4DetectorConstruction class
// KM modification starts 2020 Jan. 6th.
#include "B4DetectorConstruction.hh"

#include "G4Material.hh"
#include "G4NistManager.hh"

#include "G4Box.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "G4PVReplica.hh"
#include "G4GlobalMagFieldMessenger.hh"
#include "G4AutoDelete.hh"

#include "G4GeometryManager.hh"
#include "G4PhysicalVolumeStore.hh"
#include "G4LogicalVolumeStore.hh"
#include "G4SolidStore.hh"

#include "G4VisAttributes.hh"
#include "G4Colour.hh"

#include "G4PhysicalConstants.hh"
#include "G4SystemOfUnits.hh"

// Magnetic Field (check whether nullptr means 0)
G4ThreadLocal
G4GlobalMagFieldMessenger* B4DetectorConstruction::fMagFieldMessenger = nullptr;

// Constructor of B4DetectorConstruction.
B4DetectorConstruction::B4DetectorConstruction()
: G4VUserDetectorConstruction(),
  fAbsorberPV(nullptr),
  fGapPV(nullptr),
  fCheckOverlaps(true)
{
}

// Destructor.
B4DetectorConstruction::~B4DetectorConstruction()
{
}

// Construct() function returns G4PhysicalVolume*.
G4VPhysicalVolume* B4DetectorConstruction::Construct()
{
  // Define materials
  DefineMaterials();

  // Define volumes
  return DefineVolumes();
}

// Define materials.
void B4DetectorConstruction::DefineMaterials()
{

```

```

// NIST is GEANT4 Material Database. Instance() func. is static.
auto nistManager = G4NistManager::Instance();
// Air, BGO and Si defined using NIST Manager.
nistManager->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
nistManager->FindOrBuildMaterial("G4_BGO");
nistManager->FindOrBuildMaterial("G4_Si");
// Liquid argon material (original example).
// G4double a; // mass of a mole;
// G4double z; // z=mean number of protons;
// G4double density;
// new G4Material("liquidArgon", z=18., a=39.95*g/mole, density=1.390*g/cm3);
// The argon by NIST Manager is a gas with a different density

// Print materials
G4cout << *(G4Material::GetMaterialTable()) << G4endl;
}

// Define Volumes.
G4VPhysicalVolume* B4DetectorConstruction::DefineVolumes()
{
// Geometry parameters
G4int nofLayers = 3; // Presampler.
G4double absoThickness = 11.2*mm; // BGO 1X0.
G4double gapThickness = 0.3*mm; // Si thickness.
//G4double gapThickness = 10.*mm; // Si thickness.
G4double calorSizeXY = 5.5*cm; // Same cross section as Belle CsI.

auto layerThickness = absoThickness + gapThickness;
auto calorThickness = nofLayers * layerThickness;
auto worldSizeXY = 1.2 * calorSizeXY;
auto worldSizeZ = 1.2 * calorThickness;

// Get materials, should be consistent with DefineMaterials().
auto defaultMaterial = G4Material::GetMaterial("G4_AIR");
auto absorberMaterial = G4Material::GetMaterial("G4_BGO");
auto gapMaterial = G4Material::GetMaterial("G4_Si");
// Get materials (original example).
// auto defaultMaterial = G4Material::GetMaterial("Galactic");
// auto absorberMaterial = G4Material::GetMaterial("G4_Pb");
// auto gapMaterial = G4Material::GetMaterial("liquidArgon");

// When one of material definitions fails, should exit with a message.
if ( ! defaultMaterial || ! absorberMaterial || ! gapMaterial ) {
G4ExceptionDescription msg;
msg << "Cannot retrieve materials already defined.";
G4Exception("B4DetectorConstruction::DefineVolumes()",
"MyCode0001", FatalException, msg);
}

//-----
// World
//-----
auto worldS
= new G4Box("World", // its name
worldSizeXY/2, worldSizeXY/2, worldSizeZ/2); // its size

auto worldLV
= new G4LogicalVolume(

```

```

        worldS,          // its solid
        defaultMaterial, // its material
        "World");      // its name

auto worldPV
= new G4PVPlacement(
    0,          // no rotation
    G4ThreeVector(), // at (0,0,0)
    worldLV,   // its logical volume
    "World",   // its name
    0,         // its mother volume
    false,    // no boolean operation
    0,        // copy number
    fCheckOverlaps); // checking overlaps

//-----
// Calorimeter
//-----
auto calorimeterS
= new G4Box("Calorimeter", // its name
           calorSizeXY/2, calorSizeXY/2, calorThickness/2); // its size

auto calorLV
= new G4LogicalVolume(
    calorimeterS, // its solid
    defaultMaterial, // its material
    "Calorimeter"); // its name

new G4PVPlacement(
    0,          // no rotation
    G4ThreeVector(), // at (0,0,0)
    calorLV,   // its logical volume
    "Calorimeter", // its name
    worldLV,   // its mother volume
    false,    // no boolean operation
    0,        // copy number
    fCheckOverlaps); // checking overlaps

//-----
// Layer
//-----
auto layerS
= new G4Box("Layer", // its name
           calorSizeXY/2, calorSizeXY/2, layerThickness/2); // its size

auto layerLV
= new G4LogicalVolume(
    layerS, // its solid
    defaultMaterial, // its material
    "Layer"); // its name

new G4PVReplica(
    "Layer", // its name
    layerLV, // its logical volume
    calorLV, // its mother
    kZAxis, // axis of replication
    nofLayers, // number of replica
    layerThickness); // width of replica

```

```

//-----
// Absorber
//-----
auto absorberS
    = new G4Box("Abso", // its name
               calorSizeXY/2, calorSizeXY/2, absoThickness/2); // its size

auto absorberLV
    = new G4LogicalVolume(
        absorberS, // its solid
        absorberMaterial, // its material
        "Abso"); // its name

fAbsorberPV
    = new G4PVPlacement(
        0, // no rotation
        G4ThreeVector(0., 0., -gapThickness/2), // its position
        absorberLV, // its logical volume

        "Abso", // its name
        layerLV, // its mother volume
        false, // no boolean operation
        0, // copy number
        fCheckOverlaps); // checking overlaps

//-----
// Gap
//-----
//-----
// Modify : 11 x 11 5x5mm2 Si pads for 5.5x5.5cm2 cross section.
//-----
// G4int ndivx = 11;
// G4int ndivy = 11;

auto gapS
    = new G4Box("Gap", calorSizeXY/2, calorSizeXY/2, gapThickness/2);

// auto gapS
//     = new G4Box("Gap", // its name
//                 calorSizeXY/ndivx/2, calorSizeXY/ndivy/2, gapThickness/2);
// // its size has been modified.

auto gapLV
    = new G4LogicalVolume(
        gapS, // its solid
        gapMaterial, // its material
        "Gap"); // its name

//KM for(G4int ix=0; ix<ndivx; ++ix){
//KM     for(G4int iy=0; iy<ndivy; ++iy){
//KM         fGapPV
//KM             = new G4PVPlacement(
//KM                 0, // no rotation
//KM                 G4ThreeVector(-calorSizeXY/2+(ix+0.5)*calorSizeXY/ndivx,
//KM                                     -calorSizeXY/2+(iy+0.5)*calorSizeXY/ndivy,

```

```

//KM          absoThickness/2), // its position
//KM          gapLV,           // its logical volume
//KM          "Gap",          // its name
//KM          layerLV,        // its mother volume
//KM          false,          // no boolean operation
//KM          ix*10+iy,        // copy number, should be incremented.
//KM          fCheckOverlaps); // checking overlaps
//KM      }
//KM  }
fGapPV
    = new G4PVPlacement(
        0, // no rotation
        G4ThreeVector(0., 0., absoThickness/2), // its position
        gapLV, // its logical volume
        "Gap", // its name
        layerLV, // its mother volume
        false, // no boolean operation
        0, // copy number, should be incremented.
        fCheckOverlaps); // checking overlaps

//
// print parameters
//
G4cout
  << G4endl
  << "-----" << G4endl
  << "----> The calorimeter is " << nofLayers << " layers of: [ "
  << absoThickness/mm << "mm of " << absorberMaterial->GetName()
  << " + "
  << gapThickness/mm << "mm of " << gapMaterial->GetName() << " ] " << G4endl
  << "-----" << G4endl;

//
// Visualization attributes
//
worldLV->SetVisAttributes (G4VisAttributes::GetInvisible());

auto simpleBoxVisAtt= new G4VisAttributes(G4Colour(1.0, 1.0, 1.0));
simpleBoxVisAtt->SetVisibility(true);
calorLV->SetVisAttributes(simpleBoxVisAtt);

//
// Always return the physical World
//
return worldPV;
}

// Magnetic field.
void B4DetectorConstruction::ConstructSDandField()
{
  // Create global magnetic field messenger.
  // Uniform magnetic field is then created automatically if
  // the field value is not zero.
  G4ThreeVector fieldValue;
  fMagFieldMessenger = new G4GlobalMagFieldMessenger(fieldValue);
  fMagFieldMessenger->SetVerboseLevel(1);

  // Register the field messenger for deleting
  G4AutoDelete::Register(fMagFieldMessenger);
}

```

}

2. 入射ビームのマクロファイル。

```
# Macro file for example B4
#
# To be run preferably in batch, without graphics:
# % exampleB4[a, b, c, d] run2.mac
#
#/run/numberOfWorkers 4
/run/initialize
#
# Default kinematics:
# electron 50 MeV in direction (0., 0., 1.)
/gun/particle gamma
/gun/energy 1000 MeV
#
# 1000 events
#
/run/printProgress 100
/run/beamOn 10000
```

86

図 1: 粒子を入射するための条件を記載したマクロファイル

飛跡長のデータ

1. L_{abs} (BGO シンチレータで測定した飛跡長)。図 2 から図 6 までを掲載している。

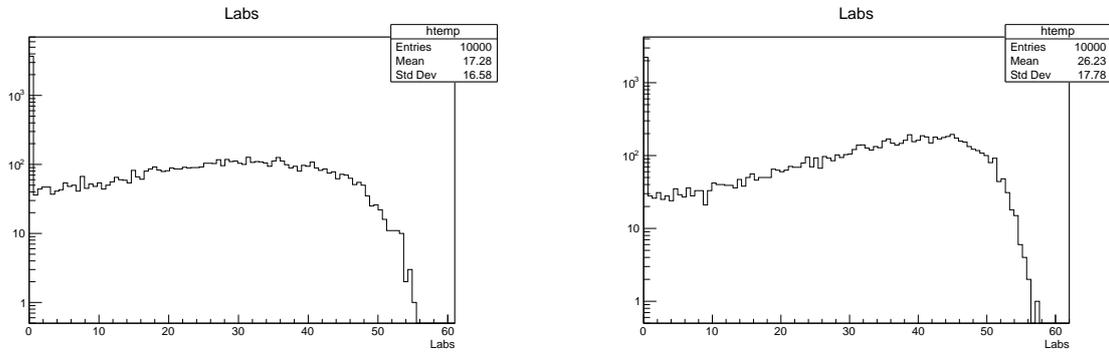


図 2: 50 MeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

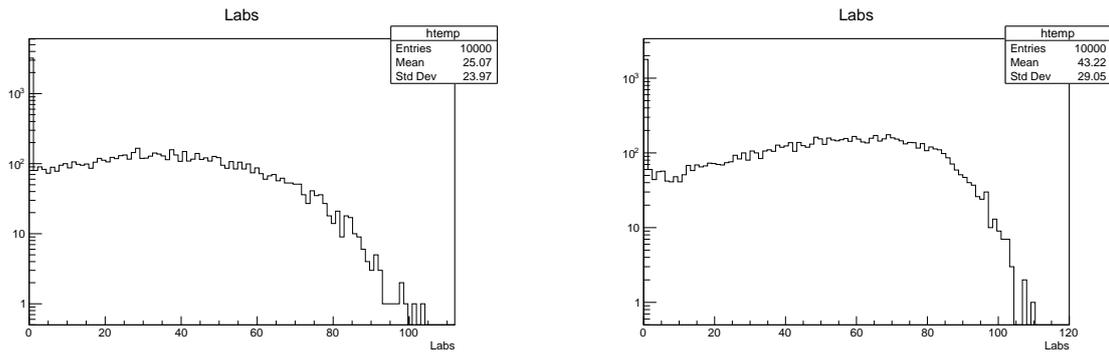


図 3: 100 MeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

2. L_{gap} (Si 検出器で測定した飛跡長)。図 7 から図 11 までを掲載している。

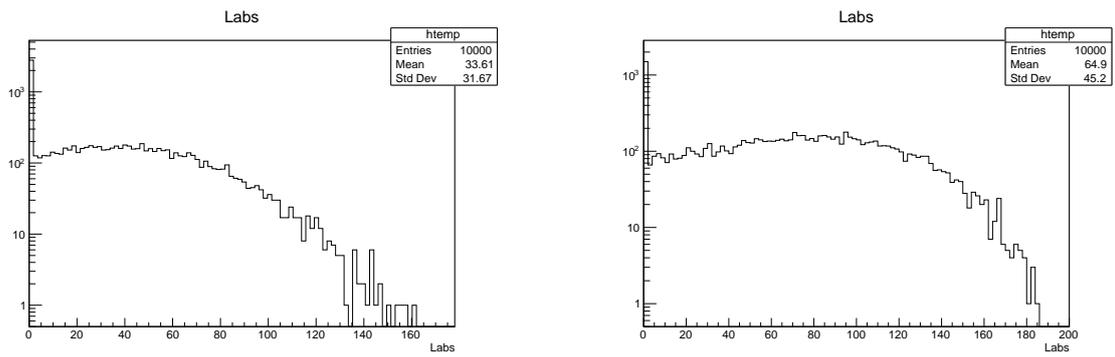


図 4: 200 MeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

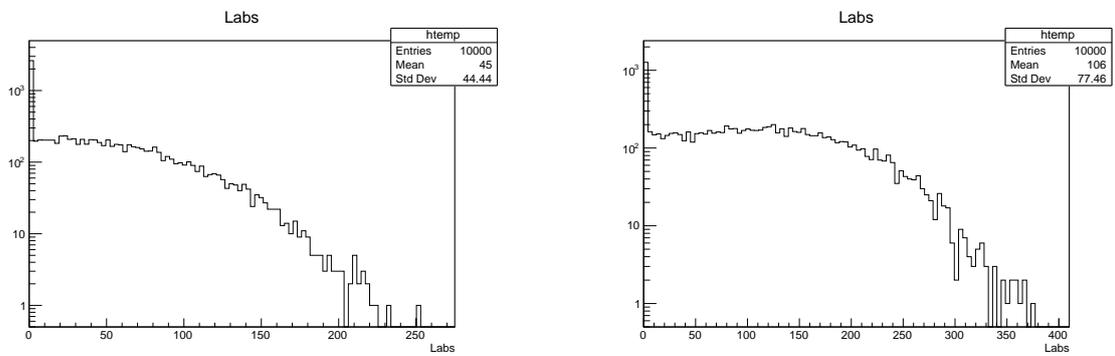


図 5: 500 MeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

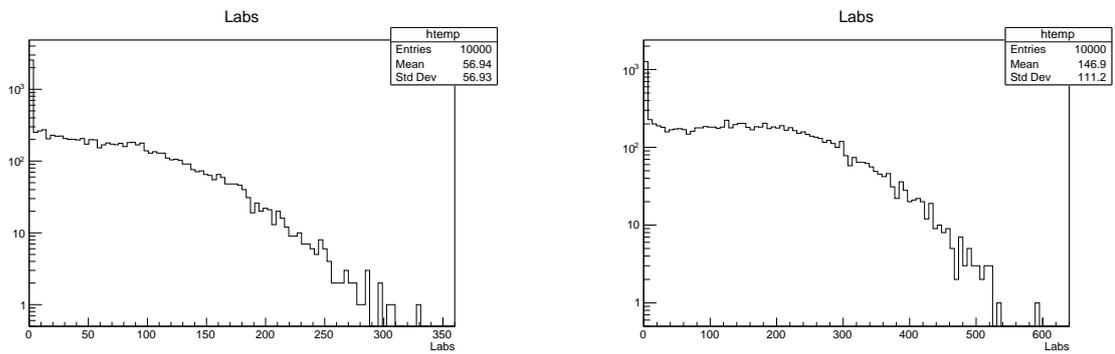


図 6: 1 GeV の γ 線が入射した場合の BGO シンチレータにおける飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

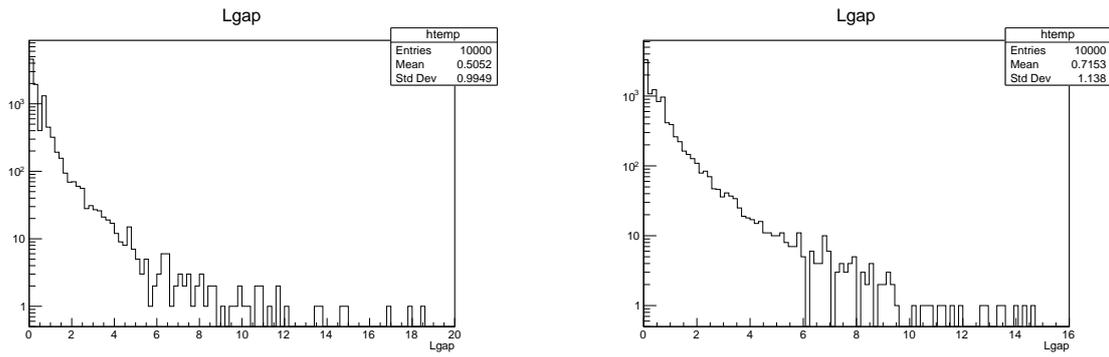


図 7: 50 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

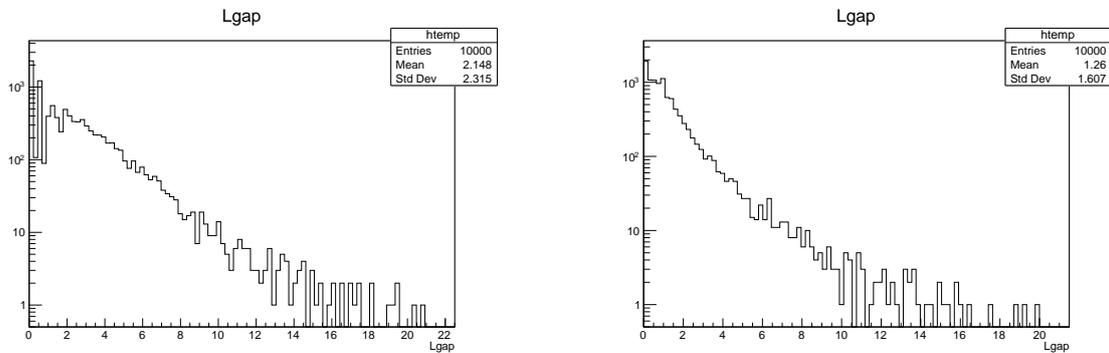


図 8: 100 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

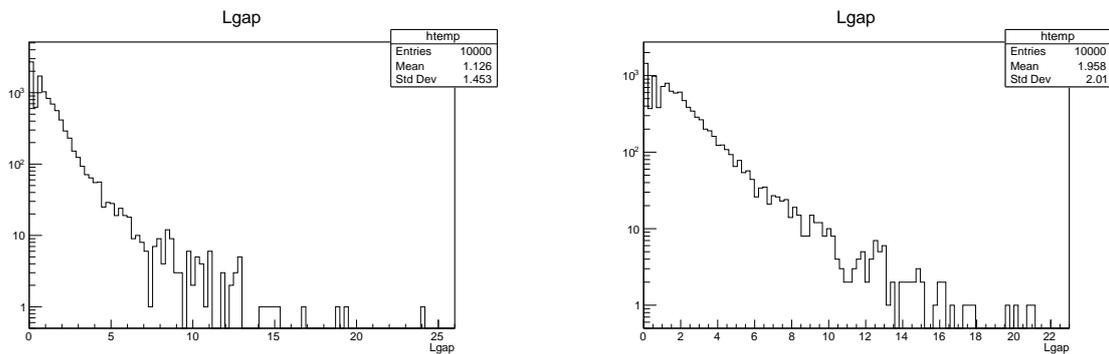


図 9: 200 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

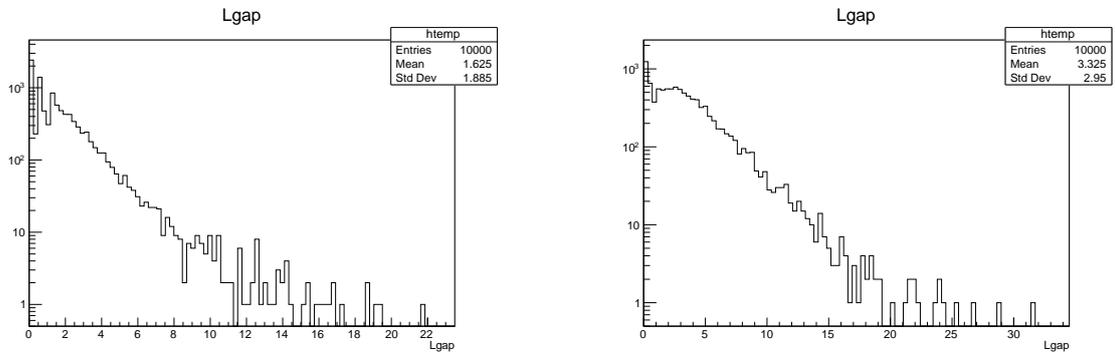


図 10: 500 MeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

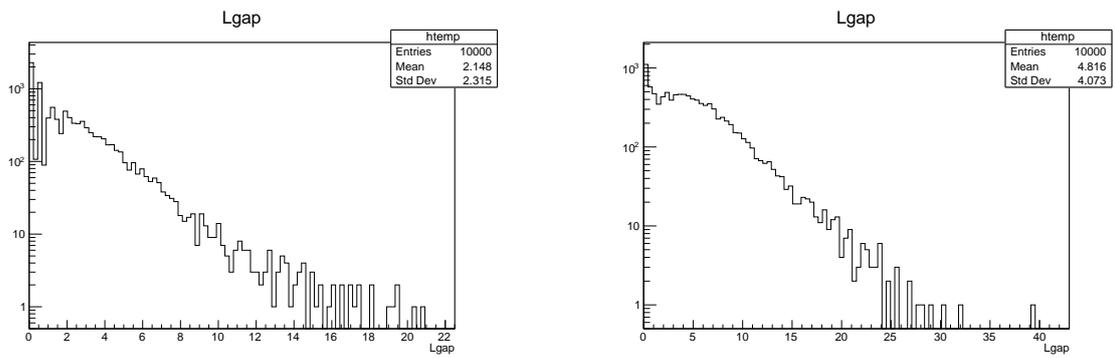


図 11: 1 GeV の γ 線が入射した場合の Si 検出器における飛跡長和の分布。(左) 2 層の場合、(右) 3 層の場合。

E_{abs} と L_{abs} 、 E_{gap} と L_{gap} の二次元プロット

実行したシミュレーションが間違っていないことを大まかに確認するチェック項目の一つとして、 E_{abs} と L_{abs} 、 E_{gap} と L_{gap} の相関を調べた結果、正比例に近い相関を示した。これは本研究の対象としたプリシャワー検出器のシミュレーションでは、粒子が物質を通過中のステップについて、その粒子が荷電粒子であった場合にのみ、そのステップの経路長とエネルギー損失を Ntuple に蓄積するよう、ステップを制御する関数のコードである B4aSteppingAction.cc の中で if 文を用いた制御を行っていることと矛盾しない。

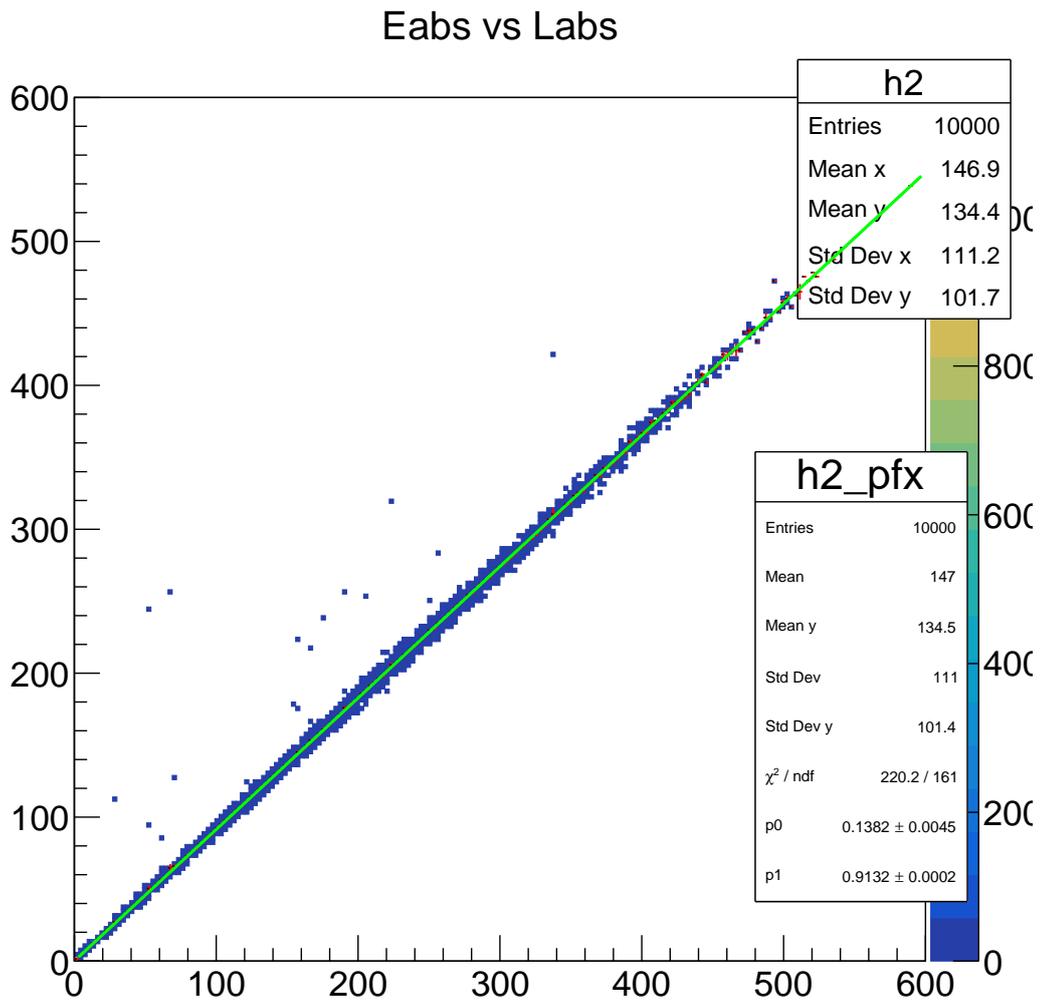


図 12: 3層、1 GeV の Eabs と Labs の関係。横軸を Labs(単位は mm)、縦軸は Eabs(単位は MeV) である。

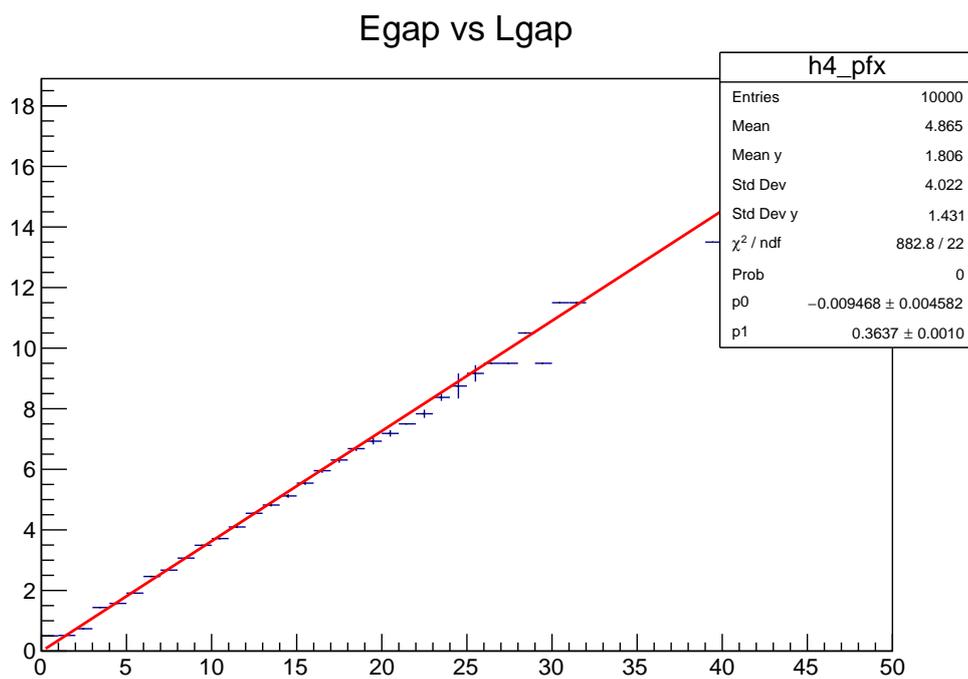


図 13: 3層、1 GeV の E_{gap} と L_{gap} の関係。横軸を L_{gap}(単位は mm)、縦軸は E_{gap}(単位は MeV) である。

関連図書

- [1] 株式会社 ハナムラオプティクス <http://www.hanamuraoptics.com/scintillatorcrystal/scintillatorcrystals/bgo.htm>
- [2] Geant4 Detector Description:Materials https://geant4.web.cern.ch/sites/geant4.web.cern.ch/files/geant4/collaboration/working_groups/geometry/training/D1-Materials.pdf
- [3] 原子力百科事典 ATOMICA https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_807.html
- [4] 原子力百科事典 ATOMICA https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_441.html
- [5] Belle I <http://belle2pb.kek.jp/Detector/ECL/>
- [6] 加納美佳・奈良女子大学大学院 人間文化研究科 修士論文 (2018) webhepl.cc.nara-wu.ac.jp/old_HP/thesis/master/2018kano/kanomika_mthesis.pdf
- [7] KEK サイト内資料参照 <https://wiki.kek.jp/display/geant4/Geant4+Japanese+Tutorial+for+Detector+Simulation+2019>
- [8] particle data group/Particle detectors at accelerators <http://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2019-rev-particle-detectors-accel.pdf>
- [9] W.R Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments