結晶シンチレーター内での光伝播の研究

1079004F　井本 昭子

広島大学理学部物理学科
素粒子実験・高エネルギー宇宙学研究室

平成 14 年 2 月 8 日

Abstract

銀河や銀河団の形成のしくみを探るべく、2005 年に Astro-E2 衛星が打ち上げ予定である。この衛星に搭載される X 線検出器 (HXD-II) には、周りからの雑音ガンマ線をアクティブに低減することができることが特徴の、筒上に伸びた井戸型の BGO($Bi_4Ge_3O_{12}$) シンチレーターが用いられる。このシンチレーターからでてくるシンチレーション光は、放射線が入射されることによって、シンチレーター内でいろいろな反射、屈折、散乱、吸収などの複雑な物理過程が起こっているはずである。BGO シンチレーターは他に比べて最も高阻止能であることが特徴であるが、シンチレーション効率が主流の NaI に比べて 10 %しかないため、シンチレーション光をできるだけロスすることなく光電子増倍管に導くことが重要である。そこで本研究では、陽子・電子・ガンマ線などのが物質内で起こす複雑な振る舞いや反応を正確にシミュレートする大規模ソフトウェアである Geant4 を用いて、BGO シンチレーターにガンマ線が入射したときの、シンチレーター内での optical photon の伝播の様子を探り、BGO のジオメトリに反映することを試みた。

目 次

1 序論 **2**

2 結晶シンチレーターについて **3**
2.1 結晶シンチレーターを用いたガンマ線検出の原理 3
2.2 シンチレーターの種類と利点 (特徴) 3
2.3 Geant4 4
2.4 本研究の目的 4

3 シンチレーション光のシンチレーター中の伝播 **5**
3.1 シンチレーション光の発生 5
3.2 シンチレーション光の物質中の伝播 6
3.3 シンチレーション光の物質境界面での反射、透過、吸収 7
3.3.1 dielectric_dielectric 7
3.3.2 dielectric_metal 11

4 シンチレーション光伝播シミュレーター **12**
4.1 Geant4 12
4.2 Geant4 による光伝播シミュレーション 12
4.3 物質境界面での光の伝播の扱い 15
4.4 シミュレーションのための準備手順 25

5 シンチレーション光伝播のシミュレーション **31**
5.1 目的 31
5.2 シミュレーションの全体の流れ 31
5.3 Geant4 の光伝播クラスの作成 35
5.4 シミュレーション条件 37
5.5 シミュレーション結果 39
5.6 今後の課題 44

参考文献 **46**

Chapter 1

序論

我々の住むこの宇宙は、約 100 億年前のビッグバン (Big Bang) と呼ばれる大爆発から始まり、現在も膨張していると考えられている。つまり最初は非常に高温かつ高密度の状態で、星も生命も存在しない素粒子が飛び交う状態であった。膨張とともに温度が冷え密度も下がり、現在我々が目にする様々な物質や天体が形成されてきた。

元々は一つに統一されていたと考えられる力がこのように分岐し、現在知られている四つの力 (重力、強い力、弱い力、電磁気力) が生まれたと考えられている。この段階における宇宙の主な構成粒子は、質量が $100\mathrm{GeV}(10^{15}$ 度に相当) 以下の素粒子 (レプトン、クォーク、グルーオン、光子) である。高エネルギー 物理学、つまり粒子加速器を使って調べられる極微の世界の研究が、今この宇宙誕生のプロセスを逆にたどって研究している学問と言える。その宇宙誕生のプロセスを探るべく、世界の研究者たちは、宇宙誕生最初の 1 マイクロ秒間のクォーク・レプトンの世界に何が起こったのかを実験室内に再現する高エネルギー実験を行ったり、天体から放射される X 線やガンマ線を観測するために宇宙にいくつもの観測衛星を打ち上げている。

Chapter 2

結晶シンチレーターについて

2.1　結晶シンチレーターを用いたガンマ線検出の原理

荷電粒子や X 線などの放射線があたったときに蛍光を出す物質のことをシンチレーターといい、この発行現象のことをシンチレーション、光のことをシンチレーション光とよぶ。シンチレーション光は荷電粒子や X 線などの放射線が物質中を通過する際に、物質中の電子を励起してエネルギーを失い (電離損失)、そのエネルギーの一部が光として放出されたものであり、この光が光電子増倍管の光電面にたどり着き、光電効果により光電子に変換され、その光電子が増幅されることによって、電気的なシグナルとなり測定される。

シンチレーションは、ガス、有機物、無機結晶などに広くみられ、特に無機結晶は比較的に密度が大きく、原子番号も大きいので、ガンマ線に対する光電効果、コンプトン効果、電子対生成などの過程が起こ りやすく、電子が発生しやすいので、低エネルギー粒子やガンマ線のエネルギー測定に使われる。

2.2　シンチレーターの種類と利点 (特徴)

シンチレーターには、NaI に Tl を混ぜた NaI(Tl)、CsI、KI などの無機結晶、アントラセンのような有機 結晶、ポリスチレンやポリビニルトルエンなどの有機個体 (プラスチックシンチレーター)、特殊なものとして、液体シンチレーターや気体シンチレーターがある。

無機結晶は発光効率 (シンチレーター中での荷電粒子の電離損失のうちシンチレーション光に変わったエネルギーの割合) が大きく、測定精度を上げることはできるが、大型の結晶の製作が困難で丈夫さに欠け、蛍光の減衰時間が長いので、速い測定には不向きである。これに対して、有機シンチレーターは、大型の結晶製作が可能、また応答が速いので、速い測定に適当である。液体シンチレーターは、任意の形の容器に入れて使用できる点が便利であり、プラスチックシンチレーターは時間分解能が優れている。

一般に、無機結晶は低エネルギー粒子やガンマ線のエネルギー測定に使われ、有機シンチレーターは高エネルギー実験に使われている。本研究では、X 線の何十倍ものエネルギーを持つ硬 X 線からガンマ線の高いエネルギーまで測定できる、ビスマス化合物結晶である無機シンチレー

ター (BGO) を用いている。

2.3 Geant4

Geant4 は、陽子・中性子・電子・ガンマ線・パイ粒子・ミュー粒子などの素粒子が物質中で起こす複雑な振舞いや反応を正確にシミュレートする大規模ソフトウエアである。高エネルギー物理学 (HEP) や宇宙線、原子核の実験などで物理成果を導くために不可欠なものである。 例えば、理論が予測する事象が実験装置によりどの様に観測されるかをシミュレートし、 実験での観測結果を比較して最終物理結果を出すために用いられている。 さらに、放射性医学治療、トモグラフィ、放射線遮蔽、宇宙工学などの分野でのシミュレーションにも応用されている。

以前は、GEANT3 よ呼ばれる FORTRAN プログラムが広く使われていた。しかし、実験装置の大規模・複雑化、また応用分野の拡大化により、シミュレーターへの機能要件が急激に複雑になり、100 万行に及ぶソースコードを維持管理することが困難となり、1994 年、CERN と日本のグループ、また他の機関も参加して Geant4 国際共同研究を開始した。1998 年に最初のオフィシャルバージョンをリリースし、この共同研究は終了、その後、共同研究の参加機関が中心となり、MoU(Memorandum of Understanding) を締結し、新たに Geant4 コラボレーションを結成。現在は、KEK 及び日本の複数の大学がこのコラボレーションに参加し、機能の追加と保守が行われている。

Geant4 は、次世代の HEP 実験及び学際分野が必要とする、複雑かつ多様なニーズにも対応でき、オブジェクト指向技術の採用は関連する計算科学分野でのソフト作成技法にも大きな刺激となり、高エネルギー実験でのソフトウエア開発が、FORTRAN から C++で行われるようになるきっかけとなった。

2.4 本研究の目的

これまで広く使われている NaI, CsI に比べ高阻止能ある BGO が最近使われるようになってきた。BGO の欠点は光発生率が NaI の 10 ~ 20 %という低さであり、発生し光をできるだけ損失することなく光検出器に送ることが大切である。そこで、本研究では、ガンマ線入射時に発生するシンチレーション光の物質境界面での反射、透過、吸収などの細かい物理過程を考慮に入れたシミュレートを再現し、シンチレーター内部でのシンチレーション光の伝播の様子を研究する。このために Geant4 ツールキットを用いる。

Chapter 3

シンチレーション光のシンチレーター中の伝播

3.1　シンチレーション光の発生

シンチレーション光は荷電粒子や X 線、ガンマ線などの放射線が物質中を通過するときに、物質中の電子を励起してエネルギーを失い、そのエネルギーの一部が光として放出されるものである。その物理過程は入射される物質のエネルギーによって異なってくるのだが、本研究では Low enargy のガンマ線の入射を取り扱っているので、以下、Low energy について述べていく。

Low energy のガンマ線をシンチレーターに入射したときに、シンチレーター内で起こる電磁相互作用は、以下のものが考えられる。

Photon process

Compton scattering

Rayleigh scattering

Gamma conversion

Photoelectric effect

Electric process

Bremsstrahlung

Ionisation and delta ray production

これらの相互作用によってシンチレーター内でシンチレーション光がつくられる。

3.2　シンチレーション光の物質中の伝播

シンチレーター内での光の伝搬は、optical photon によって成される。optical photon とは、荷電粒子がシンチレーター内を動きまわったときにつくられ、光の波長が atomic spacing をはるかに越えたとき、光子は optical とよばれる。電磁相互作用の種類については先に述べたが、この optical photon は

Rayleigh scattering

Absorption

Medium boundary interaction

の 3 種類の相互作用を受ける。

ここで、Rayleigh 散乱とは、波長に比べて寸法が十分小さな微粒子による光散乱のことである。光の波長が粒子直径の半分程度になると、粒子内部を透過した光や表面で反射した光が干渉しあって、散乱強度が粒子の直径により複雑な変化をするようになる。Rayleigh 散乱は入射光によって微粒子に電場が作用し、微粒子内の電気双極子モーメントが誘起されることによると考えられつまりこの過程は optical photon の偏光に依存するといえる。、その特徴は、散乱波の強度が微粒子の密度に比例し、波長の 4 乗に逆比例し、粒子直径の 6 乗に比例して強くなり、また微粒子の形に依存しないことである。Rayleigh 散乱における微分断面積は、old polarization に対する new polarization の偏光角を ϑ とするとき、$cos^2\vartheta$ に比例する。微分断面積を Φ とすると

$$\Phi(E,\vartheta) = (1 + cos^2\vartheta) \times FF^2(q)$$

ここで、FF^2 は Hubble's form factors であり、$q = E \cdot sin^2(\vartheta/2)$ は運動量変換である。低エネルギーのとき form factor は等法的であり、角度分布には影響を及ぼさない。

Medium boundary interaction については§ 3.3 で説明する。

シンチレーター内における光の伝播は optical photon によって成される、ということは先にも触れた。次に、この optical photon の偏光について述べていく。光子の偏光は、光子の方向と垂直な 2 つの構成ベクトルで定義される。

$$\begin{pmatrix} a_1 e^{i\Phi_1} \\ a_2 e^{i\Phi_2} \end{pmatrix} = e^i\Phi_1 \begin{pmatrix} a_1 e^{i\Phi_c} \\ a_2 e^{-i\Phi_c} \end{pmatrix}$$

ここで、

$$\Phi_c = (\Phi_1 - \Phi_2)/2$$

は circularity とよばれ、$\Phi_0 = (\Phi_1 + \Phi_2)/2$ は overall phase とよばれる。circularity は、光子の左、または右偏光の特徴を与える。シンチレーションは一次偏光、つまり、$\Phi_c = 0$ である。

overall phase は、コヒーレント波の間の干渉効果を決定づけるのに重要であり、これらは、鏡の干渉フィルターのような波長と匹敵する厚みの層にのみ重要である。そのような coating 効果は、表面の実験的な factor によって説明され、微視的なシミュレーションは要求されない。

偏光ベクトルは、$tan\Psi = a_2/a_1$ の偏光角によって記述される。(Reflection/transmission) 確率は、1 次偏光の状態に影響を受けやすいので、これを考慮に入れなければならない。

3.3 シンチレーション光の物質境界面での反射、透過、吸収

optical photon は物質の境界面で反射、透過または吸収を起こす。この物理過程の違いは、その境界面をつくる両側の物質の違い (不導体の物質、不導体と金属) や、境界面の表面状態によって生じる。前 section より、光子の状態は 2 つのベクトル、光子の運動量 ($\vec{p} = \hbar\vec{k}$)、光子の偏光 ($\vec{e}$) によって定義され、偏光ベクトルの方向は電場の方向である。$\vec{u}$ は第一媒質から第二媒質の向きで、その境界面と垂直な単位ベクトルである。境界面での光子の振舞いは、次の 2 つのことにより定義される。

1. 屈折、または反射角
2. 屈折、または反射波の振幅
3. 屈折、または反射する光子の確率

これらのことを考慮にいれて、
dielectric → metal,dielectric → dielectric の場合について区別していく。

- dielectric → metal

  光子は、透過せず、金属に吸収されるか、不導体の方へ反射される。

- dielectric → dielectric

  光子は通過する (屈折光) か、反射される (反射光) か吸収される。これらは光子の波長、入射角、偏光、境界面をつくる物質の屈折率に依存する。

3.3.1 dielectric_dielectric

境界での光子の振舞いを決めるために、まず、同質で単一な平面波を扱う。

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\vec{k}\cdot\vec{x} - i\omega t}$$
$$\vec{B} = \sqrt{\mu\epsilon}\,\frac{\vec{k}\times\vec{E}}{k}$$

ここで、μ：透磁率、ϵ：誘電率、$\vec{E}$：電場ベクトル、$\vec{B}$:磁場ベクトル、$\vec{k}$：波数ベクトルである。

古典論において、入ってきた波は、反射は (double prime) と屈折波 (single prime) に分かれる。

$$\vec{E}' = \vec{E_0}' e^{i\vec{k}'\cdot\vec{x}-i\omega t}$$
$$\vec{E}'' = \vec{E_0}'' e^{i\vec{k}''\cdot\vec{x}-i\omega t}$$

波数には、次のような関係がある。

$$|\vec{k}| = |\vec{k}''| = k = \frac{\omega}{c}\sqrt{\mu\epsilon}$$
$$|\vec{k}'| = k' = \frac{\omega}{c}\sqrt{\mu'\epsilon'}$$

ここで、物質中の波速は、$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ で、$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu\epsilon}$ は、物質中の屈折率である。3 つの波、屈折、反射、入射が、物質の表面で同じ位相をもつ状態は、Fresnel Law でよく知られており、

$$(\vec{k}\cdot\vec{x})_{surf} = (\vec{k}'\cdot\vec{x})_{serf} = (\vec{k}''\cdot\vec{x})_{serf}$$
$$ksin\, i = k'sin\, r = k''sin\, r'$$

ここで、$i,\ r,\ r'$ は各々、表面に垂直なところを基準とした入射角、屈折角、反射角である。

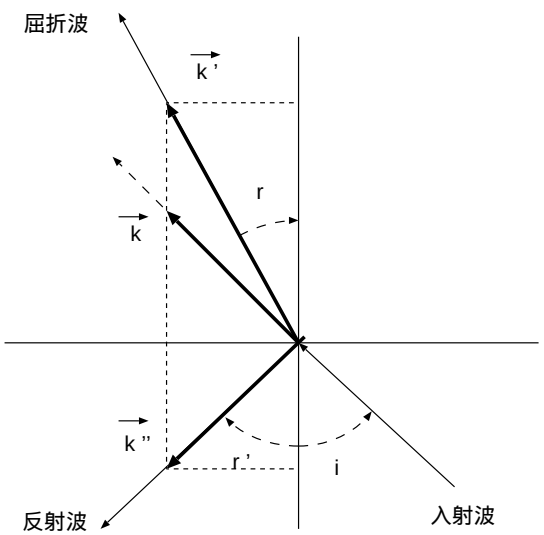


Figure 3.1: 入射波、反射波、屈折波のベクトル図

このことから、次のことがいえる。

$$i = r'$$
$$\frac{sin\ i}{sin\ r} = \sqrt{\frac{\mu'\epsilon'}{\mu\epsilon}} = \frac{n'}{n}$$

境界での波の力学的特徴は、Maxwell 方程式より得られる。入ってきた波の振幅に対して、生成された波の振幅との比は、

1. 光子の方向と境界面と垂直な方向によって決められる面に対して垂直な電場 (偏光ベクトル) の平面波は、

$$\frac{\mathrm{E}_0'}{\mathrm{E}_0} = \frac{2\mathrm{n}\ \mathrm{cosi}}{\mathrm{n}\ \mathrm{cosi} + \frac{\mu}{\mu'}\mathrm{n}'\ \mathrm{cosr}} = \frac{2\mathrm{n}\ \mathrm{cosi}}{\mathrm{n}\ \mathrm{cosi} + \mathrm{n}'\ \mathrm{cosr}}$$

$$\frac{\mathrm{E}_0''}{\mathrm{E}_0} = \frac{\mathrm{n}\ \mathrm{cosi} - \frac{\mu}{\mu'}\mathrm{n}'\ \mathrm{cosr}}{\mathrm{n}\ \mathrm{cosi} + \frac{\mu}{\mu'}\mathrm{n}'\ \mathrm{cosr}} = \frac{\mathrm{n}\ \mathrm{cosi} - \mathrm{n}'\ \mathrm{cosr}}{\mathrm{n}\ \mathrm{cosi} + \mathrm{n}'\ \mathrm{cosr}}$$

ここで、可視光またはほぼ可視光もときは、$\mu/\mu' \approx 1$。

2. 境界面と平行な電場の平面波は、

$$\frac{\mathrm{E}_0'}{\mathrm{E}_0} = \frac{2\mathrm{n}\ \mathrm{cosi}}{\frac{\mu}{\mu'}\mathrm{n}'\ \mathrm{cosi} + \mathrm{n}\ \mathrm{cosr}} = \frac{2\mathrm{n}\ \mathrm{cosi}}{\mathrm{n}'\ \mathrm{cosi} + \mathrm{n}\ \mathrm{cosr}}$$

$$\frac{\mathrm{E}_0'}{\mathrm{E}_0} = \frac{\frac{\mu}{\mu'}\mathrm{n}'\ \mathrm{cosi} - \mathrm{n}\ \mathrm{cosr}}{\frac{\mu}{\mu'}\mathrm{n}'\ \mathrm{cosi} + \mathrm{n}\ \mathrm{cosr}} = \frac{\mathrm{n}'\ \mathrm{cosi} - \mathrm{n}\ \mathrm{cosr}}{\mathrm{n}'\ \mathrm{cosi} + \mathrm{n}\ \mathrm{cosr}}$$

境界面と垂直な場合、次のような関係がある。

$$\frac{E_0'}{E_0} = \frac{2n}{n' + n} \quad , \quad \frac{E_0''}{E_0} = \frac{n' - n}{n' + n}$$

もし、$n' > n$ なら、反射波は逆位相であることを意味している。

入ってきたいくつかの波は、1 つは面と平行に偏光し、もう 1 つは垂直に偏光するものとにわかれる。

光子の粒子性により、光子の屈折や反射をする確率が計算される。光子数はエネルギーに比例するので、光子数が保たれるということは、境界面でのエネルギーが保存される、ということと同じである。

The energy current は、

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{4\pi}\sqrt{\mu\epsilon}\vec{E} \times \vec{H} = \frac{c}{8\pi}\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}E_0^2\hat{k}$$

であり、境界の単位面積のエネルギーバランスは、境界面に対して垂直方向の単位ベクトル $\vec{u}$ を用いて、

$$\vec{S} \cdot \vec{u} = \vec{S'} \cdot \vec{u} - \vec{s''} \cdot \vec{u}$$

$$s\ cosi = s'\ cosr + s''\ cosi$$

$$\frac{c}{8\pi} \cdot \frac{1}{\mu} n E_0^2\ cosi = \frac{c}{8\pi} \cdot \frac{1}{\mu'} n' E_0^{2\prime}\ cosr + \frac{c}{8\pi} \cdot \frac{1}{\mu} E_0^{2\prime\prime}\ cosi$$

となる。よって、$\mu/\mu' \approx 1$ とすると、光子の透過確率は

$$\mathrm{T} = \left(\frac{\mathrm{E}_0'}{\mathrm{E}_0}\right)^2 \frac{\mathrm{n}'\ \mathrm{cosr}}{\mathrm{n}\ \mathrm{cosi}}$$

反射する確率：R は $R = 1 - T$ となる。

反射の場合、入ってきた光子 $(\vec{k},\ \vec{e})$、屈折した光子 $(\vec{k'},\ \vec{e'})$ 反射した光子 $(\vec{k''},\ \vec{e''})$ との関係は、

$$\vec{q} = \vec{k} \times \vec{u}$$

$$\vec{e_\perp} = \left(\frac{\vec{e} \cdot \vec{q}}{|\vec{q}|}\right)\frac{\vec{q}}{|\vec{q}}$$

$$\vec{e}_\parallel = \vec{e} - \vec{e}_\perp$$

$$\mathrm{e}'_{\parallel} \;=\; \mathrm{e}_{\parallel}\frac{2\mathrm{n}\ \mathrm{cosi}}{\mathrm{n}'\ \mathrm{cosi}\ +\ \mathrm{n}\ \mathrm{cosr}}$$
$$\mathrm{e}'_{\perp|} \;=\; \mathrm{e}_{\perp}\frac{2\mathrm{n}\ \mathrm{cosi}}{\mathrm{n}\ \mathrm{cosi}\ +\ \mathrm{n}'\ \mathrm{cosr}}$$
$$e''_{\parallel} \;=\; \frac{n'}{n}e'_{\parallel} \;-\; e_{\parallel}$$
$$e''_{\perp} \;=\; e'_{\perp} \;-\; e_{\perp}$$

$sinr \;=\; n\, sin\frac{i}{n'} \;>\; 1$ の場合、屈折した波はなく、次式による全内部反射が起こる。

$$\vec{k''} \;=\; \vec{k} \;-\; 2(\vec{k}\cdot\vec{u})\vec{u}$$
$$\vec{e''} \;=\; -\vec{e} \;+\; 2(\vec{e}\cdot\vec{u})\vec{u}$$

以下、反射、透過、吸収についてそれぞれ触れておく。

反射、屈折 (透過)

光は二つの均一等方で完全に透明な媒質の境界面に入射すると一部分は反射し、一部分は屈折する。したがって、屈折した波のエネルギー (または粒子数) は入射した波のエネルギー (または粒子数) よりも小さくなる。先に述べたように反射の場合は R で、屈折の場合は T の確率でそれぞれ起こる。

また、第一媒質の屈折率が第二媒質の屈折率より大きい場合は、特定の入射角 (全反射の臨界角) 以上では屈折波が存在せず、入射波のエネルギーが全て正反射、つまり、全反射する。

吸収

物質中の波の伝播を考える場合には、一般に波動ベクトル $\vec{k}$ を複素数

$$\vec{k} \;=\; \vec{k'} \;+\; i\,\vec{k''}$$

を導入する必要がある。($\vec{k'}, \vec{k''}$: 実ベクトル) 今、波動ベクトルが特定の方向をもつ、つまり $\vec{k'}$と$\vec{k''}$ が互いに平行であるとすると、このような波は、その中の電磁場の値が一定の面が、伝播方向に垂直な平面になる。

この場合には、$\vec{k} \;=\; k\vec{l}$($\vec{l}$ は $\vec{k'}$ と $\vec{k''}$ の方向の単位ベクトル) によって波動ベクトルの長さ k を導入することができ、 $k \;=\; \sqrt{\epsilon\mu}\frac{\omega}{c}$ となる。複素量 $\sqrt{\epsilon\mu}$ ($\because$物質中) は普通、実数 n と κ を使って $k \;=\; n \;+\; i\kappa$ という形に書くので、

$$k \;=\; \sqrt{\epsilon\mu}\frac{\omega}{c} \;=\; (\ n \;+\; i\kappa\ )\,\frac{\omega}{c}$$

ここで、先にも述べたように n は媒質の屈折率、κ は吸収係数と呼ばれ、伝播につれて波が減衰する速さを決めるものである。ある吸収性の媒質に光子がはいってきたとき、その光子はこの吸収係数にしたがってエネルギーをおとしていく。

3.3.2 dielectric_metal

反射、吸収

第二媒質が吸収性である金属の場合は一般に反射波の強度が強くなり、また屈折波は吸収される。したがって、第二媒質のもつ特有の吸収係数によって、入射光波の反射と吸収する割合がかわる。

Chapter 4

シンチレーション光伝播シミュレーター

4.1 Geant4

シミュレーションとは、我々が普段行っている物理的実験をコンピューターの中で再現してしまおう、というものである。そのシミュレーションを成り立たせるためにはいろいろな設定が必要となる。たとえば、実際行われる物理的過程を追うことはもちろん必要だが、その実験で起こりうる物理的素過程の導入、用いる物質の定義、イベントループの設定、さらには、実験室自体も準備しなければならない。

図に Geant4 のプログラムの構成を示す。Geant4 では、まず Detector のジオメトリを構築する部分があり、ここでユーザーは好みの検出器を再現する。次に物理過程を記述する部分があり、ここでユーザーはシミュレーションに使う粒子とその物理反応を用意する。そして、入射粒子の発生方法を記述する部分があり、これら 3 つを用意して初めてシミュレーションを実行することができる。さらには、これらとは別にシミュレーション中においてログ情報を出したり、データ処理したりする部分も必要に応じて入れられる。Geant4 ではこうしたことが容易にできるようなクラス群が豊富に用意されている。

4.2 Geant4 による光伝播シミュレーション

光の伝播を厳密にシミュレートするには、いくつかの特別なクラスの導入が必要となる。それに伴って、光伝播特有の関数も用いられる。

光の伝播をシミュレートするにあたり考慮に入れなければならないことは、まず光自体の発生と光粒子、その光の伝播とそのまわりをとりまく環境 (例えば物質の表面) などがある。Geant4 にはそれらのことを記述するための多くのクラスと関数を持ち合わせている。

以下に、Geant4 に用意されている光伝播のクラスと関数の種類を示す。

光の発生　　シンチレーション光、チェレンコフ光

光粒子　　optical photon

光の伝播　　吸収、レイリー散乱

物質境界面の処理　　反射、透過、吸収

さらに、境界面をつくる 2 つの物質の種類 (theType) と境界面の表面状態 (theFinish) については

- theType

  dielectric_metal ..... 不導体と金属によって境界面がつくられている。

  dielectric_dielectric ..... 2 つの不導体によって境界面がつくられている。

- theFinish

  polished ..... 表面が磨かれている状態。

  ground ..... 表面がざらざらな状態。

  polishedbackpainted ..... 表面が磨かれており、さらに反射剤が内側に塗られている。

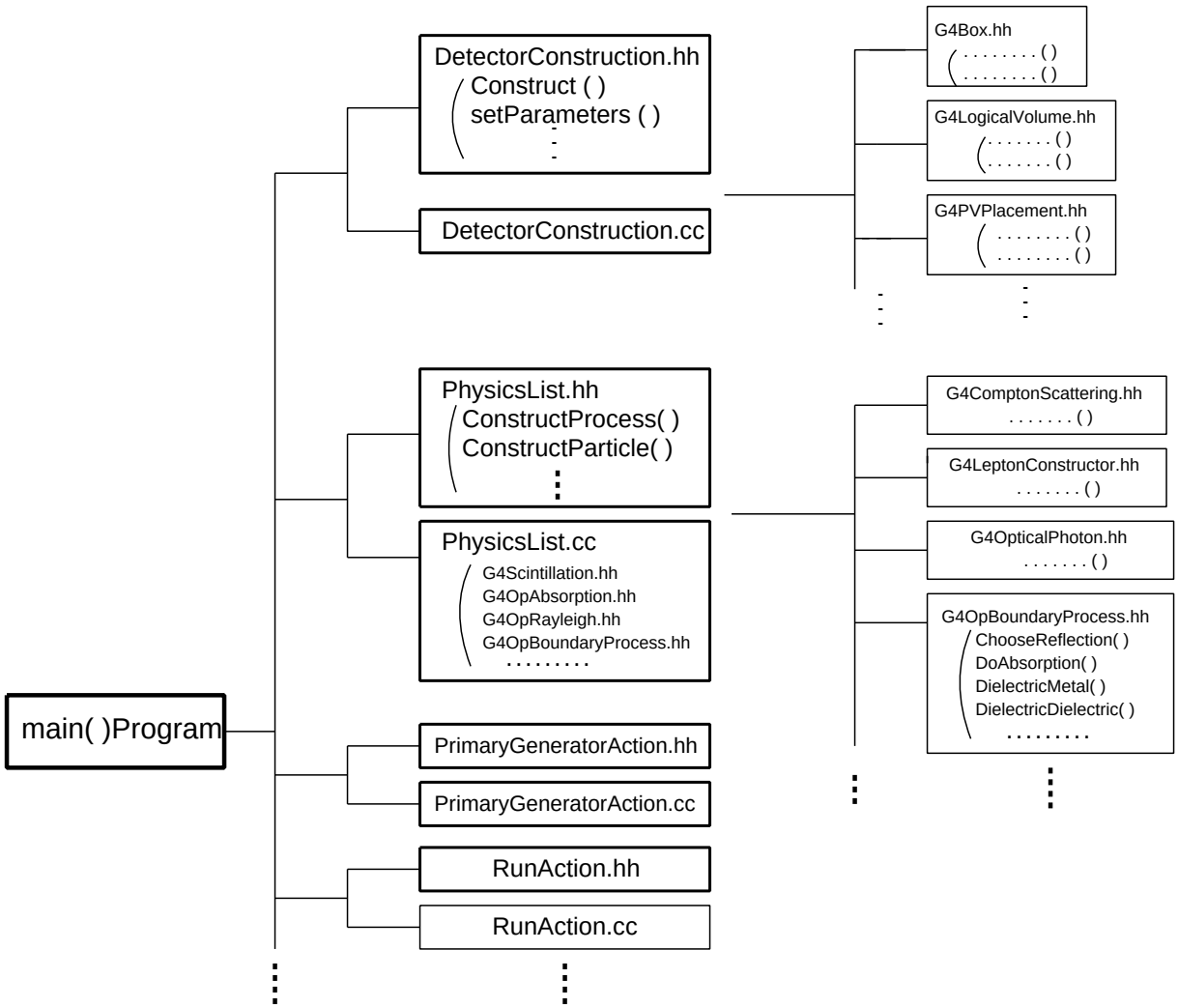
  groundbackpainted ..... 表面がざらざらで、さらに反射剤が内側に塗られている。

  polishedfrontpainted ..... 表面が磨かれており、さらに外側に反射剤が塗られている。

  groundfrontpainted ..... 表面がざらざらで、さらに外側に反射剤が塗られている。

がある。これらのクラスや関数を組み合わせることによりいろいろの場合を想定した厳密なシミュレートが可能となる。

次に、光伝播をシミュレートした今回のプログラムの流れを簡単に示す。



ここで、クラスの役割をしめす

DetectorConstruction . . . . . detector をつくるクラス
　　Construct( ) . . . . . detector をつくる関数
　　setParameter( ) . . . . . detector の大きさなどを決める関数
　　　　G4Box . . . . . 四角(detector のこと)を用意
　　　　G4LogicalVolume . . . . . detector の構成要素の決定
　　　　G4PVPlacement . . . . . detector を座標にセット

PhysicsList . . . . . 実験して起こる物理現象を記述するクラス
　　ConstructProcess( ) . . . . . 物理過程を用意
　　ConstructParticle ( ) . . . . . 素粒子を用意
　　　　G4ComptonScattering . . . . . コンプトン散乱の定義
　　　　G4LeptonConstructor . . . . . 物理現象に必要となる素粒子を定義
　　　　G4OpticalPhoton . . . . . optical photonの定義
　　　　G4BoundaryProcess . . . . . optical photonの物理過程を記述
PrimaryGeneratorAction . . . . . 入射粒子発生
RunAction . . . . . イベントループの設定

4.3　物質境界面での光の伝播の扱い

Geant4 では、§ 3.2 で述べたようなクラスを用いてシミュレーションすることになるが、ここではその中でも重要で最も複雑な物質境界面での光伝播の扱いを説明する。シンチレーター内では、境界面の表面状態や、その境界面をつくる 2 つの物質の種類によってシンチレーション光の伝播は異なってくる。

Geant4 では、境界面での物理過程を記述するものとして G4BoundaryProcess クラスがあり、その中には以下の関数が用意されている。PostStepDoIt( ) 関数が本物理過程を行う main 関数であり、それ以下に示されている関数が適宜呼ばれてプロセスが進む。

PostStepDoIt( )　境界面での物理過程を決める関数。

dielectric_metal( )　不導体と金属のつくる境界面での過程を決める関数。

dielectric_dielectric( )　2 つの不導体のつくる境界面での過程を決める関数。

ChooseReflection( )　反射の種類を決める関数。

DoReflection( )　実際に反射を行う関数 (運動量の決定など)。

DoAbsorption( )　実際に吸収を行う関数。

G4BooleanRand( )　乱数をふって、ある物理過程を確率的に実行させる関数。

以下に G4BoundaryProcess クラスの実際のフローチャートを用いて示す。

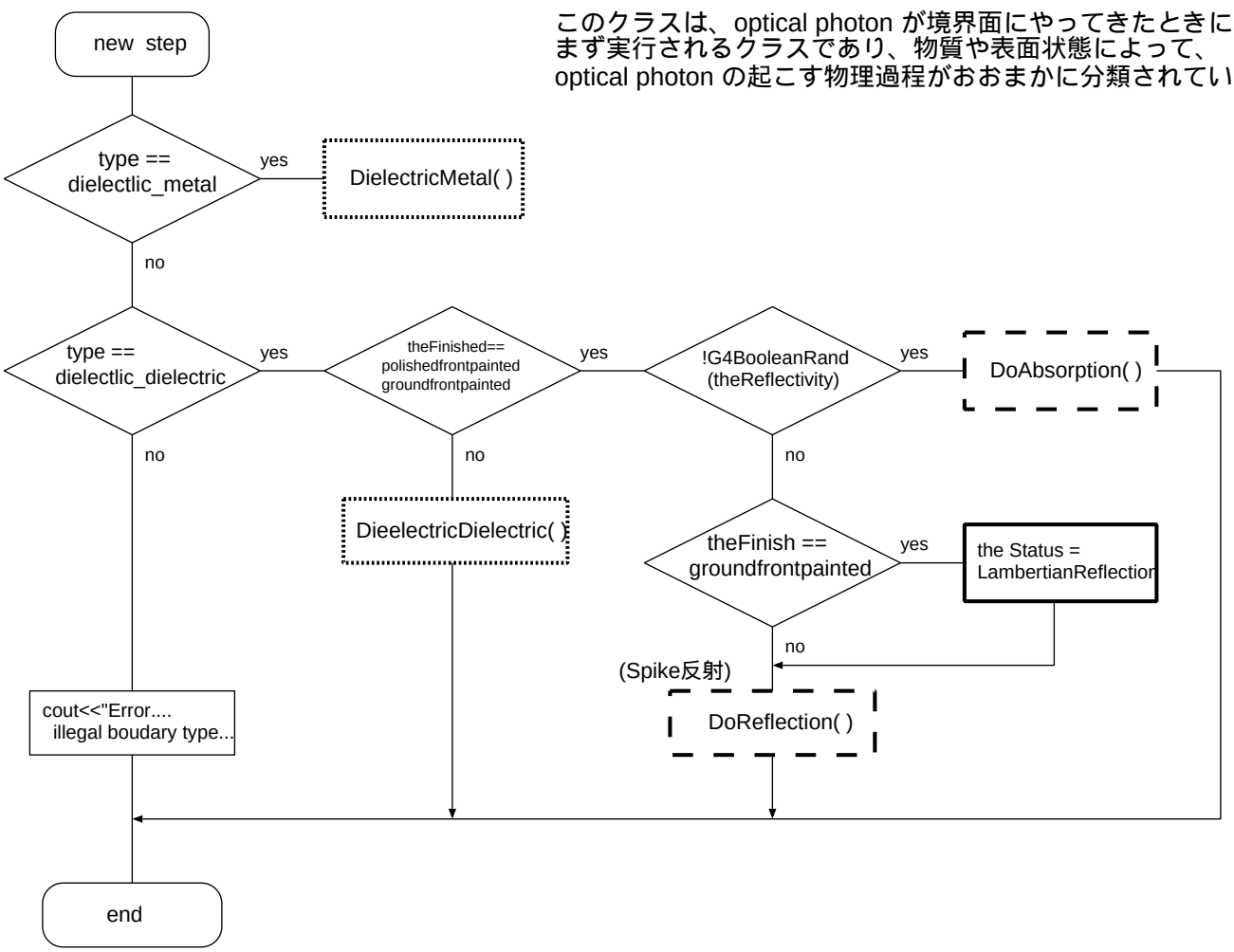
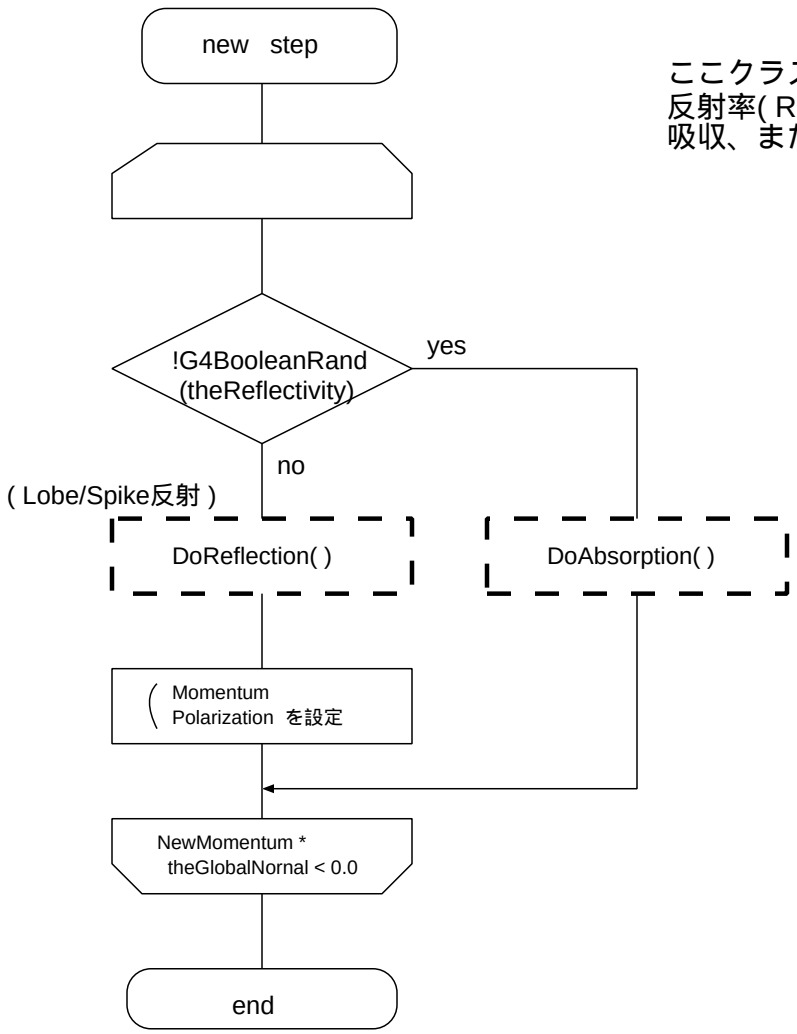
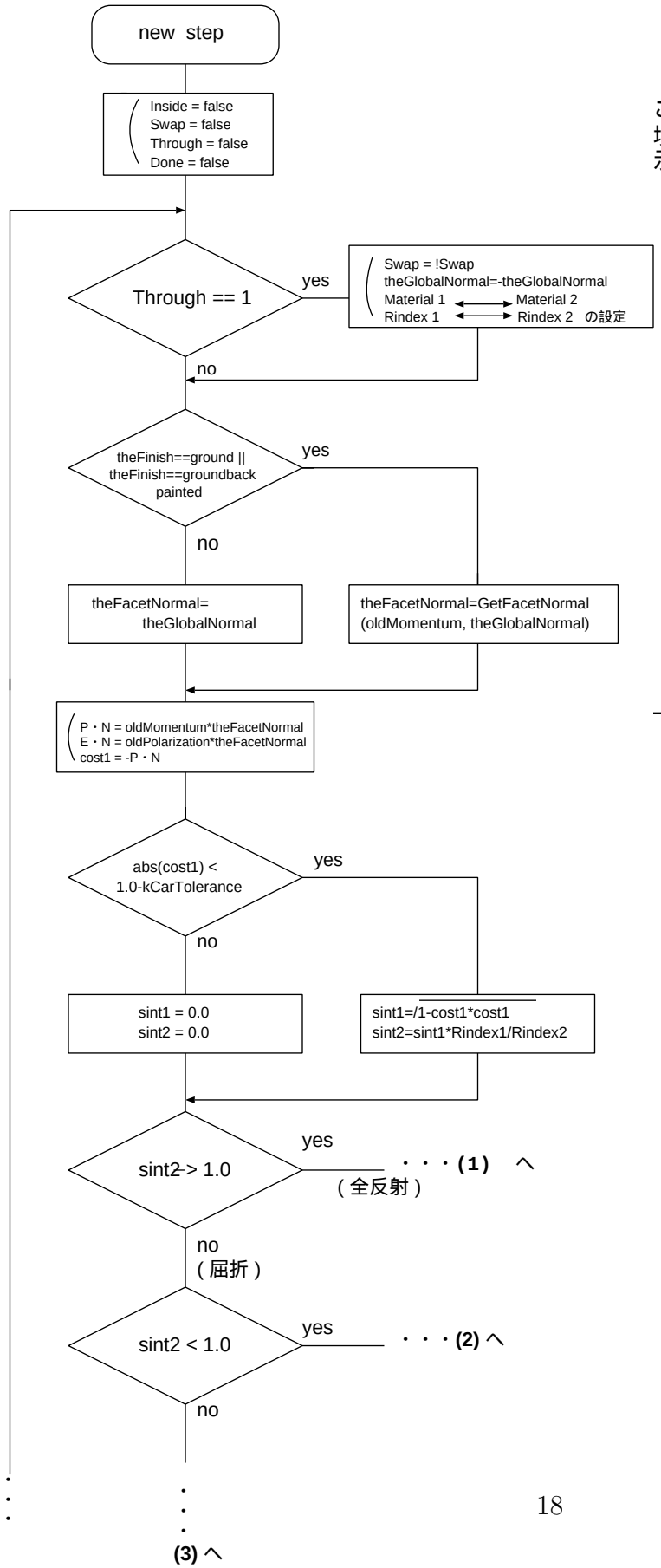


Figure 4.1: PostStepDoIt( )

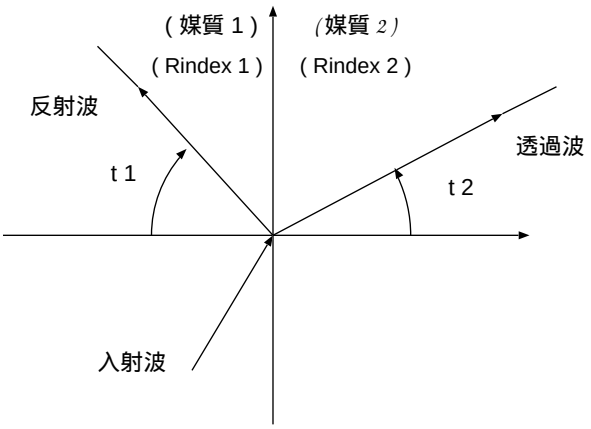


ここクラスでは、user が設定した
反射率(REFLECTIVITY)によって、
吸収、または反射が起こる過程をあらわしている。

Figure 4.2: Dielectric _ Metal( )



このクラスでは、2つの不導体のつくる
境界で optical photon の起こす物理過程を
示している。



[用いられている文字は上図参照]

Figure 4.3: Dielectric _ Dielectric( ) No1

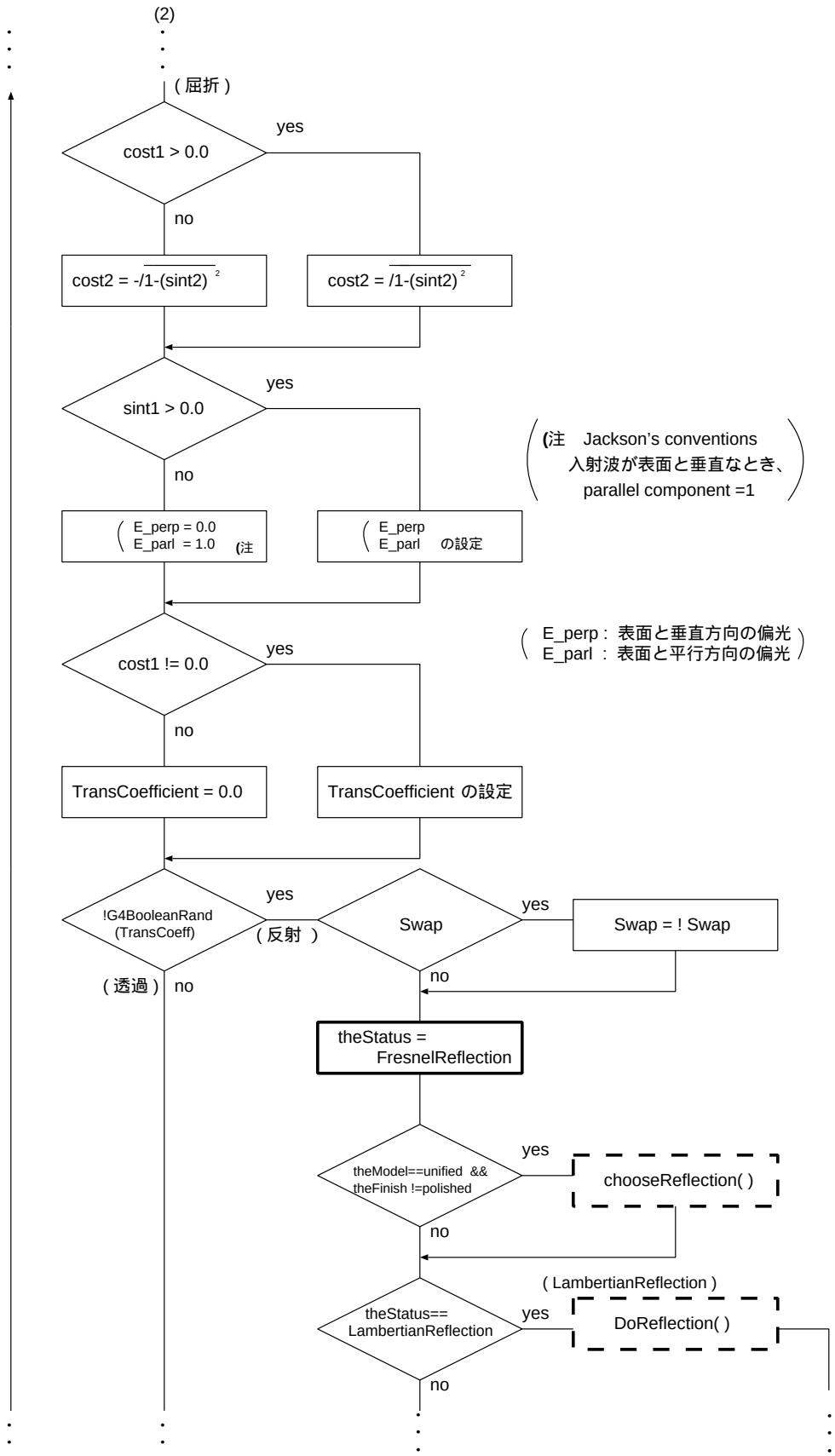


Figure 4.4: Dielectric _ Dielectric( ) No2

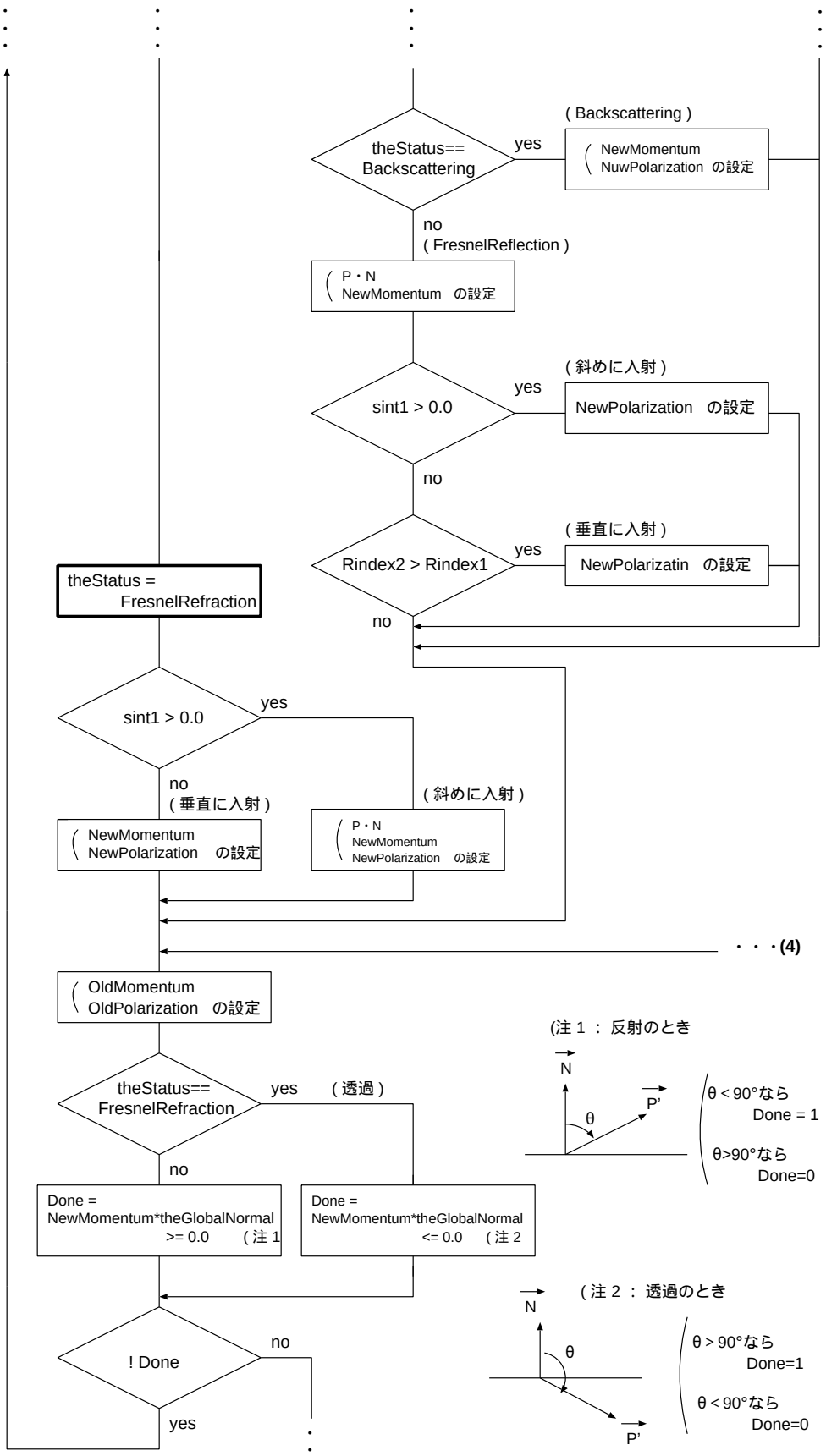


Figure 4.5: Dielectric _ Dielectric( ) No3

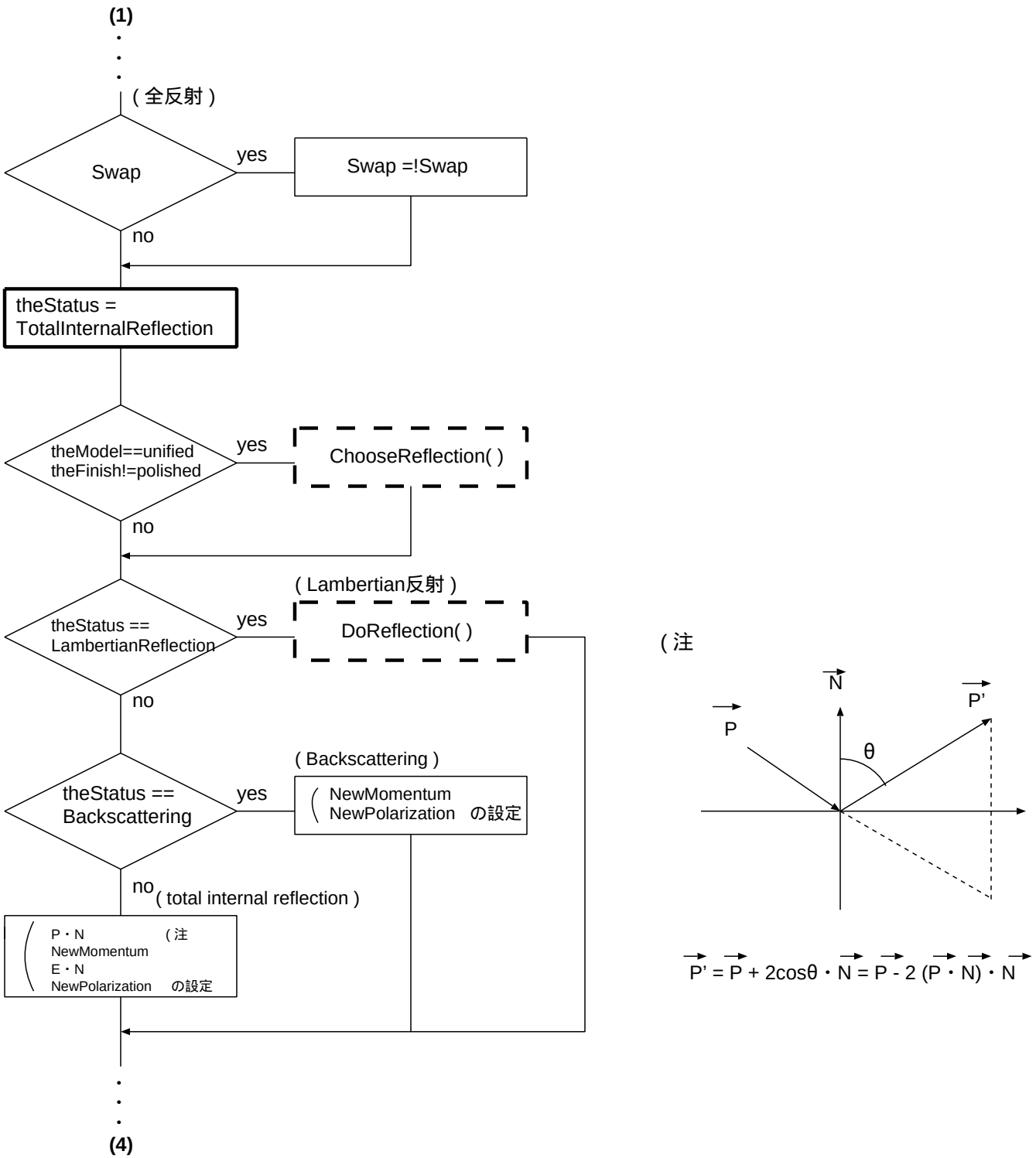


Figure 4.6: Dielectric _ Dielectric( ) No4

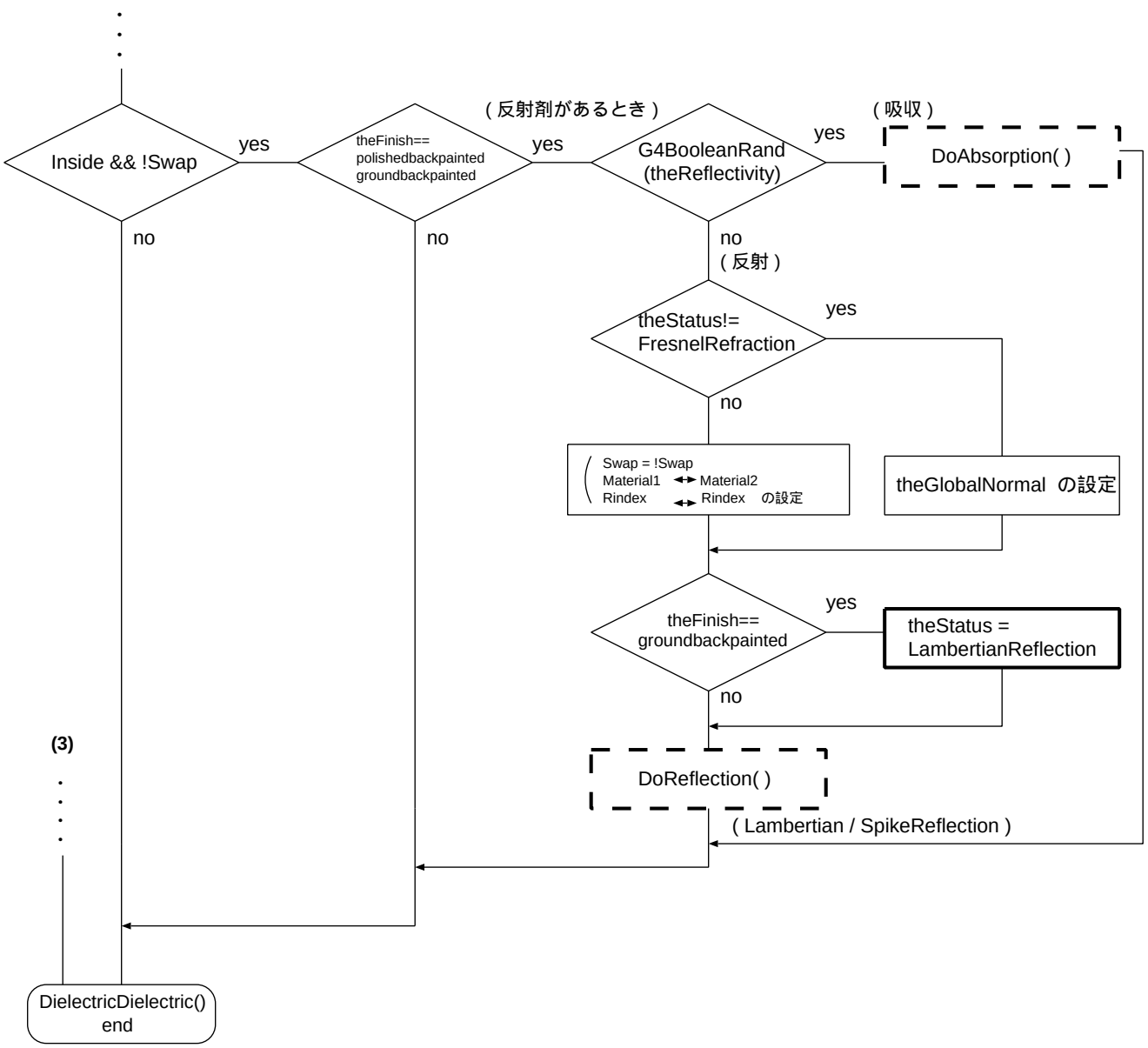
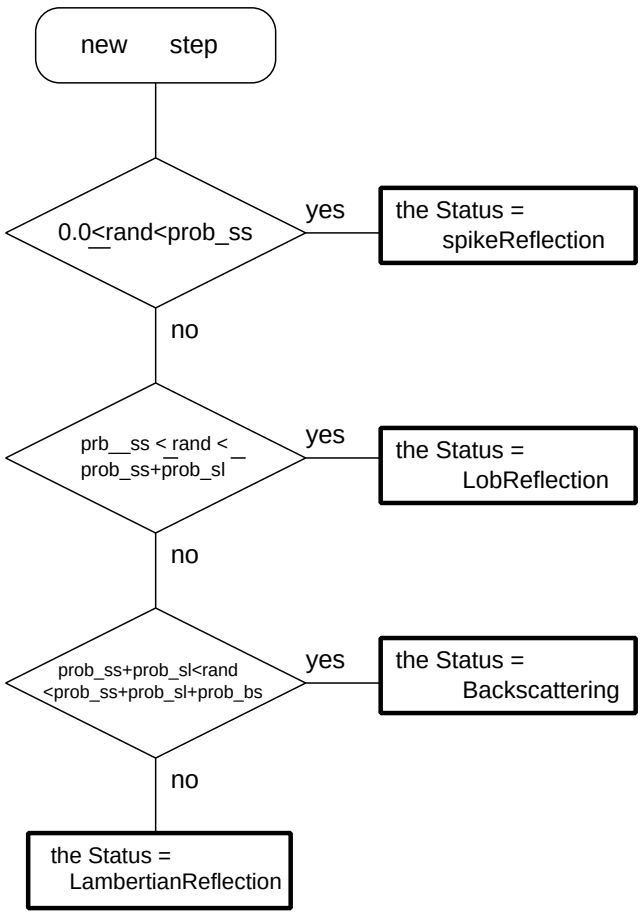


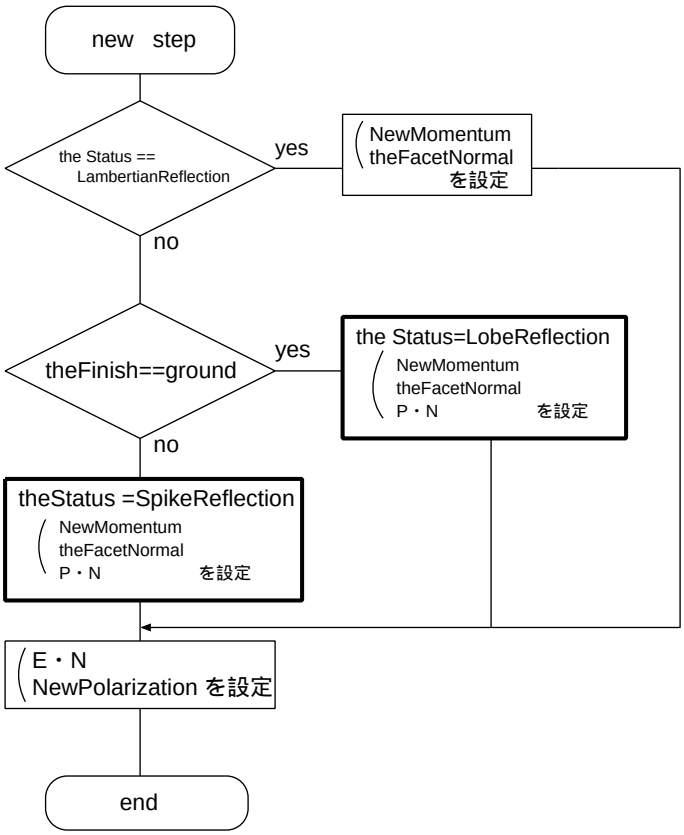
Figure 4.7: Dielectric _ Dielectric( ) No5



prob_ss, prob_sl, prob_bs は各々 SpikeReflection, LobeReflection, 及び、 Backscattering をあらわす特有の定数である。

ここのクラスでは、この定数を用いて、 反射を分類している。

Figure 4.8: ChooseReflection( )



このクラスでは、反射の種類や、表面の状態によってかわってくる momentum や、P・N, E・N の新しい設定をしている。

ここで、

- N : 表面と垂直な単位ベクトル (theFacetNormal)
- P・ N: 表面と垂直な運動量ベクトルの成分
- E ・N: 表面と垂直な偏光ベクトルの成分

Figure 4.9: DoReflection( )

実際に, どの物質の種類のときの、どのような表面状態 (theFinish) のときに、どのような反応が起こるのかを以下に示す。

- Dielectric_Metal
  .....Lobe 反射 (ground)、 Spike 反射 (not ground)、 吸収
- Dielectric _ Dielectric
  polished ..... 全反射, Fresnel 反射, 透過
  ground ..... 全反射, Lambertian 反射, 後方散乱, Fresnel 反射, 透過
  polishedfrontpainted ..... 吸収、 Spike 反射
  groundfrontpainted ..... 吸収、 Lambertian 反射
  polishedbackpainted ..... 全反射、 Lambertian 反射、 後方散乱、Fresnel 反射、 吸収
  groundbackpainted ..... 全反射、 Lambertian 反射、 後方散乱、Fresnel 反射、 吸収

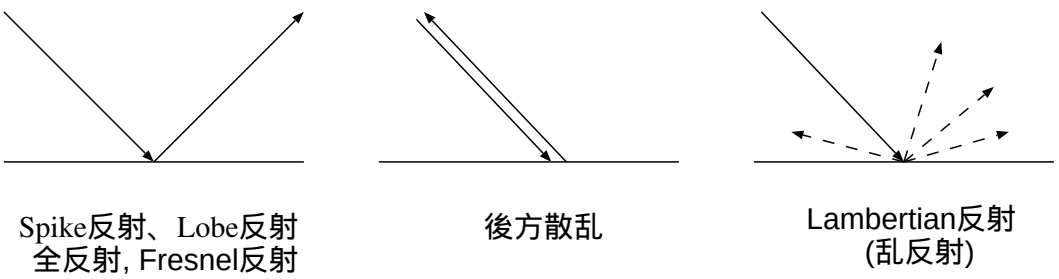


Figure 4.10: 反射、散乱の種類

4.4 シミュレーションのための準備手順

光の伝播とは、Scintillation 内における optical photon の振舞いのことであるが、特に Surface における optical photon の振舞いは Surface の状態、種類、Scintillator をとりまく環境 (例えば、Air や Scintillator と接している PMT など) や、Scintillator そのものの情報 (屈折や吸収係数) で決定される。

∗optical photon の Surface での振舞いを考えるとき、その Surface のことを特に optical Surface という。

これらのことを考慮に入れて、Surface での optical photon の物理過程が決定される。
以下、その手順を具体的なプログラムを示しながら、述べていく。

例えば下図の geometry を考えてみる。

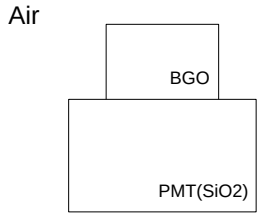


Figure 4.11: example

このとき、考慮に入れる条件を以下にあげる。

· 箱型の BGO と PMT(SiO2) を図のように設置する。周りは実験室を想定する (空気で満たされている)。
· 各々の表面状態 (theFinish) は磨かれており (polished)、反射剤は使用していない。
· 用いる Model は UNIFIED model とする。※
· BGO の屈折率は 2.15、光吸収係数は可視光領域で 344.8 ~ 1450.0*cm、Scintillation 光のスペクトルは一様とする。
· Scintillation 光が光っている時間を表す ScintillationTime を 100.*ns、Scintillation 光の数のゆらぎを表す ScintillationScale を 1.0、1MeV あたり何個の optical photon を生成するかを表す ScintillationYield を 50000./MeV とする。

※ G4OpBoundaryProcess クラスを用いるときには model を設定してやる必要がある。この model には UNIFIED model と GLISUR model の 2 種類があり、GLISUR model は、Geant3.21(Geant4 はこの改訂版) の model であるが、UNIFIED model はこの GLISUR model よりもリアルなシミュレーションを得ようとしており、表面の磨きや反射剤の全ての様子を取り扱う model である。

これらの条件を満たすようなプログラムは次の様になる。

◦ BGO と PMT の Surface を設定　(Optical Surface の導入)

Surface の Type、 Finish、Model を決める。

(例：BGO)
G4OpticalSurface*OpBGOSurface
=new G4OpticalSurface(“BGOSurface”);
//”OpBGOSurface” という名前の Surface 状態を用意。
G4LogicalSkinSurface*BGOSurface
= new G4LogicalSkinSurface(“BGOSurface”, BGOLog1,
OpBGOSurface);
//BGO の Surface(OpBGOSurface) を Skin 型 (BGOSurface) で定義。
//ただし、BGOLog1 とは、BGO 物質をさす。
G4BGOSurface − >SetType(dielectric_dielectric);
//境界面をつくる二つの物質の情報を G4BGOSurface にわたしている。
G4BGOSurface − >SetFinish(polished);
//表面状態 (今回は磨かれている) の情報を G4BGOSurface にわたしている。
G4BGOSurface − >SetModel(unified);
//UNIFIED model を G4BGOSurface に適用するように指示している。

* 境界面を定義するクラスとして、Geant4 には G4LogicalSkinSurface と G4LogicalBorderSurface の 2 種類がある。Skin 型は接する物質に関係なく物質を定義しており、それに対して Border 型は接する相手の物質を指定して境界面を定義するクラスである。この場合は、BGO が空気に触れている部分は Skin 型で設定し、BGO と PMT が接している部分は Border 型で設定している。

上で設定した Surface のときに、境界面で起こる物理過程のパラメータを決める。そのためには、RINDEX,LobeReflection, SpikeReflection, Backscattering の定数を決めてやり、その情報を各々にわたしてやる。

(例：BGO)
const G4int NUM=2;
G4double PP[NUM]={$1.6E-9*GeV, 4.1E-9*GeV$};
　　//optical photon のエネルギー別の各々の定数を与えてやることによって、より厳密なシミュレーションが可能になる。この場合は 2 つのエネルギーにわけて考えている。
G4double RINDEX[NUM]={1.0, 1.0};
　　//屈折率。
G4double SPECULARLOBECONSTANT[NUM]={0.3, 0.3};
　　//Lobe 反射の反射率。
G4double SPECULARSPIKECONSTANT[NUM]={0.2, 0.2};
　　//Spike 反射の反射率。
G4double BACKSCATTERCONSTANT[NUM]={0.2, 0.2};
　　//Backscattering 反射率。
G4MaterialPropertiesTable*myST1=new G4MaterialPropertiesTable();
　　//各々の情報を置く Table を用意。
myST1 − >AddProperty(“RINDEX”, PP, RINDEX, NUM);
　　//RINDEX の情報を Table にわたしている。
myST1 − >AddProperty(“SPECULARLOBECONSTANT”,
　　PP, SPECULARLOBECONSTANT, NUM);
　　//Lobe 反射の情報を Table にわたしている。
myST1 − >AddProperty(“SPECULARSPIKECONSTANT”,
　　PP, SPECULARSPIKECONSTANT, NUM);
　　//Spike 反射の情報を Table にわたしている。
myST1 − >AddProperty(“BACKSCATTERCONSTANT”,
　　PP, BACKSCATTERCONSTANT,NUM);
　　//Backscattering の情報を Table にわたしている。
OpBGOSurface − >SetMaterialPropertiesTable(myST1);
　　//Table myST1 を OpBGOSurface に適用している。

* この例は反射剤を用いていないが、反射剤を考慮に入れる場合は、その反射剤の反射率をあらわす ”REFLECTIVITY” も設定する必要がある。

◦ Air, Scintillator(BGO), PMT の特性を決める。

optical photon のエネルギー別 (PPSINTI) の各々の RINDEX, ABSORPTION を設定する。

(例：BGO)
const G4int NUMENTRIES=2;
G4double PPSINTI[NUMENTRIES]={$3.1E-9*Gev, 4.1E-9*Gev$};
//optical photon のエネルギー別の各々の定数を与えてやることによって、より厳密なシミュレーションが可能になる。この場合は 2 つのエネルギーにわけて考えている。
G4double RINDEX2[NUMENTRIES]={2.15, 2.15};
//BGO の屈折率。
G4double ABSORPTION[NUMENTRIES]={$344.8*cm, 1450.0*cm$};
//BGO の光吸収係数。
G4double SCINTILLATION[NUMENTRIES]={0.5, 0.5};
//Scintillation 光のスペクトル。

G4MaterialPropertiesTable*myMPT2
=new G4MaterialPropertiesTable();
//各々の情報を置く Table を用意。
myMPT2 − >AddProperty(“RINDEX”,
PPSINTI, RINDEX2, NUMENTRIES);
//RINDEX の情報を Table にわたしている。
myMPT2 − >AddProperty(“ABSLENGTH”,
PPSINTI, ABSORPTION, NUMENTRIES);
//Absorption の情報を Table にわたしている。
myMPT2 − >AddProperty(“SCINTILLATION”,
PPSINTI, SCINTILLATION, NUMENTRIES);
//Scintillation の情報を Table にわたしている。
BGO − >SetMaterialPropertiesTable(myMPT2);
//Table myMPT2 を BGO に適用している。

◦ Optical Photon の導入

Optical Photon の受ける 3 つの相互作用 (Absorption, Rayleigh scattering, boundary interactions) の導入

```
(例：Absorption)
G4OpAbsorption*theAbsorptionProcess=new G4OpAbsorption();
    //Absorption の過程をあらわすもの。
theAbsorptionProcess − >SetVerboseLevel(1);
    //VerboseLevel の値によって Output ログの量が調整でき、その設
      定を吸収過程に施している。
pmanager − >AddDiscreteProcess(theAbsorptionProcess);
    //吸収過程をプロセスマネージャーに登録している。
      pmanager(ProcessManager) とは、粒子の物理過程を管理してい
      るものである。
```

Optical photon の生成される環境、つまり Scintillation の特性 (Time, Scale, Yield) の設定。

```
G4Scintillation*theScintillationProcess
                =newG4Scintillation(“Scintillation”);
    //Scintillation の物理過程の導入。
theScintillationProcess − >SetScintillationTime(100.*ns);
    //ScintillationTime の設定。
theScintillationProcess − >SetScintillationScale(1.0);
    //ScintillationScale の設定。1.0 の場合はポアソンゆらぎである。
theScintillationProsecc − >SetScintillationYield(50000./MeV);
    //ScintillationYield の設定。
```

以上の手順をふむことにより、シンチレーター内に optical photon が発生し、その optical photon がまわりの環境に影響された厳密な物理過程をシミュレートすることができる。

Chapter 5

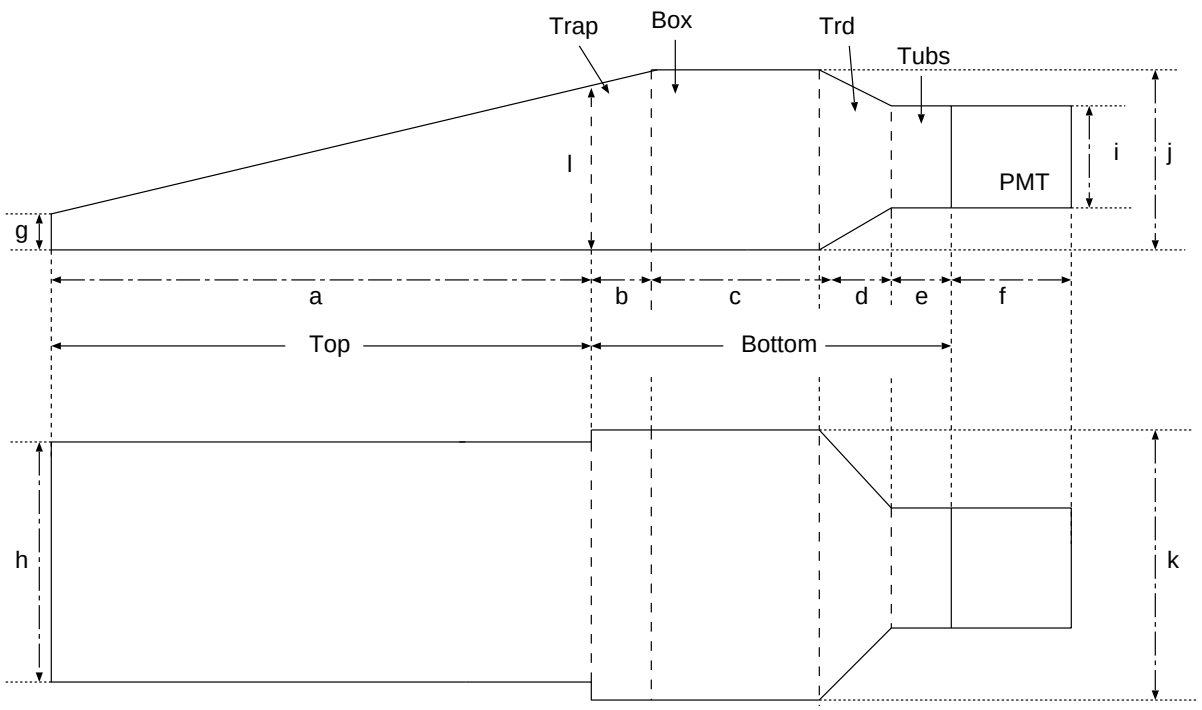
シンチレーション光伝播のシミュレーション

5.1 目的

次期 X 線衛星 Astro-E2 HXD に用いられる BGO 検出器を再現し、BGO の形状を変えることによって光収集率を良くすることができるかを実験データと比較しながら検討する。

5.2 シミュレーションの全体の流れ

BGO シンチレーターは、Top と Bottom の 2 パーツで構成されており、さらに Bottom は Geant4 の中で構成するときには形状的に、Trap、Box、Trd、Tubs の 4 パーツに分けた。(図 5.1)



a : SideTopHeight =295.0*mm
b : SideTrapHeight =15.0*mm
c : SideBoxHeight = 37.5*mm
d : SideTrdHeight = 17.5 *mm
e : SideTubsHeight = 15.0*mm
f : SidePMTHight = 30*mm
g : SideTopThick = 8.0*mm
h : SideTopWidth = 57.0*mm
i : SideTubsDiameter = 25.0*mm
j : SideBottomY = 40.0*mm
k : SideBottomX = 60.0*mm
l : SideBottomYthin = 38.45*mm

Figure 5.1: BGO シンチレーターのジオメトリ

今回シミュレーションに用いた BGO シンチレーターは、実験に使用した BGO の改訂版であり、Top の幅が 60cm から 57cm にかわっている (このスペースには CFRP とよばれる炭素繊維で箱状に囲まれるために確保されている)。実際実験で用いたのは BGO の Top の部分であり、Top と Bottom の堺目を原点としている。原点から 5cm ずつ線源 (Cs) をスライドさせたポイントで、PMT で光量を測定した。ガンマ線をあてる部分は BGO の Top の側面で (図 5.2 の斜線部)、ガンマ線が側面に垂直にあたるように設置した。(図 4.2 参照) また、BGO の周りには中でつくられた光が外へ逃げないように、反射剤 (ゴアテック) がまかれてある。

この条件のもと、まずガンマ線をあてる場所を原点より遠ざけていった場合の光量の変化と、Tubs の長さを変えていったときの光量の変化を測定した。(実際は channel-peak をみた)

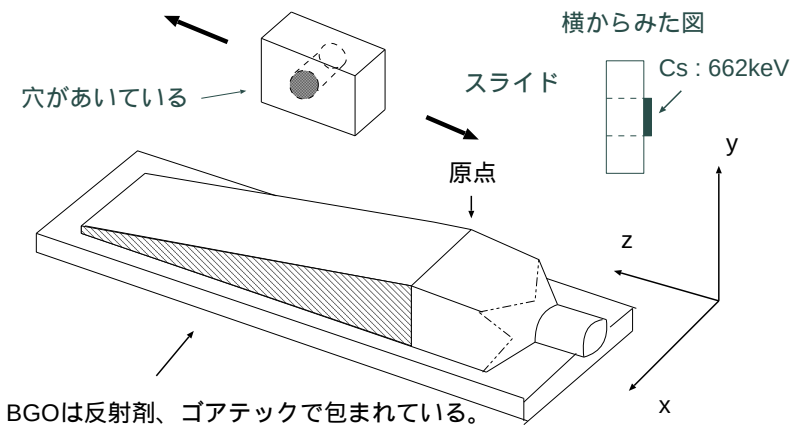


Figure 5.2: 実験の様子

その結果

横軸を channel(エネルギー)、縦軸をカウント数の peak として、その結果を 図 5.3 に示す。図より、線源を原点より遠ざけるとカウント数のピークが大きくなっている、つまり線源を原点より遠ざけると光量が増えていくことが確認された。また、Tubs の長さを短くするほど光量は増えた。(図右下の数字は、各々Tubs の長さを表したものである。)

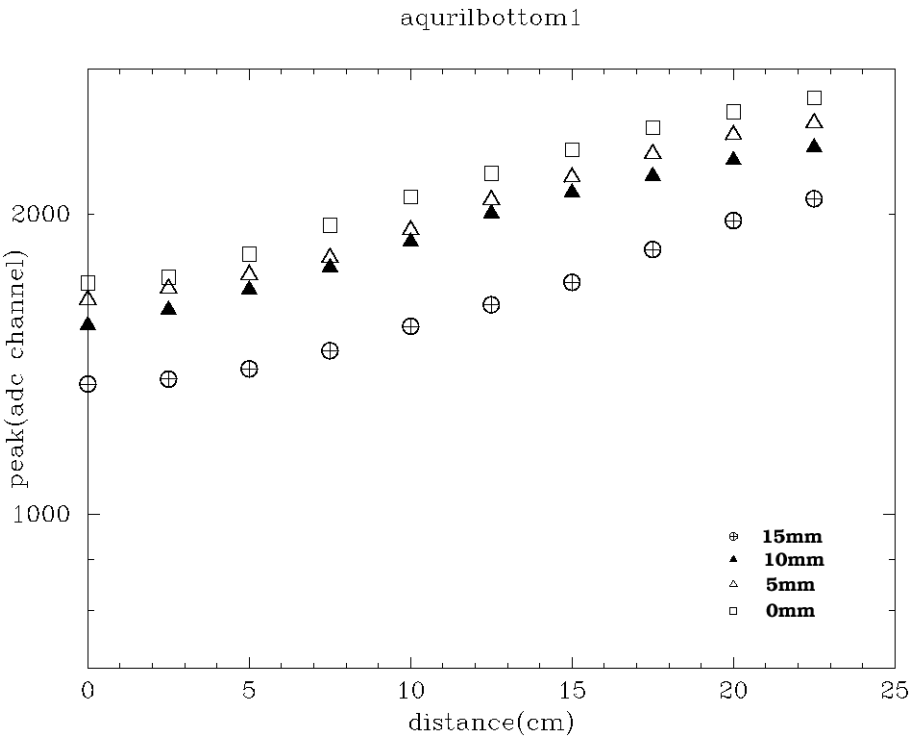


Figure 5.3: 実験の結果

以下、この実験結果をふまえてシミュレーションを行っていく。

実験と同様に Top の側面にガンマ線をあてていくのだが、先にも触れたように、今回用いる BGO の形状は改訂版であり、傾斜のはじまりが Top のつけね (原点) である従来のものに対して、改訂版は Trap のつけね (z=-15mm) から傾斜がはじまっている。側面に一ヶ所 1.5mm の段さがあるが、今回は' 傾斜している' 部分の側面というところに重点をおいて、後者の方を適用しシミュレートを行う。

次に光量についてだが、まず PMT に吸収された optical photon の数と光量は比例関係にあるので、光量を測定することと PMT 内での optical photon の吸収された数を調べることは同等である。したがって、BGO の後ろに PMT を設置する本来の形の geometry を導 入してやり、その PMT 内で強制的に optical photon を吸収させ、その数を調べることによって、実験の結果と比較をしていく。

実際にシミュレーションを行うのにあたって、プログラム作成に必要な流れを以下に示す。

1. BGO シンチレーターの geometry をプログラムに導入。
2. Material 特性の設定。
3. Optical Surface の導入、及び反射剤の設定。
4. Optical Photon の導入。

5. シミュレーション開始

5.3 Geant4 の光伝播クラスの作成

前節で述べたような実験の再現を厳密にシミュレートするために必要なプログラムの設定を § 4.3 に沿って示していく。

1. BGO シンチレーターの geometry をプログラムに導入

   まず BGO シンチレーター (図 4.1) を Top, Trap, Box, Trd, Tubs にわけてつくり、各々を座標にセットする。

```
(例：Tubs 部)
G4Tubs*solidSideBottomTubs
    =newG4Tubs("SideBottomTub",0.*mm,SideTubsDiameter/2,
                        SideTubsHeight/2,0*deg,360*deg);
  //Tubs の形をつくる。ここで、G4Tubs は円柱形のものをつくるクラスで、PMT をつくるときにも用いられる。他には、台形の形をつくる G4Trd や G4Trap が Trd、Trap、Top に、箱型をつくる G4Box が Box に使われる。
G4LogicalVolume*logicSideBottomTubs
    =newG4LogicalVolume(solidSideBottomTubs,
                              mat->BGO,"BGO");
  //Tubs は BGO 物質でできていることを設定。
TubsOffsetZ=ScintiTopPos-SideBottomSizeZ+SideTubsHeight/2;
G4VPhysicsVolume*physiSideBottomTubs=newG4PVPlacement
    (0,G4ThreeVector(0.*mm,0.*mm,TubsOffsetZ),"BottomTubs",
                    logicSideBottomTubs,worldPhys,false,0);
  //Tubs を置く Z 座標 (TubsOffsetZ) を決めて (ScintiTopPos は原点)、実験室にセットしている。
```

2. Material 特性の設定

   § 3.3 と同様。

3. Optical Surface の導入、及び反射剤の設定。

反射剤を考慮に入れた theFinish を決める。

```
(例：Top)
G4OpticalSurface*OpAirSurface=new G4OpticalSurface("AirSurface");
G4LogicalBorderSurface*AirTopSurface
        = new G4LogicalBorderSurface("AirSurface",
                        physiSideTop, worldPhys, OpAirSurface);
   //BGO の Air と接する面を Border 型で定義。
OpAirSurface->SetType(dielectric_dielectric);
OpAirSurface->SetFinish(polishedbackpainted);
OpAirSurface->SetModel(unified);
    //theFinish を反射剤をあらわす polishedbackpainted に設定。ここ
      で、'back' は内側の反射を'front' は外側の反射を促す。
const G4int NUM = 2;
G4double PP[NUM] = {1.6E - 9 * GeV, 4.1E - 9 * GeV};
G4double REFLECTIVITY[NUM] = {1.0, 1.0};
    //REFLECTIVITY の定数。これは反射剤の反射率をあらわす。こ
      の場合は 100 % optical photon を反射させる。
G4MaterialPropertiesTable*myST2=new G4MaterialPropertiesTable();
myST2->AddProperty("REFLECTIVITY",PP,
                        REFLECTIVITY,NUM);
OpAirSurface->SetMaterialPropertiesTable(myST2);
    //REFLECTIVITY の情報を Table にわたし、それを OpAirSurface
      に適用している。
```

＊ PMT と Air の境界面や BGO と PMT の境界面も上のように Border 型で設定しているが、Top と Trap のような同じ BGO 内での境界面は Skin 型で設定している。

4. Optical Photon の導入

§ 3.3 と同様。

5.4　シミュレーション条件

図 4.2 のような配置のもとに

- 線源 (particleGun) の位置を z 方向にスライドさせての光量の変化を探る。
- Tubs の長さをかえて上と同様、線源 (particleGun) をスライドさせて光量の変化をみる。

線源の高さ 10*mm, 入射エネルギー 662keV, 線源の位置を (-40、-10、z)、ガンマ線入射方向を [1, 0, 0],Trap のつけね (z= -15*mm) から 50*mm ずつ (Trap は 5*mm ずつ) スライドさせて、各々の PMT での吸収された optical photon の数を調べていく。発生したシンチレーション光のうち、PMT に吸収された数を 10 発のイベントすべてについて足し合わせて、光量とした。

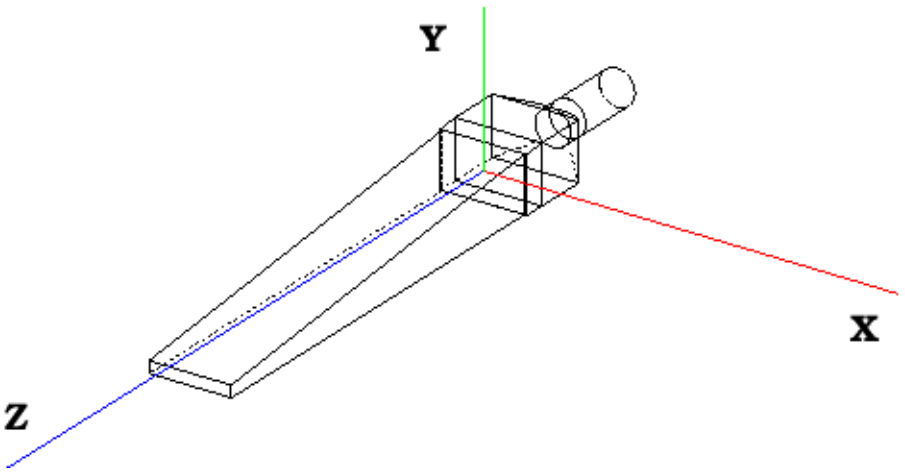


Figure 5.4: BGO の座標

ところで、座標軸は上図のようにとっており、Top と Trap の境界面の中心を原点にとっている。

ここで、線源をスライドさせていくと Top が傾斜していることから、ガンマ線が BGO をかすめる地点があるが、そこでスライドさせるのを終了させる。今回用いている particleGun は広がりをもっていないため、その地点を越えてしまうとガンマ線が BGO 内にはいらず、シミュレート不可能となってしまうためである。

また、ScintillationYield を 1000./MeV, REFLECTIVITY を 1.0、 ABSORPTION の長さをエネルギー $\{3.1E-9*GeV, 4.1E-9*GeV\}$ にたいして $\{344.8*cm, 1450.0*cm\}$ として、Tubs の長さを 5*mm と 10*mm の 2 つでシミュレートした。

図 5.5, 5.6 は、横軸は原点からの距離 (mm) で、縦軸は PMT で吸収された optical photon の数である。

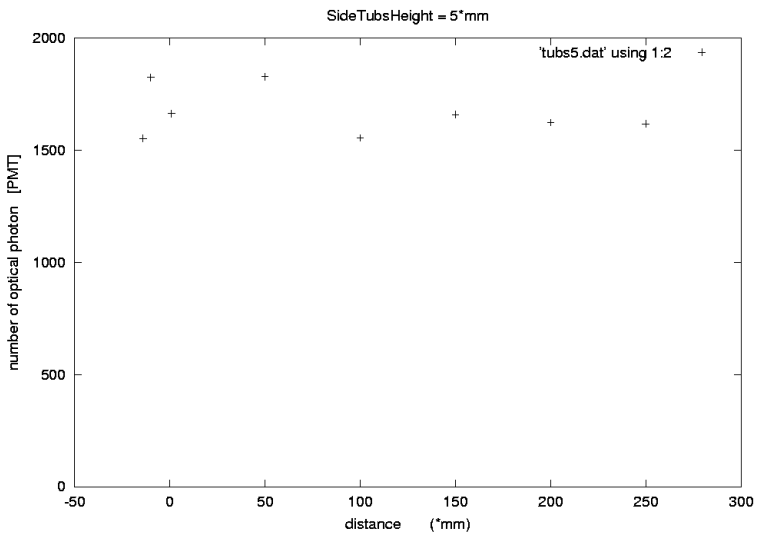


Figure 5.5: SideTubsHeight = 5*mm

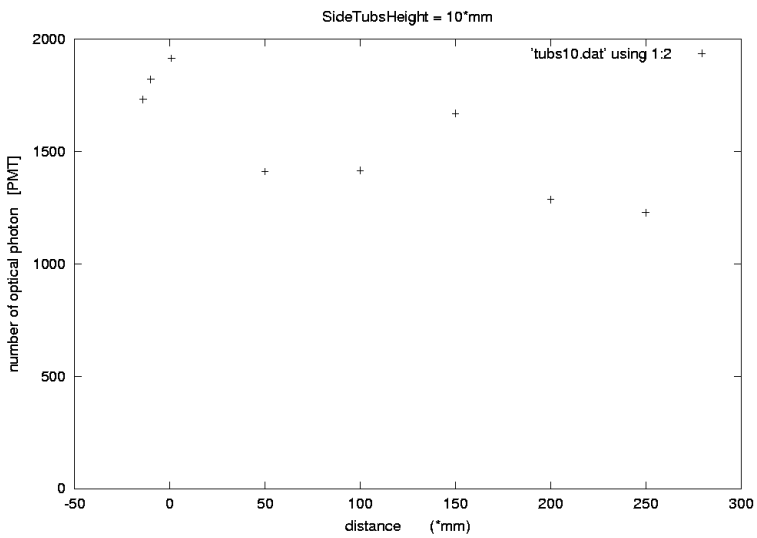


Figure 5.6: SideTubsHeight = 10*mm

この結果は、z が大きくなるにつれ、吸収された数が増えているのか減っているのかが、値がバラバラで分かりづらい。この原因として考えられることは、コンプトン散乱のように一部しかエネルギーを落さないものだとそもそもの photon の数が変わってしまう、というのも 1 つの要因であるが、optical photon をつくる入射ガンマ線が一つでも BGO を通り抜けてしまうと、全体では 10 発しか入射させていないので、できる optical photon の数に大きなズレがでてしまう、ということである。

そこで、試しに線源 (particleGun) の発生場所を BGO 内にいれてガンマ線を発射させてみたところ、ガンマ線は外に出なかったことが確認されたので、新しい設定として、線源 (paticleGun) の高さ 10*mm, 入射エネルギー 50keV, 線源の位置を (0, -10, z)、ガンマ線入射方向を [0, 0, -1] として、先と同様、Trap 内は 5*mm ずつ、Top 内では 50*mm ずつ線源をスライドさせて、シミュレーションを行った。このときの ScintillationYield は 12000./MeV とし, ABSORPTION の長さはかわらずエネルギー $\{3.1E-9*GeV, 4.1E-9*GeV\}$ にたいして $\{344.8*cm, 1450.0*cm\}$ とした。さらに Tubs の長さを 5*mm, 10*mm, 15*mm とかえてシミュレーションした。
ここで、入射エネルギーを 50keV としたのは、先の状態をかえることなく、同時にガンマ線が BGO から出ていかない (ガンマ線のエネルギーが低いため)、ための工夫である。その代わりシンチレーション光が少なくなってしまうので Yield を 12 倍にした。

5.5 シミュレーション結果

Tubs の長さを 5*mm, 10*mm, 15*mm とかえたときの、原点からの距離 z と PMT での optical photon の吸収された数との関係を表したグラフを図 5.7 ~ 5.9 に示す。

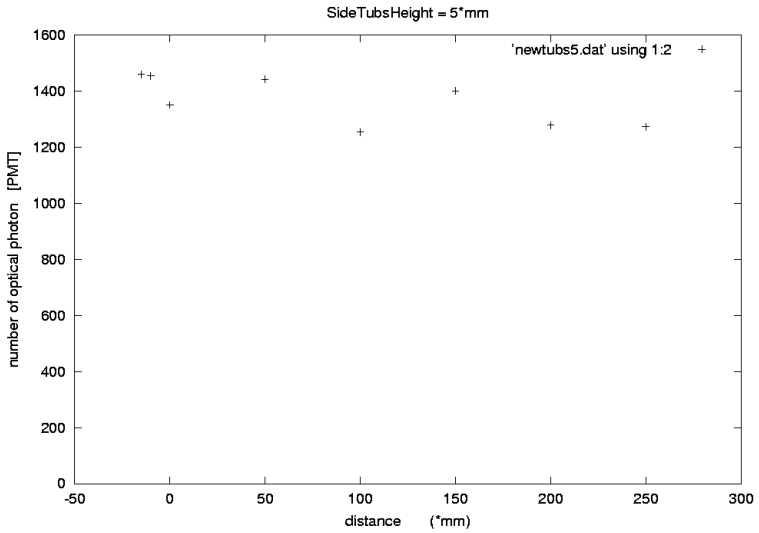


Figure 5.7: SideTubsHeight = 5*mm

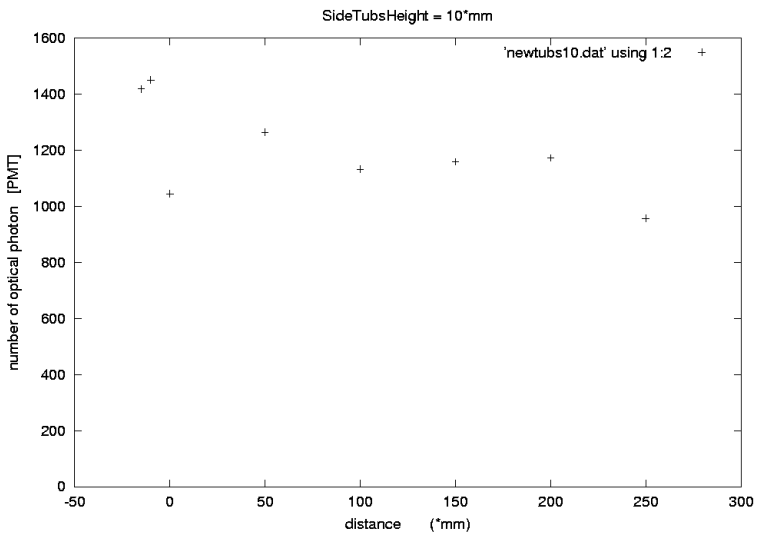


Figure 5.8: SideTubsHeight = 10*mm

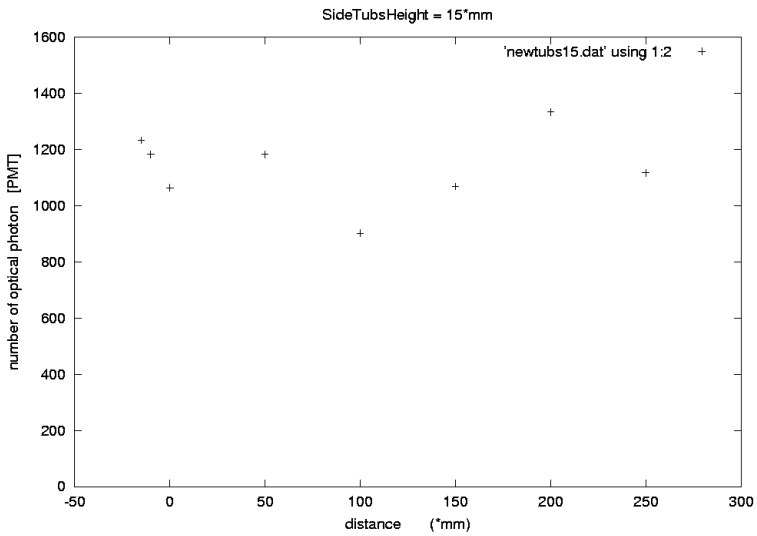


Figure 5.9: SideTubsHeight = 15*mm

データのバラつきは減ったものの、線源が原点から遠ざかるにつれて、PMT での optical photon の吸収された数が減ってしまうという、実験結果と全く逆の結果が得られた。また、Tubs の長さを短くすると PMT での optical photon の吸収の数は増えている。これは実験と同じ結果が得られた。これは Tubs の長さが短い程、生成された optican photon が受ける物理過程の回数が減り、BGO 内での吸収が少なくなるためであると考えられる。

ここで、前者の結果に対する原因の可能性として考えられることは、次の 2 点である。

- BGO 内での吸収率が低すぎるため (BGO はもう少し optical photon を吸収する可能性がある) に不確かな結果がでてしまったのではないか。
- 反射剤とはいえ、実際に 100 %の反射率は不可能ではないか。

したがって、前者の可能性を検証すべく、REFLECTIVITY=1.0 とその他の設定はかえず、ABSORPTION=300.*cm と短くして再シミュレーションを行い、後者の可能性を検証すべく、ABSORPTION=$\{344.8*cm, 1450.0.*cm\}$ とその他の設定はかえず、REFLECTIVITY=0.99 として再シミュレーションを行った。(Tubs=15*mm に固定、線源の位置 (0, -10, z) に対して、z= -15mm, 0mm, 100mm, 200mm についてシミュレートした)

その結果を図 5.10, 5.11 に示す。

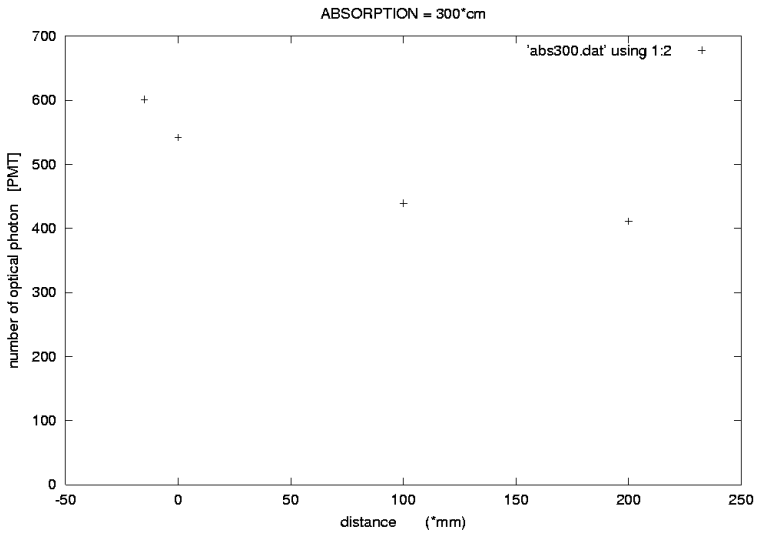


Figure 5.10: ABSORPTION = 300*cm

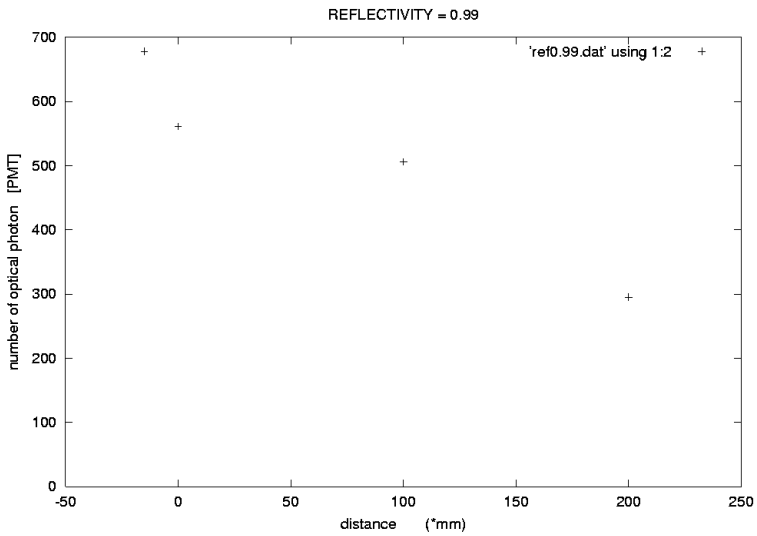


Figure 5.11: REFLECTIVITY = 0.99

グラフより、原点から遠ざかるにつれて減少する割合が前回よりも大きくなってしまった。

この結果は、PMT での optical photon の吸収される数がボトムから離れるにしたがって減少する傾向にある原因は、ABSORPTION の長さが長かったことや、反射剤の反射率が 100 % であったことではなかった、ということを示した。

では逆に ABSORPTION の長さが短いことにあるのではないか、という可能性が考えられるので、以下のように設定して直して再度シミュレーションを行った。

- REFLECTIVITY=1.0, ABSORPTION=2000.*cm と長くし、あとの設定はかえないまま、線源の位置 (0, -10, z) を z= -15*mm, 0*mm, 100*mm, 200mm とかえてシミュレートする。Tubs=15*mm と固定)

  これは、ABSORPTION の長さを長くすることにより、BGO での optical photon の吸収をできるだけ減らし、少しでも PMT に optical photon が到達できるようにしている。

この結果を図 5.12 に示す。

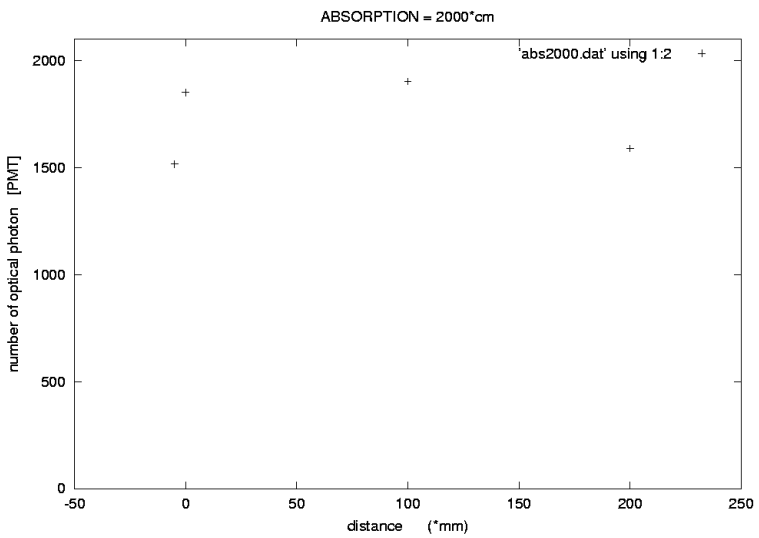


Figure 5.12: ABSORPTION = 2000*cm

グラフからも分かるように、PMT に optical photon が到達しやすくなったにもかかわらず、やはり、線源を原点から遠ざけるにつれて PMT で吸収される optical photon の数は減少していく、という結果が得られた。

5.6 今後の課題

以前行われた実験のシミュレーションをしたところ、実験とは異なる結果が得られた。この原因として考えられるのは、シンチレーター内での optical photon が本当に正確な物理過程をふんでいるかどうかである。本来ならば、BGO の境界面を通過しないとき、入射角が境界面垂直を基準として、角度が大きいときにはかなりの確率で前反射をするはずが、今回のシミュレーションでは背面反射や乱反射の割合が大きく、さらに BGO を通過し反射剤に到達したときも、本来ならばかなりの確率で乱反射をするはずが、今回のシミュレーションでは、100 %フレスネル反射をしている。つまり、Geant4 プログラム内の物理過程を再検討する必要があると言える。また、optical photon が PMT に到達する以前に、optical photon が生成されている時点ですでに optical photon の数が減少傾向にあるようにもみえており、動作自体もおかしい。

今後の課題としては、このようなことに重点をおいて再度プログラムを細かく見直していき、シミュレーションをできるだけ実験結果に近づけられる様に設定し直していくことが最重要であり、今後その新しく設定したプログラムを用いて、いろいろな geometry に関しての光伝播を研究していきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、数々の助言をしてくださった大杉節先生、深沢泰司先生に深く感謝致します。また、些細な問題にも全力投球で臨んで下さった緒方さん、水嶋さん、宇野さん、大戸さんをはじめとする研究室の先輩方にもたいへんお世話になりました。そして、同じ 4 年生として助言をしてくれただけでなく、精神的にも支えになってくれた佐藤さん、上田君、大野君、富永君、中本君、本当にありがとうございました。

Bibliography

[1] エリ．ランダウ，イエ．リフシッツ．訳 井上健男，安河内昇，佐々木健. 電磁気学 2. 東京図書株式会社, 1971．

[2] 山岡和貴．”Astro-E 硬 X 線検出器におけるシールド部の開発とトランジェント天体モニタへの応用”．東京大学，修士論文，1999，7．

[3] Geant4．(http://wwwinfo.cern.ch/asd/geant4/geant4.html).

[4] Geant4 日本グループ．(http://geant4.kek.jp/GEANT4/).

[5] 日本 Geant4 ユーザー会．(http://www.geant4.org/G4UserGroup/ja/index.html).

[6] Geant4User'sGuide-ForToolkitDevelopers .
(http://wwwinfo.cern.ch/asd/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/ForToolkitDeveloper/html/).

[7] PhysicsReferenceManual .
(http://wwwinfo.cern.ch/asd/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/PhysicsReferenceManual.html)