

GLAST 衛星 LAT 検出器の高速シミュレータ開発

芹野 裕理

修士論文

東京工業大学 理工学研究科

2005年 2月

要旨

GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) is a satellite which is developed with international cooperation scheduled to be launched in 2007. LAT (Large Area Telescope), the main detector of GLAST, has high sensitivity from 20 MeV to 300 GeV. LAT is composed of Tracker, silicon strip detectors which determines the gamma-ray direction by tracking electron-positron pairs, Calorimeter which consists of CsI crystals and captures electromagnetic shower to estimate the energy of gamma-rays, and Anticoincidence Detector.

Simulation study is essential for understanding the response of LAT, but it requires enormous time because of the huge number of particles in the shower. In this thesis, I developed a method to speed up the LAT simulator based on Geant4, a Monte Carlo simulation package written in C++. I succeeded to make it faster without degrading the precision by means of parameterization of the shower profile.

First, I evaluated two methods of parameterization: an example code included in the Geant4 package and GFlash, a library package for Geant4 released on December 17 2004. I found that both methods do not give results consistent with full Monte Carlo simulation. In GFlash, a difference of longitudinal shower profile was caused by a different formula for the “Critical Energy”. I substituted it with a suitable one. To correct the difference in the radial shower profile, I re-evaluated the parameters of the GFlash formulae by fitting the full-simulation results to the GFlash models.

Second, I applied refined GFlash to the simulator of LAT Calorimeter. With an adjustment to account for the filling factor of the real instrument to GFlash, I obtained a result consistent with a full simulation.

目次

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 第 1 章 | イントロダクション | 4 |
| 第 2 章 | 宇宙 線天文衛星 GLAST 塔載 LAT 検出器について | 6 |
| 2.1 | GLAST 衛星の概要 | 6 |
| 2.2 | 検出器各部について | 7 |
| 2.2.1 | Tracker | 7 |
| 2.2.2 | Calorimeter | 7 |
| 2.2.3 | Anti Coincidence Detector (ACD) | 7 |
| 第 3 章 | 宇宙放射線と検出器の相互作用のシミュレーション | 11 |
| 3.1 | モンテカルロシミュレーションの概要 | 11 |
| 3.2 | 相互作用シミュレーションツール Geant4 | 12 |
| 3.2.1 | Geant4 とは | 12 |
| 3.2.2 | Geant4 の問題点 | 12 |
| 第 4 章 | Geant4 によるシミュレーションの高速化 | 14 |
| 4.1 | 高速化の必要性 | 14 |
| 4.2 | 高速化の手法 | 14 |
| 4.2.1 | ジオメトリの簡略化 | 14 |
| 4.2.2 | cutoff length の説明 | 14 |
| 4.2.3 | profiling | 16 |
| 4.2.4 | parameterization | 17 |
| 4.3 | cutoff length による高速化 | 18 |
| 4.4 | 電磁シャワーの parameterisation | 22 |
| 4.4.1 | parameterization の理論 | 22 |
| 4.4.2 | parameterization による高速化 | 25 |
| 第 5 章 | まとめと今後の課題 | 49 |
| 付録 A | GFlash の使い方。 | 50 |

目 次

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | GLAST の完成予想図 | 6 |
| 2.2 | LAT の構成図 | 8 |
| 2.3 | 完成した Tracker の写真。 | 8 |
| 2.4 | 対生成のシミュレーション | 9 |
| 2.5 | Calorimeter の配置図 | 9 |
| 2.6 | ACD 用プラスチックシンチレータ | 10 |
| 3.1 | 計算時間の平均 | 13 |
| 4.1 | LAT ジオメトリ | 15 |
| 4.2 | プロファイルによる結果 | 17 |
| 4.3 | cutoff length による変化 1 | 19 |
| 4.4 | cutoff length による変化 2 | 20 |
| 4.5 | cutoff length による計算時間変化 | 21 |
| 4.6 | GFlash 評価用ジオメトリ | 26 |
| 4.7 | オリジナル GFlash の深さ方向シャワープロファイル | 26 |
| 4.8 | GFlash の修正結果 | 27 |
| 4.9 | 動径方向のプロファイルの GFlash との比較 | 28 |
| 4.10 | radial profile 評価のための CsI ジオメトリ | 29 |
| 4.11 | 1GeV 電子,layer15 での radial profile のフィッティング | 30 |
| 4.12 | 1GeV 電子,layer15(深さ 7.5cm) での radial profile のフィッティング | 30 |
| 4.13 | R_C のフィッティング | 31 |
| 4.14 | R_T のフィッティング | 31 |
| 4.15 | p のフィッティング | 32 |
| 4.16 | z_1 のプロット | 32 |
| 4.17 | z_2 のプロット | 33 |
| 4.18 | k_1 のプロット | 33 |
| 4.19 | k_2 のプロット | 34 |
| 4.20 | k_3 のプロット | 34 |

| | |
|--|----|
| 4.21 k4のプロット | 35 |
| 4.22 p1のプロット | 35 |
| 4.23 p2のプロット | 36 |
| 4.24 p3のプロット | 36 |
| 4.25 radial profileの修正結果 5GeV | 38 |
| 4.26 radial profileの修正結果 10GeV | 38 |
| 4.27 radial profileの修正結果 100GeV | 39 |
| 4.28 LAT CalorimeterにおけるCsI結晶の配置 | 40 |
| 4.29 GFlashのLAT Calorimeter適用結果 1GeV | 43 |
| 4.30 GFlashのLAT Calorimeter適用結果 10GeV | 44 |
| 4.31 GFlashのLAT Calorimeter適用結果 100GeV | 44 |
| 4.32 GFlashをLAT用にチューン後の結果 1GeV | 45 |
| 4.33 GFlashをLAT用にチューン後の結果 10GeV | 46 |
| 4.34 GFlashをLAT用にチューン後の結果 70GeV | 47 |
| 4.35 計算時間の平均 | 48 |

第1章 イントロダクション

宇宙には様々な光で満ちているが、大きく分けて二つに分類できる。熱的な放射によるものと、何らかの強力な加速機構によって加速された荷電粒子の非熱的な放射によるものである。現在の X 線天文学は 10keV 以下の撮像・分光観測を第一の目的としており、この領域では重力エネルギーで加熱されたプラズマからの放射が支配的である。一方で、10keV を越える硬 X 線やさらには MeV、GeV といった 線領域はパルサーやブラックホール天体、AGN、線バーストなどの非熱的放射が卓越し、宇宙における巨大加速器を探る重要なプローブになる。

特に近年、我々の宇宙に対する理解は劇的な発展をし続けているが、CGRO(Compton Gamma-Ray Observatory) 衛星 EGRET 検出器 (1991-1992) による 線の観測が残した功績は宇宙における様々な高エネルギー加速現象の存在を直接的に示したという点で非常に大きい。60 以上もの AGN(Active Galactic Nuclei) を発見し大質量ブラックホールの理解が大きく進むことになった。他にも電波をほとんど出さない 線パルサーや 線バーストの GeV まで延びる 線成分、等方的な 30MeV-100GeV での Extragalactic Diffuse Emmission、そして約 170 個の未同定天体の存在を明らかにした。

このように EGRET は様々な粒子加速機構が宇宙に存在することを示し、線天文学の大きな可能性を切り開くことになったが、一方で検出器の角度分解能や有効面積が十分であったとは言いがたい。多くの 線天体はその対応天体を特定することすらできず、現状で多くの謎を残している。より分解能が良く感度の良い次世代の 線望遠鏡衛星の登場が期待されることとなった。

GLAST(Gamma-ray Large Area Space Telescope) 衛星は EGRET が可能性を切り開いた 線天文学の大きな発展を促すことが期待されている。

| | EGRET | GLAST |
|-----------|----------------------|--|
| エネルギーバンド幅 | 20MeV - 30GeV | 20MeV-300GeV |
| 有効面積 | 1500 cm ² | 10,000cm ² at 10GeV |
| 視野 | 0.5sr | 2.4sr |
| 角度分解能 | 5.8 ° | 3.37 °(front)4.64 °(total) at 100MeV 0.086 °(front)0.115 °(total) at 100MeV |
| エネルギー分解能 | 10% | 9% |

表 1.1: EGRET と GLAST の性能比較

第2章 宇宙 線天文衛星 GLAST 塔載 LAT 検出器について

2.1 GLAST 衛星の概要

GLAST(Gamma-ray Large Area Space Telescope) [5] は国際的な協力の下に開発が進められており 2007 年に打ち上げ予定である。主検出器である LAT(Large Area Telescope) は検出器 (Tower) の 4×4 のアレイとバックグラウンド除去のための Anti Coincidence Detector から成り、1 つの Tower は大きさが $372\text{mm} \times 372\text{mm} \times 624.7\text{mm}$ であり、Tracker と Calorimeter で構成されている。Tower は天体からの 線の到来方向とエネルギーを測定するためのもので、Tracker 部では線を対生成させることによって生じた電子陽電子対をトラッキングし、Calorimeter ではそれらのエネルギーを測定する。

GLAST は一度に全天の 20% を視野に入れることができ、一つの天体に対し長期的な観測も可能である。また 線バーストのような突発的に生じる現象にも対応できる。そのような現象に対してより広範囲での視野をカバーするために GBM(GLAST Burst Monitor) という検出器も LAT とは別に GLAST に搭載される。



図 2.1: GLAST の完成予想図

2.2 検出器各部について

2.2.1 Tracker

Tracker は 5 種類合計 19 枚のトレイ状のモジュールを重ねるような形状で構成され、トレイはシリコンストリップ検出器や 線を電子陽電子対生成させるためのタングステン (W) などで構成される。

シリコンストリップ検出器は一般に高エネルギーの荷電粒子を高い精度でトラッキングするために高エネルギー加速器実験などで広く使われている。

そこで 線を対生成をさせ電子陽電子対をシリコンストリップ検出器でトラッキングすることで 線の方向を見積もることができる。また、対生成による粒子の軌跡をイベントとして採用するということは荷電粒子によるバックグラウンドの除去にもつながる。

高エネルギーの 線に対しては対生成の平均自由行程は

$$\lambda_{pair} \simeq \frac{9}{7} X_0 \quad (2.1)$$

となる (Leo [1])。最低限 1 回は対生成を起こさないとトラッキングはできない。しかし対生成のために必要以上に Tracker 全体の radiation length を大きくすると今度は電子陽電子がすぐに止まってしまうため特に低エネルギーでの位置分解能が悪くなってしまう。またエネルギー分解能にも響いてくる。一つの Tower に搭載される W の厚さの合計は $4.125\text{mm} = (0.723\text{mm} \times 4 + 0.105\text{mm} \times 12)$ であり、radiation length(X_0) に換算すると $1.08X_0$ になる。これは対生成を起こし、なおかつ分解能への影響を最小限に押えるために見積もられた値である。

2.2.2 Calorimeter

Calorimeter は 8 つのトレイから成り、1 つのトレイは 12 本の CsI(Tl) 結晶から構成される。無機シンチレータの利点は高い密度と高い原子番号による放射線の阻止能の高さにある。その中でも CsI(Tl) はシンチレーション光が比較的多くエネルギー分解能が良好なこと、またシンチレーション光の波長が光の読み出しに使われるフォトダイオードに合っていることから用いられる。

図 2.5 からわかるように棒状の CsI 結晶がレイヤー毎に 90 度ずつ向きを変えて並べられている。これによってシャワーの発展が縦方向にも横方向にもわかるようになっている。

LAT Calorimeter に使われている CsI 結晶は高さ 19.9mm。レイヤ 8 つ分の CsI 結晶だけの縦方向の radiation length に換算した厚さはおよそ $8.6X_0$ となる ($X_0 = 18.5\text{mm}$)。

2.2.3 Anti Coincidence Detector (ACD)

ACD は莫大な量の荷電粒子バックグラウンドを除去するためにある。線領域では天体からのシグナルに比べバックグラウンドが膨大なためこれらをいかに効率良く除去するかが鍵となる。

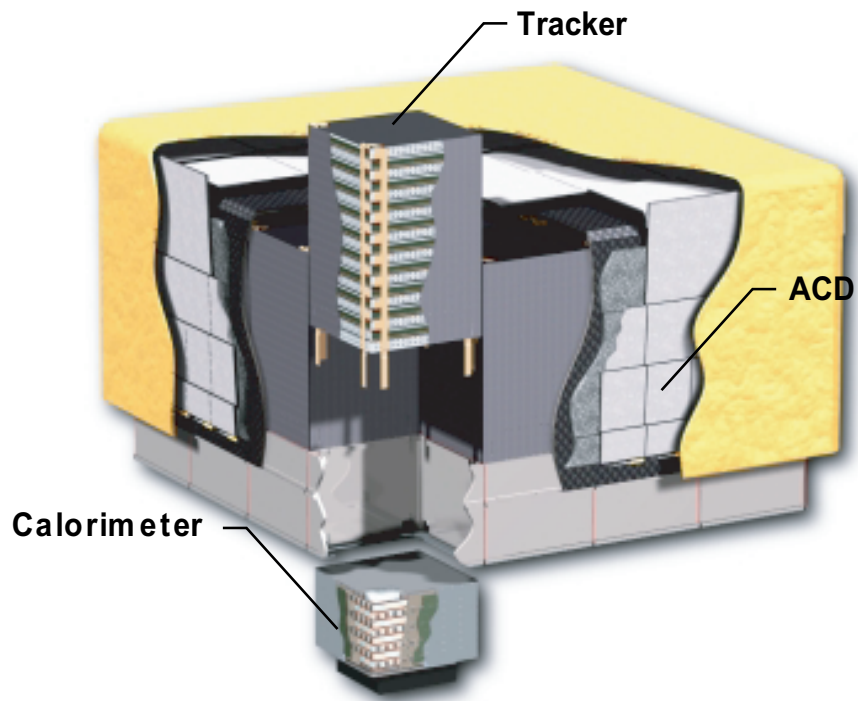


図 2.2: LAT の構成図。Tracker と Calorimeter から成る Tower が 4×4 あり、その周りをタイル状のプラスチックシンチレータで構成された ACD で囲んでいる。

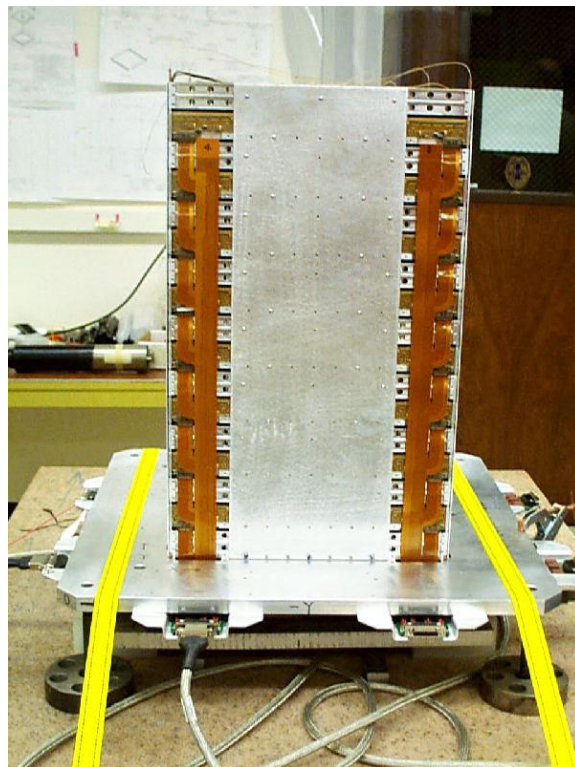


図 2.3: 完成した Tracker の写真。

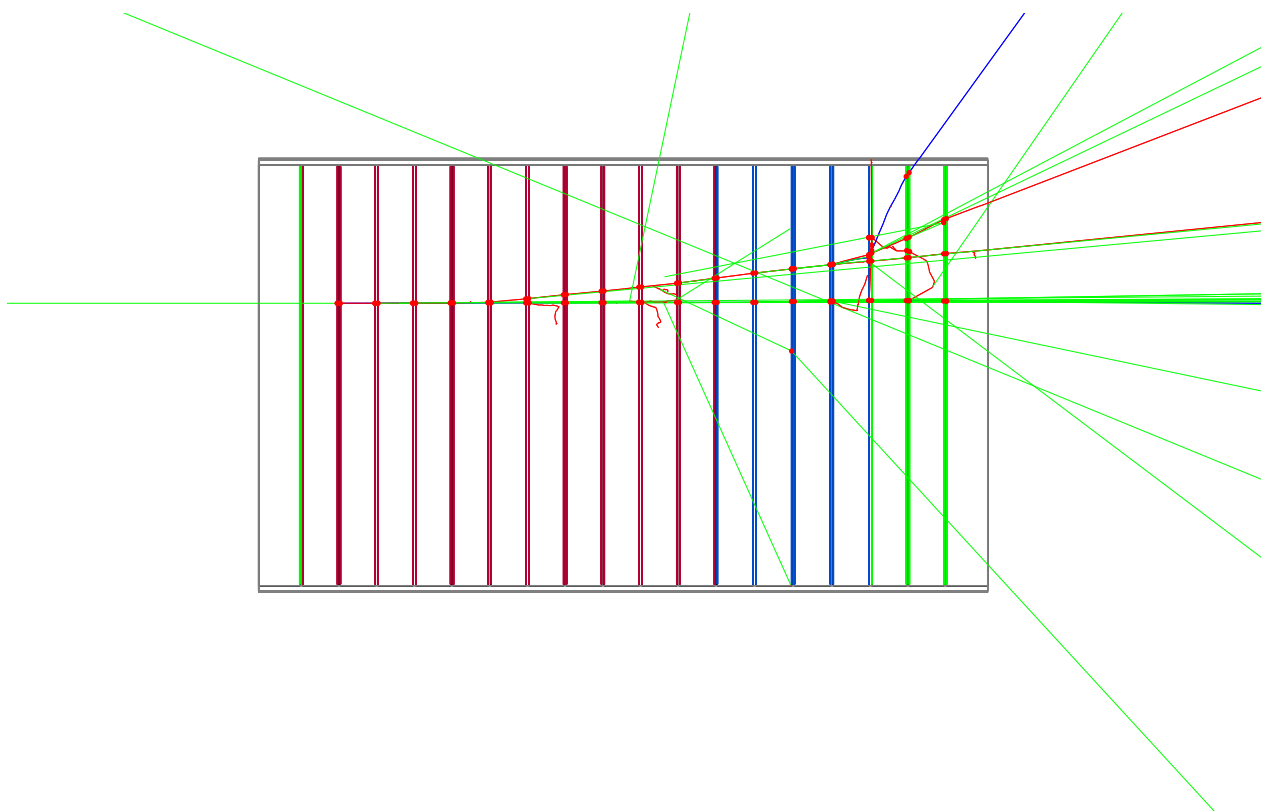


図 2.4: Tracker に 線を左から垂直に入射させ対生成したシミュレーションの図。右側にカロリメータがあることになる。赤の点がシリコンにエネルギーを与えた点。実際の観測では赤い点から 線の到来方向を見積もることになる。この後、これらの粒子はカロリメータで止まり、エネルギーを見積もられる。粒子の軌跡は赤が電子、青が陽電子、緑が 線である。



図 2.5: Calorimeter の配置図。棒状の CsI 結晶がレイヤー毎に 90 度ずつ向きを変えて並べられている。

特に GLAST は広い視野を持つので、視野外からのバックグラウンドを取り除くことが本質的である。

検出器はタイル状のプラスチックシンチレータから構成されている。



図 2.6: ACD に使われるプラスチックシンチレーターと wavelength-shifting fiber

第3章 宇宙放射線と検出器の相互作用のシミュレーション

3.1 モンテカルロシミュレーションの概要

乱数を用いた統計的な計算法はモンテカルロ法と呼ばれ、理論・実験の各方面で重要な手段となっている。素粒子や原子核の実験を行う場合、高エネルギー粒子の吸収・散乱等の物質との相互作用は確率で記述されるため、測定器の立体角、検出効率、測定精度などを定量的に見積もる上でモンテカルロシミュレーションをは欠かす事ができない。

例えば、粒子を検出器に打ち込んだ時、中でどのように散乱しエネルギーを失い、どのようなエネルギー分布を構成するか、或いは検出器から何割が洩れ出すかといったような疑問は、実験の話題に限らず普遍的なものである。仮にその現象を記述する個々のプロセスが良く知られていたとしても、系全体を直接計算する事は難しい。そこで個々のプロセスが起こる確率の比に従って乱数を発生させ、多数回の試行を行う事によって実際の現象をシミュレートする。

通常のアプローチとして理論が予測する事象が実験装置でどの様に観測されるかをシミュレートする。これと観測結果を比較して、物理的な考察を行う為に用いられている。

疑似乱数

計算機でモンテカルロシミュレーションを実行する際には、各種の分布法則に従う確率変数の実現値とみなされるような数値の系列 (乱数列) が必要である。基本となるのは区間 $(0,1)$ の一様分布に従う確率変数である。

計算機で乱数列を生成させる場合は、一様分布の近似として、ある種のアルゴリズムに従い規則性をできるだけ除いた数列 (疑似乱数列) を発生させる事になる。これにより決定論的なコンピュータの計算に確率の要素を含ませる事ができる。

良質な疑似乱数を用いる事は、モンテカルロシミュレーションでは大規模なものほど重要である。コンピュータの中では何らかの計算法に従って疑似乱数を発生させているが、その計算法によって疑似乱数の質に大きな違いが生じる。質の悪い疑似乱数列は、それぞれの疑似乱数の相関が強く独立性が悪いなどの問題がある。このため、疑似乱数発生にあたっては、乱数の周期、偏りなどについて十分にチェックされたルーチンを使うべきである。

なお、後述する Geant4 ではあらかじめ数種類の疑似乱数列を生成するクラスライブラリが用意されている。

3.2 相互作用シミュレーションツール Geant4

3.2.1 Geant4 とは

Geant4 [3] とは、高エネルギー・原子核実験だけでなく、宇宙科学、放射線医学などの分野も視野に入れて開発された粒子と物質の相互作用シミュレーションを行なうためのツールキット (C++ クラスライブラリ) である。

Geant4 の前身である GEANT3 は 1980 年代に CERN を中心とするメンバーによって、FORTRAN 言語を用いて開発された。GEANT は GEometry ANd Tracking の略である。GEANT3 は、多くの実験で標準の測定器シミュレータとして使われるようになり、現在では世界で最も広く使用されているシミュレータの 1 つである。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ってきた。それに伴い、従来のソフトウェア開発技法で新しい機能を追加し膨大なソースコードを維持管理することは困難になってきた。

そこで、ソフトウェア開発技術の分野で近年注目を集めているオブジェクト指向技術を適用すれば、予想される機能の発展性や様々なユーザへの多様な対応性、保守性などを無理なく実現できると考えられ、オブジェクト指向言語 C++ を用いて国際的コラボレーションの下で研究開発された。現在も保守、機能の追加が行われている。

3.2.2 Geant4 の問題点

Geant4 は一つ一つの高エネルギー粒子が物質と行う相互作用をシミュレートすることで幅広い用途に対しユーザーの労力を軽減する非常に有効なツールである。しかし、例えば電磁シャワーのような粒子を大量に発生させるような現象を伴う実験をシミュレートする場合、粒子の数だけシミュレートする時間が増大してしまう。理想的な計算時間で目的とするシミュレーションが終らないなど、目的によっては利便性に欠けてしまうことがある。

図 3.1 は LAT Calorimeter に様々なエネルギーの電子を入射させた時に 1 イベントにかかった平均時間である。入射電子のエネルギーが高くなるほど電磁シャワーを起こし生成される粒子の数が増え、計算時間もかかる。

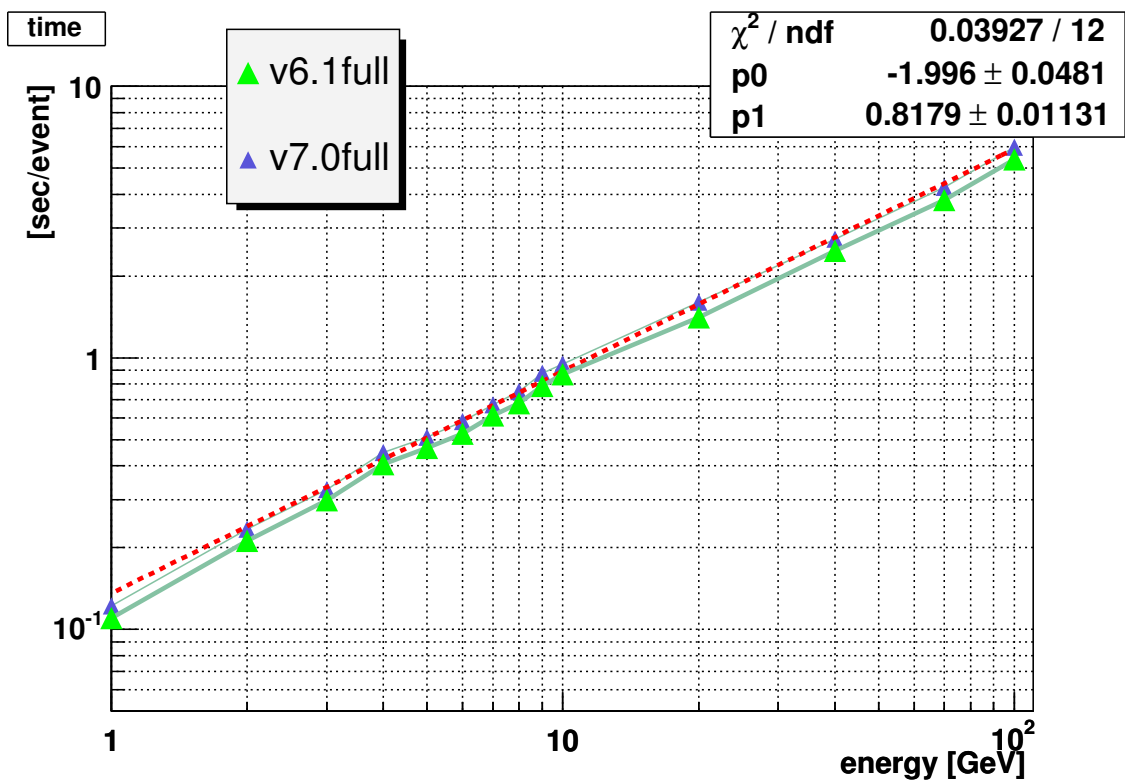


図 3.1: Calorimeter のジオメトリに入射させた電子のエネルギーに対して 1 イベントにかかる時間の平均。CPU は Intel Xeon 2.8GHz。緑の大きい が Geant4 バージョン 6.1。青の小さい がバージョン 7。7 の方がわずかに時間がかかっている。赤い破線はバージョン 7 を $y = \exp(p_0 + p_1 \times \ln x)$ でフィッティングした結果。

第4章 Geant4によるシミュレーションの高速化

4.1 高速化の必要性

LAT Tracker は高い位置精度での粒子検出を目的としているため、シミュレーションにおいても精度を著しく落とすことができない。また LAT Calorimeter は CsI シンチレータを使っており、CsI は有効原子番号が $Z_{eff} = 54$ と大きいため高エネルギー粒子が入射すると電磁シャワーを起こす。したがって計算時間はそこで多く費されることになる。このように LAT と高エネルギー粒子との相互作用シミュレーションは多くの時間が必要とされる。

しかし、実際の長期間の衛星軌道上でのシミュレーションを考慮するとターゲットとする線イベント以外にもバックグラウンドの荷電粒子などの数多くのイベントをシミュレートする必要も出てくる。そのような状況では粒子や検出器の物質に応じて計算精度を必要最低限のものに絞り込むなどをし、計算時間をできる限り短縮されることが要求される。

そこで今回 LAT シミュレータの高速化に関する研究を行った。

4.2 高速化の手法

4.2.1 ジオメトリの簡略化

粒子と検出器との相互作用をシミュレートする際、可能な限り検出器の構造を反映することが原則である。しかし Geant4 では検出器のジオメトリを細かく記述する程、粒子をトラッキングする際のステップが細かくなり計算時間が増加することは避けられない。したがって計算結果に本質的に影響せず計算時間を不必要にかけたくない部分はジオメトリを簡略化することにより計算時間を短縮することが可能である。響をしないとわかっているジオメトリを省き構造を簡略化することにより計算時間を短縮することが可能である。

今回のシミュレーションで用いる LAT のジオメトリは図 4.1 のようになっている。

4.2.2 cutoff length の説明

Geant4 における cutoff length とは、ある粒子が 2 次粒子を生成する相互作用を起こした時に実際に 2 次粒子を生成し追ってシミュレートするかどうかを決める Production Threshold のこと

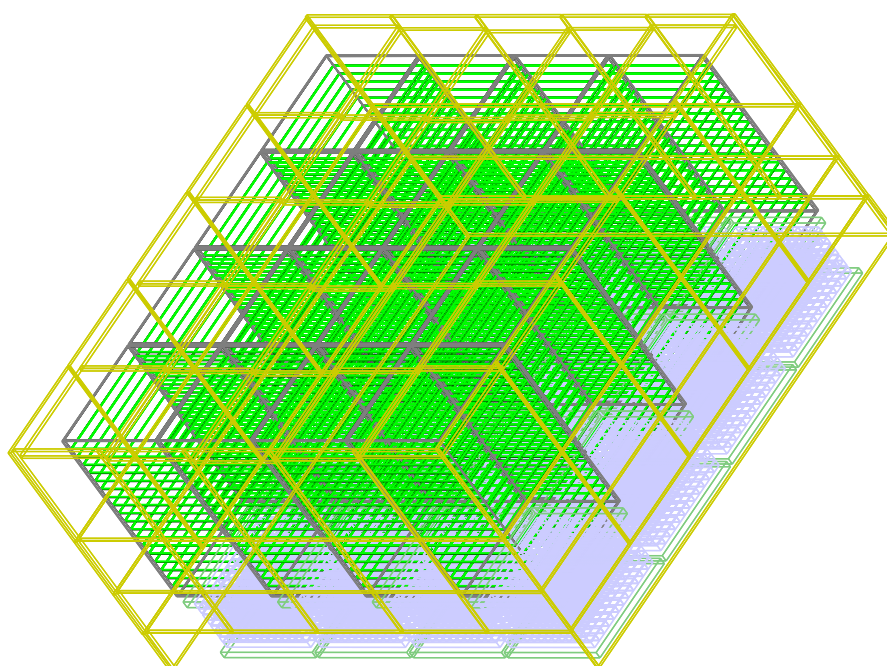
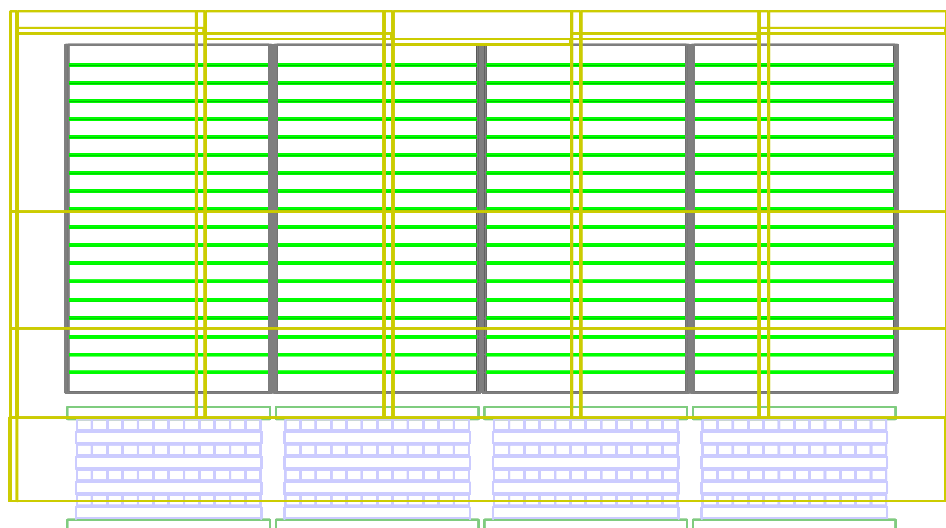


図 4.1: (上) 全体のジオメトリ。黄色の部分^が ACD。緑^が Tracker。下の白い部分^が Calorimeter。
(下) 斜めから見た図。

| | 時間 (秒) | 回数 |
|-----------------------|---------|------------|
| G4Transportation | 2242.41 | 2832652007 |
| G4VMultipleScattering | 1248.65 | 450513015 |
| G4VEnergyLossProcess | 1178.95 | 333925303 |
| G4PhotoElectricEffect | 319.21 | 257295882 |
| G4ComptonScattering | 148.24 | 255132826 |
| G4GammaConversion | 105.79 | 24674846 |

表 4.1: step 毎に行われた粒子の相互作用の時間と回数。反応一回の時間よりも反応の回数が時間に効いていることがわかる。

である。他の一般的な手法ではこのような値は粒子のエネルギーで定義することが多いが、実際にシミュレーションしたい精度は検出器のサイズ (つまり、長さ) を基準にして決まることが多く、Geant4 では長さで Production Threshold を決めることができるようになっている。具体的には、ある相互作用で粒子が 2 次的に発生した際、その 2 次粒子が物質中を cutoff length 以上走れるエネルギーを持っていない場合は 2 次粒子は計算上生成されない。その代わりに、割り当てられるはずだったエネルギーはその相互作用を起こした位置に落とされる。これによって異なる物質や粒子によって最小ステップの長さがばらばらになるようなことなく、一貫したな扱いが可能である。なお、cut-off length は粒子の種類や物質 (Geant4 での Logical Volume) 毎に設定することが可能である。これにより、適切な値を物質ごとに選ぶことでシミュレーションの精度を落とすことなく計算時間を短縮することが可能である。

例えば Calorimeter では、エネルギーを測定するための検出器という性質上それほどの位置精度は必要とされない。そこで cutoff length を必要な精度を保ちつつ長めに設定することによって計算速度の向上を期待することができる。

4.2.3 profiling

一般的なソフトウェアのデバッグ方法の一つとして、プロファイリングという手法がある。これによりソフトがどの関数をどれだけ呼ぶことによってどれだけ時間がかかっているか、を定量的に見積もることができる。

Geant4 でプロファイラ (gprof) を使うには環境変数 G4PROFILE を 1 に設定して Geant4 をビルドすればよい。

例として、図 4.1 の上から垂直に Tracker の中心に当たるように 100GeV の電子を 10000 回打ち込んだ結果は図 4.2 のようになった。

またステップ毎に行われている反応を見てみると表 4.1 のようになった。反応一回の時間よりも反応の回数が時間に効いていることがわかる。したがって粒子の数を減らすような工夫、あるいは粒子のステップの数を減らすような工夫が計算時間短縮につながるということがわかった。

100.GeV-1.mm10000events

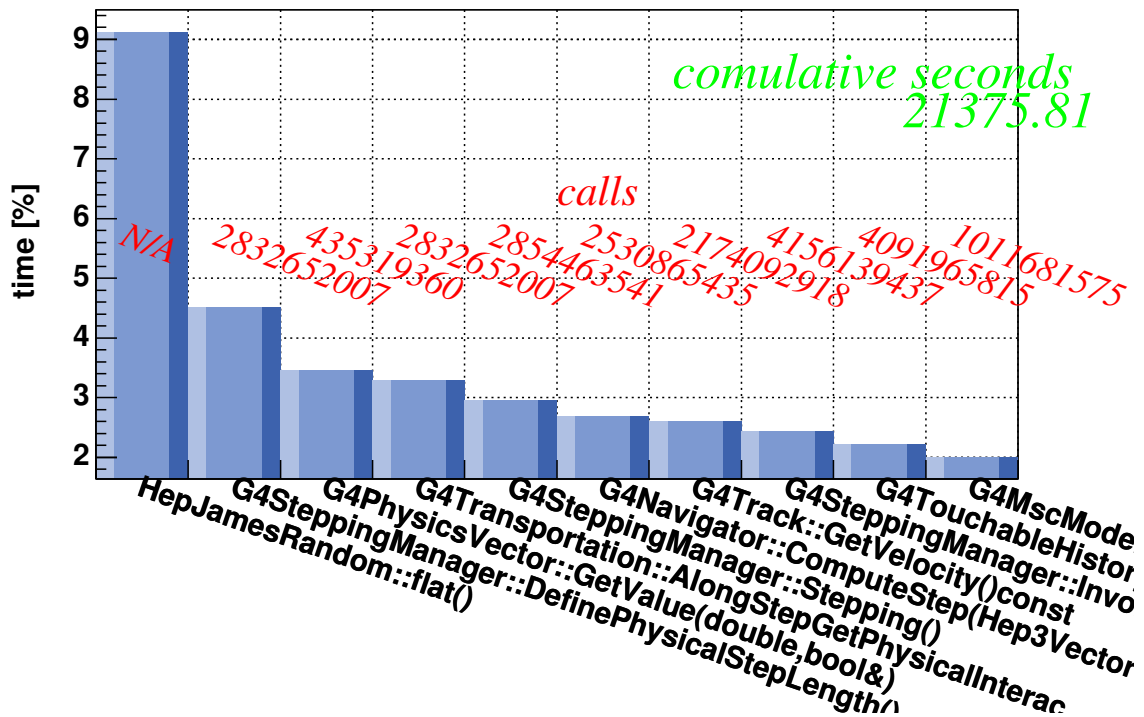


図 4.2: LAT のジオメトリに 100GeV の電子を 10000 回入射させた時の、gprof による時間がかかった関数上位 10 個。1 番時間がかかっているのは乱数を生成する関数。また他の関数も粒子のいかなるステップの計算においても使われるものである。

4.2.4 parameterization

電磁シャワーのような莫大な量の粒子を発生させるような現象においては統計的な情報が十分であるため、エネルギー損失の分布などが入射粒子のエネルギー、粒子が入射する物質の原子番号などといった数種の物理量をパラメータとしてモデル化することができる。そのことを parameterization という。電磁シャワーの parameterization は宇宙線分野において古くから使われていた手法である。

今回用いた parameterization の手法については後述する。

4.3 cutoff length による高速化

4.2 中でも述べたように、cutoff length を最適化することにより精度を保ちつつ計算する粒子の数を減らし計算速度の向上を図ることができる。図 4.1 のような LAT のジオメトリにおいて cutoff length を変化させることによって計算速度がどのように変わるかを調べた。

具体的には、cutoff length 0.01mm,0.1mm,1mm,10mm,100mm で様々なエネルギーの電子を図 4.1 の上から Tracker 部に向けて垂直に入射させた。結果は図 4.3-4.4 のようになった。図の 4.4 の”difference” は

$$\frac{(\text{other cutoff energy deposit}) - (0.01\text{mm cutoff energy deposit})}{0.01\text{mm cutoff energy deposit}} \quad (4.1)$$

で定義される。100mm 以外は図 4.3 では重なってしまっている。cutoff length が 10mm までは 0.01mm のデータを基準におよそ ± 0.01 倍のずれの範囲で合うことがわかった。

また cutoff length を変化させた時に、計算時間がどのように変化するかが図 4.5 である。これを見ると 0.1mm,1mm,10mm の計算速度は 0.01mm の 2 倍前後になっていることがわかる。これより 0.1mm,1mm,10mm のどれかを使うのが良いと思われる。図 4.4 に見られるような精度の変化があるので、必要に応じて使い分けるのもよいであろう。

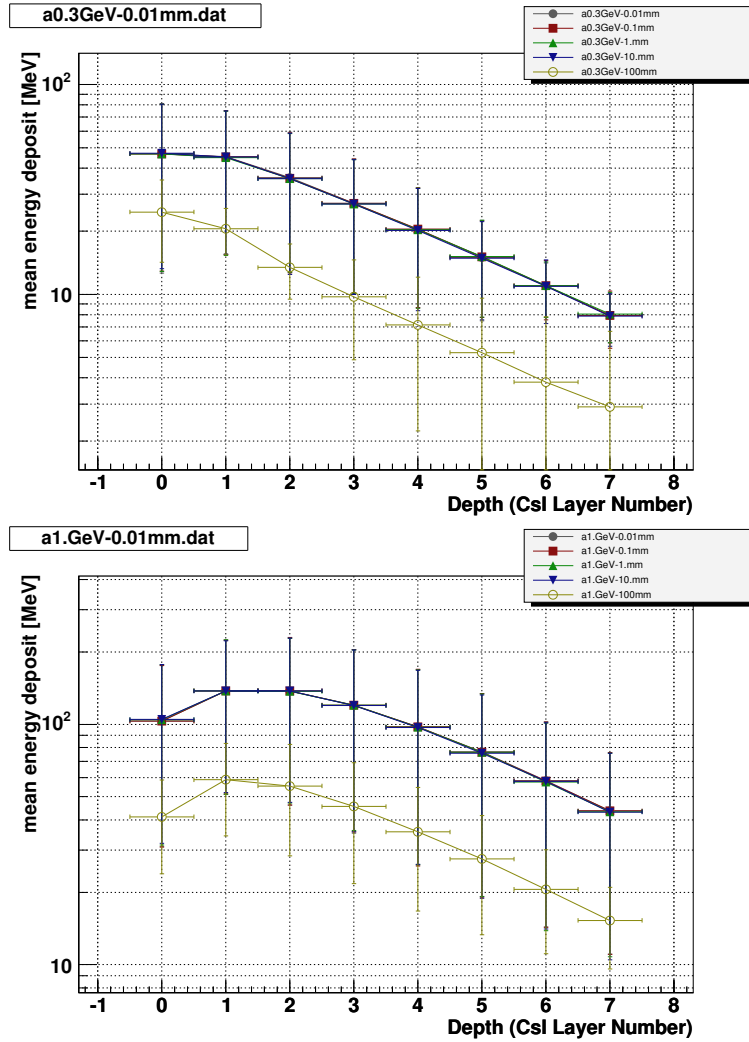


図 4.3: 0.3GeV を Tracker に垂直に打ち込んだ (上)。1GeV を Tracker に垂直に打ち込んだ (下)。cutoffはそれぞれ、 θ が 0.01mm。 θ が 0.1mm。上向き θ が 1mm。下向き θ が 10mm。 θ が 100mm。100mm にしたものの以外はみな重なってしまっている。

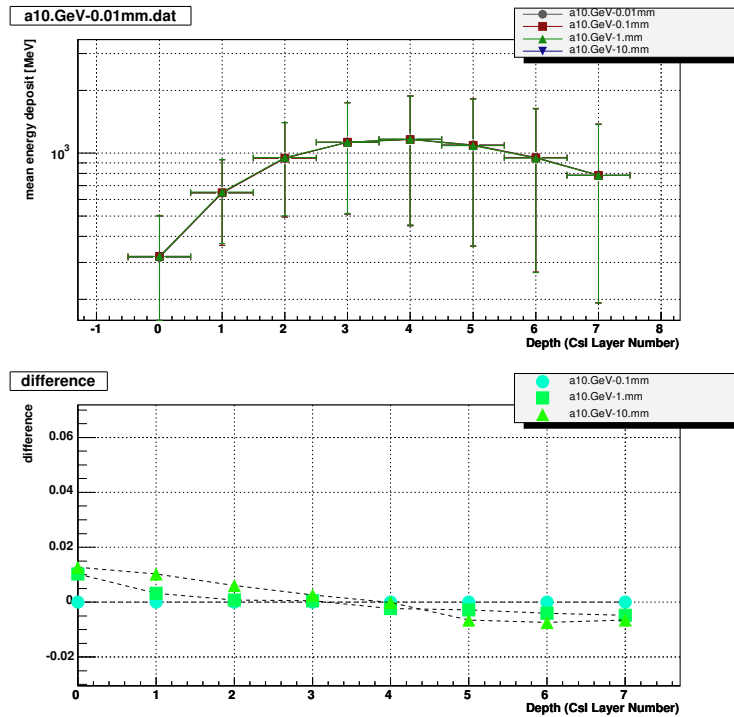


図 4.4: 上図は 10GeV 電子を Tracker に垂直に打ち込んだ時の Calorimeter のレイヤー毎の平均エネルギー損失。見方は図 4.3 と同様。但し、100mm のデータは省略した。これを見ると 0.01mm や 0.1mm の cutoff のエネルギー損失に比べ 1mm や 10mm の場合ファクター 0.01 程度のエネルギー損失が浅い方のレイヤーでより多く起きていることがわかる。これは本来生成される 2 次粒子がエネルギーが低く cutoff length 以上動けなかったため早い段階 (浅いレイヤー) エネルギー損失したと考えられる。

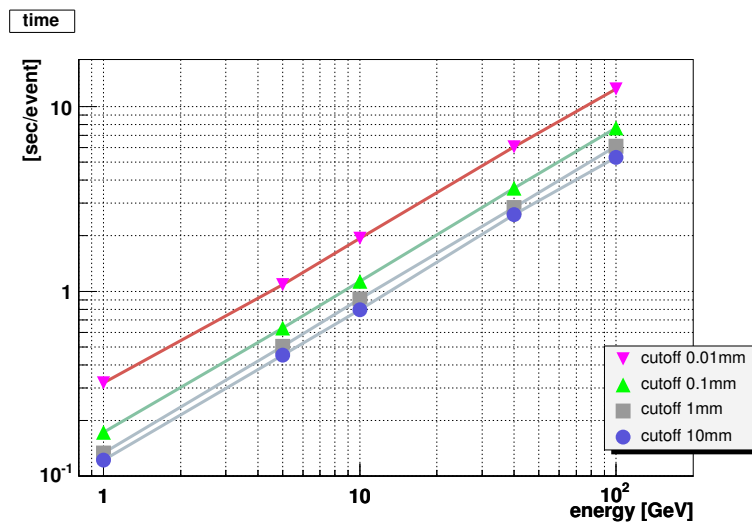


図 4.5: cutoff length による計算時間変化。下向き は 0.01mm。上向き は 0.1mm。 は 1mm。 は 10mm。

| Symbol | Definition | Value |
|-----------|---|---------------------------------------|
| α | 微細構造定数 ($e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$) | 1/137 |
| $m_e c^2$ | 電子質量 | 0.511 MeV |
| r_e | 古典電子半径 ($e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$) | 2.82 fm |
| N_A | アボガドロ数 | $6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ |
| Z | 原子番号 | |
| A | 原子質量 | |

表 4.2: この章で使う物理量の定義 (Leo [1])。

4.4 電磁シャワーの parameterisation

4.4.1 parameterization の理論

4.2でも触れたように、電磁シャワーの parameterization は電磁シャワーのエネルギー損失分布をモデル化することにより行う。ここではそのモデルおよびモデルに必要な物理量について述べる。この節で使う基本的な物理量および物理定数は表 4.2 である。

radiation length X_0

高エネルギーの電子は物質中を通過する際のエネルギー損失は制動放射によるものが支配的となる。radiation length X_0 は電子が制動放射によってエネルギーを $1/e$ に失うまでにその物質中を通過できる距離のことである。

Leo [1] によると、 X_0 は

$$\begin{aligned} \frac{1}{X_0} &= 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} \{Z^2 [L_{\text{rad}} - f(Z)] + Z L'_{\text{rad}}\} \\ &= \frac{716.408}{A} \{Z^2 [L_{\text{rad}} - f(Z)] + Z L'_{\text{rad}}\} \end{aligned} \quad (4.2)$$

で書ける。ここで $L_{\text{rad}}, L'_{\text{rad}}$ は $Z > 4$ の時それぞれ $\ln(184.15Z^{-1/3}), \ln(1194Z^{-2/3})$ で書ける。また $f(Z)$ はウランまでの元素に対して $a = \alpha Z$ として

$$f(Z) = a^2[(1 + a^2)^{-1} + 0.20206 - 0.0369a^2 + 0.0083a^4 - 0.002a^6] \quad (4.3)$$

と書ける。

電磁シャワーの縦方向のプロファイルは物質によってスケールが変化するが、radiation length で規格化することによって統一的に表すことができる。

Geant4 においても radiation length は式 (4.2) を使って求めている。

なお CsI における radiation length は 1.85cm である。

critical energy E_c

電子のエネルギー損失は、電子が低エネルギーの状態ではクーロン散乱による衝突による損失、高エネルギーでは制動放射による損失が支配的であるが、両方のエネルギー損失が等しくなるような時の電子のエネルギーを critical energy (E_c) という。

一般的に

$$E_c = \frac{800MeV}{Z + 1.2} \quad (4.4)$$

とされている (Leo [1])。また The Review of Particle Physics [2] によると液体、固体の物質に関しては

$$E_c = \frac{610MeV}{Z + 1.24} \quad (4.5)$$

という式が実験値と合うとされている。

Moliere Radius R_M

Moliere Radius R_M を用いて 電磁シャワープロファイルの半径を規格化すると様々な物質でのプロファイルを統一的に書くことができる (Leo [1])。

$$R_M = X_0 \frac{E_s}{E_c} \quad (4.6)$$

である。ここで E_s は scale energy $\sqrt{4\pi/\alpha}m_e c^2 = 21.2052MeV$ 。

なお、CsI における Moliere Radius は 3.5cm である。

電磁シャワーによるエネルギー損失

電磁シャワーにおけるエネルギー損失の空間分布は 3つの確率密度関数で書くことができる。

$$dE(r) = E f(t) dt f(r) dr f(\phi) d\phi \quad (4.7)$$

ここで、 t は X_0 で規格化した深さ、 r は R_M で規格化した半径の大きさ、 ϕ は方位角である。

深さ方向のシャワープロファイル $f(t)$ は

$$f(t) = \frac{(\beta t)^{\alpha-1} \beta \exp(-\beta t)}{\Gamma(\alpha)} \quad (4.8)$$

とガンマ分布で書けることが知られている (Leo [1])。

また、半径方向のシャワープロファイルは Grindhammer [4] によると $0 \leq p \leq 1$ とするとき

$$f(r) = p \frac{2rR_C^2}{(r^2 + R_C^2)^2} + (1-p) \frac{2rR_T^2}{(r^2 + R_T^2)^2} \quad (4.9)$$

と書ける。ここでパラメータ R_C, R_T, p は Grindhammer [4] によると深さを示す変数 τ によって書け、

$$R_C(\tau) = z_1 + z_2\tau \quad (4.10)$$

$$R_T(\tau) = k_1 \{ \exp(k_3(\tau - k_2)) + \exp(k_4(\tau - k_2)) \} \quad (4.11)$$

$$p(\tau) = p_1 \exp \left\{ \frac{p_2 - \tau}{p_3} - \exp \left(\frac{p_2 - \tau}{p_3} \right) \right\} \quad (4.12)$$

と表すことができる。

方位角方向のシャワープロファイルは一様で $f(\phi) = 1/2\pi$ と想定される。

4.4.2 parameterization による高速化

Geant4 の付属例”N05”

Geant4 には多数のシミュレーション例としてのソースコードが付属している。その中で電磁シャワーの parameterization を扱っているもの (novice exampleN05) がある。

N05 で使っている電磁シャワーにおけるエネルギー損失の空間分布の式は、縦方向に関しては式 (4.8) を用いる。また半径方向に対しては式 (4.9) ではなく、

$$f(r) = \begin{cases} 0.9 & (0 \leq r \leq 1R_M) \\ 0.1 & (1R_M < r \leq 3.5R_M) \end{cases} \quad (4.13)$$

を用いている。90%のエネルギーを半径0から $1R_M$ の間に一様に検出器に与え、残りの10%を半径 $1R_M$ - $3.5R_M$ の間に一様に与えるという簡略化された扱いとなっている。これは Leo [1] の記述にもとづいた計算となっている。

エネルギー損失の空間分布は上述の式によって与えられる3次元の確率密度関数に従う乱数を用いて座標を決め、入射粒子のエネルギーを100等分した仮想のエネルギー損失を配置する。

GFlash

2004年12月17日に Geant4 バージョン 7.0 がリリースされ、その中に GFlash という parameterisation を用いて高速の電磁シャワーをシミュレートするライブラリが加わった。これは Grindhammer [4] の手法を厳密に再現したものである。

各 parameterization の評価

フルシミュレーションとの正確な比較を行うため、LAT Calorimeter とは別の CsI 結晶のジオメトリを用意し (図 4.6) 様々なエネルギーの電子を入射した。円柱状の形に同心円状のレイヤーを用意したのは、電磁シャワープロファイルが式 (4.7) のように円柱座標の式でかかっているためである。これによって動径方向のプロファイルが式 (4.9) 用いて評価できることになる。

各 parameterization とフルシミュレーションの深さ方向のシャワープロファイルに関する比較を行った (図 4.7 は 10GeV の電子を入射したもの)。“N05” は良く合っている。フルシミュレーションと GFlash とでピークのずれがあることがわかる。この傾向は他のエネルギー (0.3-100GeV) の電子を入射した場合にも見られた。その原因を調べ、GFlash の修正を試みた。

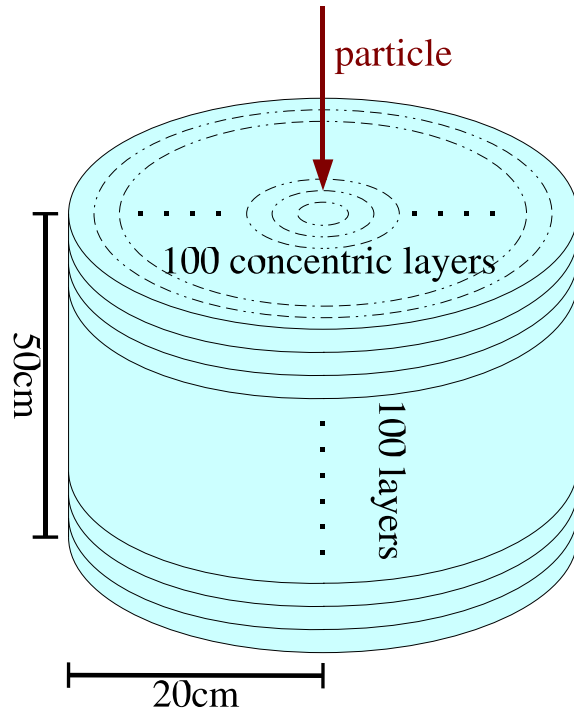


図 4.6: GFlash とフルシミュレーションとの比較に用いた CsI 結晶のジオメトリ。深さ方向に 100 のレイヤ、動径方向に 100 のレイヤを用意した。

a10.GeV-0.1mmCsIfull longitude

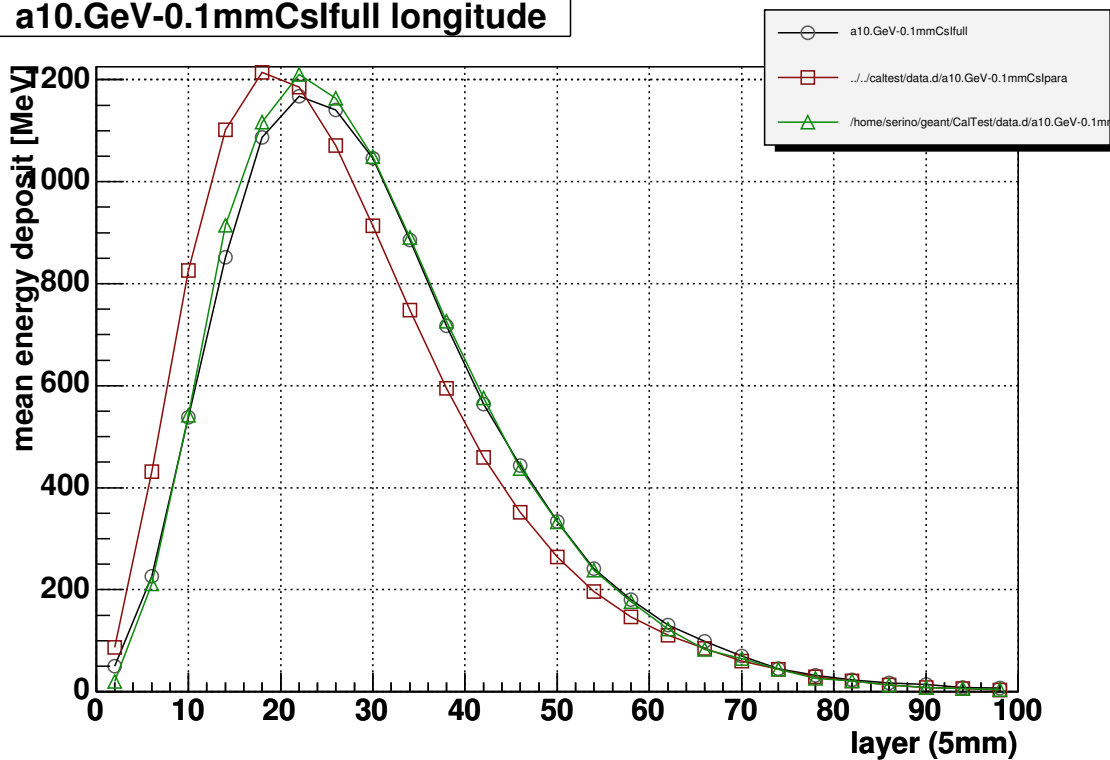


図 4.7: 10GeV の電子を図 4.6 に入射したときの深さ方向のエネルギー損失分布を比較した。Full Simulation()。オリジナル GFlash()。ExN05()。フルシミュレーションと GFlash とでピークの位置のずれがあることがわかる。

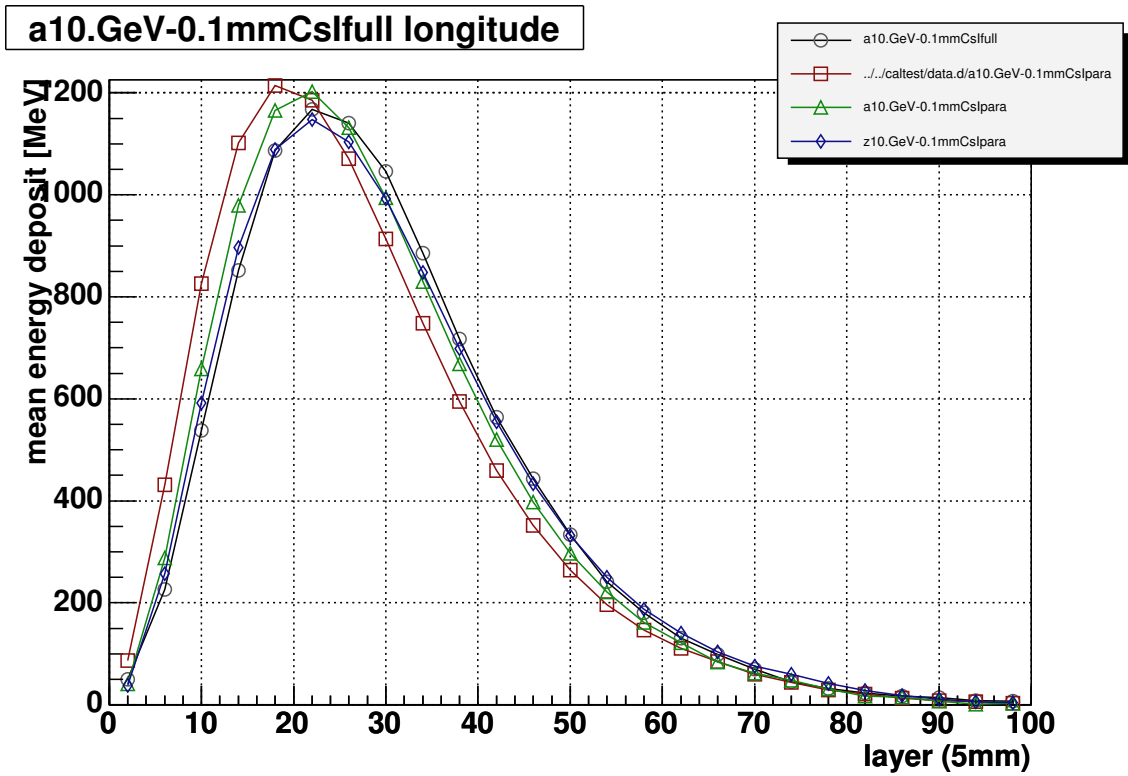


図 4.8: Full Simulation()。オリジナル GFlash()。式 (4.4) を用いた GFlash()。式 (4.5) を用いた GFlash()。 となるにつれ に合うようになる。

Critical energy (E_c) による GFlash longitudinal profile の改善

GFlash では Critical energy E_c を求める際に Grindhammer [4] と同様

$$E_c = 2.66 \left(X_0 \frac{Z}{A} \right)^{1.1} \quad (\text{ここで } X_0 \text{ の単位は mm}) \quad (4.14)$$

を使っているが、広く用いられている式は (4.4) であったり、式 (4.5) もあることから、これら 3 つの E_c によるプロファイルの変化を見た (図 4.8)。オリジナル GFlash の時に見られたピークのずれが、式 (4.5) を使うことによって改善されることがわかった。

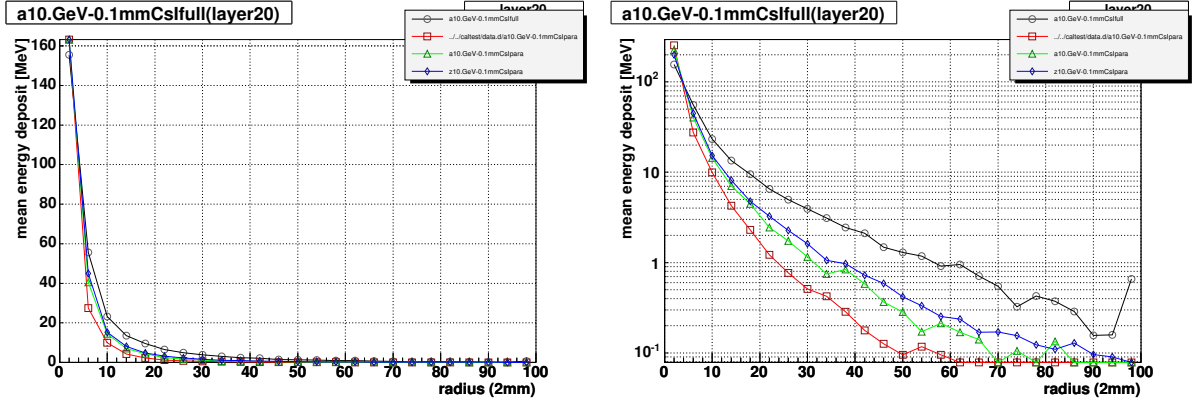


図 4.9: 10GeV の電子を図 4.6 に入射した時のレイヤーが 20 番目 (10cm の深さ) での動径方向のシャワープロファイル。Full Simulation()。オリジナル GFlash()。(4.4) 式を使った GFlash()。(4.5) 式を使った GFlash()。半径の大きいところでエネルギー損失のずれが大きくなる。

各パラメータによる radial profile の改善

続いて GFlash の動径方向のシャワープロファイルについて比較した。なお、“N05” については動径方向は式 (4.13) となっておりフルシミュレーションと合うべきものではないので比較しない。

図 4.9 は 10GeV の電子を図 4.6 の形状の CsI 結晶に入射させたときの深さ方向のレイヤーが 20 番目 (10cm の深さ) の動径方向のシャワープロファイルである。radial profile は半径が大きくなると GFlash と full simulation の間でエネルギー損失のずれが目立つようになることがわかる。この傾向は他のレイヤ、他のエネルギーを入射させた時にも見られた。

そこで full simulation のデータの Grindhammer [4] の経験式 (4.9) へのフィッティングを行い、式 (4.9) に現れるパラメータを求め直した。

式 (4.9) 中の各パラメータ (4.10)、(4.11)、(4.12) は深さを表す変数 τ で表され、

$$\tau = t/T \quad (4.15)$$

である。ここで t は radiation length X_0 で規格化した量 $t = x/X_0$ であり、 T の平均は

$$T = \ln \frac{E}{E_c} - 0.858 \quad (4.16)$$

で表せる。Grindhammer [4] によって与えられている式 (4.10)、(4.11)、(4.12) のパラメータは

$$z_1 = 0.0251 + 0.00319 \ln E \quad (4.17)$$

$$z_2 = 0.1162 - 0.000381Z \quad (4.18)$$

$$k_1 = 0.659 - 0.00309Z \quad (4.19)$$

$$k_2 = 0.645 \quad (4.20)$$

$$k_3 = -2.59 \quad (4.21)$$

$$k_4 = 0.3585 + 0.0421 \ln E \quad (4.22)$$

$$p_1 = 2.632 - 0.00094Z \quad (4.23)$$

$$p_2 = 0.401 + 0.00187Z \quad (4.24)$$

$$p_3 = 1.313 - 0.0686 \ln E \quad (4.25)$$

であり、GFlashでもデフォルトではこれらの値を使っている。これらの値をCsIに最適なものに修正をすることを試みた。

半径方向の正確なシャワープロファイルが得るために図4.6よりも半径方向に詳細にデータを取得できるジオメトリを用意し(図4.10)、0.3GeV、1GeV、2GeV、3GeV、4GeV、5GeV、7GeV、10GeV、20GeV、40GeV、70GeV、100GeVの電子をそれぞれ一定量CsIに入射させた。これによって得られたデータから各入射エネルギー各深さ各半径での1イベントあたりの平均エネルギー損失を入射エネルギー一定深さ毎に横軸を半径としてプロット、式(4.9)でフィッティングし(図4.11、4.12)深さ毎のパラメータ R_C, R_T, p を取得した。これらの値を深さを横軸にしてプロットし、式(4.10),(4.11),(4.12)でそれぞれフィッティングし(図4.13、4.15、4.14) $z_1, z_2, k_1, k_2, k_3, k_4, p_1, p_2, p_3$ をエネルギー毎に取得し、横軸にエネルギーをとってプロットしフィッティングを行い(図4.16-4.24)最終的な値を出した。

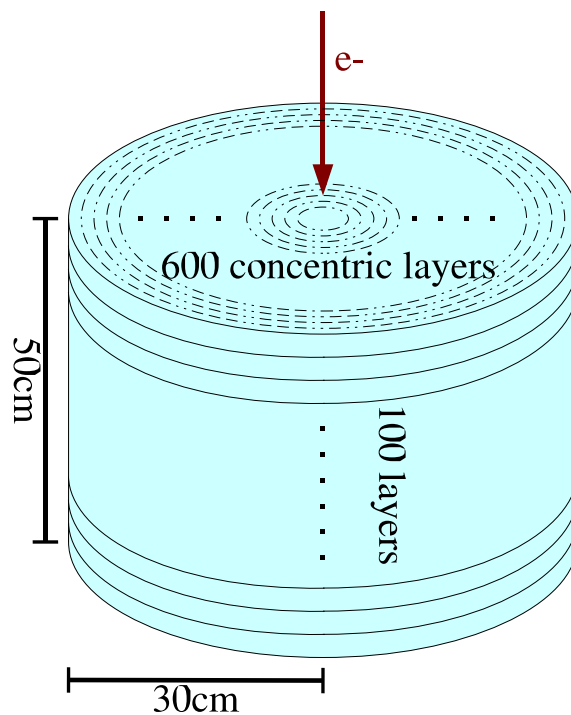


図 4.10: radial profile 評価のための CsI ジオメトリ。深さの浅いところでは動径方向のシャワープロファイルのピークは非常に鋭いので精度を上げるため動径方向のレイヤーを図 4.6 より細かく区切った。

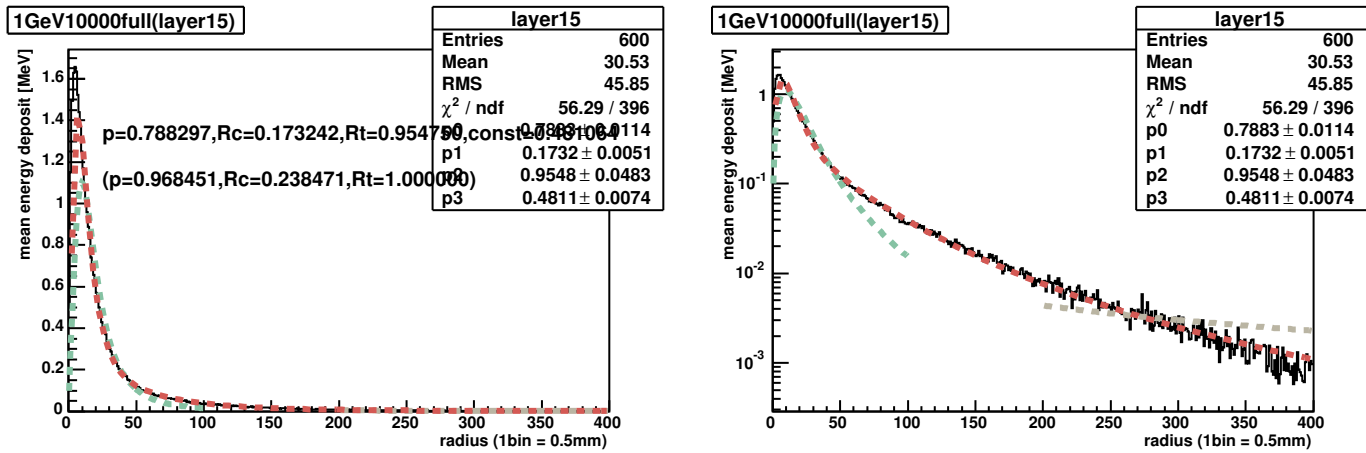


図 4.11: 図 4.10 に 1GeV の電子を入射した時の layer15(深さ 7.5cm) での式 (4.9) による動径方向のプロファイルのフィッティング。左、リニアスケール。右、ログスケール。右図の右上の p_0 が式 (4.12) の p 。 p_1 が式 (4.10) の R_C 。 p_2 が式 (4.11) の R_T 。

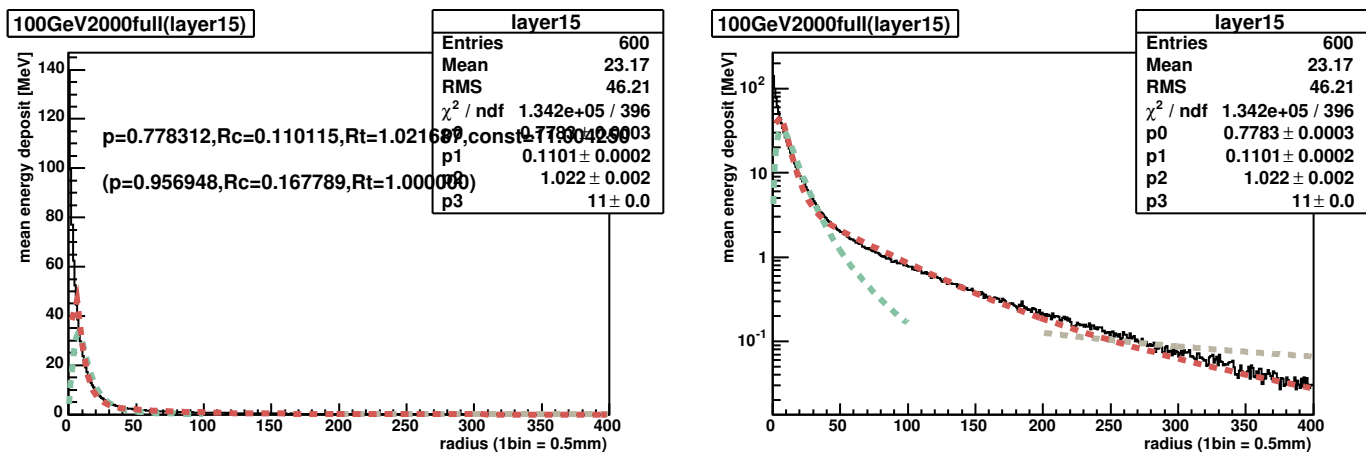


図 4.12: 図 4.10 に 100GeV の電子を入射したときの layer15 での式 (4.9) による動径方向のプロファイルのフィッティング。左、リニアスケール。右、ログスケール。

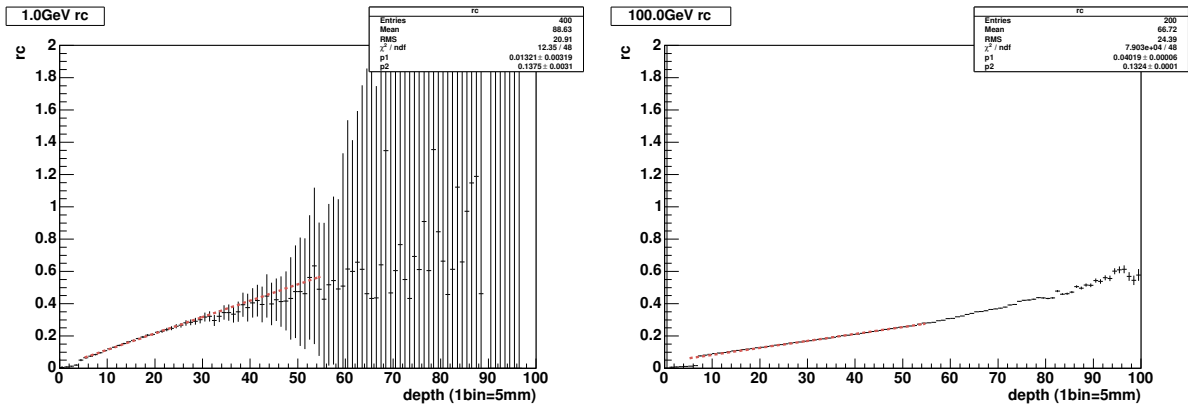


図 4.13: 深さに依存する動径方向のプロファイルのピークの広がりを示すパラメータ R_C の式 (4.10) へのフィッティング。これにより入射電子のエネルギー毎に z_1, z_2 を求めることができる。左図は 1GeV の電子を図 4.10 に入射した時の各深さでのフィッティングによって求められた R_C がプロットされている。右図は、100GeV の電子を入射したとき。それぞれの図の右上の p1,p2 が z_1, z_2 に対応している。

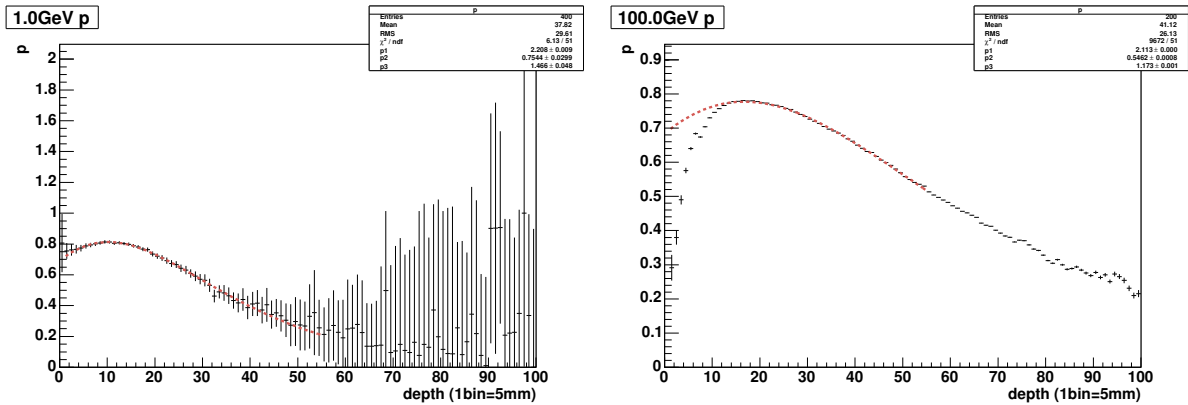


図 4.14: 深さに依存する動径方向のプロファイルのテールの広がりを示すパラメータ R_T の式 (4.11) へのフィッティング。これにより入射電子のエネルギー毎に k_1, k_2, k_3, k_4 を求めることができる。左図は 1GeV の電子を図 4.10 に入射した時の各深さでのフィッティングによって求められた R_T がプロットされている。右図は、100GeV の電子を入射したとき。それぞれの図の右上の p1,p2,p3,p4 が k_1, k_2, k_3, k_4 に対応している。

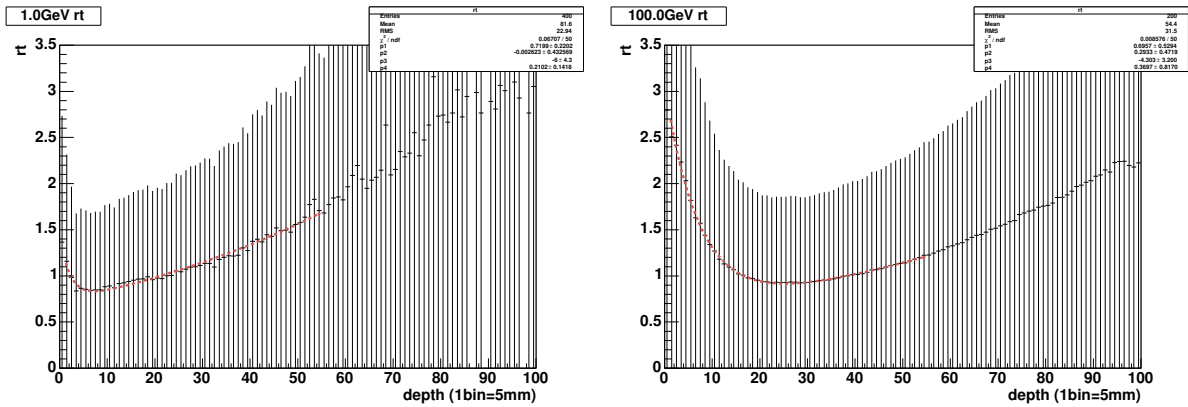


図 4.15: 深さに依存する、動径方向のプロファイルのピーク成分とテール成分の比を示すパラメータ p の式 (4.12) へのフィッティング。これにより入射電子のエネルギー毎に p_1, p_2, p_3 を求めることができる。左図は 1GeV の電子を図 4.10 に入射した時の各深さでのフィッティングによって求められた p がプロットされている。右図は、100GeV の電子を入射したとき。それぞれの図の右上の p_1, p_2, p_3 が p_1, p_2, p_3 に対応している。

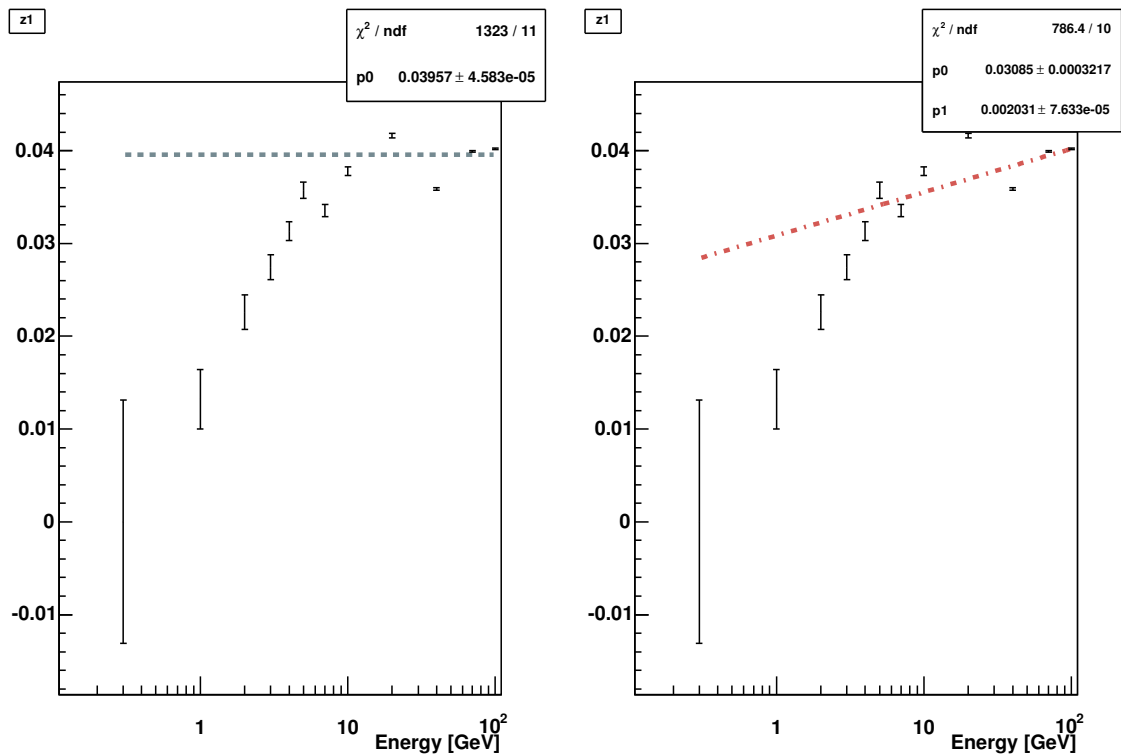


図 4.16: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた z_1 のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

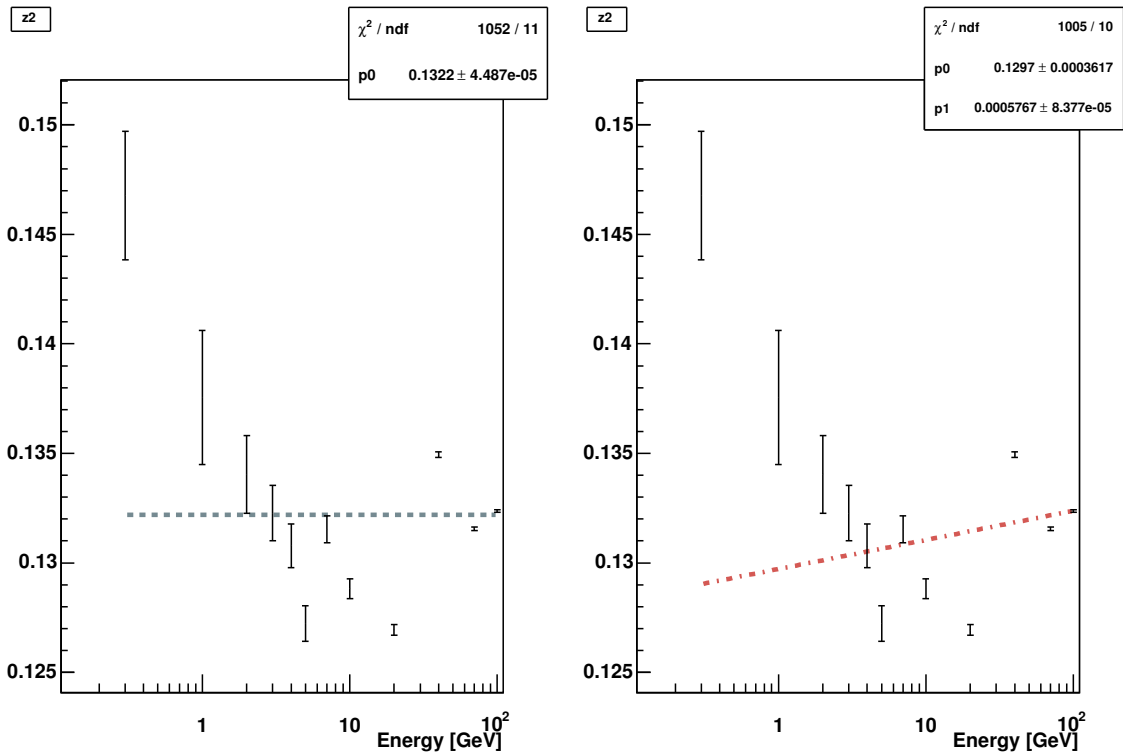


図 4.17: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた z_2 のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

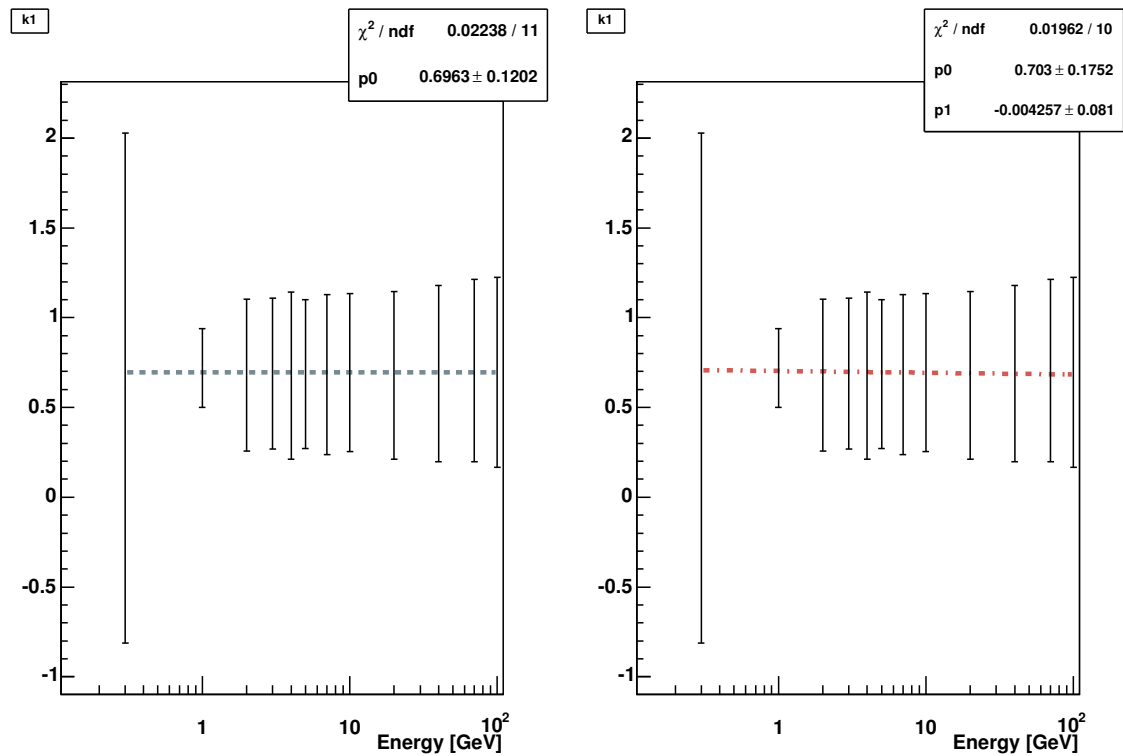


図 4.18: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた k_1 のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

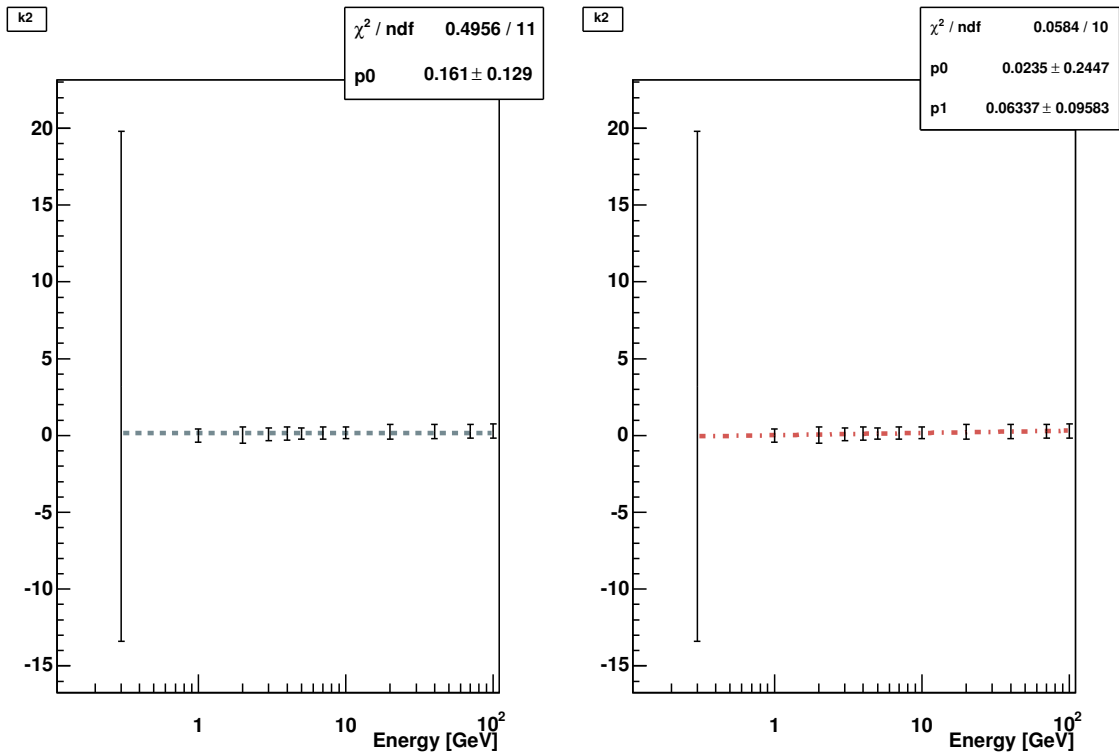


図 4.19: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた k_2 のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

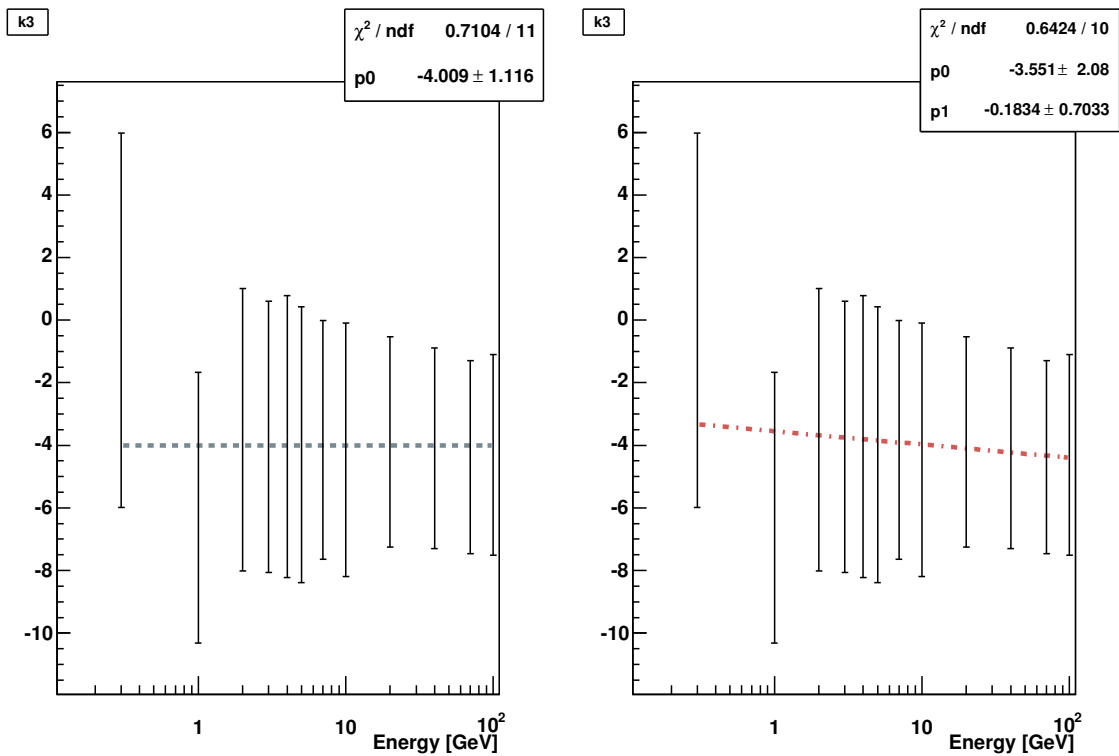


図 4.20: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた k_3 のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

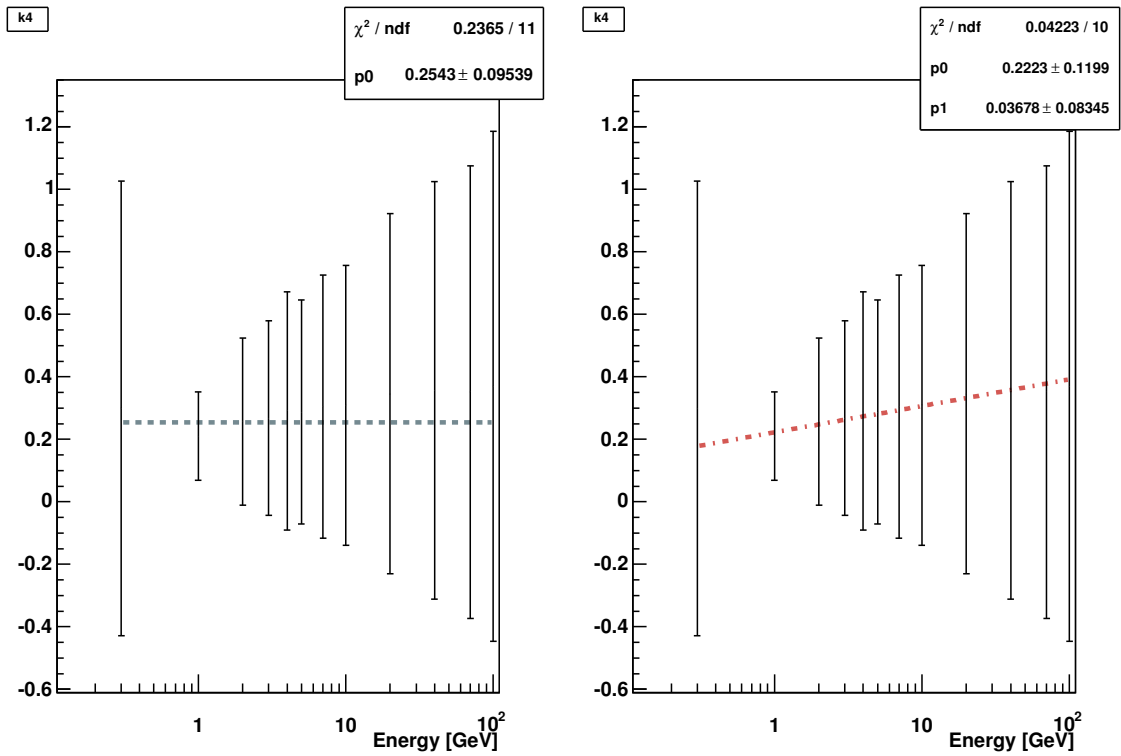


図 4.21: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた $k4$ のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

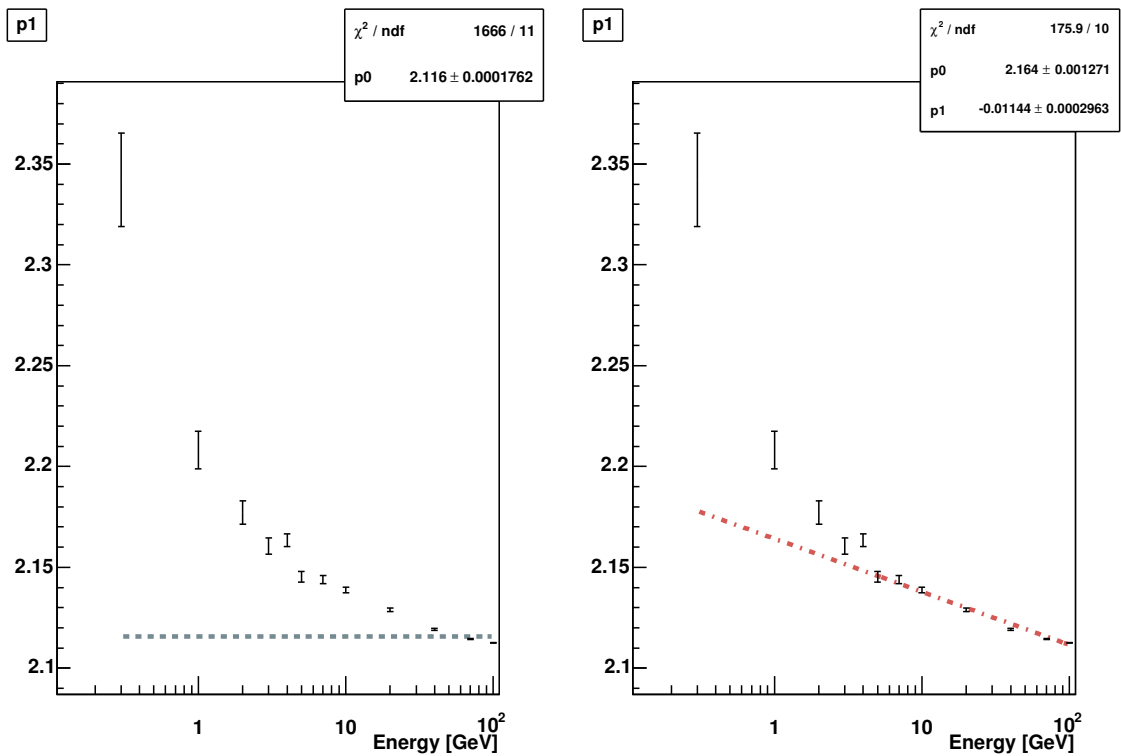


図 4.22: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた $p1$ のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

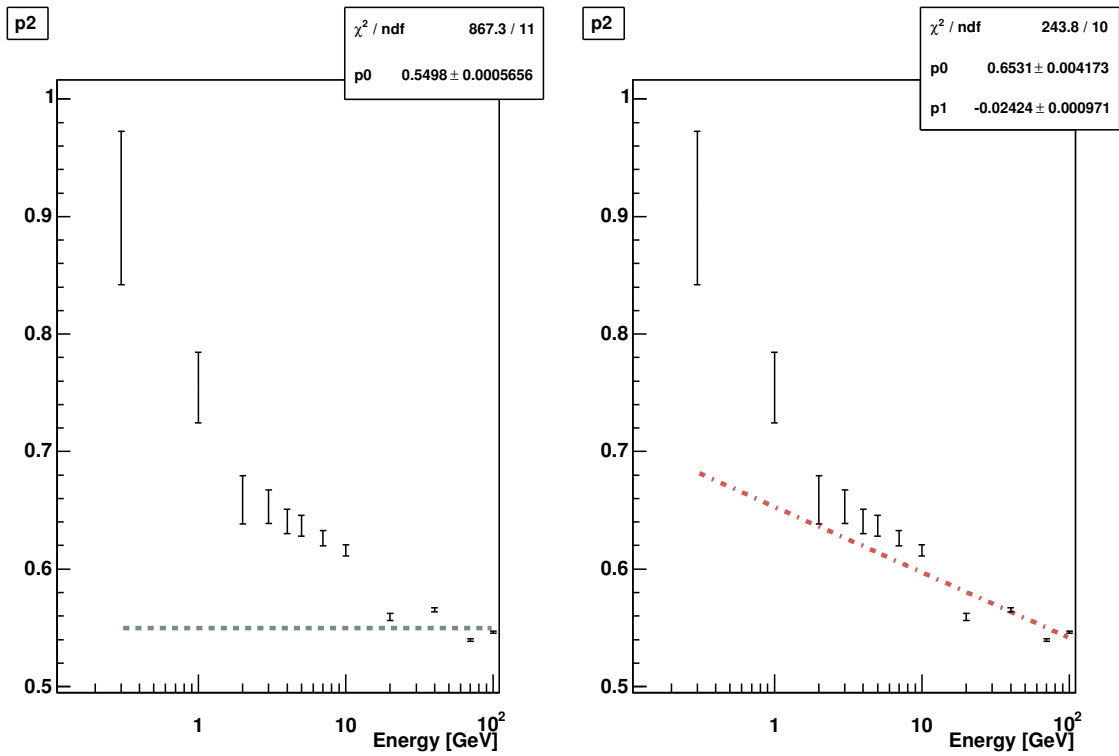


図 4.23: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた p_2 のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

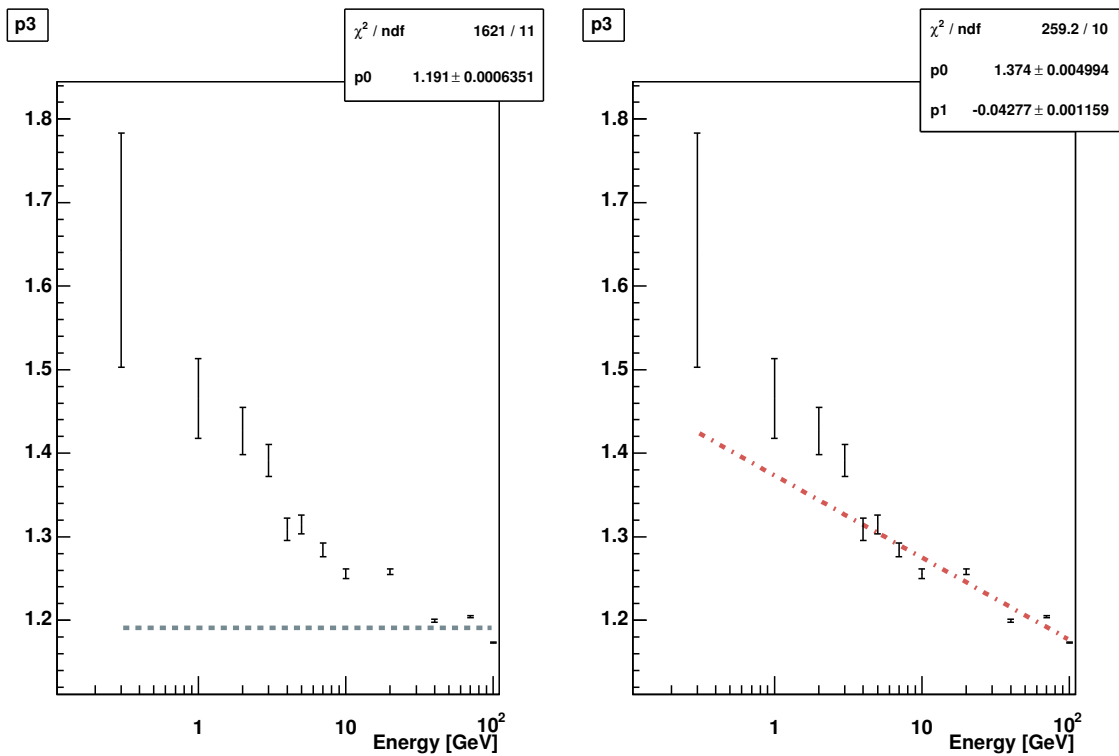


図 4.24: 様々な入射電子のエネルギーに対して得られた p_3 のプロットおよびフィッティング。左は定数でフィット。右は $A + B \times \ln E$ でフィット。

| | befor | after |
|-------|--------------------------|---|
| z_1 | $0.0251 + 0.00319 \ln E$ | $0.03085 \pm 0.0003217 + (0.002031 \pm 7.633 \times 10^{-5}) \ln E$ |
| z_2 | $0.1162 - 0.000381Z$ | $0.1322 \pm 4.487 \times 10^{-5}$ |
| k_1 | $0.659 - 0.00309Z$ | 0.6963 ± 0.1202 |
| k_2 | 0.645 | 0.161 ± 0.129 |
| k_3 | -2.59 | -4.009 ± 1.116 |
| k_4 | $0.3585 + 0.0421 \ln E$ | $0.2223 \pm 0.1199 + (0.03678 \pm 0.08345) \ln E$ |
| p_1 | $2.632 - 0.00094Z$ | $2.164 \pm 0.001271 + (-0.01144 \pm 0.0002963) \ln E$ |
| p_2 | $0.401 + 0.00187Z$ | $0.6531 \pm 0.004173 + (-0.02424 \pm 0.000971) \ln E$ |
| p_3 | $1.313 - 0.0686 \ln E$ | $1.374 \pm 0.004994 + (-0.04277 \pm 0.001159) \ln E$ |

表 4.3: GFlash のデフォルトでのパラメータとフルシミュレーションのデータをフィッティングして得られたパラメータとの比較。

p_1, p_2 に関しては式 (4.22)(4.23) より定数になるはずだがデータではエネルギー増加に対して有意に減少する傾向が見られたため、 $A + B \times \ln E$ の式の形を使った。

最終的にフィッティングの各パラメータは表 4.3 のようになった。

得られたこれらのパラメータを GFlash に反映させてイベントを走らせたところ動径方向のシャーププロファイルは図 4.25-4.31 のようにオリジナル GFlash よりも改善させることができた。

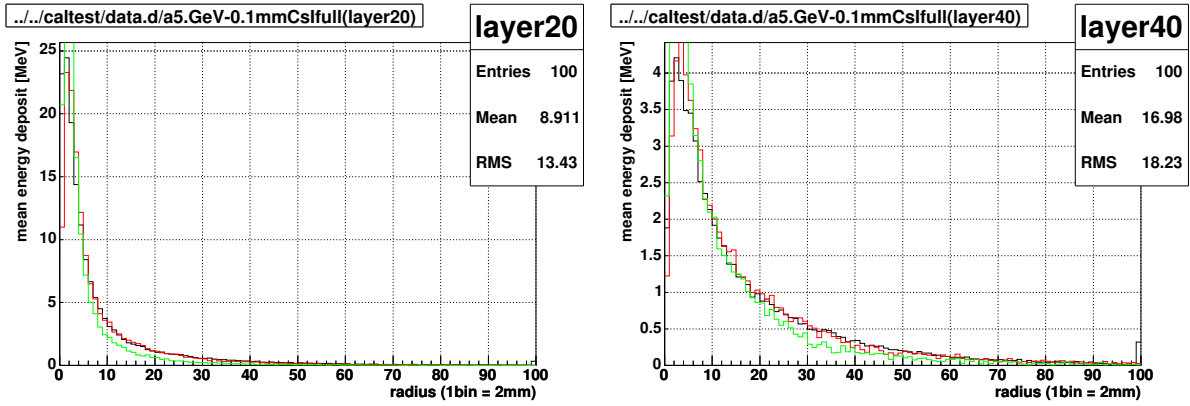


図 4.25: 5GeV の電子を入射したデータ。左はレイヤー 20(深さ 10cm)。右はレイヤー 40(深さ 20cm)。黒はフルシミュレーション。緑はオリジナル GFlash。赤が修正後の GFlash。

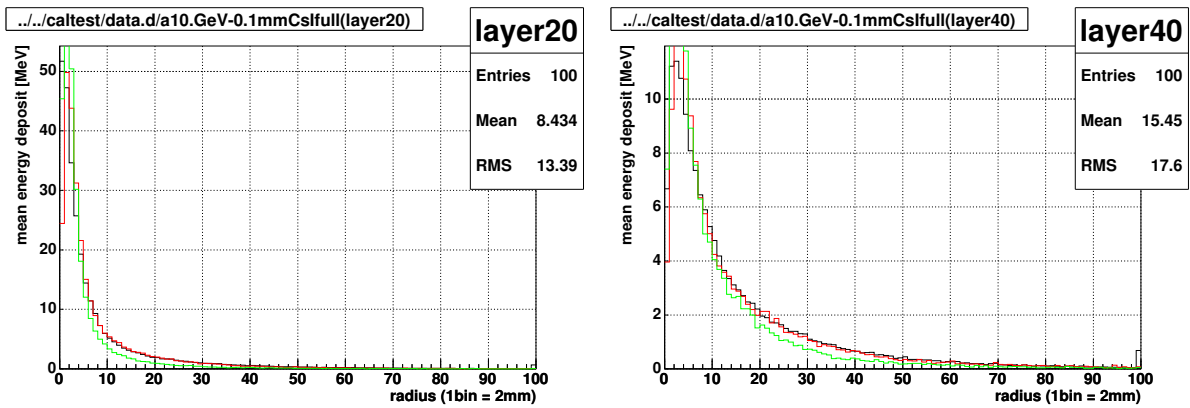


図 4.26: 10GeV のデータ。左はレイヤー 20(深さ 10cm)。右はレイヤー 40(深さ 20cm)。色は 4.25 と同様。

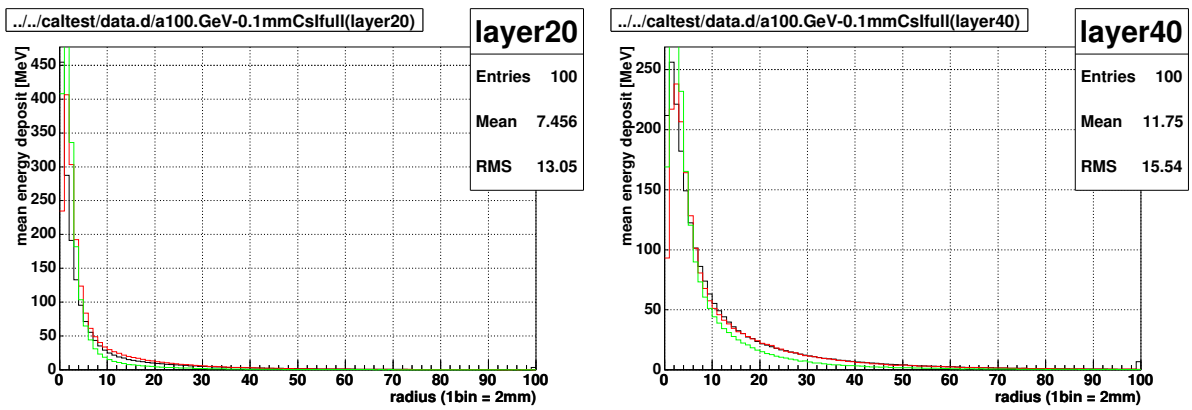


図 4.27: 100GeV のデータ。左はレイヤー 20 (深さ 10cm)。右はレイヤー 40(深さ 20cm)。色は 4.25 と同様。

LAT Calorimeter への応用

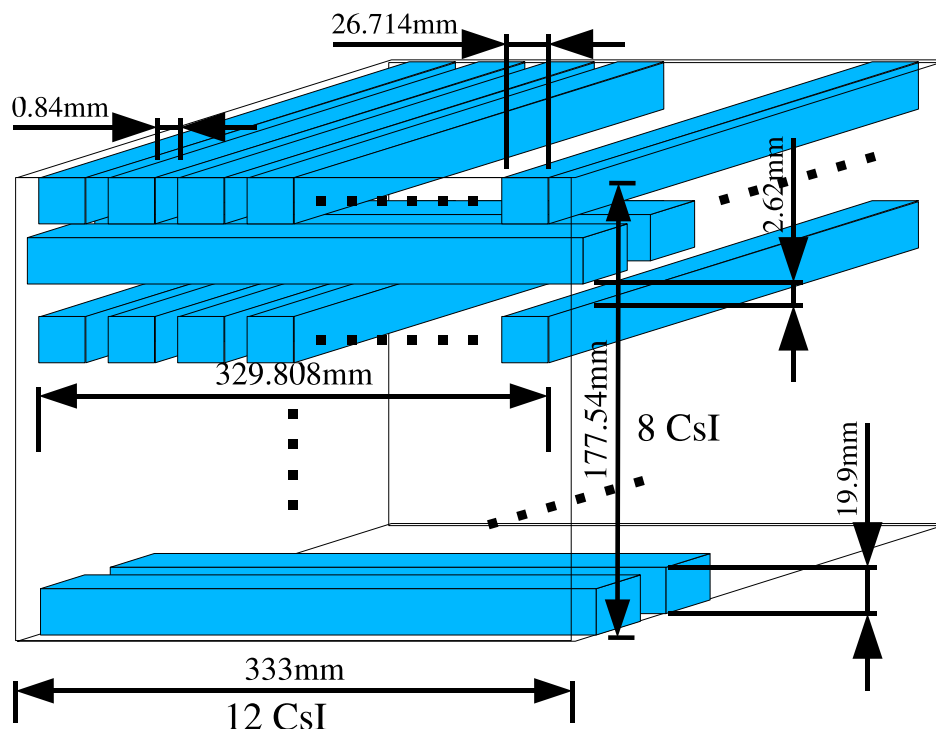


図 4.28: LAT Calorimeter における CsI 結晶の配置。周りの黒の枠は粒子が入射すると GFlash が発動し電磁シャワープロファイルを生成するボリューム (envelope) を示す。envelope に CsI 結晶が完全に詰まっているわけではない (充填率 86.3%)。

GFlash のパラメータを修正し、LAT Calorimeter に応用することを考えた。

GFlash は粒子が入射したとき parameterization を実行するボリューム (envelope という) を設定してやる必要がある。その envelope に今回は Calorimeter 1 つの CsI 結晶全体を包むようなボリュームを設定して (図 4.28) GFlash を試した。その結果図 4.29-4.31 のようになった。いずれも full simulation に比べ GFlash はシャワーの発達が早い傾向を見ることができる。

これは実際の LAT Calorimeter では CsI が完全に詰まっているわけではなく間に隙間があるが、この Calorimeter に対して GFlash を適用するとそのことが考慮されないことに原因があると考えられる。そこで GFlash の電磁シャワープロファイルをを LAT Calorimeter に合わせて間延びさせることを考えた。

parameterization を起こす体積 (envelope) は図 4.28 の黒の線で囲った部分である。しかし実際の CsI 結晶が占める体積はそれよりも少ない。CsI 結晶が占める体積を envelope の体積で割ると

$$\frac{26.714\text{mm} \times 19.9\text{mm} \times 333\text{mm} \times 12 \times 8}{333\text{mm} \times 333\text{mm} \times 177.54\text{mm}} = 0.863 \quad (4.26)$$

であるので CsI でない体積を真空とすると、envelope の平均密度は CsI の密度 $\times 0.863$ である。

GFlash が parameterization に使う物質由来の基本となる値は X_0, Z, A であり、 Z, A に関して近似的に 0.863 を掛けた値を GFlash 内にて使うことにした。また X_0 は式 (4.2) 以外にも Leo [1] によると

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} \quad (4.27)$$

と書くこともでき、これより $1/X_0$ は近似的に Z の一次の式と見ることができるので $1/X_0$ にもまた 0.863 を掛けた値、つまり X_0 は CsI のそれに $1/0.863$ を掛けた値を GFlash 内にて使うことにした。

こうすることによって電磁シャワープロファイルを間延びさせることができるが、実際のシャワーは CsI でエネルギーを失うのであり、中空部分で失うことは無い。GFlash の扱いでは、電磁シャワーからすると envelope 全体が検出器のように見えてしまうため実際には CsI が存在しないような座標でもエネルギーを失ってしまう¹。したがってこのままでは電磁シャワーのエネルギー損失のうち $1 - 0.863 = 0.137$ 分を検出することが無く損してしまうことになる。そこで GFlash 内においてエネルギー損失を計算する時に $1/0.863$ 倍することにした。

それによって得られた結果が図 4.32-4.34 である。見てわかるように、1GeV 以外はレイヤー 0 以外の深さでかなりの改善があった。

全てのエネルギーで共通するのはレイヤー 0 でのエネルギー損失がフルシミュレーションより明らかに低いことである。もともとが envelope を均一なものとした仮定による単純にパラメータを定数倍するという簡単なモデルであるので、この問題が改善の余地を示唆しているとも考えられる。

また、図 4.32 に見られるように、5GeV より下のエネルギーを入射させた場合は全くフルシミュレーションと合わないことがわかった。ただこれは図 4.29 において全体のエネルギー損失の量がフルシミュレーションと parameterization とで明らかに異なっていることが見てとれるように、パラメータを定数倍する前の状態での GFlash に問題があると考えられる。図 4.6 のような均一の CsI では低エネルギーでもよく一致していたことから、envelope 内に均一でないジオメトリを配置したことが問題であると考えられるがまだ詳しくはわからない。

結論

GFlash に使われている各パラメータを求め直した結果、図 4.6 のような均一な CsI のジオメトリに対しては良い精度で合うようになった。また LAT Calorimeter のジオメトリに GFlash を用いる場合、LAT Calorimeter に合わせた修正をした結果、LAT Calorimeter で 5 GeV 以上の電子

¹GFlash では検出器でないボリュームにエネルギー損失があるとエラーを出して止まるようになっている。今回はその部分のソースコードを改編し検出器以外の部分でエネルギー損失を起こしても止まらないようにして使用した。

を入射させたときにフルシミュレーションの結果とごく浅い部分を除いては良い精度で合わせる
ことができた。

“N05” は特に修正を加えること無くフルシミュレーションの結果と良い合致をみせている。し
かし、動径方向のシャワープロファイルが簡略化されていることから、使用する場面を選ぶこと
になるだろう。

なお、GFlash を用いて LAT の Calorimeter に電子を入射させた際の 1 イベントをシミュレー
トするのに要する時間は平均でフルシミュレーションのおよそ 50 倍速くなることがわかった (図
4.35)。

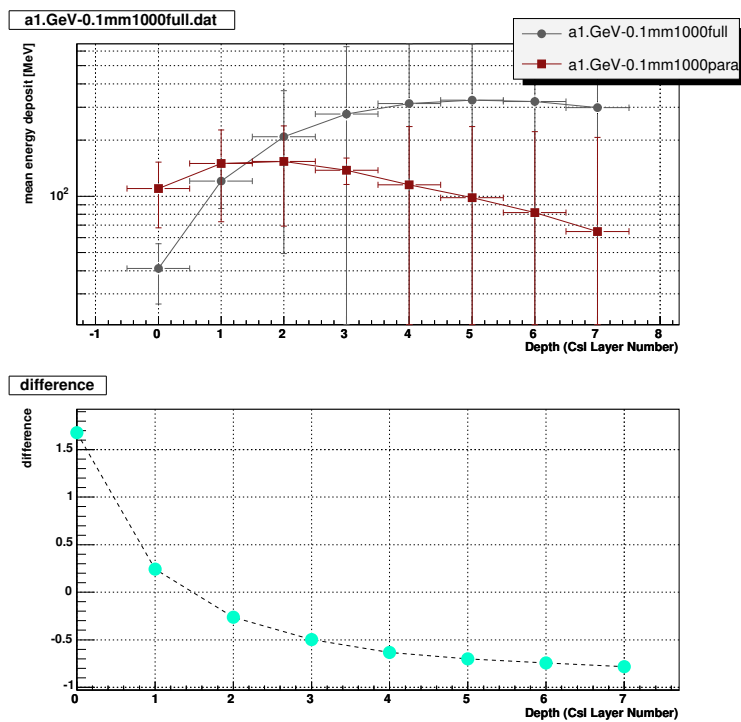


図 4.29: 1GeVの電子を LAT Calorimeter に入射させた。上図、 はフルシミュレーション。 はパラメータを修正した GFlash。下図の”difference”は $\frac{\text{GFlash energy deposit} - (\text{Full Simulation energy deposit})}{\text{Full Simulation energy deposit}}$ 。エネルギー損失の大きさがフルシミュレーションより GFlash の方が全体的に小さくなっている。

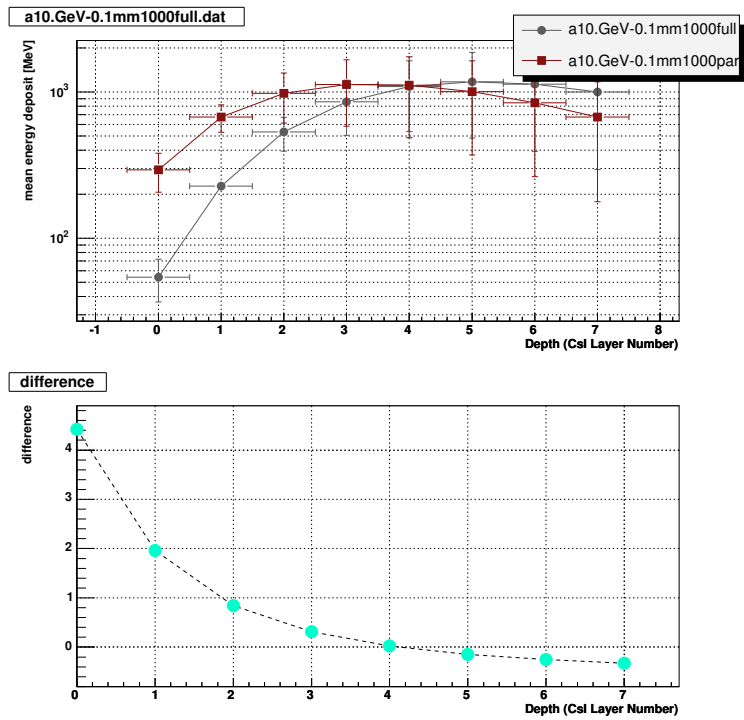


図 4.30: 10GeV の電子を LAT Calorimeter に入射させた。グラフの見方は図 4.29 と同じ。GFlash の方がシャワーの発達が急であることがわかる。

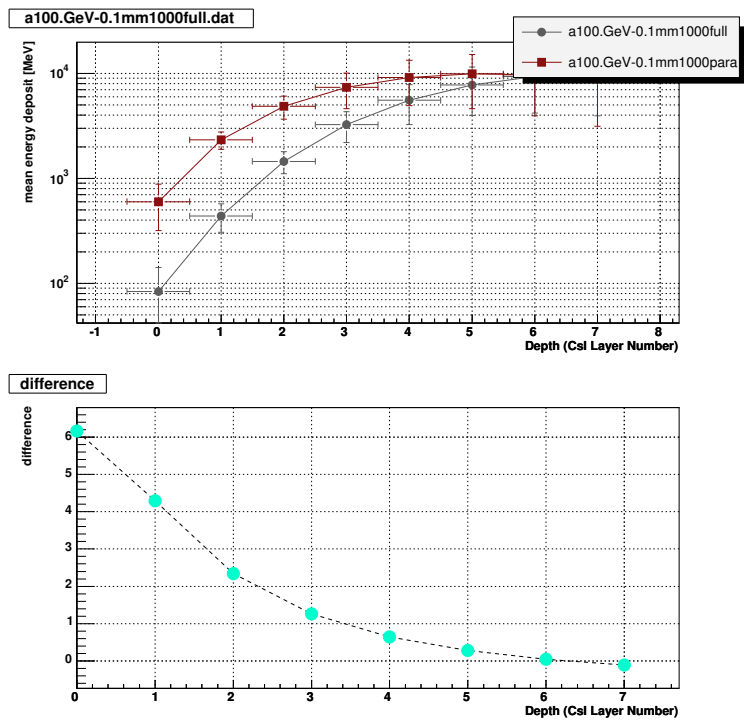


図 4.31: 100GeV の電子を Calorimeter に入射させた。グラフの見方は図 4.29 と同じ。GFlash の方がシャワーの発達が急であることがわかる。

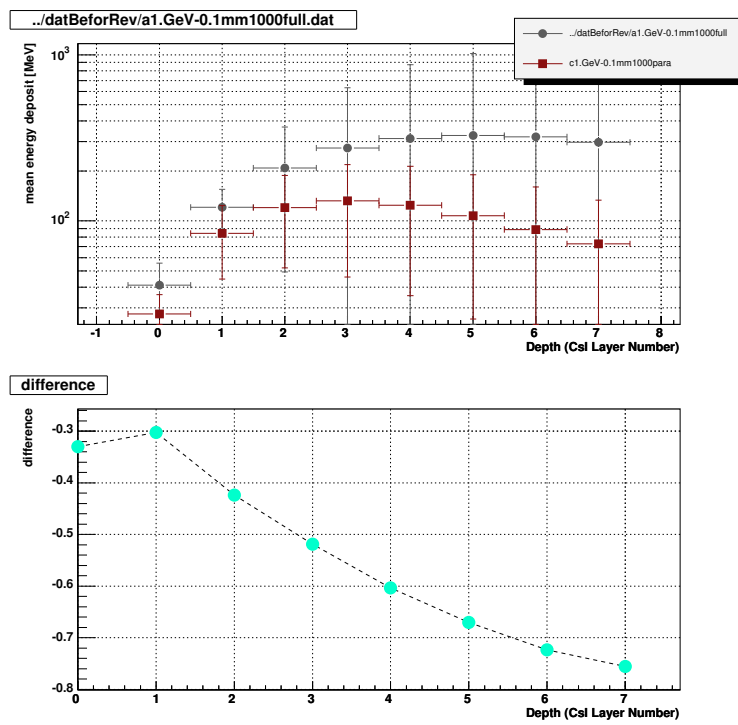


図 4.32: 黒はフルシミュレーション。赤は CsI の物理量とエネルギー損失をを定数倍した GFlash。1GeV の電子を入射させた。図 4.29 と同様全体的に GFlash のエネルギー損失が低い。

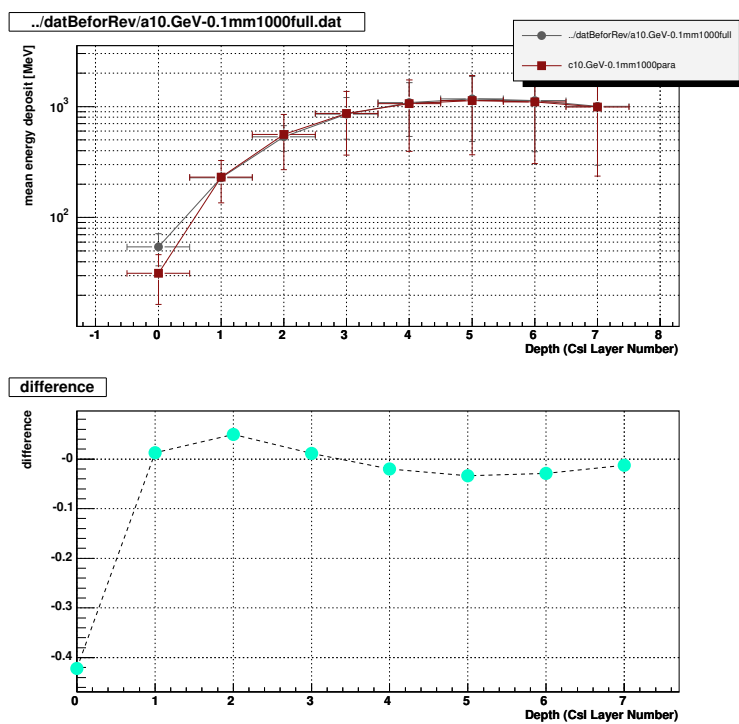


図 4.33: 10GeV の電子を入射させた。グラフの見方は図 4.32 と同様。レイヤー 0 以外は良く合っている。

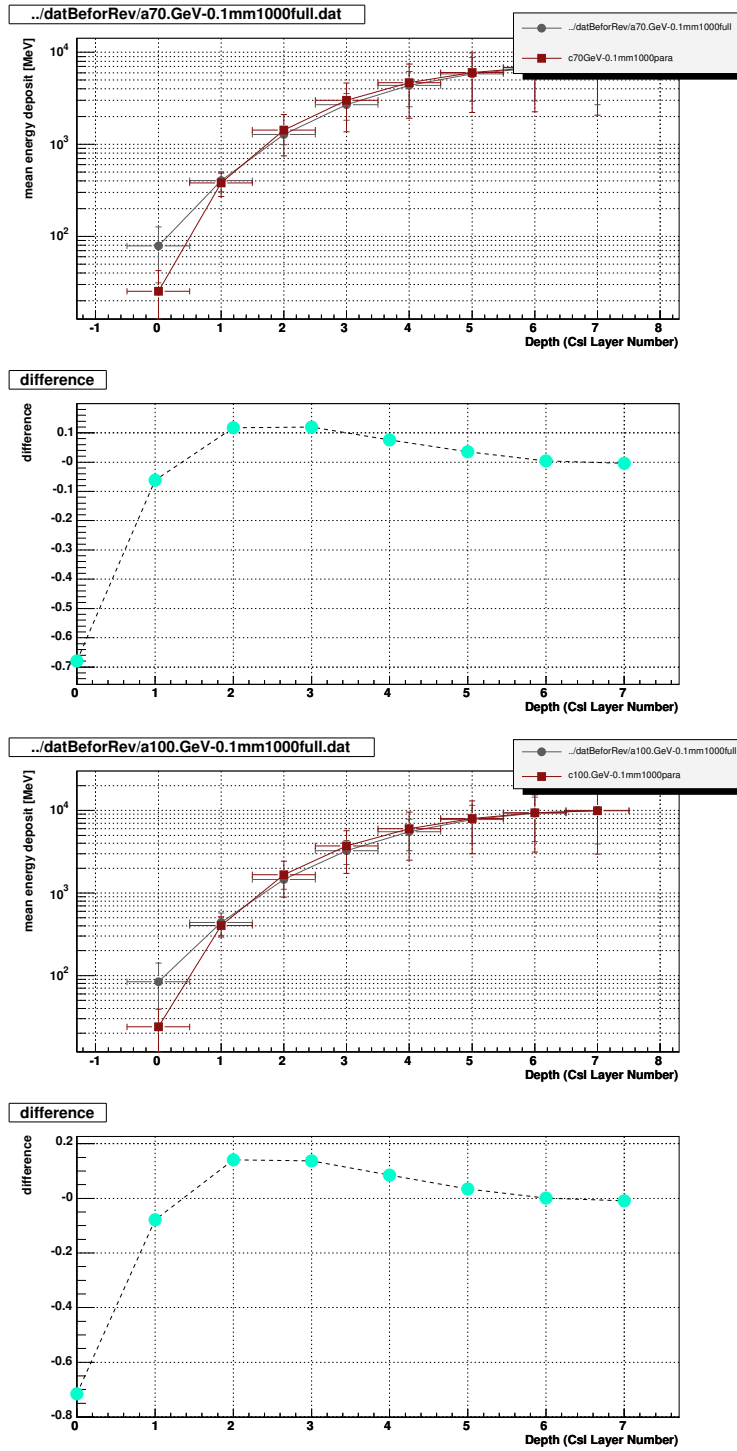


図 4.34: 70GeV(上)、100GeV(下)の電子を入射させた。グラフの見方は図 4.32 と同様。レイヤー 0 以外は良く合っている。

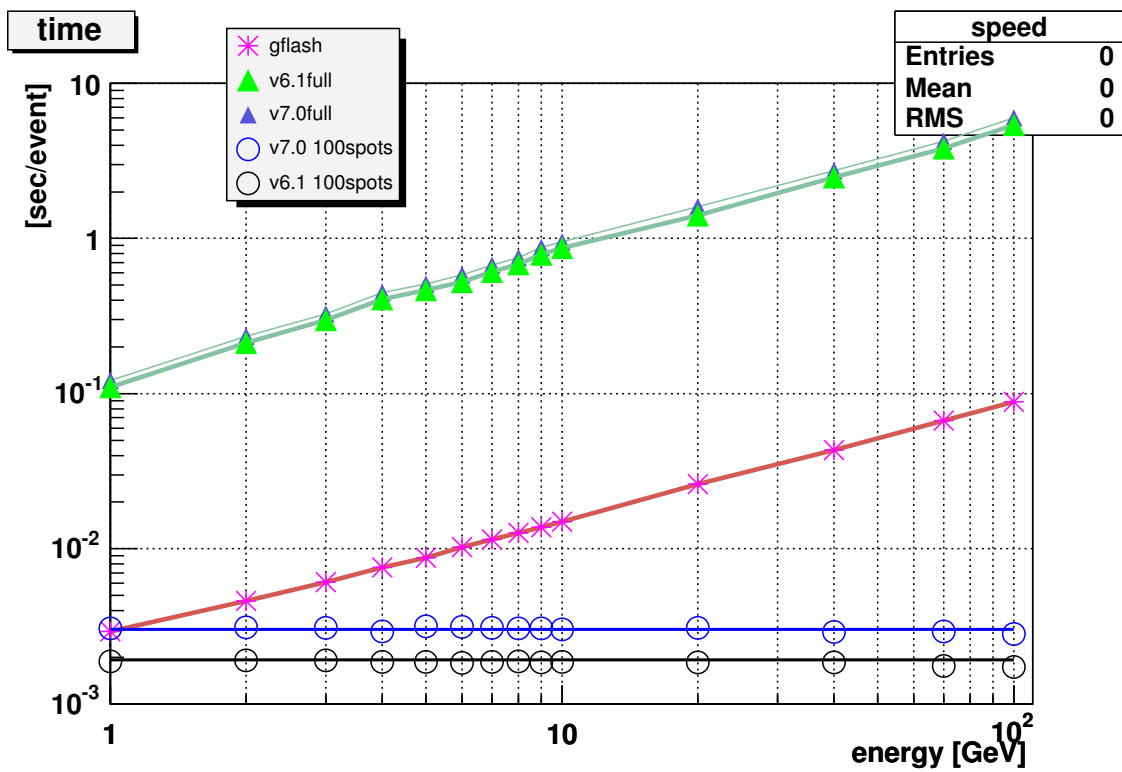


図 4.35: Calorimeter のジオメトリに入射させた電子のエネルギーに対して 1 イベントにかかる時間の平均。 がフルシミュレーション。*が GFlash。 は ExN05。

第5章 まとめと今後の課題

本論文では GLAST 衛星に搭載される、LAT 検出器のシミュレータ高速化に関する研究を行った。

プロファイルを使った解析の結果、シミュレーションに時間がかかるのは、呼び出される関数自体にボトルネックがあるという訳ではなく、乱数や粒子の 1step 毎に行われる計算の数が膨大なものであることによるものだということがわかった。したがって計算する必要があるステップの数を減らす、あるいは粒子の数を減らす、といったことが高速化につながることになる。

それゆえに電磁シャワーのシミュレーションにおいて parameterization による高速化は有効である。parameterization にも様々な手法があるが、その中でも GFlash は動径方向のシャワープロファイルが実際のデータを基にモデル化されているという点で一長の理がある。

しかし実際に使用、評価してみると深さ方向、動径方向それぞれのエネルギー損失分布にフルシミュレーションとのずれが見付かった。そこで critical energy E_c を求める式を変更し、動径方向のプロファイルの式中にある基本的なパラメータ $z_1, z_2, k_1, k_2, k_3, k_4, p_1, p_2, p_3$ をフルシミュレーションのデータから求め直したところ改善が見られた。

この修正した GFlash を LAT Calorimeter に適用する際にはまた別のパラメータを考慮しなくてはならないことがわかった。今回は parameterization を実行する領域 (envelope) に対する CsI 結晶の比を用いて、原子番号、原子質量、radiation length に反映させたところ、5GeV 以上のエネルギーの電子を入射した時のシャワープロファイルはごく浅いところを除いた深さの部分で良い精度で再現できることが分かった。合うことがわかった。

また、cutoff length についても 10mm 程度まで大きくしても 1% 程度の精度の差でデータをとれることがわかった。また速度も 0.1mm, 1mm, 10mm の時の計算速度は 0.01mm の時の 2 倍前後に及ぶことがわかった。0.1mm, 1mm, 10mm の中からどれかを必要に応じて選ぶのが良いと考える。

今後は、さらに GFlash の LAT Calorimeter への最適化についての研究を進める必要がある。今回は最も簡単ところで CsI 結晶の充填率を単純にファクターとして使っただけであったが、まだ改善の余地は残されている。また、タワー間をシャワーがまたがったケースなども今後考慮に入れる必要がある。

また、全く別の高速化のアプローチも考えられる。複数のボリュームを細かく配置することは粒子トラッキングのステップを増やすことになり計算時間を増やすことにつながる。そこで複数のボリュームを一つのボリュームにまとめて性質を平均化するという手段が考えられる。

付録A GFlashの使い方。

粒子が入射したときに parameterization を使いたいボリュームを envelope と呼ぶ。Geant4 に使う DetectorConstruction クラスにおいて LogicalVolume を定義するところで、envelope にしたい LogicalVolume を指定する。

```
GFlashShowerModel* aaa=new GFlashShowerModel("emShowerModel",CsIILogLog);
aaa->SetFlagParamType(1);
aaa->SetFlagParticleContainment(0);
GFlashHomoShowerParamterisation *bb =
    new GFlashHomoShowerParamterisation(CsI,new GVFlashHomoShowerTuning);
GFlashParticleBounds *cc = new GFlashParticleBounds;
GFlashHitMaker *dd = new GFlashHitMaker;
aaa->SetParticleBounds(*cc);
aaa->SetParametrisation(*bb);
aaa->SetHitMaker(*dd);
```

上の例では CsIILogLog が envelope にしたい LogicalVolume である。CsI は G4Material オブジェクト。

GFlashShowerModel::SetFlagParamType() は粒子が envelope に入った時 parameterization を使うかフルシミュレーションにするかを設定する。使う時は 1 を渡す。GFlash の ON/OFF はコマンド /GFlash/flag でも切り換えることができる。

GFlashShowerModel::SetFlagParticleContainment() は、電磁シャワーによるエネルギー損失の空間的な分布がその envelope 内で 90%以上存在し得るかを parameterization を実行する前に簡単にチェックするかどうかを指定する。チェックする時は 1 を渡す。同様のことはコマンド /GFlash/containment でも行える。これが 1 の時で 90%もエネルギー損失できないと判断された時は GFlash に代わってフルシミュレーションが実行される。

関連図書

- [1] Techniques for nuclear and particle Physics experiments by W.R. Leo. (Springer, Berlin and Heidelberg, 1987) pp xvi + 368, Soft cover, DM 80-. ISBN 3-540-17386-2. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 34:290–290, Aug. 1988.
- [2] Eidelman S, Hayes K, Olive K, et al. Review of Particle Physics. *Physics Letters B*, 592:1+, 2004.
- [3] Geant4 Collaboration , Agostinelli S, Allison J, et al. Geant4-a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 506:250–303, July 2003.
- [4] Grindhammer G, Peters S. The parameterized simulation of electromagnetic showers in homogeneous and sampling calorimeters. 1993.
- [5] Kamae T. GLAST large area telescope - daily survey of high energy sky. *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, 122:179–186, July 2003.

謝辞

今回の修士論文を書くにあたって終始ご指導いただきました、指導教官である河合誠之 教授に深く感謝いたします。

また研究を行う際に適切なアドバイスをいただきました、片岡淳 助手に深く感謝いたします。

SLACにおいて色々な面でお世話になった方々(2005年2月現在) 釜江常好 教授、水野 恒史 氏に厚く御礼申し上げます。

理化学研究所宇宙放射線研究室において数々の関係でお世話になった方々角田 氏、馬場彩 氏、小浜 氏、並木 氏、中島 氏、洪 氏、桜井 氏、宮本八太郎 氏、に心から感謝いたします。

渡辺・河合研究室において様々な点でお世話になった方々 渡辺靖志 教授、石野御夫妻、小谷太郎 氏、鈴木素子 氏、坂本貴紀 氏、浦田裕次 氏、森隆志 氏、佐藤理江 氏、山本芳久 氏、五十川知子 氏、谷津陽一 氏、有本誠 氏、倉本祐輔 氏、斎藤孝男 氏、倉城秀行 氏、小野峻 氏、長男勉 氏、藤山幸生 氏、平川拓朗 氏、谷兼祐一 氏、久保田香織 氏、金井義和 氏、粟生菜摘 氏、古徳純一 氏、にお礼申し上げます。