

# 新型カロリメータ の Geant4 を用いた シミュレーション

信州大学 理学部物理科学科  
高エネルギー物理学研究室

03S2014G

陣内 隆平

# 目次

- 第1章 目的
- 第2章 カロリーメータ
  - 2.1 カロリーメータ
  - 2.2 電磁シャワー
  - 2.3 チェレンコフ光
- 第3章 Geant4
  - 3.1 Geant4
  - 3.2 ExampleN03
- 第4章 シミュレーション
  - 4.1 シミュレーションの概要
  - 4.2 物質と測定器形状の定義
  - 4.3 入射粒子の定義
  - 4.4 ファイルへの出力
- 第5章 シミュレーションデータの解析
- 第6章 まとめ

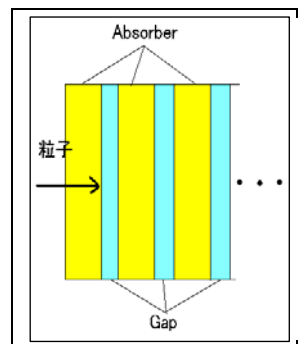
# 第1章 目的

サンドイッチ型カロリメータにおいて、吸収層に鉛ガラスを用いることにより、吸収層でチェレンコフ光が測定可能になる。チェレンコフ光の数を調べることにより入射エネルギーを測定することができる。従来の方は検出層で検出されたエネルギーから入射粒子のエネルギーを測定する方法である。これとチェレンコフ光により入射エネルギーを求める方法を組み合わせて、電子の入射エネルギーの測定精度を上げることを目的とする。

## 第2章 カロリメータ

### 2.1 サンドイッチ型カロリメータ

カロリメータとは物質の相互作用を通して粒子のエネルギーを測定するものである。今回扱ったカロリメータはサンドイッチ型カロリメータと呼ばれるものである。サンドイッチ型カロリメータは、主に鉄や鉛からなる吸収層(Absorber)と、シンチレータ等からなる検出層(Gap)を交互に繰り返した構造をしている。カロリメータに入射した電子は吸収層で電磁シャワーを起こし、発生した荷電粒子が検出層でシンチレーション光を発生させる。カロリメータはそのシンチレーション光を測定することにより入射エネルギーを測定する。



## 2.2 電磁シャワー

高エネルギーの電子が物質に入射すると、制動放射により光子が発生する。その光子が物質中を運動すると電子と陽電子のペアが発生し、発生した電子と陽電子がまた制動放射を起こし・・・、という繰り返りで、光子、電子、陽電子の数が増大していく。この現象を電磁シャワーという。

## 2.3 チェレンコフ光

荷電粒子が物質中を運動する時、荷電粒子の速度( $v$ ) が、物質中の光速度( $=\frac{c}{n}$  ただし、 $c$ は真空中の光速度、 $n$ は物質の屈折率)よりも速い場合、光が出る。光は、荷電粒子の進行方向に対して放射角 ( $\text{ただし } \cos \theta = \frac{c}{nv}$ ) で出る。当該物質中の周りの原子が分極し、荷電粒子通過後にその分極が解かれることにより発光が起こる。この光をチェレンコフ光という。

## 第3章 Geant4

### 3.1 Geant4

粒子と物質の相互作用のシミュレーションを行うことは、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においても不可欠な要素である。そうしたシミュレーションプログラムとして、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。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一つである。一方、最近の急速な計算機技術の発達に伴い、ソフトウェア開発技術の分野では、近年注目を集めているオブジェクト指向技術が、様々な分野でますます定着しつつある感がある。このことは、高エネルギー実験の分野でも例外ではなく、今や多くの実験において、オブジェクト指向技術とC++言語を用いたソフトウェア開発が行われている。Geant4は、これまでのGEANTでの経験を可能な限り生かした上で、オブジェクト指向技術とC++言語を用いて、GEANT3の再構築を行ったもので、国際的なコラボレーションの下で開発が行われてきた。すでに、CERNの主なLHC実験では、本格的な使用が開始されている。Geant4は、今後の高エネルギー物理学実験のコンピュータ・シミュレーションにおいて、中核的な存在となるといわれているソフトウェアである。

### 3.2 ExampleN03

ExampleN03はGeant4に標準で用意されているサンドイッチ型カロリメータのプログラムである。これを使って今回のシミュレーションを行った。

# 第4章 シミュレーション

## 4.1 シミュレーションの概要

Geant4 に標準で用意されている ExampleN03 のプログラムを書き換えることによりサ  
ンドイッチ型カロリメータのシミュレーションを行った。また、ExampleN03 ではチェ  
レンコフ光を扱ってなく、ExampleN06 が光を扱う例となっている。よって以下の手順を  
行い、ExampleN03 においてチェレンコフ光が扱えるようにする。

- 1 N06 のフォルダにおいて、include のフォルダの中にある ExN06PhysicsList.hh と  
ExN06StackingAction.hh を N03 の中の include のフォルダにコピーする。同様に  
src のフォルダの中にある ExN06PhysicsList.cc と ExN06StackingAction.cc を N03 の  
src のフォルダにコピーする。そして名前とそれぞれのファイルの中にある ExN06 を  
すべて ExN03 に変更する。
- 2 N03 の中の exampleN03.cc にヘッダーファイル

```
#include "ExN03StackingAction.hh"
```

を追加し、main()の中に

```
G4UserStackingAction* stacking_action = new ExN03StackingAction;  
runManager->SetUserAction(stacking_action);
```

を追加する。

3 鉛ガラスの基本パラメータを設定する。N03 の src の Ex03DetectorConstruction.cc で

```
G4Material* Namarigarasu =  
new G4Material("Namarigarasu", density= 5.368*g/cm3, ncomponents=2);  
Namarigarasu->AddMaterial(SiO2, fractionmass= 30.0*perCent);  
Namarigarasu->AddMaterial(ZnO , fractionmass= 70.0*perCent);
```

の下に

```
// ----- Generate & Add Material Properties Table -----  
const G4int nEntries = 2;  
  
G4double PhotonEnergy[nEntries] =  
    { 2.034*eV, 4.136*eV };  
  
G4double RefractiveIndex1[nEntries] =  
    { 1.85, 1.85};  
G4double Absorption1[nEntries] =  
    {100*m, 100*m };  
G4double ScintilFast[nEntries] =  
    { 1.00, 1.00};  
G4double ScintilSlow[nEntries] =  
    { 0.01, 1.00};  
  
G4MaterialPropertiesTable* myMPT1 = new G4MaterialPropertiesTable();  
myMPT1->AddProperty("RINDEX", PhotonEnergy, RefractiveIndex1,nEntries);  
myMPT1->AddProperty("ABSLENGTH", PhotonEnergy, Absorption1, nEntries);  
myMPT1->AddProperty("FASTCOMPONENT",PhotonEnergy, ScintilFast, nEntries);  
myMPT1->AddProperty("SLOWCOMPONENT",PhotonEnergy, ScintilSlow, nEntries);  
myMPT1->AddConstProperty("SCINTILLATIONYIELD",0./MeV);  
myMPT1->AddConstProperty("RESOLUTIONSCALE",1.0);  
myMPT1->AddConstProperty("FASTTIMECONSTANT", 1.*ns);  
myMPT1->AddConstProperty("SLOWTIMECONSTANT",10.*ns);  
myMPT1->AddConstProperty("YIELDRATIO",0.8);  
Namarigarasu->SetMaterialPropertiesTable(myMPT1);
```

を追加する。これで鉛ガラスで発生したチェレンコフ光の数が扱えるようになる。

## 4.2 物質と測定器形状の定義

物質や測定器の定義は Geant4 のプログラム中の、N03 というフォルダの中の ExN03DetectorConstruction.cc にかかれていて以下のようにになっている。

```
// default parameter values of the calorimeter
AbsorberThickness = 8.*mm;
GapThickness      = 2.*mm;
NbOfLayers       = 100;
CalorSizeYZ      = 100.*cm;
ComputeCalorParameters();

// materials
DefineMaterials();
SetAbsorberMaterial("Namarigarasu");
SetGapMaterial("Scintillator");
```

これは吸収層の厚さ(AbsorberThickness)が 8mm、検出層の厚さ(GapThickness)が 2mm、それが 100 レイヤーあるということ(100 回繰り返すということ)である。CalorSizeYZ はその直方体の断面積であり今回は、縦横ともに 100cm で面積 1 m<sup>2</sup>の正方形である。また、吸収層の物質は鉛ガラス、検出層の物質はシンチレータを用いた。なお鉛ガラスは以下のよう

```
G4Material* Namarigarasu =
new G4Material("Namarigarasu", density= 5.368*g/cm3, ncomponents=2);
Namarigarasu->AddMaterial(SiO2, fractionmass= 30.0*perCent);
Namarigarasu->AddMaterial(ZnO , fractionmass= 70.0*perCent);
```

これは鉛ガラスの密度が 5.368 [ g/cm<sup>3</sup> ]、その構成物質は、二酸化ケイ素が 30%、酸化鉛が 70%ということである。

今回は以上の定義の測定器を用いてシミュレーションを行った。



### 4.3 入射粒子の定義

ExampleN03 では、入射粒子の種類、入射エネルギー、入射回数をマクロファイルとして以下のように記述しておけば、これを実行することができる。また、この中の `verbose` の数字を変えることにより、画面に出力する情報を変えることができる。

```
# $Id: run1.mac,v 1.2 2000/11/21 10:59:42 maire Exp $
#
# Macro file for "exampleN03.cc"
#
# can be run in batch, without graphic
# or interactively: Idle> /control/execute run1.mac
#
/control/verbose 2
/control/saveHistory
#
/run/verbose 2
/event/verbose 0
/tracking/verbose 1
#
# muon 300 MeV to the direction (1.,0.,0.)
# 3 events
#
/gun/particle e-
/gun/energy 100 MeV
/run/beamOn 100
```

## 4.4 ファイルへの出力

シミュレーションの結果を解析するために、シミュレーションデータをファイルへ出力した。今回出力したのは、各イベントごとの吸収層に落ちたエネルギー、各イベントごとの吸収層で観測されたチェレンコフ光の数である。

各イベントごとの吸収層に落ちたエネルギーの出力は、ExN03EventAction.ccの中で

```
void ExN03EventAction::EndOfEventAction(const G4Event* evt)
{
    std::ofstream fout;
    fout.open("data",std::ios::app);

    if (evtNb%printModulo == 0)
    {
        fout
            << EnergyAbs
            << G4endl;
    }
}
```

と書くことにより得られる。

各イベントごとの吸収層で観測されたチェレンコフ光の数の出力は、ExN03StackingAction.ccの中で

```
void ExN03StackingAction::NewStage()
{
    std::ofstream fout;
    fout.open("data1",std::ios::app);
    fout
        << gammaCounter
        << G4endl;
}
```

と書くことにより得られる。

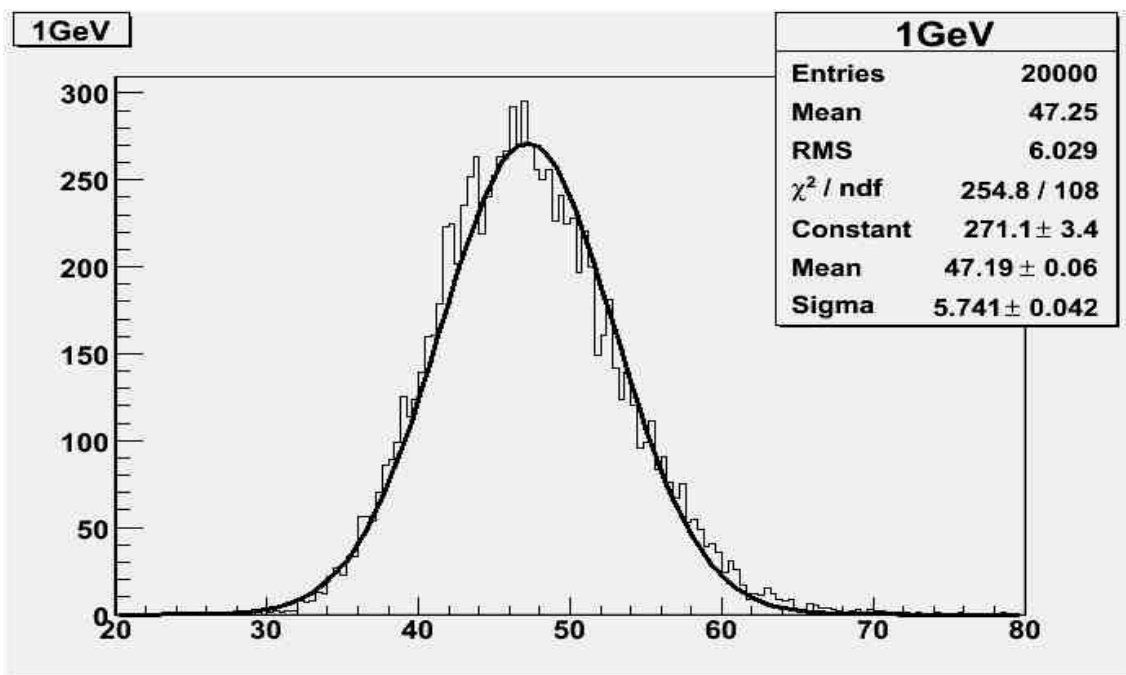
## 第5章 シミュレーションデータの解析

電子を 1GeV、5GeV、10GeV でカロリメータに入射させるシミュレーションをそれぞれ 10000 回行いヒストグラムを作った。ヒストグラムはガウス分布するとみなすことができガウス関数

$$f(x) = A \exp(-(x - X)^2 / (2\sigma^2))$$

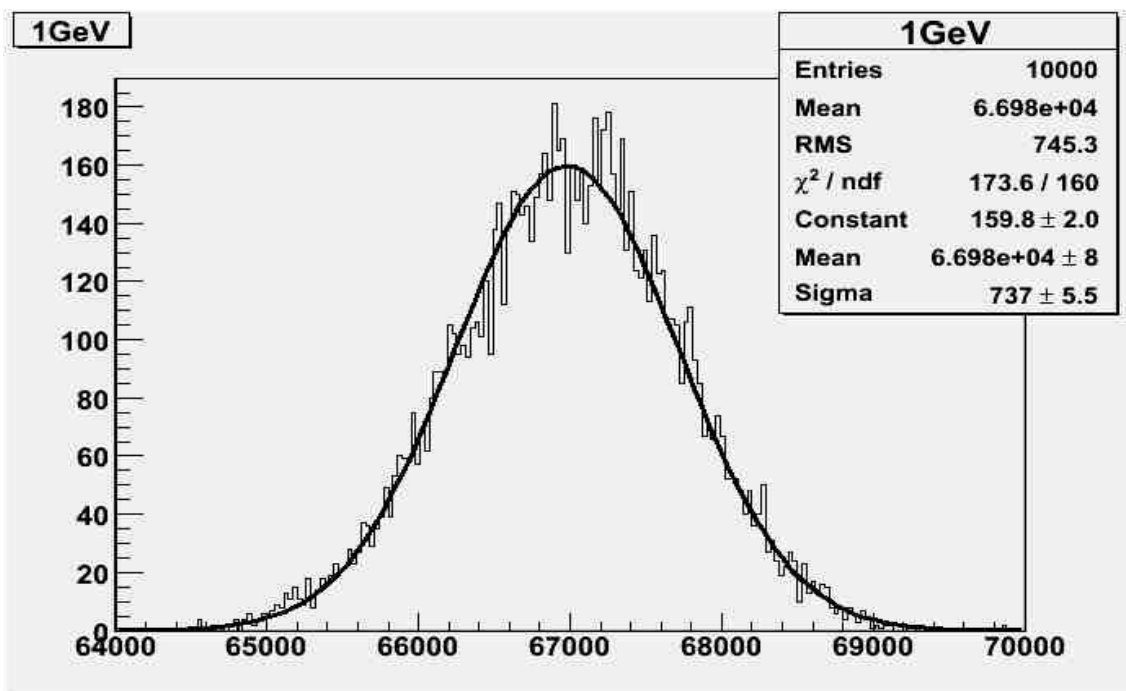
で fitting した。

電子を 1GeV で入射させたときのシンチレータに落ちたエネルギー



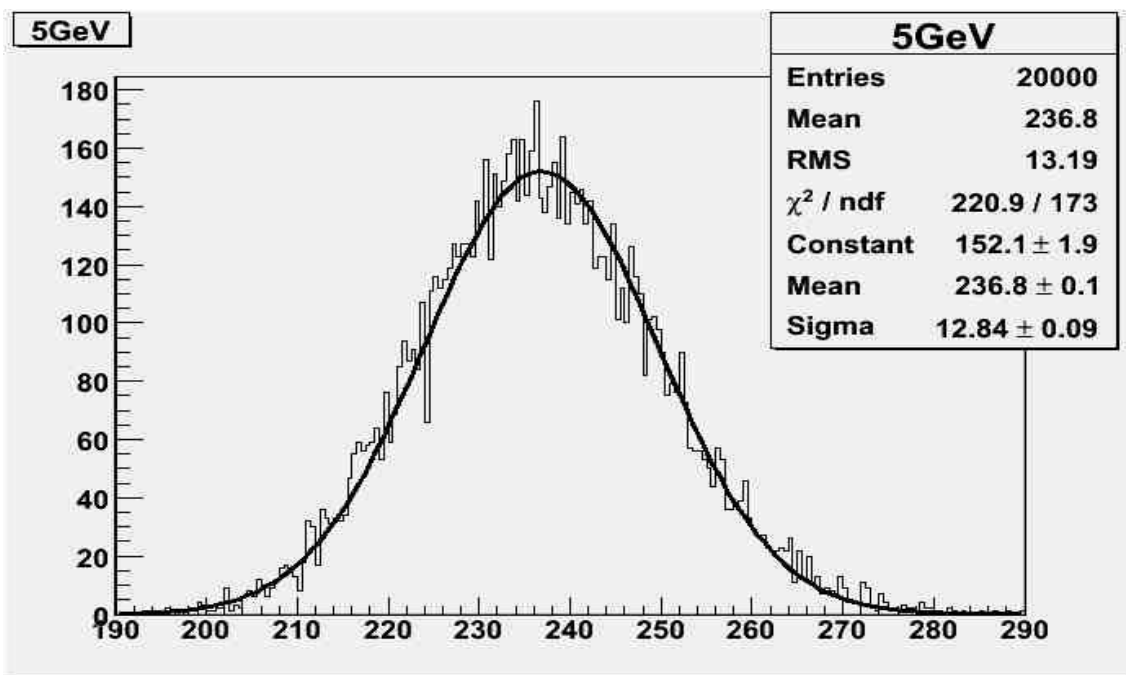
( 縦軸：個数 横軸：シンチレータに落ちたエネルギー (MeV) )

電子を 100MeV で入射させたとき鉛ガラスで検出されたチェレンコフ光の数



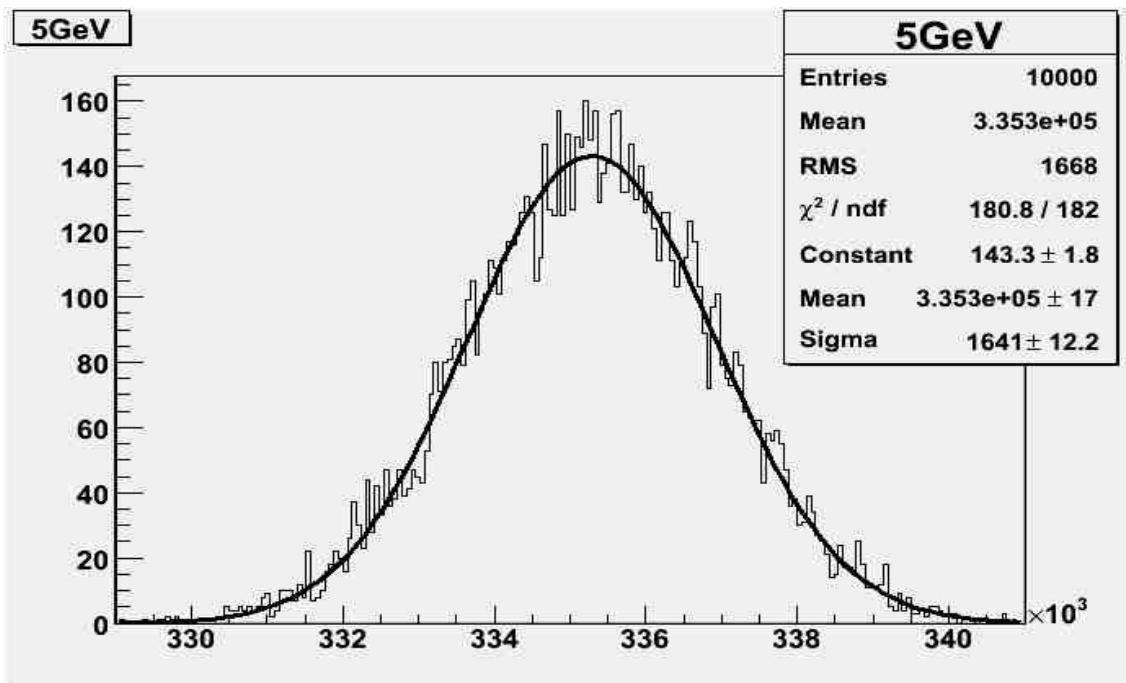
( 縦軸：個数 横軸：鉛ガラスで検出されたチェレンコフ光の数 )

電子を 5GeV で入射させたときのシンチレータに落ちたエネルギー



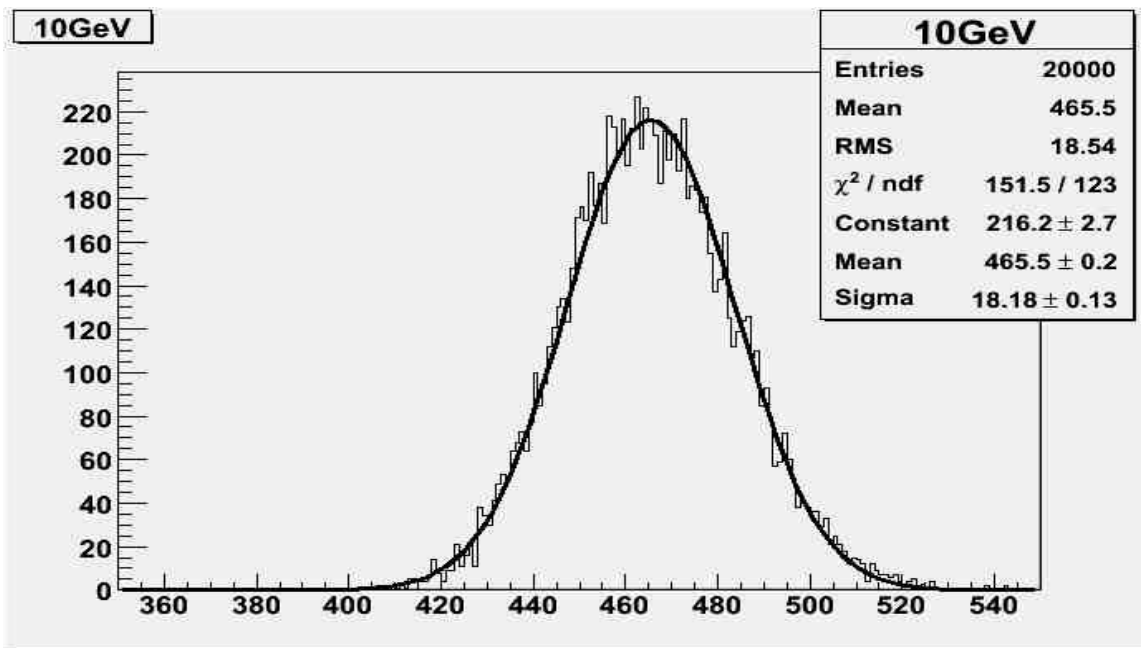
( 縦軸：個数 横軸：シンチレータに落ちたエネルギー (MeV) )

電子を 5GeV で入射させたとき鉛ガラスで検出されたチェレンコフ光の数



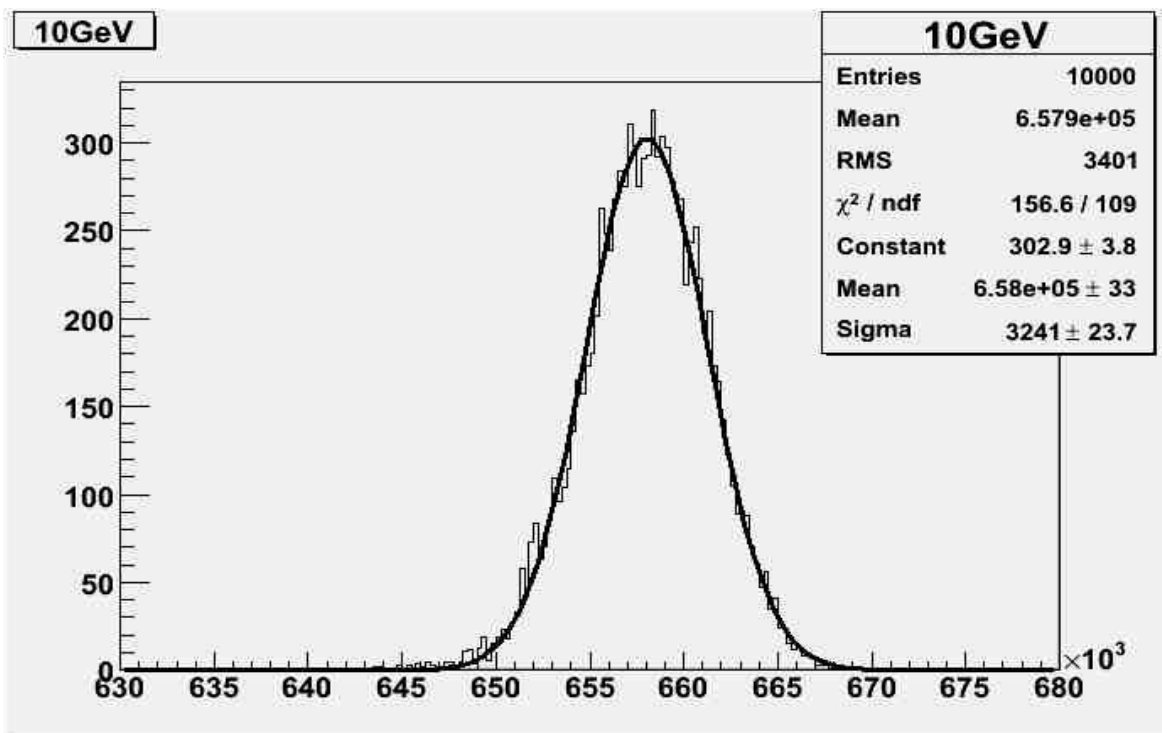
( 縦軸：個数 横軸：鉛ガラスで検出されたチェレンコフ光の数 )

電子を 10GeV で入射させたときのシンチレータに落ちたエネルギー



( 縦軸：個数 横軸：シンチレータに落ちたエネルギー (MeV) )

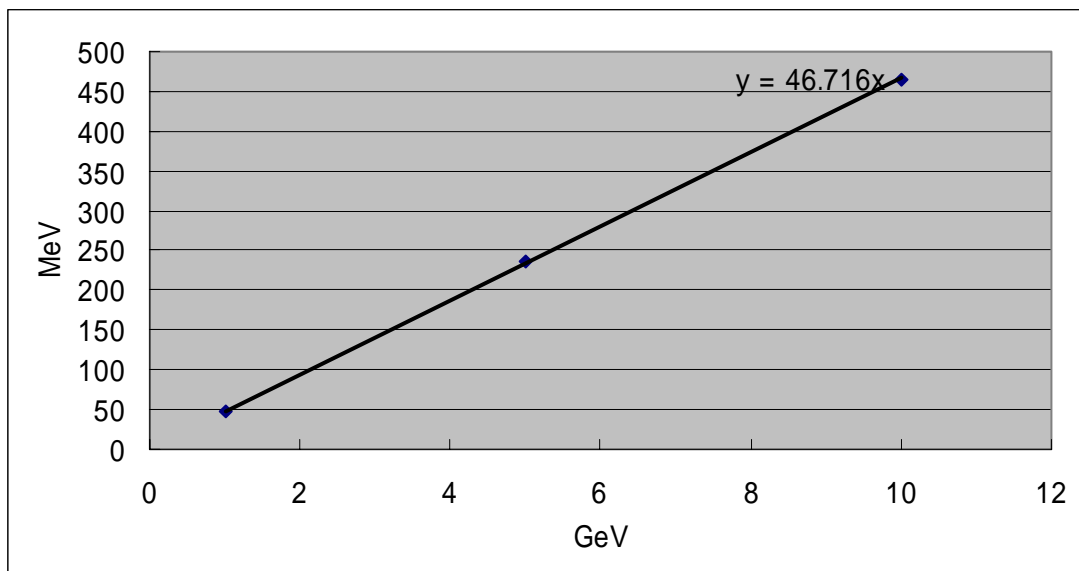
電子を 10GeV で入射させたとき鉛ガラスで検出されたチェレンコフ光の数



( 縦軸：個数 横軸：鉛ガラスで検出されたチェレンコフ光の数 )

ここで入射エネルギーとシンチレータに落ちたエネルギーの平均をプロットしてグラフを作った。

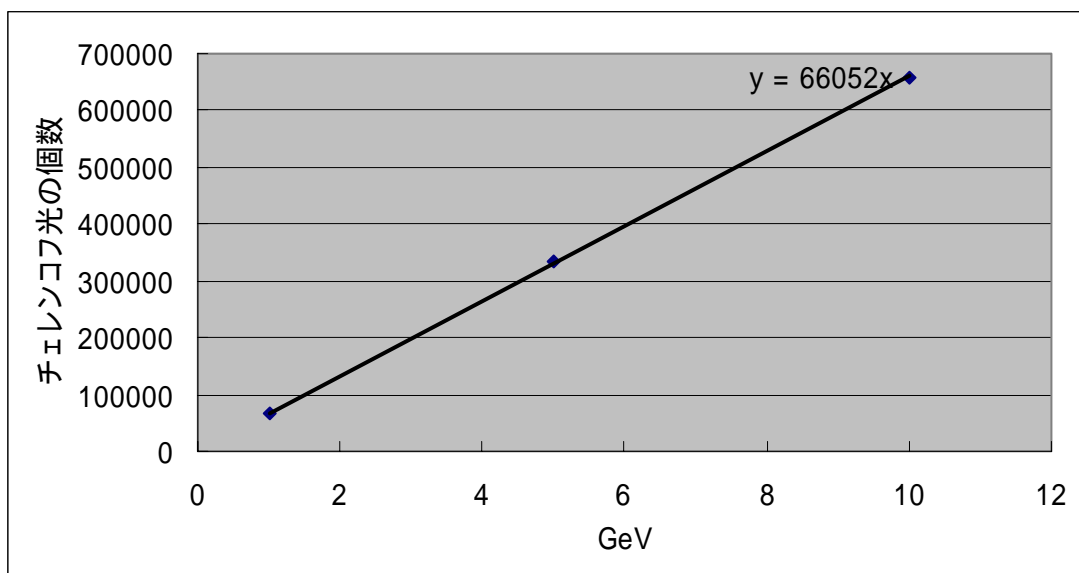
( 横軸：入射エネルギー 縦軸：シンチレータに落ちたエネルギー )



このグラフよりシンチレータに落ちたエネルギーは電子の入射エネルギーに比例しているといえる。よって、シンチレータに落ちたエネルギーを求めることにより、電子の入射エネルギーを求めることができる。

同様に入射エネルギーと鉛ガラスで発生したチェレンコフの数の平均をプロットしてグラフを作った。

( 横軸：入射エネルギー 縦軸：鉛ガラスで発生したチェレンコフ光の数 )



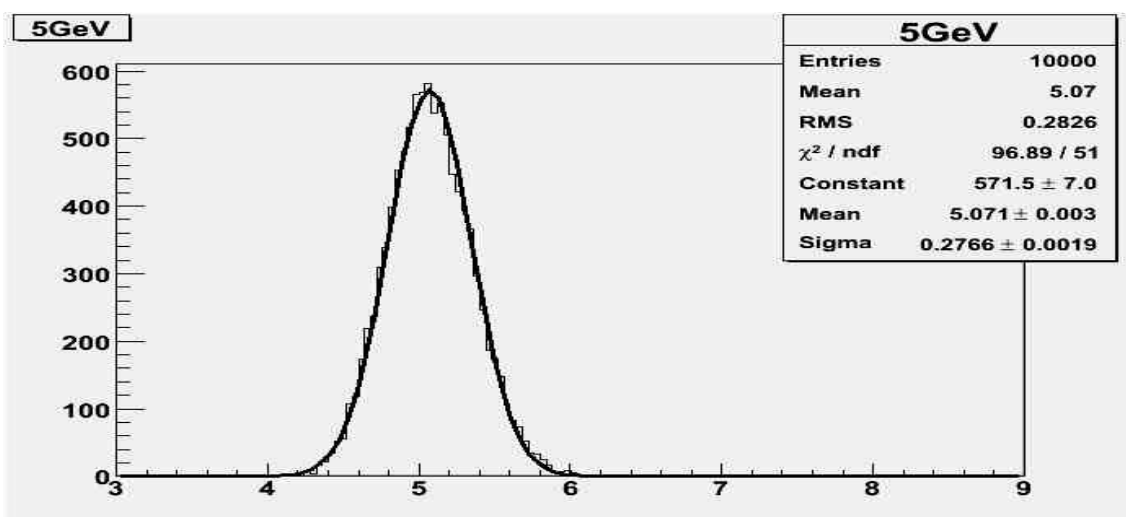
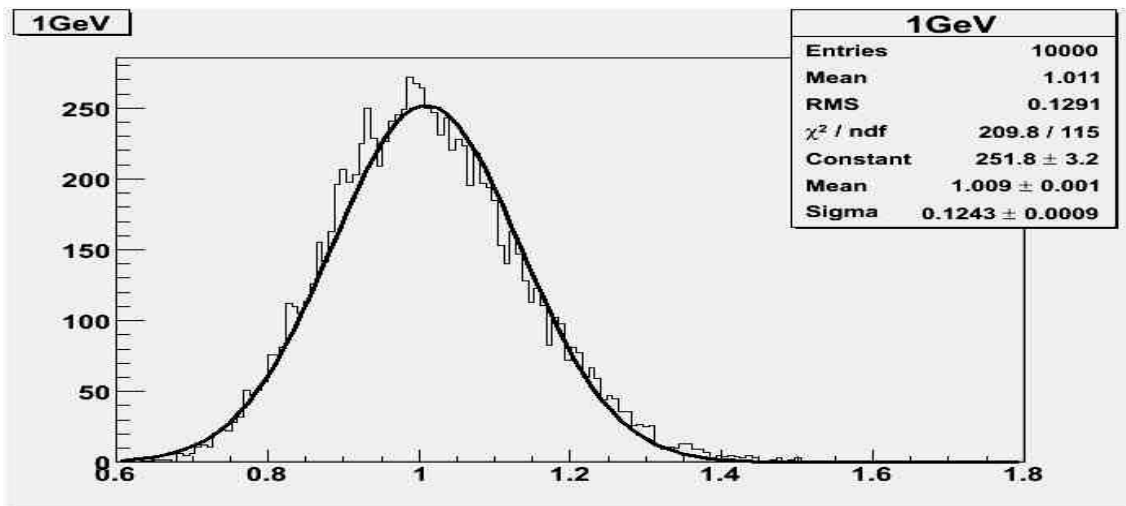
このグラフより鉛ガラスで発生したチェレンコフ光の数は電子の入射エネルギーに比例しているといえる。よって、鉛ガラスで発生したチェレンコフ光の数を求めることにより、電子の入射エネルギーを求めることができる。

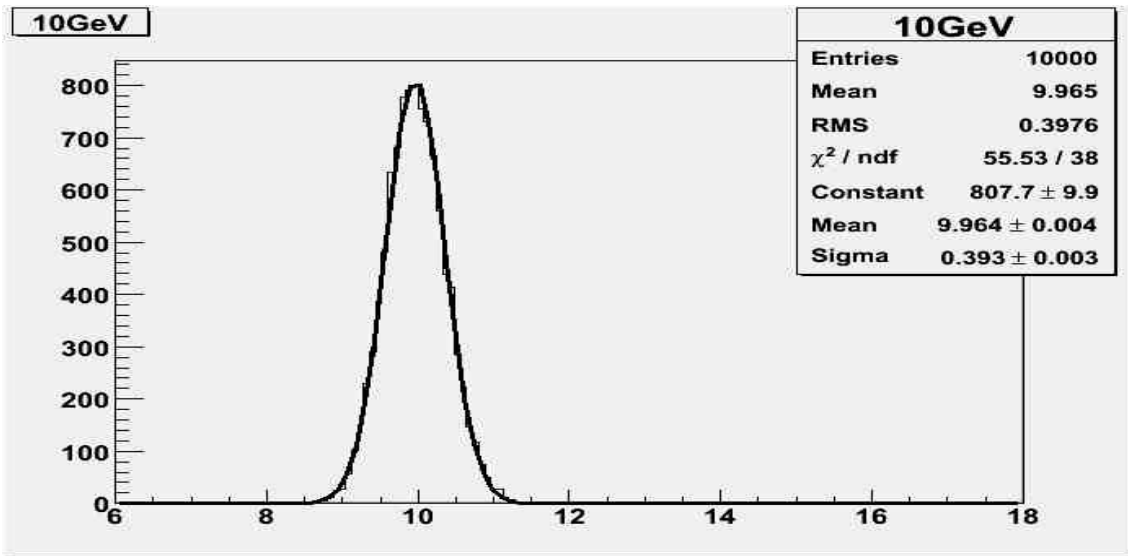
以下にシンチレータに落ちたエネルギーから電子の入射エネルギーを求めた結果と、鉛ガラスで発生したチェレンコフ光の数から電子の入射エネルギーを求めた結果を示す。



シンチレーション光より入射エネルギーを求めた場合

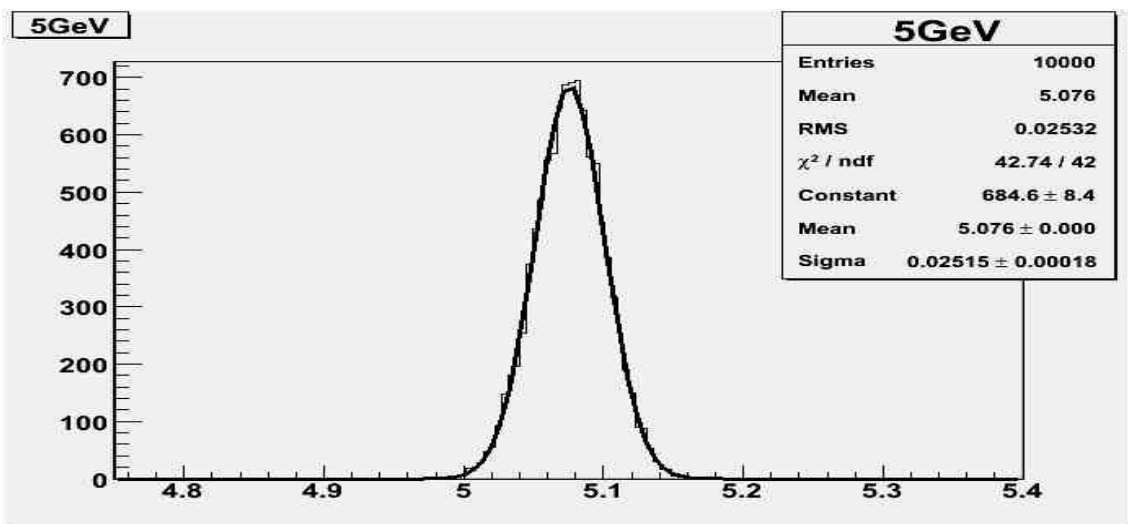
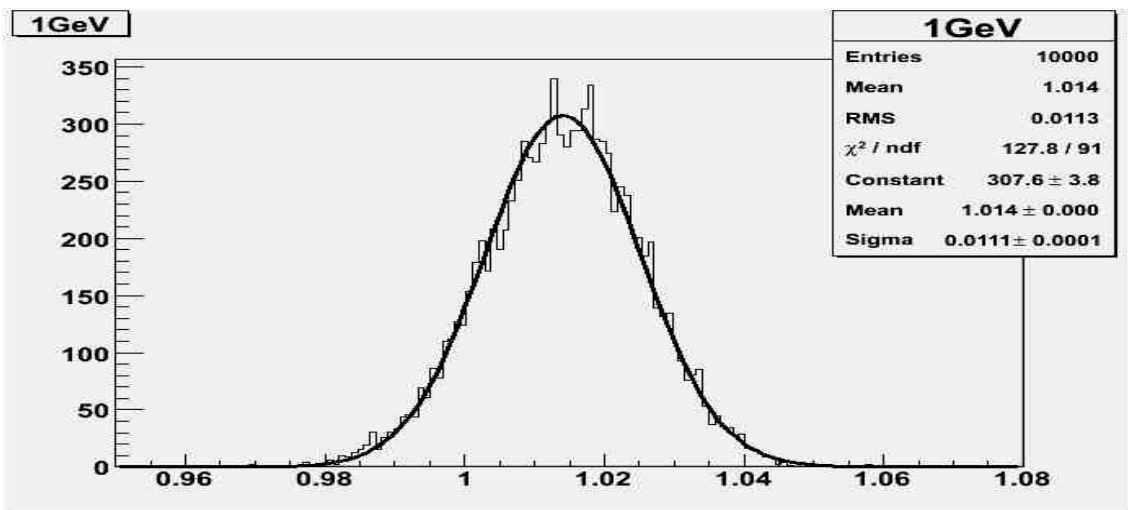
( 縦軸：個数 横軸：シンチレータに落ちたエネルギーから求めた入射エネルギー (GeV) )

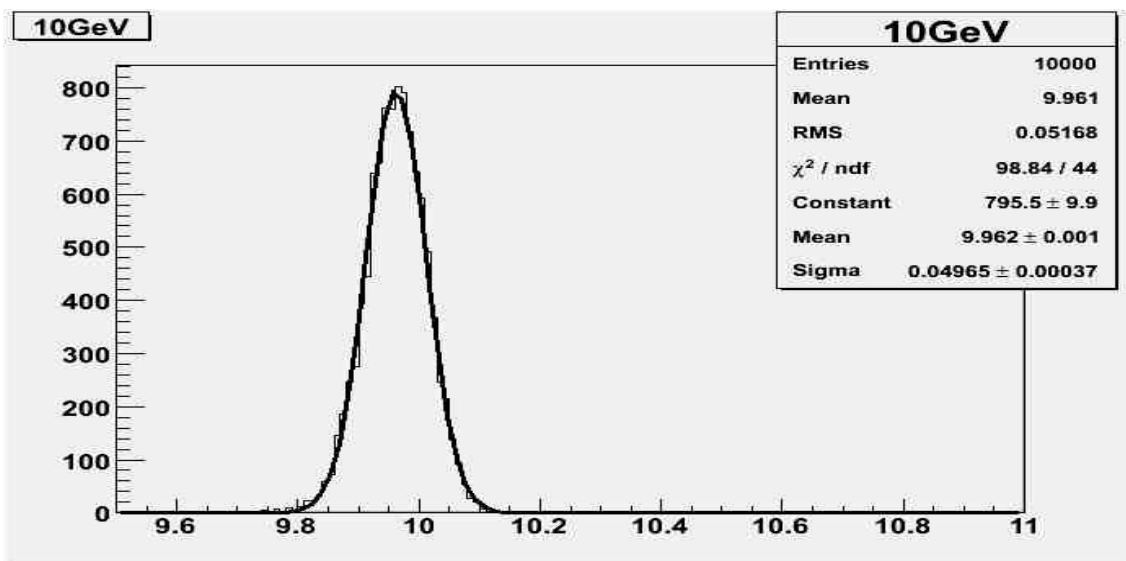




チェレンコフ光から入射エネルギーを求めた場合

( 縦軸：個数 横軸：鉛ガラスで発生したチェレンコフ光の数から求めた入射エネルギー (GeV) )





精度の比較

ここで精度を示す値としてそれぞれのガウス分布の  $\sigma/E$  を求める。  $\sigma/E$  の値が小さいほど精度が高いことを示している。なお  $\sigma$  は標準偏差、  $E$  はエネルギーの平均としている。

シンチレーション光より入射エネルギーを求めた場合

1GeV のとき  $\sigma/E = 0.12307$

5GeV のとき  $\sigma/E = 0.05455$

10GeV のとき  $\sigma/E = 0.039438$

チェレンコフ光から入射エネルギーを求めた場合

1GeV のとき  $\sigma/E = 0.010946$

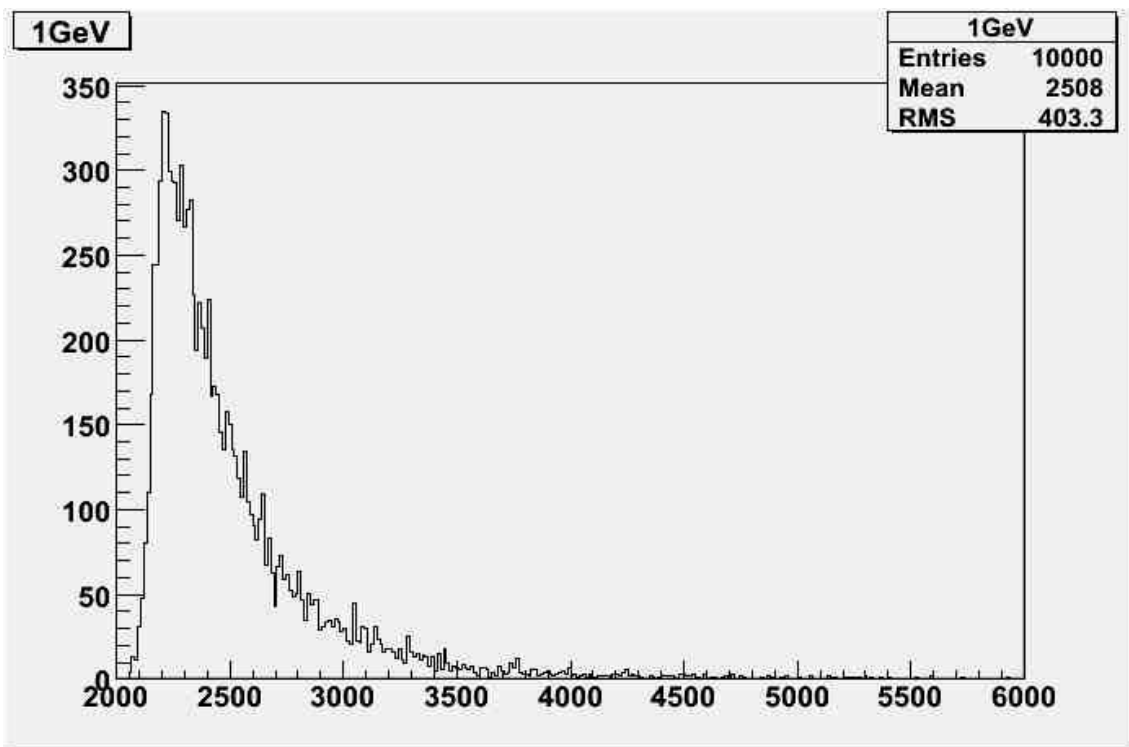
5GeV のとき  $\sigma/E = 0.004954$

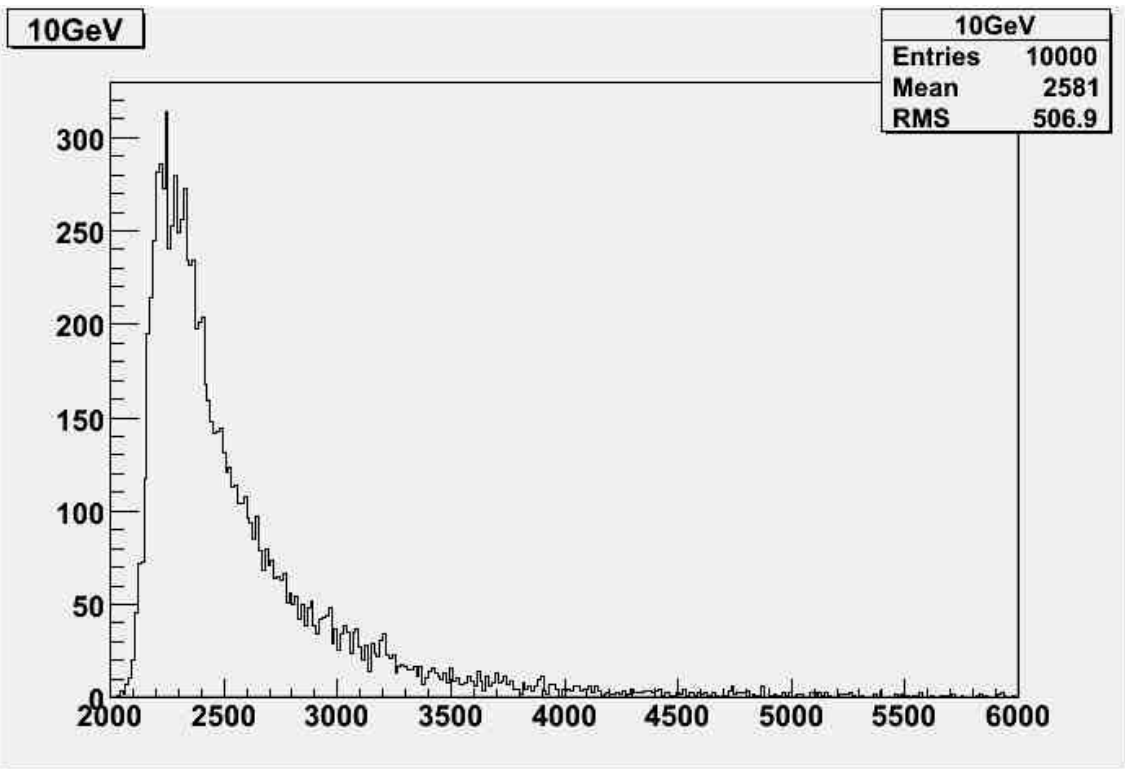
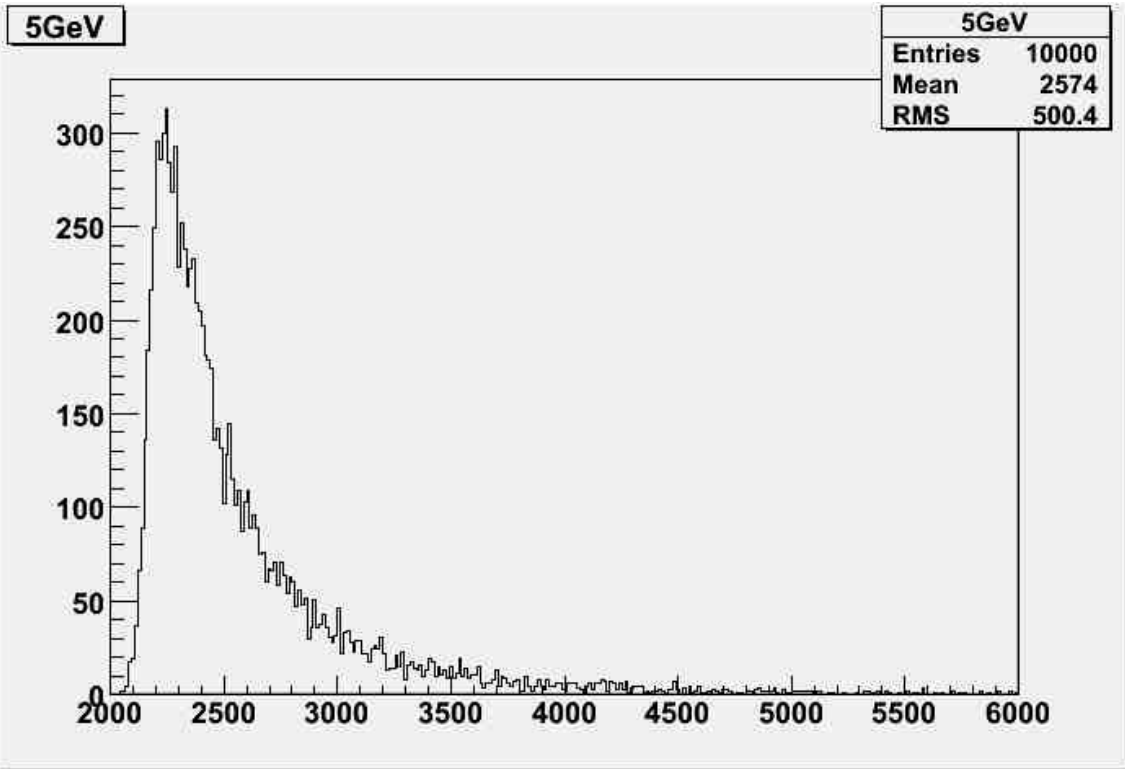
10GeV のとき  $\sigma/E = 0.004984$

これらの結果から、チェレンコフ光から入射エネルギーを求めた場合はシンチレーション光より入射エネルギーを求めた場合よりも、はるかに高い精度をもっていることがわかる。また、いずれも入射エネルギーが高くなるにつれ精度が高くなっていくことがわかる。

また、面積 100cm<sup>2</sup> で厚さ 4cm の鉛ガラス に  $\mu$  粒子を入射させる実験も行った。入射エネルギーは、1GeV、5GeV、10GeV の 3 パターン行った。

( 縦軸：個数 横軸：鉛ガラスに落ちたチェレンコフ光の数 )





入射エネルギーに増加に対して、鉛ガラスに落ちたチェレンコフ光の数の増加分が非常に小さいことに関しては、 $\mu$  粒子が物質と相互作用をほとんど行わずに鉛ガラスを突き抜けてしまうことが理由として挙げられる。

また、ヒストグラムがエネルギーの高いほうに尾を引いているように見られるものはランダウ分布と呼ばれるものである。

## 第6章 まとめ

検出層に落ちたエネルギーから粒子の入射エネルギーを測定する場合に比べ、吸収層で発生したチェレンコフ光の数から入射エネルギーを測定する場合はエネルギーの測定精度ははるかに高い結果になった。現在、実際の実験ではチェレンコフ光の測定精度は高くなく、検出層に落ちたエネルギーから粒子の入射エネルギーを測定する場合に比べ、精度は低くなっている。今後の課題は実際の実験と同じ測定精度でシミュレーションを行ってみることである。なお、今回のシミュレーションは発生したチェレンコフ光を 100%検出できた場合の話である。

# 謝辞

この研究にあたりご指導していただいた、竹下先生に深く感謝いたします。また、シミュレーションに関して多くのご指導をいただいた長谷川先生に深く感謝いたします。そして、多くの助言を下された、里山氏、伊藤氏に深くお礼申し上げます。