

物質中での空気シャワー粒子
シミュレーション

甲南大学工学部物理学科 宇宙粒子研究室
学籍番号 11061002
氏名 石田 哲也

目次

第一章 序論

- 1.1 宇宙線
- 1.2 空気シャワー
- 1.3 研究目的
- 1.4 宇宙線断層撮像プロジェクト

第二章 PHITS

- 2.1 PHITS
- 2.2 PHITS の特徴
- 2.3 PHITS のセクション構成

第三章 実験概要

- 3.1 実験手順
- 3.2 シミュレーション
- 3.3 プログラム
- 3.4 結果

第四章 まとめ

- 4.1 考察
- 4.2 今後の課題

参考文献

第1章 序章

1.1 宇宙線

宇宙線とは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線のことである。宇宙線の主成分は陽子およびヘリウムなどの原子核である。陽子は地球の磁場に曲げられるため、あるエネルギー以下のものは地球に入射できない。重い原子核に対しては、核子あたりの限界運動量が約2分の1になる。

宇宙線のほとんどは銀河系内を起源とし、超新星残骸などにより加速されていると考えられている。これらは、銀河磁場で銀河内に長時間閉じ込められるため、銀河内物質との衝突で破砕し、他の原子核に変化することがある。

実際、Li、Be、B、Sc、Vなどの元素の存在比が、太陽系内のものと宇宙線中とで大きく異なることが知られている。このため、宇宙線の元素比や同位元素の存在比を測定することで、宇宙線の通過した物質を推測することが出来る。遠方の銀河からもまた私たちが属している銀河系内からも、たくさんの宇宙線がやってきている。宇宙線は地球の大気に飛び込み、空気中の酸素や窒素の原子核と反応を起こします。（*空気シャワー）

粒子の強度は太陽活動によって変動する。太陽活動が激しくなると、太陽から放出される磁場のために宇宙線が押しやられ、活動極大時には1GeV以下の強度が約半分になってしまう。

陽子は宇宙背景放射の光子と衝突してエネルギーを失うため、 $6 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上のエネルギーの宇宙線は宇宙全体からではなく、大体50Mpc以内の近傍銀河の領域で生成されたものだけが地球に到達する。

地球大気に飛び込む前の宇宙線を一次線宇宙線、大気中の原子核などと反応した宇宙線を「二次宇宙線」とよびます。

二次宇宙線は、ミューオン、ニュートリノ、電子、ガンマ線、中性子が主成分でありこのうち電子やガンマ線は大気中で吸収されて減り、地上や地中まで来るのはミューオンとニュートリノがほとんどである。

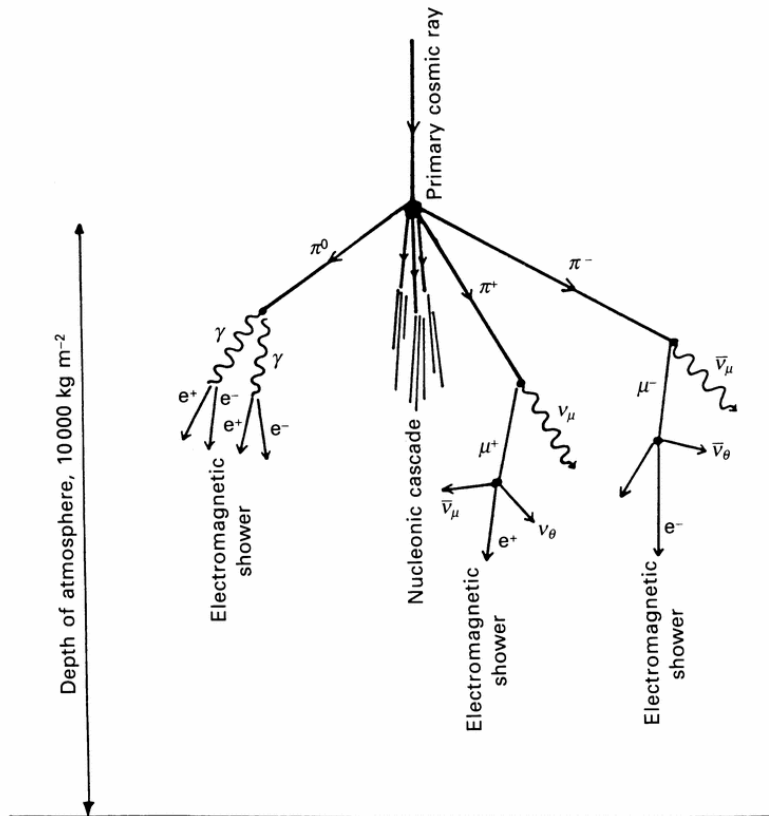
1.2 空気シャワー

宇宙には宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子が飛び交っている。この粒子が地球の大気上層で、大気中の原子核とぶつかり二次粒子を発生させ、地上に落ちてくる。この現象は空気シャワーと呼ばれる。発生した粒子のうち、寿命の短い粒子は崩壊し、地表まで落ちてくる粒子は主にガンマ線、電子、ミューオン、核子である。

宇宙線の到来頻度はエネルギーが高くなるにつれて極端に小さくなり、観測には大きな検出面積や長時間の観測が必要になる。このため、 10^{15} eV 以上の高エネルギー宇宙線を人工衛星や気球などを用いて直接観測することは難しくなる。このような場合でも、地表で空気シャワー観測を行うことで、間接的に高エネルギーの宇宙線を観測することが出来る。

空気シャワーの観測方法としては、次のようなものがある。1 つは、地表に到達した粒子を観測するものである。この場合、地表に複数の検出器を配置して、そこを通過した粒子を記録する。一方、空気シャワー中の荷電粒子が、大気中を通過した際に生じるチェレンコフ光やシンチレーション光といった微小な光を観測する方法もある。これは、月の無い、暗い夜にしか観測を行えない。

また、空気シャワーから生じる電波を観測する方法も考えられる。これは以前から注目され、実際に電波の検出には成功しているが、実用的な空気シャワーの観測手段としては確立されなかった。しかし、近年、この方法が再度試みられており、一部で関心が持たれている。



<http://alpha.sci.osaka-cu.ac.jp/grapes3/principle-j.html>

1.3 研究目的

PHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)を使って物質内での粒子の振る舞いをシミュレーションし、それらを目に見える形で表し理解を深めようとする。

最終目的の宇宙線コンピュータ断層撮像プロジェクトに役立てる。

1.4 宇宙線断層撮像プロジェクト

ミューオンというのは、質量が電子の約206倍であることを除けば、電子と同じ性質をもつ素粒子である。地表には、1平方メートルあたり、毎秒150個程度降り注ぐ。ミューオンはもともと貫通力の高い素粒子であるが、質量が電子の約206倍であるから、ニュートリノなどとは物質との相互作用は強い。そこで、密度の低い物質なら簡単に通り抜け、逆に物質の密度が高ければ通り抜けにくくなる。火山において、マグマは冷えて固体化したものと液状では密度が異なるので、火山の中を通過するミューオンの量を比較すれば、ドロドロのマグマの量を知ることができ、その火山の構造を断層のように表すことができる。



写真1 ミューオグラフィー観測

「宇宙線ミューオン」を使い撮影

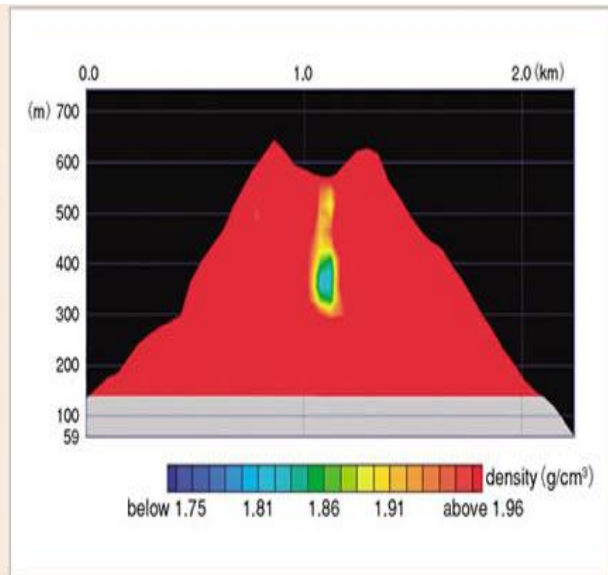


図2 薩摩硫黄島のミューオグラフィー

http://www.jishin.go.jp/main/herpnews/series/2009/0906_03.html

このことを利用すればピラミッドの内部などの構造を知ることが可能であると思われる。

第二章 PHITS

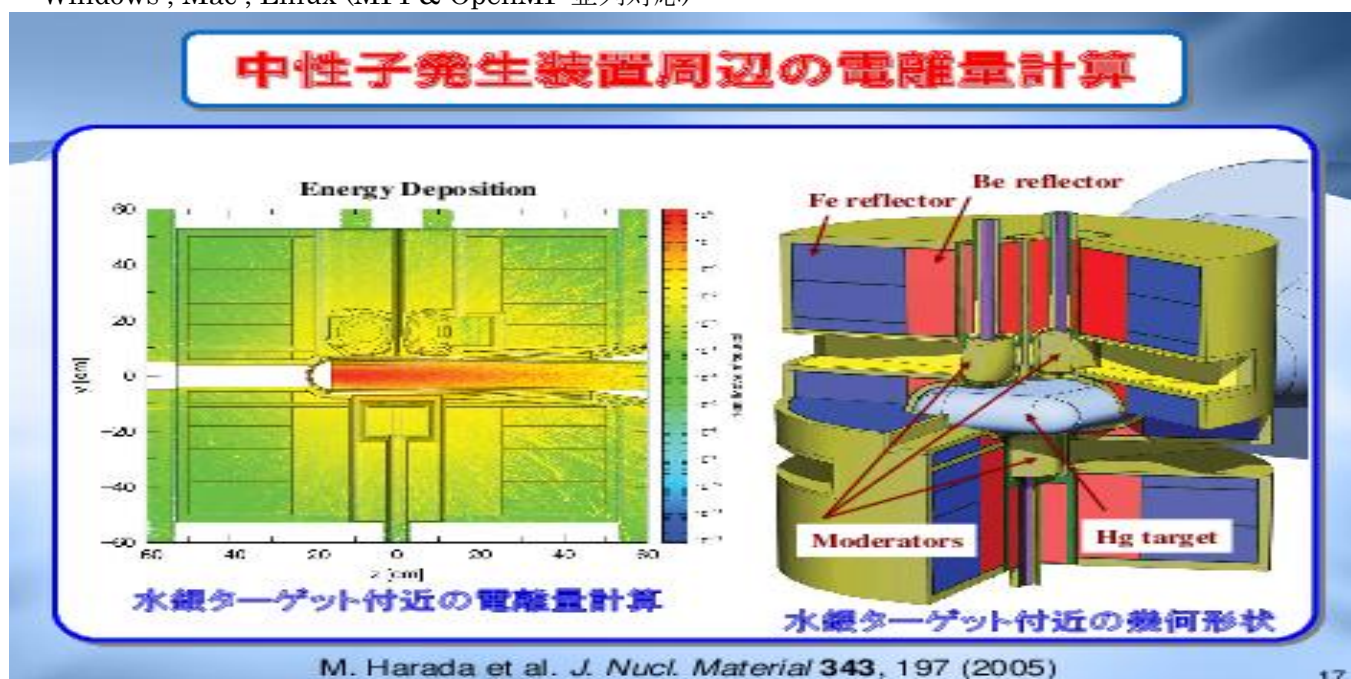
2.1 PHITS

PHITS とは、基幹開発機関の日本原子力研究開発機構 (JAEA)、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 及び財団法人高度情報科学技術研究機構 (RIST) の合意の下に、JAEA 外利用に対して提供可能なプログラムである。

広いエネルギーを持つ各種の放射線を扱える汎用の粒子・重イオン輸送計算コード。任意の体系中における陽子・中性子・重イオン・電子・光子などの挙動を、核反応モデル及びデータを用いて模擬することが出来る。

2.2 PHITS の特徴

- *言語 Fortran(Intel Fortran 11.1 , Gfortran 4.71 or later)
- *入力データ形式 任意のフォーマットの ASC IIコントロールファイル
ユーザーが Fortran プログラムを書く必要はない
- *幾何形状
 - ・任意の3次体系
 - ・2D&3D 描画ツール(ANGEL)
 - ・GUI 入力支援ソフト(SimpleGEO , option)
- *計算できる物理量
 - ・粒子フルエンス
 - ・発熱量
 - ・核反応生成粒子
 - ・電離密度分布など
- *出力データ形式
 - ・テキストデータ
 - ・ヒストグラム
 - ・等高線図
- *プラットフォーム
 - ・Windows , Mac , Linux (MPI & OpenMP 並列対応)



2.3 PHITS のセクション構成

[Title]

タイトルコメント

[Parameters]

変数の定義

[Source]

放射線に関する定義

[Material]

物質の定義

PHITSでは物質を

金の場合 197Au 100 のように

同位体 元素名 天然存在比と定義する方法と

水 1H 2 16O 1

空気 14N 8 16O 2

ポリエチレンの場合 12C 2 1H 4

と元素番号 元素名 個数と定義する方法がある。

[Surface]

面の定義

立方体を作る場合は[Surface]の項で面を六個組み合わせて箱を作る。

[Cell]

入れ物の定義

[T-Track]

検出器の定義

[End]

この八個のセクションで構成されている。

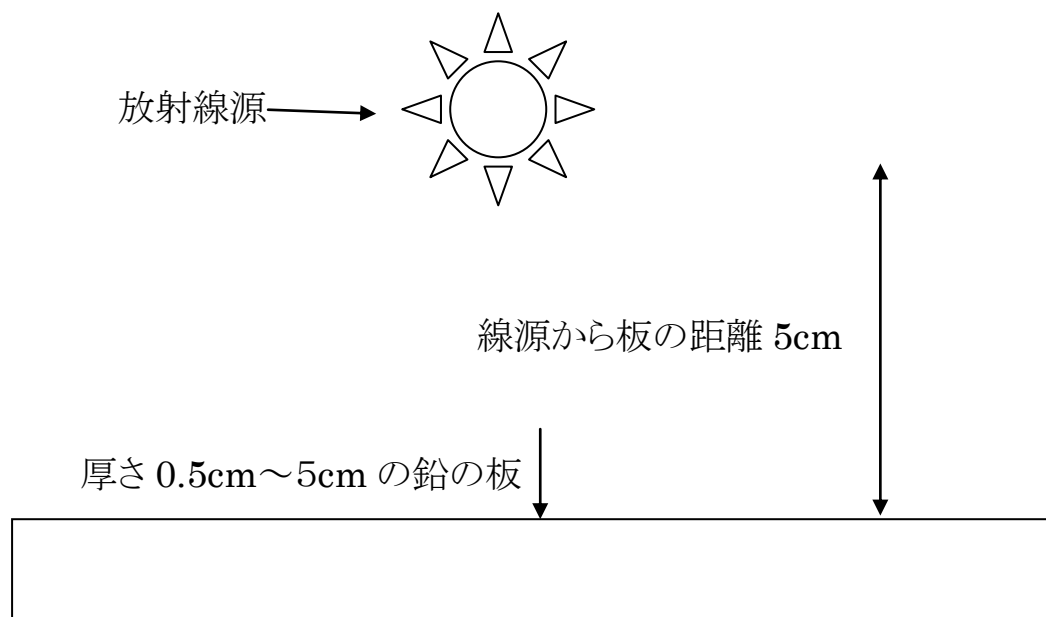
第三章 実験概要

3.1 実験手順

1. PHITSのディスクをWINDOWSのパソコンに入れPHITSをインストールしPATHを通す。
(PATHとは→外部記憶装置内「ハードディスクなど」でファイルやフォルダ名所在を表す文字列。
ファイルやフォルダのコンピュータ内での住所にあたる。)
PATHはシステムの詳細設定→環境変数から設定できる。
2. メモ帳、ワードパットなどでプログラムを組み、コマンドプロンプトで実行し出てくる図形を見る。

3.2 シチュエーション

今回このようなシチュエーションのプログラムを組んだ



説明

- 鉛の板の厚さを 0.5cm.1cm~5cm まで変化させ、鉛の板を通り抜けた後の粒子の振る舞いを見る。
- 放射線源の種類はミューオン、電子、ガンマ線で行う。
- 電子とガンマ線のエネルギーは10MeV.50MeV.100MeV で変化させて行う。
- ミューオンのエネルギーは1GeV でおこなう。
- 電子とガンマ線は10個の粒子を入射し透過した数を数え、透過率を計算しグラフにする。

3.3 プログラム

今回の実験に使ったプログラムである。

[Title]

sotuken

[Parameters]

```
icntl = 0 # (D=0) 3:ECH 5:NOR 6:SRC 7,8:GSH 11:DSH 12:DUMP
maxcas = 10 # (D=10) number of particles per one batch
maxbch = 1 # (D=10) number of batches
emin(2) = 1.000000000E-10 # (D=1.0) cut-off energy of neutron (MeV)
dmax(2) = 20.0000000 # (D=emin(2)) data max. energy of neutron (MeV)
emin(12) = 5.000000000E-01 # (D=1.d9) cut-off energy of electron (MeV)
emin(13) = 5.000000000E-01 # (D=1.d9) cut-off energy of positron (MeV)
emin(14) = 500.000000000E-03 # (D=1.d9) cut-off energy of photon (MeV)
dmax(12) = 1000.00000 # (D=emin(12)) data max. energy of electron (MeV)
dmax(13) = 1000.00000 # (D=emin(13)) data max. energy of positron (MeV)
dmax(14) = 1000.00000 # (D=emin(14)) data max. energy of photon (MeV)
igamma = 2 # (D=0) 0:No, 1:Old, 2:EBITEM, 3:EBITEM+Isomer
iprint = 1 # (D=0) photonuclear GDR, 1:analog, -1:implicit itall
file(6) = phits.out # (D=phits.out) general output file name
file(7) = c:/phits/data/xsdir.jnd # (D=xdirs) nuclear data input file name
file(14) = c:/phits/data/trxcrd.dat # (D=trxcrd.dat) photon data input file name
```

[Source]

```
s-type = 1 # mono-energetic axial source
proj = photon # kind of incident particle 粒子
dir = 0. # z-direction of beam [cosine]
phi = 180.
r0 = 0.1 # radius [cm] 半径
z0 = -10. # minimum position of z-axis [cm] z軸の最小位置
z1 = 10. # maximum position of z-axis [cm] z軸の最大位置
e0 = 10. # energy of beam [MeV]
```

[Material]

```
mat[1] 204Pb 0.014 206Pb 0.241 207Pb 0.221 208Pb 0.524
mat[2] 14N 8 16O 2
```

[MatNameColor]

```
mat name color
1 Pb brown
2 Air pastelviolet
```

[Surface]

```
10 so 500.
13 px -6.
14 px -5.
15 py -30.
```

```
16 py 30.
17 pz -30.
18 pz 30.
```

[C e l l]

```
100 2 -0.0012 -10 #105
101 -1 10
105 1 -11.34 13 -14 15 -16 17 -18
```

[T - T r a c k]

```
mesh = xyz # mesh type is xyz scoring mesh
x-type = 2 # x-mesh is linear given by xmin, xmax and nx
nx = 200 # number of x-mesh points
xmin = -30. # minimum value of x-mesh points
xmax = 1. # maximum value of x-mesh points
y-type = 2 # y-mesh is linear given by ymin, ymax and ny
ymin = -5.000000 # minimum value of y-mesh points
ymax = 5.000000 # maximum value of y-mesh points
ny = 1
z-type = 2 # z-mesh is linear given by zmin, zmax and nz
nz = 200 # number of z-mesh points
zmin = -15. # minimum value of z-mesh points
zmax = 15. # maximum value of z-mesh points
part = electron photon neutron
e-type = 1 # e-mesh is given by the below data
ne = 1 # number of e-mesh points
0.0 1000.0
unit = 1 # unit is [1/cm^2/source]
axis = xz # axis of output
file = xz_track_all.out # file name of output for the above axis
title = sotuken
gshow = 1 # 0: no 1:bnd, 2:bnd+mat, 3:bnd+reg 4:bnd+lat
epsout = 1 # (D=0) generate eps file by ANGEL
```

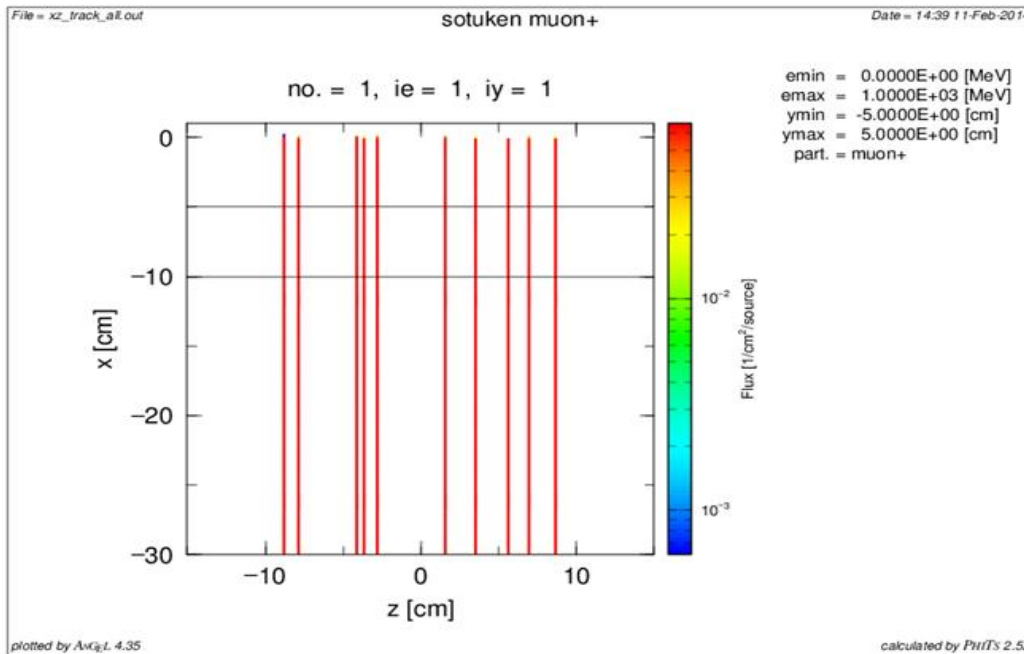
[E n d]

ミュオンにはこのプログラムとは違うものを使っている。

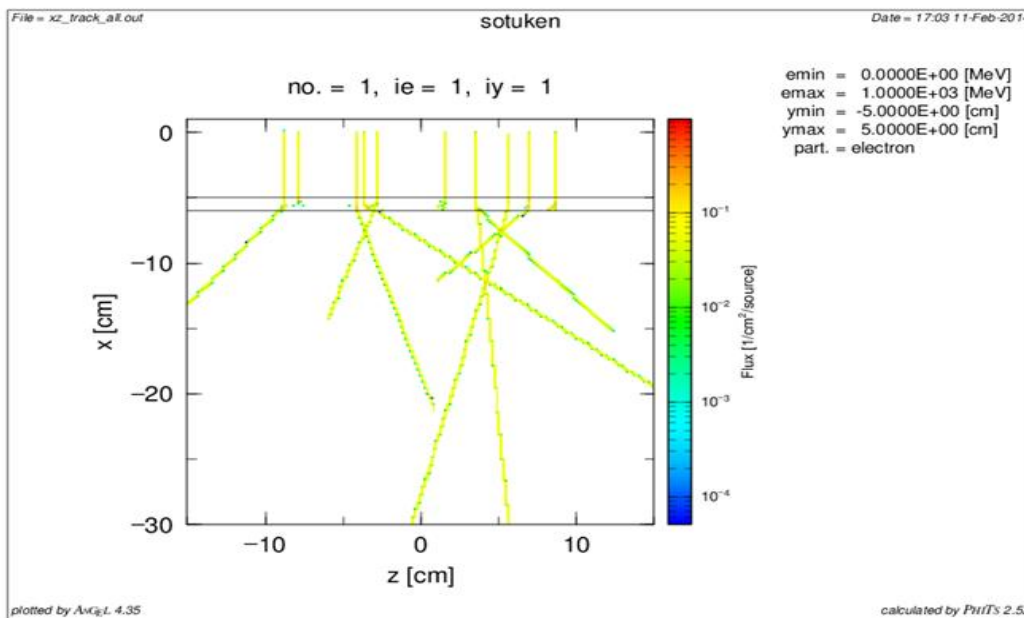
PHITSはデフォルトではelectron,photonの輸送計算は行なえないようになっている。

3.4 結果

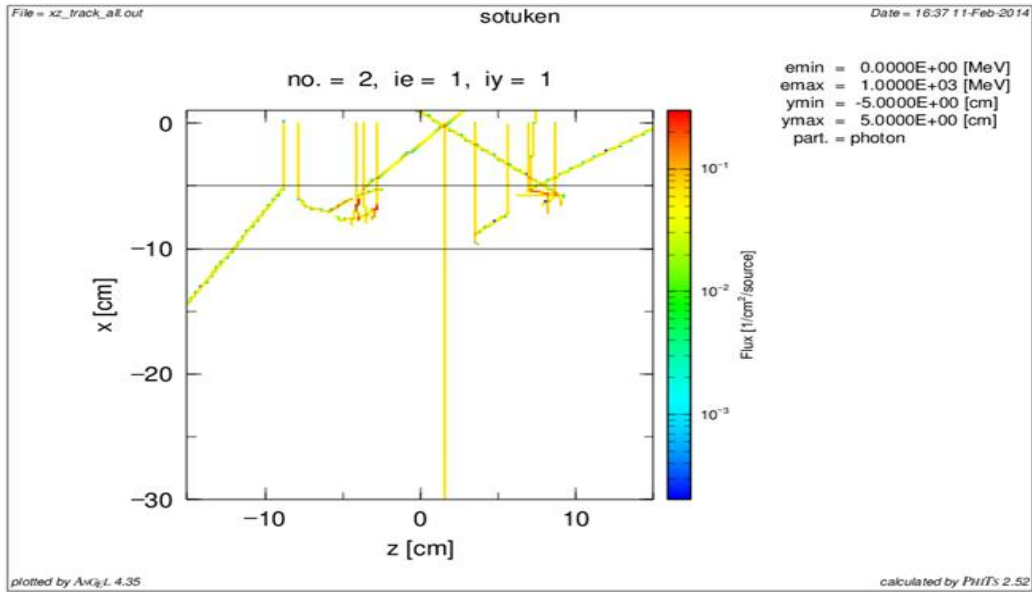
• ミューオン 1GeV 鉛の厚さ 5cm



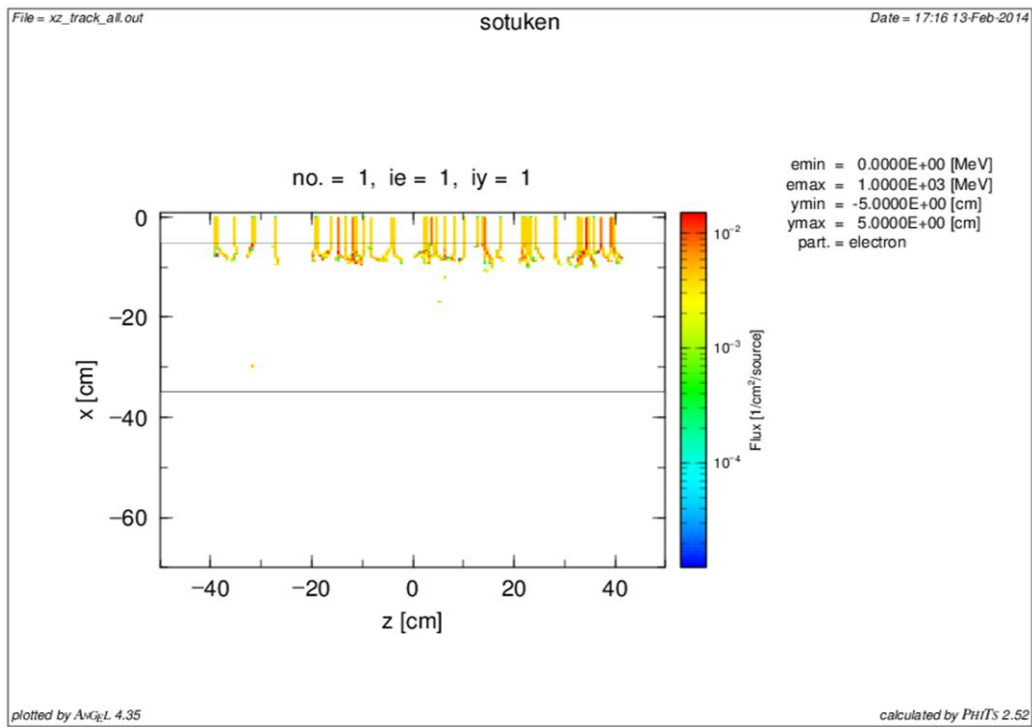
• 電子 100MeV 鉛の厚さ 1cm



• Photon 10MeV 鉛の厚さ 5cm



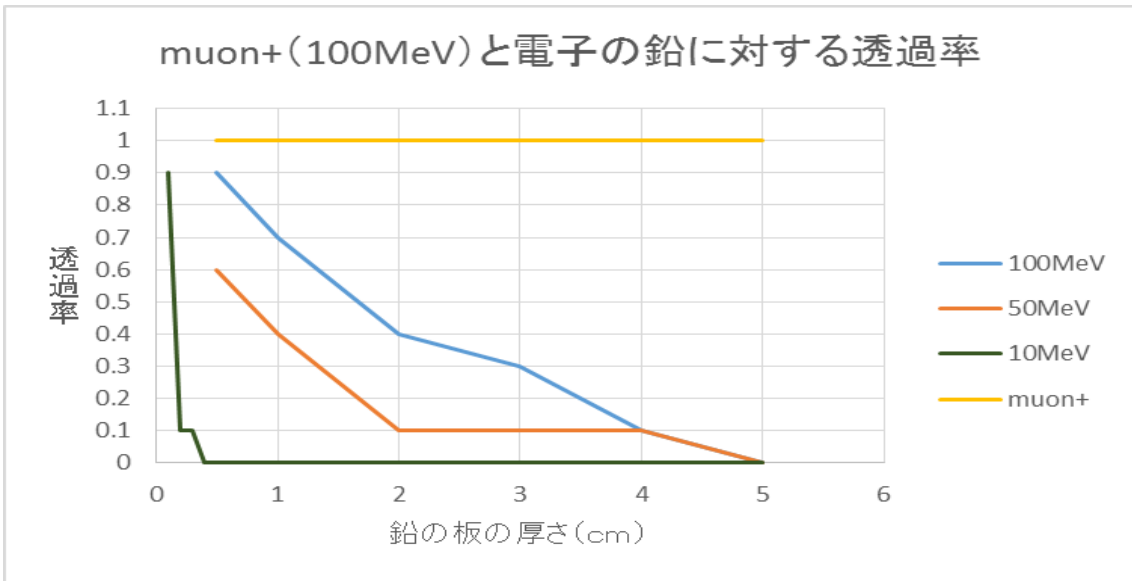
• 電子10MeV 厚さ30cm 水



・電子と photon の鉛に対する透過率の表

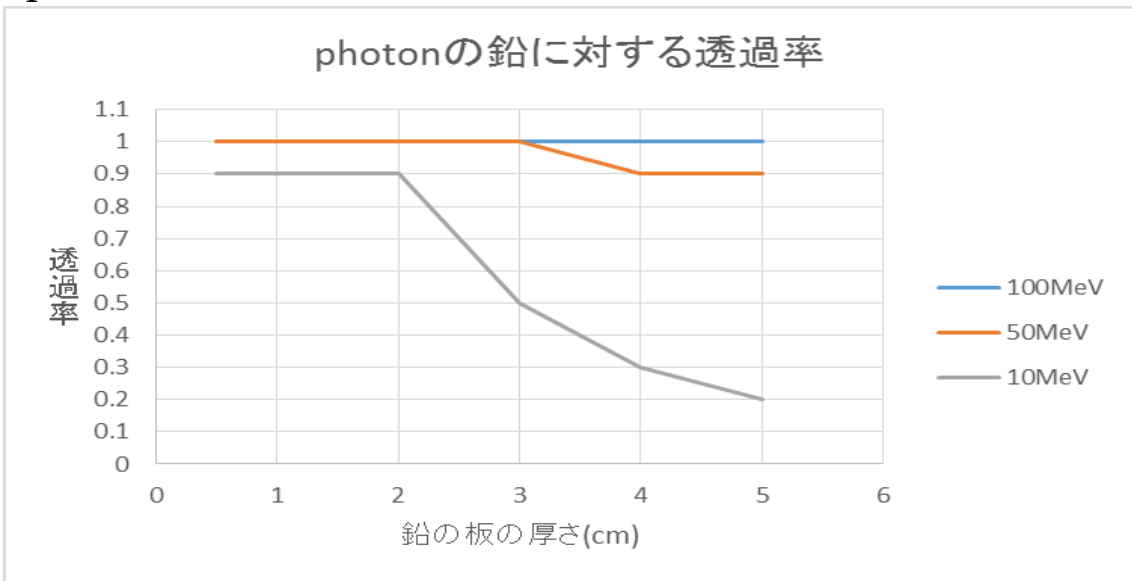
電子				photon			
100MeV	厚さcm	透過率	通った個数	100MeV	厚さcm	透過率	通った個数
	5	0	0		5	1	10
	4	0.1	1		4	1	10
	3	0.3	3		3	1	10
	2	0.4	4		2	1	10
	1	0.7	7		1	1	10
	0.5	0.9	9		0.5	1	10
50MeV	厚さcm	透過率	通った個数	50MeV	厚さcm	透過率	通った個数
	5	0	0		5	0.9	9
	4	0.1	1		4	0.9	9
	3	0.1	1		3	1	10
	2	0.1	1		2	1	10
	1	0.4	4		1	1	10
	0.5	0.6	6		0.5	1	10
10MeV	厚さcm	透過率	通った個数	10MeV	厚さcm	透過率	通った個数
	5	0	0		5	0.2	2
	4	0	0		4	0.3	3
	3	0	0		3	0.5	5
	2	0	0		2	0.9	9
	1	0	0		1	0.9	9
	0.5	0	0		0.5	0.9	9
	0.4	0					
	0.3	0.1					
	0.2	0.1					
	0.1	0.9					

• muon+(100MeV)電子の鉛に対する透過率のグラフ



*このミュオンは100MeV の場合

• photon の鉛に対する透過率のグラフ



4.1 考察

- 入射した電子が二つに分かれているのは、電子が鉛の中の原子にぶつかり電子をはじき出した為だと考えられる。またこの場合は出てきた電子は一つとしてカウントしている。
- muon+は電子と比較するために 100MeV にしているが、実際地表に落ちてくるのは1GeV のエネルギーを持っているのでかなり透過率が高いことが分かる。
- 鉛の透過率は EGS5 でシミュレーションを行なった田中君とほとんど同じになった。
- 今回行なった水のシミュレーションから、PHITS でミューオン、ガンマ線、電子を組み合わせることにより建物の構造や地層表面近くでの組成の解明に役に立ちそうである。

4.2 今後の課題

- 今回 photon の透過率を調べたが、実際検出器で検出するのは電子なので、photon を入射して出てくる電子の数を数える実験を行う。
- 7号館を PHITS 上に作り、上空からミューオン、電子、ガンマ線を降らせ建物内でどのような振る舞いをするかを見る。

参考文献

- Phits-basic-lecture-jp
- 日本原子力研究開発機構

謝辞

今回研究を進めるにあたり、ご指導いただいた梶野文義教授、山本常夏准教授に感謝いたします。また宇宙粒子研究室の皆様、両親にお礼申し上げます。
ありがとうございました。