

Geant4を用いた宇宙線ミュオン ラジオグラフィによる火山内部 イメージングモデルの構築

第18回 B2JS勉強会

東北大学物理学科 4年 石川歩

CONTENTS

I . イントロダクション

i . 宇宙線ミュオンラジオグラフィの概要

ii . シミュレーションツール : Geant4

II . 本研究の内容

i . シミュレーションの準備

ii . 解析の準備

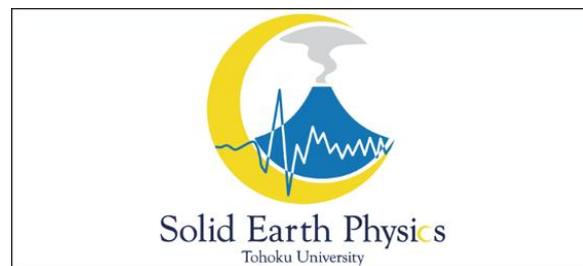
III . まとめと今後の課題

I . イントロダクション

進路と来年度の研究テーマ

進路

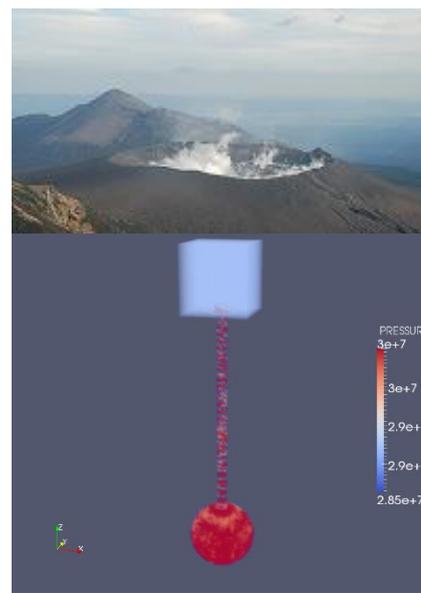
東北大学大学院理学研究科
地球物理学専攻固体地球物理学講座
(地震学・火山物理学)



研究テーマ

「火山噴火予知」

- ・火道流の数値シミュレーション
- ・噴火予測モデルの構築





プロジェクトリーダー

【事業内容】

- ・事業期間:10年間
- ・連携推進体制
他省庁の研究機関、海外の研究機関等と密に連携

先端的な火山観測技術の開発

火山透過技術 高エネルギー物理
リモートセンシング 資源工学
火山ガス観測 地球化学

従前の観測研究と他分野との連携・融合

火山噴火の予測技術の開発

火山噴出物分析 物質科学
噴火履歴調査 歴史学、考古学、地質学
シミュレーション 計算科学

火山災害対策技術の開発

リアルタイム災害把握技術 測量、画像処理
リアルタイム降灰予測 計算化学、気象学
災害対策情報ツールの開発 社会防災

各種観測データの一元化

大学間の連携促進、他分野の参入
国際DB規格による流通 情報科学

アウトプット

直面する火山災害への対応
(災害状況をリアルタイムで把握し、活動の推移予測を提示)

火山噴火の
発生確率を提示

理学にとどまらず工学・
社会科学等の広範な知識を
有する研究者を育成・確保
(80人→160人)

博士課程学生を研究プロジェクトに参画
博士課程修了後にポスドクとして起用

火山研究人材育成コンソーシアム

人材育成プログラムへの参画・協力
早期に優秀な学生を獲得

「人材育成運営委員会」運営方針

研究プロジェクトと連携し、
若手研究者の育成・確保を推進

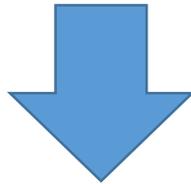


行政機関(国、地方)、
民間企業等での活躍



今年度の研究

- ✓ 来年度はシミュレーション屋
- ✓ 高エネルギー物理学と火山に関係

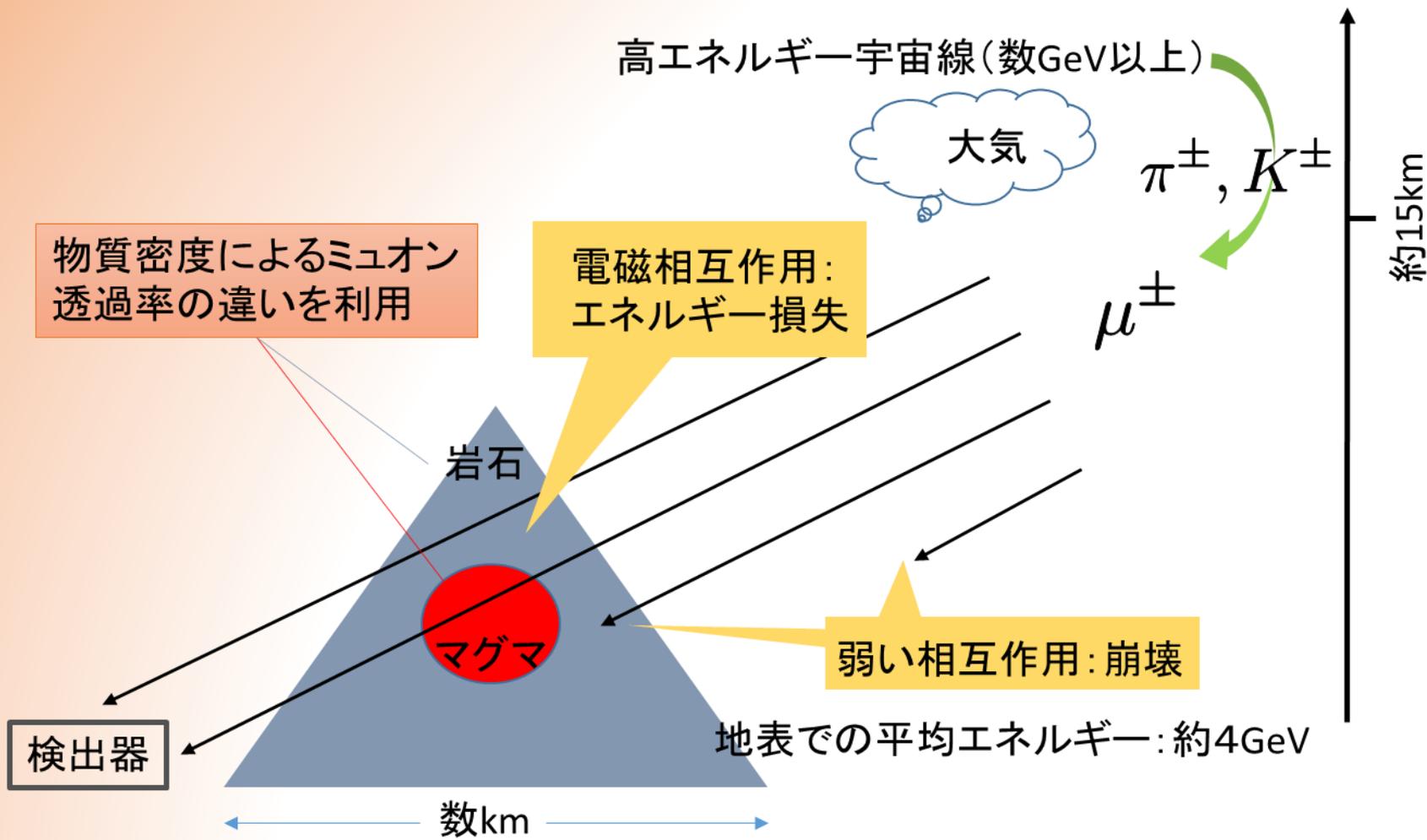


先端的な火山観測技術の開発
火山透過技術 高エネルギー物理

宇宙線ミュオンラジオグラフィ(以下“**ミュオグラフィ**”)と
シミュレーションの勉強

i . ミュオグラフィの概要

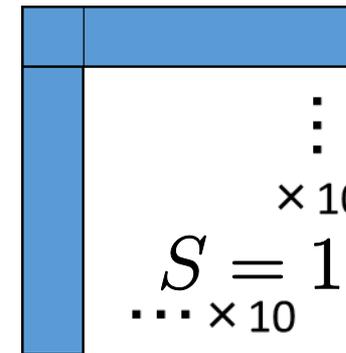
宇宙線ミュオンの物質透過



ミュオン検出器

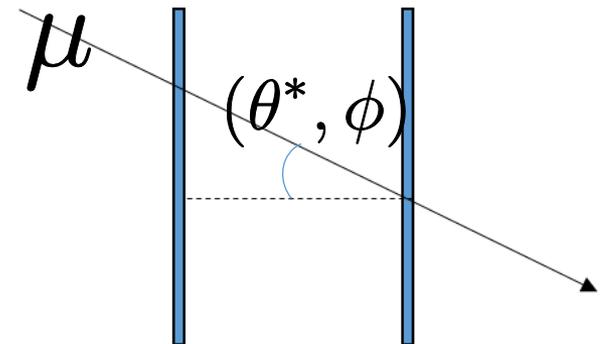
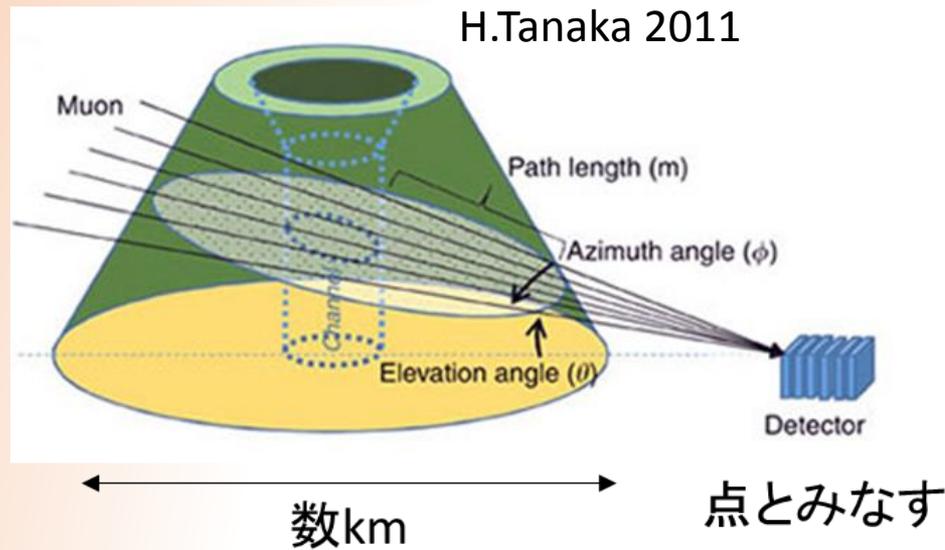
主流
: プラスティックシンチレータ

面積 $10\text{cm} \times 100\text{cm}$ を 20 枚


$$S = 1 [\text{m}^2]$$

... $\times 10$

$\times 10$



ミュオン検出器

検出器で得られる情報:

ミュオンの飛来方向 (θ^*, ϕ)

→ある経路 (θ^*, ϕ) のミュオンフラックス

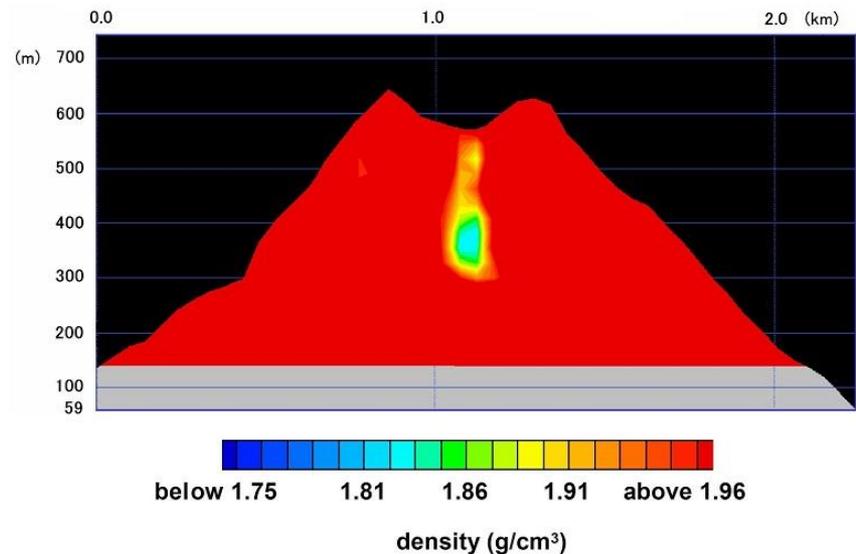
$$F(E_\mu, \theta^*, \phi)$$



経路ごとの平均密度

$$\rho(\theta^*, \phi)$$

H.Tanaka 2013



青: 低密度

赤: 高密度

ミュオグラフィの原理

観測値

$F(\theta^*, \phi)$ フラックス

(θ^*, ϕ) 経路(方向)

理論式

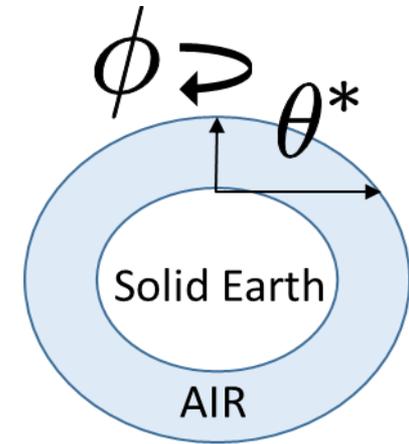
$\frac{dE}{dX}(E)$ 電磁相互作用によるエネルギー損失
Bethe-Bloch formula に従う

$N_\mu(E_\mu, \theta^*)$ ミュオンのエネルギースペクトル

フラックスの表式

$$F(E_\mu, \theta^*, \phi) = \int_{E_\mu} dF(E_\mu, \theta^*)$$

$$F(E_{\min}, \theta^*) = \int_{E_{\min}}^{\infty} N_\mu(E_\mu, \theta^*) dE_\mu$$



経路の物質を透過できるエネルギーの下限値 E_{\min} を得る

ミュオグラフィの原理

観測値

$F(\theta^*, \phi)$ フラックス

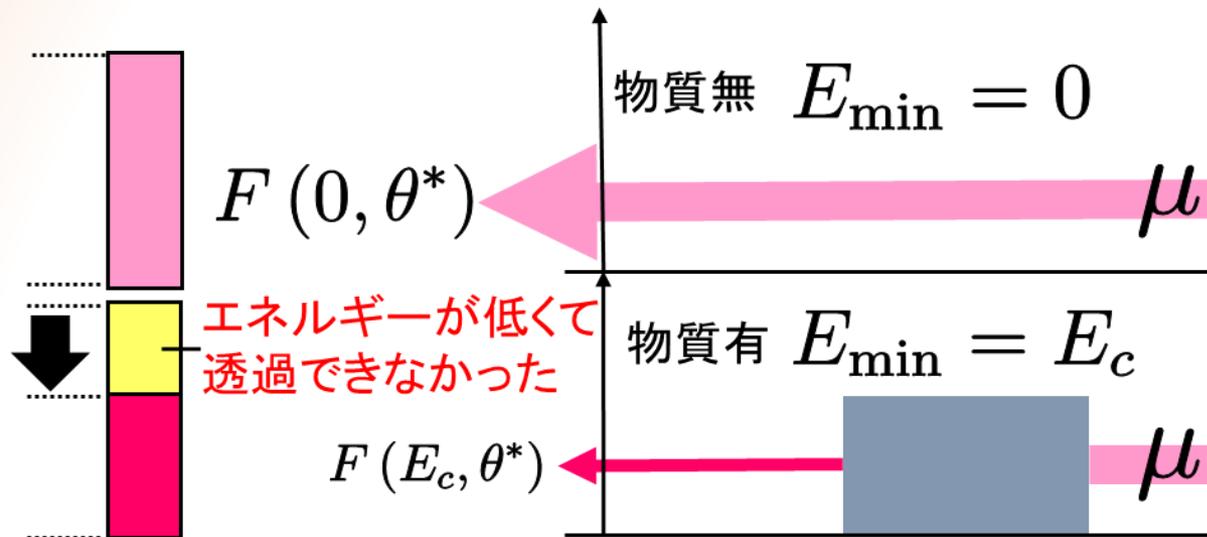
(θ^*, ϕ) 経路(方向)

理論式

$\frac{dE}{dX}(E)$ 電磁相互作用によるエネルギー損失
Bethe-Bloch formula に従う

$N_\mu(E_\mu, \theta^*)$ ミュオンのエネルギースペクトル

E_{\min} : 経路の物質を透過できる最低エネルギー



密度分布のマッピング

ミュオンの飛程(密度長)

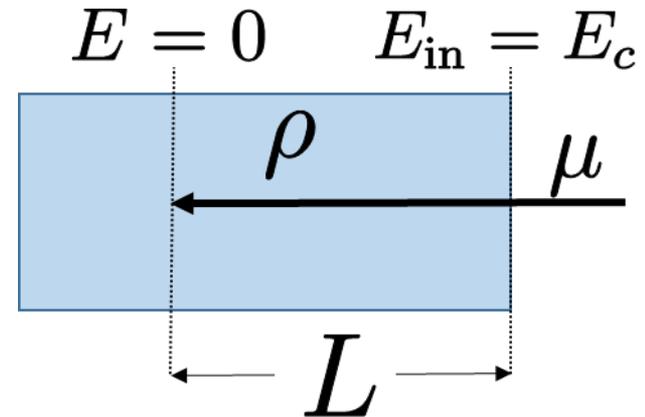
$$X(E_c) = \int_0^{E_c} \left(\frac{dE}{dX} \right)^{-1} dE$$

各経路(θ^* , ϕ)ごとの平均密度

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{X \text{ (g/cm}^2\text{)}}{L \text{ (cm)}}$$

X : ミュオンが通過してきた飛程

L : 地形図から読み取った経路長

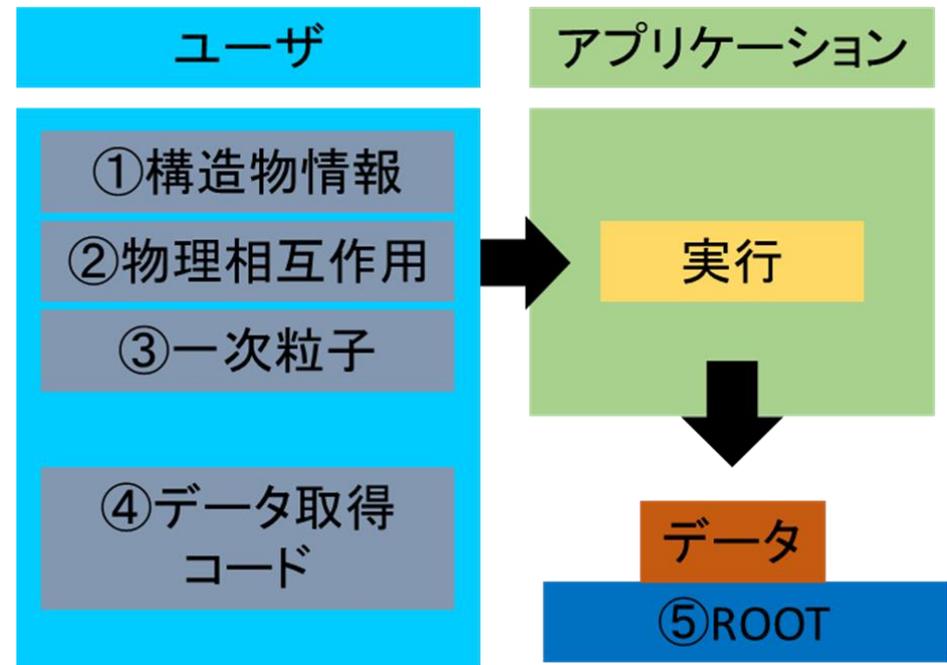
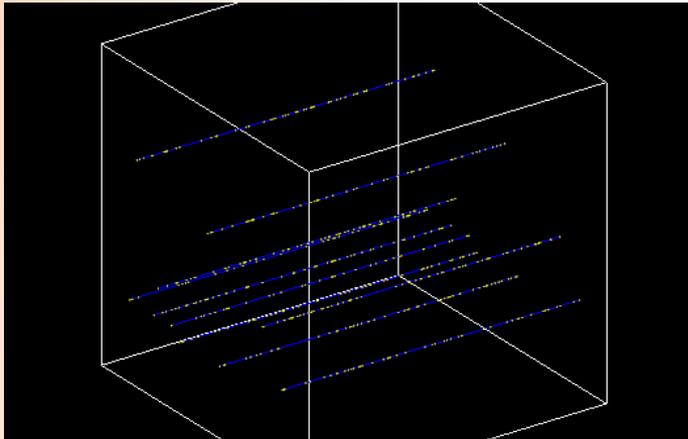


ii . シミュレーション ツールキット : Geant4

Geant 4

最大の特徴: 広範な物理過程を記述する柔軟な機能

- ✓ 粒子が物質中を通過する際に生じる相互作用をシミュレーション
- ✓ 高エネルギー物理学や放射線医療等の分野で応用
- ✓ C++で記述

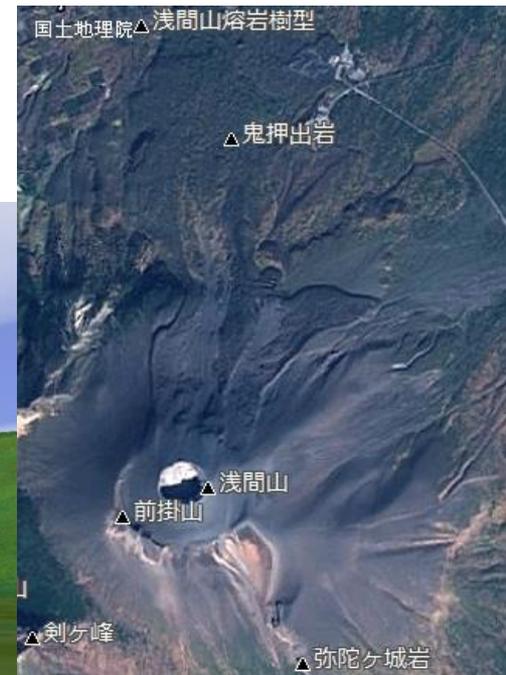


Ⅱ. 本研究の内容

目的

- ✓ ミュオグラフィの原理・シミュレーションに関する知識を理解するためにモデルを作る

→ 火口底(クレーター)を対象にした
先行研究の再現



i . シミュレーションの準備

シミュレーション条件

① 構造物情報

- ・浅間山の地形(標準岩石)
- ・検出器(1m×1mプラスチックシンチレータ2枚)
- ・大気はないものとする

② 物理相互作用

- ・高エネルギーミュオンの電磁相互作用を記述するクラス
G4MuBetheBloch

③ 初期条件

- ・ミュオンのエネルギー:4GeV
- ・発生面:検出器が山体方向に張る立体角

④ データ取得プログラム

- ・理解していない

① 構造物の設定



ii . 解析の準備

解析の流れ

⑤解析プログラム

(A) フラックスからエネルギー下限値を求める

$$F(E_{\min}, \theta^*) = \int_{E_{\min}}^{\infty} N_{\mu}(E_{\mu}, \theta^*) dE_{\mu}$$

(B) エネルギー下限値から飛程を求める

$$X(E_c) = \int_0^{E_c} \left(\frac{dE}{dX} \right)^{-1} dE$$

(C) 飛程を経路長で割って密度分布を求める

$$\rho(\text{g/cm}^3) = \frac{X(\text{g/cm}^2)}{L(\text{cm})}$$

解析方法の検討

(A) ミュオンのエネルギースペクトル

$$N_{\mu}(E_{\mu}, \theta^*) = AW_{\mu}(E_{\mu} + \Delta E_{\mu})^{-\gamma} \\ \times \left[\frac{r_{\pi}^{\gamma-1} B_{\pi} \sec \theta^*}{E_{\mu} + \Delta E_{\mu} + B_{\pi} \sec \theta^*} + 0.36b_r \frac{r_K^{\gamma-1} B_K \sec \theta^*}{E_{\mu} + \Delta E_{\mu} + B_K \sec \theta^*} \right]$$

ミュオンの崩壊確率 W_{μ} : E_{μ} とミュオン飛行距離の関数

(C) ミュオンが透過してきた経路の長さ地形図から読み取る具体的な手法は分からないが、Geant4では情報取得コードを渡すことで得られる

→GISなどを使って地道に測る？



解析方法の検討

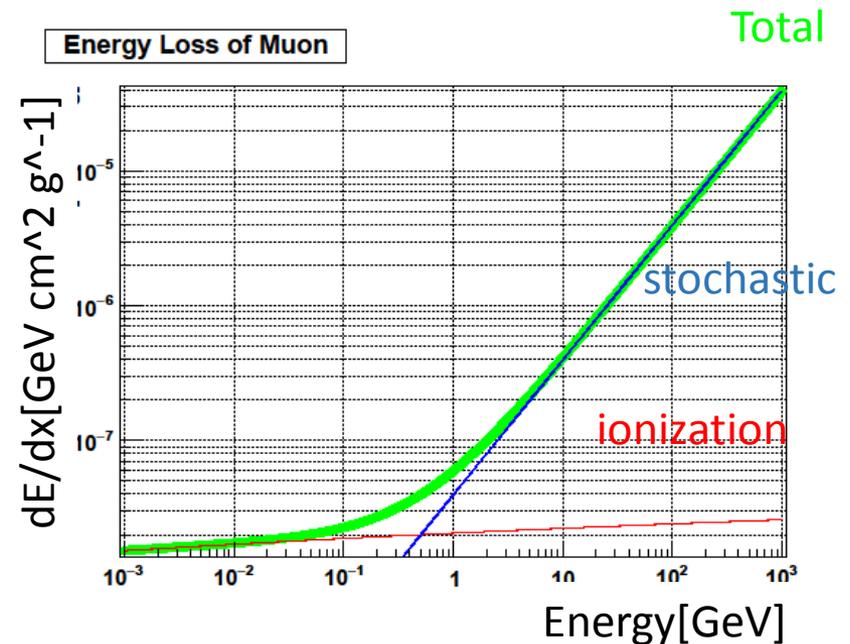
(B) 電磁相互作用によるエネルギー損失の近似式

$$\frac{dE}{dX}(E) = \left[1.88 + 0.77 \ln \frac{E}{M_\mu} + 3.9E \right] \times 10^{-3} \text{ (GeVg}^{-1}\text{cm}^2\text{)}$$

(B) ミュオンの飛程 (密度長)

$$X(E_c) = \int_0^{E_c} \left(\frac{dE}{dX} \right)^{-1} dE$$

積分できないので実験値を適当な関数でフィットして飛程とエネルギーの関係式を作る？



Ⅲ. 成果と今後の課題

成果

- ✓宇宙線ミュオンラジオグラフィの原理、Geant4の基礎を勉強
- ✓シミュレーション条件を検討・設定した

今後の課題

- ✓シミュレーション実行
 - : 標高データの埋め込み、初期粒子をMCで生成
- ✓解析プログラムの作成
 - : 積分できない式の扱い、実験値のフィットなどの方法を検討
 - : 地形図から経路長を求める方法を検討