

# 宇宙線ミュオンラジオグラフィー におけるMCシミュレーション

東京大学地震研究所

西山竜一, 武多昭道, 宮本成悟

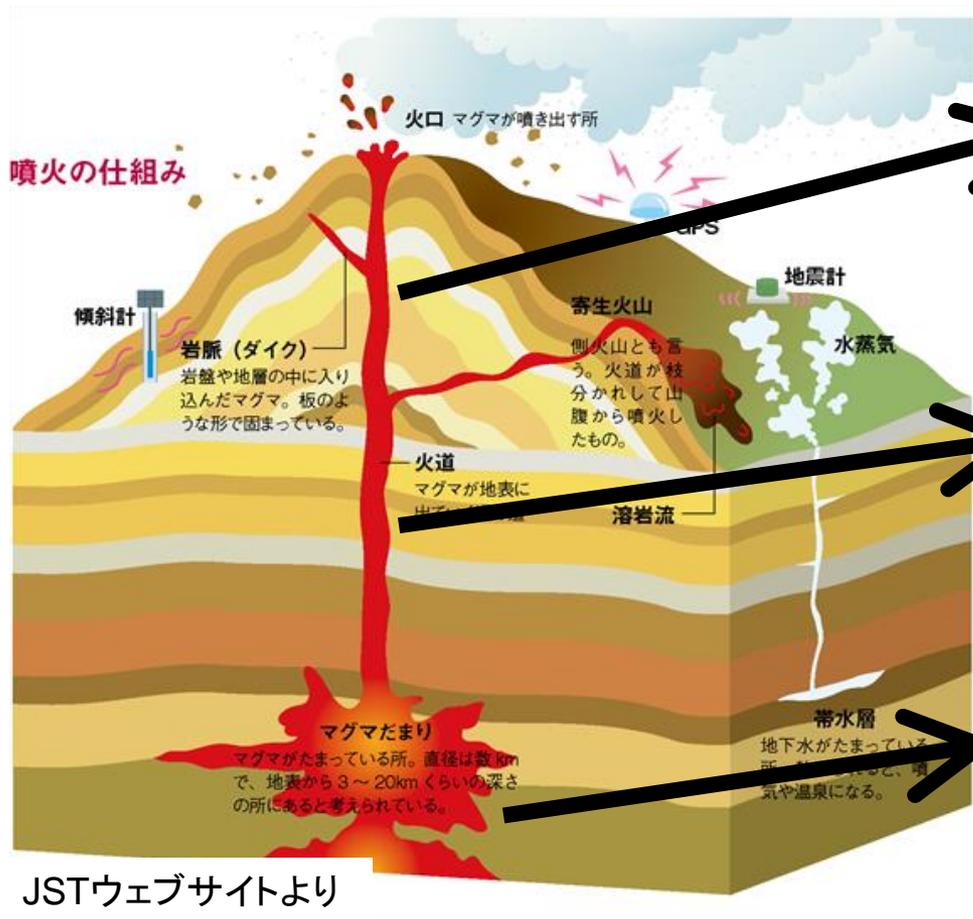
MC研究会

2015年3月19日

# 目次

1. ミューオンラジオグラフィーの原理
2. MCシミュレーションを行う動機
3. シミュレーション方法
4. シミュレーション結果
5. 将来展望、結論

# ミューオンラジオグラフィによる火山観測



ミューオンラジオグラフィ  
⇒ 火道の形状、マグマ頭位  
発泡度(バルク密度)

火山性地震の震源分布  
⇒ 火道の位置

GPS等による地殻変動観測  
⇒ マグマだまりの位置  
マグマの供給量

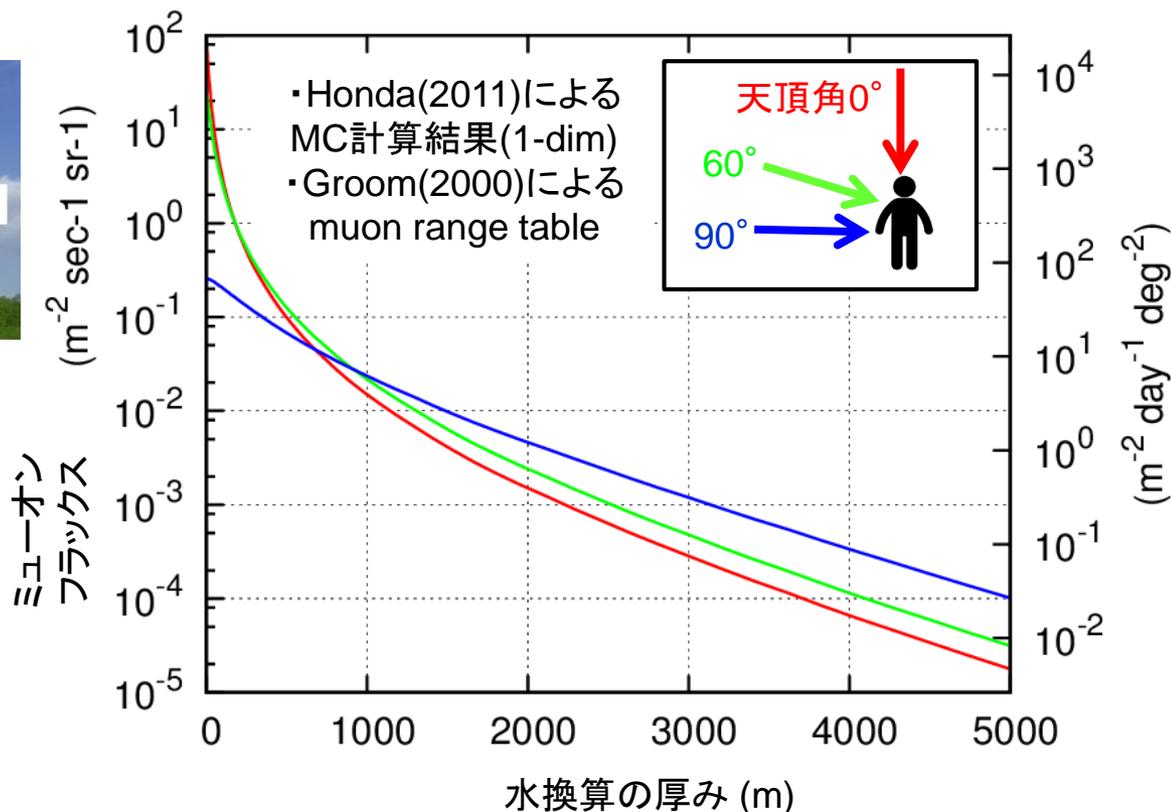
# ミュオンラジオグラフィーの原理



$$I_{obs} = \frac{\epsilon^{-1} N_{obs}}{S \Omega T}$$

検出効率 粒子数  
 面積・立体角・時間

粒子  
 フラックス



山体を貫通したミュオンの数を計測する。  
 ミュオンの経路に沿った山体の物質質量(密度 × 長さ)が分かる。

# ミュオンをとらえる検出器



原子核乾板  
@雲仙普賢岳



シンチ検出器  
@桜島

	原子核乾板	シンチレーション型 (Tanaka et al., 2014)
角度分解能	5 mrad	33 mrad
場所の制約	電源不要 軽量	要・商用電源 重量
時間分解能	なし	あり

# 目次

1. ミューオンラジオグラフィーの原理
2. MCシミュレーションを行う動機
3. シミュレーション方法
4. シミュレーション結果
5. 将来展望、結論

# MCシミュレーションを行う動機

## A) Muon Energy Spectrumの緯度・経度・標高・方位・季節依存性の理解

地磁気の効果(東西効果含む)  
太陽活動の強弱  
大気圧 etc...

検出器構造の最適化に必要!!!

## B) 背景ノイズ源の理解

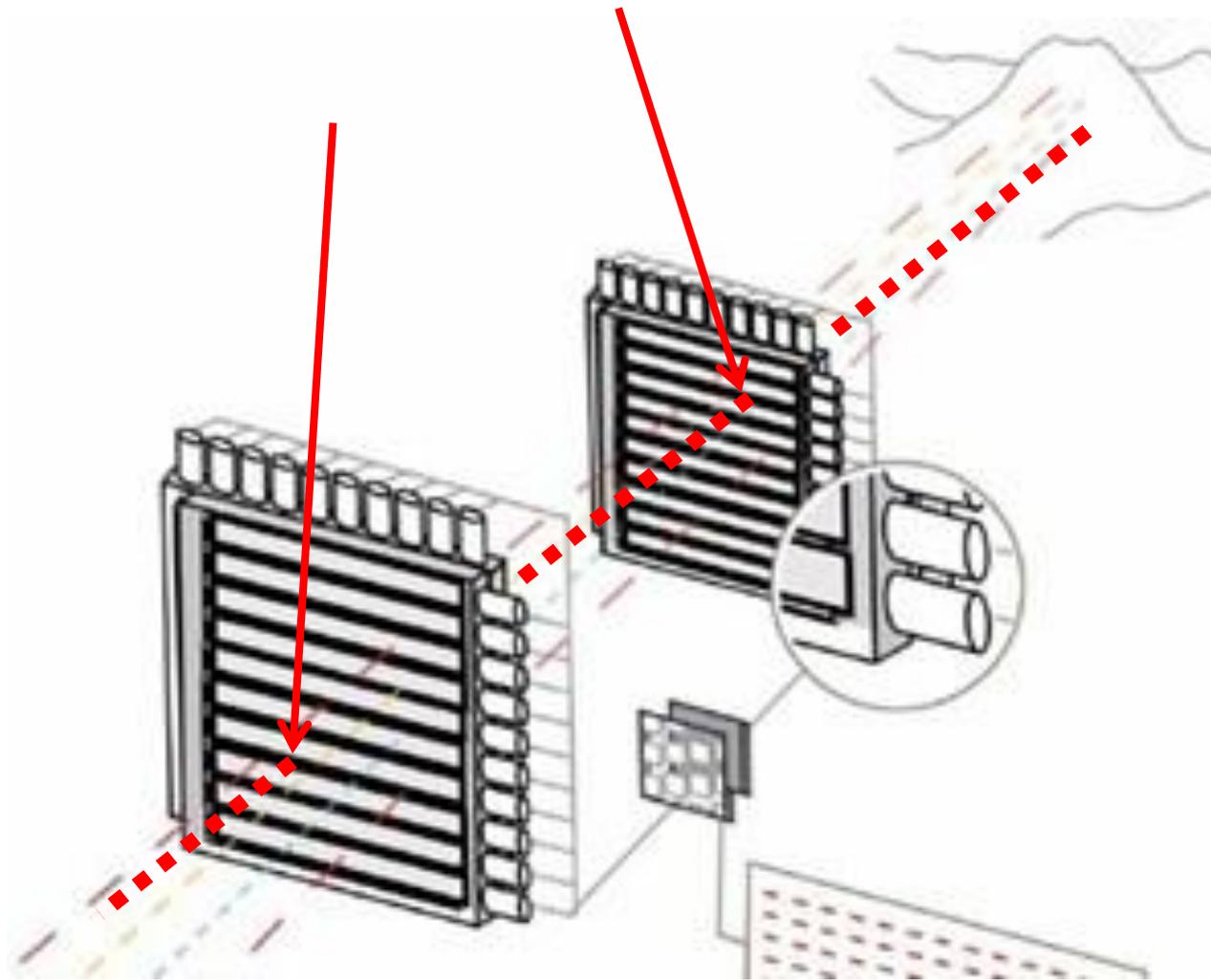
ノイズの混入は密度値の過小評価につながる

B-1. fake tracks

B-2. 検出器近辺で生成される粒子

B-3. 検出器後方からの上向き粒子

# ノイズ源の候補1: fake tracks

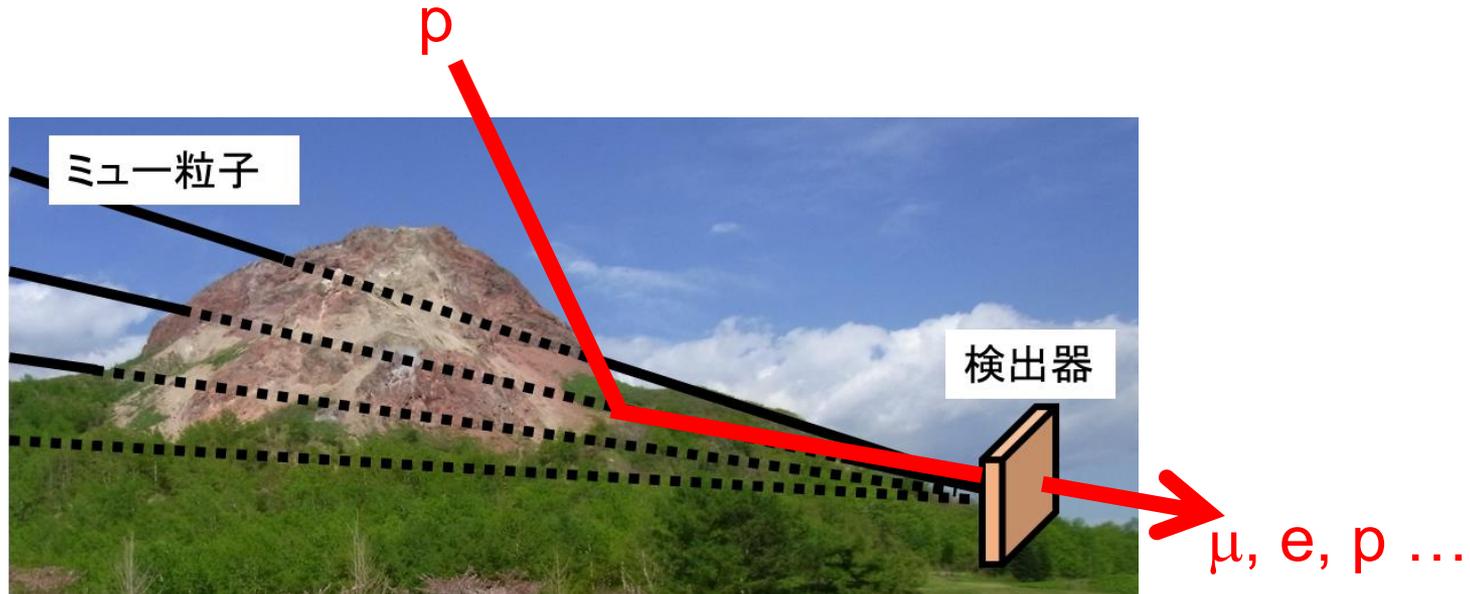


空気シャワーの同時ヒットが、  
偽のトラックを生む

シンチレーション型検出器の

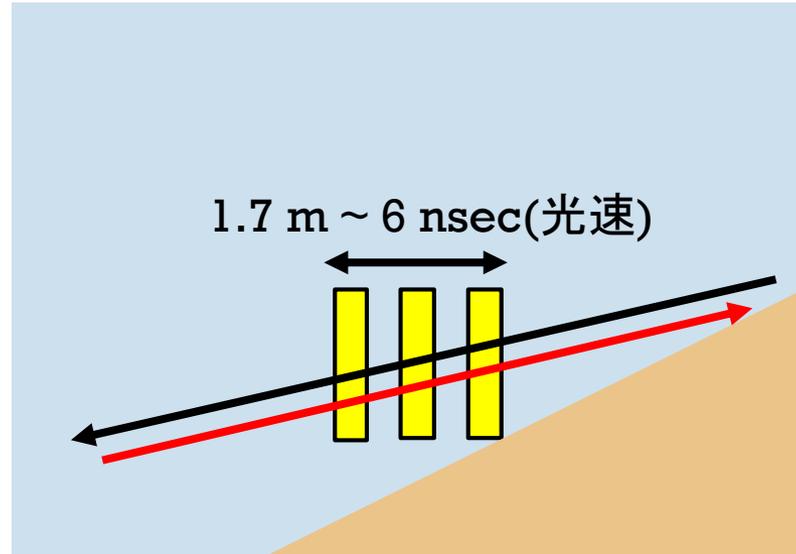
- ・ ストリップ幅
- ・ 層数
- ・ 層間の距離
- ・ 同時計数のゲート幅

# ノイズ源の候補2: 検出器近辺で作られる粒子



ミューオン以外の成分の寄与を正確におさえる必要がある

# ノイズ源の候補3: 検出器近辺で作られる粒子



Jourde et al. (2013)より

検出器後方から上向きに飛ぶ荷電粒子が存在  
上向き粒子の混入は、推定密度の過小評価につながる

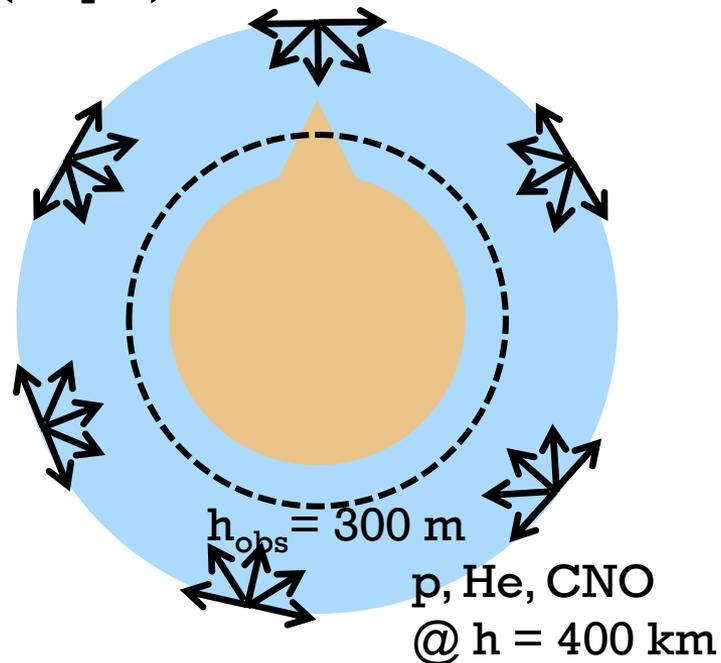
# 目次

1. ミューオンラジオグラフィーの原理
2. MCシミュレーションを行う動機
3. シミュレーション方法
4. シミュレーション結果
5. 将来展望、結論

# シミュレーション方法

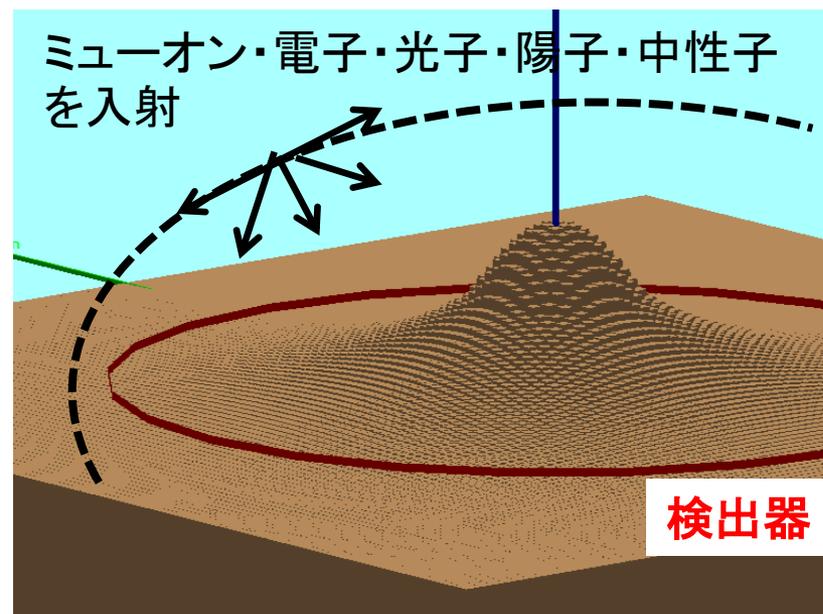
## 2種類のMonte Carloコードを併用

(Step 1). COSMOS



観測点の標高における各粒子のエネルギー分布を計算

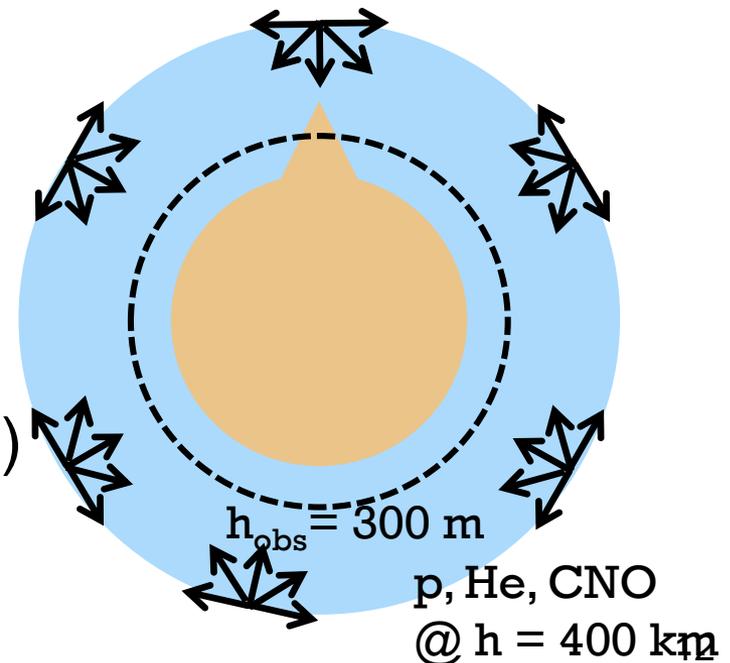
(Step 2). GEANT4 Agostinelli et al. (2003)



仮想の天球から、(1)で得たエネルギー分布に則して、粒子を入射

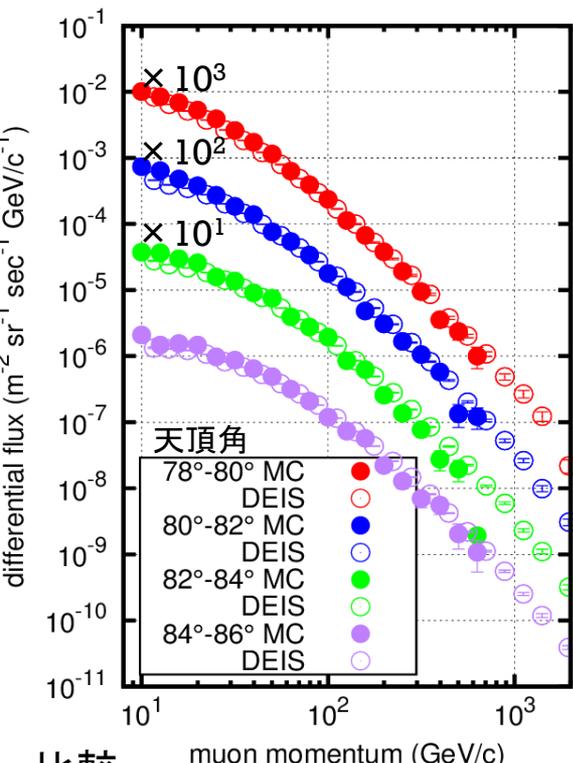
# Step1: COSMOSによる宇宙線生成・伝播計算

- p, He スペクトラム: BESS1998 (Sanuki et al., 2000)
- interaction model: PHITS (< 2 GeV)  
DPMJET-III (2 – 100 GeV)  
QGSJET-II-03 (> 100 GeV)
- 大気モデル: US Standard Atmosphere (1976)
- 地球・大気の球形を考慮
- 観測点の緯度・経度依存性を無視  
(地球表面全体での平均エネルギー  
スペクトラムを計算)
- 計算時間:  $1.3 \times 10^4$  (hours  $\times$  cores)



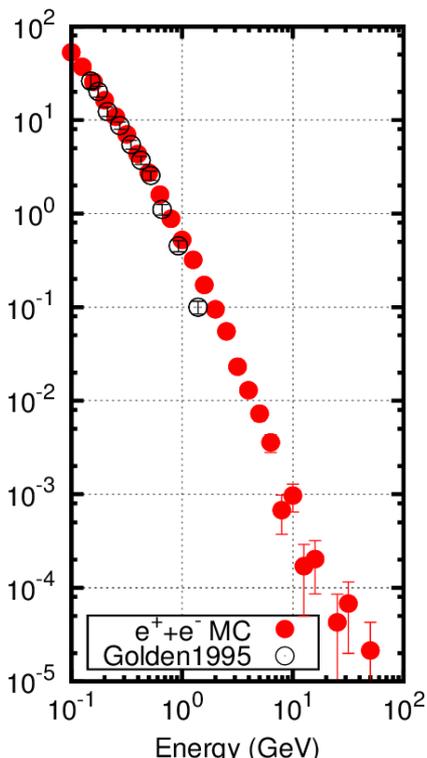
# Step1: COSMOS計算結果

ミュオン  
(準水平)



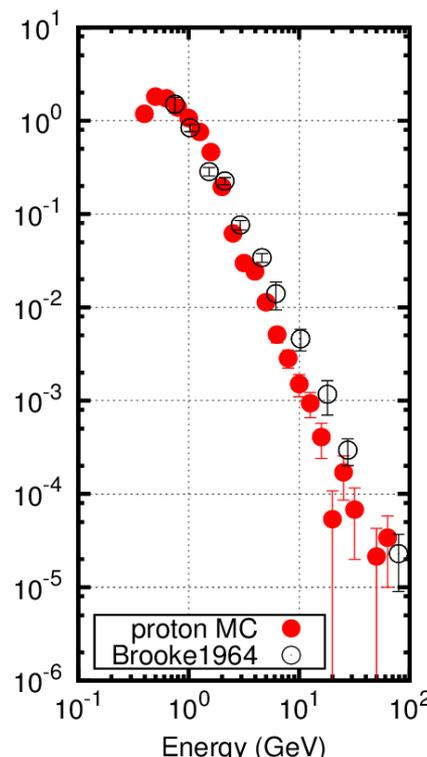
Alkofer et al. (1985)

電子  
(鉛直)



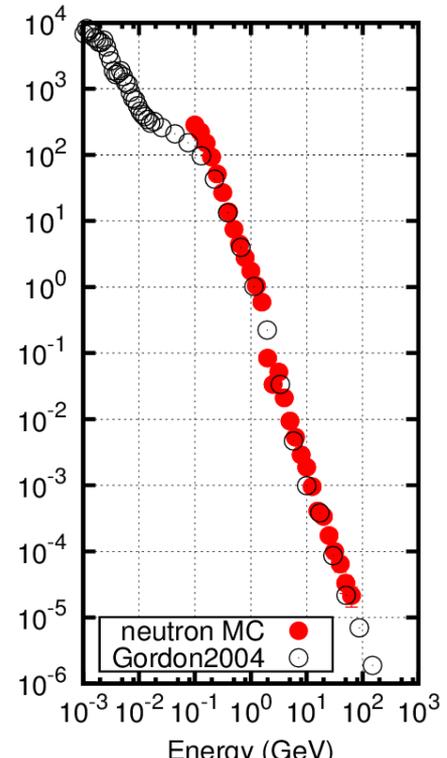
Golden et al. (1995)

陽子  
(鉛直)



Brooke et al. (1964)

中性子



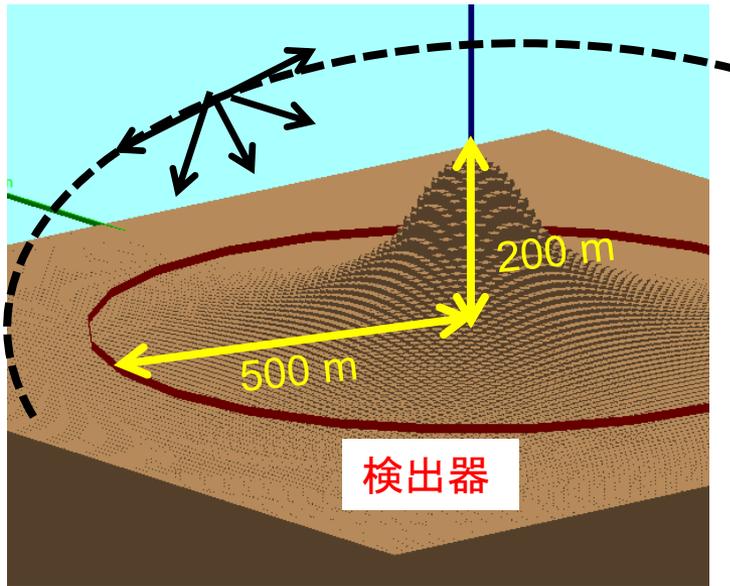
Gordon et al. (2004)

MC計算結果は、既存の観測データと概ね一致した。

# Step 2: GEANT4による検出器付近の伝播計算

## 計算方法

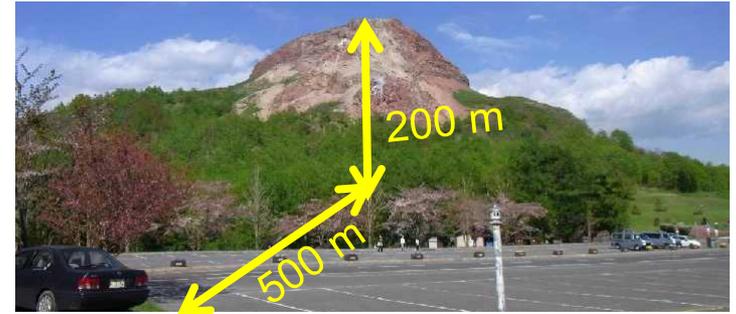
- ① GEANT4中に山体と検出器を構築(回転対称)



- ② COSMOSで得られたエネルギー分布に則して、ミューオン・電子・光子・中性子・陽子を入射
- ③ 検出器に届く粒子の種類・エネルギーを記録

## 観測データとの比較

原子核乾板@昭和新山溶岩ドーム



OPERA型原子核乾板と鉛板による  
Emulsion chamber

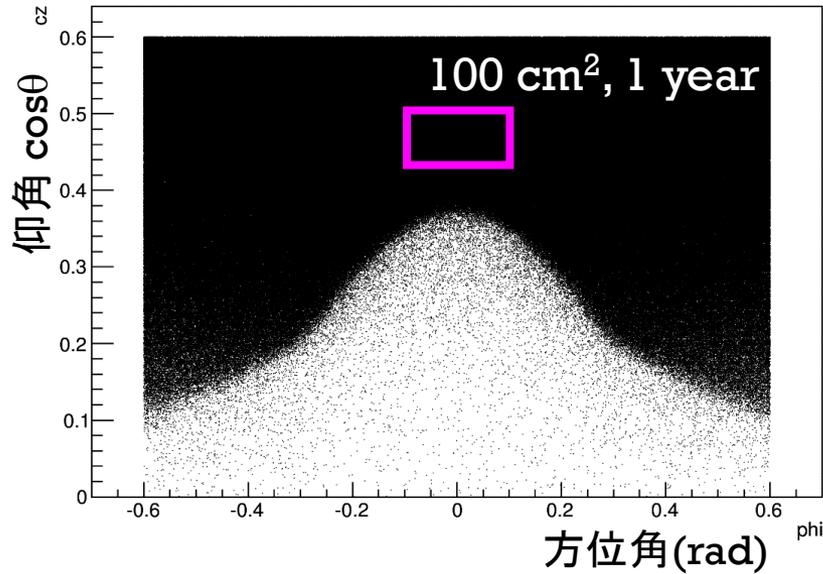


12 cm x 10 cm  
1 kg

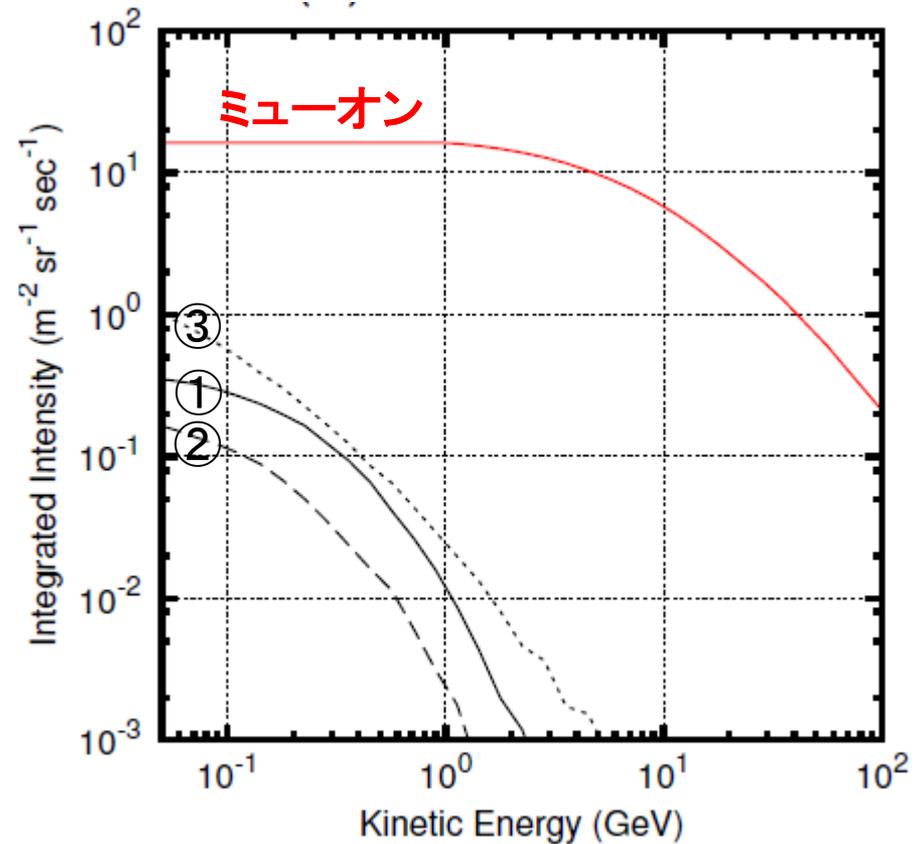
# 目次

1. ミューオンラジオグラフィーの原理
2. MCシミュレーションを行う動機
3. シミュレーション方法
4. シミュレーション結果
5. 将来展望、結論

# シミュレーション結果

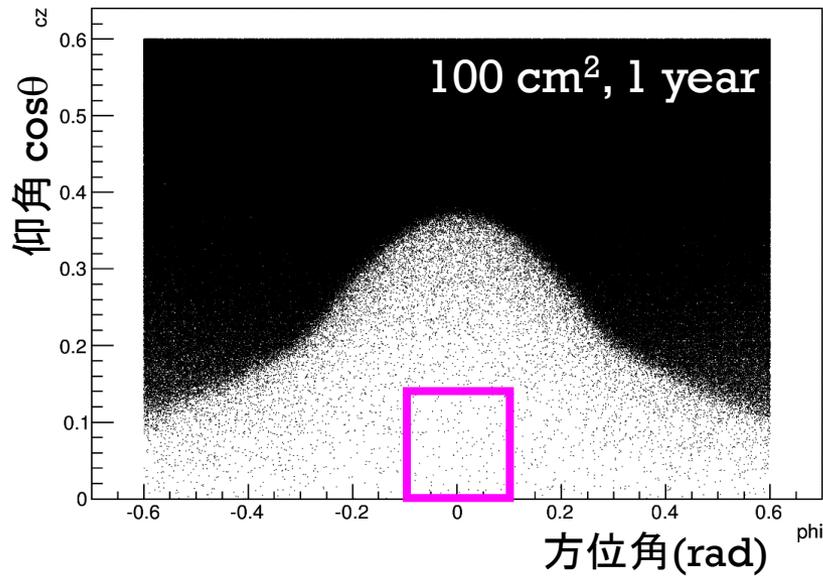


- ① 陽子
- ② 陽子・中性子起源の電子とミュオン
- ③ 電子

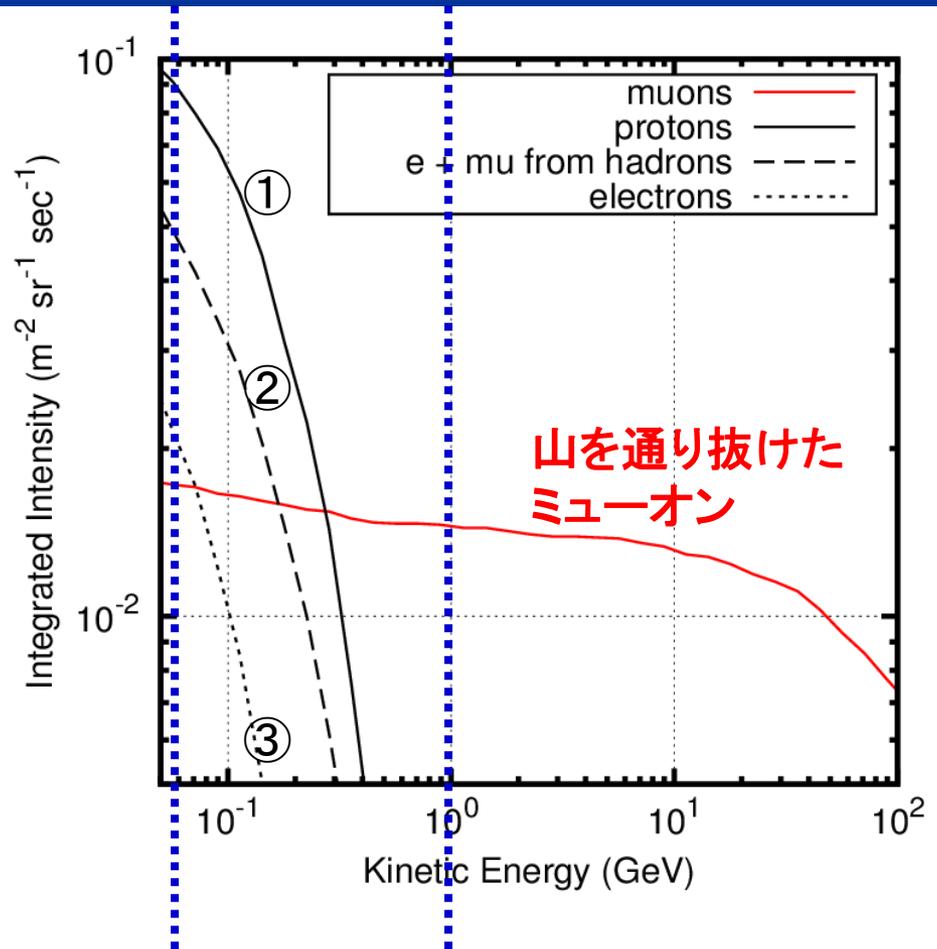


空を見込む領域では、ミュオンの寄与が卓越する。

# シミュレーション結果



- ① 陽子
- ② 陽子・中性子起源の電子とミュオン
- ③ 検出器後方からの上向き電子



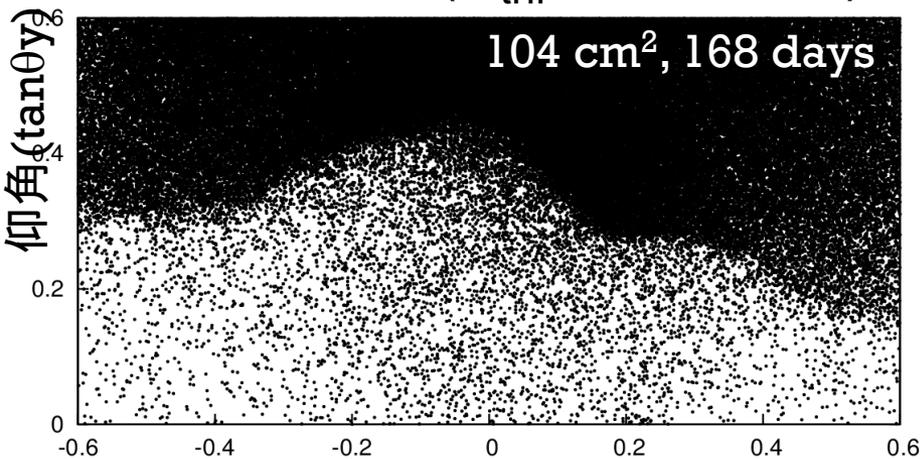
山を見込む視野領域では、

低エネルギー(< 1 GeV)において、①～③のノイズ粒子が卓越する。

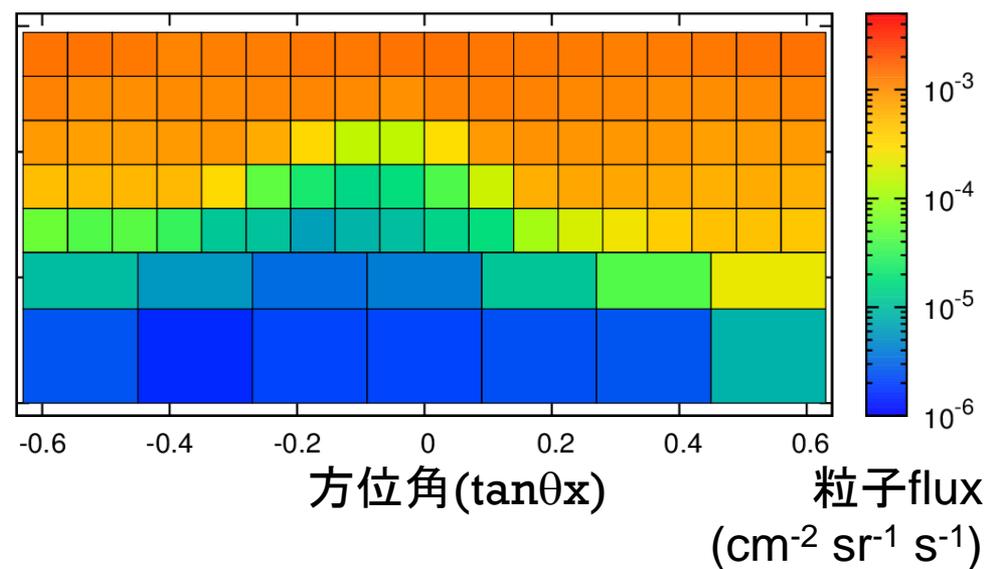
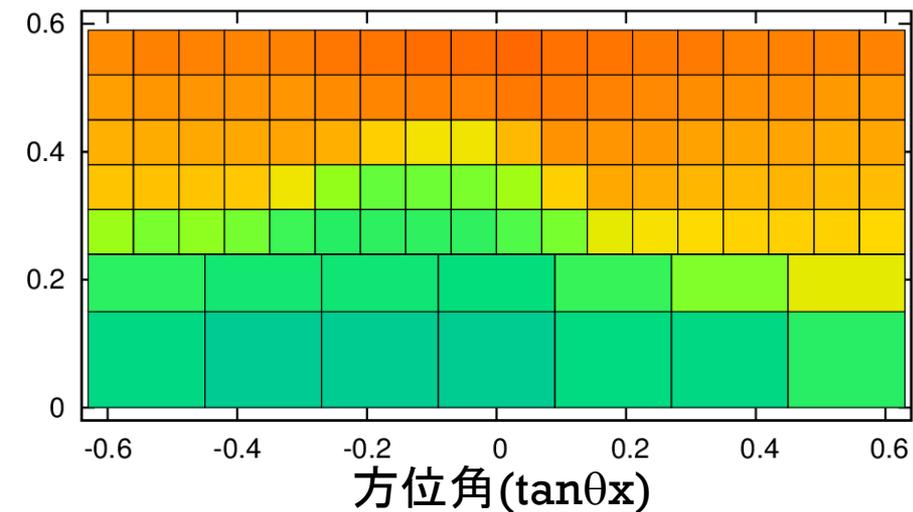
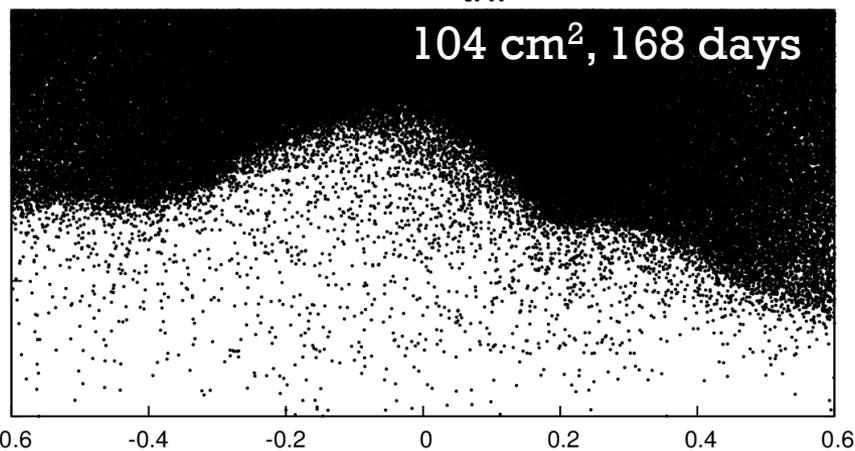
A. 乾板4枚      B. 乾板20枚+鉛10mm

# 原子核乾板による観測結果

A. 乾板4枚 ( $E_{\text{thr}} \sim 60 \text{ MeV}$ )



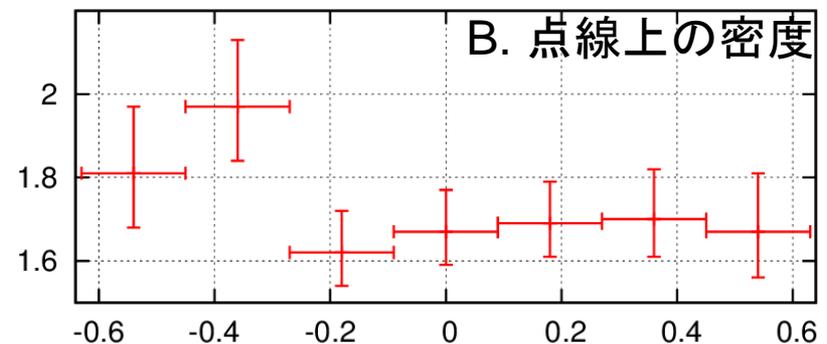
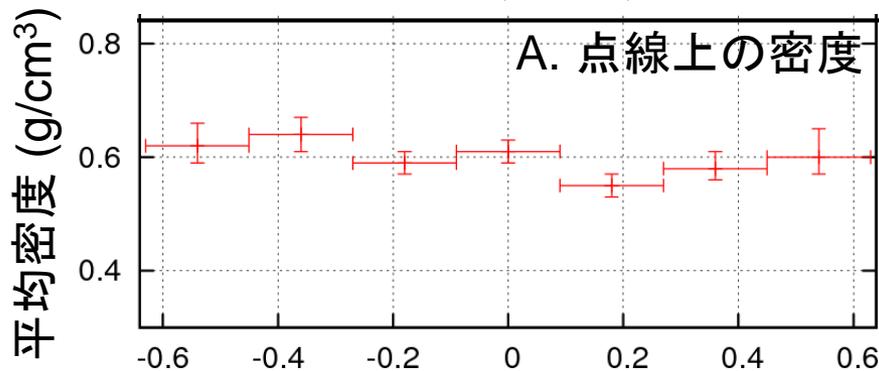
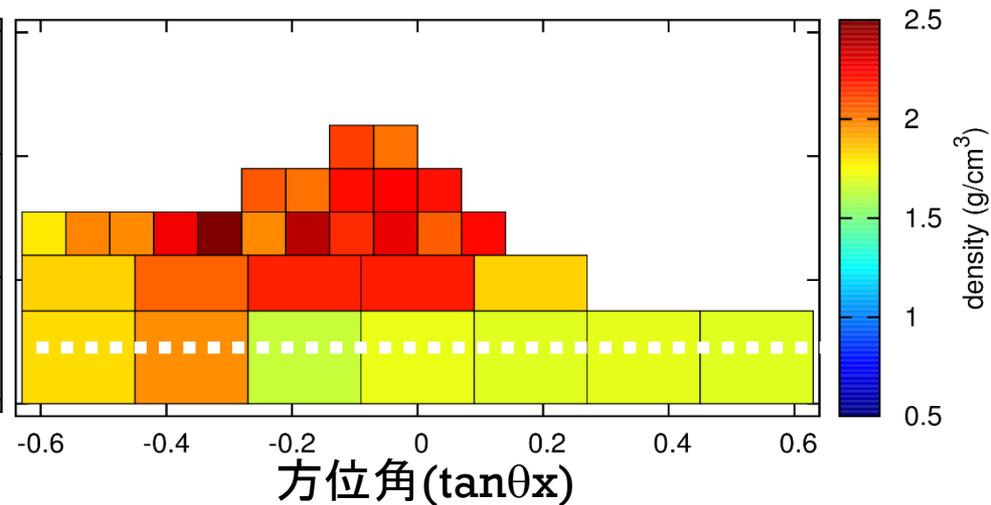
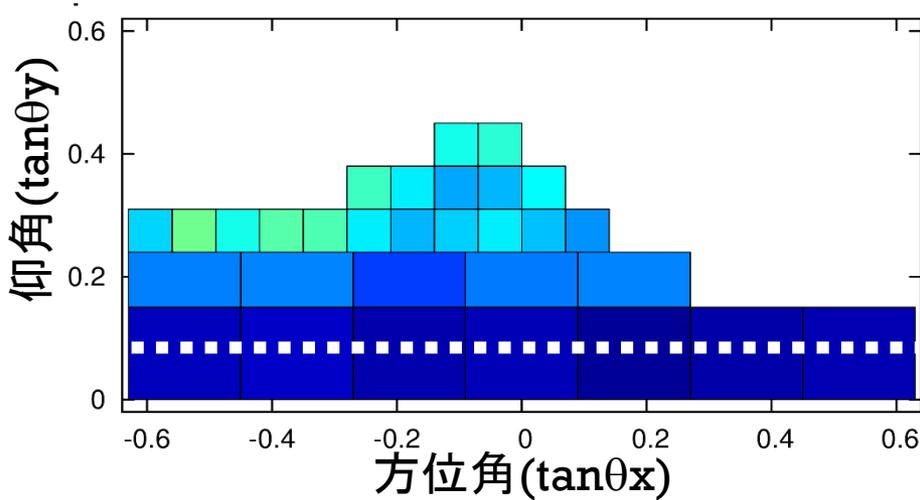
B. 鉛積層型 ( $E_{\text{thr}} \sim 1 \text{ GeV}$ )



# 密度測定結果

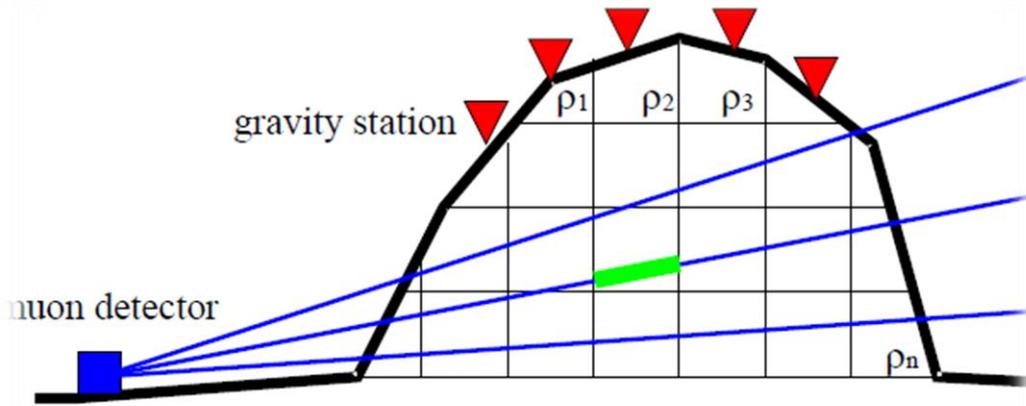
A. 乾板4枚 ( $E_{\text{thr}} \sim 60 \text{ MeV}$ )

B. 鉛積層型 ( $E_{\text{thr}} \sim 1 \text{ GeV}$ )

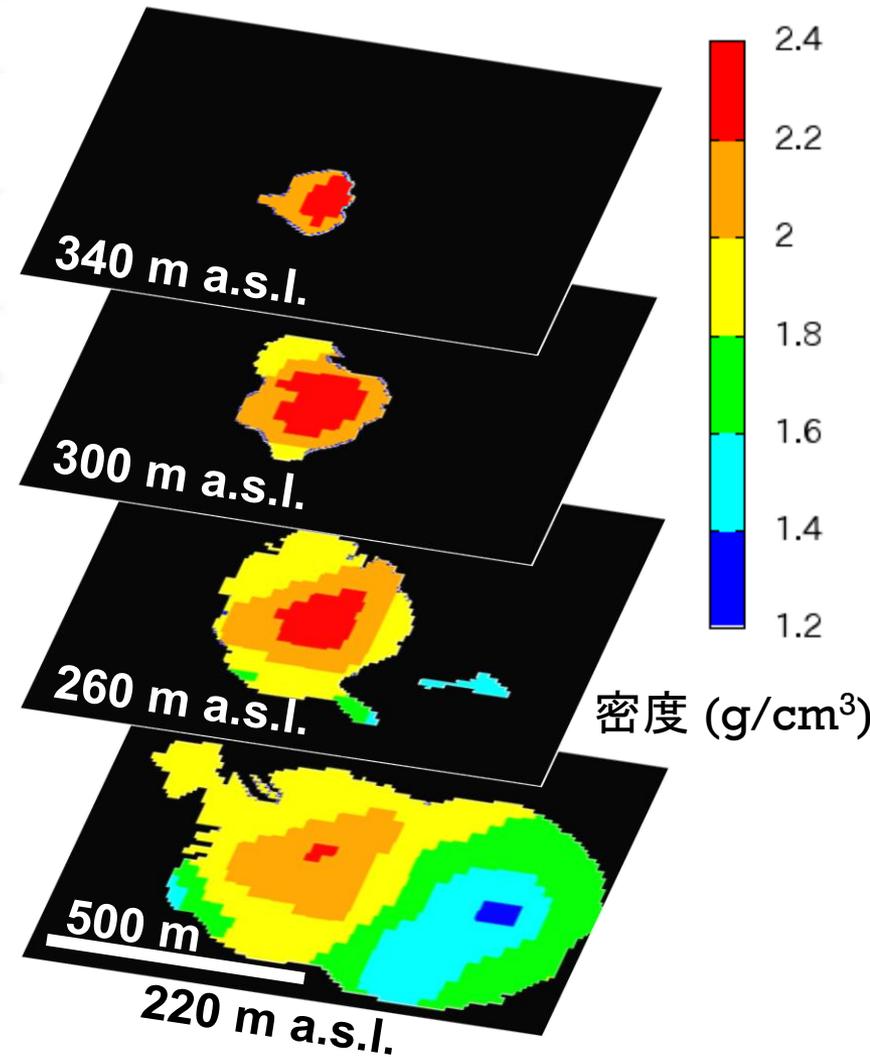


エネルギー閾値の高い鉛積層型のみ、適切な密度値を与える。

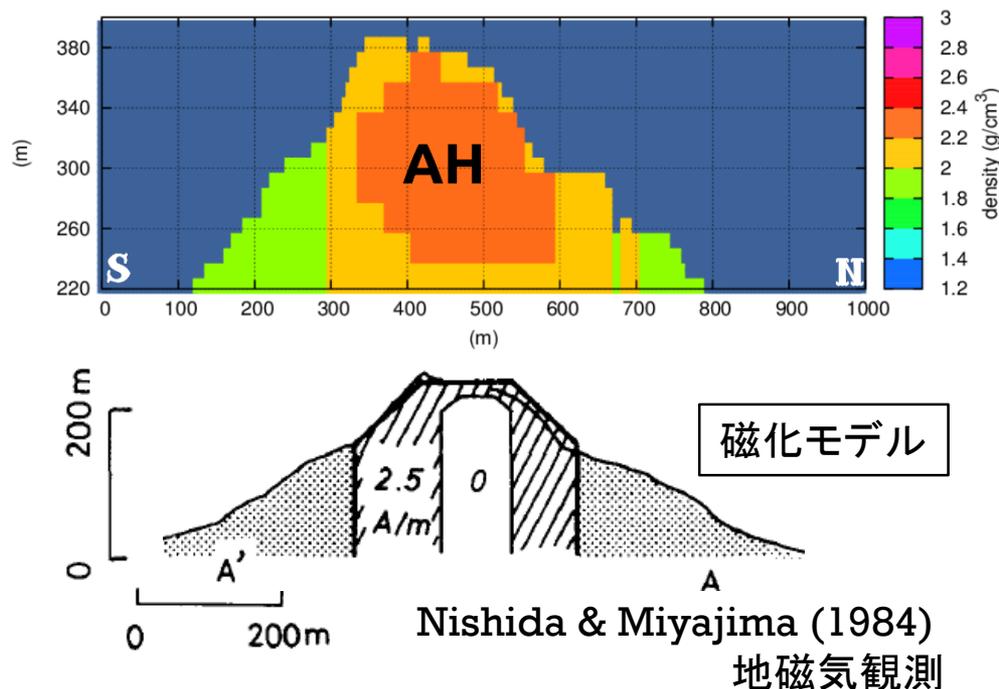
# 重力異常データとの3次元密度構造推定



頂上での重力測定風景(2011. 4)

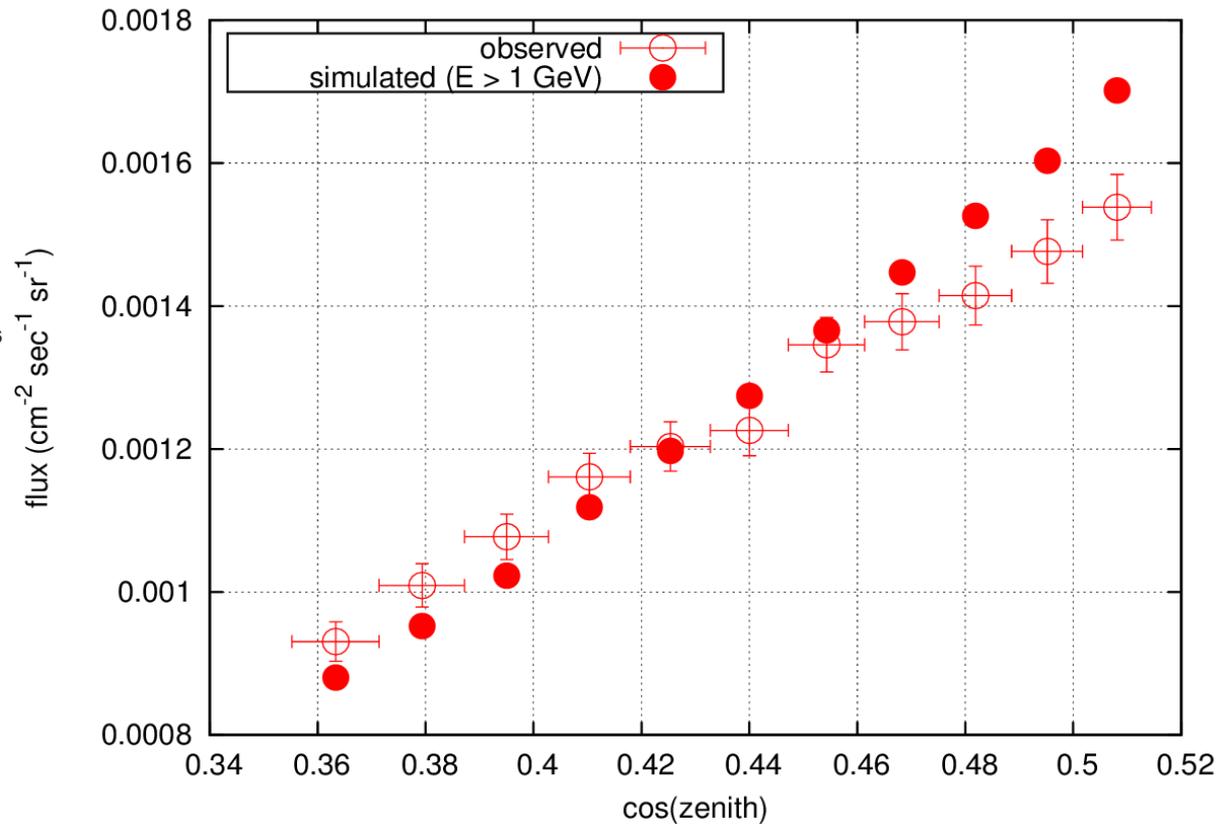
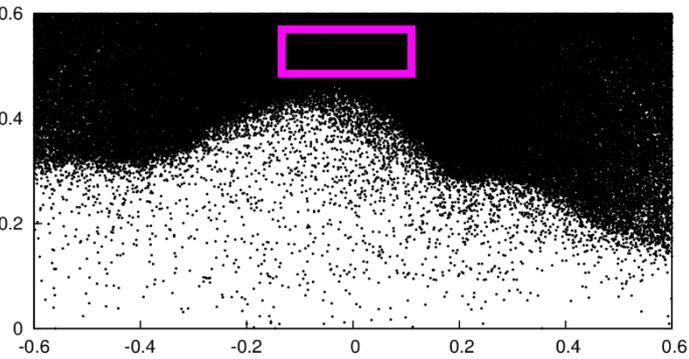


# 地磁気観測結果との比較



- 3D密度構造からは、高密度(比重2.0-2.4)の溶岩が鉛直に貫く構造をしていることがわかった(AH1)
- 先行研究(地磁気観測)の結果とよく整合
- BG除去手法の確立により、ミュオンラジオグラフィーを精密科学に押し上げた

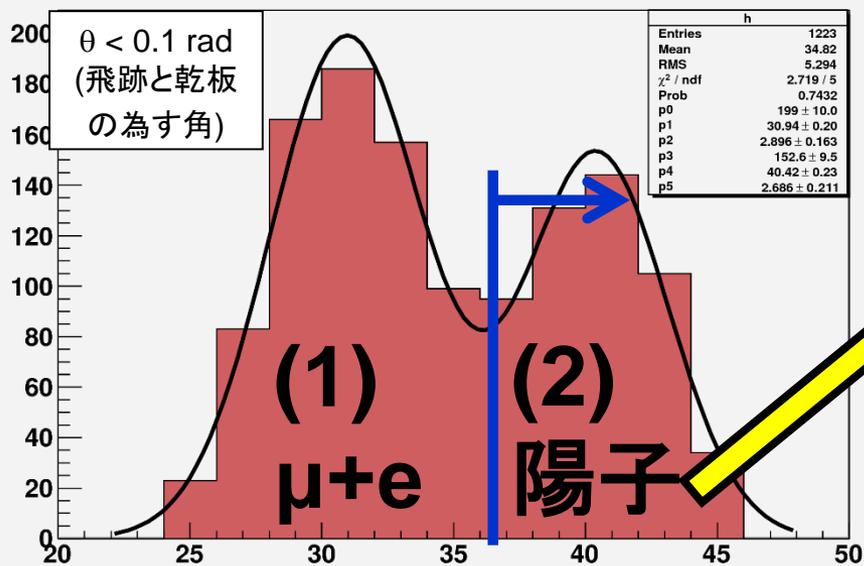
# 観測量との比較1: 空からのミュオンフラックス



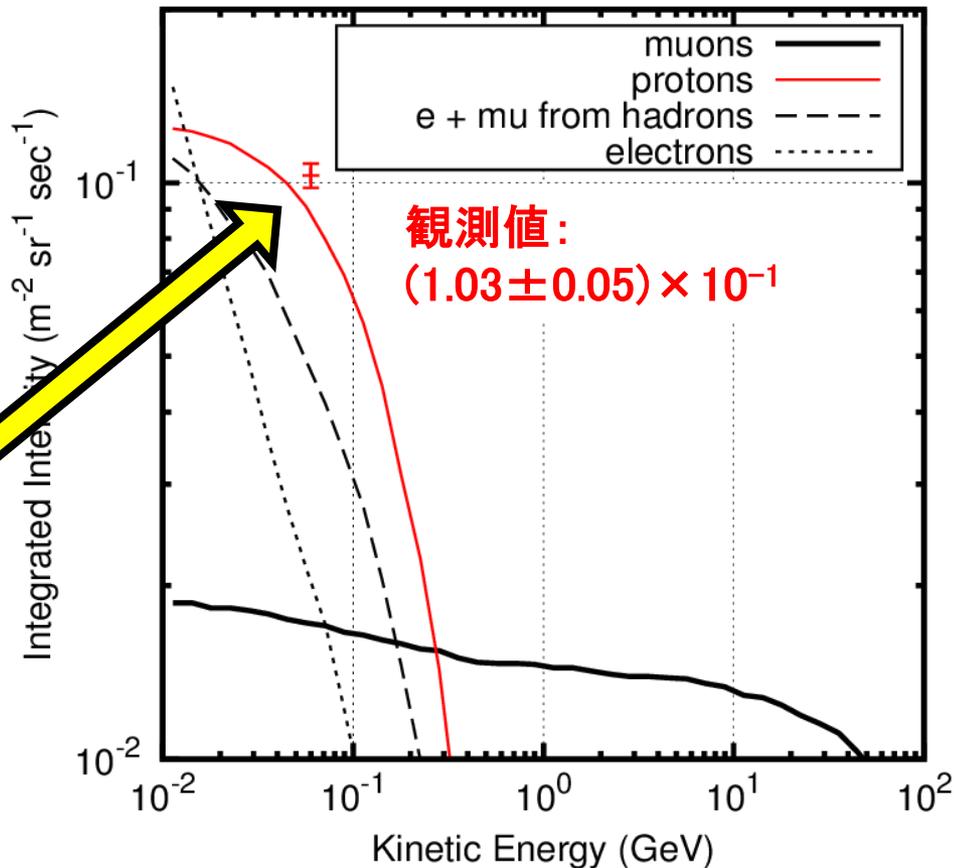
乾板(鉛積層型)で得られた空のミュオンフラックスは、理論値と10%以内で一致した。

# 観測量との比較2: 山からの陽子フラックス

## Grain density分布(乾板4枚)



飛跡の濃さ(銀粒子数/100  $\mu\text{m}$ ) ~  $dE/dx$



乾板検出器で観測された陽子のフラックスは、  
シミュレーションによる計算値と10%以内で一致した

# 目次

1. ミューオンラジオグラフィーの原理
2. MCシミュレーションを行う動機
3. シミュレーション方法
4. シミュレーション結果
5. 結論、将来展望

- ミューオンラジオグラフィーにおける背景ノイズ源を理解するためにCOSMOS, GEANT4を組み合わせてシミュレーションの枠組みを作った
- 計算の結果、ノイズの主たる要因は、低エネルギー (< 1 GeV) の荷電粒子であることが分かった
- 低エネルギー粒子を除去できる鉛板積層型の乾板検出器を用いることで、対象の密度を適切に求められることを昭和金山において実証した
- 観測されたミューオンおよび陽子のフラックスは、MCによる計算値と10%以内で一致した

## A) Muon Energy Spectrumの緯度・経度・標高・方位・季節依存性の理解

地磁気の効果(東西効果含む)  
太陽活動の強弱  
大気圧 etc...

## B) 背景ノイズ源の理解

B-1. fake tracks

B-2. 検出器近辺で生成される粒子

B-3. 検出器後方からの上向き粒子

# 空気シャワーMCのその他の実用例

- 空気シャワーに含まれる電磁成分を用いたラジオグラフィー
  - ミューオンと比べて減衰が早いため、1m～数十mの物体の透視に適している
  - 地下水量の測定に応用
  - 空気シャワーシミュレーションによる横方向分布、時間分布、エネルギー分布が不可欠
- ニュートリノ振動を用いた地球深部の化学組成測定
  - ニュートリノ振動の精密測定によって地球内部の電子数密度分布が得られる
  - 地震波等から得られている物質密度分布と組み合わせることで、地球深部の平均化学組成を測定可能
  - 大気ニュートリノフラックスの正確な予測が不可欠
- 雷雲中の電子加速メカニズムの解明
  - 逃走電子雪崩を引き起こしうる電子の正確なフラックス予測が重要
- 地下素粒子実験におけるバックグラウンド
  - 地中での核破砕によって生成される中性子フラックスの定量的な見積もりが重要
  - 陽子のフラックスは計算可能、かつ測定可能であることが我々の研究から示されている