

# 宇宙線ミュオンの東西効果

岡山理科大学

坂本智則 (B4)

長尾桂子 (岡山理科大学), 石黒勝己 (奈良県立橿原考古学研究所, 名古屋大学)

# 目次

## 1. 研究の背景：

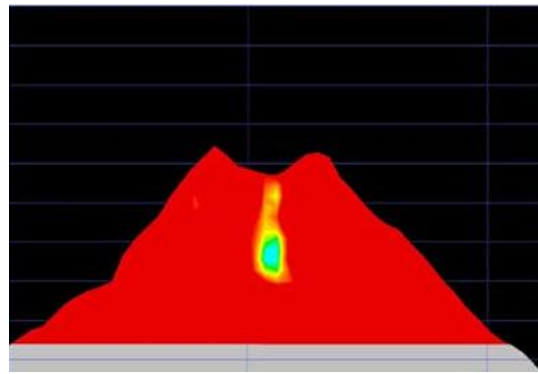
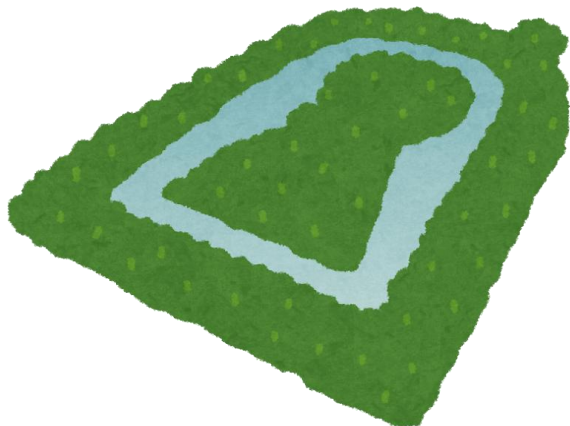
ミューオンラジオグラフィーと東西効果

## 2. COSMOS Xを用いたシミュレーション

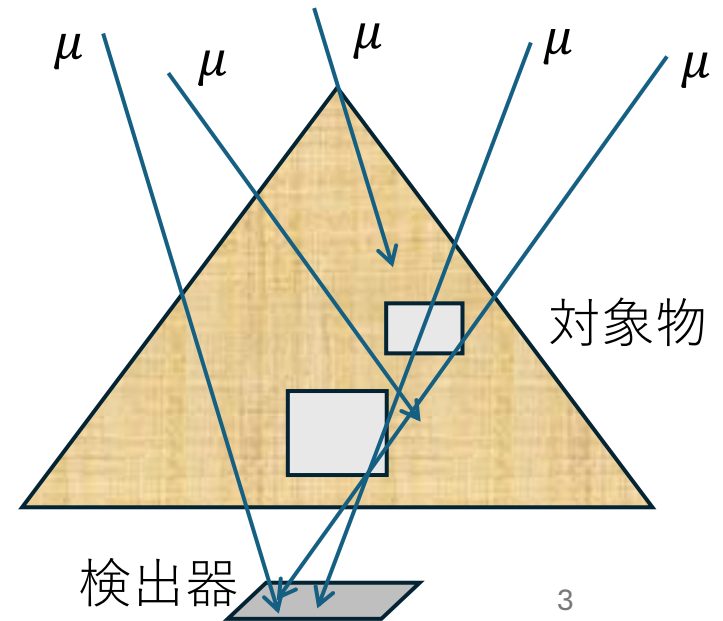
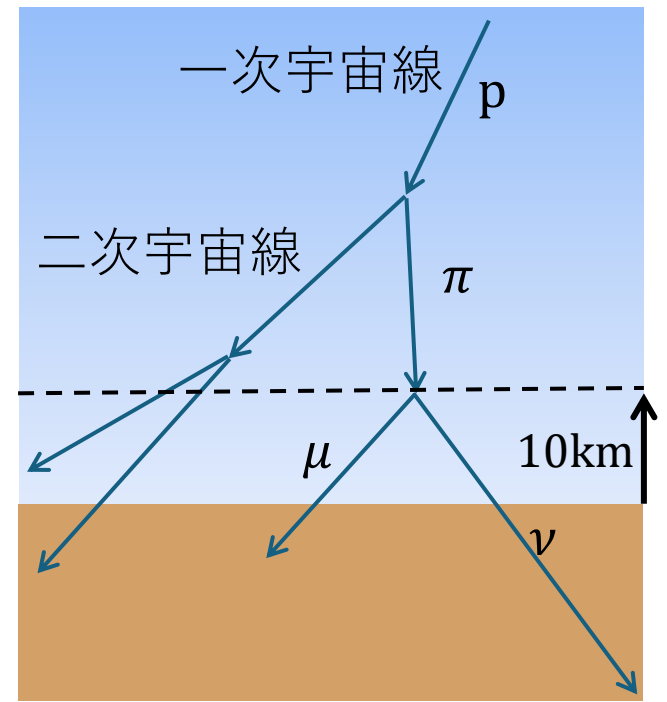
## 3. まとめと今後の展望

# ミューオンラジオグラフィ

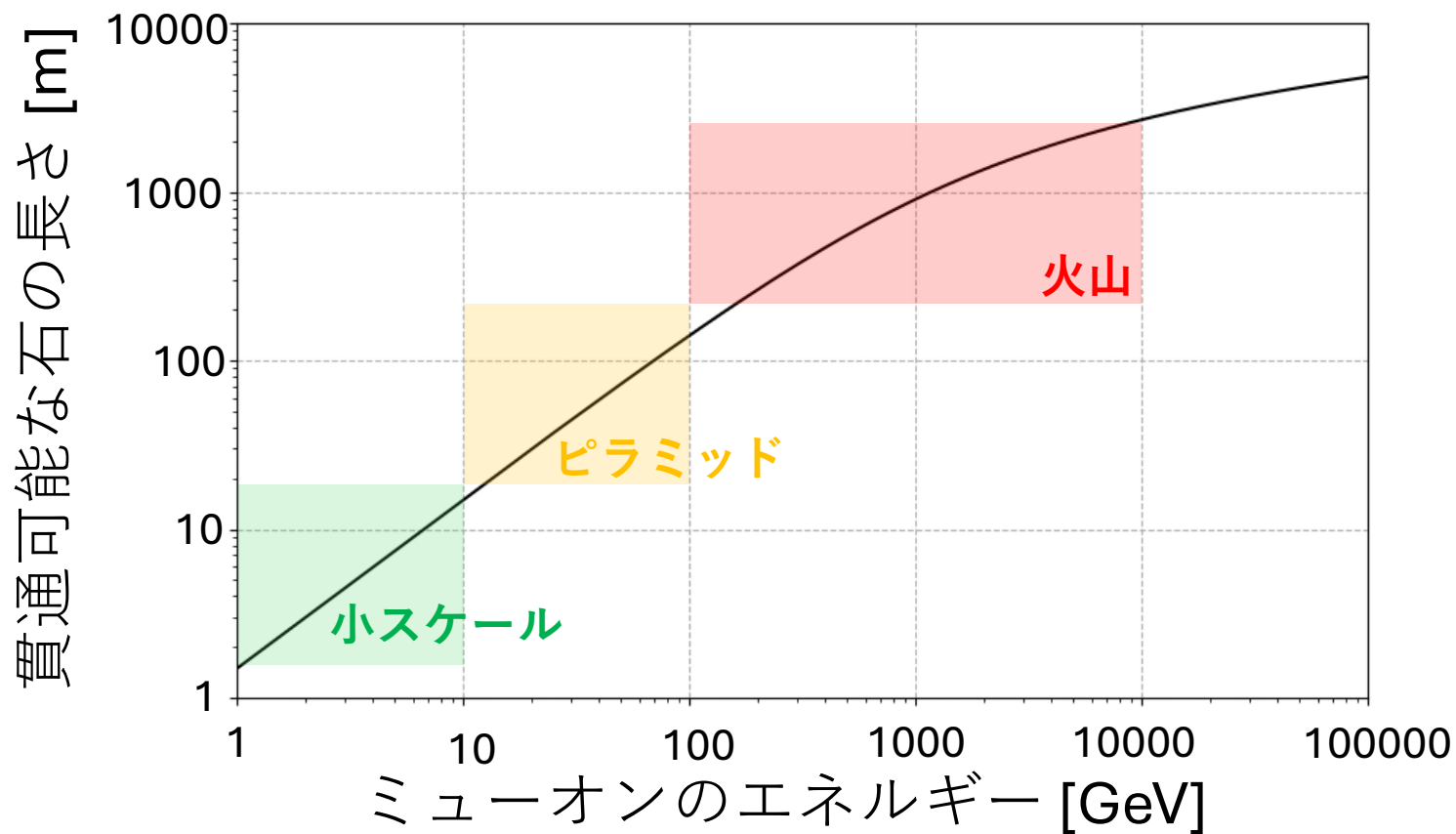
- ミューオン
  - 二次宇宙線として降ってくる
  - 透過力が高い
- ミューオンラジオグラフィ
  - X線撮影のように構造物の内部を可視化する技術



田中宏幸 (2009)



# スケールとミュオンのエネルギー



森島邦博 (2018) 図 改変

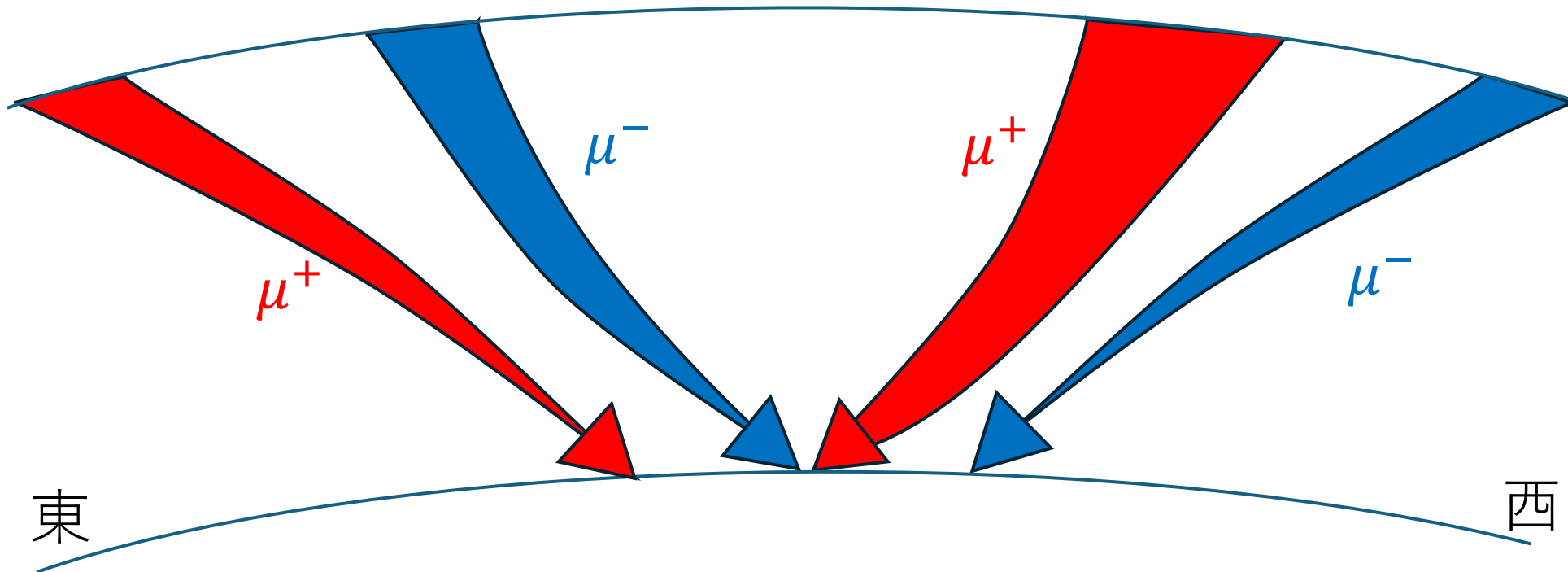


西尾晃 (2022)

➡ 小スケールでは、  
低エネルギーが重要

# 東西効果

地球磁場によりミューオンは曲げられ，東からの入射数より西からの入射数のほうが多くなる



➡ 正確なミューオンラジオグラフィーでは，東西効果の影響を考慮する必要がある可能性あり

# 研究目的

小スケールのミュオンラジオグラフィでは、低エネルギーのミュオンを用いるため、東西効果の影響が大きい可能性がある

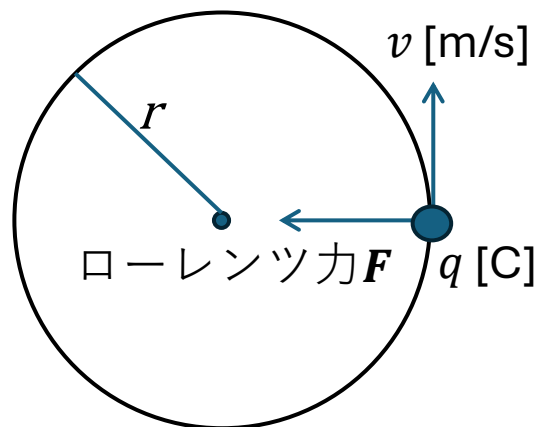


低エネルギーのミュオンにおける東西効果のシミュレーションを行う

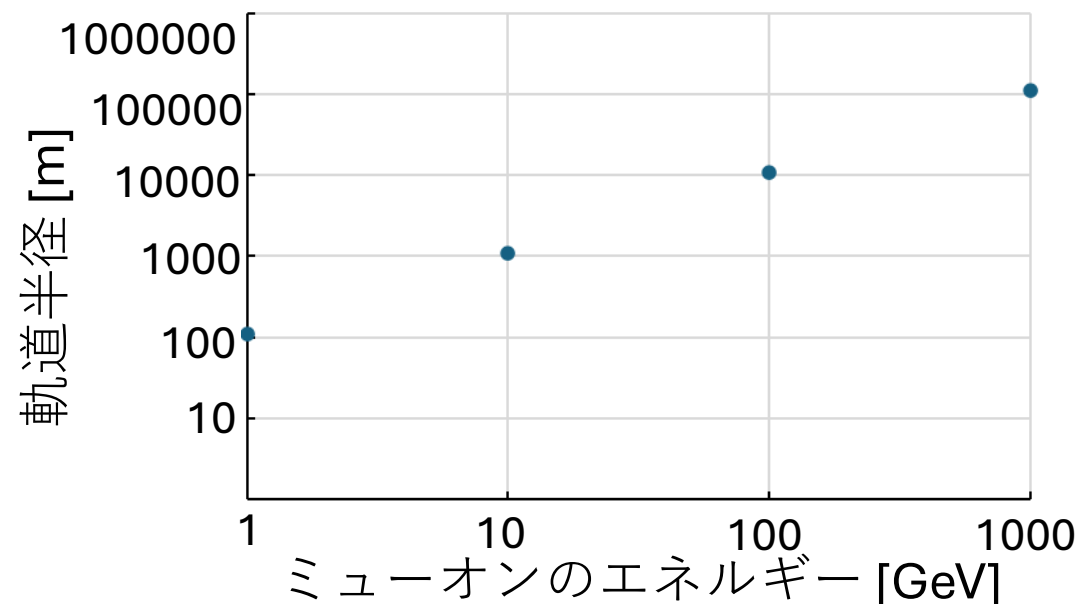
# ミューオンのエネルギーと軌道半径

- 地球磁場で曲げられる軌道半径

$$r = \frac{mv}{qB}$$



- ミューオンのエネルギーと軌道半径

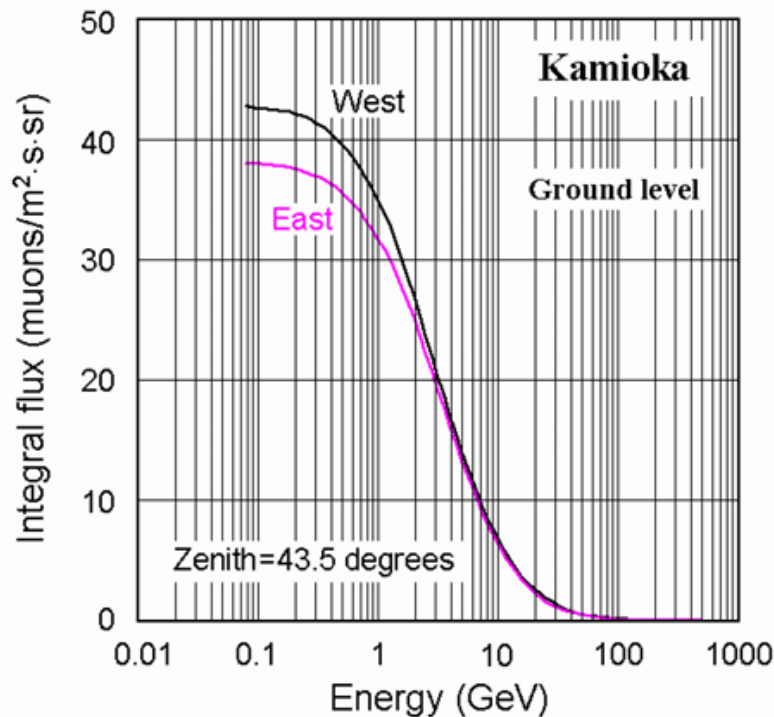
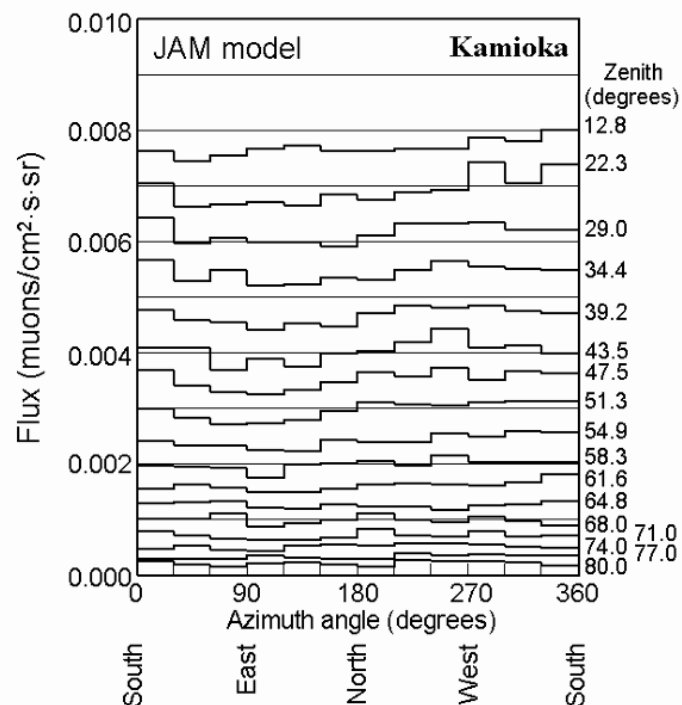


➡ **低エネルギーのミューオンでは、東西効果の影響が大きい**

➡ シミュレーションで東西効果の影響を調べた<sub>7</sub>

# ミューオンの東西効果に関する先行研究

- 地上でのミューオンフラックス



湊進 (2012)



低エネルギーのミューオンの運動エネルギー依存性、  
天頂角依存性を調べたい



# 地中のミュオンフラックス

## ● 遮蔽物を通過するミュオンフラックスの減衰

$$I_{\mu}(h, \theta) = \frac{A}{h+H} (h \sec \theta + a)^{-\alpha} e^{-\beta h \sec \theta}$$

三宅三郎 (1979)

$$I(h, \theta) = I_{00} \cos^n \theta e^{\frac{h}{\Lambda(h)}}$$

湊進 (1992)

$$\frac{dI_{\mu}}{dE_{\mu}} = 0.14 \left[ \frac{E_{\mu}}{\text{GeV}} \left( 1 + \frac{3.64 \text{ GeV}}{E_{\mu} (\cos \theta^*)^{1.29}} \right) \right]^{-2.7}$$

$$\times \left[ \frac{1}{\frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta^*}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{\frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta^*}{850 \text{ GeV}}} \right]$$

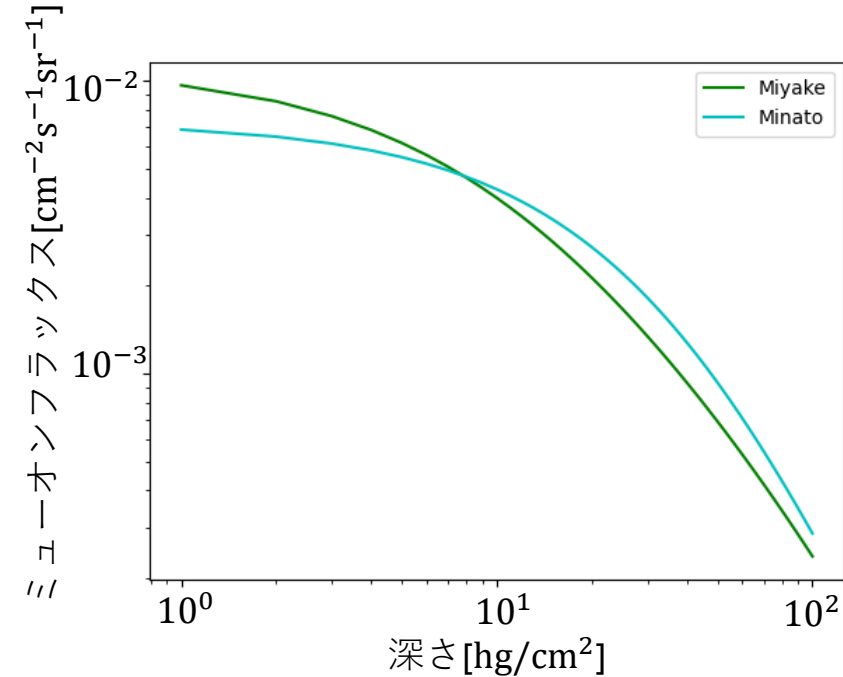
M.Guan (2015)

$h$ : 深さ

$\theta$ : 天頂角

$I_{\mu}$ : ミュオンフラックス

$E_{\mu}$ : ミュオンのエネルギー



➡ 方位角が含まれていないので、東西効果を議論できない

# 目次

## 1. 研究の背景：

ミューオンラジオグラフィーと東西効果

## 2. COSMOS Xを用いたシミュレーション

## 3. まとめと今後の展望

# シミュレーション結果 (方位角分布)

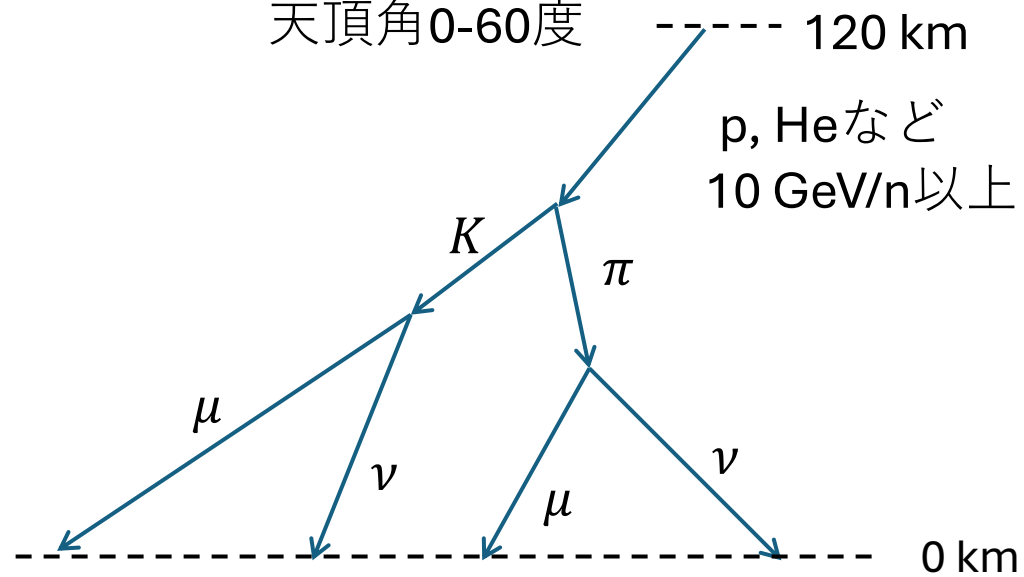
- COSMOS X シミュレーション

- 条件

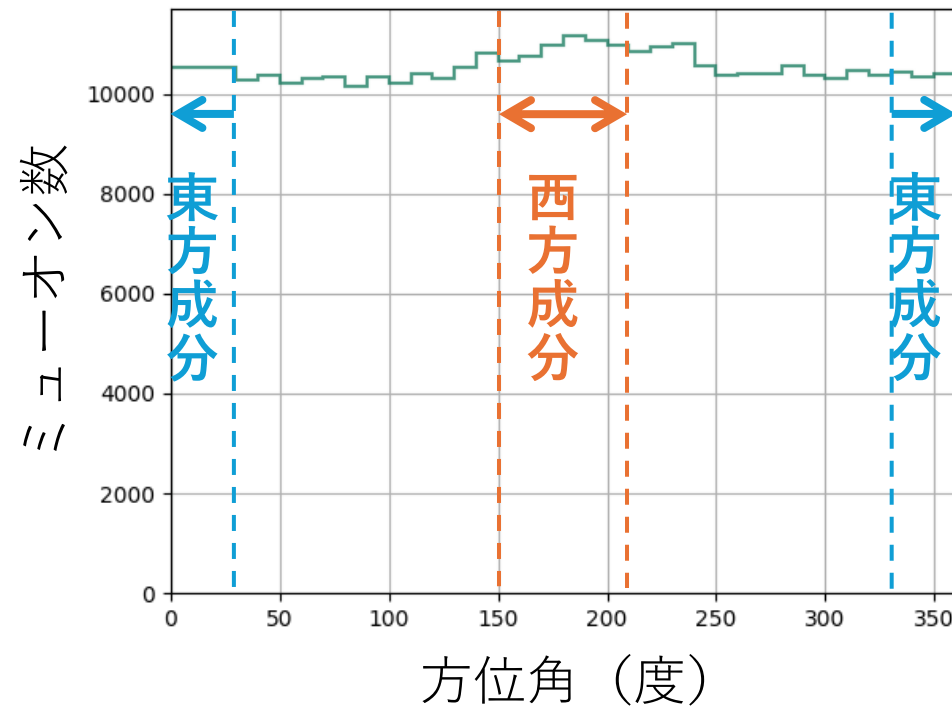
天頂角0-60度

120 km

p, Heなど  
10 GeV/n以上



- ミューオン数の方位角分布

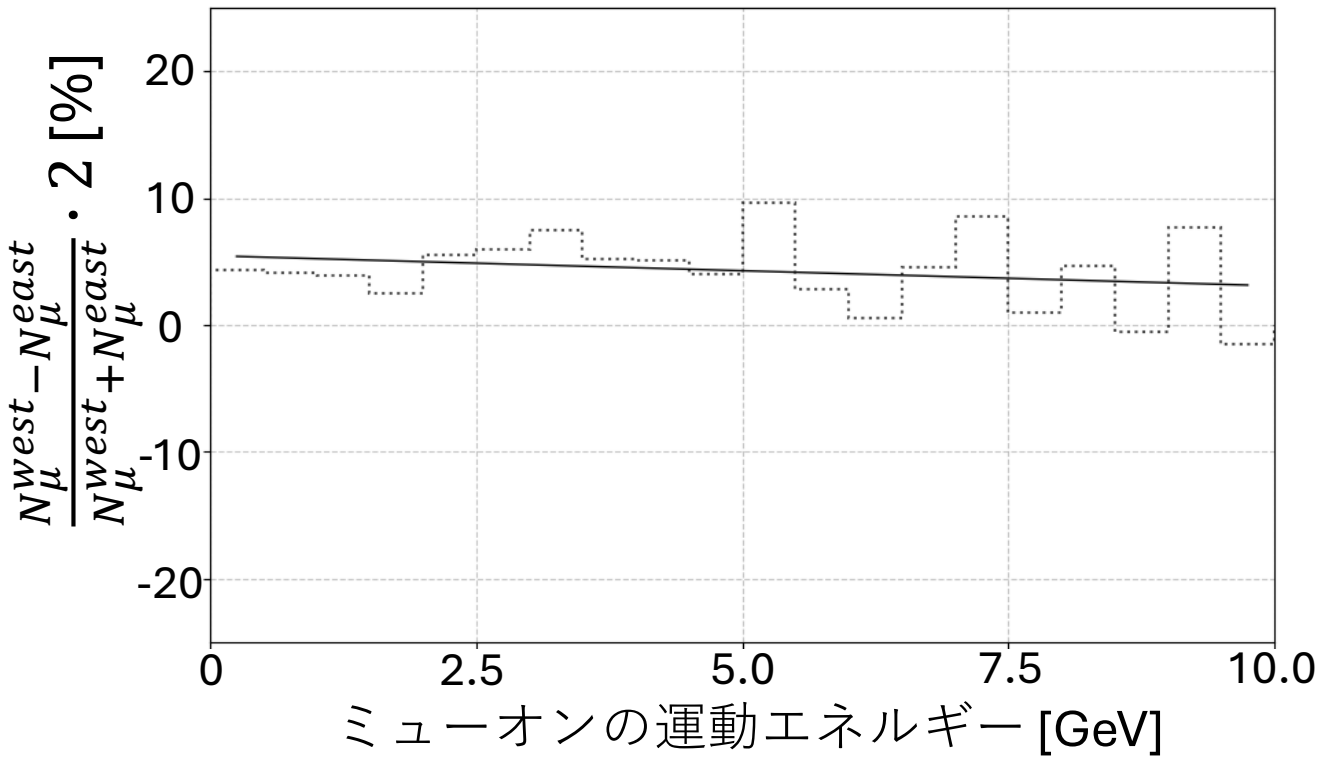


東方成分：  
 $0 \pm 30$ 度  
西方成分：  
 $180 \pm 30$ 度

➡ 西方成分 > 東方成分

# シミュレーション結果 (運動エネルギー依存性)

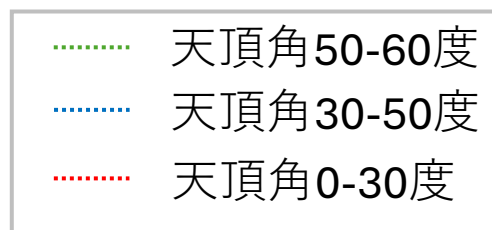
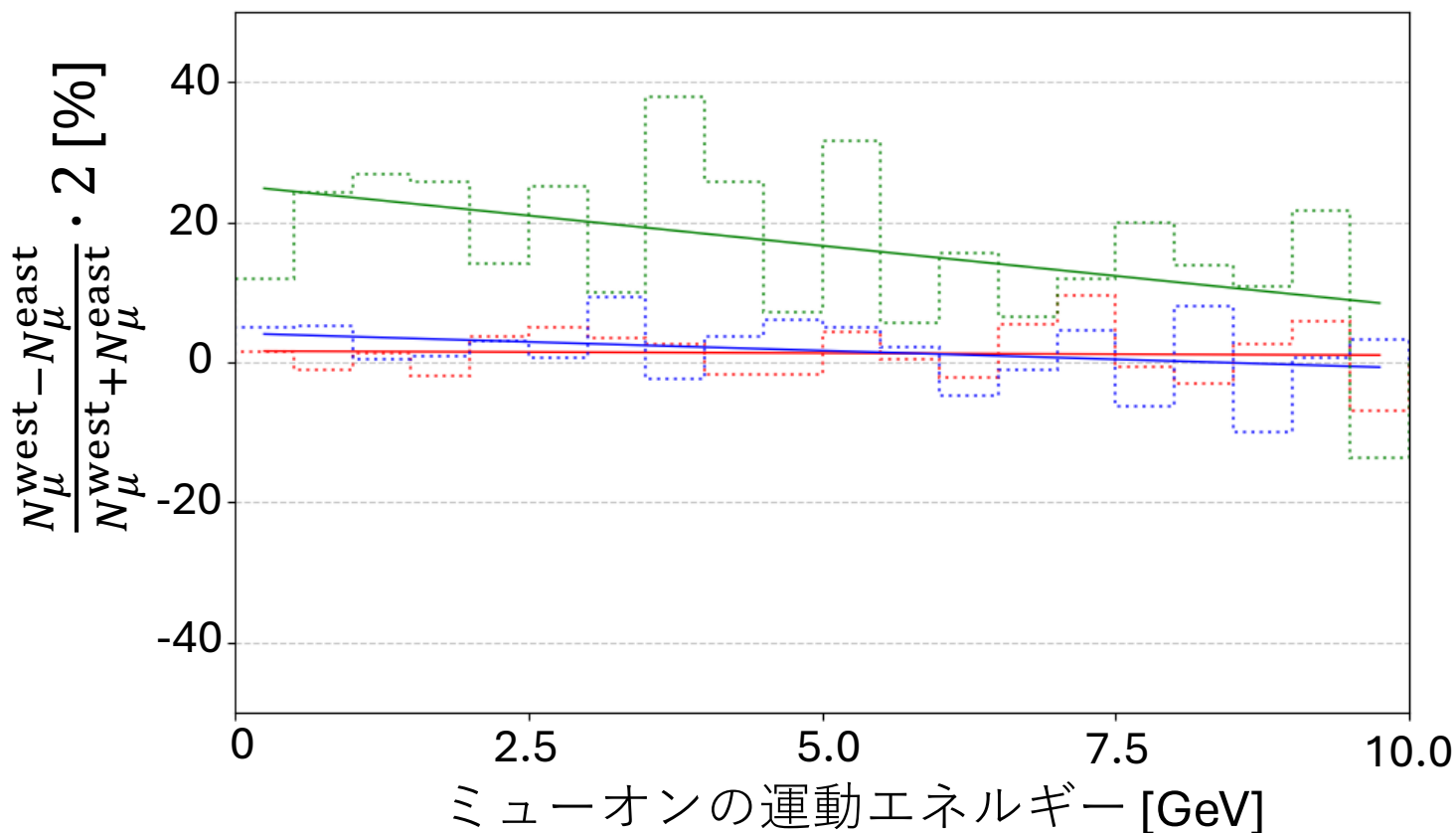
- ミューオン数の東西の正味の差



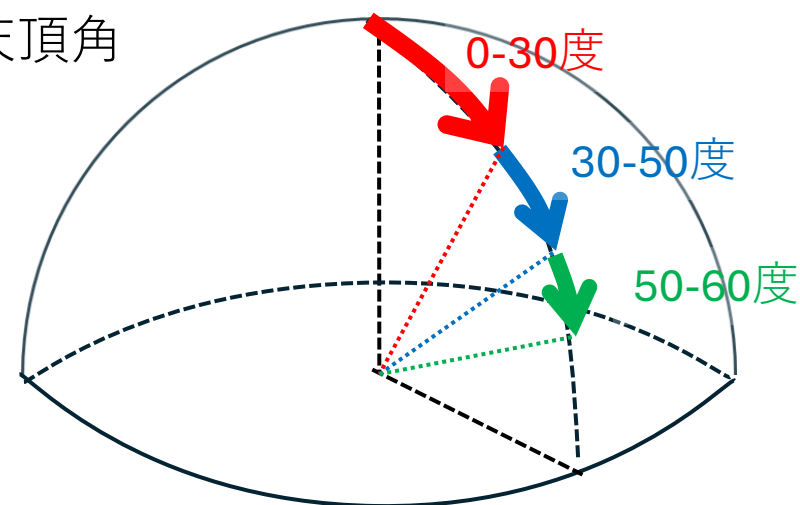
➡ 東西で差はあるが，運動エネルギーによる有意な違いは見られない

# シミュレーション結果（天頂角依存性）

- ミューオン数の東西の正味の差

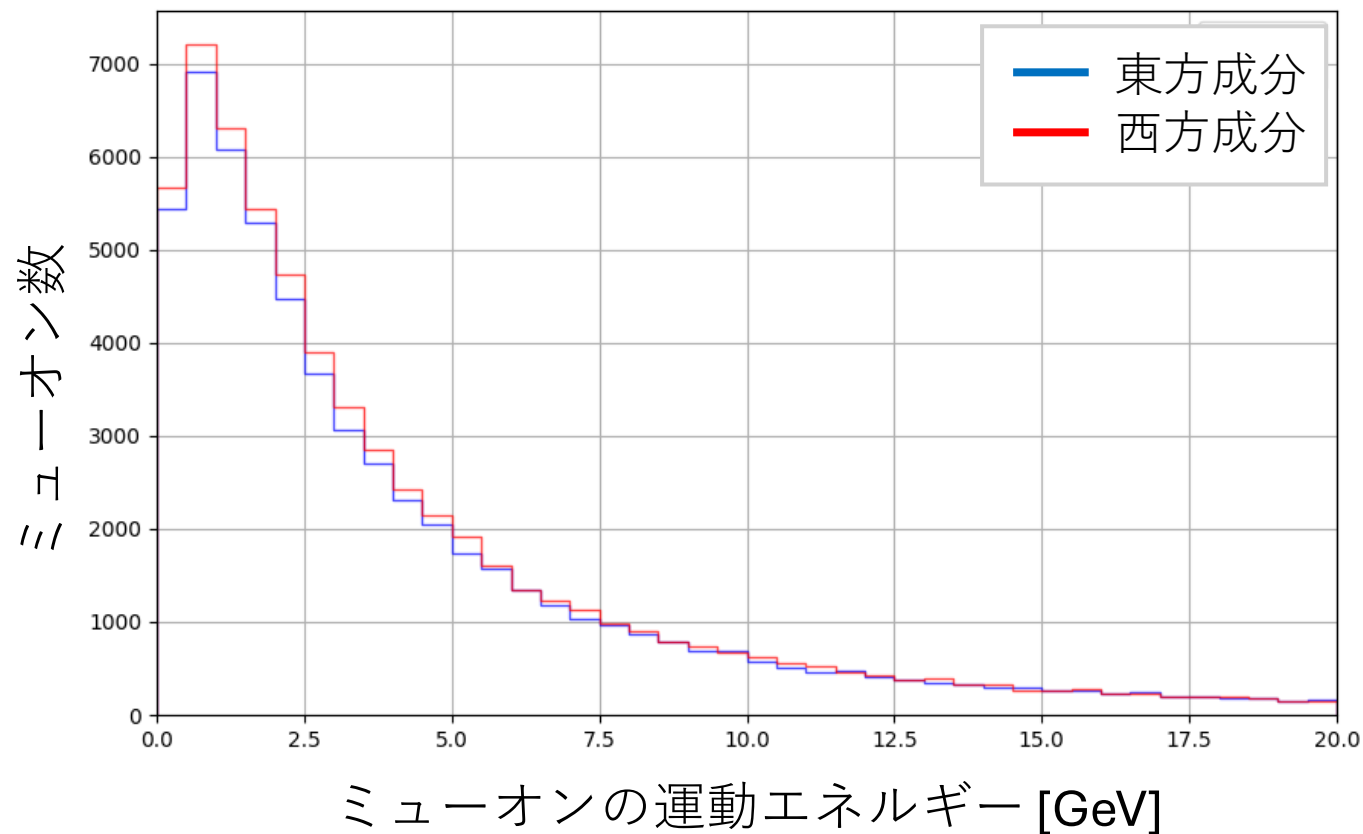


- 天頂角



➡ 天頂角が大きいほど東西効果は大きい

# シミュレーション結果 (運動エネルギー分布)



➡ 1GeV以下のミュオンを有効に使いたい

# 東西効果の実測

- 小高い開けた場所に検出器を設置



# 目次

## 1. 研究の背景：

ミューオンラジオグラフィーと東西効果

## 2. COSMOS Xを用いたシミュレーション

## 3. まとめと今後の展望

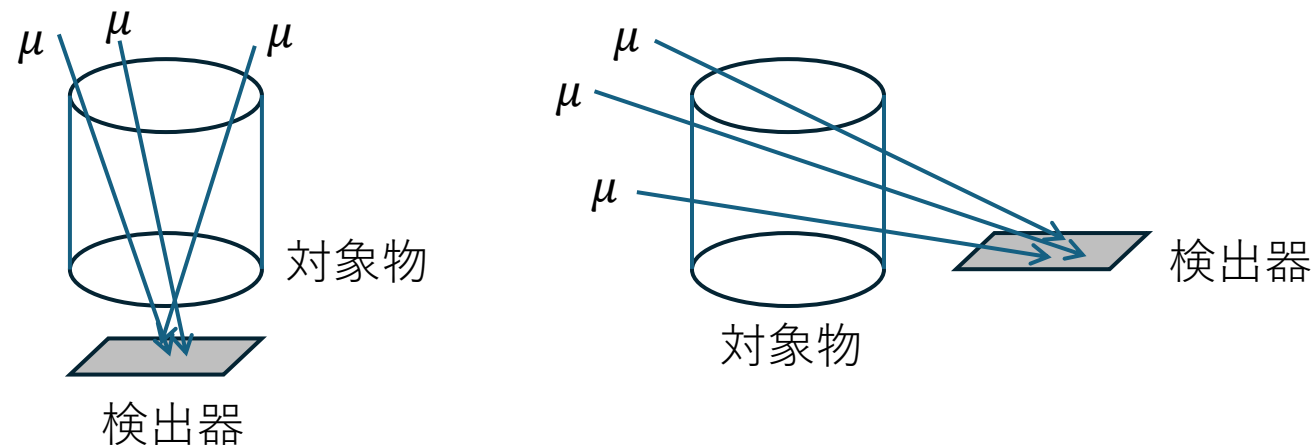


# まとめ

- 小スケールでは，東西効果が重要
  - シミュレーションから**4.4%の東西効果を確認**
  - 天頂角が大きいほど東西効果は大きく，  
運動エネルギー依存性は高い**
- 現在，東西効果を実測する計画が進行中

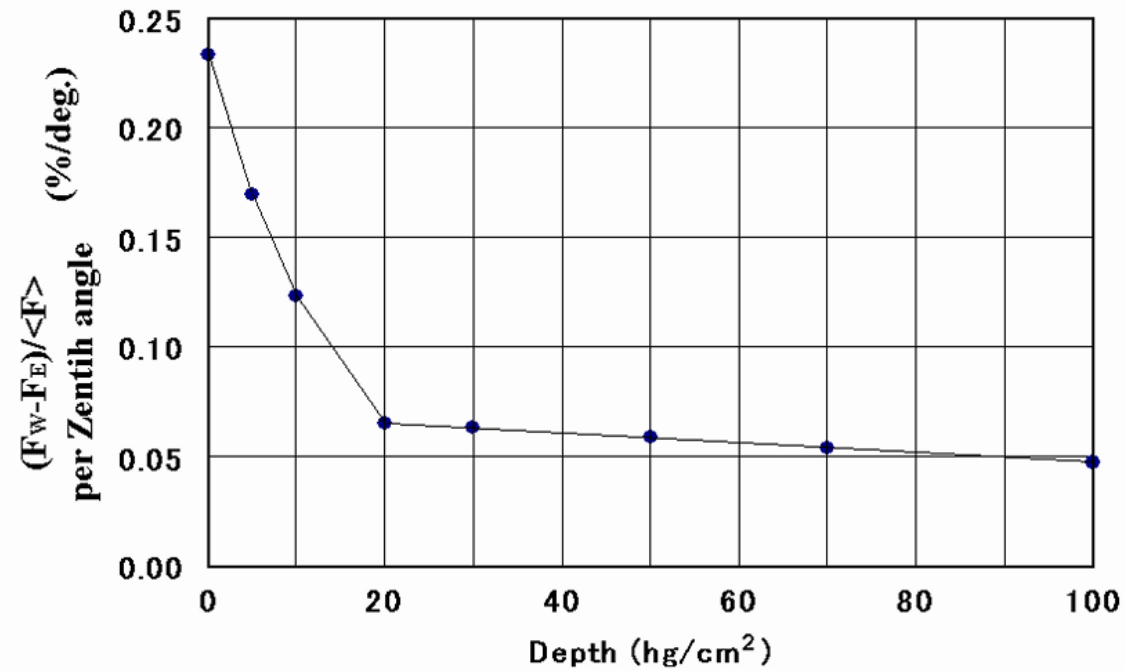
# 今後の展望

- 大天頂角における東西効果のシミュレーション
- ミューオン数を増やし，データのばらつきを軽減する
- 緯度・経度による違いを調べ，実測とも比較
- 一次宇宙線の入射高度の評価



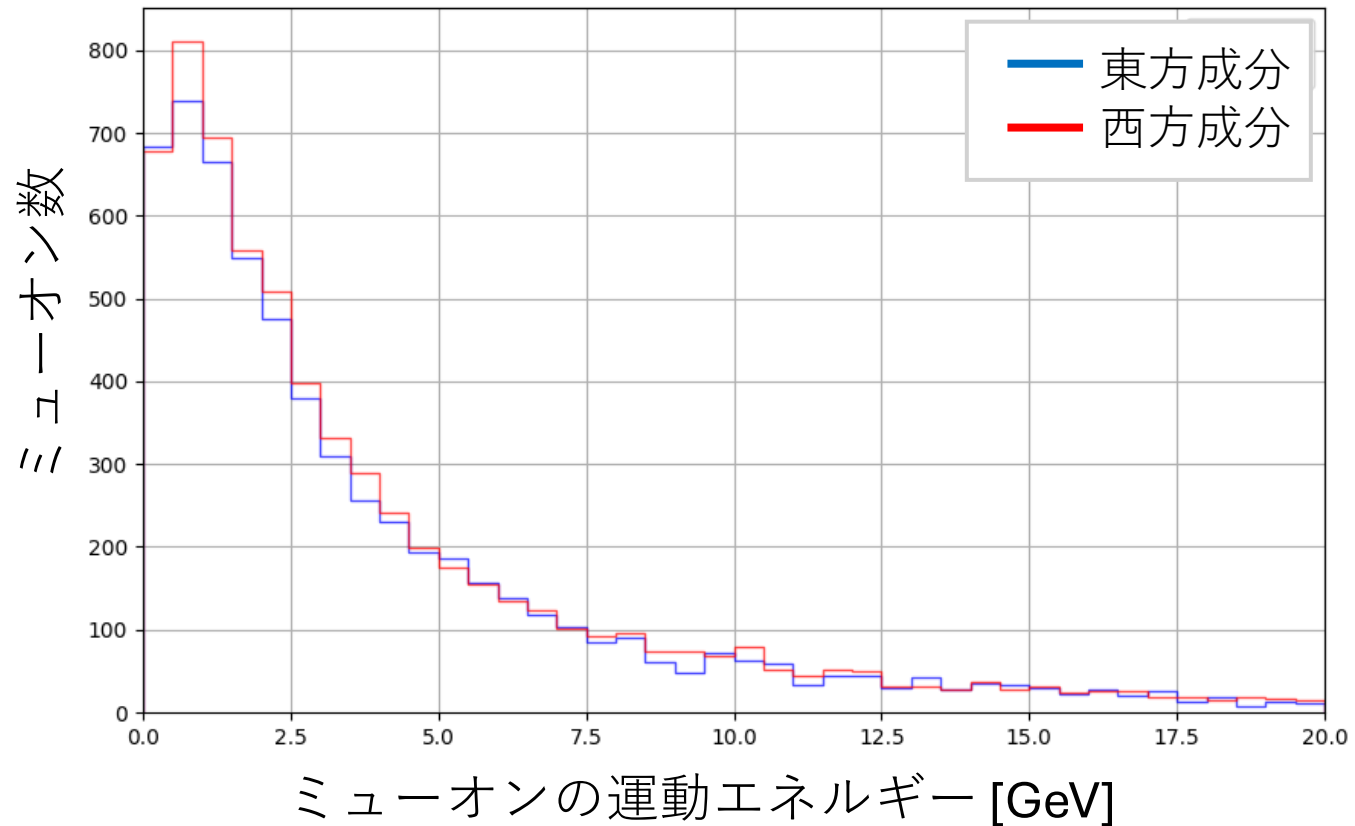
補足

# 地中での東西効果の先行研究

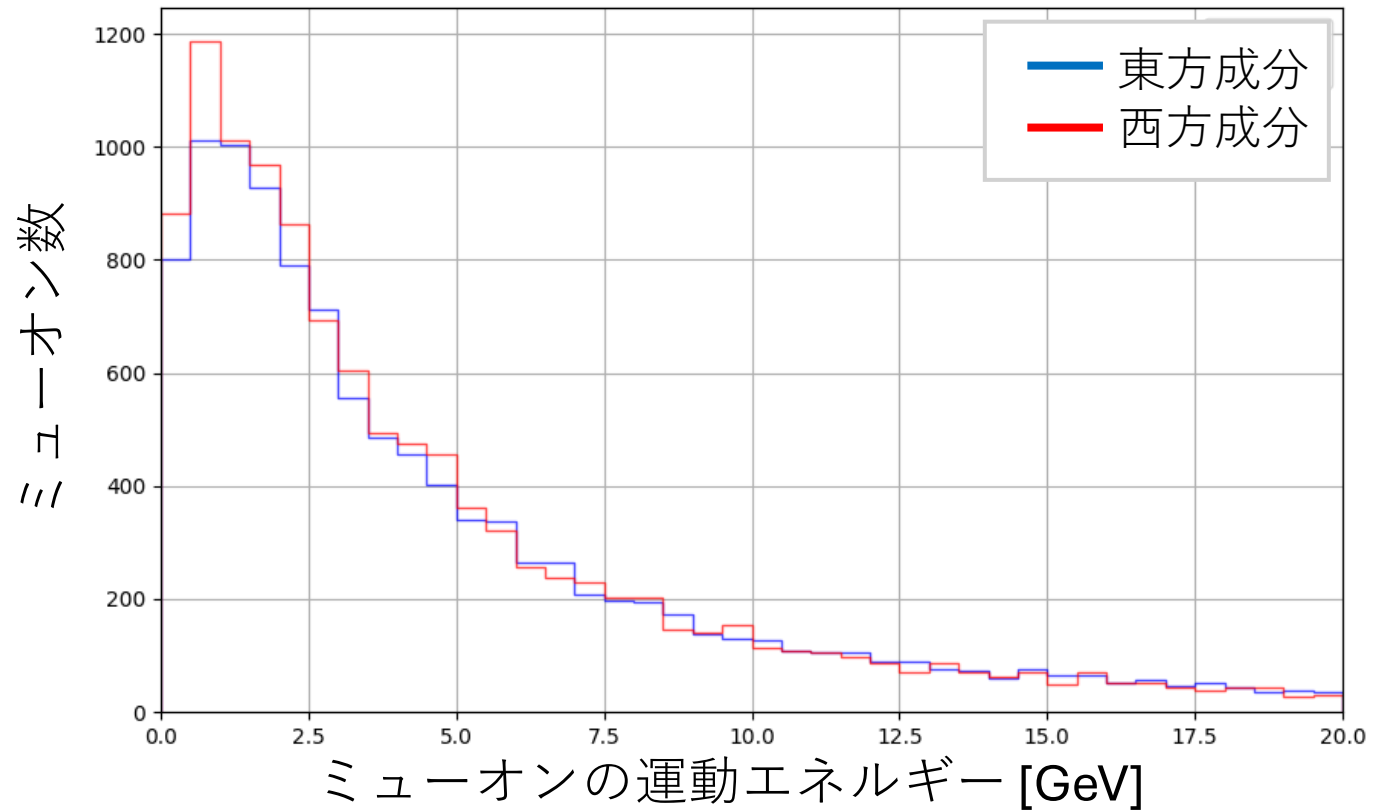


湊進 (2012)

# 1GeV/n以上の運動エネルギー分布



# 天頂角40-50度での運動エネルギー分布



# 天頂角と方位角

- 天頂角  
地面に対する法線と飛跡のなす角
- 方位角  
東を0度として反時計回りに角度を振ったもの (COSMOS X)

