



# スーパーカミオカンデにおける 宇宙線ミュオンフラックスの測定

**多田智昭**、藤田紗希<sup>A</sup>、中野佑樹<sup>B</sup>、大山雄一<sup>C</sup>、小汐由介

**岡山大理**、IPMU<sup>A</sup>、富山大理<sup>B</sup>、KEK<sup>C</sup>、他 Super-Kamiokande collaboration

2026年3月23日

日本物理学会2026年春季大会 オンライン

# 目次

- 研究背景・目的
- スーパーカミオカンデ検出器
- 宇宙線ミュオン再構成プログラム
- データ解析
  - ▶ 多重度分布
  - ▶ フラックス
- まとめ

# Cosmic-ray muon

## ● 大気ニュートリノと宇宙線ミュオン

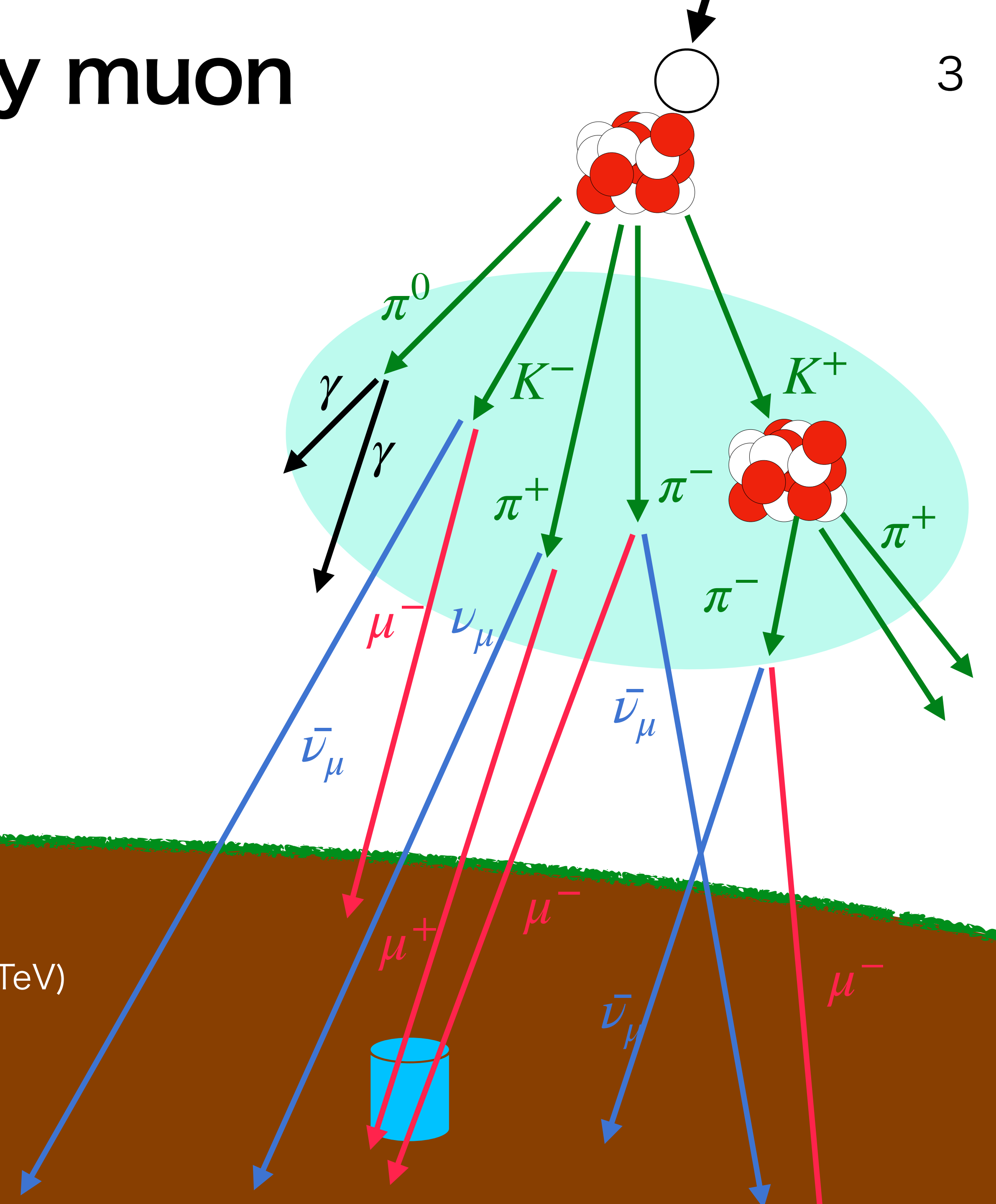
- ▶ 1次宇宙線 (p, He, O, Fe) と大気原子核 (O, N) の反応
  - ・ ハドロンシャワーの生成
- ▶ ハドロンシャワー中の  $\pi$  中間子とK中間子
  - ・ 他の大気原子核と再び反応
  - ・ 大気ニュートリノと宇宙線ミュオンに崩壊

Parent particle	Decay mode	Branching ratio [%]
$\pi^\pm$	$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	100.0
$K^\pm$	$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	63.5
	$K^\pm \rightarrow \pi^0 + \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	3.2
$K_L$	$K_L \rightarrow \pi^\mp + \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	27.1

[https://pdg.lbl.gov/2025/tables/contents\\_tables.html](https://pdg.lbl.gov/2025/tables/contents_tables.html)

## ● 地下環境における宇宙線ミュオン

- ▶ 岩盤で除去：高エネルギーミュオンのみが到達 (例 神岡地下 ~TeV)
  - **空気シャワーの初期段階の情報**を保持



# Muon bundle

## ● Muon bundle

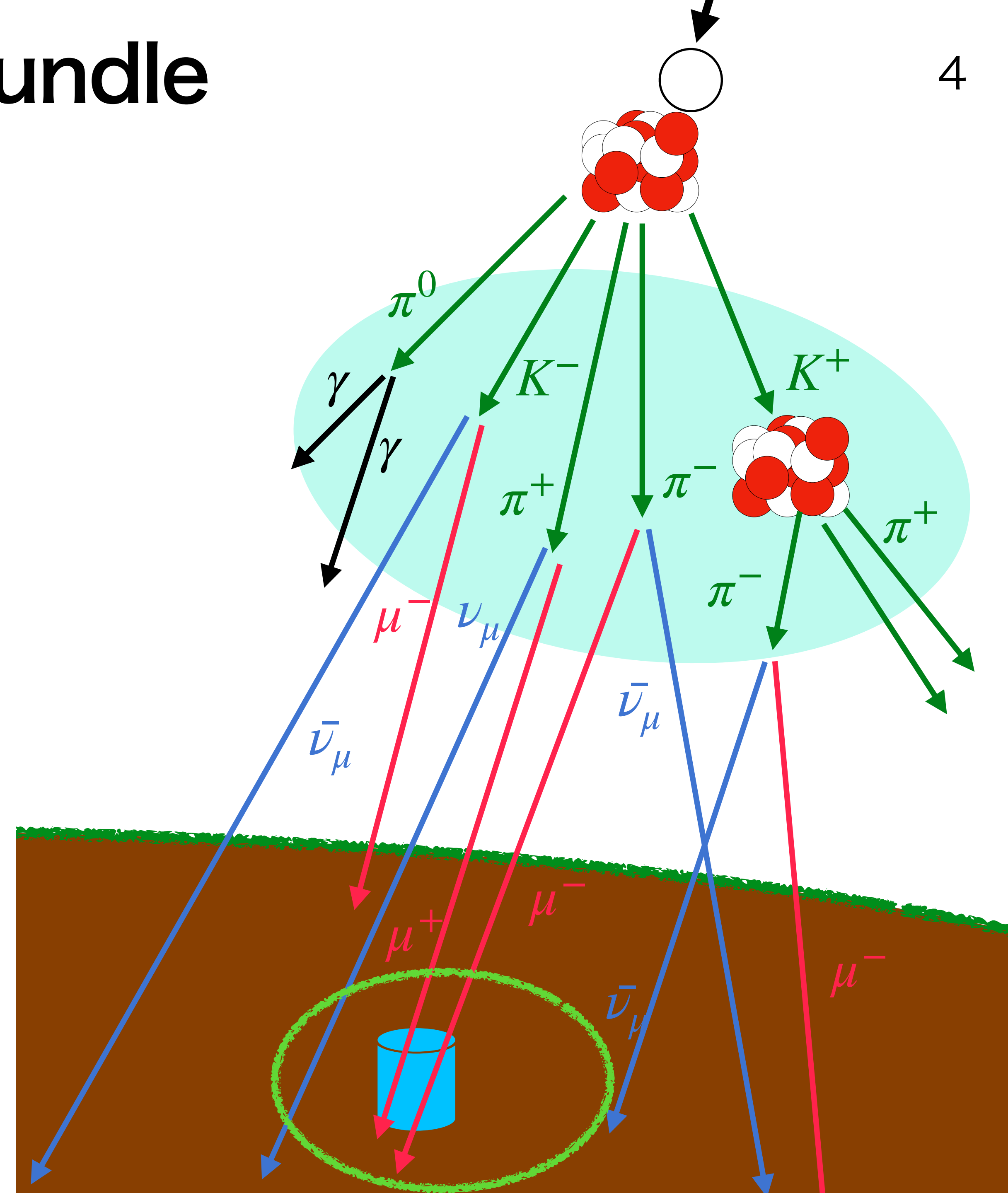
- ▶ 同一の空気シャワーに由来する  
複数ミュオンが同時に検出器に到達する事象

## ● Muon bundleの特徴量

- ▶ **多重度分布 (multiplicity)**
  - ・ 一次宇宙線のエネルギー
  - ・ 一次宇宙線の組成
  - ・ ハドロン生成多重度

- ▶ **空間距離分布 (Track separation)**
  - ・ 生成高度
  - ・ シャワーの内部構造

Muon bundleは空気シャワーの強度/内部構造を同時に反映している

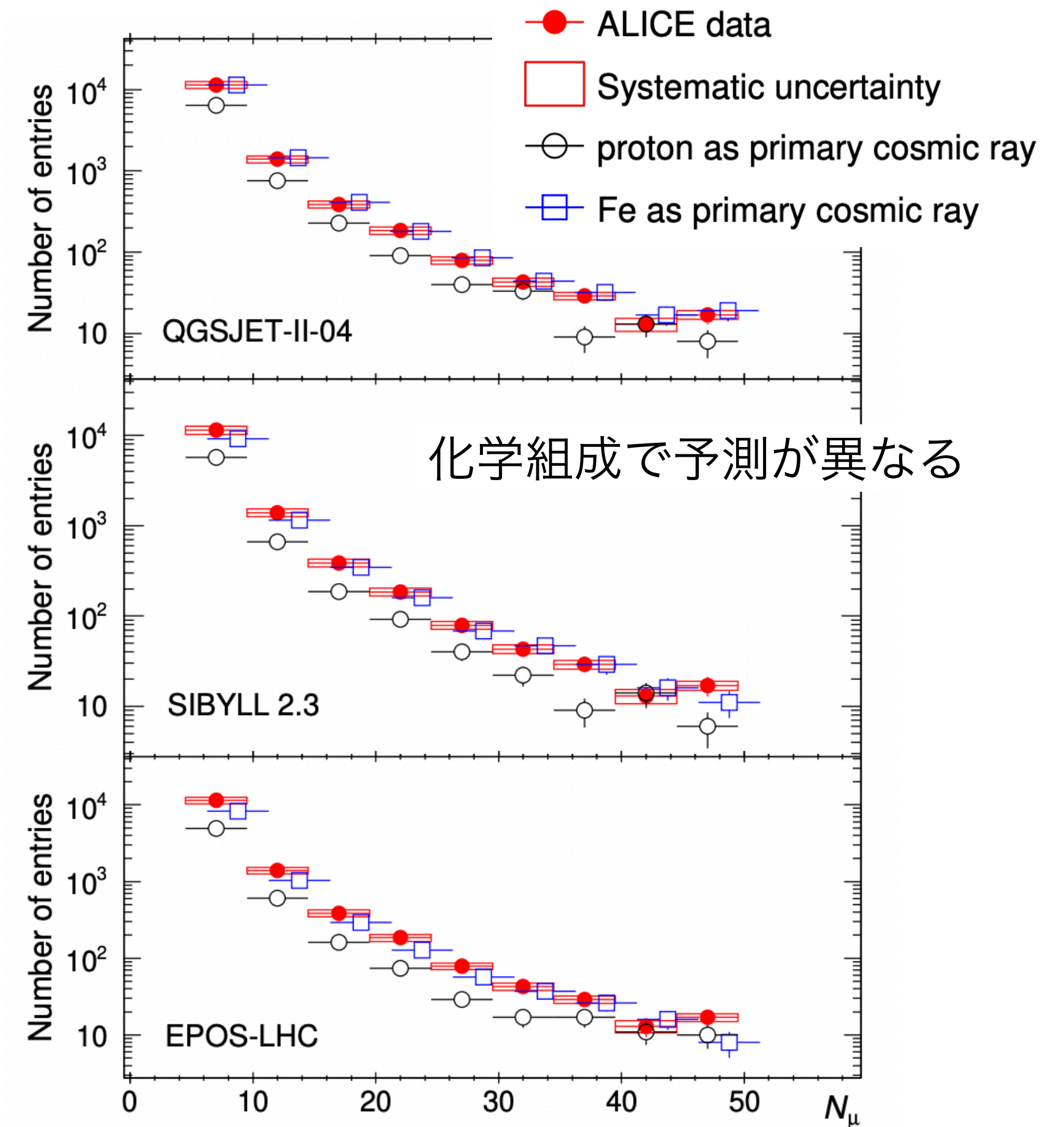
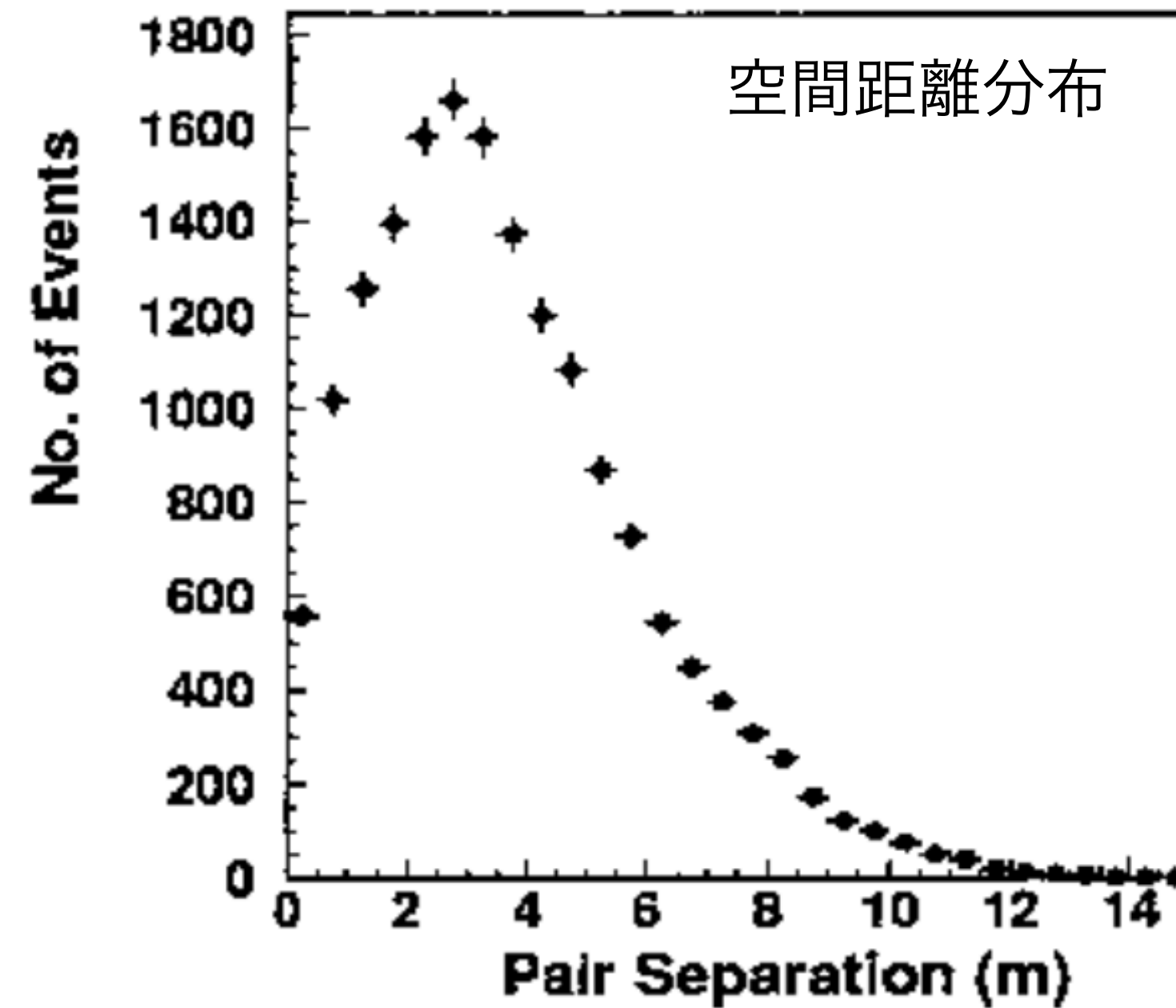
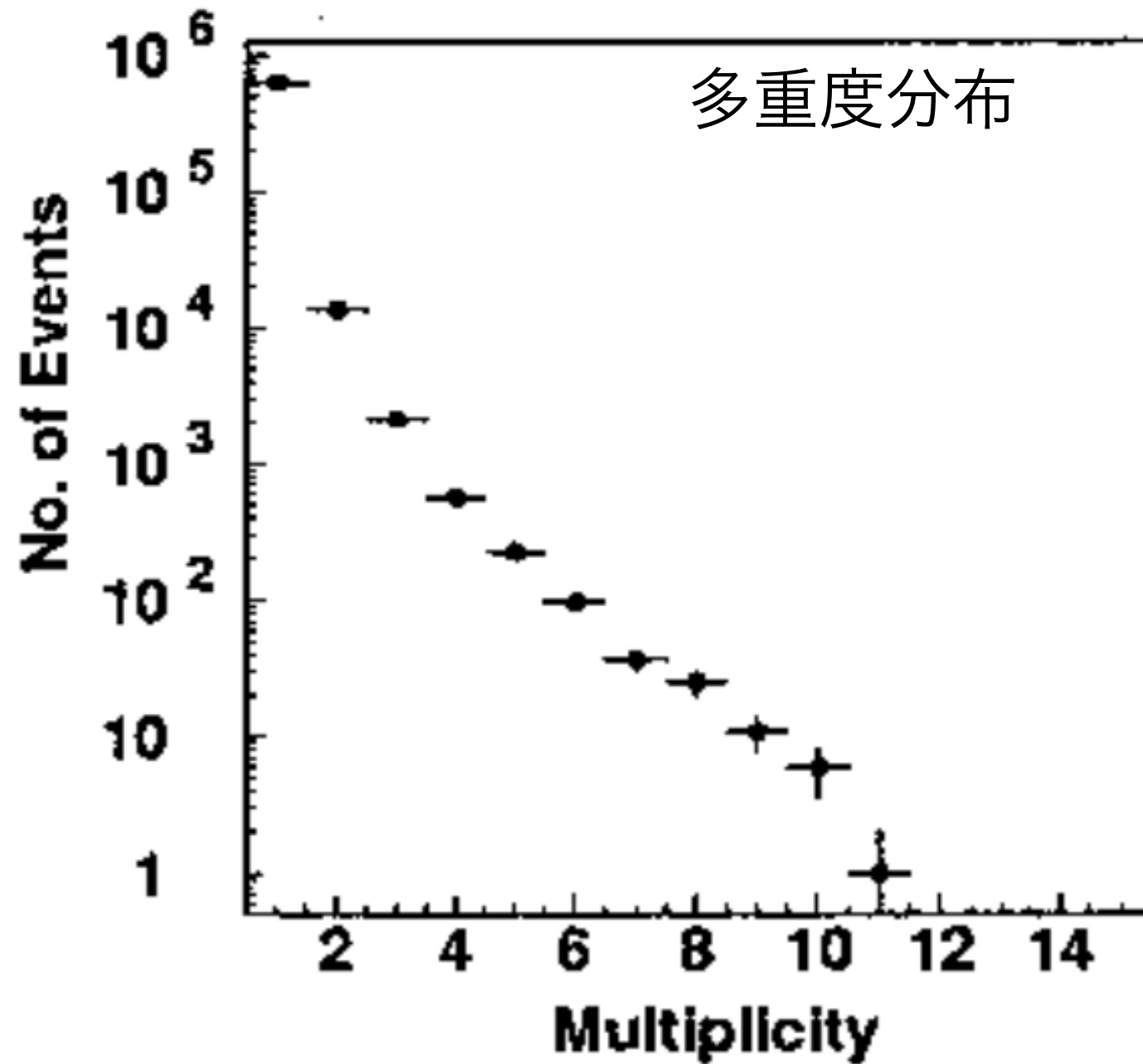


# 研究目的

## ● 地下環境におけるMuon bundle測定とシミュレーション比較

LVD @LNGS

Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 35 (1994) 243-245



地下に到達する**Muon bundleの多重度および空間距離分布**を精密に測定する  
→ **一次宇宙線の化学組成やハドロン相互作用モデルの検証**をする

本講演は解析の現状について報告する

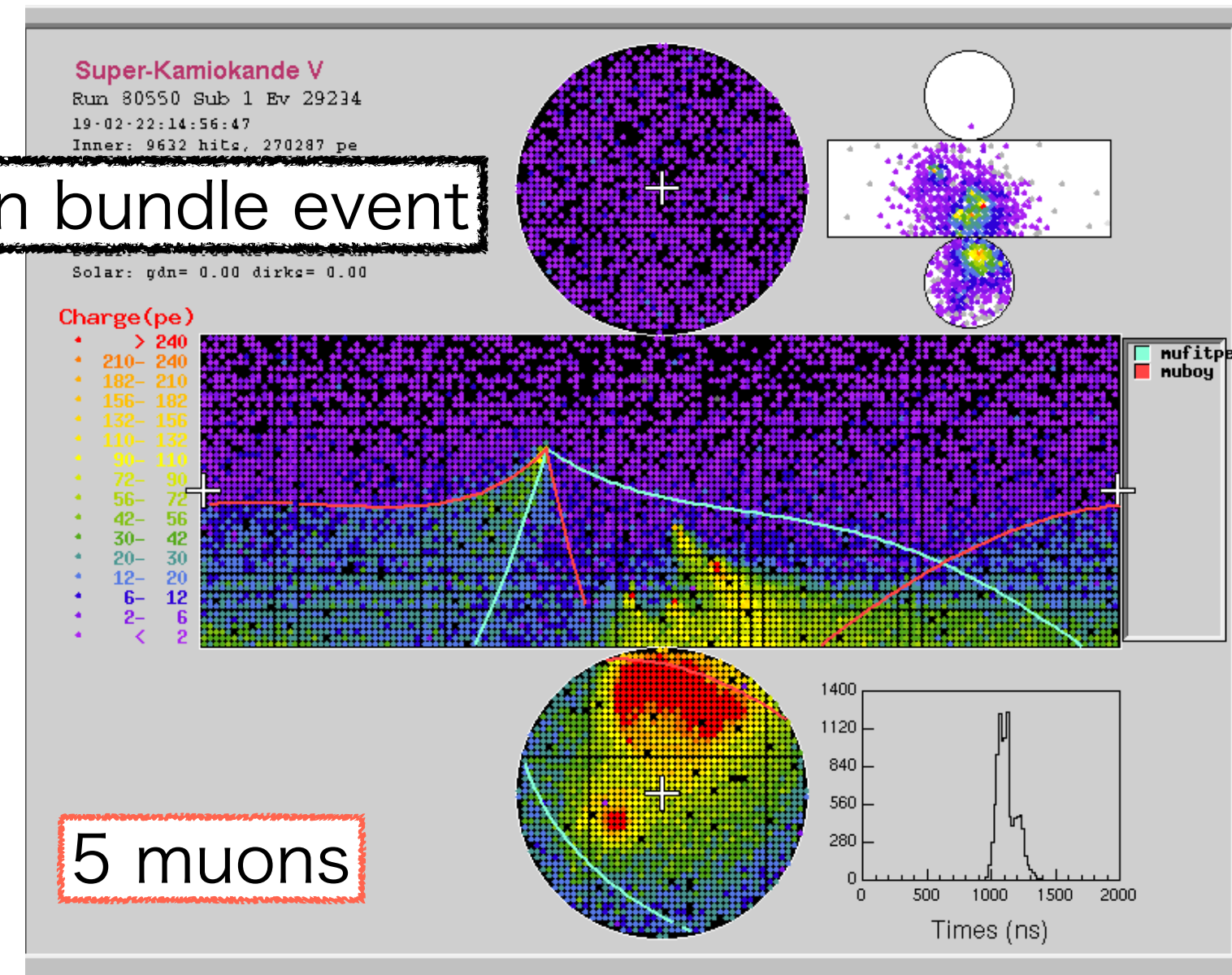
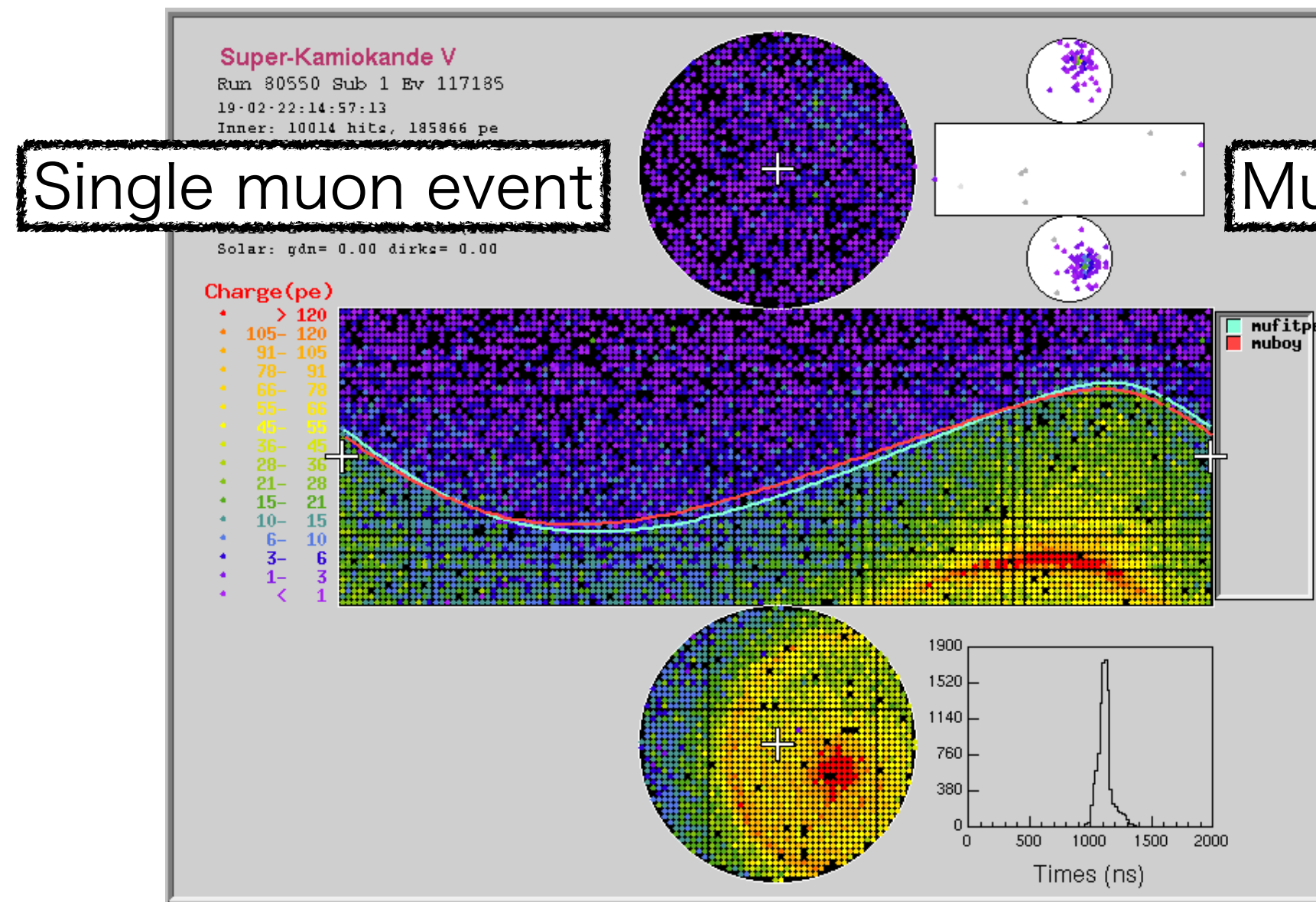
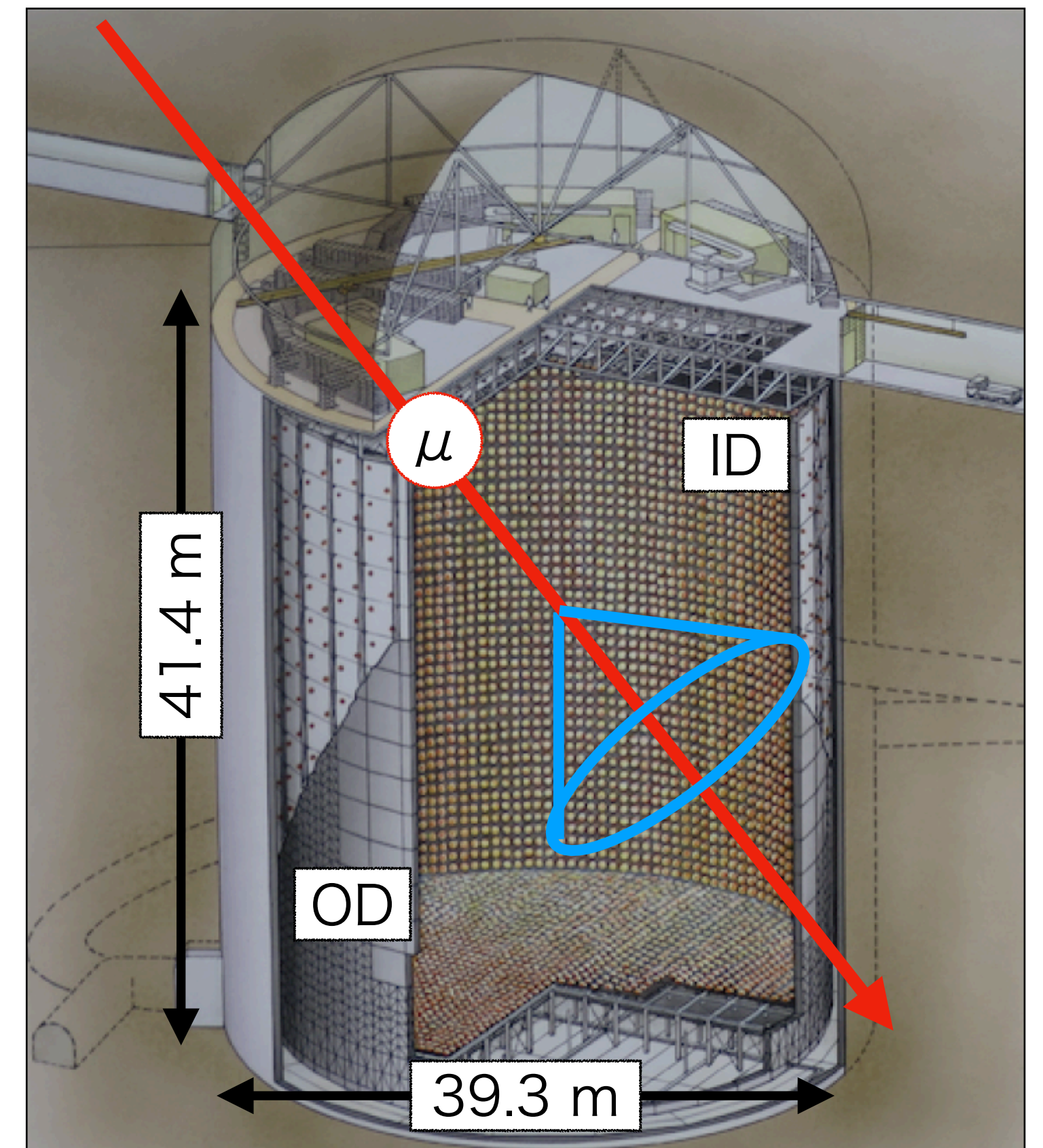
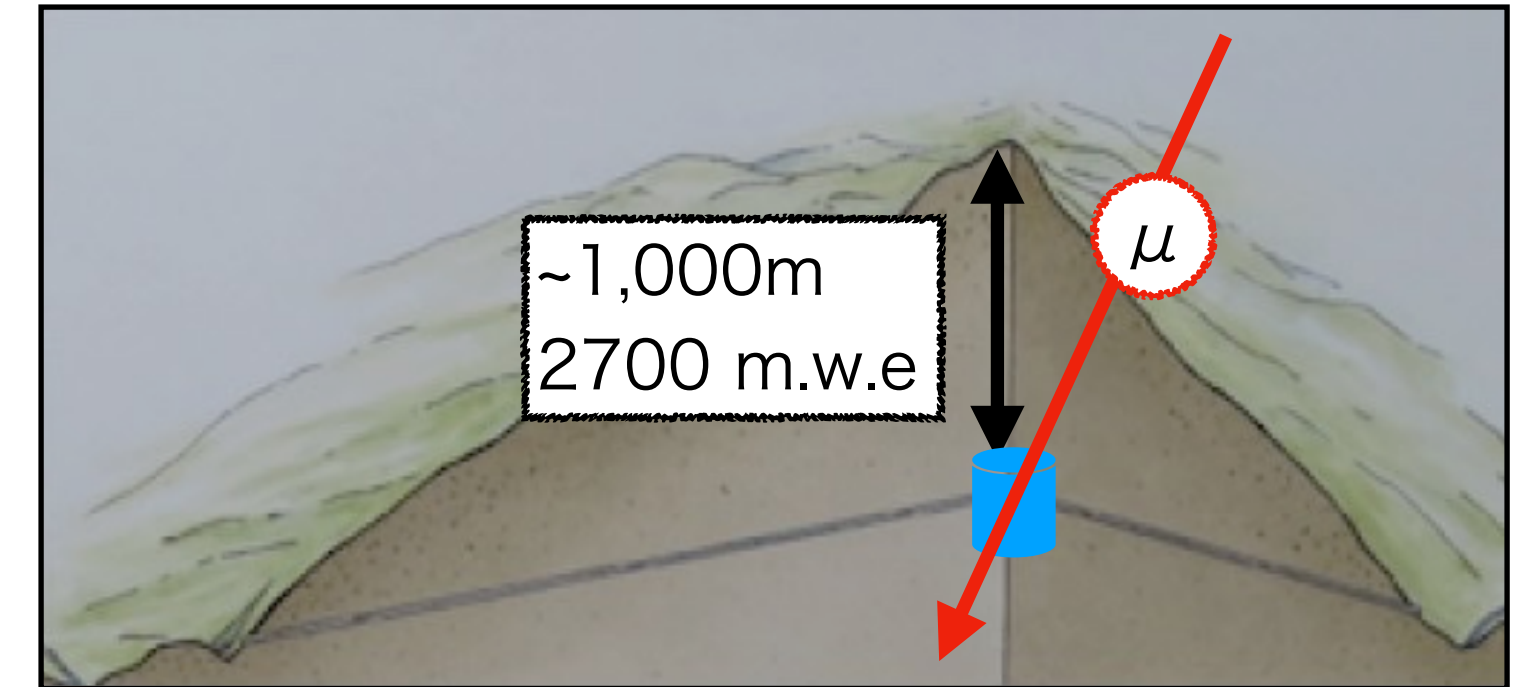
# スーパーカミオカンデ検出器

## ● 検出器

- ▶ 大型水チェレンコフ検出器 (岐阜県飛騨市神岡町地下 ~1,000 m)
- ▶ 約5万トンの超純水
- ▶ ID ~11,000 20-inch PMTs / OD ~2,000 8-inch PMTs
- ▶ チェレンコフ光をPMTで検出

## ● Muon事象

- ▶ ~ 2Hz (1日 ~18万事象)
- ▶ 地上で~800GeV以上のエネルギー



# 宇宙線ミュオン再構成プログラム

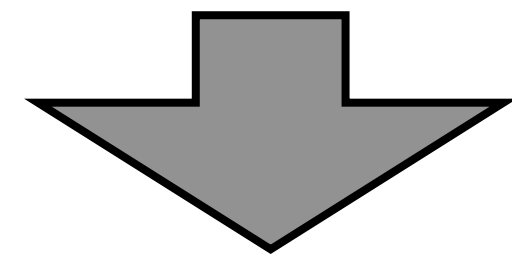
## ● ミューオン事象再構成プログラム

- ▶ Muon事象における、**トラック数** / **各トラックの方向** / **検出器への入射位置** を再構成
  - ・ IDPMTで検出した光子の **Timing** と **Charge** を使用 (ODは使わない)

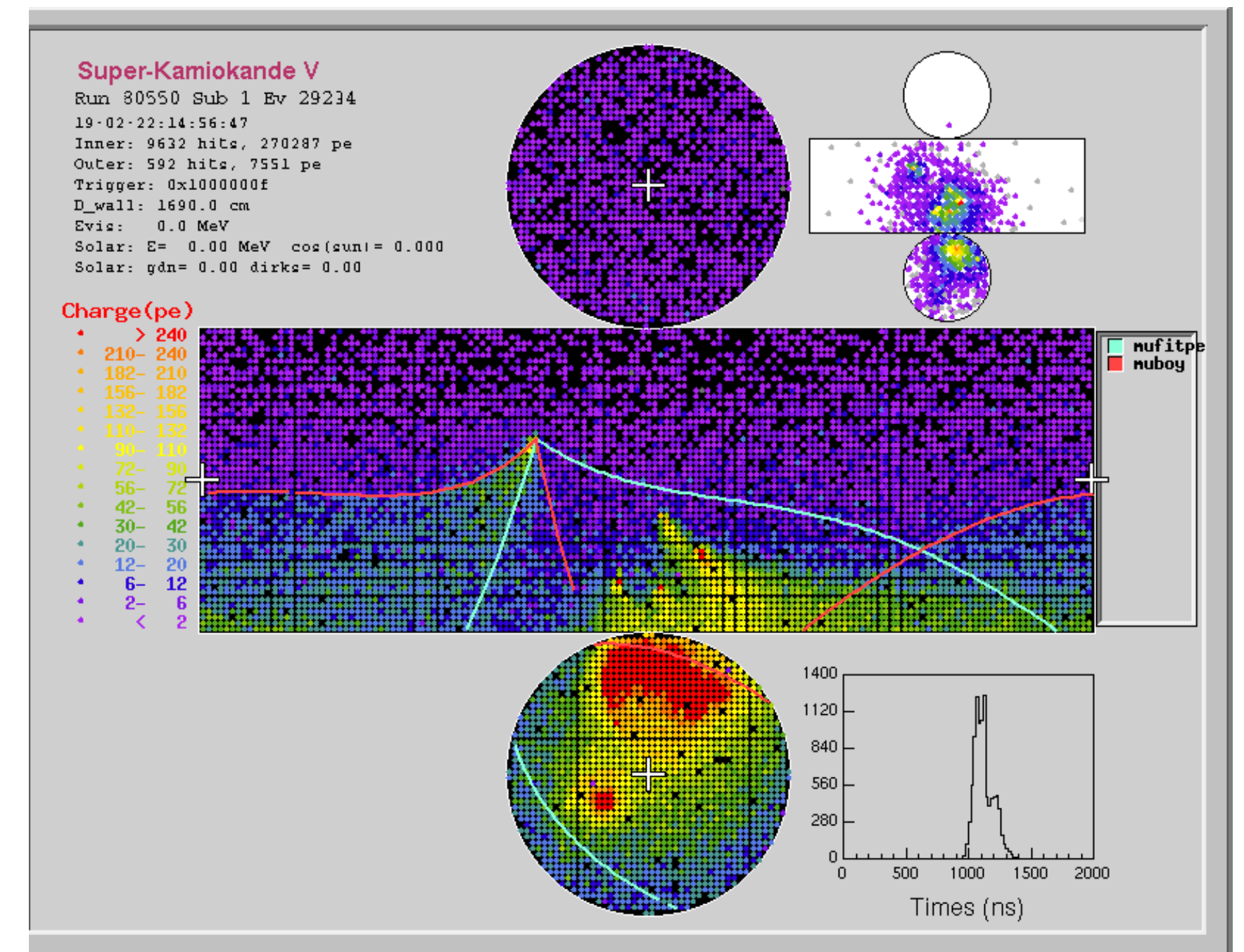
## ● 現行のプログラム

- ▶ **Single muonの方向や入射位置**をより正確に再構成
- ▶ Single event or Bundle event をTimingで判別
- ▶ Bundle eventの取り扱い
  - ・ 方向：全てのトラックで同じ (トラックが完全に平行)
  - ・ トラック数：入射位置に相当するヒットクラスターを数える  
→ Miscountingが多い

目的達成には、Bundle event中のトラック数を正確に数えることが必要  
Track countingの精度を向上させた再構成プログラムの開発が必要



**機械学習ベースの再構成プログラムの開発**



# 機械学習ベースの再構成プログラム

- **Object detection** (物体検出)

- ▶ 画像の中から物体を見つけ、対象物体の周囲をBoxとして出力

**Our idea**

ミュオントラックの検出を**物体検出の問題として定式化**する

- **機械学習モデル**

- ▶ Detection Transformer  
(<https://arxiv.org/abs/2005.12872>)

- **トレーニング**

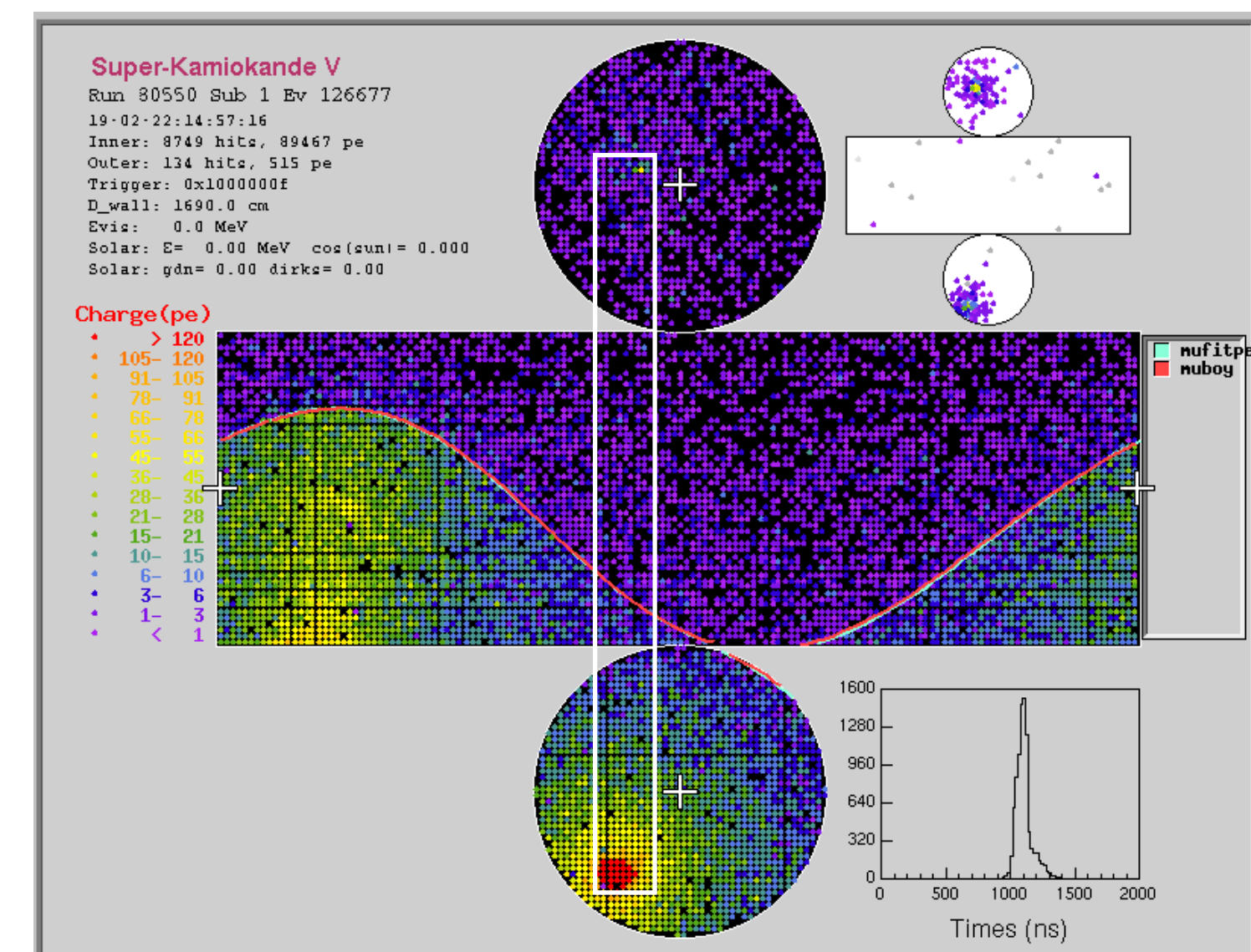
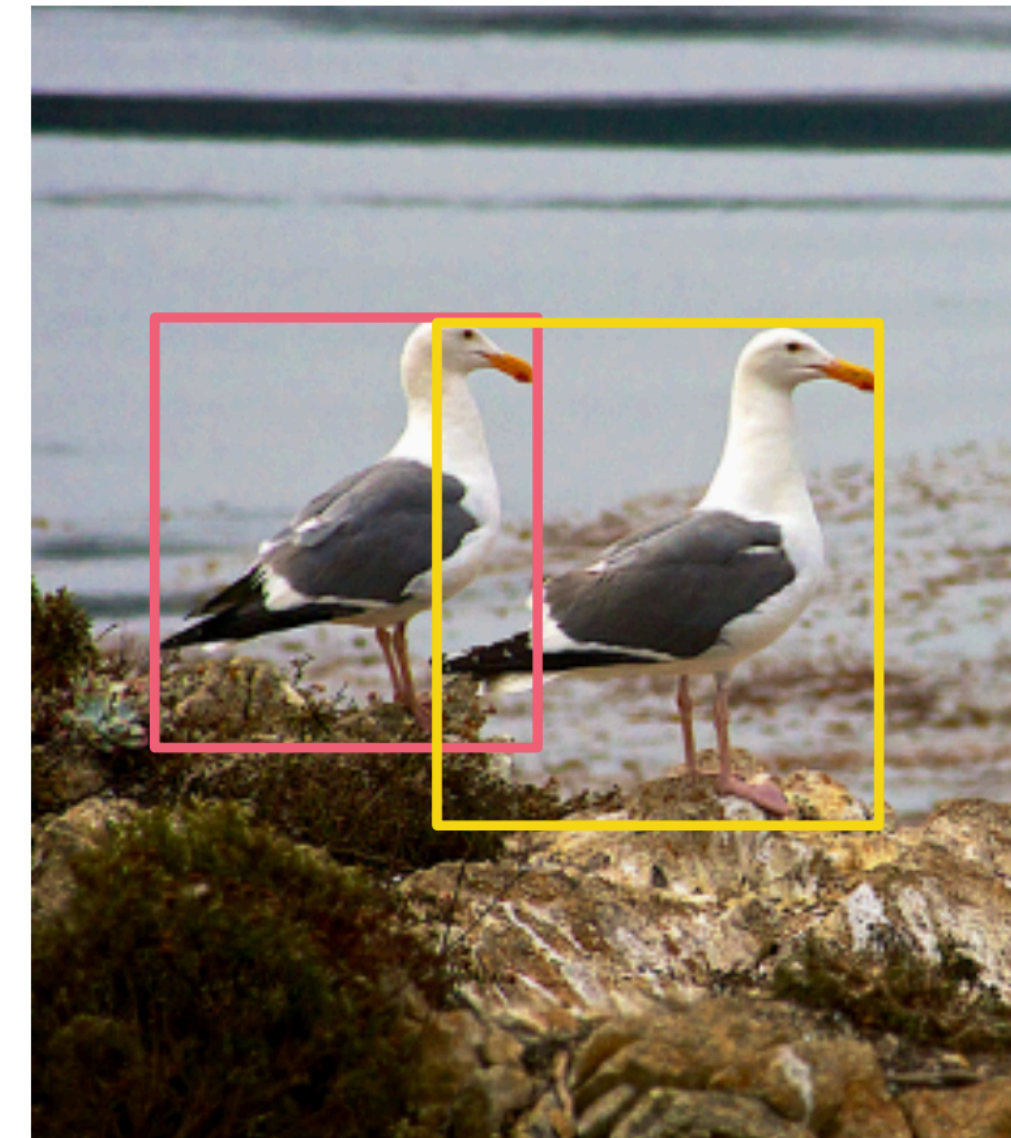
- ▶ 1本から10本の**Muon bundle** simulation

- **Input information**

- ▶ ID PMTの**Timing** / **Charge** (画像として入力)

- **Output information**

- ▶ トラック数
- ▶ 各トラックの入射方向 / 入射位置 / 入射時間

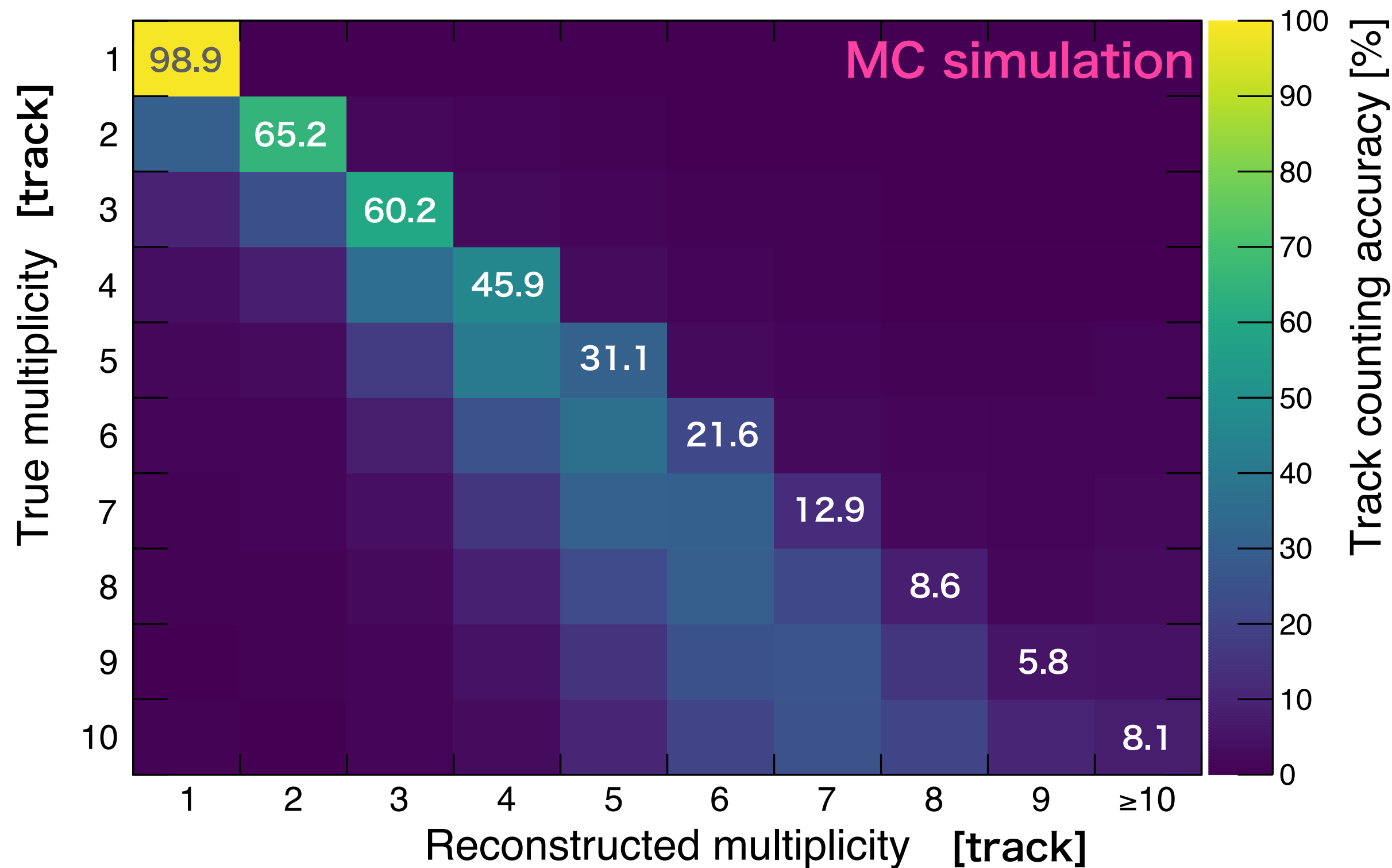


# Performance

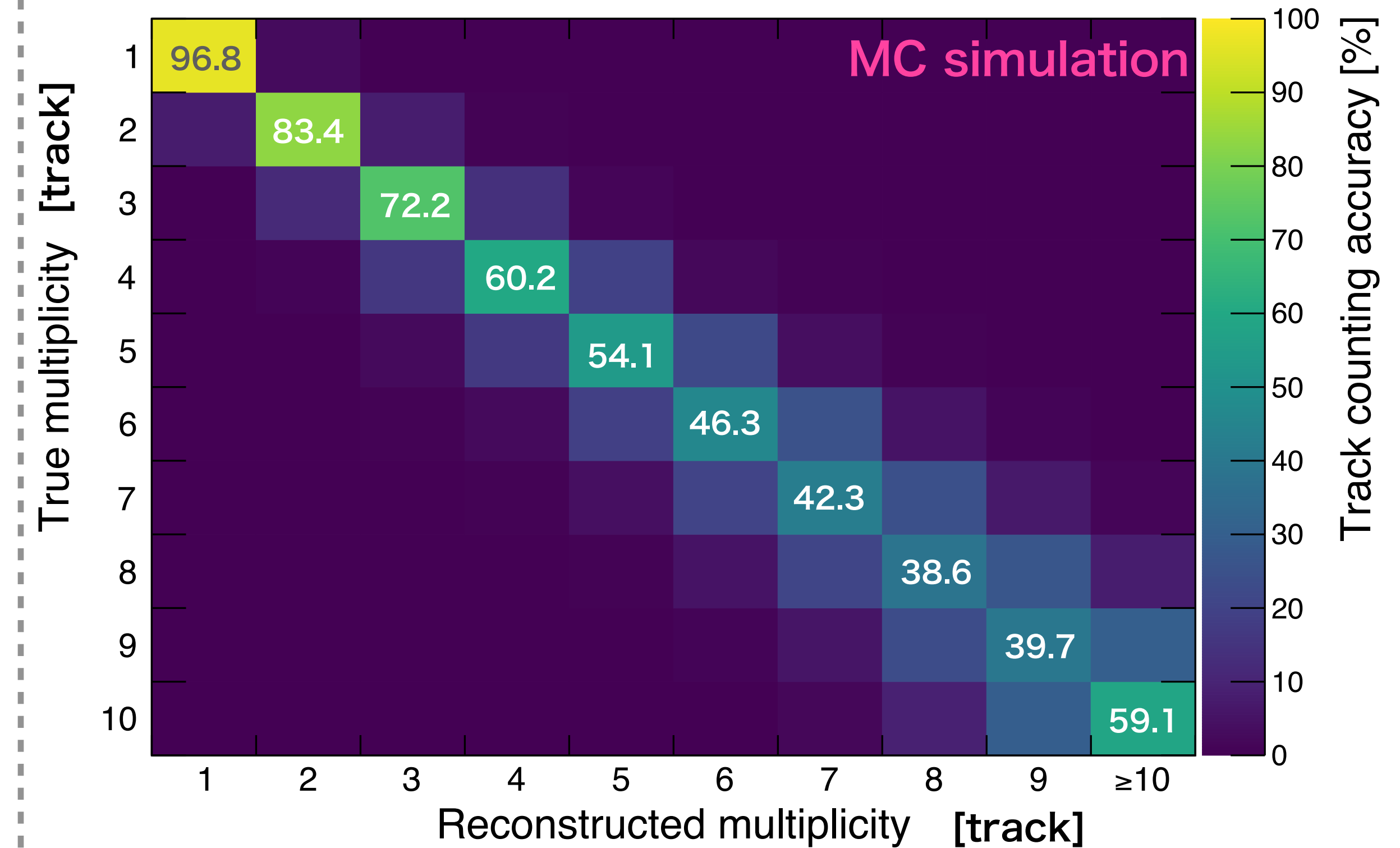
## ● Track counting の性能比較

- ▶ Muon bundle simulation (1本 ~ 10本)
- ▶ Confusion matrix [%] / 対角項 : 本数を正しく再構成できた割合

現行の再構成プログラム



機械学習ベースの再構成プログラム

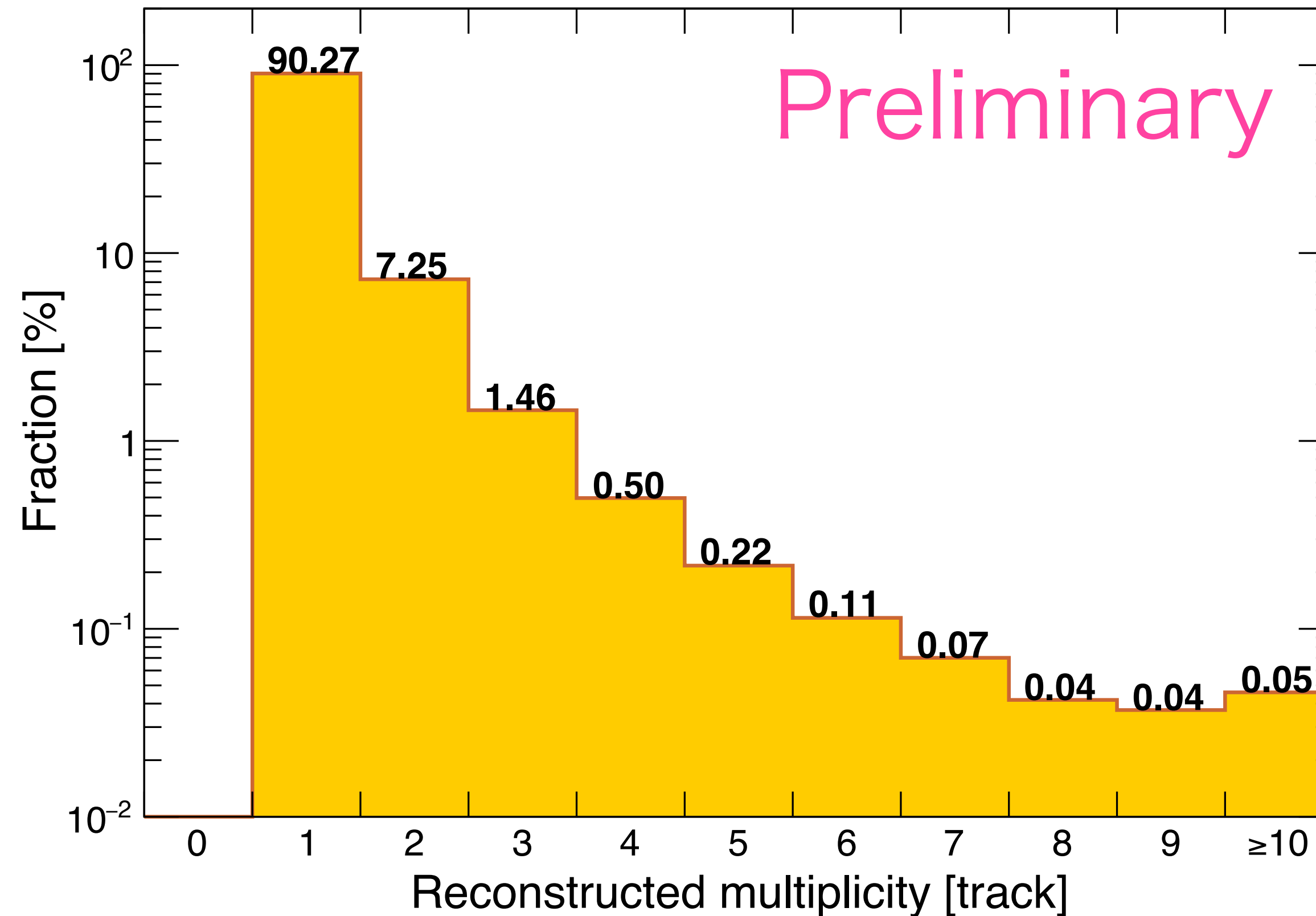


Track counting が現行より向上したプログラムが開発できた  
その他の再構成精度 (方向 / 入射位置) も同程度の精度を保っている

# Muon bundleの多重度分布

## ● 多重度分布

- ▶ Feb. 2019 - Jul. 2020 (1.5 years)
- ▶ 再構成の結果



90%がSingle muon event、残り10%がMuon bundle eventとして再構成

ハドロン相互作用モデルなどのシミュレーションとの比較のためには "到来した" 多重度分布が必要

**Confusion matrix**を使って行列を解く (Unfolding) → 解析進行中

# フラックス

## ● Total muon flux [ $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ ]

- ▶ データ期間 : Feb. 2019 - Jul. 2020 (1.5 years)
- ▶ # of total muon track:  $N$
- ▶ Effective area:  $S(\theta)$  [ $\text{cm}^2$ ]
- ▶ Livetime:  $L$  [sec]

$$Flux = 1.64 \pm 0.03 \times 10^{-7} \text{ [cm}^{-2}\text{sec}^{-1}] \text{ (stat.+syst.)}$$

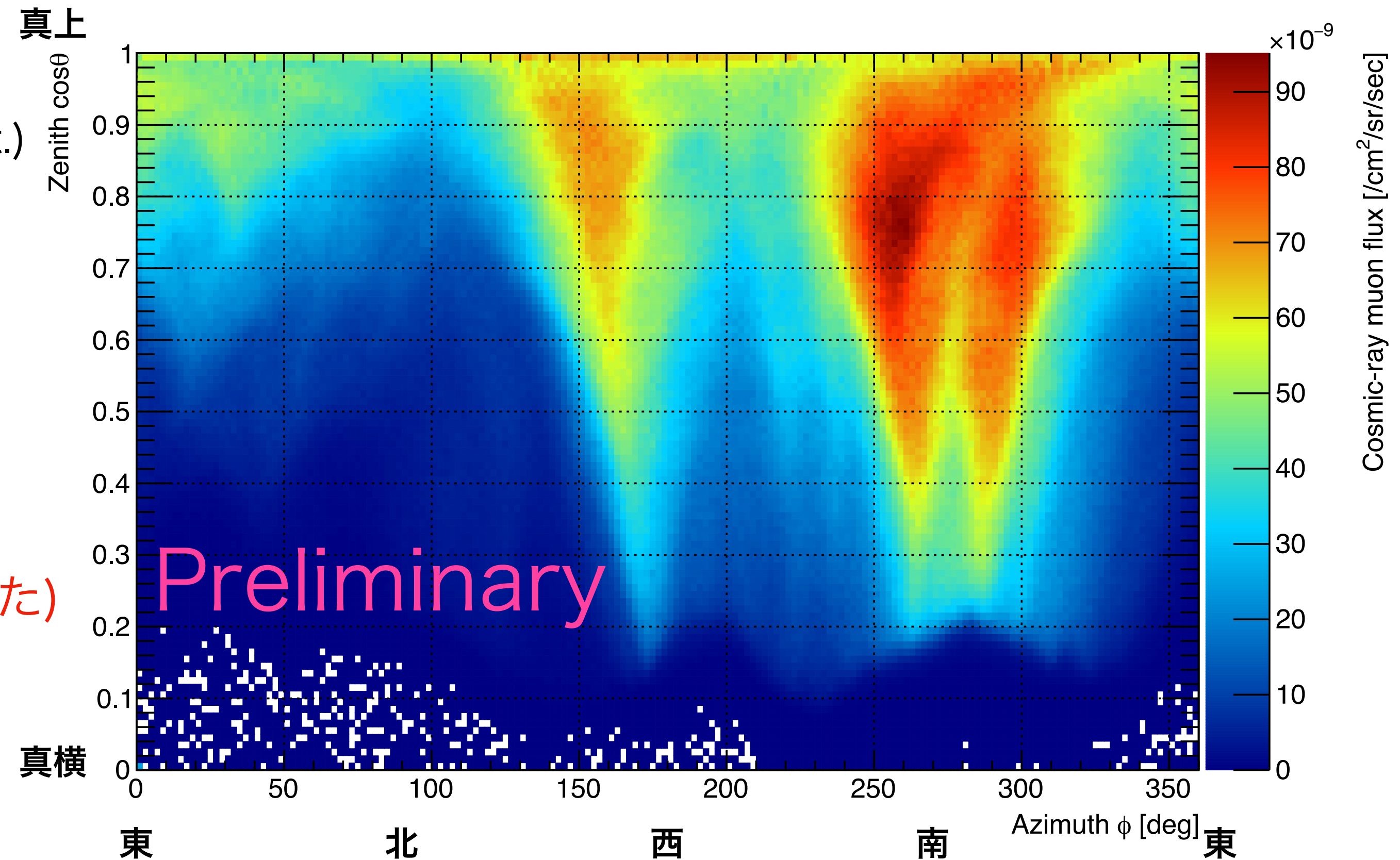
## ● フラックスの角度依存性

- ▶ Zenith  $\cos \theta$  vs Azimuthal  $\phi$
- ▶ SKの周りの山の形を反映  
→ フラックスが大きいところは山が薄い

Muon bundleを考慮した (トラックを全てカウントした)  
Muon fluxの測定を行うことができた

フラックス計算式

$$Flux = \sum_1^N 1/(S(\theta) \times L)$$



# まとめ

## ● Muon bundle

- ▶ 一次宇宙線の化学組成、空気シャワーの強度や内部構造を反映している

地下に到達する**Muon bundle**の多重度および空間距離分布を精密に測定する  
→ 一次宇宙線の化学組成やハドロン相互作用モデルの検証をする

## ● 機械学習ベースの宇宙線ミュオン再構成プログラム

- ▶ Track countingを重視
- ▶ Object detection (Detection Transformer)
- ▶ 現行の再構成プログラムよりも**Track countingが向上**

## ● 多重度分布

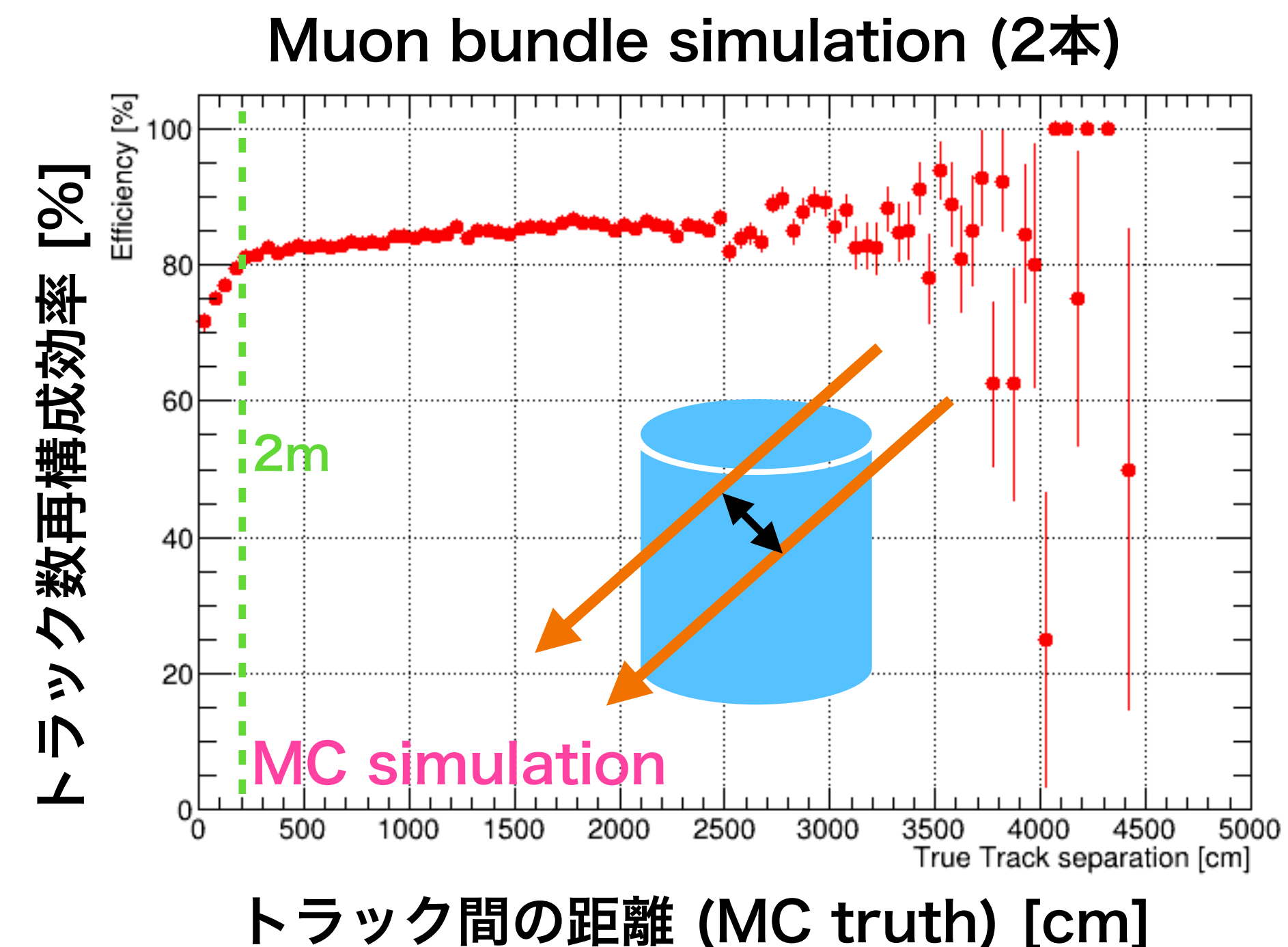
- ▶ 約90%が**Single muon event**として再構成  
- シミュレーションとの比較はこれから

## ● フラックス測定

$$Flux = 1.64 \pm 0.03 \times 10^{-7} \text{ [cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{]} \text{ (stat.+syst.)}$$

## ● 空間距離分布

- ▶ 2m以上の距離ではトラック識別を80%以上で可能



再構成プログラムの開発について論文執筆中

Back up

# Muon bundleの空間距離分布

## ● 空間距離分布の解析

### ▶ トラック識別の距離依存性

- 空間距離が近いとトラックを区別できない可能性
  - シミュレーションを使って調査
  - 機械学習ベースの再構成プログラムは  
数 $m$ の空間距離でもトラックを区別(再構成)可能

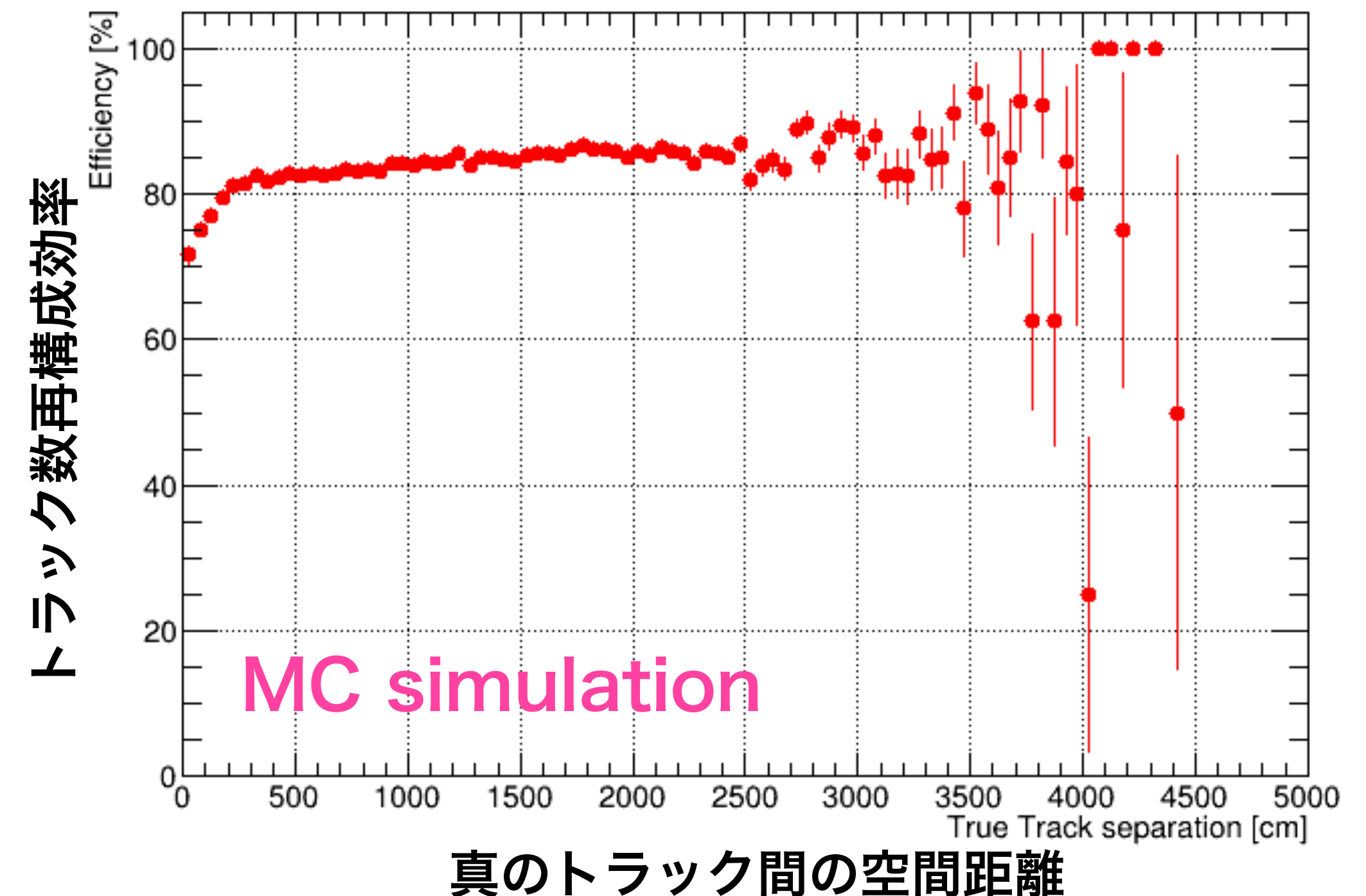
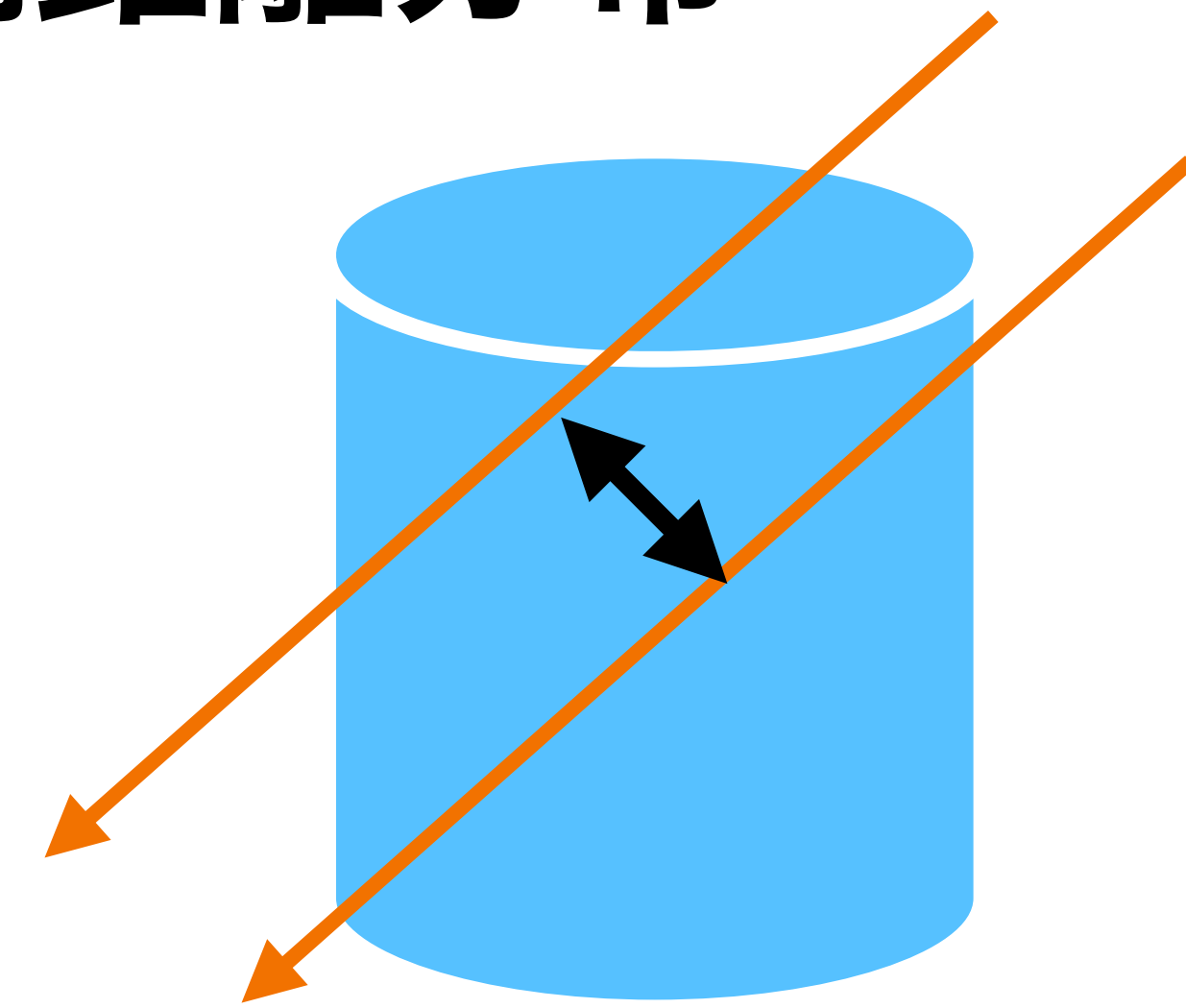
### ▶ Misfitの混入

- 2本、3本、4本、 $\dots$ 、場合分けして作成予定
  - 本数のmisfit事象が混じる
  - シミュレーションを用いてmisfitが入らない  
selectionを決める

空間距離分布は数 $m$ の距離まで見ることができる

本数毎に空間距離の平均などを評価して

ハドロン相互作用モデルなどと比較 → 解析進行中



# 機械学習ベースのミュオン再構成プログラム

## SK検出器でMuon bundleの本数分布や空間距離分布を測定する

- Muon bundle中のトラック数を正確に数えることが必要

現行のSKのミュオン事象再構成プログラム  
→ Single muonの方向や入り口を正確に再構成

- Track countingの精度を向上させた再構成プログラムの開発が必要

機械学習ベースの再構成プログラムの開発

- Object detection (物体検出)

▶ 画像の中から物体を見つけ、対象物体の周囲をBoxとして出力

Our idea : ミュオントラック検出を物体検出の問題として定式化

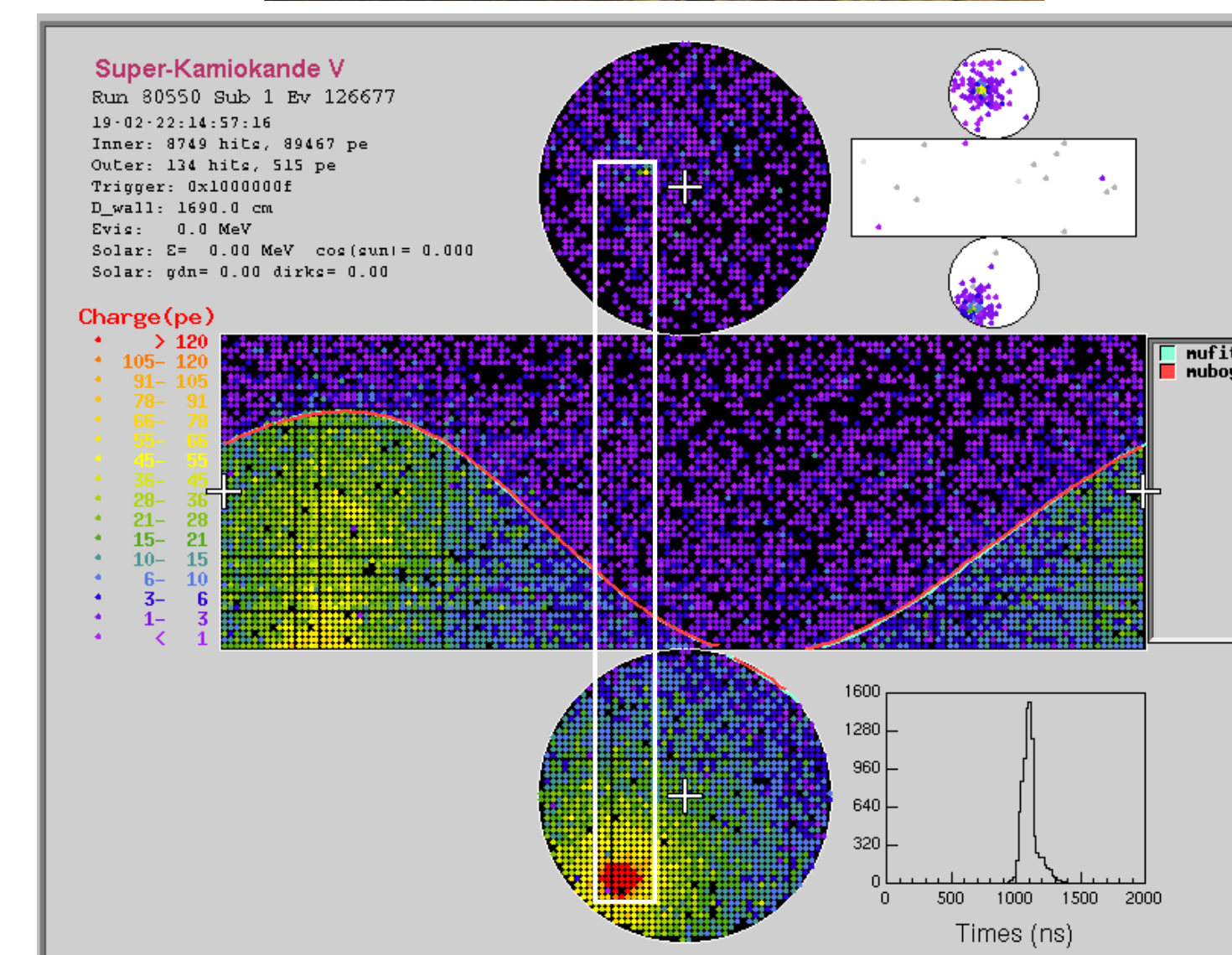
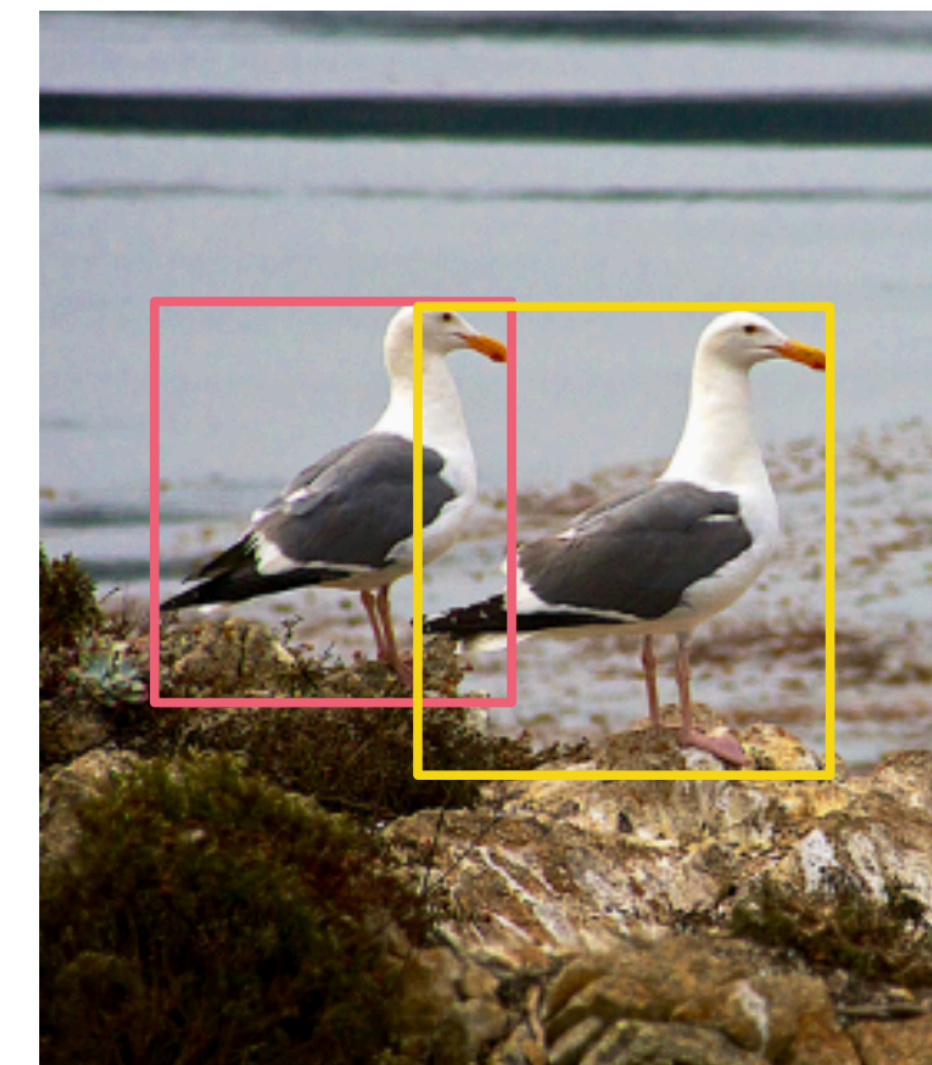
- 機械学習モデル

▶ Detection Transformer (<https://arxiv.org/abs/2005.12872>)

- Training sample → 1本から10本のMuon bundle simulation

- Input → ID PMTのTimingとCharge

- Output → トラック数 / 入射方向 / 入射位置 / 入射時間

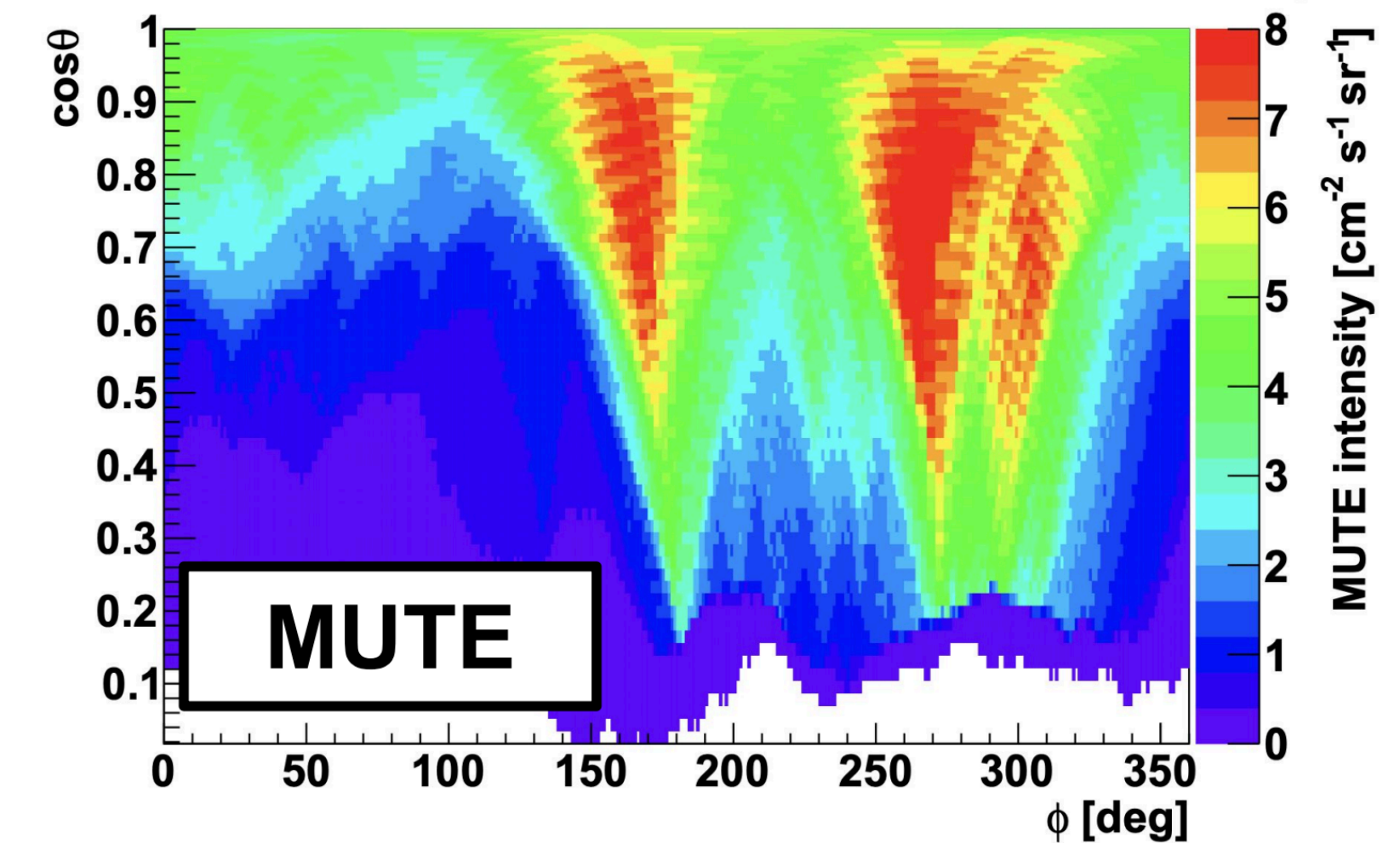
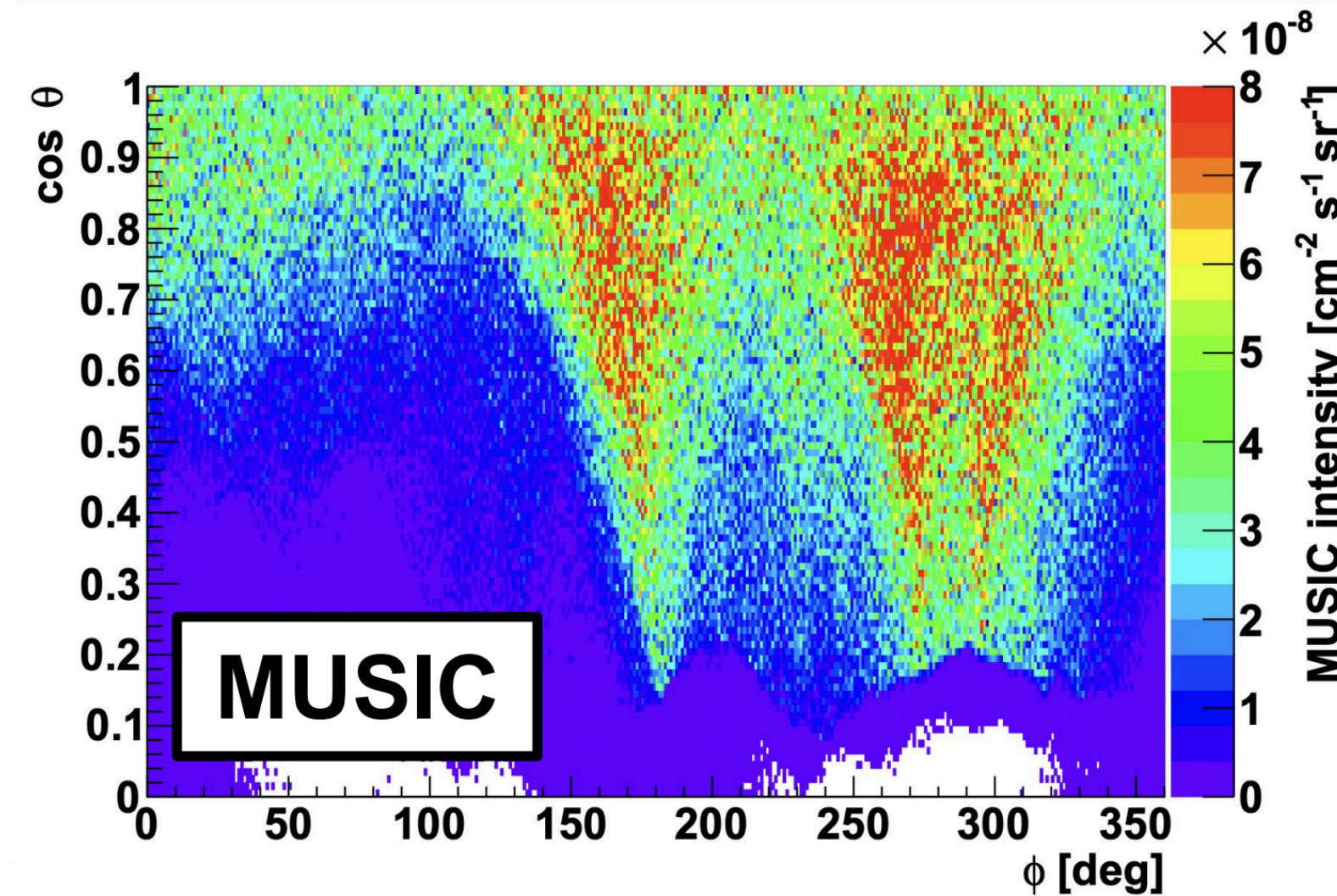
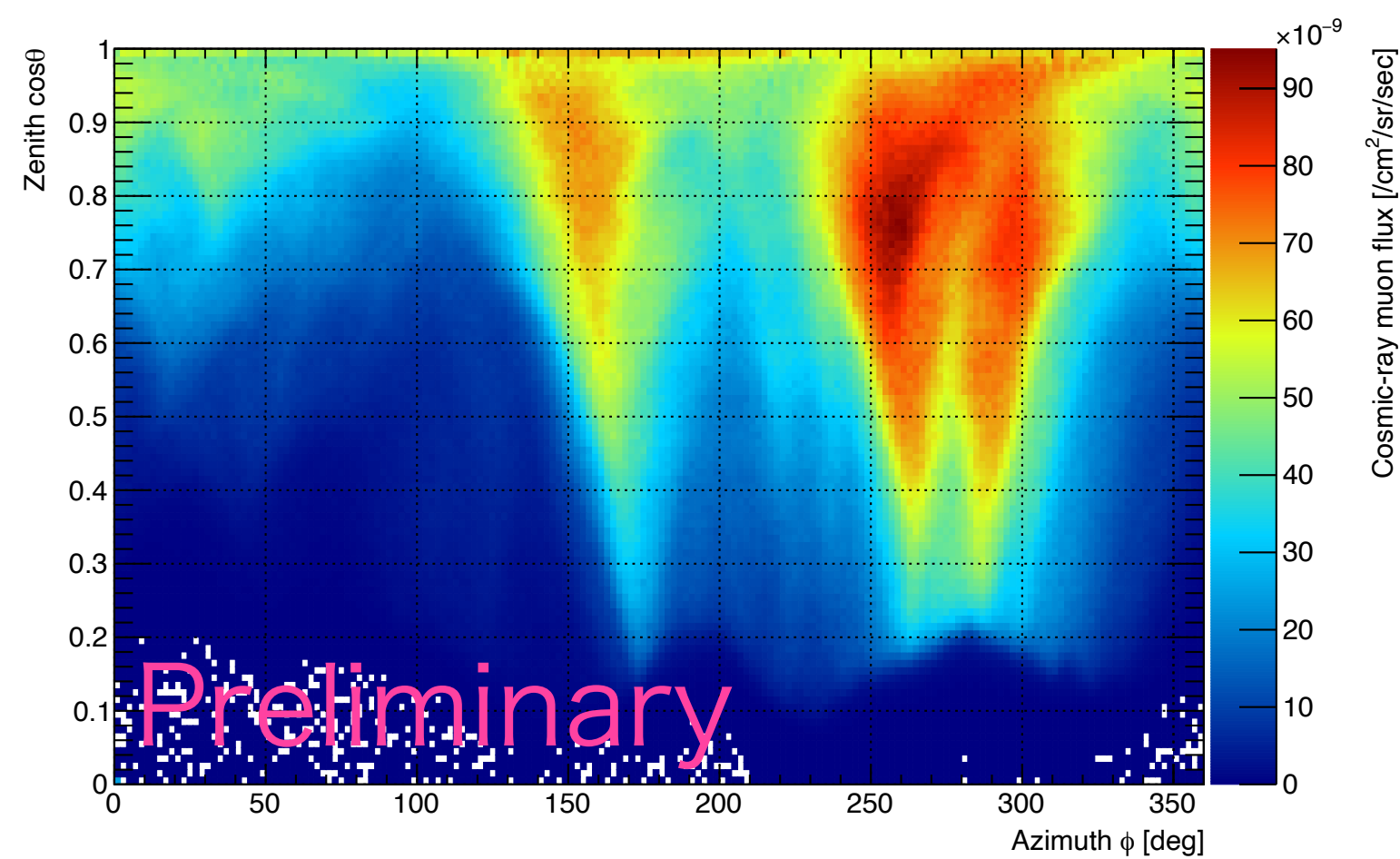


# ミュオンシミュレーションとの比較

## ● Muon propagation simulation

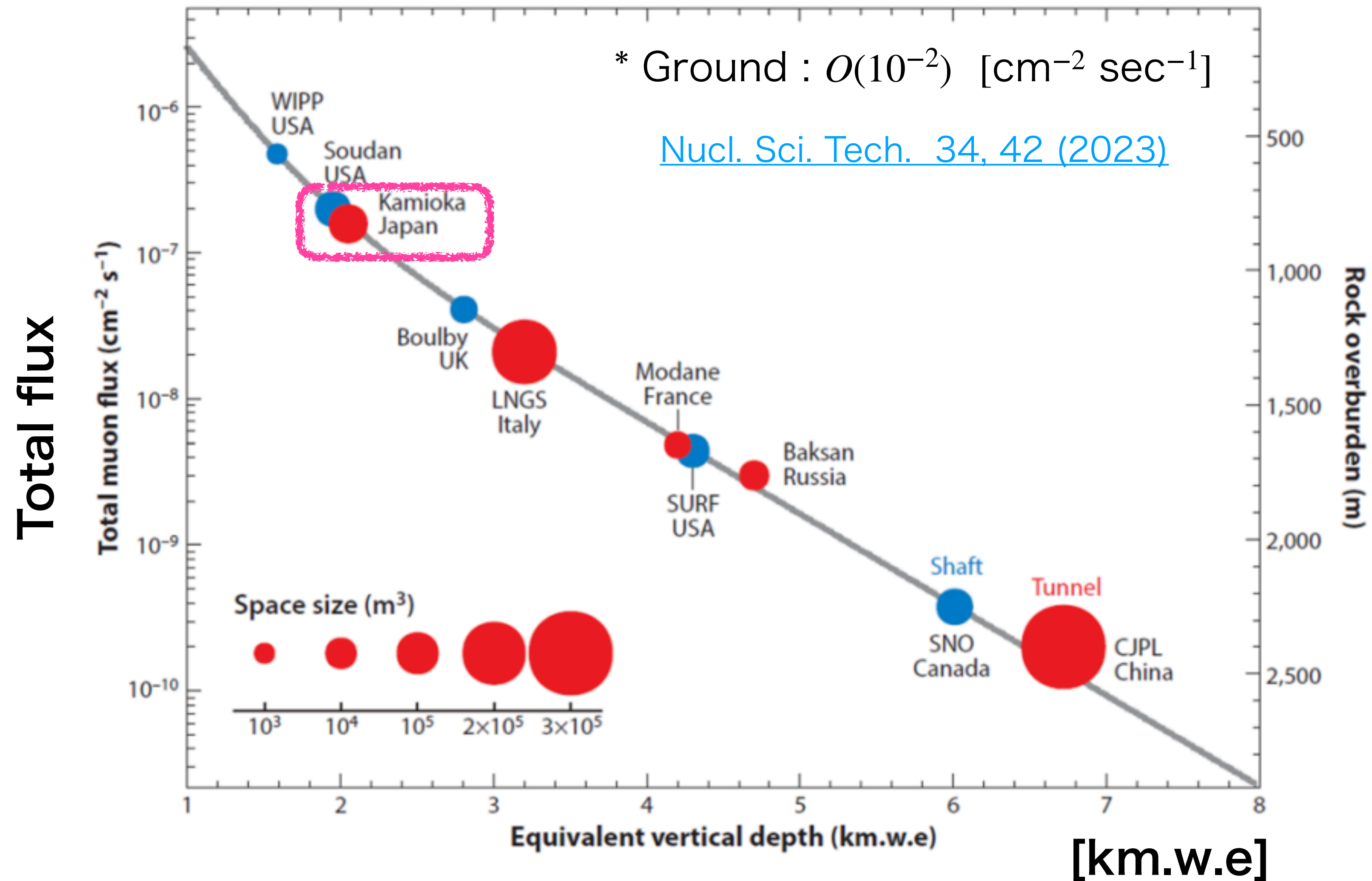
- ▶ MUSIC : 1つのMuonを岩盤中を伝搬させる (モンテカルロ)
- ▶ MUTE : 伝搬確率を計算して地下での生存量を計算

Total flux	Observed data	MUSIC simulation	MUTE simulation
$\times 10^{-7}$ [ $\text{cm}^2/\text{sec}$ ]	$1.64 \pm 0.03$	$1.53 \pm 0.11$	$1.61 \pm 0.11$



フラックスの測定値はシミュレーションと誤差の範囲内で一致している

# 地下環境でのMuon flux



# Muon bundle MCの作成

- Muon event generator

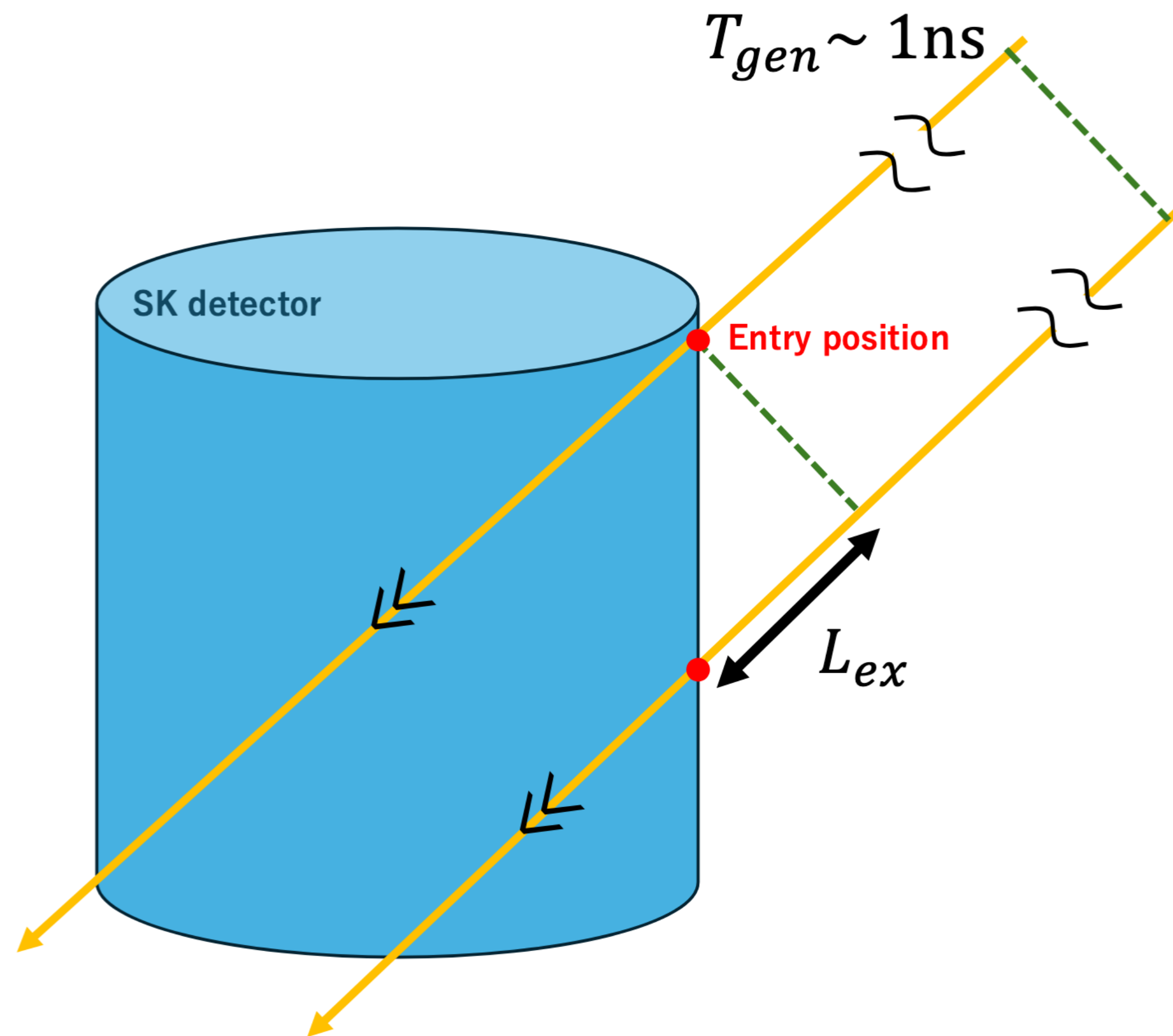
- 各トラックの**Direction**、**Entry position**、**Entry timing**
- ミューオンデータと一致するように構築

- ① 1st muon track

- **Direction**: 現行の再構成プログラムの結果をPDFとして使用
- **Entry position**: Directionと同じ
- **Entry timing**: 任意

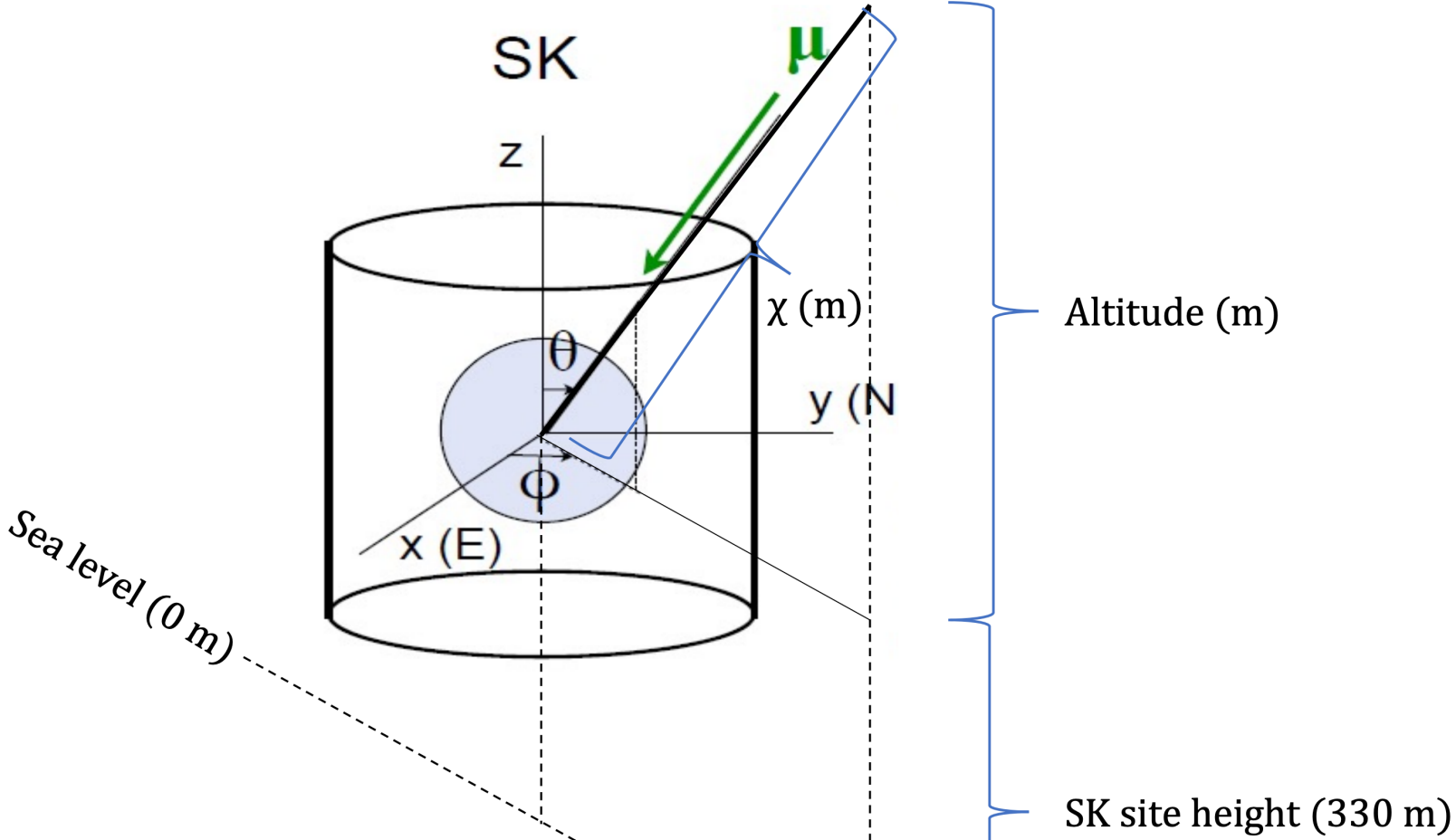
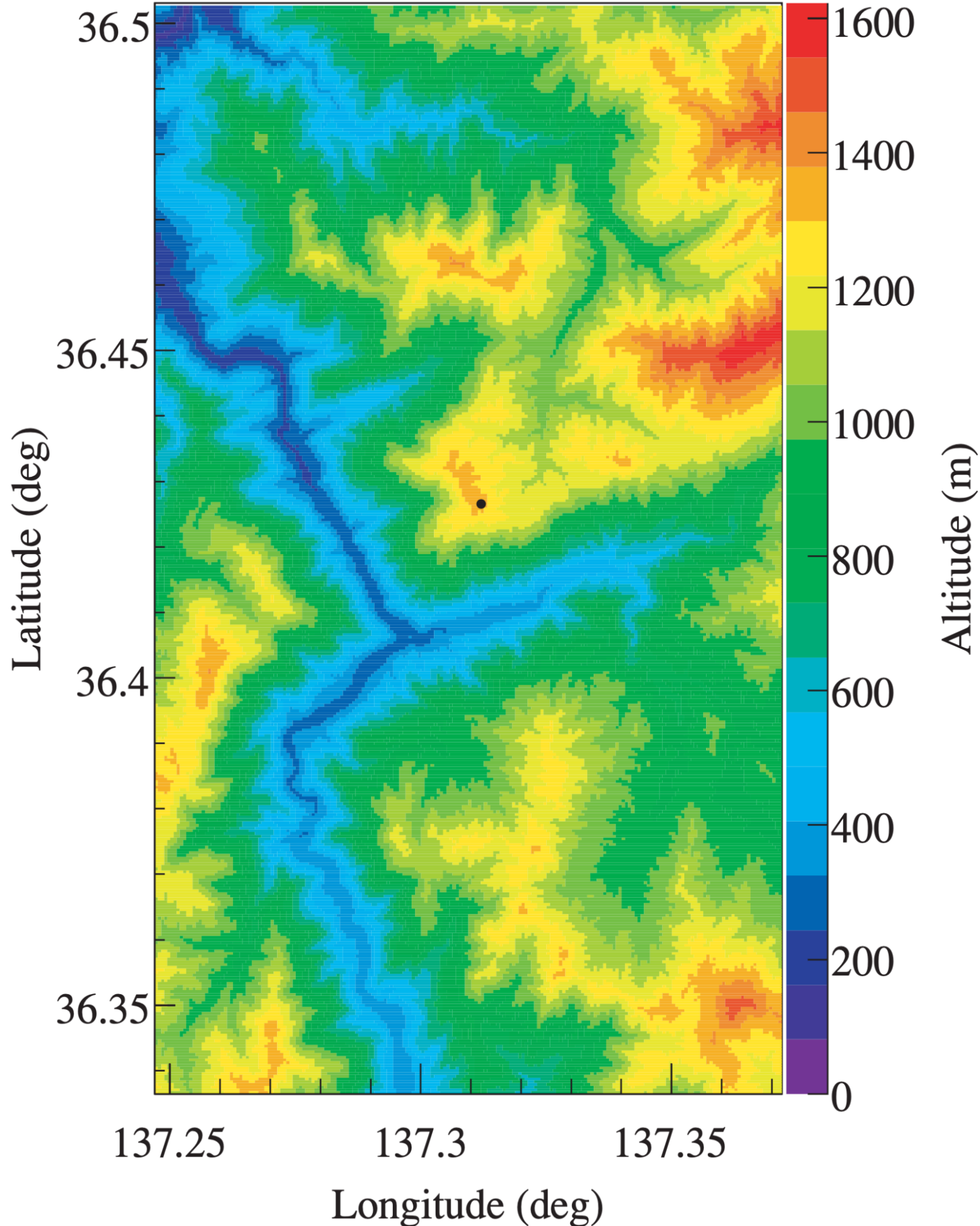
- ② 2nd muon track

- **Direction**: 1st muonと**完全に平行**
- **Entry position**: トラック間の距離 ( $\Delta D$ ) から計算  
外部データから $\Delta D$ を決定
- **Entry timing**: トラック毎のタンクまでの距離差  $L_{ex}$  から計算  
(最後に時間順でソート)

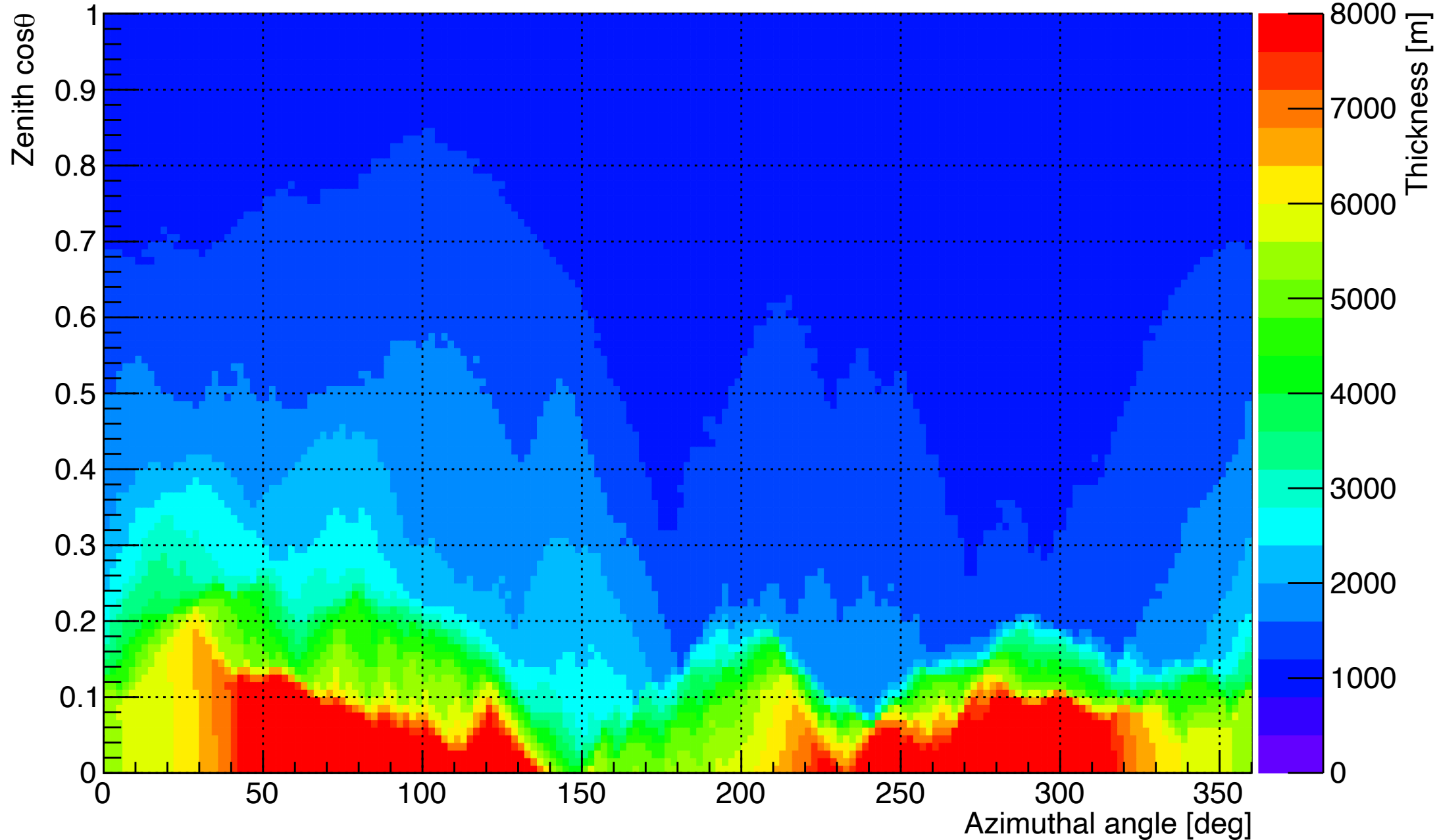


検出器シミュレーションは既存のSKのシミュレーション (今回はGeant3)

# 神岡地下の地形

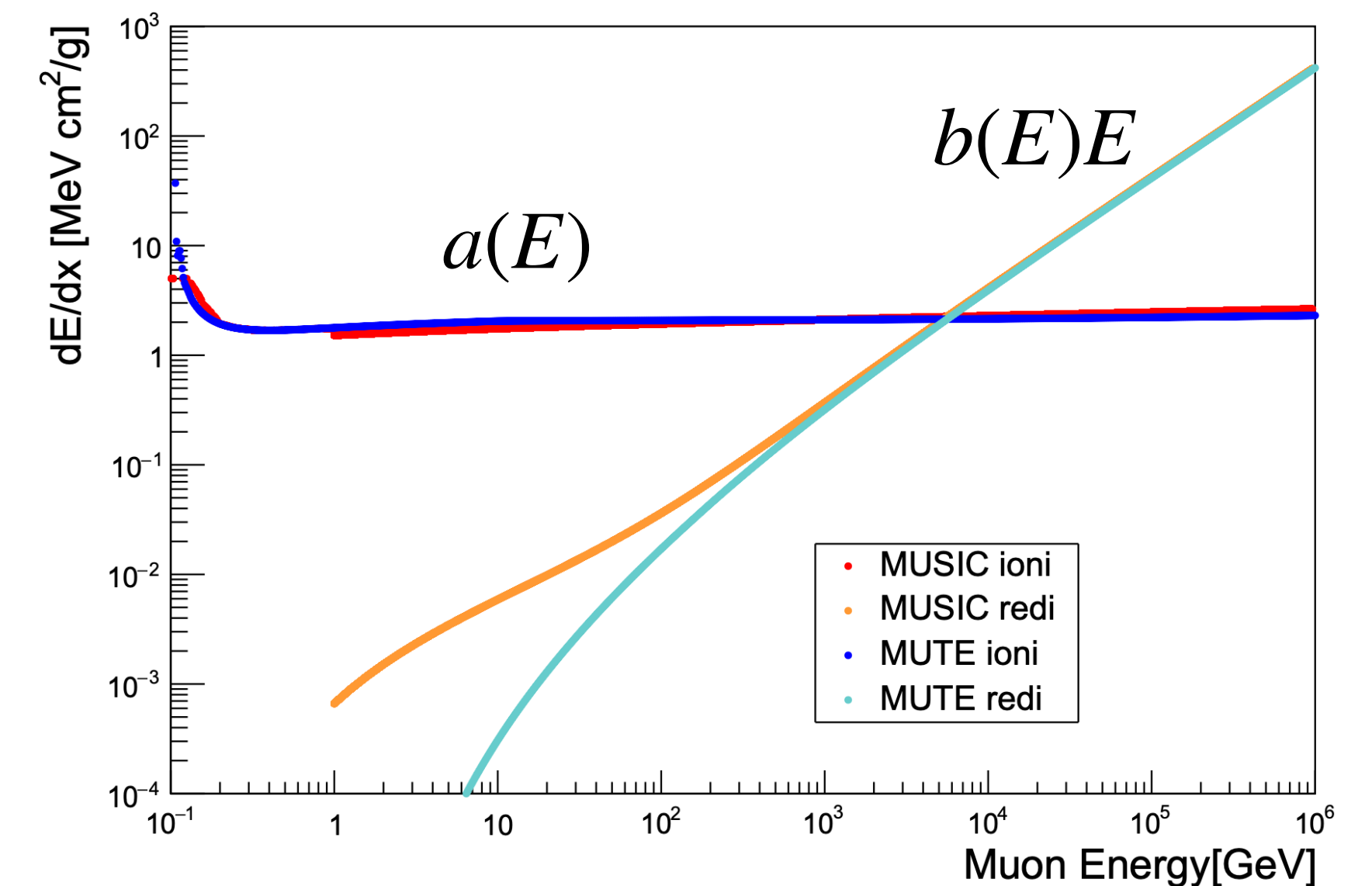
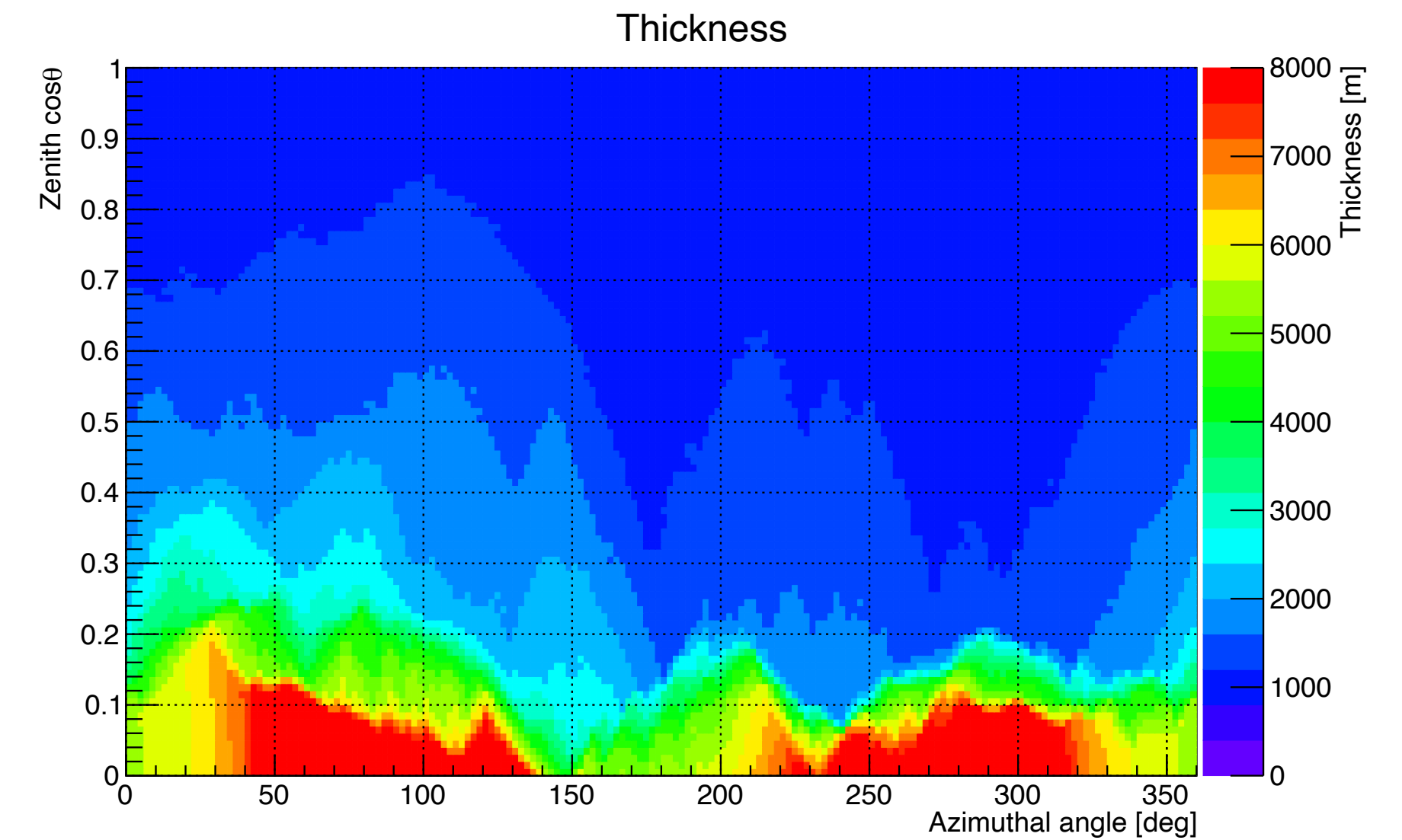


SK中心から  $\theta$   $\phi$  方向を見た時の山の表面までの距離



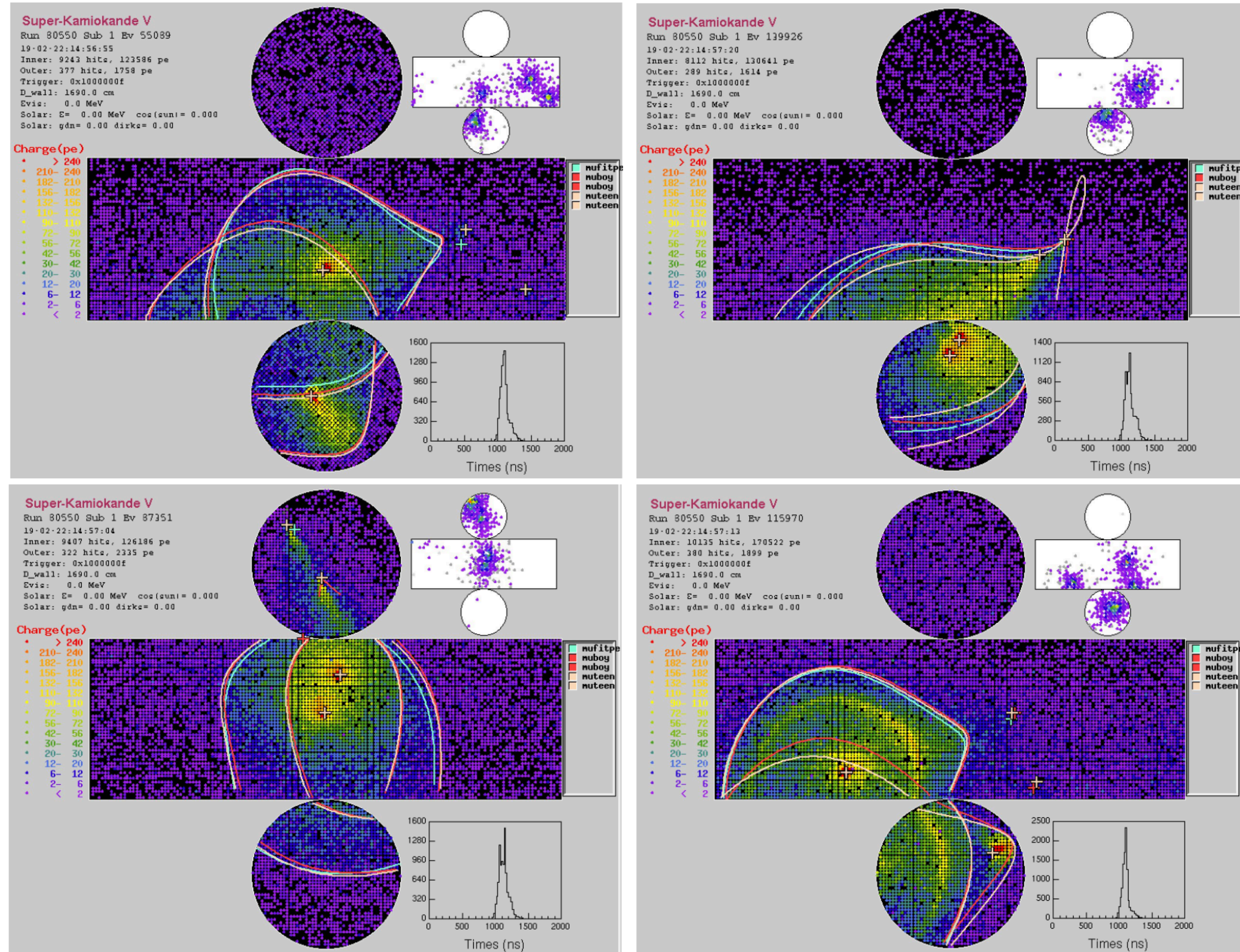
# MUSIC (Muon Simulation Code)

- MUSICの特徴：Muon 1個に対してsimulationを行える
- 初期条件 (乱数で決める)：(SKからみた)  $\cos \theta$  と  $\phi$  とエネルギー
  - $\cos \theta$  と  $\phi$  からSKまでの岩盤の厚さ(距離)を取得
- Muonを少しずつ進めながらエネルギー損失を計算
- $a(E)$ ：電離過程 (ionization) → 連続的なエネルギー損失
  - Bethe-Bloch
- $b(E)E$ ：輻射過程 → 確率的なエネルギー損失
  - 制動放射 (Bremsstrahlung)
    - ミューオンが原子核のクーロン場で曲げられる
  - 電子対生成 (Pair Production)  $\mu + N \rightarrow \mu + e^+e^- + N$
  - 核相互作用 (Photonuclear Interaction)  $\mu + N \rightarrow \mu + X$
- この計算からエネルギーがなくなるか、SKに到達するまでsimulate



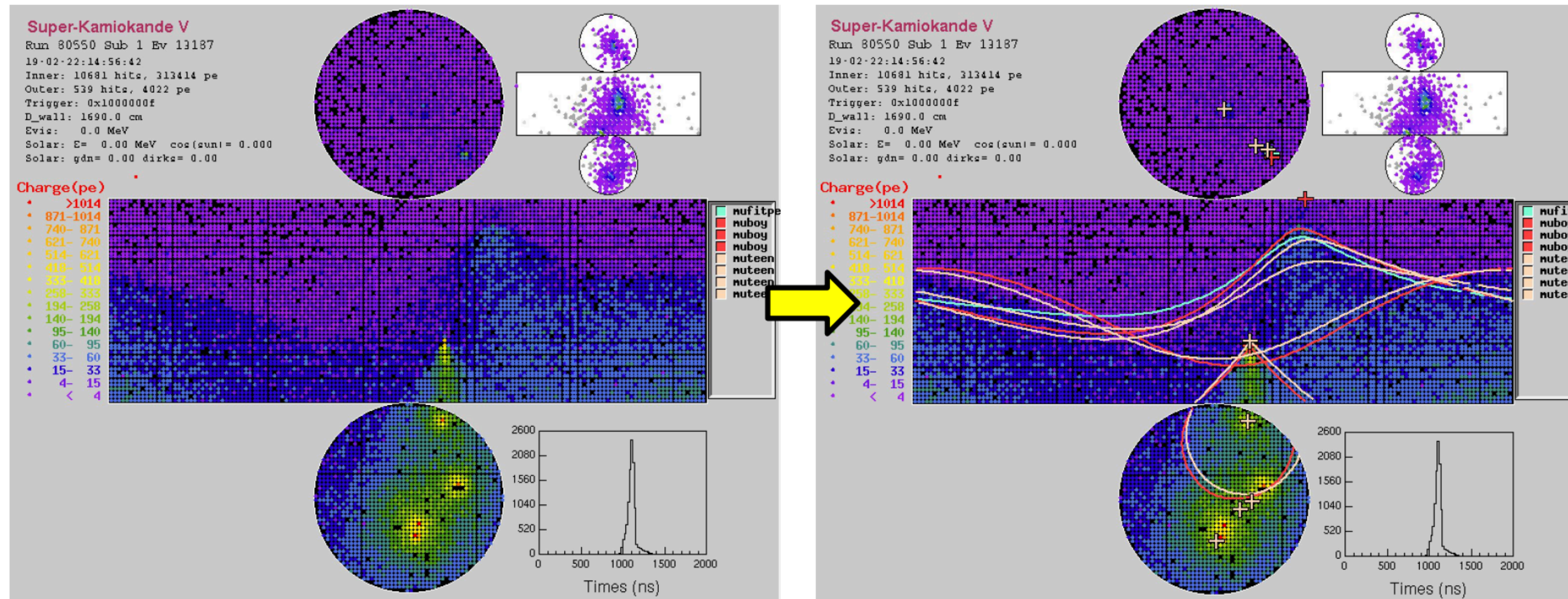
# Example event displays

- Double



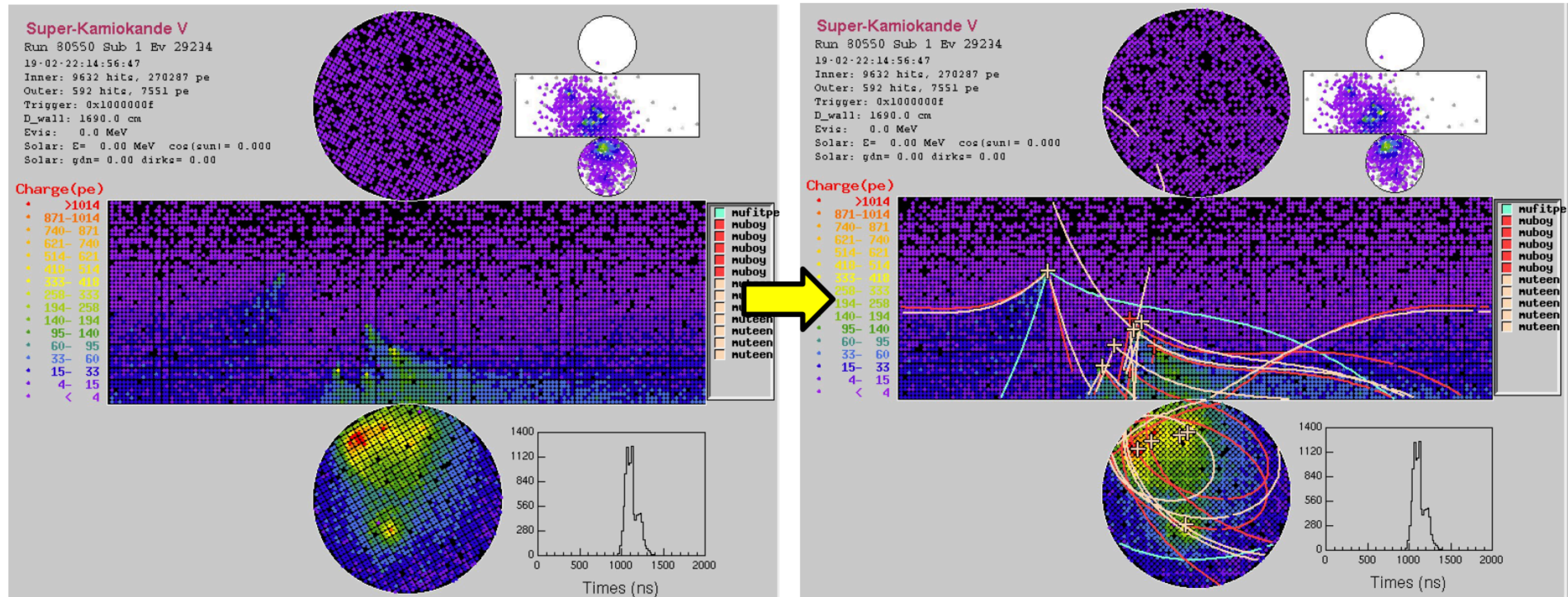
# Example event displays

## 4-track event



# Example event displays

## 5-track event



# Example event displays

## > 5-track event (8?)

