



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^A、中野佑樹^B、大山雄一^C、小汐由介

岡山大理、IPMU^A、富山大理^B、KEK^C、他 Super-Kamiokande collaboration

2026年3月4日

学術変革「地下稀事象」若手研究会 @神戸大学六甲キャンパス

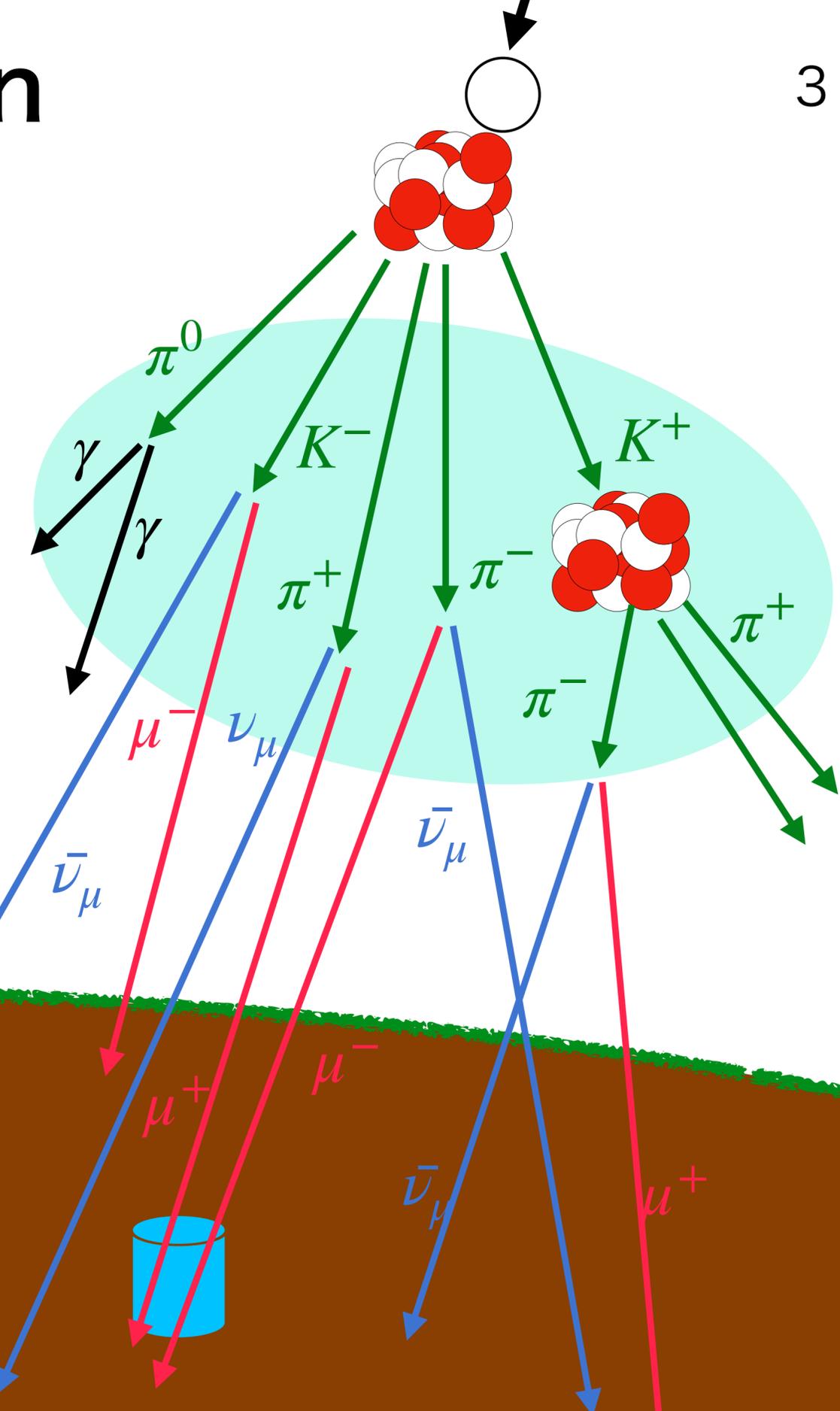
- 研究背景・目的
- スーパーカミオカンデ検出器
- 機械学習ベースの宇宙線ミュオン再構成アルゴリズム
- データ解析
 - フラックス
 - 本数分布
 - 空間分布
- まとめ

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 π 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 [%]
π^\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



地下環境では、低エネルギー成分は岩盤で除去され
 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している

Muon bundle

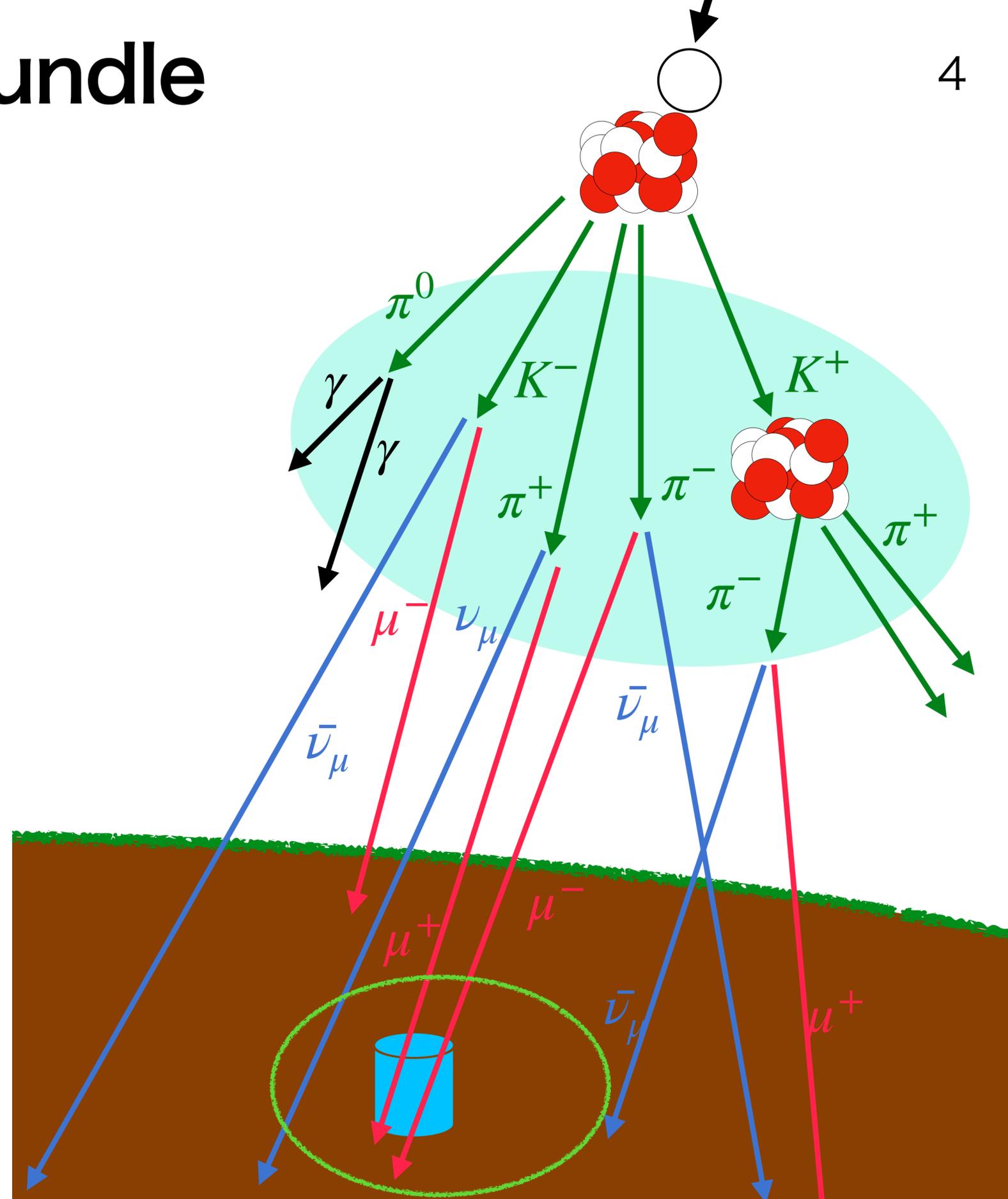
● Muon bundle

- ▶ 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

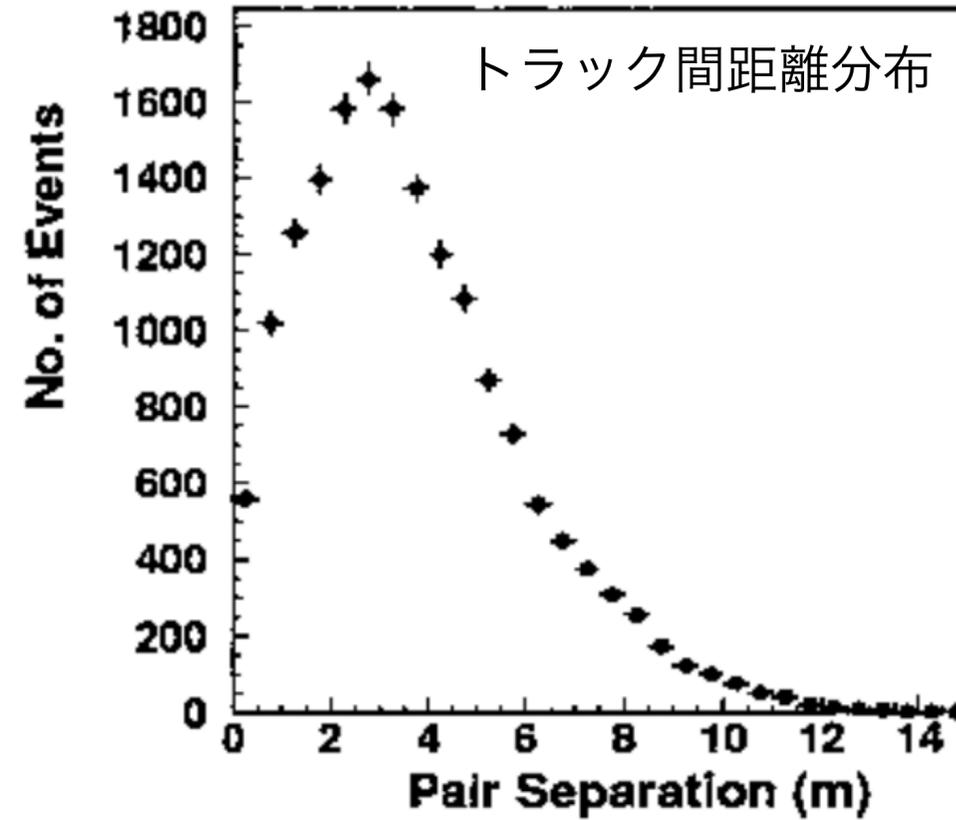
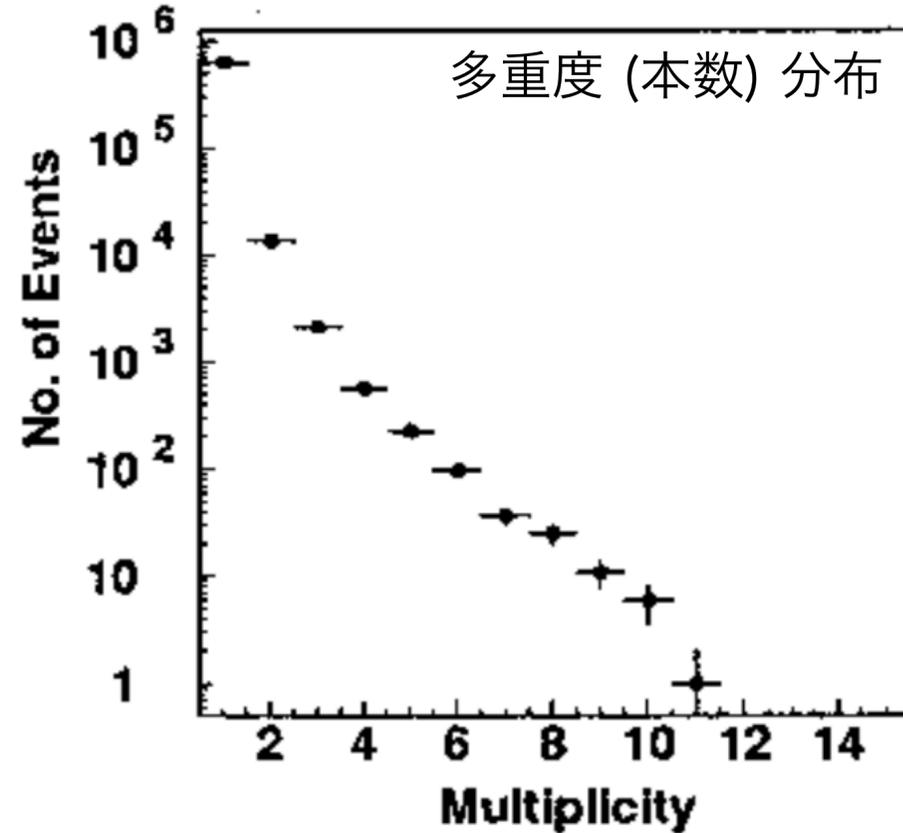
Muon bundleは空気シャワーの強度/内部構造を同時に反映している



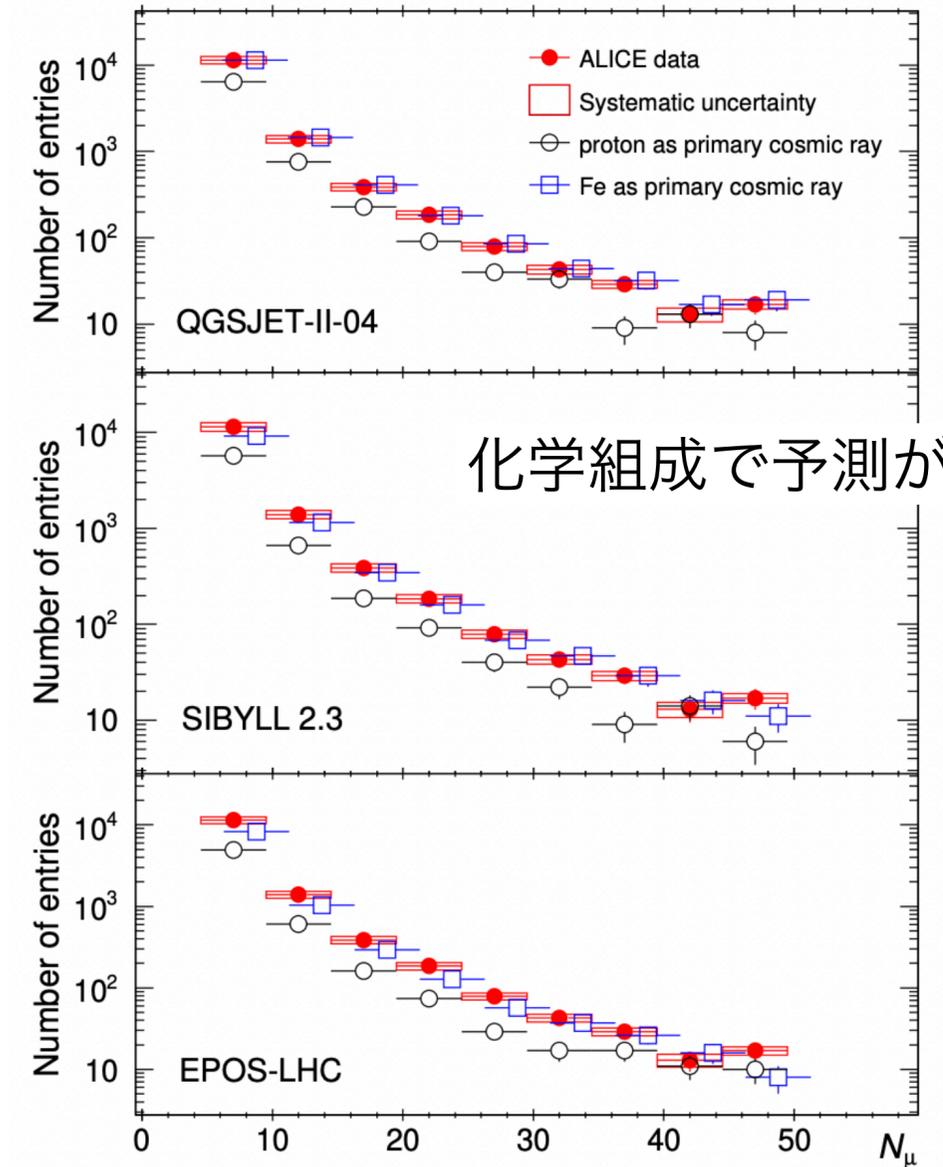
研究目的

● 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



ALICE @CERN データとシミュレーションの比較



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

本発表は解析の現状について報告する

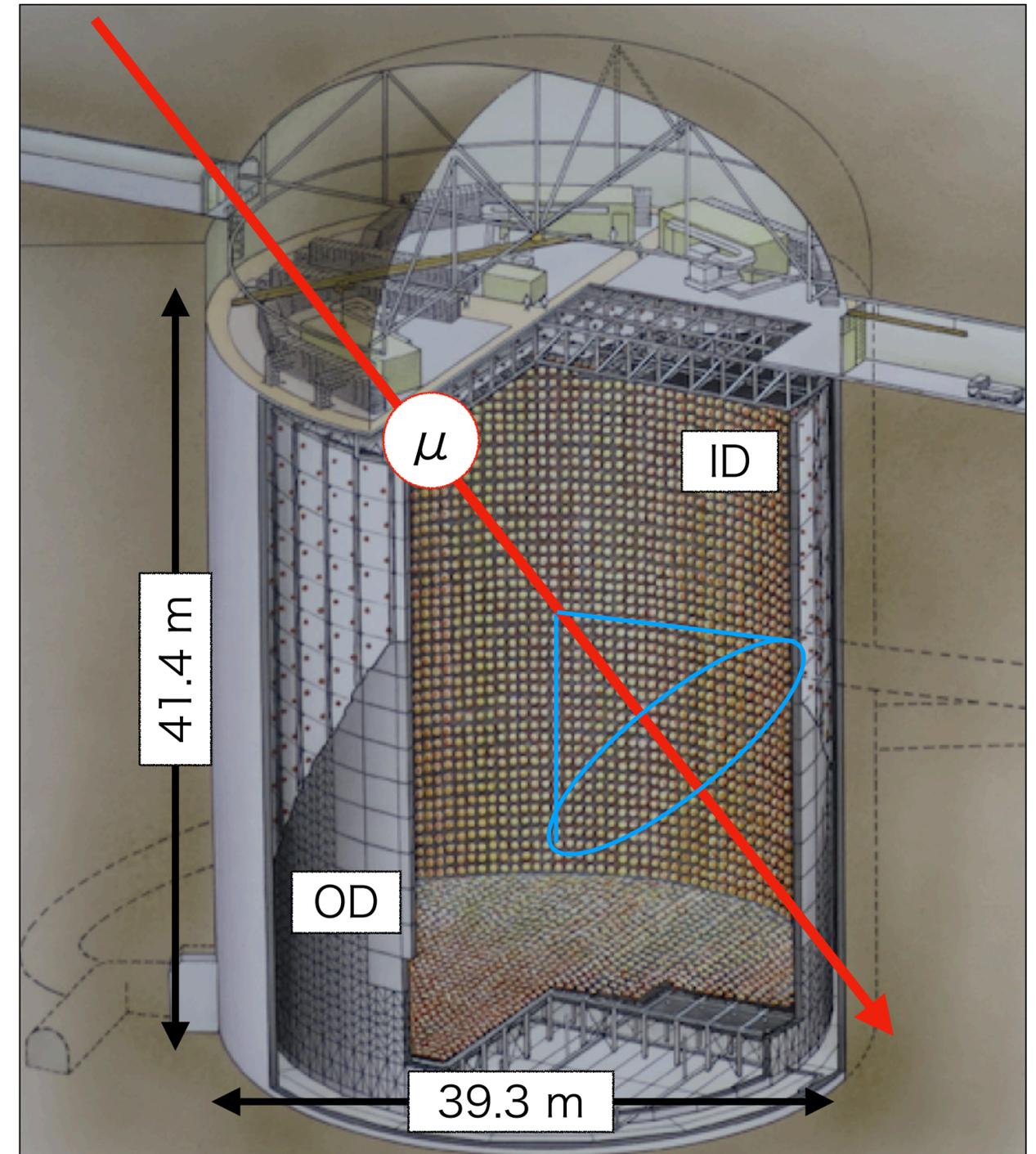
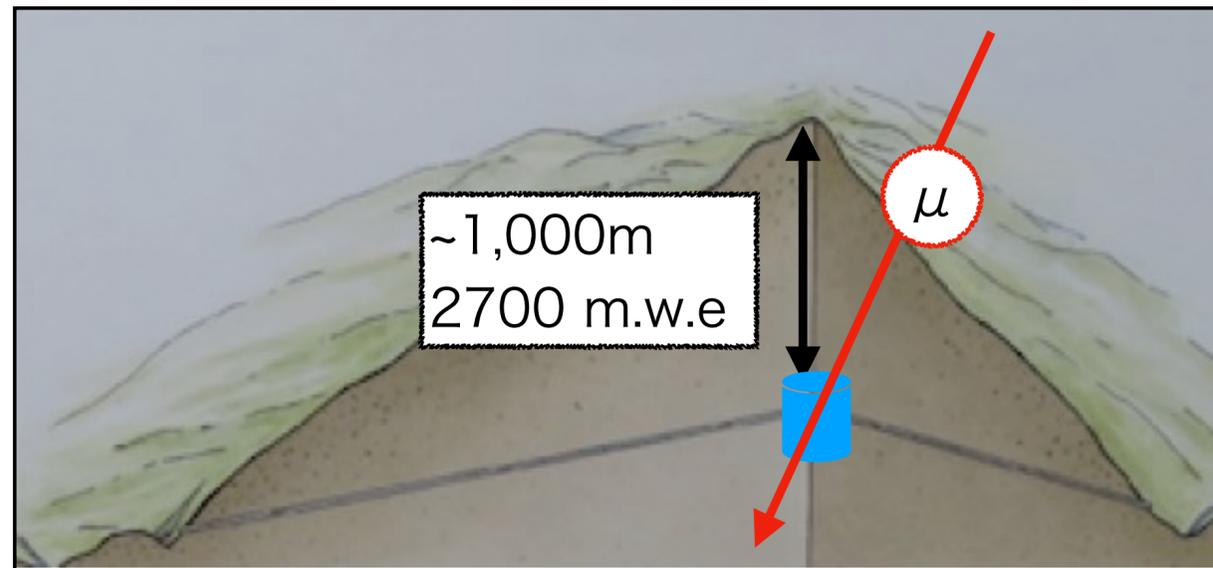
スーパーカミオカンデ検出器

検出器

- 大型水チェレンコフ検出器
- 岐阜県飛騨市神岡町の地下1,000m
- 1996年観測開始
- 約5万トンの超純水

検出原理

- 荷電粒子のチェレンコフ光をPMTで検出
- TimingとChargeでVertex/Direction/Energyを再構成



Muon event in SK

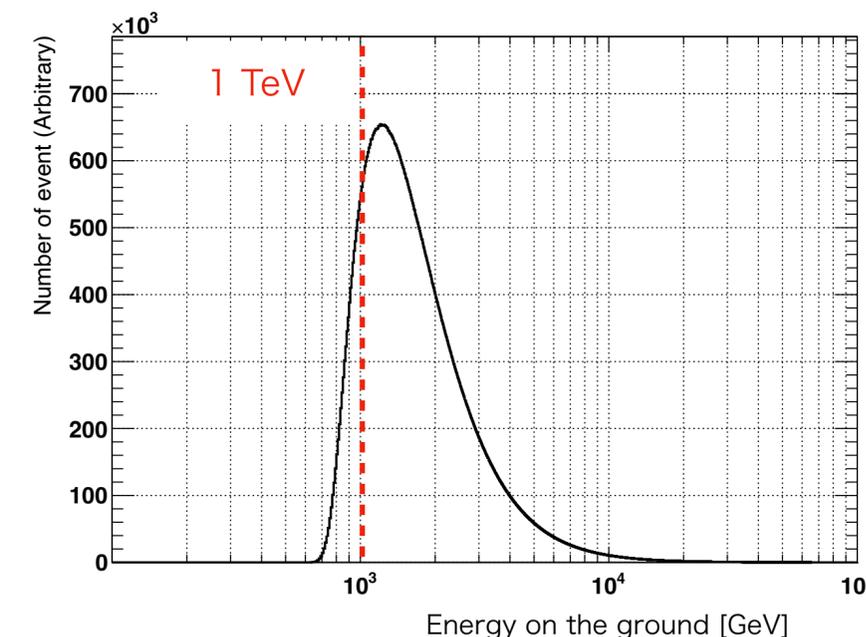
観測頻度

▶ ~ 2Hz (1日 ~18万事象)

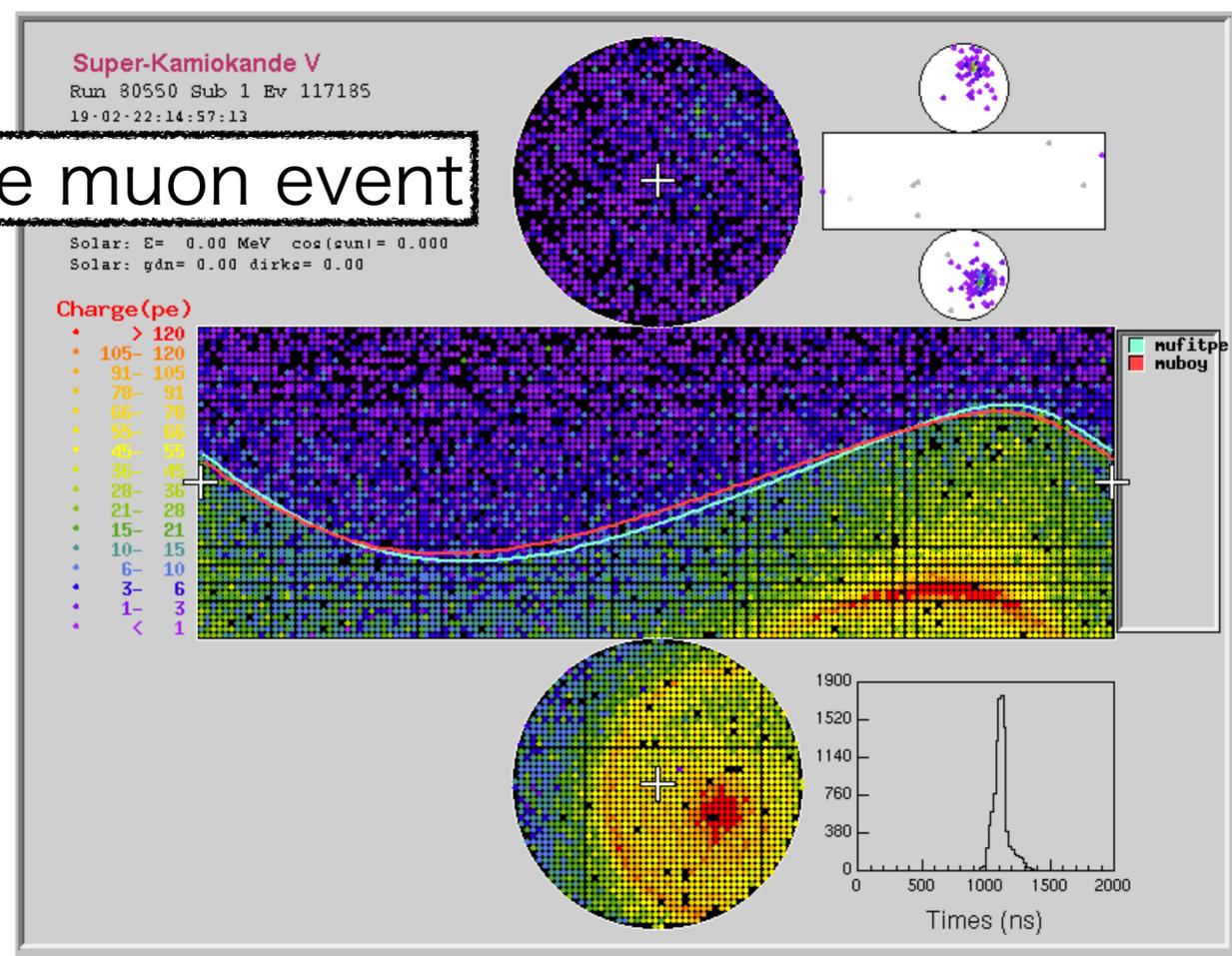
エネルギー

▶ SKに到達するMuonが地上で持っていたエネルギー (MUSIC)

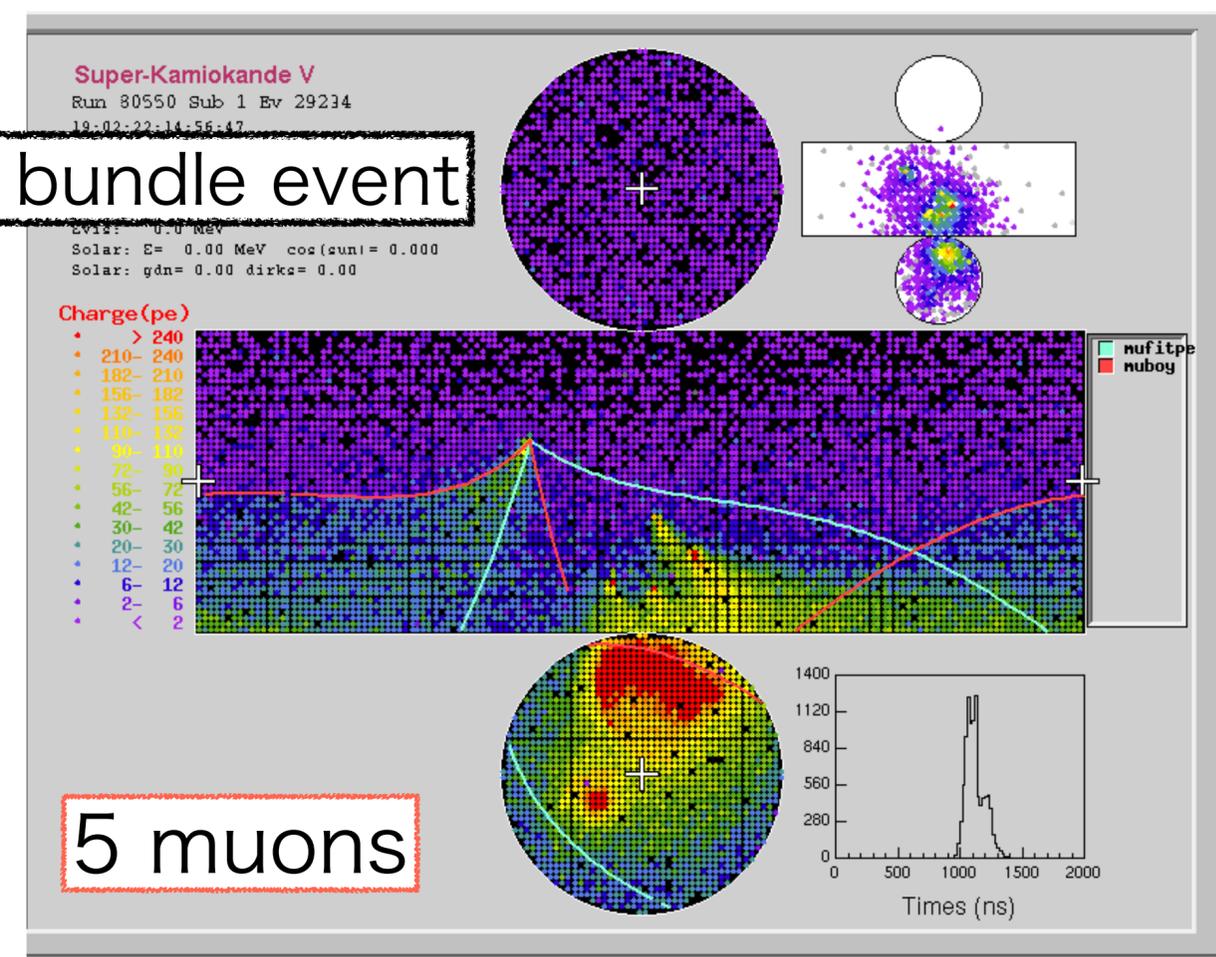
→ ~800GeV以上のMuonが到達



Single muon event



Muon bundle event



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の宇宙線ミューオンの再構成プログラム
→ Single muonの方向や入り口を正確に再構成
→ Track countingは得意ではない

- **Track countingの精度を向上させた**ミューオン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

- トレーニングや性能評価用のMuon bundle simulationの構築

- ① Muon bundle simulationの構築
- ② 機械学習ベースの再構成プログラムの開発 + 性能評価
- ③ データ解析

機械学習ベースの再構成プログラムの概要

- **Object detection** (物体検出)

- ▶ Computer visionで最も研究されている問題の1つ
- ▶ 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**

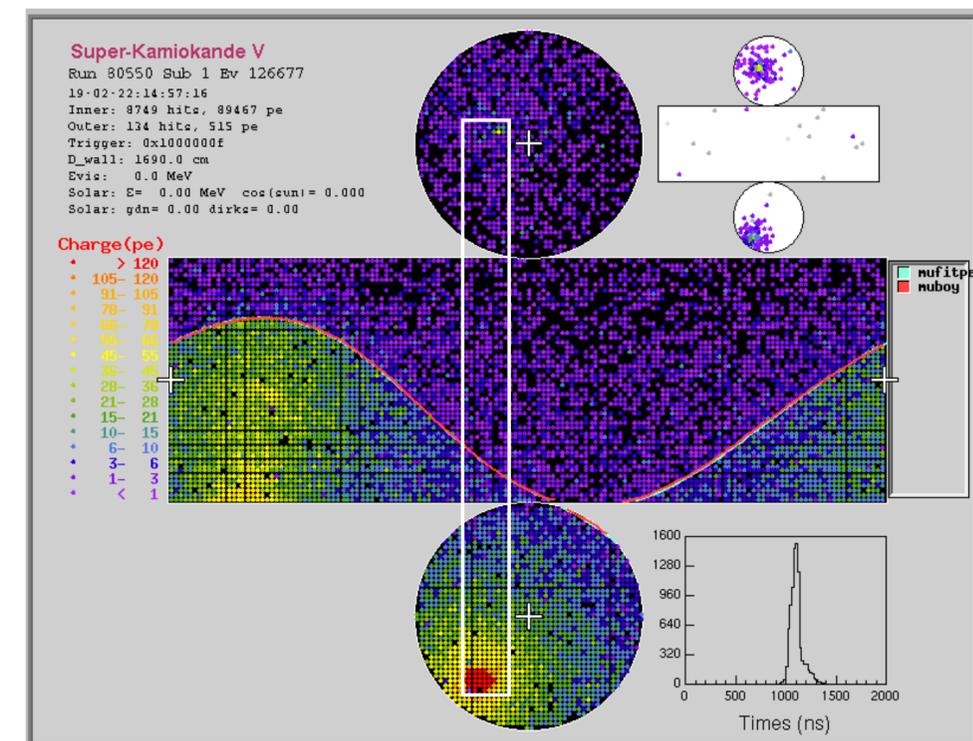
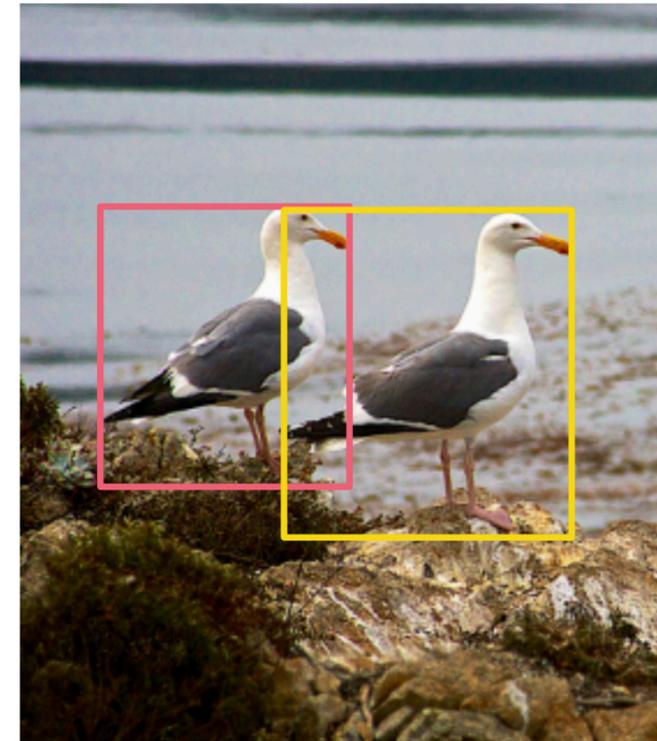
- ▶ 1本から10本の**Muon bundle**事象のSimulation

- **Input information**

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

- **Output information**

- ▶ **トラック数**、それぞれの**入射方向/入射位置/入射時間**



● Track counting の性能比較

▶ 1本から10本のMuon bundle事象のSimulation

▶ Confusion matrix [%]

→ 対角項が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

[%]		Reconstruction									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	>10
TRUE	1	98.82	0.11	0.03	0.06	0.02	0.02	0.01	0	0.01	0.03
	2	29.75	65.61	2.09	1.11	0.47	0.23	0.15	0.11	0.05	0.07
	3	9.33	24.95	59.61	2.98	1.29	0.72	0.37	0.22	0.17	0.18
	4	3.82	8.48	35.86	45.90	2.61	1.31	0.75	0.39	0.33	0.45
	5	1.612	2.82	17.68	40.69	31.46	2.52	1.30	0.71	0.42	0.72
	6	1.00	1.53	8.09	25.82	37.09	20.70	2.26	1.45	0.73	1.26
	7	0.69	0.94	4.29	15.08	30.43	30.35	12.80	2.29	1.18	1.88
	8	0.53	0.50	2.25	8.84	21.35	29.91	23.12	8.43	1.86	3.18
	9	0.39	0.42	1.51	5.08	15.24	24.28	26.23	16.40	5.93	4.51
	10	0.26	0.34	0.88	3.23	10.18	19.68	25.62	21.14	10.84	7.78

機械学習ベースの再構成プログラム

[%]		Reconstruction									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	>10
TRUE	1	96.91	2.91	0.13	0.04	0.01	0	0	0	0	0
	2	7.11	84.46	7.81	0.36	0.13	0.05	0.04	0.03	0.01	0.01
	3	0.39	11.39	71.11	15.31	1.30	0.31	0.12	0.03	0.02	0.04
	4	0.03	0.86	13.61	60.20	22.05	2.50	0.50	0.18	0.07	0.02
	5	0.01	0.09	1.76	15.05	51.69	25.96	4.02	1.13	0.21	0.08
	6	0	0.01	0.30	2.24	15.74	45.28	27.49	6.97	1.64	0.33
	7	0	0	0.03	0.40	3.10	16.84	39.59	30.05	8.42	1.57
	8	0	0	0	0.12	0.55	4.35	17.32	40.12	29.31	8.23
	9	0	0	0	0.03	0.16	0.93	5.00	22.66	41.08	30.15
	10	0	0	0	0.03	0.07	0.27	1.34	8.82	30.88	58.59

Track counting が現行よりも向上した再構成プログラムが開発できた

その他の再構成精度も同じレベルを保っている (角度分解能 → 神戸大 曽根 ポスター)

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: $S(\theta)$ [cm^2]
- ▶ Livetime: L [sec]

$$Flux = 1.64 \pm 0.03 \times 10^{-7} \text{ (stat+syst.)}$$

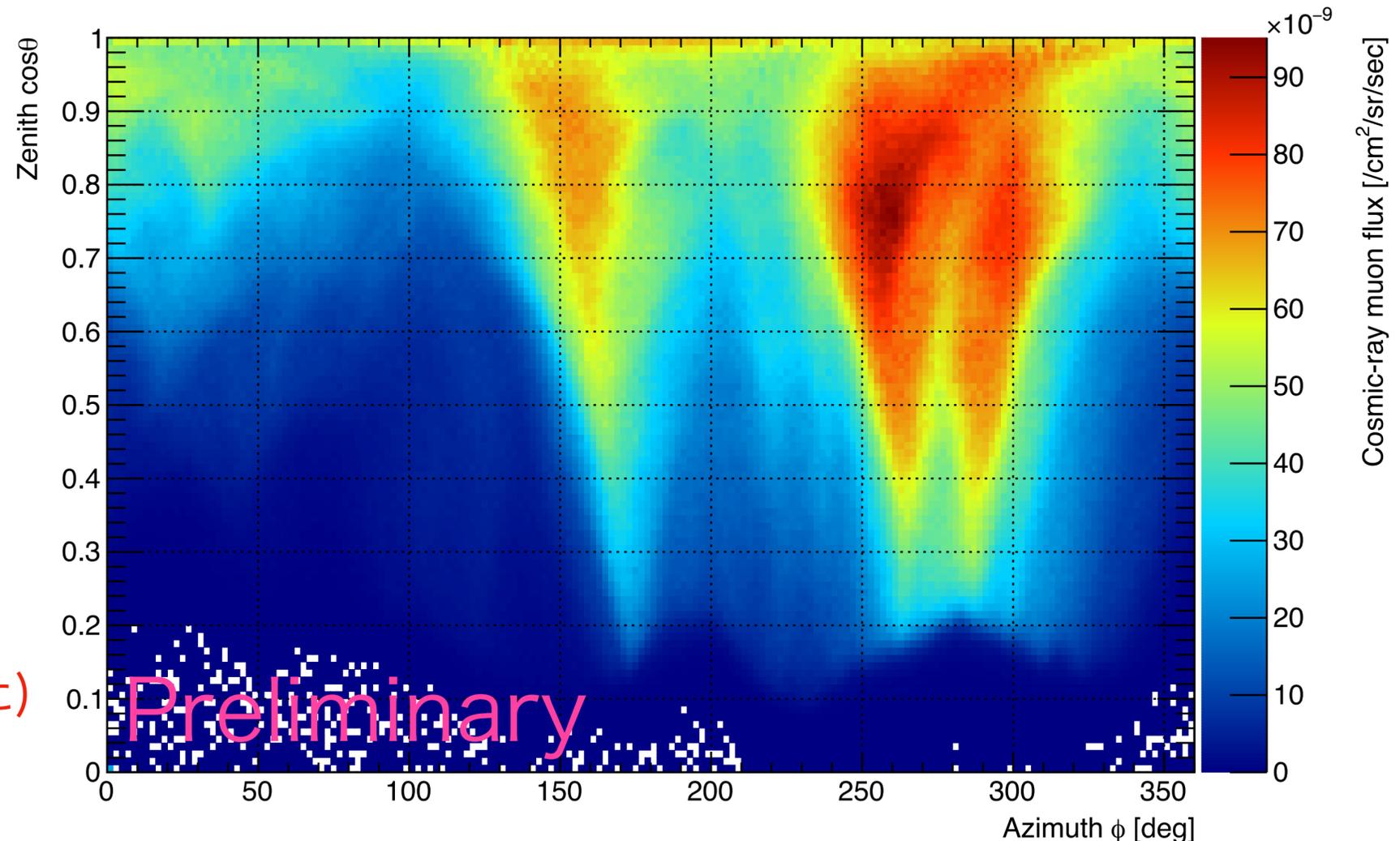
● フラックスの角度依存性

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

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

$$Flux = \sum_{1}^N 1/(S(\theta) \times L)$$

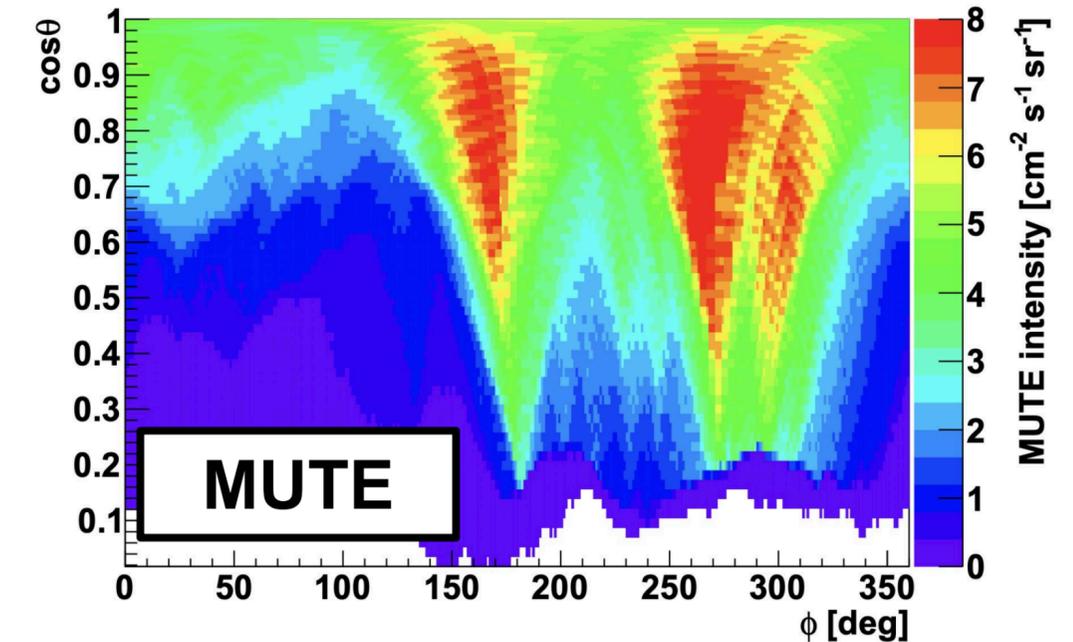
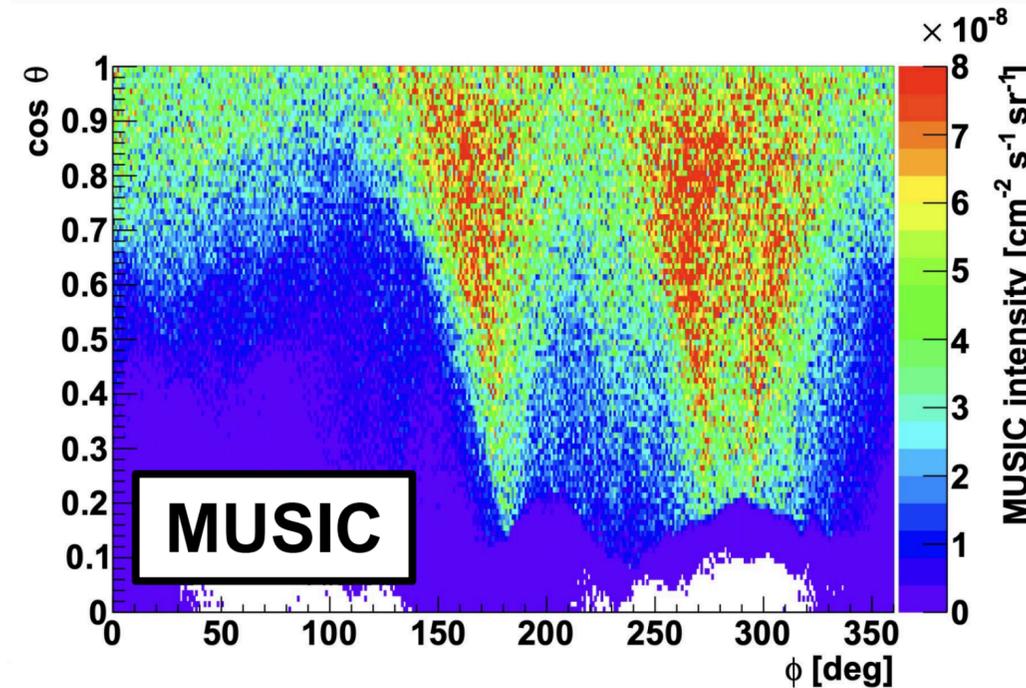
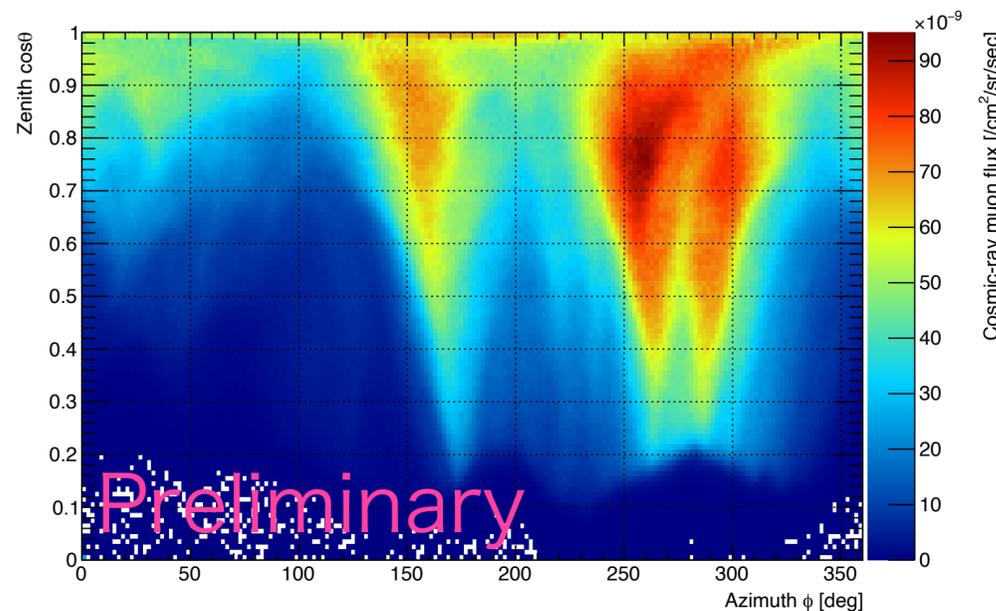


ミュオンシミュレーションとの比較

● Muon propagation simulation

- ▶ MUSIC : 1つ1つのMuonを乱数使って計算して伝搬 (Old simulation)
- ▶ MUTE : 伝搬確率を計算 (New simulation)

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

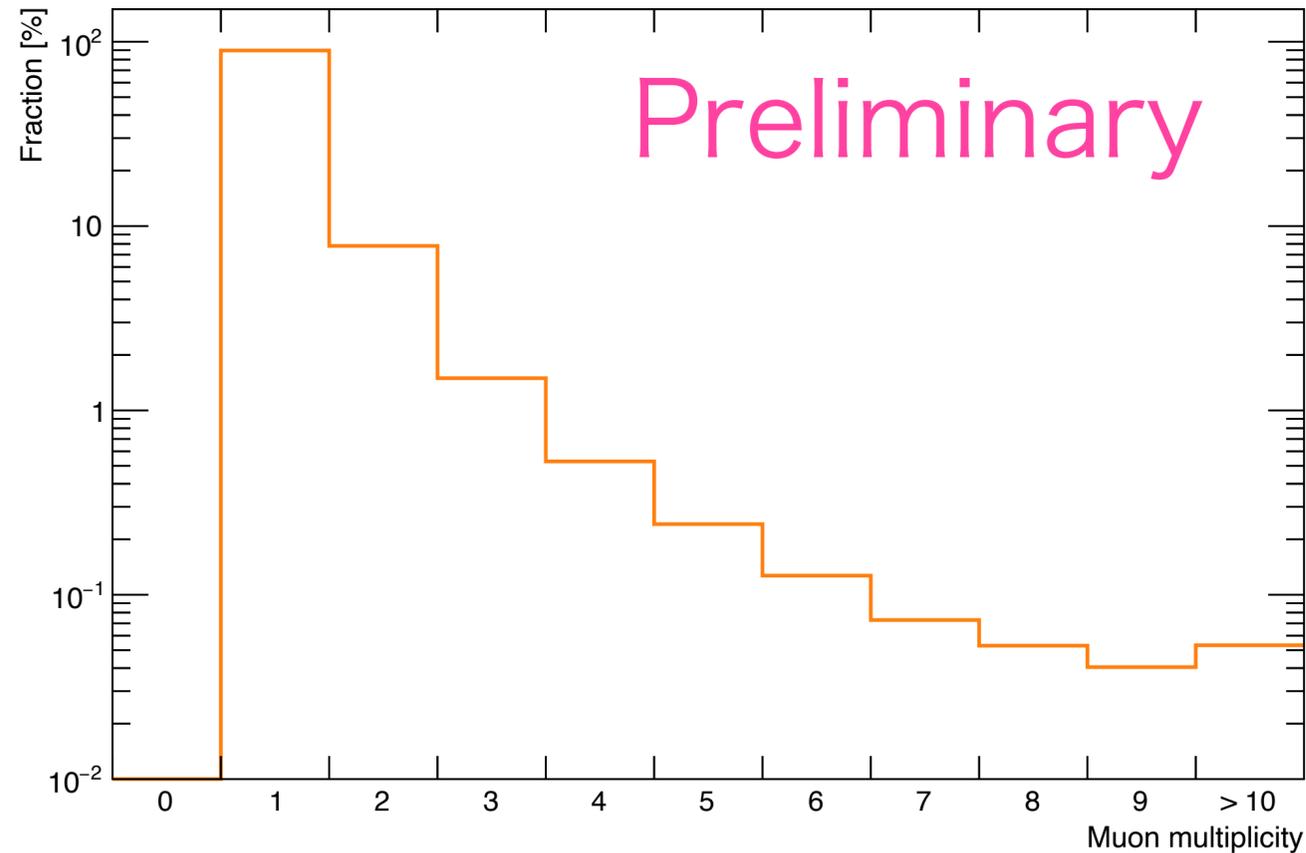


フラックスの測定値はシミュレーションと誤差の範囲内で一致している

Muon bundleの多重度分布

● 再構成でカテゴリーされた多重度

- ▶ SKでは約90%の割合で
Single muonが観測



Category	1	2	3	4	5	6	7	8	9	> 10
Fraction [%]	89.677	7.719	1.499	0.526	0.241	0.125	0.0712	0.0513	0.0393	0.0511

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
シミュレーションで作成したConfusion matrixを使ってUnfoldingする → 解析進行中

Muon bundleの空間距離分布

● 空間距離分布の解析

▶ トラック識別

- 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検証
 - 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

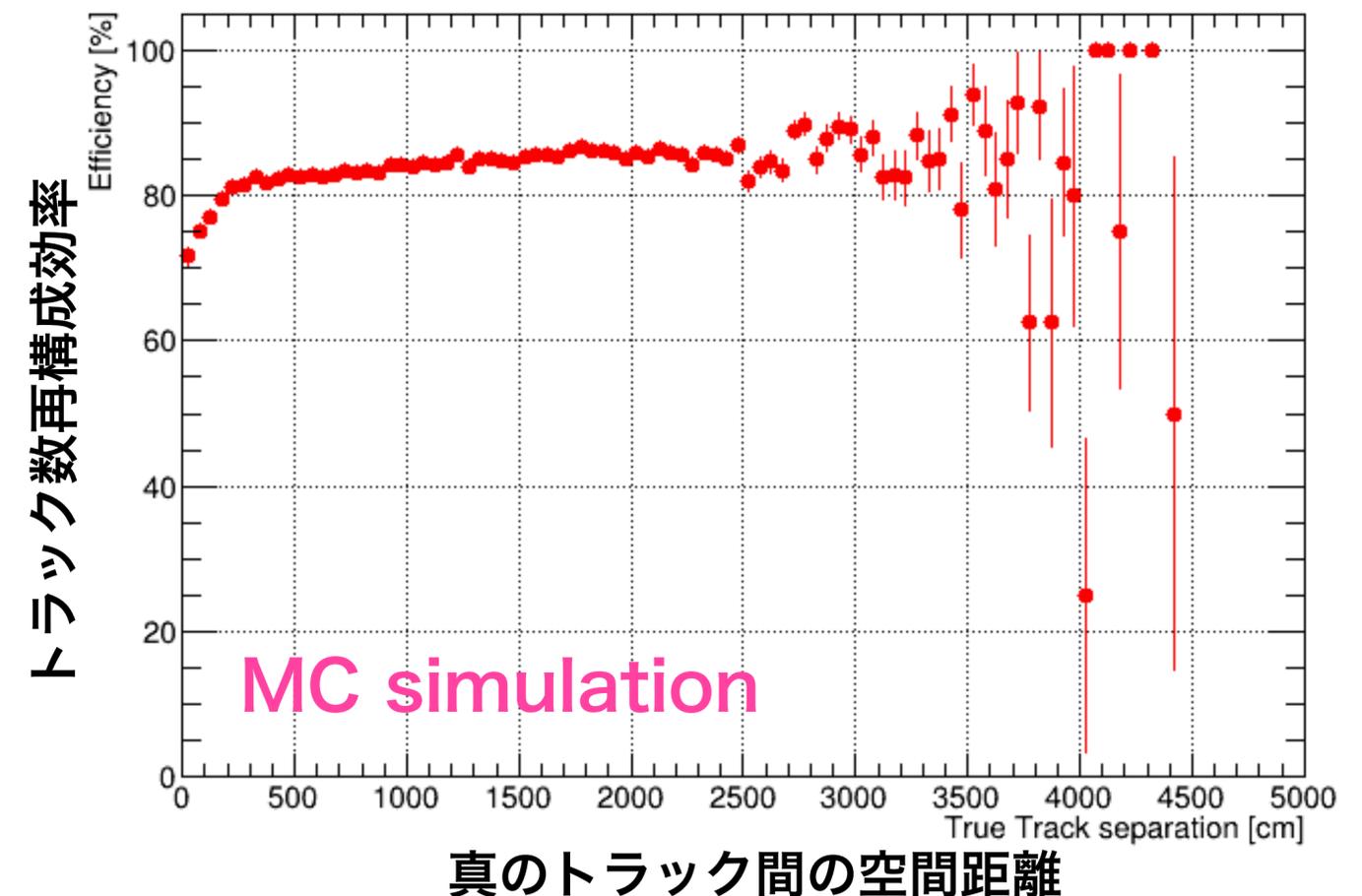
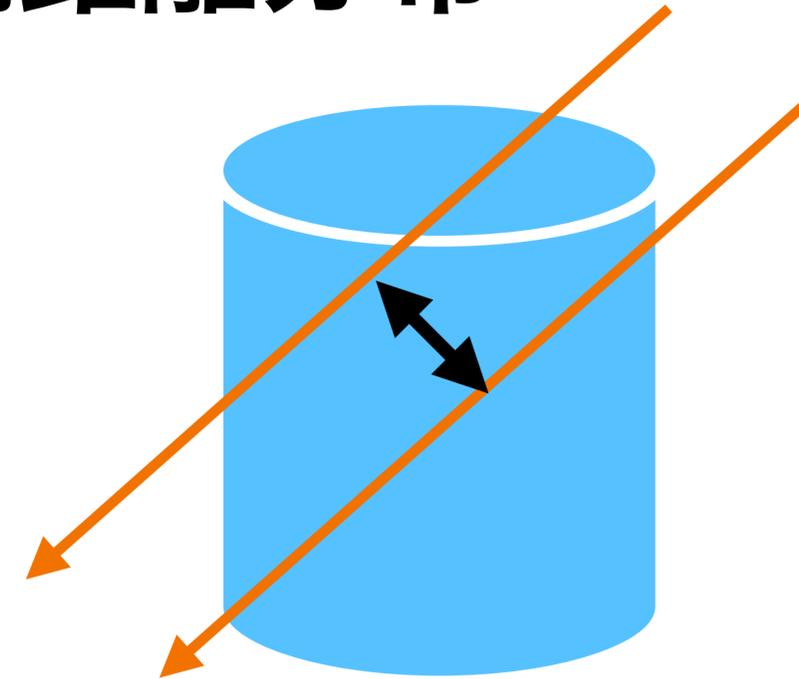
- 2本、3本、4本、、、場合分けして作成予定
 - 本数のmisfit事象が混じる
 - シミュレーションを用いて、misfitが入らない
selectionを決める

空間距離分布は数 m の距離まで見ることができそう

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



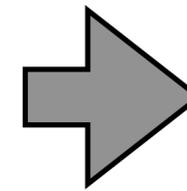
● Muon bundle

- ▶ 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

● 機械学習ベースの再構成プログラム

- ▶ Object detection (Detection Transformer)
- ▶ 現行の再構成プログラムよりも精度の高い結果を得た



再構成プログラムの構築で論文執筆中

● フラックス測定

$$Flux = 1.64 \pm 0.03 \times 10^{-7} \text{ (stat+syst.)}$$

● 多重度分布

- **約90%の割合でSingle muonが観測**された → シミュレーションとの比較のために解析進行中

● 空間距離分布

- **数mの距離までトラックの識別が可能** → シミュレーションとの比較のために解析進行中

Back up

Muon bundle MCの作成

- Muon event generator

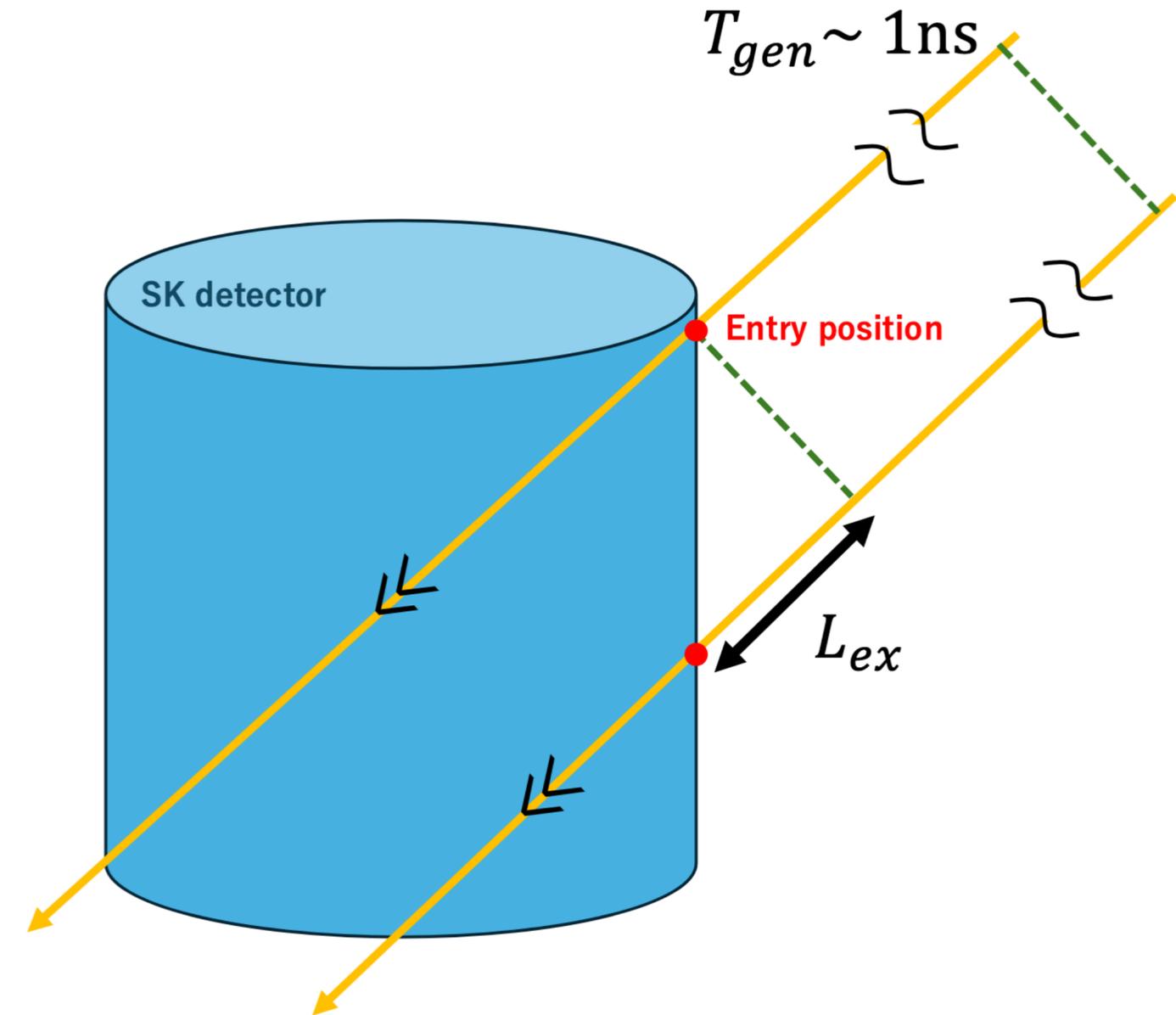
- 各トラックの**Direction**、**Entry position**、**Entry timing**
- ミューオンデータと一致するように構築

- 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

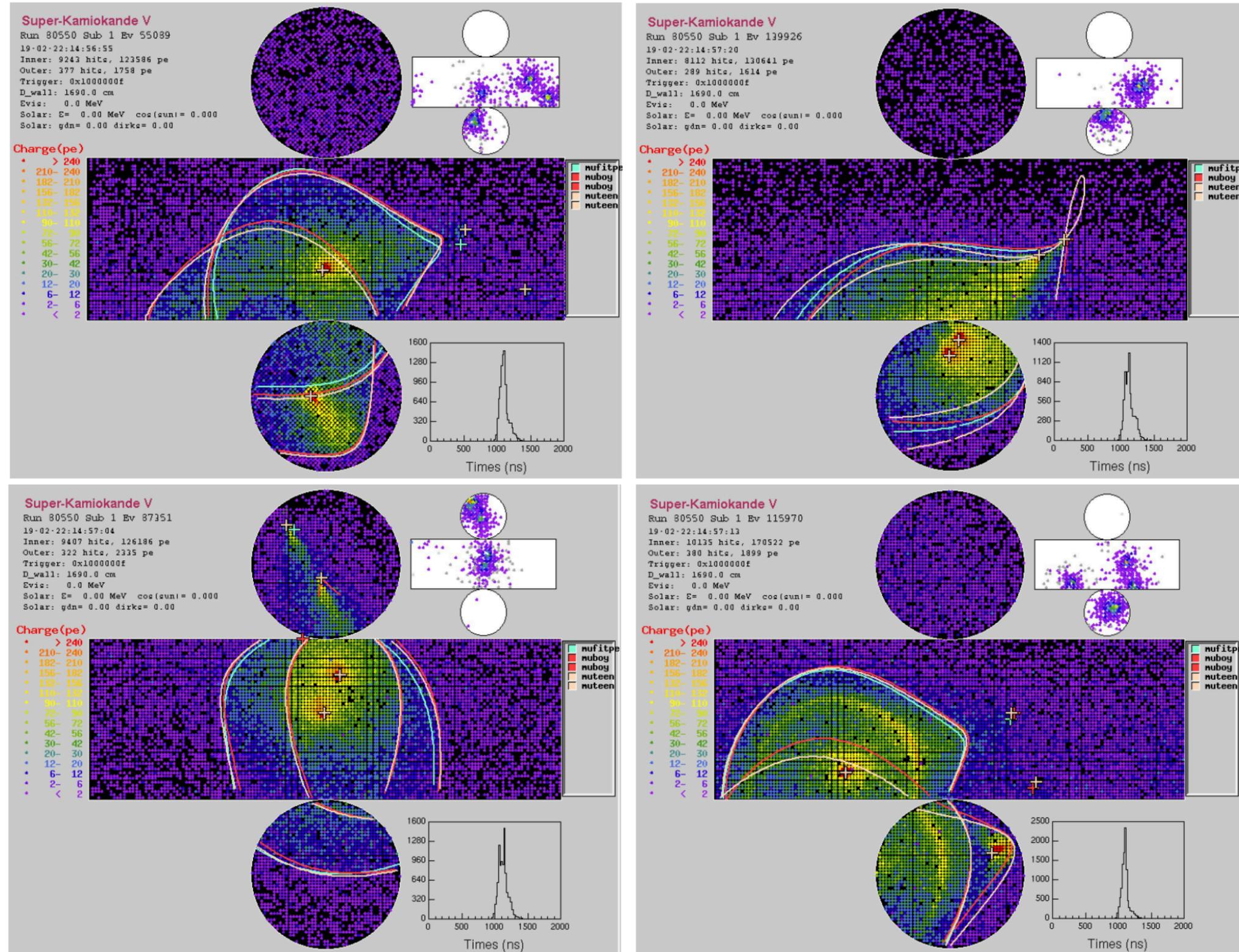
- ② 2nd muon track

- **Direction**: 1st muonと**完全に平行**
- **Entry position**: トラック間の距離 (ΔD) から計算
外部データから ΔD 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)



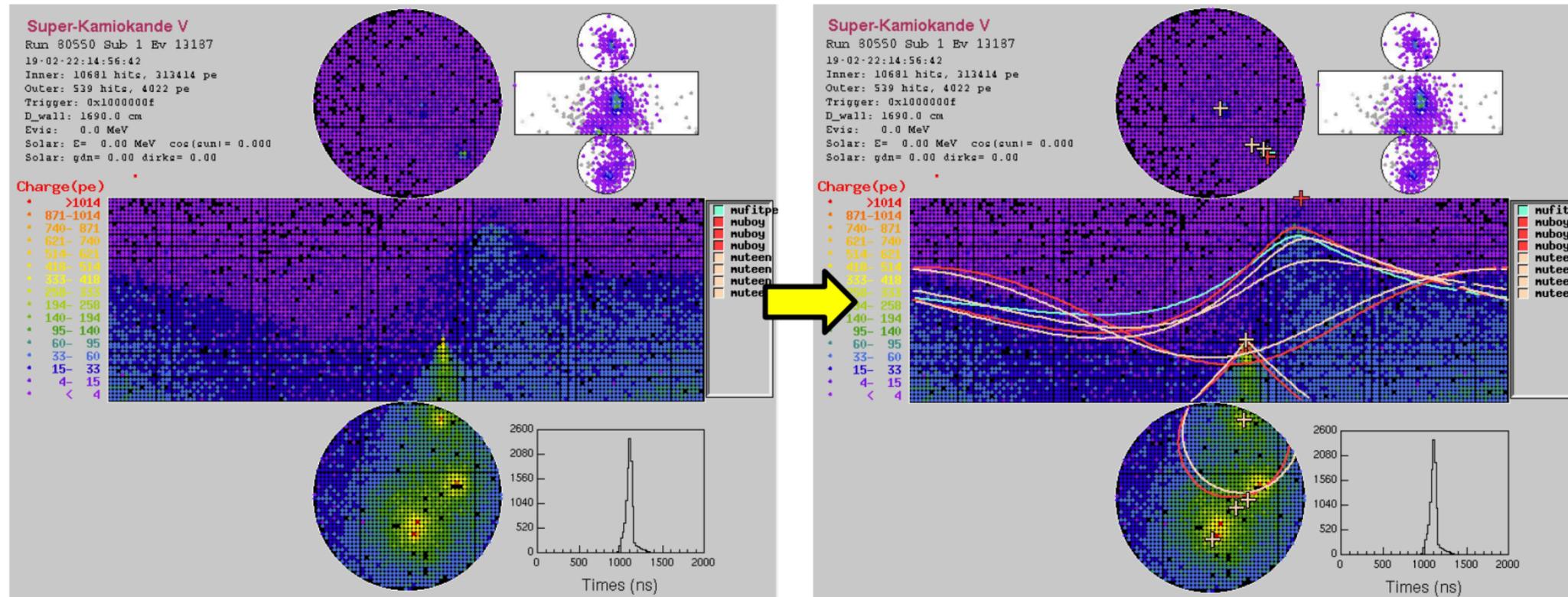
Example event displays

- Double



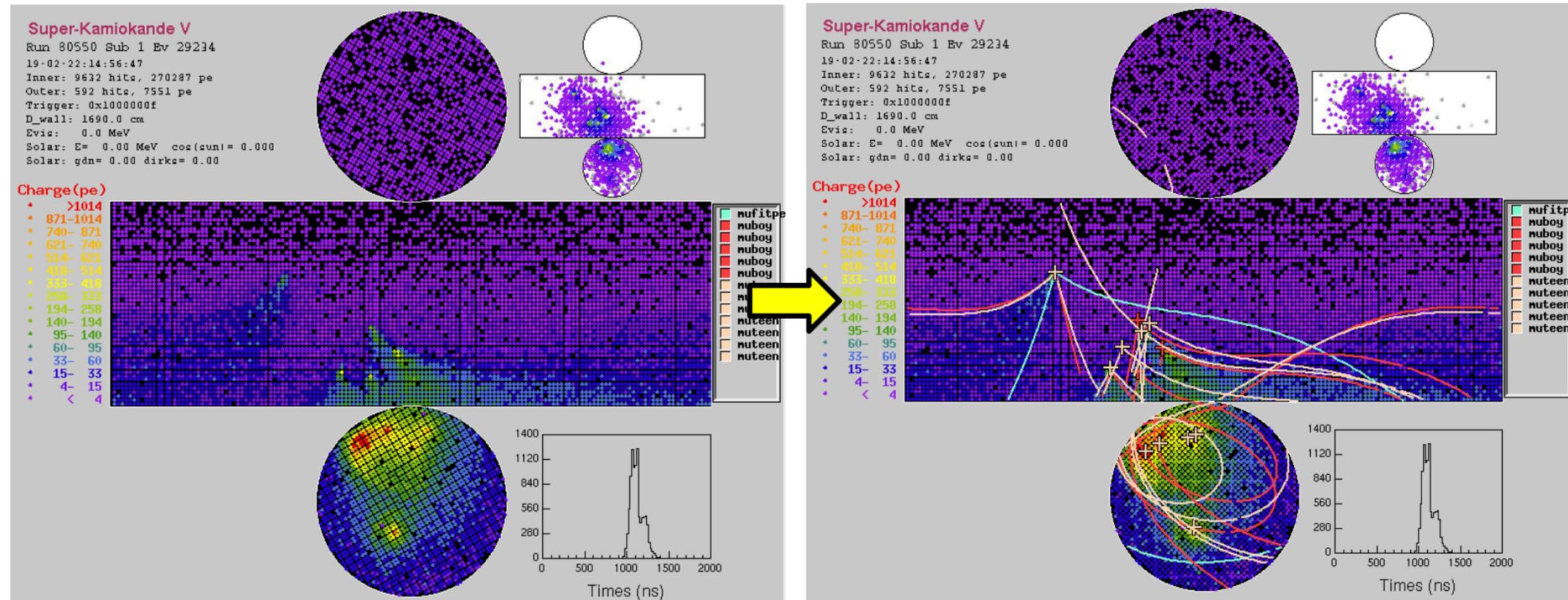
Example event displays

4-track event



Example event displays

5-track event



Example event displays

> 5-track event (8?)

