

地下検出器のミューオン束同時計測に向けた研究

東北大学ニュートリノ科学研究センター
齊藤恵汰

2026/03/04

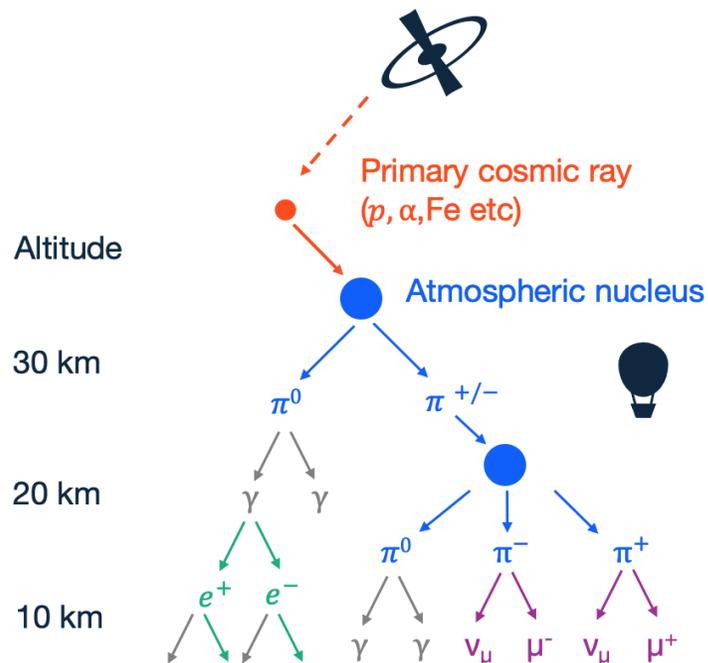
第2回 学術変革「地下稀事象」若手研究会

Muon Puzzle

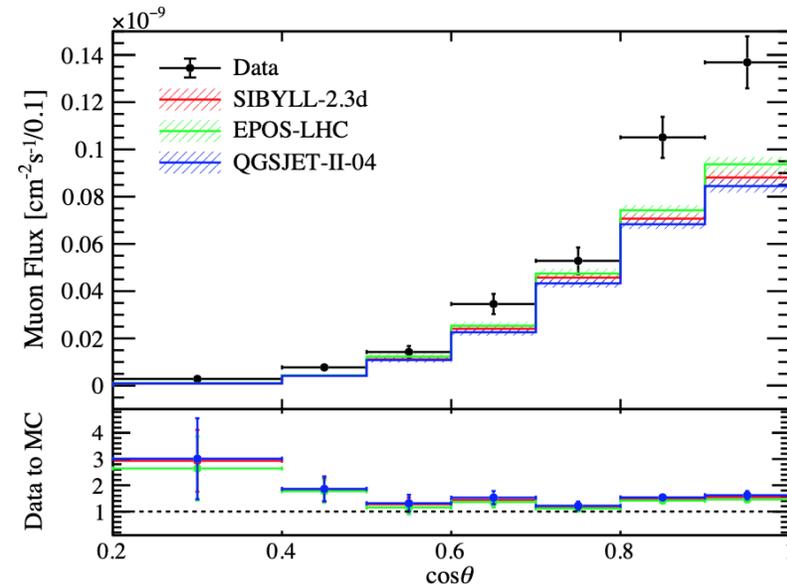
宇宙線大気シャワーの測定 → LHCのエネルギー領域を超えた固定標的実験

Muon Puzzle

- 観測データ ≠ 理論予測
- ミューオンのレートや反応の広がり、エネルギー分布などが乖離
- 元素組成や既存のハドロン相互作用モデルでは説明不可
- **高エネルギー前方物理を理解する上で重要**



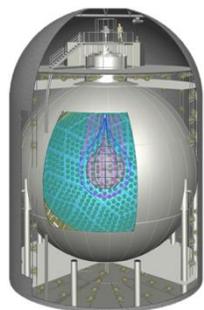
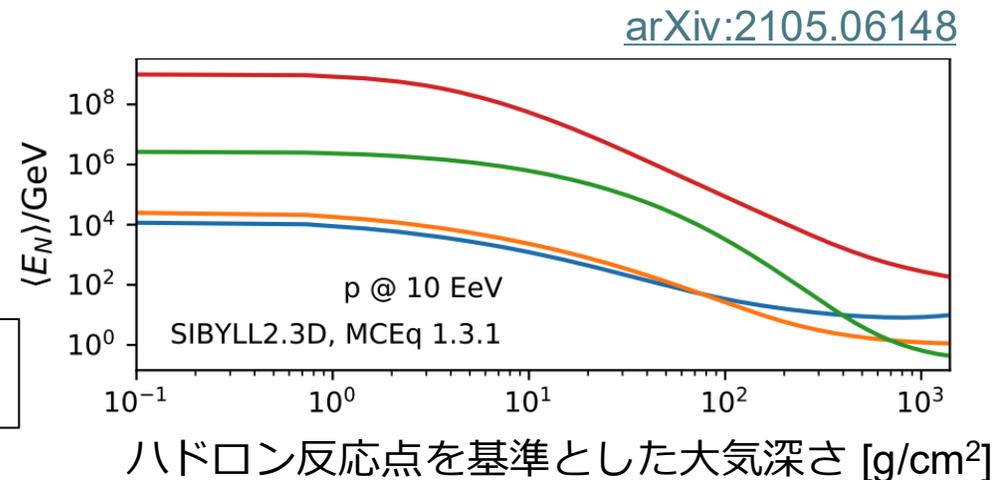
Jinping Neutrino Experiment の1ton prototype detectorに到来するフラックス天頂角分布。実データと予測値のずれは~40%。 [arXiv:2510.16341](https://arxiv.org/abs/2510.16341)



地下検出器

岩盤がGeVスケールのミュオンをフィルターすることでより高エネルギーのミュオンを選択的に検出

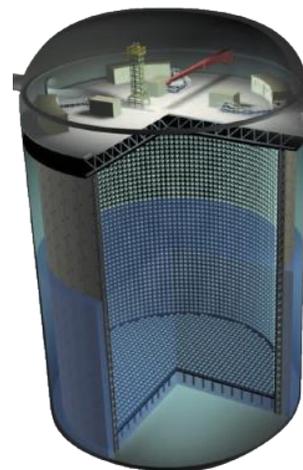
→ シャワーカスケード初期の反応で生じたミュオンを検出



KamLAND (2002-2024)

1kt液体シンチレータ検出器

1325 17-inch + 554 20-inch PMTs



Super-Kamiokande (1998-)

50kt水チェレンコフ検出器

~10000 20-inch PMTs

両検出器は神岡地下(~1000 m) に位置
検出器中のミュオン飛跡から到来方向を再構成可能

ミュオン束測定

ミュオン束: 同じ大気シャワーから生成される複数のミュオン

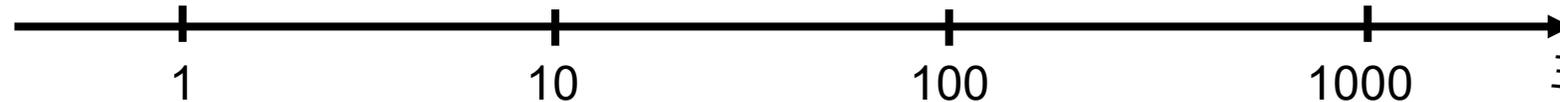
ミュオン束のレート + 束間の距離測定

→乖離の原因が元素由来かハドロン相互作用モデル由来かの縮退を解いてMuon puzzleに取り組む。

単一の地下検出器

(Super-Kamiokande, KamLAND etc.)

Ref) 多田智昭さん 「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」



IceCube

- ~1 km³ 氷チェレンコフ検出器
- 86 ストリング(125 m間隔)



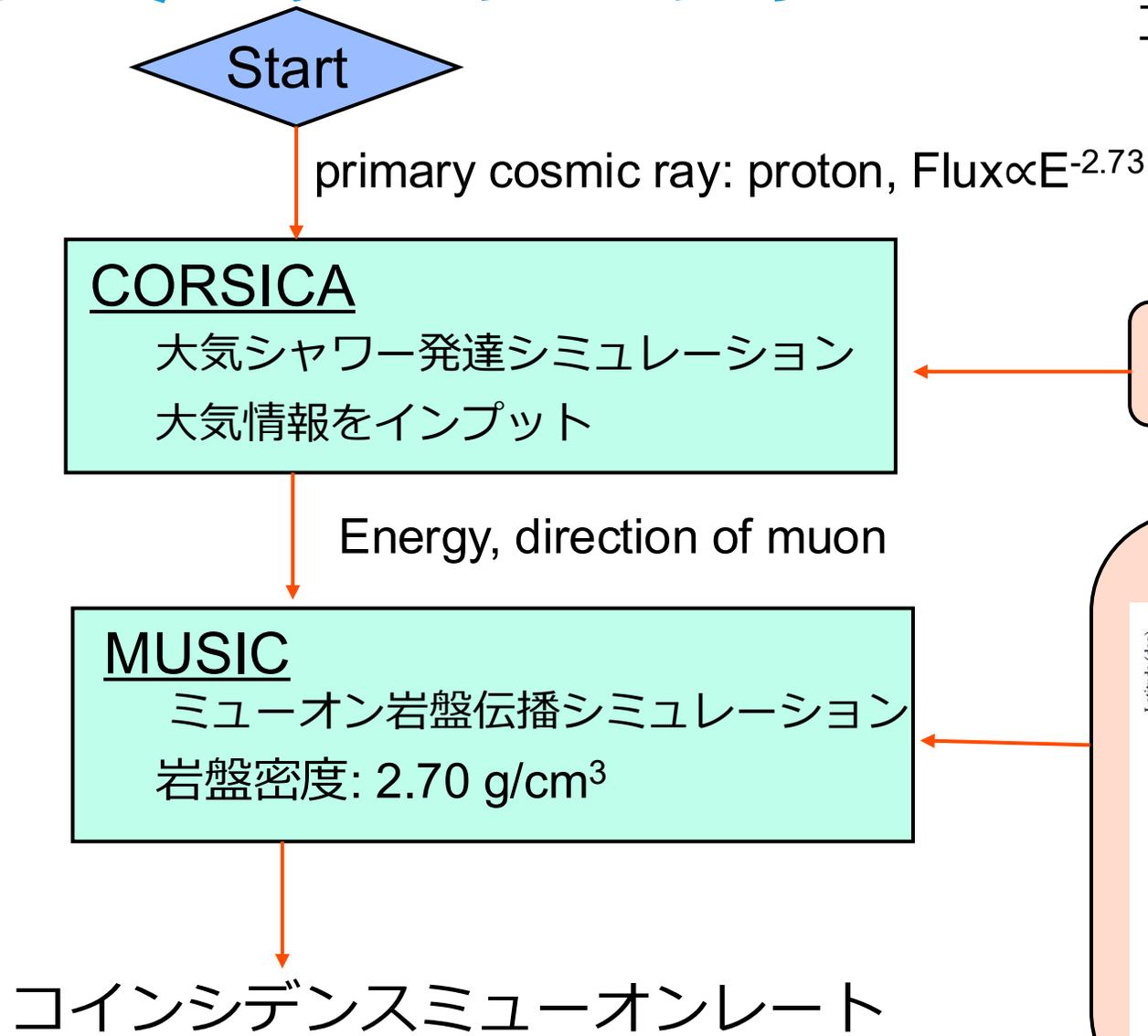
KamLANDとSuper-Kamiokande (Super-K)間の距離 ~ 200 m

→O(100) m 広がるミュオン束測定が可能

KamLANDとSuper-Kのコインシデンス事象レートの観測値と予測値を比較し、Muon puzzleにアプローチ

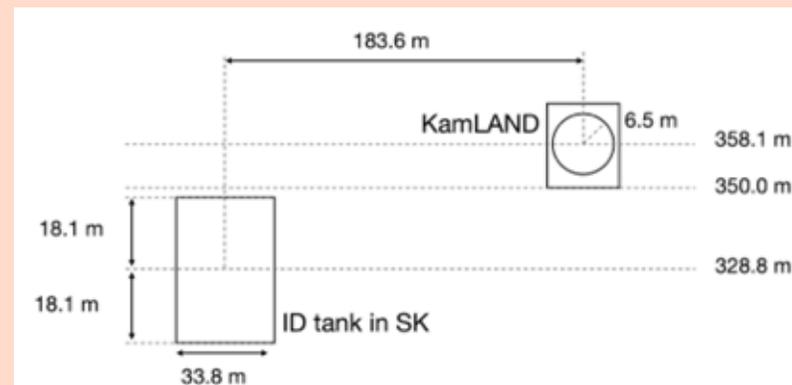
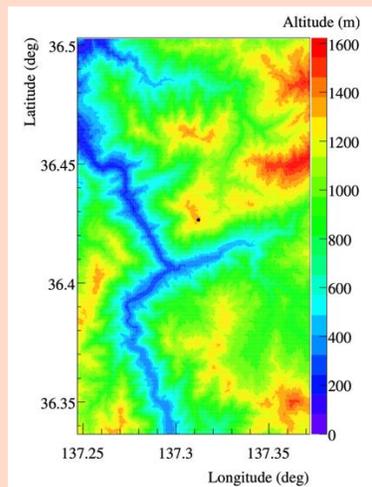
シミュレーションフロー

既存のハドロン相互作用モデルから予測される
コインシデンスミュオンレートを計算

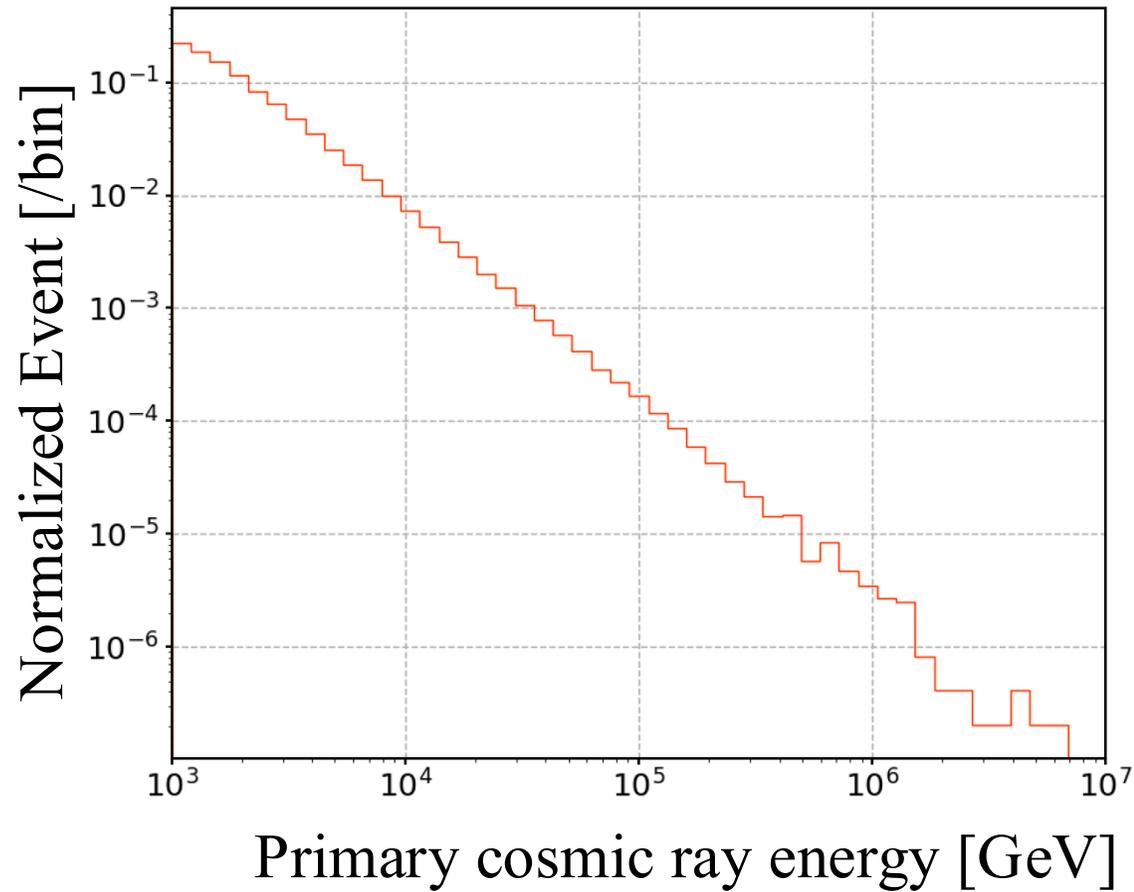


ハドロン相互作用モデル

Geometry



一次宇宙線スペクトル



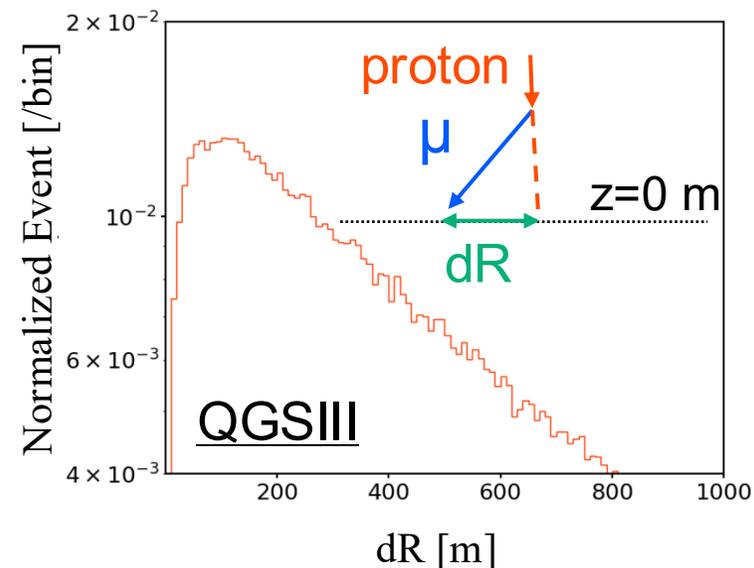
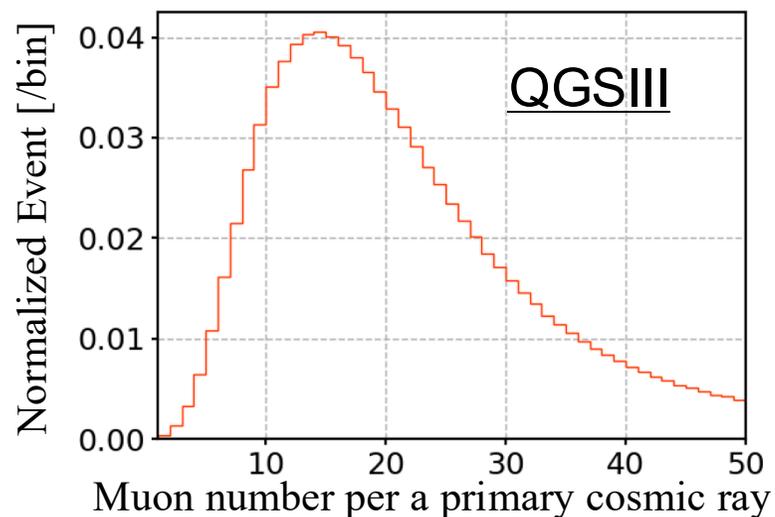
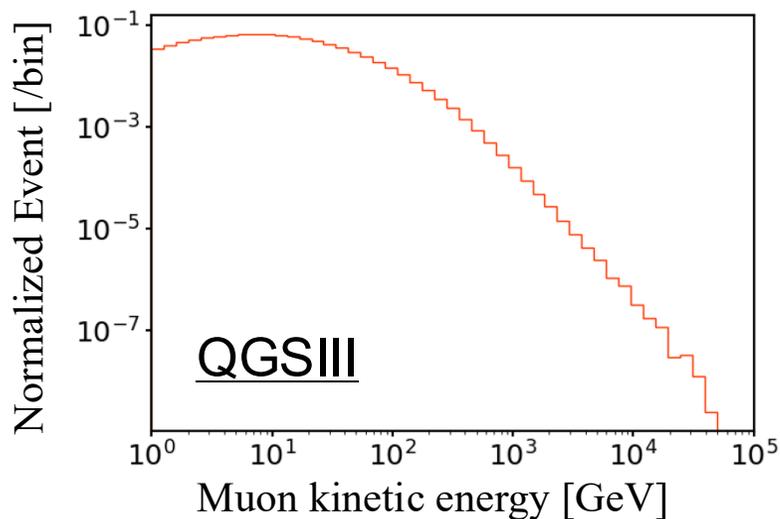
- 陽子 100%を仮定
- Zenith angle: $0 < \theta [^\circ] < 70$
- $\varphi \propto E^{-2.73}$
- 一次宇宙線エネルギー: 10^3 - 10^7 GeV

一次宇宙線に対して一様にサンプリングし重み付け
→高エネルギーな一次宇宙線の統計を増やす

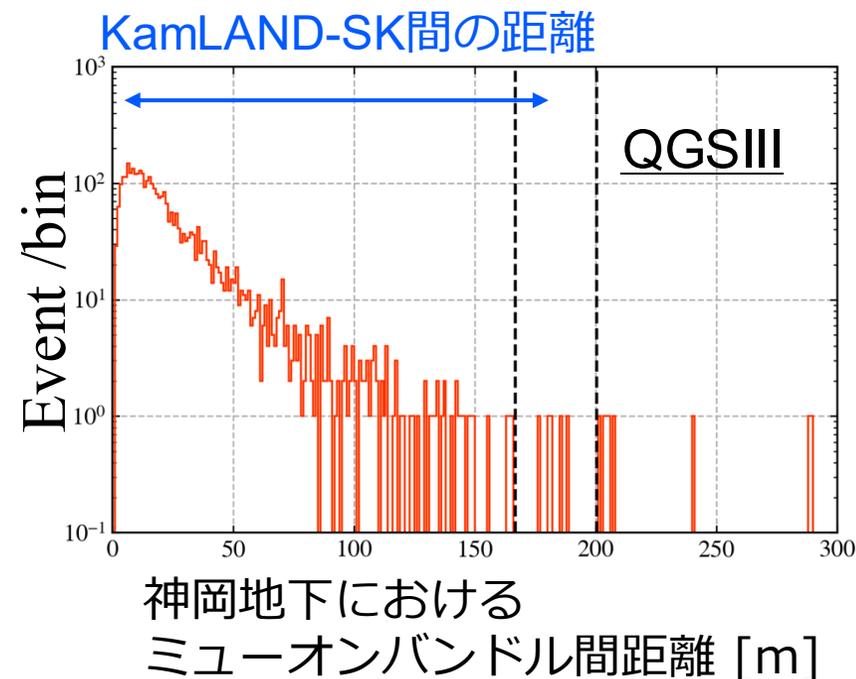
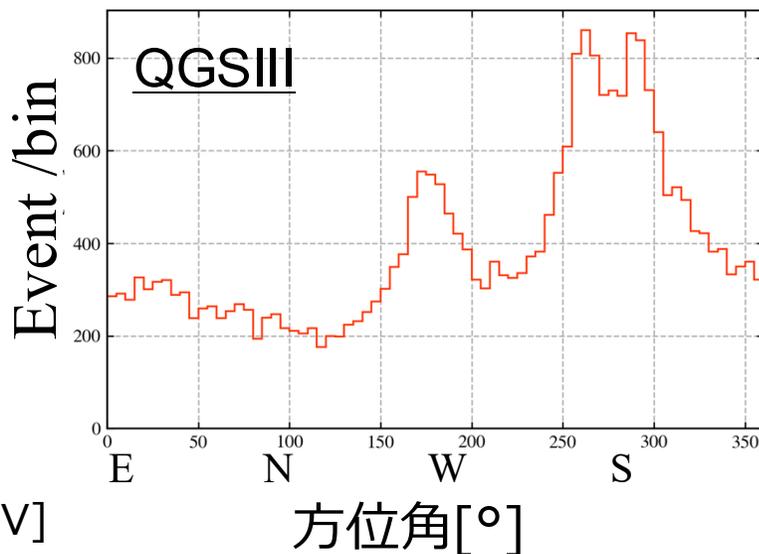
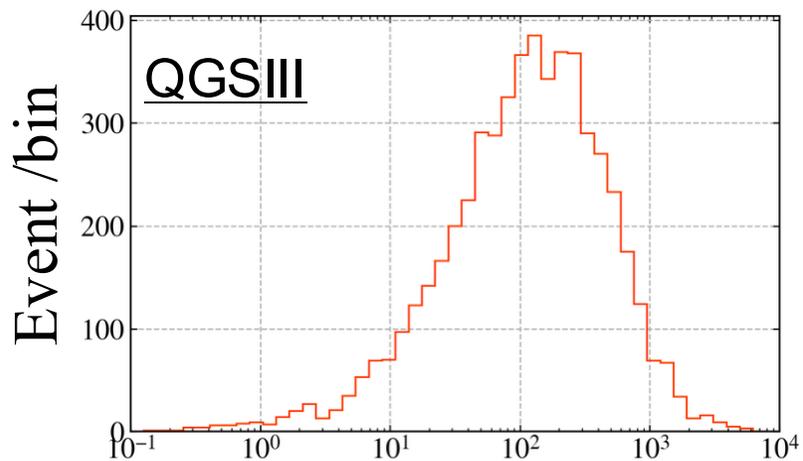
大気シャワー発達シミュレーション

CORSIKA (COsmic Ray Simulations for KAscade)

- ▶ 大気シャワー発達MCシミュレーションツール
- ▶ ハドロン相互作用モデル(QGSIII, SIBYLL)を仮定しミューオンのエネルギーや方向を決定
- ▶ 神岡付近の大気情報や磁場を考慮



- ミューオンは岩盤中では電離、制動放射、対生成や原子核との非弾性散乱でエネルギーを損失
- MUSIC (MUon Simulation Code)を用いてミューオン岩盤伝播を計算
- 神岡地下の岩盤密度: $\sim 2.70 \text{ g/cm}^3$

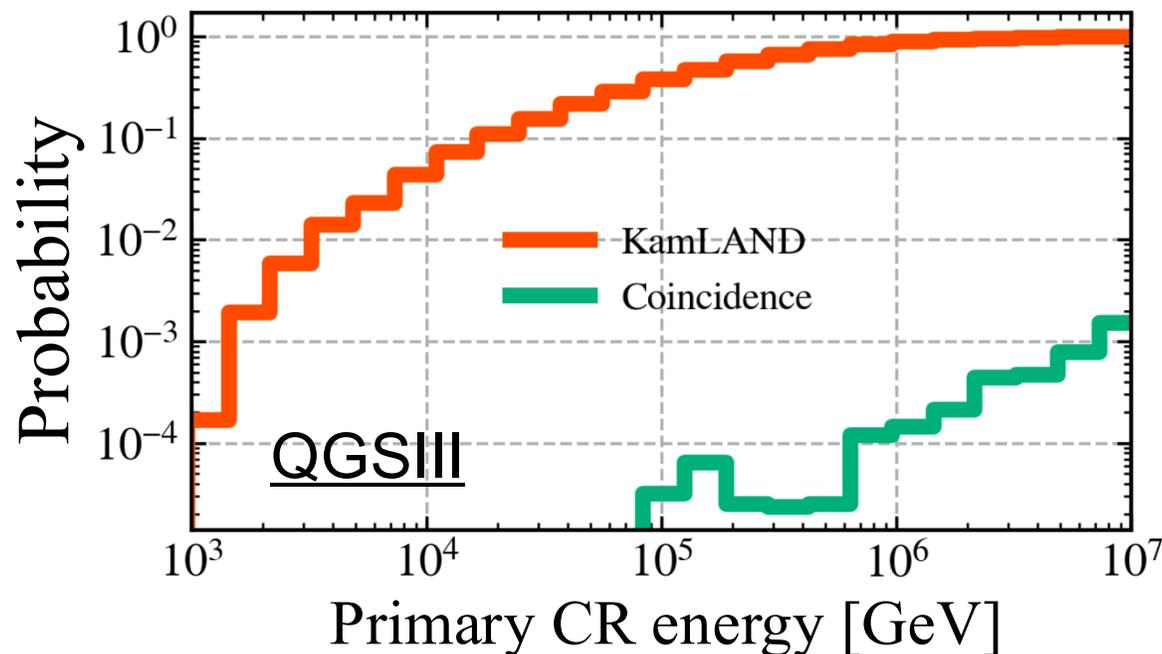


コインシデンス事象レート

CORSIKA+MUSICでKamLANDに入るミュオン数とコインシデンスするミュオン数の比がわかる。

KamLANDの事象レート 0.34 /secとして規格化しコインシデンス事象レートを導出する。

神岡地下まで到来する一次宇宙線の割合



期待コインシデンス事象レート (+統計エラー):
0.156±0.073 /day (QGSIII)
0.143±0.098 /day (SIBYLL)

KamLANDとSuper-K両方が稼働している
Livetimeを5年とすると事象数は300イベント程度

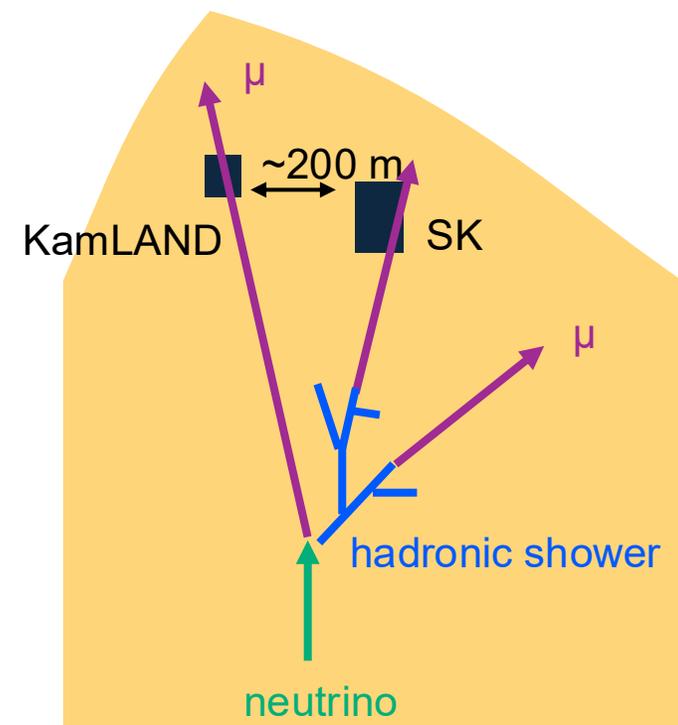
一次宇宙線のエネルギーが高いほどコインシデンス事象も多い

まとめ

- Muon puzzle
 - ▶ 観測ミューオン数、エネルギー、反応広がりがハドロン相互作用モデルで予測される値と乖離
- O(100)m広がるミューオン束をKamLANDとSuper-Kでコインシデンス測定しMuon puzzleにアプローチ
- 期待コインシデンス事象数は~0.15 /day

今後の展望

- 他の元素 (鉄、He) や一次宇宙線エネルギースペクトルのShape、岩盤密度を変えた場合のコインシデンス事象数を計算
- T2KのTimestampを用いて時間較正し、KamLANDとSKの実データよりコインシデンス事象数を導出
- Up-goingコインシデンスミュオンについて物理的意義や実現可能性の議論
 - ▶ 岩盤中の深非弾性散乱によりTeV-PeVニュートリノ探索ができる可能性
 $\nu + N \rightarrow \mu + (\text{hadron})$
 $(\text{hadron}) \rightarrow \text{Multiple } \mu$



Back up