

P23 地下検出器のミュ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 (e-mail: saito@awa.tohoku.ac.jp)

1. 概要

Muon puzzle (高エネルギー前方物理の課題):
宇宙線ミュオン観測データが予測値と乖離

KamLANDとSuper-Kamiokandeの同時計測

単一検出器ではできない
 $O(100)$ m 広がるミュオン束測定
よりMuon puzzleにアプローチ

第一歩としてモンテカルロシミュレーション
による期待同時計測ミュオン数導出を行い
実現可能性を議論

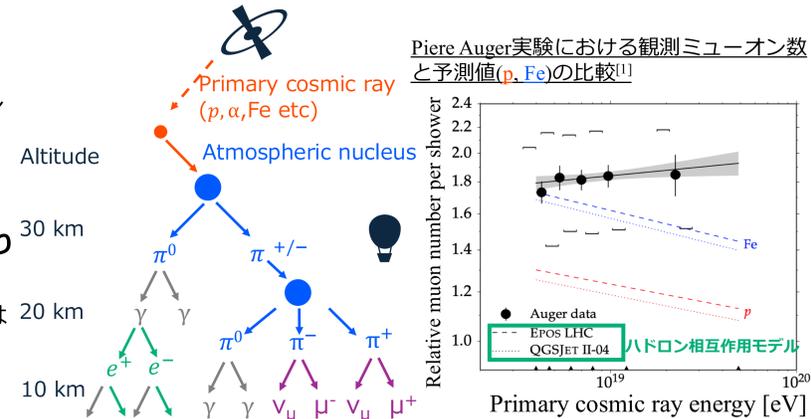
2. 大気シャワー測定とMuon puzzle

宇宙線大気シャワー測定
→LHCのエネルギーを超えた固定標的実験

地表で観測される荷電二次宇宙線のうちミュオン
が最大の割合を占める

Muon puzzle^[2]

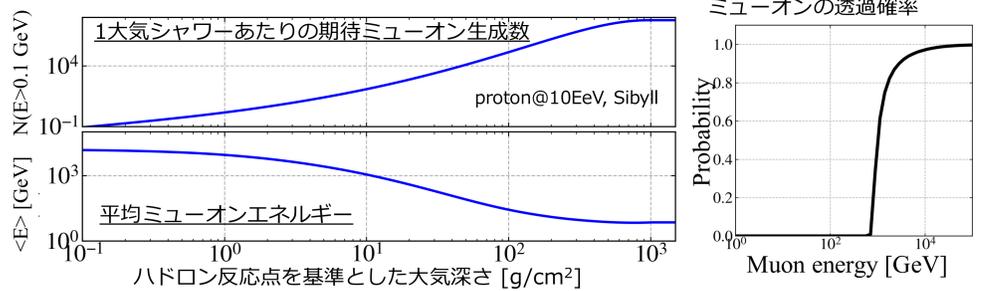
- 観測ミュオン数、エネルギー、反応の広がり
が理論予測値と乖離
- 元素組成や既存のハドロン相互作用モデルでは
説明不可
- 高エネルギー前方物理を理解する上で重要



3. 地下検出器

岩盤がGeVスケールのミュオンをフィルターして高エネルギーのミュオンを
選択的に検出^[2]

→ 大気シャワー初期のハドロン相互作用により生じたミュオンを検出



**Kamioka Liquid scintillator
Anti-Neutrino Detector
(KamLAND)**

- 1kt液体シンチレータ検出器
- 1325 17-inch + 554 20-inch PMTs
- 2002年から2024年まで
データ取得

**Super-Kamiokande
(Super-K)**

- 50kt 水チェレンコフ検出器
- ~10000 20-inch PMTs
- 1998年からデータ取得

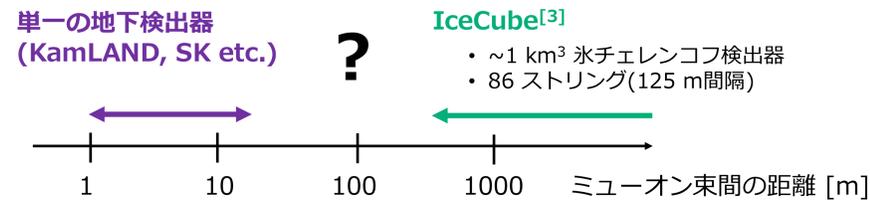
両検出器は神岡地下1000 m (2700 m.w.e.) に位置

4. 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 + ミュオン束間の距離測定

→ 乖離の原因が元素組成由来かハドロン相互作用モデル由来かの縮退を解いて
ミュオンパズルを理解



KamLANDと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の同時計測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**

5. モンテカルロ(MC)シミュレーションを用いた期待同時計測事象レートの導出

一次宇宙線

- 陽子 100%を仮定
- 一次宇宙線エネルギー: 10³-10⁷ GeV
- 天頂角: 0-70°

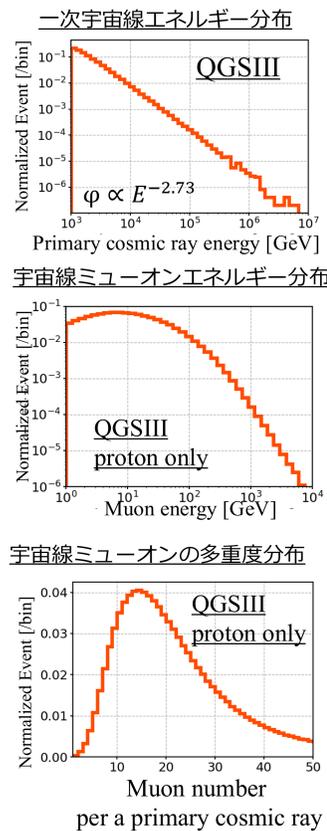
大気シャワー発達MCシミュレーション
(CORSIKA^[4])

- ハドロン相互作用モデルを仮定
- 神岡付近の大気情報や磁場を考慮

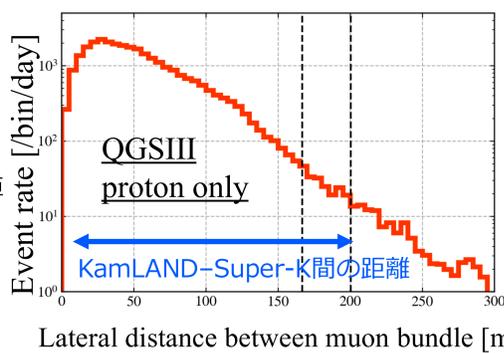
岩盤伝播MCシミュレーション
(MUSIC, MUon SIMulation Code^[5])

- 神岡付近の地形を考慮
- 神岡地下の岩盤密度: 2.70 g/cm³
- ミュオンは岩盤中で電離、制動放射、対生成
や原子核との非弾性散乱などでエネルギーを損失

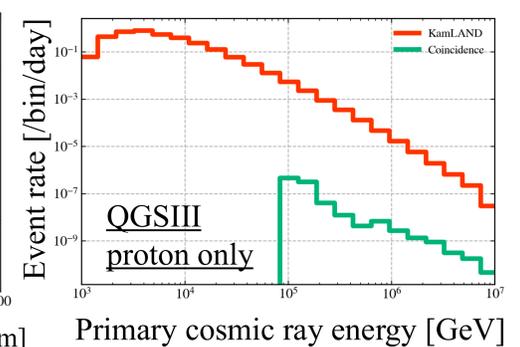
期待同時計測事象レート



神岡地下におけるミュオン束間距離 [m]



KamLANDのミュオン事象と同時計測事象の
一次宇宙線エネルギースペクトル



単一の検出器より高エネルギーな一次宇宙
線由来のミュオンを検出できる

KamLANDミュオン事象レート(=0.34 /sec)で規格化し同時計測事象レートを導出

ハドロン相互作用モデル	期待同時計測事象レート [1/day] (+ statistic error)
QGSIII ^[6]	0.156±0.073
Sibyll ^[7]	0.143±0.098

KamLANDやSuper-KのLivetimeで統計を十分貯めることが可能

6. まとめ

- Muon puzzle
 - 観測ミュオン数、エネルギー、反応広がり
が予測値と乖離
- $O(100)$ m広がるミュオン束をKamLANDとSuper-Kで同時計測しMuon puzzleに
アプローチ
- 期待同時計測事象数は~0.15 /dayであり統計数を貯めることは十分可能

7. 今後の展望

- 岩盤密度や一次宇宙線スペクトルの形に起因するミュオンレート不定性の評価
- 一次宇宙線の元素組成を変えた場合の期待同時計測事象数を計算
- KamLANDとSuper-Kの実データより同時計測事象数を計算し期待事象数と比較

参考資料

- [1] Phys. Rev. D 91, 032003 (2015)
- [2] Albrecht, J., Cazon, L., Dembinski, H. et al. *Astrophys Space Sci* 367, 27
- [3] Phys. Rev. D 87, 012005

- [4] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, FZKA 6019 (1998)
- [5] *Astropart. Phys.* 7:357-368, 1997
- [6] Phys. Rev. D 83, 014018
- [7] F. Riehn, A. Fedynitch, and R. Engel, *Astropart. Phys.* 160, 102964 (2024)