

地下実験室に到来する宇宙線ミュオンフラックスのシミュレーション間の系統的な評価

島村蓮^A, 中野佑樹^B, 多田智昭^C, 南野彰宏^A 横浜国立大学^A, 富山大学^B, 岡山大学^C

Email: shimamura-ren-vg@ynu.jp, ynakano@sci.u-toyama.ac.jp

1. イントロダクション

(1) ミューオンの核破砕事象

- ・ ミューオンは酸素などの原子核を破壊し、放射性物質や中性子を生成
 - ・ 放射性物質は崩壊し、荷電粒子を放出
 - ・ 中性子はGdの中性子捕獲でγ線を放出 (※スーパーカミオカンデ)
- ・ ニュートリノ検出や暗黒物質検出にも、荷電粒子やγ線が使われている
- ・ ミューオンは地下で行われるニュートリノ観測や、暗黒物質探索実験バックグラウンドになる

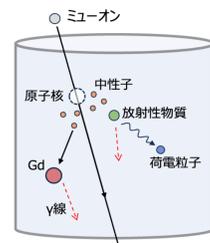


図1. ミューオンの核破砕事象

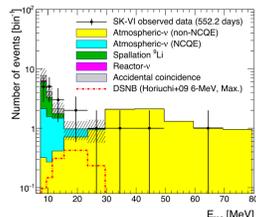


図2. 超新星背景ニュートリノ観測におけるエネルギー分布[1]

(2) 地下実験室に到来するミュオン

- ・ 地下実験室に到来する、宇宙線ミュオンの観測頻度や到来方向などミュオンについての情報を調べる必要がある
- ・ 検出器には検出条件があるためすべてのミュオンを観測することはできない
- ・ そのため宇宙線ミュオンの理解には、検出器による観測に加えてシミュレーションによる予想も重要となる。

目的

本研究では2つのシミュレーションを使用して、地下実験室でのミュオンのフラックスを評価を行う

地下実験室にどれだけのミュオンが到来するか知りたい

→将来的にはミュオン起源の放射性物質や中性子の生成量を調査する

2. ミューオン伝搬シミュレーション

(1) シミュレーションについて

- ・ ミューオンは山の中をエネルギーを落としながら伝搬し、地下実験室に到達する
- ・ 使用したミュオン伝搬コードは MUSIC [2], MUTE [3]

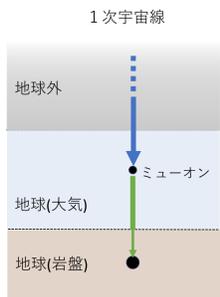


図3.1次宇宙線とミュオン

表1. MUSICとMUTEについて[2][3]

	作成年	言語	使用実績
MUSIC	1997	Fortran	SK, KamLAND, HK
MUTE	2022	Python, C++	国内の地下実験では利用実績無し

(2) MUTEとMUSICの違い

1. 一次宇宙線モデル, ハドロン相互作用のモデルの違い

表2. MUSICとMUTEのモデルの違い[2][3]

	1次宇宙線のモデル	ハドロン相互作用モデル
MUSIC	Modified Gaisser formula ($E^{-2.7}$ に依存)	
MUTE	複数のモデルあり	複数モデルあり(今回はSIBYLL-2.3c)

2. エネルギー損失 (詳細は調査中)

- ・ 物理過程: 電離損失, 相対損失(制動放射, 非弾性散乱, 対生成)
- ・ 電離損失と相対損失の両方の式に違い

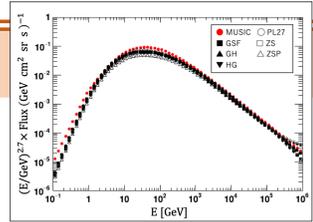


図4. 地表のミュオンスペクトル (天頂角 = 0°)

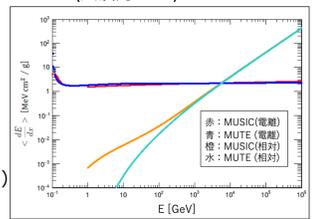


図5. エネルギー損失

3. 地下実験室のフラックスの比較

(1) ミューオンフラックスの角度分布と全フラックス

スーパーカミオカンデ(SK, 地下1000m)で予想される角度ごとのミュオンフラックスを国土地理院の標高データとミュオン伝搬シミュレーションを用いて、計算した山の密度は2.70g/cm³としてシミュレーションを行った

- ・ 本質的には同じ結果を得ることができた
 - ・ $(\Phi, \cos\theta) = (270, 0.8)$ 辺りに一番ミュオンが到来している
 - ・ 山の厚い水平方向からはほぼミュオンが到来しない
- ・ 細かい差がみられた
 - ・ 1次宇宙線のフラックス
 - ・ 物理計算過程に違いがあること

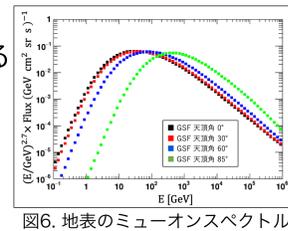


図6. 地表のミュオンスペクトル

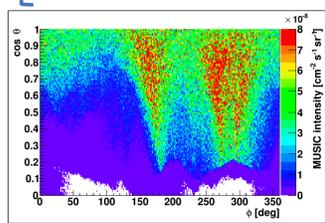


図7. SKでのフラックス (MUSIC)

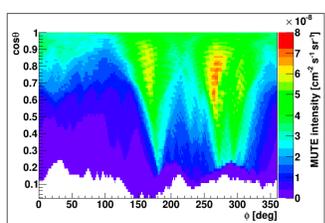


図8. SKでのフラックス (MUTE-GSF)

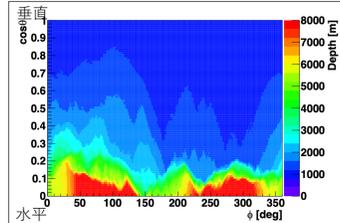


図9. 山の厚さ

(2) 神岡地下の様々な場所での全フラックス

複数の地下実験室に到来する全ミュオンフラックスをMUTEとMUSICで求めた

- ・ MUTE(GSF)よりMUSICのフラックスの値が大きい
- ・ MUSICとMUTE(GSF)で約20%の違いがあった

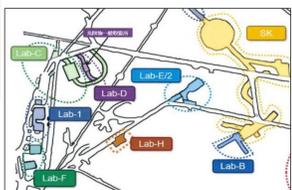


図10. 神岡地下の実験区域の地図

表3. MUTE(GSF)とMUSICによる神岡地下の各地点の全フラックス

※具体的な数字については、中野までご連絡ください

(3) MUTEの一次宇宙線モデル

- ・ MUTEには6種類の一次宇宙線モデルが入っている
- ・ MUSICと宇宙線ミュオンフラックスの値が一番近い、MUTEのモデルは、HGモデル
- ・ MUSICとMUTE(HGモデル)で約16%の違いがある

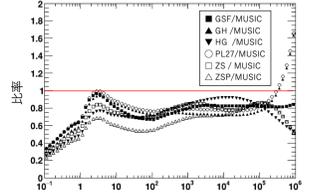


図11. 地表のミュオンスペクトルの比 (天頂角 = 0°)

表4. MUTE(各モデル)とMUSICによるSKの全フラックス

※具体的な数字については、中野までご連絡ください

(4) KamLANDの観測データとシミュレーションの比較

KamLANDに到来する宇宙線ミュオンフラックスの値を、観測データとシミュレーションで比較した

- ・ KamLANDの観測データ[4]を使用
- ・ MUSICは観測データと0.4σで一致
- ・ MUTE(HG)は観測データと2.4σ程度、離れている

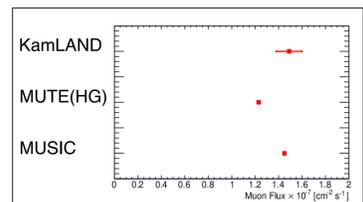


図12. KamLANDの観測データとシミュレーションの比較

表5. MUTEとMUSICによるKamLANDの全フラックス

※具体的な数字については、中野までご連絡ください

4. まとめと展望

- ・ MUSIC, MUTEで神岡地下実験室の宇宙線ミュオンフラックスを計算した
- ・ MUTEとMUSICの差は約20%程度であった
- ・ KamLANDの観測値とMUSICの予想値は0.4σ, MUTE(HG)は2.4σ程度離れている
- ・ 今後はスーパーカミオカンデでの観測値とMUSIC, MUTEの予想値の比較を行う

5. 参考文献

- [1] M. Harada et al. Search for Astrophysical Electron Antineutrinos in Super-Kamiokande with 0.01% Gadolinium-loaded Water, The Astrophysical Journal Letters, 2023/7/10, <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acdc9e>
- [2] P. Antonioli et al. A THREE-DIMENSIONAL CODE FOR MUON PROPAGATION THROUGH THE ROCK: MUSIC, Astroparticle Physics, 1997/7/30, [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(97\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(97)00035-2)
- [3] A. Fedynitch, et al. On the Accuracy of Underground Muon Intensity Calculations, The Astrophysical Journal, 2022/3/20, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5027>
- [4] KamLAND Collaboration, Production of radioactive isotopes through cosmic muon spallation in KamLAND, Phys. Rev. C 81, 025807, 2010/2/23, <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.81.025807>