

スーパーカミオカンデ実験における 宇宙線ミューオンの電荷比と スピン偏極度の測定

PHYSICAL REVIEW D 110, 082008 (2024)

多田智昭、中野佑樹^A、北川芙西音、佐藤和史^B、小汐由介 岡山大理、富山大理^A、ICRR^B、他 Super-Kamiokande collaboration

2025年3月6日



研究背景・目的

- ▲ スーパーカミオカンデ検出器
- ミューオン・崩壊電子事象
- 電荷比とスピン偏極度の測定
- 解析手法

● 解析結果

🌒 まとめ

研究背景

 π^0

 $\overline{\nu}$

μ

 π

 K^+

3

 π^+

 π^+

 π

 $ar{
u_{\mu}}$

大気ニュートリノと宇宙線ミューオン

- 1次宇宙線 (p) と大気原子核 (O, N) の反応
 ハドロンシャワーの生成
- ヘドロンシャワー中の π/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ーオンに崩壊

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

 宇宙線ミューオンの情報から間接的に 大気ニュートリノの情報を得ることが可能

研究背景

ニュートリノ振動

- 太陽ニュートリノ、大気ニュートリノ、原子炉ニュートリノ、加速器ニュートリノ
 - ⑤ 質量差 Δm_{32}^2 (質量階層性)、混合角 θ_{23} 、 CP 位相角 δ_{CP} の値を詳細に測定したい

→ 特に Δm_{32}^2 、 θ_{23} は 大気ニュートリノ や加速器ニュートリノで 測定される

- ▲ より詳細な測定のためには、大気ニュートリノの予測 (Honda fluxなど) をより向上させたい
 → 不定性を削減したい
 - ▶ Fluxの絶対値 (5% ~ 25%)
 ▶ Flavour比、*ν*/*v* 比 (数% ~ 20%)
 - ▶ 親中間子(K/π)の生成比 (5% ~ 20%)
- 宇宙線ミューオンの観測から 制限を課すことが期待される



4

研究目的



- 🏶 正ミューオンと負ミューオンの数の比
- エネルギーが高い (一次宇宙線に近い) ほど、 電荷比が大きい (~1TeVでは1.3程度)

スピン偏極度 (生成時) P^µ₀

- 🌢 ミューオンのスピンの偏り
- スピンの向き→ 親中間子の崩壊過程 + 相対論的な伝搬
 伝搬方向とスピンは揃いやすい
- エネルギーが高いほど、K中間子由来のミューオンの 寄与が大きくなり、偏極度の絶対値が大きくなる。
- 親中間子の生成比を反映



宇宙線ミューオンの電荷比とスピン偏極度を測定する

→ 大気ニュートリノ予測の新たな入力変数に加え、予測精度を高める

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
- 1996年観測開始
- 岐阜県飛騨市神岡町の地下1,000m
- 約5万トンの超純水(or Gd溶解水)

検出原理

- チェレンコフ光をPMTで検出 (Timing、Charge)
- ▲ 2008年より回路が変更 (SK-IV ~ 現在)
 → [-5, 35] usecの時間幅の全Hitを保存

SKでの宇宙線ミューオン

下向きに入射 (約2Hz、1日に約20万事象)
 地表で約0.8TeV以上のエネルギー

観測データ

- ▲ 2008年9月~2018年5月 (SK-IV)
- 2019年2月~2020年7月 (SK-V)
- 2020年7月~2022年5月 (SK-VI)



ミューオン - 崩壊電子事象

ミューオンの崩壊

 $\mu \rightarrow e + \nu_{\mu} + \nu_{e}$

検出器内でミューオンが止まり、電子を放出
 崩壊電子の放出方向はスピンの向きに相関

SKでのミューオンの崩壊事象の観測

- 宇宙線ミューオン事象の前後[-5, 35] usec範囲の
 電子事象を探索
- おおよそ1分に1事象

崩壊率

 $\frac{d^2\Gamma}{dx\,d\cos\theta} \sim N(x)[1+P^{\mu}\beta(x)\cos\theta]$

x:電子の相対エネルギー

cosθ:電子の放出角度 (スピンとの角度)

N(*x*):電子のエネルギースペクトル

P^μ:生成時のミューオンのスピン偏極

正ミューオンは-1、負ミューオンは+1 β(x):非対称性パラメータ





電荷比とスピン偏極度の測定

電荷比

- Super-Kでは電荷を分別することはできない
- 水中の負ミューオンの振る舞いに注目
 - ▶ エネルギー分布が歪み(原子核反跳)
 - ▶ 寿命が相対的に短い(原子核捕獲)
 - → 崩壊時間とエネルギー分布から統計的に決定

スピン偏極度

- 崩壊電子の放出方向はミューオンのスピンの方向と強い相関
 - → <u>ミューオンの運動方向と崩壊電子の放出方向</u>の間の 角度分布から決定



学術変革「地下稀事象」若手研究会 @富山大学五福キャンパス

水中での負ミューオン

- 酸素原子の電子軌道上で崩壊
 → 原子核を反跳
- 原子核に吸収される (18.4%)



スピン偏極度の減衰 (脱偏極)

Medium

Rock

大気と岩盤での減衰

- 宇宙線ミューオンは親中間子の静止系で完全偏極
- 伝搬中に周囲の物質では偏極情報を失わず、SK検出器まで到達する

崩壊直前(水中)での減衰

電荷によって減衰過程が異なる

正ミューオン

- ・ 反磁性ミューオンとして**偏極を保持して崩壊**
- ・ ミューオニウムを形成して崩壊 (脱偏極)
- 化学的な反応を経て崩壊 (脱偏極) → 全体の約28%が偏極を失う

負ミューオン

- 酸素原子の電子軌道に入った後、励起軌道からの遷移し崩壊 (脱偏極)
- K軌道まで遷移した後、周囲の電子を獲得し崩壊 (脱偏極)
 - → 全体の約95%が偏極を失う





運動方向

スピン方向

 π^+) $S_{\pi} = 0$

解析手法

MCシミュレーションの作成

- <u>電荷 × 完全偏極</u>の4種のMCサンプルを作成
- 電荷比と偏極を考慮して組み合わせ
 → 任意の電荷比と偏極をもつMC
- 崩壊時間、<u>エネルギー</u>、<u>角度(cos θ)</u>の分布を作成

測定手法

- 上記3つの分布を観測データとMCで比較
 正負ミューオンで偏極の絶対値を共通という仮定

$$\chi^2_{\rm Total}~(R,P_0^{\mu}) = \chi^2_{\rm Time} + \chi^2_{\rm Energy} + \chi^2_{\cos\theta}$$

$$\begin{cases} \chi_{\mathrm{Time}}^{2} = \sum_{i}^{n_{\mathrm{Time}}} \frac{\left(N_{i}^{\mathrm{Data}} - N_{i}^{\mathrm{MC}}\right)^{2}}{(\sigma_{i}^{\mathrm{Data}})^{2} + (\sigma_{i}^{\mathrm{MC}})^{2} + (\sigma_{i}^{\mathrm{Syst.}})^{2}} \\ \chi_{\cos\theta}^{2} = \sum_{i}^{n_{\cos\theta}} \frac{\left(N_{i}^{\mathrm{Data}} - N_{i}^{\mathrm{MC}}\right)^{2}}{(\sigma_{i}^{\mathrm{Data}})^{2} + (\sigma_{i}^{\mathrm{MC}})^{2} + (\sigma_{i}^{\mathrm{Syst.}})^{2}} \\ \chi_{\mathrm{Energy}}^{2} = \sum_{i}^{n_{\mathrm{Energy}}} \frac{\left(N_{i}^{\mathrm{Data}} - N_{i}^{\mathrm{MC}}\right)^{2}}{(\sigma_{i}^{\mathrm{Data}})^{2} + (\sigma_{i}^{\mathrm{MC}})^{2}} + \left(\frac{1-p}{\sigma_{i}^{\mathrm{E-scale}}}\right)^{2} \end{cases}$$

電荷	偏極度
正	1
正	-1
負	1
負	-1



解析結果



解析結果

他の実験結果との比較

SK検出器内で崩壊電子を生成する宇宙線ミューオンは、地表で約0.8TeV程度のエネルギーを持つ
 ミューオンの伝搬シミュレーション (MUSIC) から決定

電荷比

● 2つのシミュレーションと比較 → Honda fluxと良い一致 (< 1 σ)、 π Kモデルと1.9 σ

スピン偏極度

- Honda fluxと1.5 σ
- 1TeV領域ではユニークな測定となった





大気ッ予測シミュレーションへの寄与

電荷比

● 予測に制限を加えることは厳しいかもしれないが、新しい入力変数にはなり得る

スピン偏極度

● 1TeV領域でユニークな測定であるため、予測に新たな制限を課すことができる

大気ν予測の専門家に伺ったところ、"大きな改善を生むことはないだろう"という回答 測定と予測が1.5σ以内で一致していること 宇宙線ミューオンのエネルギーが高いこと、が理由



まとめ

- 大気ν振動のより詳細な測定のために、シミュレーションの不定性を削減した
 絶対Flux、Flavour比、ν/ν 比、エネルギー分布
 - ▶ 宇宙線ミューオンの測定からシミュレーションに制限を課すことが可能
- スーパーカミオカンデ検出器では、ミューオン-崩壊電子事象を観測することで 統計的に電荷比とスピン偏極度を測定できる
- 水中でのミューオンの偏極の減衰過程や崩壊過程を考慮したシミュレーションサンプルを作成し、
 データと定量的に比較
 ▶ 1 22 + 0.02 (state 1)
- SK検出器でストップする宇宙線ミューオンに対して、 電荷比とスピン偏極度を決定した

▶ 他の実験や予測と比較 → 予測と1~2σ程度での一致

論文として出版された PHYSICAL REVIEW D 110, 082008 (2024)
 https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.110.082008
 年次変化や方向依存性についても議論している

● 今後、大気ニュートリノ予測シミュレーションの専門家と議論を進める

学術変革「地下稀事象」若手研究会 @富山大学五福キャンパス

 $R_{\mu} = 1.32 \pm 0.02 \text{ (stat. + syst.)}$ $P_0^{\mu} = 0.52 \pm 0.02 \text{ (stat. + syst.)}$



15

スーパーカミオカンデでの宇宙線ミューオン関連のポスター発表

番号	発表者	タイトル
P07	藤田紗希 (IPMU)	スーパーカミオカンデにおける ミューオン束フィッターの開発とミューオンフラックスの測定
P08	前川雄音 (慶応大)	スーパーカミオカンデにおける 酸素原子核 <mark>ミューオン捕獲</mark> による放射性同位体の分岐比測定
P19	三木信太郎 (ICRR)	酸素原子核の <mark>負ミューオン捕獲</mark> 反応における中性子多重度の測定 <u>arXiv:2502.17002</u>

Back up

大気 νフラックス予測

17



ミューオン伝搬シミュレーション

MUSIC (Muon simulation code)





18





・10MeV付近にガンマ線が入り込む



πΚ モデル

・ 単純なフラックスの理論式の比

$$R_{\mu} = \frac{f_{\pi}}{\frac{1+1.1E_{\mu}\cos\theta/\varepsilon_{\pi}}{1+1.1E_{\mu}\cos\theta/\varepsilon_{K}}} + \frac{\eta f_{K}}{1+1.1E_{\mu}\cos\theta/\varepsilon_{K}}}{\frac{1-f_{\pi}}{1+1.1E_{\mu}\cos\theta/\varepsilon_{\pi}}} + \frac{\eta(1-f_{K})}{1+1.1E_{\mu}\cos\theta/\varepsilon_{K}}}$$

Systematic uncertainty



時間差 vs エネルギー





年次変化

- 2008年から2022年の観測データから1年毎に電荷比とスピン偏極度を測定
- 🌒 有意な周期変動は見られなかった





方向依存性

- *cosθ*毎、方角毎にサンプルを分けて、電荷比とスピン偏極度を測定
- 有意な変動は見られない、一方でより詳細な議論にはサンプルの統計が十分ではない

