

1. 本研究の目的

原子核によるミューオン捕獲事象

$$\mu^- + A(N, Z) \rightarrow B^*(N + 1, Z - 1) + \nu_\mu \quad [1]$$

分岐比 R_B

$B + \gamma$

R_C

$C + n + \gamma$

R_F

$D + p + \gamma$

$E + 2n + \gamma$

$F + \alpha + \gamma$

$\vdots$

原子核ミューオン捕獲は不安定な放射性同位体を生成し、スーパカミオカンデ(SK)では太陽ニュートリノ観測のバックグラウンド事象となる。

→ SKでミューオン核反応の研究が可能

SKでは酸素原子核に捕獲され、β崩壊する核種(¹⁶N, ¹⁵C, ¹²B)が検出される。

Isotope	Reaction	Q-value [MeV]	Half-life [s]
¹⁶ N	¹⁶ O(μ ⁻ , ν) ¹⁶ N	10.42	7.13
¹⁵ C	¹⁶ O(μ ⁻ , νp) ¹⁵ C	9.77	2.45
¹² B	¹⁶ O(μ ⁻ , να) ¹² B	13.37	0.0202

本研究は、¹⁶N, ¹⁵C および ¹²B の生成率および分岐比の世界最高精度の測定を実施した。

また、ミューオン原子核捕獲によるβ崩壊は検出器内で一様・等方的に起こるため、分岐比の理解により、将来実験の新たなエネルギー校正手段としての活用が期待される ex.) ハイパカミオカンデ

2. SKにおけるミューオン捕獲事象の検出

宇宙線 μ ~ 2 Hz

検出器を通り抜け

検出器内で停止 ~ 6000 /day

$\mu^+ : \mu^- = 1.32 : 1$

82% 電子に崩壊

18%** 酸素原子核に捕獲

各分岐比

¹⁶N ¹⁵C ¹²B ...

β崩壊 SKで検出

*H. Kitagawa et al., Phys. Rev. D 110, 082008 (2024).

**T. Suzuki et al., Phys. Rev. C 35, 2212 (1987).

SKに宇宙線ミューオンが飛来 一部ミューオンはSK内部で静止する

約500 /dayの頻度で 放射性同位体が生成される

静止ミューオンとβ崩壊事象のペアを探索することで、酸素原子核捕獲による放射性同位体の測定ができる

3. 放射性同位体事象の選択

静止ミューオンと同位体事象候補との距離分布

ミューオンから 0 - 25秒 100 - 125秒

distance from muon stop position[cm]

Decay time [sec]

同位体事象候補を静止ミューオンからの距離・時間で選択。(< 160 cm, < 25 s)

バックグラウンドを取り除いた同位体の崩壊時間・エネルギー分布を取り出せる。

再構成エネルギー分布

崩壊時間分布

4. ¹⁶N, ¹⁵Cの生成率・分岐比測定

χ^2 を用いて生成率を測定

$$\chi^2_{\text{Total}}(R_{16\text{N}}, R_{15\text{C}}) = \chi^2_{\text{Time}} + \chi^2_{\text{Energy}}$$
$$\chi^2_{\text{Time}} = \sum_i \frac{(N_i^{\text{Data}} - N_i^{\text{MC}})^2}{(\sigma_i^{\text{Data}})^2 + (\sigma_i^{\text{MC}})^2 + (\sigma_i^{\text{Syst.}})^2}$$
$$\chi^2_{\text{Energy}} = \sum_i \frac{(N_i^{\text{Data}} - N_i^{\text{MC}})^2}{(\sigma_i^{\text{Data}})^2 + (\sigma_i^{\text{MC}})^2} + \left(\frac{1-p}{\sigma_{\text{E-scale}}} \right)^2$$

・ミューオンの選択効率

・ミューオン電荷比[2]

・放射性同位体選択効率

を考慮して同位体の生成率・分岐比を計算

崩壊時間分布

再構成エネルギー分布

生成率 1σ region

SK-IV, V, VIの3期間で測定

結果 (SK-IV 2970日)

	¹⁶ N	¹⁵ C
生成率 [event/kton/day]	2.23±0.03	0.15±0.03
分岐比 [%]	10.9±0.3	0.7±0.1

5. ¹²Bの生成率・分岐比測定

崩壊時間分布

再構成エネルギー分布

生成率Δχ²分布

SK-IV, V, VIの3期間で測定

12Bは寿命が短いため、静止ミューオンから0.5秒以内の領域で探索。χ²を用いて生成率・分岐比を決定。(¹⁶N, ¹⁵Cの混入は4.の結果を使用)

結果 (SK-IV 2970日)

	¹² B
生成率 [event/kton/day]	0.28±0.01
分岐比 [%]	1.34±0.04

6. まとめ

水チェレンコフ検出器のSKでは酸素とミューオンの核反応の研究が可能。

ミューオンと酸素の核反応で生成される同位体 ¹⁶N, ¹⁵Cそして¹²Bの分岐比を測定した。¹⁶Nを世界最高精度で測定し、¹⁵C, ¹²Bは初めて分岐比の測定をした。

Other measurement:[1][3]

PHITS:[4][5], Geant4:[6]

Reference

[1] D. Measday, Phys. Rep. 354, 243–409 (2001).

[2] H. Kitagawa et al., Phys. Rev. D 110, 082008 (2024).

[3] B. Heisinger et al., Earth Planet. Sci. Lett. 200, 357 (2002).

[4] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913 (2013).

[5] S. Abe and T. Sato, J. Nucl. Sci. Technol. 54, 101 (2017).

[6] J. Allison et al., Nucl. Instrum. Meth. A 835, 186 (2016).