



学術変革領域「極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化」

2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)

ミューオン原子核物理

新倉潤

理化学研究所

仁科センター 核変換データ研究開発室

大気中の宇宙線の7割はミューオン



EXPACS: https://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html





(おさらい) ミューオンとは?

ゲージ粒子



Mass: 105.65682755(23) MeV/c² Charge : $+1(\mu^+), -1(\mu^-)$ Spin : 1/2 Size : $< 10^{-18}$ m Lifetime : 2.1969811(22) $\mu s(\mu^+)$ $2.197025(155) \ \mu s(\mu^{-})$ Decay Mode : $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_{\mu} + \nu_e$

 $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$

(c) Higgstan.com







正負ミューオンの物質中での振る舞い





https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/Radio-Frequency-muSR.aspx

新倉潤(理研仁科センター)

2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)





ミューオンと原子核の相互作用



新倉潤(理研仁科センター)

2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)

ミューオン原子核捕獲反応 (弱い相互作用)













新倉潤(理研仁科センター)

2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)

ミューオン原子捕獲とその崩壊

ミューオンX線







ミューオン原子捕獲





ミューオン原子捕獲とその崩壊





T. Okumura et al., Phys. Rev. Lett. 127, 053001 (2021).



K. Ninomiya et al., J. Comp. Chem. 19, 87 (2020).



ミューオン原子と原子核はほぼ同じ大きさを持っている

ミューオン原子1s状態



$m_{\mu} = 105.7 MeV/c^{2}$

新倉潤(理研仁科センター)





ミューオン原子の束縛エネルギー

ミューオン原子1s状態



$m_{\mu} = 105.7 MeV/c^{2}$

新倉潤(理研仁科センター)

2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)





ミューオン原子X線を測定すれば、原子核の大きさがわかる

ミューオン原子1s状態





。25/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会 (富山大学)



少し前に話題になった「陽子サイズパズル」も測定原理は同じ

Proton size puzzle



R. Pohl et al., Nature 466, 213 (2010).

新倉潤(理研仁科センター)





最近は半径に加えて、原子核の荷電分布や変形の測定などが行われている

荷電分布の測定 @阪大RCNP-MuSIC





arXiv:2204.03233 [nucl-ex].

四重極モーメントの測定 @PSI SµS



A. Antognini et al., Phys. Rev. C 101, 054313 (2020).



低エネルギーミューオン実験



世界の低速ミューオン施設(5施設)



ビームタイムは3-5日程度、年1,2回、実験毎に測定体系を考えます

2017.9@RAL-ISIS (UK)



2018.1@RCNP-MuSIC



新倉潤(理研仁科センター)

2019.1@RCNP-MuSIC



2022.8@PSI (Switzerland)



2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会 (富山大学)

2024.2@J-PARC MLF



2024.4@J-PARC MLF





ミューオン原子核捕獲反応

ミューオン崩壊とミューオン原子核捕獲





2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)

新倉潤(理研仁科センター)



Q: Huff factor ~1



ミューオン崩壊と原子核崩壊の競合



T. Yamazaki et al., Phys. Scr. 11, 133 (1975).

原子核捕獲が起きる確率は、 ミューオン1S軌道と原子核の波動関数の 重なりの大きさで決まる。





Kalliope µSR spectrometer @D1 area in J-PARC



J-PARCでのミューオン原子寿命測定実験



R. Mizuno et al., Phys. Rev. C submitted, arXiv:2501.05897 (2025).



機械学習によるミューオン原子寿命の包括的核データ評価



機械学習 = ガウス過程回帰

新倉潤(理研仁科センター)

H. Iwamoto et al., Phys. Rev. C accepted (2025). ミューオン核データ: https://ribf.riken.jp/muon/ (準備中)



29











2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)

ミューオン原子核捕獲反応

実際は原子核内の陽子と反応する

励起エネルギー: 5-50 MeV くらい?



どのような熱い原子核が生成されるのか、それはどのように崩壊するのか?





2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)



OMC : Ordinary Muon Capture





ミューオン原子核捕獲 (OMC) と *β* β 崩壊

D. Zinatulina et al., Phys. Rev. C. 99, 024327 (2019).

2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)







FIG. 1. Experimental arrangement of the counter telescope and cadmium-loaded liquid-scintillator tank.

B. Macdonald et al., Phys. Rev. 139, B1253 (1965).

2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)

中性子多重度の測定実験







中性子多重度から、複合核の励起エネルギーを予想する



新倉潤(理研仁科センター)

1中性子の束縛エネルギー = 7-8 MeV



インビーム放射化法による中性子多重度の測定



2025/3/7 第10回「極低放射能技術」研究会(富山大学)

In-beam activation setup



@RAL-ISIS



@RAL-ISIS



@Univ. Tokyo

M. Niikura et al., Phys. Rev. C. 109, 014328 (2024).



40

放射化法を使った中性子多重度の測定

20



20

40

新倉潤(理研仁科センター)

M. Niikura et al., Phys. Rev. C. 109, 014328 (2024).







中性子エネルギーの測定



2017,2018 @RCNP-MuSIC



新倉潤(理研仁科センター)

T. Y. Saito, PhD thesis, UTokyo (2023).



中性子スペクトルから複合核の温度を知る



新倉潤(理研仁科センター)

複合核からの蒸発中性子のエネルギースペクトル $f(E) = AE^{5/11} \exp\left(-\frac{E}{\theta}\right)$

θ: 複合核の温度~1.4 MeV for Pd (A~100)

cf. $\theta \sim 1.1$ MeV for Tl, Pb, Bi (A~200)

W. U. Schröder et al., Zeitschrift für Physik 268, 57 (1974).

$$\theta \propto \sqrt{\frac{E}{A}}$$

T. Y. Saito, PhD thesis, UTokyo (2023).









- ミューオンは第二世代の荷電レプトンで、負ミューオンは物質中で「重い電子」として振る舞う。
- 負ミューオンは、電磁気力によってミューオン原子を形成し、基底準位(1s)にあるミューオン原子の一部は 弱い相互作用によりミューオン原子核捕獲反応を起こす。
- ミューオン原子の分光により、原子核の大きさ(半径)や形を知ることができる。
- ミューオン原子捕獲反応についてはまだ未解明な部分が多く、最近の研究で反応によって生成される複合核 の温度や反応過程の理解が進んでいる。



まとめ









