

企画セッション（「シグマ」調査専門委員会主催、核データ部会共催）

「将来の核データ 次世代 JENDL に向けてー」

(2) ミューオン核データ

理化学研究所

新倉 潤

niikura@riken.jp

1. はじめに

近年ミューオンによる核反応は、ミューオン非破壊元素分析、核変換、医療用 RI 製造、放射線安全、半導体ソフトエラー、地球惑星科学等の様々な研究分野でその重要性が指摘されている。しかし、これらの研究の基盤となるミューオンと原子核の核反応データを網羅的に収録したデータベース（ミューオン核データ）は存在しない。そこで、2023 年頃から理化学研究所・九州大学・JAEA・東京大学・大阪大学・KEK の研究者から構成されるミューオン核データ開発チームを立ち上げ、次世代 JENDL への収録に向けた核データ開発を進めている[1]。計画開始時は 7 名で構成される開発チームであったが、その後様々な分野の研究者が参加し、現在は 13 名のチームメンバーと共に開発を進めている。

ミューオン核データの開発のキックオフとして、2023 年 12 月 14 日にシグマ専門調査委員会および理化学研究所仁科センター核変換データ研究開発室の共催で「ミューオン核データ研究会」が開催された[2]。この研究会では、ミューオン核データに関連する様々な分野での研究の現状を共有し、今後の核データ開発に向けた課題について議論された。研究会では下記 6 件の講演が行われた。

- 新倉潤（理化学研究所）「ミューオン核データ」
- 川瀬頌一郎（九州大学）「ミューオン原子核捕獲反応からの放出粒子の測定」
- 山口雄司（JAEA）「J-PARC 物質・生命科学実験施設における放射線安全と放射性核種生成確率の測定」
- 安部晋一郎（JAEA）「放射線挙動解析コード PHITS のミューオン輸送計算機能」
- 中島康弘（東京大学）「ニュートリノ原子核反応の精密理解を目指した原子核実験」
- 湊太志（九州大学）「ミューオン捕獲反応後の放出粒子エネルギーの分布と反跳エネルギー」

また、2024 年 3 月 27 日には、日本原子力学会 2024 年春の年会において核データ部会主催・シグマ調査専門委員会共催で企画セッション「ミューオン核データの進展」が開催された[3]。この企画セッションでは主に関連する実験・理論それぞれの研究成果が報告

され、また将来の核データ整備に向けた展望が議論された。この企画セッションでは、下記4件の講演が行われた。

- 新倉潤（理化学研究所）「インビーム放射化法によるミュオン核データの測定」[3]
- 川瀬頌一郎（九州大学）「ミュオン原子核捕獲反応の実験研究」[4]
- 湊太志（九州大学）「ミュオン捕獲反応の理論計算から見えた核データの新たな可能性」[5]
- 安部晋一郎（JAEA）「PHITS のミュオン輸送計算機能とその応用」[6]

上記二つの研究会では、これまで比較的独立して行われてきた様々な分野の研究者間の協力体制の構築、実験と理論の相互連携、今後の核データ評価手法や核データ開発指針等について活発な議論が行われた。

2. ミュオンと原子核の相互作用とミュオン核データ

負の電荷を持つミュオン（以下単にミュオンと記す）が物質中に停止すると、原子核のクーロン場に捕われてミュオン原子を形成し、基底準位の1s軌道までオーグジュ電子やミュオン原子X線を放出して段階的に遷移する。1s軌道にあるミュオンは一定の寿命を持ち、自然崩壊または原子核捕獲反応（以下、ミュオン捕獲と記す）によって消滅する。ミュオン捕獲の素過程は、主に原子核内の陽子とミュオンが弱い相互作用によって結びつき中性子とニュートリノを生成する反応、



であり、原子番号 Z 、質量数を持つ原子核 (A, Z) に対してミュオン捕獲が起こると、原子番号が一つ小さい原子核 $(A, Z-1)$ を形成する。



この反応においてミュオンの静止質量 ($106 \text{ MeV}/c^2$) の殆どはニュートリノが運動エネルギーとして持ち去り、残りのエネルギーは $5\text{-}50 \text{ MeV}$ 程度の励起状態にある原子核（複合核）の形成に使われると考えられている。反応により生成した複合核は、中性子・陽子・アルファ粒子などの粒子放出とガンマ線脱励起を伴い残留核へと変化する。

現在開発中のミュオン核データは、ミュオンによる核反応に関連する下記の5つのサブライブラリから構成される[1]。

- ① ミュオン原子X線のエネルギーと強度
- ② ミュオン原子の寿命（ミュオン捕獲率）
- ③ ミュオン捕獲による核種生成確率
- ④ ミュオン捕獲から放出される荷電粒子の放出確率とエネルギースペクトル
- ⑤ ミュオン捕獲から放出される中性子の放出確率とエネルギースペクトル

それぞれのサブライブラリに関連する先行研究や、最近の実験手法・理論モデルの開発状況については文献[1]や過去の核データニュース[3-6]等を参照されたい。

3. ミューオン捕獲反応の物理モデル

ミューオン核データ開発チームでは、ミューオン捕獲反応を記述する二つの物理モデルを採用している。一つは、安部（JAEA）らによって放射線挙動計算コード PHITS に実装されているミューオンと原子核の相互作用モデルである[7]。PHITS では、ミューオン捕獲過程で得られる原子核の励起状態を Singer モデル[8]で、直接過程から複合核に至る過程を原研版 QMD 模型 (Jaeri Quantum Molecular Dynamics, JQMD) [9]、複合核からの粒子放出過程を一般化蒸発モデル (Generalized Evaporation Model, GEM) [10]で記述する。もう一つの物理モデルは、湊（九州大学）らによって開発された、第 2 タムダンコフ近似 (Second Tamm-Dancoff approximation, STDA) 、二成分励起子モデル、Hauser-Feshbach モデルを組み合わせたミューオン捕獲反応理論[11]である。いずれのモデルも、ミューオン捕獲から直接過程や前平衡過程を経て複合核形成からの蒸発過程までを記述する物理モデルとして、これまで中性子入射反応等で開発されてきたモデルをほぼそのまま利用している。ミューオン捕獲は中性子入射反応と比べて生成される原子核に持ち込まれる角運動量や励起エネルギーが異なるが、これらの物理モデルがミューオン捕獲にも適応できるのか、という点はこれからミューオン核データ開発を進めてく上で最も興味深いところである。

4. Si 原子核のミューオン捕獲反応の測定

ミューオン捕獲反応の実験測定は 1980 年代までは精力的な研究がなされていたが、その後は様々な要因により研究が途絶えてしまい、今世紀に入ってからほとんど研究がなされていない。この「忘れられた研究」が再び脚光を浴びるようになった一つのきっかけは、宇宙線ミューオンによる半導体デバイスのソフトエラー研究である。ソフトエラーとは電子機器の一過性の誤動作のことであり、主に宇宙線が半導体に入射することにより生じるエネルギー損失に起因したビット反転に由来すると考えられている。従来は、宇宙線に含まれる中性子が地上におけるソフトエラーの主要因と考えられてきたが、近年の半導体デバイスの微細化や構造変化に伴い、ミューオンが中性子に代わりソフトエラーの主要因となる可能性が示唆されている。宇宙線ミューオン起因のソフトエラーは、主に Si 原子核のミューオン捕獲による荷電粒子放出過程に起因すると考えられており [12]、近年 Si 原子核のミューオン捕獲に関する理論および実験研究が精力的に行われている。そのため、Si 原子核はこの核反応を研究する上で重要なベンチマーク核となっている。本稿では、特に最近の進展についてその概要を紹介する。

4.1. ミューオン原子寿命測定と核データ評価

水野（東京大学）らを中心とした研究チームが、2024 年 4 月に J-PARC MLF において Si 原子核のミューオン原子寿命測定実験を実施した。Si の安定同位体濃縮標的 ($^{28,29,30}\text{Si}$)

のミュオン原子の寿命の測定を、D1 エリアのミュオンスピン回転/緩和/共鳴 (μ SR) 測定用のスペクトロメーターを使用して測定した。ミュオン原子の寿命はこれまで天然存在比の標的については多く測定がなされてきているが[13]、ミュオン原子寿命の同位体依存性を測定したデータは非常に少ない。測定された $^{28,29,30}\text{Si}$ のミュオン原子寿命から、PHITS に実装されている Primakoff の経験式と比べて比較的穏やかな同位体依存性を持つことが明らかとなり、この経験式に代わる新たな核データ評価手法の必要性が示された。

この実験をきっかけに、これまで知られているミュオン原子寿命について核データ評価が進められている。現在、岩元大樹 (JAEA) らにより機械学習の手法を利用した核データの包括的な評価手法の開発が行われている。この新たな核データ評価手法の詳細は、2024 年日本原子力学会秋の年会の予稿集を参照されたい[14]。

4.2. ミュオン捕獲から放出される荷電粒子測定

近年、川瀬 (九州大学) らを中心とした研究チームにより、ミュオン捕獲からの放出荷電粒子のエネルギー測定に特化した検出器システムが開発された[15]。この検出器システムは、高エネルギーおよび低エネルギー用の二種類の荷電粒子検出器を組み合わせることで広いエネルギー範囲の荷電粒子測定を可能とする。高エネルギー荷電粒子検出器は Si 検出器と CsI シンチレーターで構成され、 ΔE -E 法を用いた粒子識別により最大 100 MeV までの荷電粒子を測定できる。また低エネルギー荷電粒子の測定には、中性子核変換ドーピングシリコン半導体検出器 (nTD-Si) の波形解析による粒子識別手法を用いることで、およそ 3 MeV までの低いエネルギーの荷電粒子の測定が可能となっている。2023 年 7 月に、この検出器システムを使用した初めての実験をイギリス RAL-ISIS 施設において実施し、その最新の解析結果は、北藤 (九州大学) らにより 2024 年日本原子力学会秋の年会で報告された[16]。

4.3. ミュオン捕獲で生成する残留核の生成確率測定

ミュオン捕獲による核種生成確率の測定は、主にインビーム放射化法[17]を利用して行っている。Si 原子核の測定は、水野らにより進められており、2022 年 2 月に J-PARC MLF にて、また 2023 年 8 月にイギリス RAL-ISIS にて放射化測定実験を実施した。放射化法はその名の通り放射性同位体のみ、その核種生成数を測定することができる。インビーム放射化法は、J-PARC MLF や RAL-ISIS のミュオン施設で提供されるパルスミュオンビームの時間特性を使うことで、数十 ms 以上の短寿命放射性同位体の生成数を測定することが可能である。この新しい手法により、Si の安定同位体濃縮標的 ($^{28,29,30}\text{Si}$) それぞれについて残留核種の生成確率を得ることができた。

4.4. 物理モデルとの比較

放出荷電粒子のエネルギースペクトルと核種生成確率の測定結果は、二つの物理モデルとの比較を行った。PHITS 計算は荷電粒子の特に高いエネルギーの生成確率を過小評価する一方で、核種生成確率については全体的に実験値を非常によく再現している。一方で、ミューオン捕獲反応理論[11]では、荷電粒子のエネルギースペクトルを広範囲において非常によく再現するが、核種生成確率については中性子放出確率を過大評価する傾向が見られた。このように、ミューオン捕獲の反応機構を記述するためには、単一の物理量だけではなく、2節に示したミューオン核データの全てのサブライブラリの測定を行いそれらを統一的に理解する必要がある。

5. まとめと今後の展望

現在、次世代 JENDL への収録に向けたミューオン核データの開発を行っている。2023年に発足した開発チームでは、半導体デバイスのソフトウェア研究を契機として特に Si 原子核をベンチマーク核としたミューオン捕獲の実験・理論の研究開発を進めている。また、Si 以外の原子核についても広い核領域での様々な物理量の実験計画、理論モデルの改良、核データ評価手法とデータフォーマットの検討などを行っている。開発チームでは、今後 5,6 年かけて主要核種についての核データを順次公開していく予定である。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、ミューオン核データ開発チームの安部晋一郎氏 (JAEA)、岩元大樹氏 (JAEA)、川瀬頌一郎氏 (九大)、河村成肇氏 (KEK)、北藤健太郎氏 (九大)、友野大氏 (阪大/KEK)、松崎禎市郎氏 (理研)、水野るり恵氏 (東大)、湊太志氏 (九大)、山口雄司氏 (JAEA)、渡辺幸信氏 (九大) らとの多くの議論とご協力をいただきました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] M. Niikura et al., Proc. Symp. Nucl. Data 2023, arXiv:2403.19965.
- [2] <https://indico2.riken.jp/e/muon2023>
- [3] 新倉潤, 核データニュース No. 138, 1-7 (2024).
- [4] 川瀬頌一郎, 核データニュース No. 138, 8-13 (2024).
- [5] 湊太志, 核データニュース No. 138, 14-23 (2024).
- [6] 安部晋一郎, 核データニュース No. 138, 24-31 (2024).
- [7] S. Abe and T. Sato, J. Nucl. Sci. Technol., 54, 101 (2017).
- [8] P. Singer, Il Nuovo Cimento, vol. 23, pp. 669-689 (1962).
- [9] K. Niita et al., Phys. Rev. C 52, 2620 (1995); T. Ogawa et al., Phys. Rev. C 92, 024614 (2015).
- [10] S. Furihata, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B 171, 251 (2000).
- [11] F. Minato et al., Phys. Rev. C 107, 054314 (2023).

- [12] S. Manabe et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 65, 1742 (2018).
- [13] T. Suzuki et al., *Phys. Rev. C* 35, 2212 (1987).
- [14] 岩元大樹 他, 日本原子力学会 2024 年秋の大会 予稿集 2F15 (2024).
- [15] S. Kawase et al., *Nucl. Instrum. Methods A* 1059, 168984 (2024).
- [16] 北藤健太郎 他, 日本原子力学会 2024 年秋の大会 予稿集 2F05 (2024).
- [17] M. Niikura et al., *Phys. Rev. C* 109, 014328 (2024).