

企画セッション（核データ部会主催・「シグマ」調査専門委員会共催）
「ミューオン核データの進展」

(2) ミューオン原子核捕獲反応からの放出荷電粒子測定

九州大学
大学院総合理工学研究院
川瀬 頌一郎
kawase@aecs.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

筆者は日本原子力学会 2024 年春の年会の企画セッション「ミューオン核データの進展」の中で「ミューオン原子核捕獲反応からの放出荷電粒子測定」というタイトルで講演を行った。本稿では、まずミューオン原子核捕獲反応の粒子放出エネルギースペクトルの特徴と測定データの現状について概観する。そして筆者らが英国ラザフォードアップルトン研究所において行ったミューオン原子核捕獲反応からの放出粒子のエネルギースペクトル測定について簡単に紹介する。

2. ミューオン原子核捕獲

物質中に停止した負ミューオンは、原子核の電場に捉えられミュオニック原子を形成した後、一定の確率でミューオン原子核捕獲反応(μNC : muon nuclear capture)を引き起こす[1] (図 1)。この反応で原子核はミューオンを捕獲し、弱い相互作用によって核内の陽子 1 つが中性子に変わる。この際、ミューオンの質量エネルギーはその多くがミューオンニュートリノによって持ち去られるが、残りのエネルギーが原子核の励起に使われる。この励起状態からの脱励起過程では中性子やガンマ線が主に放出されるが、陽子や α 粒子等の軽荷電粒子も小さな確率ながら放出されることが知られている。

放出される粒子のエネルギースペクトル形状は μNC に関わる複数の過程の詳細を反映していることがわかっている[2]。10 MeV 以下の低エネルギー粒子は複合核形成からの蒸発過程によって主に放出される一方で、10 MeV 以上の高エネルギー粒子は直接過程や前平衡過程に起因し、特に核内核子相関や中性子交換カレント(MEC)の顕著な影響があると考えられている[3,4]。そのため、 μNC の反応機構を理解するためには、放出粒子のエネルギースペクトルを幅広いエネルギー範囲で詳細に測定することが不可欠である。

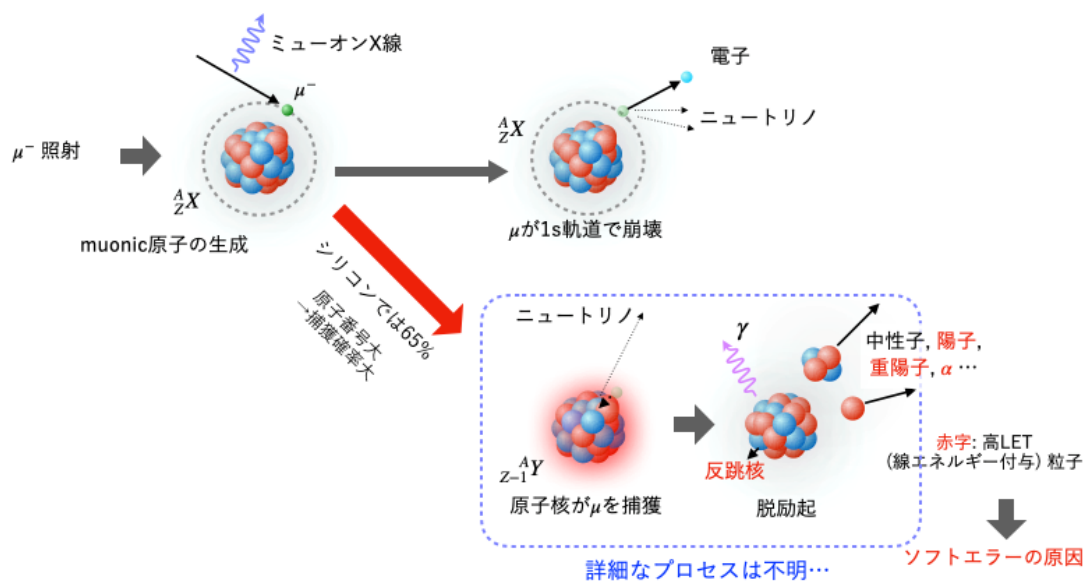


図1 ミューオン原子核捕獲のプロセスの概念図

ミューオン原子核捕獲反応による荷電粒子放出エネルギースペクトル測定は原子核物理の観点からだけではなく、応用面においても重要である。例えば、J-PARC MLF で実施された半導体デバイスへのミューオン照射実験では、半導体デバイス内の Si 原子核における μ NC による荷電粒子放出がソフトウェアの原因となる可能性が示唆されている[5]。放出荷電粒子のエネルギーが異なれば半導体デバイス中の線エネルギー付与も変化する上に、 μ NC によって高エネルギー荷電粒子が放出された場合、同時に複数のメモリセルでエラーを発生させ、通常のメモリ訂正アルゴリズムの適用が不可能になる multiple cell upset (MCU)を引き起こす可能性がある。したがって、地上に遍く降り注ぐ宇宙線ミューオンに起因するソフトウェアの発生率の高精度な評価には、Si 原子核における μ NC によって放出される荷電粒子について、広いエネルギー範囲でのエネルギースペクトル測定が必要である。

3. ミューオン原子核捕獲反応からの荷電粒子放出測定データの現状

μ NC からの放出粒子のうち、中性子のエネルギースペクトルについては 1980 年代までに様々な原子核を標的とした測定が行われている。いずれの標的においてもスペクトルに顕著な構造は見られず、放出エネルギーが増加するにつれて中性子放出確率は指数関数的な減衰を示すことがわかっている。

一方で、 μ NC からの荷電粒子放出の測定例は極めて少ない。 μ NC から放出される荷電粒子のエネルギーの多くは数 MeV 程度とエネルギーが低く飛程が短いため、物質中に入射するとすぐに停止してしまう。そのため、粒子識別やエネルギー測定が難しく、初

期の原子核乾板による AgBr の μ NC 測定[6]を除いて、長い間 30 MeV 程度以上における荷電粒子スペクトルしか測定されていなかった[7,8,9]。2020 年代に入り、新たに μ NC からの荷電粒子測定が 3 件報告された[10,11,12]。以前の測定に比べて幅広いエネルギー範囲におけるエネルギースペクトルが取得され、特に Edmonds らによる PSI での測定[11]では検出器アレイを用いた測定としては初めて α 粒子のエネルギースペクトルが測定された(図 2)。しかしながら、複合粒子、特に α 粒子については低エネルギー領域のエネルギースペクトルの情報が不十分であり、 μ NC 反応機構の議論や高 LET 粒子の発生量が重要となる半導体デバイスにおけるソフトエラー率の高精度評価のためには、さらに低いエネルギーまでのスペクトルの測定データが望まれる状況であった。

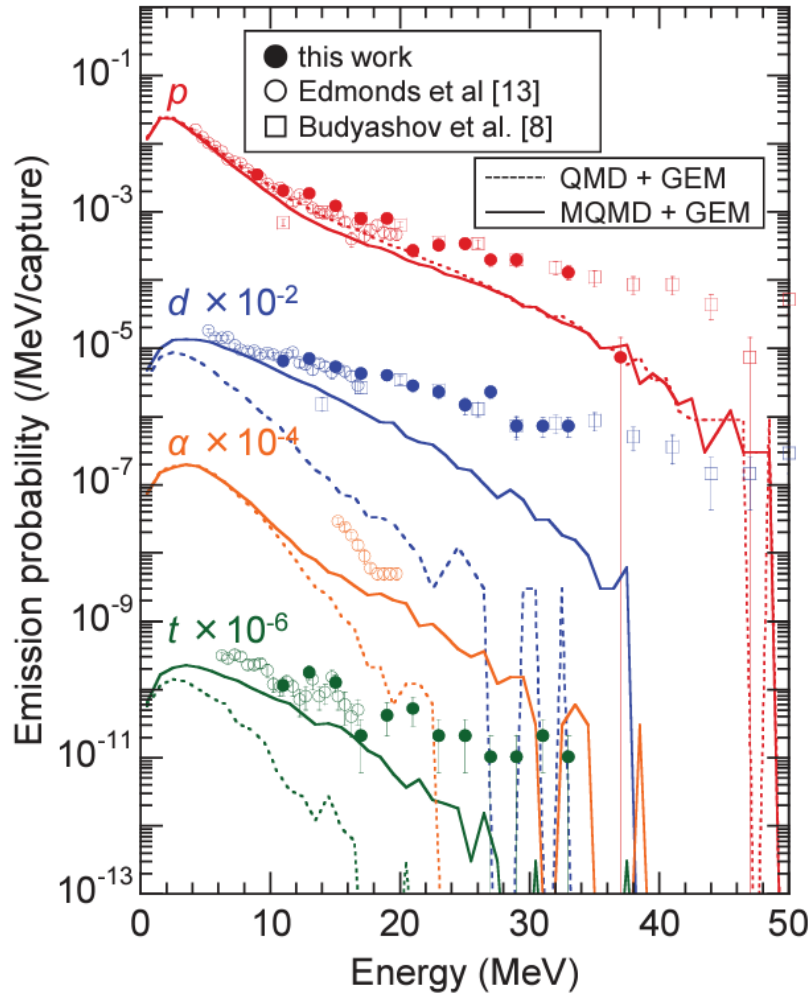


図 2 Si における μ NC から放出される荷電粒子エネルギースペクトルの測定データ [12](引用記号は引用元論文のもの)

4. RAL における μ NC からの放出荷電粒子のエネルギースペクトル測定実験

前述のような状況のなか、筆者らは μ NC 反応機構の理解および宇宙線ミューオン起因の半導体デバイスソフトエラー率高精度評価のための基礎データ取得を目的とし、Si における μ NC から放出される荷電粒子のエネルギースペクトル測定実験を行った。実験は英国ラザフォード=アップルトン研究所(RAL)にあるパルス中性子・ミューオン施設 ISIS の RIKEN-RAL 施設[13]において実施した。本実験は当初は 2020 年に実施予定であったが、コロナ禍が直撃したことと、その直後に RAL-ISIS のアップグレードが行われたことがあり、結果として 3 年遅れの 2023 年 7 月の実施となった（その分、十分に余裕を持ったスケジュールでの検出器開発により自信を持って測定ができたので、我々にとっては“災い転じて福となす”であったのかもしれない）。

本実験で用いた検出器体系の概観図を図 3 に示す。標的中で大部分が停止するようエネルギーを下げた負ミューオンビームを Si 標的に照射し、 μ NC によって発生した荷電粒子を Si 標の上流側に設置した検出器テレスコープにより検出した。既往測定より広いエネルギー範囲の荷電粒子を検出・識別するため、本実験では低エネルギー用と高エネルギー用の 2 種類の検出器テレスコープを組み合わせた検出器体系を用いた。低エネルギーテレスコープでは中性子核変換ドーピング(nTD) Si 検出器を用いた波形解析法[14]により、高エネルギーテレスコープでは Si 検出器と CsI シンチレータを用いた ΔE -E 法により粒子識別を行った。

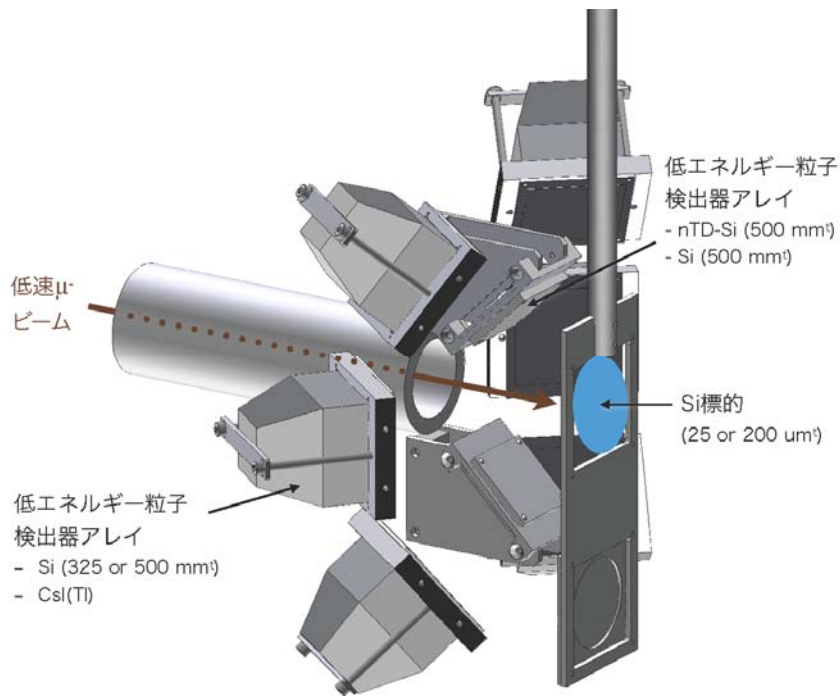


図 3 RAL で実施した Si における μ NC からの荷電粒子測定実験で用いた検出器体系

低エネルギーテレスコープによる粒子識別図の一例を図 4 に示す。横軸はシリコンの信号電荷から求めた荷電粒子の運動エネルギー、縦軸は検出器の立ち上がりの速さを表す最大電荷量と呼ばれる量である。これらの相関により、 μ NC によって発生する低エネルギー荷電粒子の識別が可能である。本実験データは鋭意解析中であるが、既存データより広いエネルギー範囲で陽子、重陽子、三重陽子および α 粒子のエネルギースペクトルが取得できる見込みである。今回取得した測定データは μ NC 反応モデルの検証や高精度化に有用であり、これにより宇宙線ミュオン起因ソフトウェア発生率の高精度評価へ貢献することが期待される。

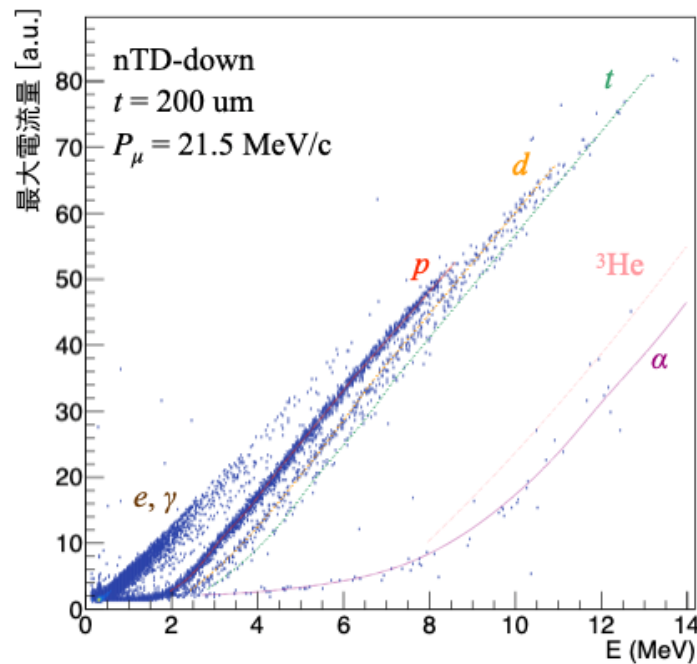


図 4 低エネルギーテレスコープによる粒子識別図の一例

5. おわりに

μ NC によって放出される荷電粒子エネルギースペクトルのデータは原子核研究のみならず、半導体デバイスにおける宇宙線ミュオン起因ソフトウェア発生率評価の観点からも重要である。現状では低エネルギー荷電粒子放出や α 粒子放出についての測定データが欠乏している。そのため、 μ NC 反応機構のさらなる理解のためには様々な原子核における μ NC からの放出粒子のエネルギースペクトルを系統的に測定し、理論モデルとの比較を行う必要がある。今回、nTD-Si 検出器を用いて低エネルギーの荷電粒子の識別・エネルギー測定が可能な検出器系を開発し、Si 原子核における μ NC によって放出される荷電粒子のエネルギースペクトルの測定を行った。 μ NC からの放出荷電粒子測定の第 2 弾として、こちらも半導体デバイスに使用されている銅について μ NC からの放出荷電粒

子測定を考えている。今後も様々な原子核における μNC からの放出粒子のエネルギースペクトル測定を行っていくとともに、検出器系の立体角カバレッジを拡大するアップグレードを行い、 μNC から放出される複数の荷電粒子のコインシデンス測定（実現すれば世界初）にも挑む予定である。また、今回開発した低エネルギー荷電粒子の識別およびエネルギー測定ができる検出器体系は、 μNC 測定においてのみならず、低エネルギー荷電粒子の発生する核反応測定においても有用である。今後、低エネルギー荷電粒子を生じる核反応測定にも今回開発した検出器体系を活用していきたいと考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19H05664, JP21H01863 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] D. Measday, Phys. Rep. **354**, 243-409 (2001).
- [2] W.U. Schröder et al., Z. Phys. **268**, 57 (1974).
- [3] M. Lifshitz, P. Singer, Nucl. Phys. A **476**, 684–700 (1988).
- [4] F. Minato, T. Naito, O. Iwamoto, Phys. Rev. C **107**, 054314 (2023).
- [5] S. Manabe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. **65**, 1742–1749 (2018).
- [6] H. Morinaga, W.F. Fry, Nuovo Cimento Ser. **9** (10) (1953) 308.
- [7] Yu. G. Budyashov et al., Sov. Phys. (JETP) **33**, 11 (1971).
- [8] M. P. Balandin et al., Sov. J. Nucl. Phys. **28**, 297 (1978).
- [9] K.S. Krane et al., Phys. Rev. C **20**, 1873 (1979).
- [10] A. Gaponenko et al., Phys. Rev. C **101**, 035502 (2020).
- [11] A. Edmonds et al., Phys. Rev. C **105**, 035501 (2022).
- [12] S. Manabe et al., EPJ Web. Conf. **284**, 01029 (2023).
- [13] A. D. Hillier et al., Phil. Trans. R. Soc. A **377**, 20180064 (2019).
- [14] S. Kawase et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **1059**, 168984 (2024).