

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K12495

研究課題名（和文）ミュオンニュートリノ質量測定に向けた低速ミュオニックヘリウムビーム開発

研究課題名（英文）Development of muonic helium beam for measuring neutrino mass

研究代表者

友野 大（Tomono, Dai）

大阪大学・核物理研究センター・特任助教（常勤）

研究者番号：40415245

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ヘリウム3原子(^3He)とミュオンの反応で三重水素とミュオンニュートリノの崩壊調べることで運動学的にニュートリノ質量を測定する目標のために、ミュオニックヘリウム3原子($^3\text{He}\mu^-$)を生成してビームとして取り出すことを目標とし、その前段階として ^4He にミュオンを照射して止まった原子を引き出すための実験装置の設計を進めることができた。実験装置のうち真空層の転用にともなう改良、真空層周辺の整備までは実施できた。大阪大学で想定していたミュオンビーム照射はミュオン源故障のため期間内にはできなかったが、今後に成果がでるよう引き続き準備を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

残念ながら照射はビームトラブルで未実施のため、研究としては実施した装置設計、製作、実験検討での成果ではあるが、ビーム生成が可能になった際には学術的意義として運動学的な質量測定で精度向上が考えられる。さらに社会的意義として、ビーム生成手法を応用することで低速ミュオン原子ビームとして材料分析等の応用の可能性について、現段階では検討に至ったので今後の研究継続で明らかにする。

研究成果の概要（英文）：In order to measure the neutrino mass kinematically by investigating the decay of triton and muon neutrinos in the reaction of helium-3 (^3He) and muons, muonic helium-3 atoms ($^3\text{He}\mu^-$) are produced and extracted as a beam. As a preliminary step, ^4He is irradiated with muons to extract the stopped atoms. The design of the experimental apparatus to extract the stopped atoms could be proceeded. Among the experimental apparatus, improvements associated with the vacuum chamber and its surrounding components were completed. Although the muon beam irradiation that had been planned at Osaka University could not be carried out during the period due to the muon source trouble, we would continue preparations for future achievement.

研究分野：ミュオン科学、量子ビーム

キーワード：ミュオン ミュオン原子

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レプトンの第2世代である素粒子ミュオンは、標準理論の検証やそれを超える新物理の探索をするための実験にとって非常に有用なプローブであり、崩壊分岐比、質量、寿命などさまざまな固有量の精密測定により基礎物理の精度向上に寄与している。

ところで、すでに質量を持つことが知られているニュートリノに関しては、制約はあるが運動学的にミュオンニュートリノの質量を測定する方法がある。過去には同様の測定がパイ中間子崩壊プロセスで行われている。しかし、この方法では高速のパイ中間子と高速のミュオンを捕まえるため測定精度が悪く、高精度での測定のためにはあらたな方法が必要となる。これを後述のビームと一体化した方法で実現できるかどうかが問題になる。

2. 研究の目的

原理的には入射粒子と崩壊生成物の運動量を精密測定することによって、運動学的に計算することで質量が求められる。高精度での測定するためには、2体崩壊など運動学的に簡単に記述できること、崩壊前後の粒子の運動量が決定できること、粒子の質量が精度よく決まっていることが求められる。ミュオンニュートリノに関しては、90年代に粒子を用いた $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_\mu$ の崩壊プロセスを用いた測定が最も高精度で測定されている。質量との運動学的な関係は

$$m_\nu^2 = m_e^2 + m_\mu^2 - 2m_e (m_\mu^2 + p_\mu^2)^{1/2}$$

となり、測定値としては m_ν と μ の質量、 μ の運動量に依存し $m_\nu = -0.016 \pm 0.023$ (K. Assamagan, et al., Phys. Rev. D53 (1996) 6065.), $m_\nu \sim 170$ keV が現在までの測定値の上限である。我々の目標ではこの上限を更新するような方法を考案することが目標である。そのためには

崩壊とは全く独立した原子核標的へのミュオン捕獲反応を用いた測定手法を考えた。特に、後述するヘリウムにミュオンを束縛した状態のビームを作ることによって実現させるため、入射ビーム開発に取り組む。さらにビーム開発を行うことで、このビームが新たな応用研究に利用できないかも本研究では検討課題である。

3. 研究の方法

レプトンの崩壊とは独立した、原子核標的を用いた新たな測定方法を考える。

原子核がミュオンを捕獲した際の放出粒子が少ない方が実験的には高精度測定が容易である。

1) ${}^6\text{Li} + \mu^- \rightarrow {}^6\text{Li}_\mu + {}^3\text{H} + {}^3\text{H} + \nu_\mu$ および 2) ${}^3\text{He} + \mu^- \rightarrow {}^3\text{He}_\mu + {}^3\text{H} + \nu_\mu$ 、 ${}^3\text{He} + \mu^- \rightarrow {}^3\text{He}_\mu + d + n + \nu_\mu$ が提案されているが、このうち、1) は三体崩壊であり、また統計が少ないことが示唆されているので、2) の ${}^3\text{He}$ の二体崩壊に着目し、崩壊と同様反応前後の運動量測定を行い質量を決定する。ミュオン、 ${}^3\text{He}$ (t) の質量は ppm レベル以下の精度で決定されており、終状態の t のエネルギーが測定精度を決める。

ところで、 ${}^3\text{He}$ 標的は物質量が限られるため、ミュオンを止める標的と t の検出器を一体化したセットアップを構築することが非常に難しい。そこで本提案では新しく運動量可変な ${}^3\text{He}_\mu$ ビームを実現することを考えた。これにはいくつかの方法が考えられるが、1つには薄い重水素 (d_2) 標的を用いて ($d\mu d$) 分子を生成し、核融合反応によって ${}^3\text{He}$ やミュオンを伴ったまま低速な ${}^3\text{He}_\mu$ を生成する方法、イオン源で生成する ${}^3\text{He}$ にミュオンを合わせて照射して飛行中に生成する方法、また高価ではあるが ${}^3\text{He}$ にミュオンを止める方法などある。反応や引き出し方法を考慮すると非常に難しいものが多い。

これらの方法でビームを生成するには装置の制約や実現性にも克服すべきいろいろな問題があることがわかり、まずは引き出しを確実にを行うためにも標的として ${}^3\text{He}$ の代わりに入手しやすい ${}^4\text{He}$ を使って、 ${}^4\text{He}$ にミュオンを止めることによって ${}^4\text{He}_\mu$ のビームを作ることから開始することとした。この方法で引き出すことができれば、引き出し電圧によってエネルギーをコントロールできる。

4. 研究成果

装置は生成を行うガスチャンバーと引き出し電極からなるが、全てを予算内で賄うことは難しいので他実験で利用していた転用可能なチャンバーを部分的に再利用した。特にビーム生成

部に関しては既存の引き出し電極の転用で進めることとした。ただし、元々使用していたビームラインが全く異なるため、ビームラインに接続するための改造と電極の利用のための装置改造等を行い、真空装置などの購入を進めて、大阪大学での実験の実施に向けた整備を行った。また改造した装置のシミュレーションによる評価を進めているところである。

実際のビーム試験に関しては、大阪大学核物理研究センターの連続状ミュオンビームを用いて行うこととした。ただし、大阪大学のミュオンビームは現在ソレノイド電磁石の不具合があり修理を行なっているためミュオンビーム供給ができていない。そのため、残念ながら今回の申請中には準備までで照射まで行くことができなかったが、ミュオンビーム供給再開時は実験ができるよう引き続き準備を進めていく予定である。また将来的にはミュオン原子の ^4He 、 ^3He がビーム化できるよう引き続き基礎的な研究を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 友野大
2. 発表標題 Muon Spectroscopy with negative and positive DC muon beams at RCNP-MuSIC
3. 学会等名 Material Research Meeting 2021 (MRM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dai Tomono
2. 発表標題 New DC muon source MuSIC-RCNP at Osaka University
3. 学会等名 Hyperfine Interactions and their Applications 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------