

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21872

研究課題名（和文）ペニングトラップを用いたミュオン精密測定手法の開発

研究課題名（英文）Development of muon penning trap experiment

研究代表者

飯沼 裕美（Inuma, Hiromi）

茨城大学・理工学研究科（理学野）・准教授

研究者番号：60446515

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：ミュオン粒子やミュオン原子の質量 $m$ や磁気モーメントの大きさを決める $g$ 因子をペニングトラップ実験によって世界最高精度で検出する実験構想を白紙状態から練りあげた。実験にかかる技術的な課題の調査、開発項目の洗い出しを行い概念設計をまとめること、電子や中性子ではおなじみだが、ミュオン粒子では前例のない「単独粒子の電磁場内に捕獲する」ためのペニングトラップ装置の開発を行い、短寿命荷電粒子の精密計測の基礎実験技術の確立に取り組んだ。2019年に捕獲後の粒子状態検出手法検討のため国際シンポジウムを開催し、高電圧チェンバーを詳細設計した。更に、大型予算（基盤S）の獲得につながる基礎研究成果にまとめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界最高強度の陽子ビームから生成される高品質ミュオンビームを駆使した、ほぼ静止状態のミュオン粒子の電磁場内の捕獲は、前例のない実験となる。この技術開発はミュオンに留まらず、さらに重く不安定な短寿命荷電粒子の精密計測の基礎実験技術の確立につながる。強磁場中に設置する高周波高電圧チェンバーの技術は、基礎物理実験だけでなく、医療用MRIで用いられる高周波磁場調整技術とも関連する。本研究では、電磁場計算精度0.1ppmを達成；原理的に超高精度で電磁場制御できるを確認した。実機製作に向けた設計ツールを一般化して医療分野を始め、精密電磁場制御を必要とする科学分野への波及効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：We devised an experimental concept to detect the  $g$ -factor which is related with the mass of muons and muonic atoms, and the magnetic moment with the world's highest accuracy by the Penning trap experiment. Investigate technical issues related to experiments, identify development items and summarize conceptual design, develop penning trap device to capture unprecedented in electromagnetic field of single particle. In 2019, an international symposium was held to study the particle state detection method after capture, and the high-voltage chamber was designed in detail. Furthermore, we have summarized the basic research results that will lead to the acquisition of a large budget (grants-in-Aid Kiban-S).

研究分野：基礎物理素粒子実験

キーワード：ミュオンペニングトラップ 高電圧チェンバー 精密電磁場解析

### 1. 研究開始当初の背景

ペニングトラップ実験は荷電粒子の持つ物理量の精密測定には最も適した方法で、広く普及している。しかし、これまでミュー粒子に適用されることはなかった。冷却ミュー粒子が存在しなかったこと、ミュー粒子が2マイクロ秒と短寿命であるためである。本研究では、ミュー粒子を電磁場内に捕獲するためのペニングトラップ装置の開発を行う。この装置を用いて短寿命荷電粒子の精密計測の基礎実験技術を確立させる。さらに高精度での測定にむけて乗り越えるべき課題を明らかにし、その解決方法を探る。

ミュー粒子およびミュオニックなイオンの精密測定を行うことは、標準模型では説明のつかない物理実験結果を裏に潜む新しい物理への取っ掛かりを探ることである。

まず第1に「ミュー粒子のg因子からのズレ (Muon g-2) の実験値と標準理論からの予言値の相違の解明」である。1990年代に欧米で繰り返し行われた実験結果と理論値の3~4の相違は未だ謎のままであり、J-PARCに於いても、Muon-Hラインでmuon g-2/EDM実験(E34)計画が進行中である。一番の特徴は、世界最強のパルスミュオンビームを利用した超低速ミュー粒子ビームを利用できることであり、その結果、従来方式とは異なるユニークな実験手法を採用している。

第2に「陽子の荷電半径の謎」である。ミュー粒子を実験プローブとして用いることができる。陽子の周りに負電荷ミュー粒子を束縛させた「ミュー粒子水素原子」のスペクトルをQEDの理論値と比較することで、陽子の荷電半径を決めることができる。他の手法；陽子電子の比弾性散乱実験や、水素原子のスペクトル測定から決めた結果はいずれもQEDの理論値とは大きく乖離しており、より単純な系での精密測定を待たねばならない状況である。ミュー粒子はその崩壊においてパリティが破れ、スピンの状態を自ら語る事が可能な、基礎物理に最適な素粒子である。これを、大強度かつ、クリーンなミュー粒子ビームを実現するJ-PARCは、ミュー粒子をプローブにする基礎実験のメッカになるだろう。

### 2. 研究の目的

本研究では、ミュー粒子を単独で電磁場内に捕獲するためのペニングトラップ装置の開発を行う。この装置を用いて短寿命荷電粒子の精密計測の基礎実験技術を確立させる。さらに高精度での測定にむけて課題を明らかにし、解決方法を探る。そして、本計画が、J-PARCがミュー粒子を用いた基礎物理実験を聖地としての立ち位置を確立する決定打になると期待する。

J-PARCミュオンビームラインで行うべき基礎物理実験の筆頭は、「大強度ミュー粒子捕獲(トラップ)実験」と考える。素粒子物理、原子核ハドロン物理の両コミュニティの共通の興味が凝縮した物理結果を期待できる。我々は、現在、ミュー粒子を単独で電磁場内に捕獲するためのペニングトラップ装置の開発を立ち上げに取り組んでいる。ペニングトラップ実験は荷電粒子の持つ物理量の精密測定には最も適した方法であり、ペニングトラップの技術自体は確立している。例えばCERNでの反陽子ペニングトラップ実験で反陽子g因子を世界最高精度で測定した実績がある。この技術を、質量が陽子の9分の1のミュー粒子にもほぼソックリそのまま適用できるのではないかと？その場合、トラップの際に最も大きなネックであるミュー粒子の短寿命は圧倒的な統計量で凌駕できるのではないかと？

我々は、2段階でこの実験実現を考えている。まずは、現在稼働中の利用可能なMLFミュオンビームラインで、25Hzでミュオンペニングトラップの精密計測の基礎実験技術を学び、50倍の大統計が期待できる新ビームライン(TS2)に向けて、実験技術課題を明らかにする。そして新ビームラインの利用が可能になった暁には世界最高強度のミュオンペニングトラップ設備が完成する。そして、ミュー粒子やミュオニック原子の質量や磁気モーメントg因子を世界最高精度で求めて、既知の物理学の限界を究め、さらに新しい物理の探索を行う、低エネルギー素粒子実験とも呼ぶべき分野を新たに開拓し確立することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、近年、J-PARCで生成に成功した冷却ミュー粒子ビームを用いる。さらに陽子をプローブとしてミュー粒子の運動を観測する新手法をペニングトラップに適用し、短寿命による実験精度の低下を補う。世界初のペニングトラップによるミュー粒子のシグナル検出を狙う。

荷電粒子単体の持つ物理量、例えば電荷qと質量mの比 $q/m$ や、g因子の精密測定において、最も強力で有効な方法がペニングトラップを用いた実験である。直径約1cm、高さ約2cmの金属円筒空洞内に四重極静電場を作る。静電場の鞍点近傍で、荷電粒子はz軸方向の調和振動zを行う。さらにz軸方向の静磁場 $B$ によって荷電粒子はサイクロトロン運動を行いxy平面動径方向に関して閉じ込められる。結果、荷電粒子は変調サイクロトロン、マグネトロン、軸方向の3つの調和振動を行いつつ、3次元空間に安定して捕獲される(図1参照)。3個の振動モードのうち軸方向振動は鏡像電流として、電極を通して外部RLC共振回路で捉えることが可能だ(図1参照)。この観測を通じて3モードの振動数を精密測定でき、そこから諸物理量が導かれる。

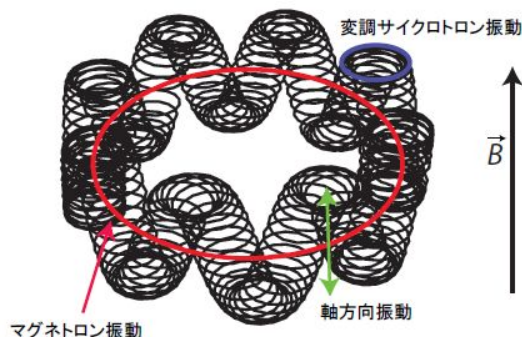


図 1: トラップ内粒子の振動

1950 年代に発案されたこの方法は、より洗練され、今では広く普及している。電子や陽子それらの反粒子、軽いものから非常に重いイオンまで、幅広い荷電粒子の質量や  $g$  因子の精密測定に利用されている。電子や陽子とその反粒子では、単一粒子の捕獲によって、現在では実に ppt ( $10^{-12}$ ) の相対精度に到達した。ただし、これらは諸外国でなされた測定で、日本国内でペニングトラップ精密測定は、現在、行われていない。圧倒的な実験精度の実現が可能であるにもかかわらず、これまでミュオンを使ったペニングトラップ実験は世界で一度も行われたことがない。第一の理由として、ペニングトラップに捕獲できる程度に低速なミュオンソースが用意できなかった。第二に、ミュオンの寿命が  $2.2\mu\text{s}$  と短く、電子とニュートリノに崩壊してしまうため、捕獲できたとしてもミュオンの振動の観測が不可能と考えられていた。第二の問題について、短寿命であるミュオンの振動を精度よく検出することが、本研究の独自な点である。まず、 $1.7\text{T}$  の静磁場があればミュオンの軸方向振動数を  $\nu_z \sim 3\text{MHz}$  程度に設計でき、ミュオン粒子の寿命内 ( $\tau_{\mu}^{-1} = 450\text{kHz}$ ) の観測が可能になる。

#### 4. 研究成果

大きくわけて 4 つの観点からの研究成果が得られている。

##### (1) 理論的側面

ペニングトラップ内の 1 荷電粒子の運動は古典力学で記述され、量子力学を加味すれば十分、QED は不要と考えられている。しかし、この結論は一樣磁場中の電子のサイクロトロン運動の QED1 ループ解析の結果から導かれたもので、電子の約 200 倍の質量を持つミュオンに対しては正しくない。QED の 3 ループから、ミュオンには電子には存在しない強調因子が存在することが過去の QED の文献の精査から判明した。これがどの程度、ミュオンペニングトラップ実験での物理量決定に影響するかは、現在、精査中である。

##### (2) トラップ検出器設計のためのシミュレーション

トラップ中、あるいはその前にスピンを  $90$  度回転させると、ラーモア歳差運動による回転信号が得られ、磁気モーメントを測定することができる。得られる陽電子信号の Geant4 ベースのシミュレーションに、ラーモア歳差運動による効果とトラップによる軸方向振動の効果を取り込んで、図 2 のような結果が得られた。2 つの振動が明瞭に確認されており、精密に測定することで目標の精度を達成できることが確認できた。

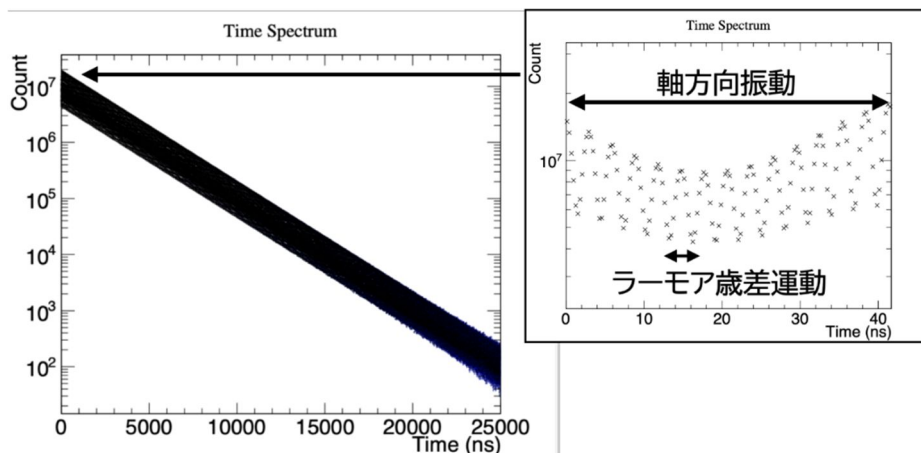


図 2: トラップ中のミュオン粒子からの崩壊陽電子スペクトルシミュレーション

(3) ミュー粒子ビーム生成効率増加のための基礎実験

ペニングトラップに捕獲する超低速の $\mu^+$ を真空中に効率的に生成することが重要である。現在までに確立されたレーザー共鳴イオン化法では高温タングステンフィルムから放出する $\mu$ をイオン化することで $\mu^+$ を得るが、タングステンの温度相当の熱エネルギーを $\mu^+$ も持ち、更なる精密測定では問題となる。そこで、数 10K 程度でも真空中に $\mu$ を放出する物質の探索を開始した。n 型 Si を用いた実験により、表面付近で生成した $\mu$ が真空中に放出されるのか観測する方法を確立した。n 型 Si では真空中への放出の明確な信号は得られていないが、今後 KCl などや SiC などの物質で観測を行う予定である。

(4) トラップ用 4 重極電場チェンバーの概念設計のための環境整備

1.7T の強磁場中に設置する四重極電場チェンバーの概念設計は 3 次元有限要素法を用いたソフトウェア(OPERA-3D)を導入し、専用ワークステーションにて精密計算を行う。計算機環境整備を整え、ミュー粒子蓄積領域の電場・磁場マップを取得し、4.2 で挙げた Geant-4 ベースのシミュレーションに電場、磁場分布情報を反映させ、トラップ計算の精度を向上させることを可能にする。

(5) ミューオニウム原子の超微細構造分光への発展

本研究で開発する精密トラップ磁場技術が完成すれば、ミューオニウム原子の超微細構造分光の相補的にミュー粒子の質量精度を格段に向上させることができる。トラップ開発と並行して進めてきた分光実験はゼロ磁場において実証試験に成功し、最初の物理結果を得て論文として出版された。また、近い将来に行う予定の磁場中における Zeeman 副準位分光のための装置開発についても空洞共振器の設計と試験結果をまとめた論文として出版された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kanda S., Fukao Y., Ikedo Y., Ishida K., Iwasaki M., Kawall D., Kawamura N., Kojima K.M., Kurosawa N., Matsuda Y., Mibe T., Miyake Y., Nishimura S., Saito N., Sato Y., Seo S., Shimomura K., Strasser P., Tanaka K.S., Tanaka T., Torii H.A., Toyoda A., Ueno Y.	4. 巻 815
2. 論文標題 New precise spectroscopy of the hyperfine structure in muonium with a high-intensity pulsed muon beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136154 - 136154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. S. Tanaka et al.,	4. 巻 5
2. 論文標題 Development of microwave cavities for measurement of muonium hyperfine structure at J-PARC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 ptab047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西村昇一郎
2. 発表標題 ミュオンベニングトラップ実験
3. 学会等名 KEK S型課題 合同研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

New Developments of Muon Precision Physics  
<https://kds.kek.jp/indico/event/32734/>

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
研究分担者	仁尾 真紀子  (nio makiko)  (80283927)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・上級研究員   (82401)	
研究分担者	下村 浩一郎  (shimomura koichiro)  (60242103)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授   (82118)	
研究分担者	西村 昇一郎  (nishimura shoichiro)  (20836431)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・博士研究員   (82118)	
研究分担者	河村 成肇  (kawamura naritoshi)  (60311338)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特別准教授   (82118)	
研究分担者	神田 聡太郎  (sotaro kanda)  (10800485)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教   (82118)	

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1件

国際研究集会 New Developments of Muon Precision Physics	開催年 2019年～2019年
--	--------------------

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
---------	---------