

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01231

研究課題名（和文）ソレノイド磁場と新型ガス検出器を組み合わせた高精度中性子寿命測定実験

研究課題名（英文）Precise measurement of neutron lifetime using a solenoidal magnet and new gaseous detector

研究代表者

吉岡 瑞樹 (Yoshioka, Tamaki)

九州大学・先端素粒子物理研究センター・准教授

研究者番号：20401317

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では茨城県東海村の陽子加速器施設J-PARCの大強度中性子ビームを用いて、既存の手法とは異なる測定方法により中性子寿命を世界最高精度で決定する新しい実験を提案している。本申請の研究では、新規実験での要となる新型ガス検出器の設計・作製・性能評価を一貫して行なった。作製したガス検出器とソレノイド磁石の統合試験を行い、先行研究で支配的であった背景事象を期待通りに削減できることが分かった。さらに、装置群一式をJ-PARCビームラインに設置し、中性子ビーム照射試験を行なった。以上、本研究によりソレノイド磁場を用いた新規中性子寿命精密測定実験のための主要部分の開発が完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で作製した新型ガス検出器と磁場を組み合わせ、J-PARCの世界最高強度のパルス中性子源で実験を実施することにより、中性子寿命をこれまでに無い精度で測定できる可能性が拓いた。先行研究の異なる手法間の乖離が何らかの新たな物理に起因している場合、中性子が約1%の分岐比で検出器に痕跡を残さない未知の粒子に崩壊していることを意味する。それは既存の素粒子の振る舞いを記述する理論体系の拡張に留まらず、時空の構造の理解をも大きく変革する大発見につながるため、社会に与える影響も大きい。

研究成果の概要（英文）：We are proposing a new experiment to measure neutron lifetime at J-PARC using a solenoidal magnet to reduce a dominant background in the previous experiment. In this study, we have designed, constructed, and evaluated the performance of a new gaseous detector, which is a key component of the new experiment. Integration test of the developed gaseous detector with a solenoid magnet has been performed, and it has been found that the new gaseous detector can reduce the background events as expected that have dominated in the previous experiment. Furthermore, the developed gaseous detector and the solenoid magnet were installed at the J-PARC beamline, and a neutron beam irradiation test was conducted. Thus, we concluded that we are almost ready for the new experiment to measure neutron lifetime using a solenoidal magnet.

研究分野：実験素粒子物理学

キーワード：中性子 ガス検出器 超伝導磁石

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中性子は最も単純な原子核の一つであり、およそ 900 秒で陽子、電子、反ニュートリノに崩壊する。その寿命は素粒子標準理論において重要なパラメータの一つであり、また、ビッグバン元素合成理論においても、ヘリウムなどの軽元素合成量に大きな影響を及ぼす事が知られている。その重要性から、現在に至るまで様々な方法により精密測定が行われてきたが、現在主流となっている 2 手法(以下、中性子カウント法および陽子カウント法)の測定結果の間には 8.7 ± 2.2 秒 (4.0 標準偏差) と大きな乖離が存在しており、上記理論のさらなる精密検証を妨げていた。

これらの実験結果の差が、これまで考慮されていない新たな物理過程の存在によるものなのか、それとも測定手法による系統誤差によるものなのか、早急にその真偽を確かめる必要があった。中性子カウント法と陽子カウント法の乖離が何らかの新たな物理に起因している場合、中性子が約 1% の分岐比で検出器に痕跡を残さない未知の粒子に崩壊していることを意味する。それは既存の素粒子の振る舞いを記述する理論体系の拡張に留まらず、時空の構造の理解をも大きく変革する大発見につながるため、この乖離の起源の追求は素粒子原子核分野における喫緊の課題となっていた。

2. 研究の目的

本申請の研究では、中性子崩壊で発生した電子を計数する第 3 の手法(電子カウント法 : 中性子ビームをガス検出器に通過させ、崩壊で発生した電子を計数)により、最終的に中性子寿命を世界最高精度(0.5 秒)で求めることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では新型ガス検出器を作製し、ソレノイド磁場と組み合わせることによって、先行研究で問題となっていた背景事象を大幅に低減できる。従来の検出器では、背景事象である壁面を起点とする電子は中性子崩壊からの電子と区別ができなかった。一方で新しく考案したガス検出器では、中性子崩壊で発生した電子がソレノイド磁石が作る磁場に従って巻きつき、さらに陽極と陰極の位置を変更することで背景事象との区別が容易となる。モンテカルロ・シミュレーションによる研究により、200mT の磁場を印加した場合、信号事象の検出効率を落とさずに背景事象を 1/20 に低減できると試算されており、これは 0.5 秒での寿命決定に十分な値である。

4. 研究成果

(1)本研究により作製するガス検出器は従来の検出器に比べて複雑な電場構造を持つ。本研究開始以前に試作機の動作試験により所期の性能を満たしていることが分かったため、本研究では実機を作製を行なった。図 1 に作製したガス検出器の写真を示す。作製した検出器ワイヤーの張力測定を行い、要求値を満たしていることが分かった。また、高電圧印加試験を行い、放電対策を施した。さらに、信号増幅回路の作製および性能評価を行い、本実験に使用可能であることを示した。その後、宇宙線を用いた性能評価試験を行い、良好な性能を示すことが分かった。

(2)ソレノイド磁場が本実験現場周辺の電子機器に与える影響を抑制するため、磁気遮蔽体が必要となる。シミュレーションにより影響を見積り、磁気遮蔽体の設計を行なった。その後、磁気遮蔽体を作製し、実験現場である J-PARC のビームラインに設置した。図 2 にビームラインに設置した磁気遮蔽体の写真を示す。ソレノイド磁石冷却

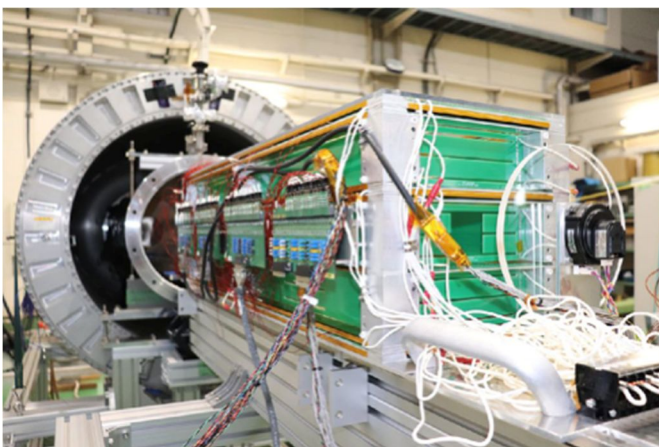


図 1 : 作製したガス検出器と、超伝導磁石との統合試験の様子。

のためのヘリウム回収系をビームラインに整備し、安全審査に合格したのちに、ビームライン状での励磁試験を行なった。

(3)宇宙線背景事象を排除するための宇宙線カウンターの開発を行なった。宇宙線カウンターはプラスチックシンチレーターと光半導体検出器から構成される。まず、九州大学にて宇宙線カウンターの量産を行い、性能評価を行なった。その後、作製した宇宙線カウンターを J-PARC に輸送し、ガス検出器の周囲に設置した。宇宙線事象を用いてデータ収集を行い、所期の性能を達成していることを確認した。また、光半導体検出器はプラスチックシンチレーターの両端に設置しているため、両端の信号の時間差により宇宙線の通過位置を算出できる。これを利用してガス検出器の検出効率を評価する手法を考案し、原理実証を行なった。

(4)作製したガス検出器を高エネルギー加速器研究機構に輸送し、超伝導ソレノイド磁石との統合試験を行なった。図 1 に作製したガス検出器と超伝導磁石との統合試験の様子を示す。作製したガス検出器および信号増幅器が磁場中で正しく動作することを確認した。さらに、宇宙線および各種放射線源を用いた性能評価を行い、シミュレーションで期待される通りに従来支配的であった背景事象を削減できることが分かった。

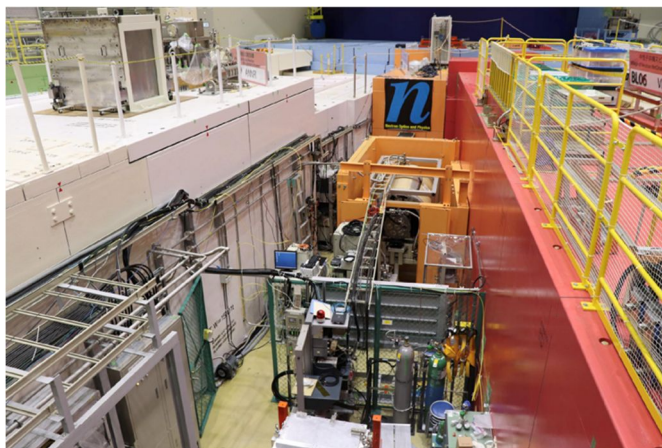


図 2: J-PARC における中性子ビーム照射試験の様子。

(5)高エネルギー加速器研究機構での統合試験の後、装置群一式を J-PARC に輸送し、ビームラインに設置した。データ収集系の整備の後、初の中性子ビーム照射試験を行い、 ^3He 吸収反応事象の観測に成功した。図 2 に J-PARC における中性子ビーム照射試験の様子を示す。しかしながら、超伝導磁石の漏れ磁場が上流光学系に影響を与えることが判明したため、今後の対策を要する。

以上、本研究によりソレノイド磁場を用いた電子カウント法による中性子寿命精密測定実験のための主要部分の開発が完了した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sumi Naoyuki, Otono Hidetoshi, Yoshioka Tamaki, Mishima Kenji, Makida Yasuhiro	4. 巻 22
2. 論文標題 Precise Neutron Lifetime Measurement with a Solenoidal Coil	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11036
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.22.011036	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 -

1. 著者名 Koga J., Ieki S., Kimura A., Kitaguchi M., Kitahara R., Mishima K., Nagakura N., Okudaira T., Otono H., Shimizu H.M., Sumi N., Takada S., Tomita T., Yamada T., Yoshioka T.	4. 巻 16
2. 論文標題 Measurement of rays from 6LiF tile as an inner wall of a neutron-decay detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P02001 ~ P02001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/16/02/P02001	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 -

1. 著者名 Yano Kodai, Makida Yasuhiro, Makise So, Mishima Kenji, Otono Hidetoshi, Sumi Naoyuki, Yoshioka Tamaki	4. 巻 33
2. 論文標題 Precise Neutron Lifetime Measurement: An Integration Test with a Gaseous and a Solenoidal Magnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11117
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.33.011117	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 -

1. 著者名 Sumi N., Hirota K., Ichikawa G., Ino T., Iwashita Y., Kajiwara S., Kato Y., Kitaguchi M., Mishima K., Morikawa K., Mogi T., Oide H., Okabe H., Otono H., Shima T., Shimizu H. M., Sugisawa Y., Tanabe T., Yamashita S., Yano K., Yoshioka T.	4. 巻 33
2. 論文標題 Precise Neutron Lifetime Measurement Using Pulsed Neutron Beams at J-PARC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11056
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.33.011056	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 -

1. 著者名 Tamaki Yoshioka	4. 巻 2020-001
2. 論文標題 Fundamental physics using neutron at J-PARC and accelerator-driven neutron source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JAEA Conf	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11484/jaea-conf-2020-001	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 -

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 So Makise
2. 発表標題 Lifetime of Neutron Apparatus (LiNA) with time projection chamber and solenoid coil
3. 学会等名 INT Workshop INT-19-75W Fundamental Symmetries Research with Beta Decay (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodai Yano
2. 発表標題 Precise Neutron Lifetime Measurement : An integration test with a Gaseous Detector and a Solenoidal Magnet
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoyuki Sumi
2. 発表標題 Precise neutron lifetime measurement using pulsed neutron beam at J-PARC
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tamaki Yoshioka
2. 発表標題 Fundamental physics using neutron at J-PARC and accelerator-driven compact neutron source
3. 学会等名 2019 Symposium on Nuclear Data (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodai Yano
2. 発表標題 Integration test with a Gaseous Detector and a Solenoidal Magnet for the Precise Neutron Lifetime Measurement
3. 学会等名 2019 Symposium on Nuclear Data
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢野浩大
2. 発表標題 ソレノイド磁場を用いた中性子寿命測定のための宇宙線カウンターの開発
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢野浩大
2. 発表標題 中性子の精密寿命測定のための宇宙線カウンターの開発
3. 学会等名 第125回日本物理学会支部例会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoyuki Sumi
2. 発表標題 Precise Neutron Lifetime Measurement with a Gaseous Detector and a Solenoidal Magnet
3. 学会等名 Fifth Joint Meeting of the Nuclear Divisions of the APS and the JPS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideaki Uehara
2. 発表標題 Upgrade of Neutron Lifetime Measurement at J-PARC
3. 学会等名 Fifth Joint Meeting of the Nuclear Divisions of the APS and the JPS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoyuki Sumi
2. 発表標題 Precise neutron lifetime measurement with a gaseous detector and a solenoidal magnet
3. 学会等名 RCNP Workshop on Fundamental Physics using Neutrons and Atoms
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 角直幸
2. 発表標題 ガス検出器とソレノイド磁場を用いた中性子寿命の精密測定実験：検出器製作と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永野智也
2. 発表標題 ガス検出器とソレノイド磁石を用いた中性子寿命の精密測定実験：宇宙線検出器のシミュレーションと製作、評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 角直幸
2. 発表標題 ガス検出器とソレノイド磁場を用いた中性子寿命の精密測定実験：検出器製作と性能評価
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永野智也
2. 発表標題 ガス検出器とソレノイド磁石を用いた中性子寿命の精密測定実験：宇宙線検出器のシミュレーションと製作
3. 学会等名 第124回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上原英晃
2. 発表標題 J-PARC/BL05 における中性子寿命測定実験：高精度化に向けたアップグレード
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡瑞樹
2. 発表標題 次世代中性子技術を用いた高精度中性子寿命測定実験
3. 学会等名 日本物理学会第 76 回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢野浩大
2. 発表標題 ソレノイド磁石を用いた中性子寿命測定のための宇宙線カウンターの開発及び性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第 76 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松崎俊
2. 発表標題 J-PARC/BL05 における中性子寿命測定実験:飛跡形状の背景事象の分類に関する調査
3. 学会等名 日本物理学会第 76 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松崎俊
2. 発表標題 磁場を用いた中性子寿命実験における宇宙線カウンターの開発
3. 学会等名 第 126 回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢野浩大
2. 発表標題 J-PARC/BL05 における中性子寿命測定実験:MC を用いたバックグラウンドの系統誤差の検証
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 三島賢二、角直幸、北口雅暎、吉岡瑞樹、音野瑛俊	4. 発行年 2021年
2. 出版社 高エネルギー物理学研究者会議	5. 総ページ数 10
3. 書名 中性子寿命の謎の解明に向けて	

〔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
研究分担者	榎田 康博 (Makida Yasuhiro) (30199658)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授 (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
---------	---------