

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654058

研究課題名(和文) 超高精度ヘリウム同位体比分析による中性子寿命の決定と原子核・宇宙物理学への貢献

研究課題名(英文) Determination of neutron lifetime by ultraprecise helium isotope ratio measurement to contribute nuclear physics and space physics

研究代表者

角野 浩史 (SUMINO, Hirochika)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90332593

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、J-PARCパルス中性子源で進められている中性子寿命測定実験で、中性子数の決定に用いている検出器内のヘリウムガスの同位体比(3He/4He比)を精確に求めることで中性子寿命の高精度決定に貢献するために、希ガス質量分析計を改良し、0.1%以下の確度・精度で3He/4He比を決定可能にすることを目指した。3He/4He比の測定値の揺らぎの要因を洗い出し、分析磁場の安定化とイオン光学の最適化を行った結果、3He/4He比の決定精度は0.08%となり、目標を達成できた。また国際原子力機関が作製した標準水試料中のトリチウム濃度を3He蓄積法により測定し、3He/4He比測定の確度を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to precisely and accurately determine isotope ratio of helium (3He/4He) filling a time projection chamber developed for neutron lifetime measurement using a pulsed cold neutron spallation source at J-PARC, we improved a noble gas mass spectrometer. Stabilizing magnetic field and optimizing ion optics resulted in 0.08% precision of 3He/4He determination, which satisfies the requirement for neutron lifetime determination better than previous reports. The tritium concentrations of standard water samples provided by IAEA were also determined using the 3He accumulation method to confirm accuracy of 3He/4He measurement with the mass spectrometer.

研究分野：同位体地球化学

キーワード：ヘリウム 同位体比 中性子 質量分析 J-PARCパルス中性子源

1. 研究開始当初の背景

ビッグバン初期宇宙における元素合成において、中性子の β 崩壊寿命はHe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、様々な手法による中性子寿命の精密測定がこれまでなされており、Particle Data Groupによる最新のコンパイルの平均値は 885.7 ± 0.8 秒である (Amsler *et al.*, *Phys. Lett.*, 2008)。しかし、近年それよりも 7.2 秒 (9σ) も小さい、 878.5 ± 0.7 (stat) ± 0.3 (sys) 秒という値が報告されており (Serebrov *et al.*, *Phys. Rev. C*, 2008)、もしこの結果が正しいのであれば、既存の元素合成モデルは大きな修正を迫られることになる。これは可及的速やかに解決されるべき問題である。

この問題に対し、J-PARC 中性子源で発生させた中性子ビームの β 崩壊を観測し、0.1%の精度で寿命の導出を試みる実験が、連携研究者の三島賢二ら、高エネ研を中心としたグループによって進められている。この実験では、中性子 β 崩壊イベントと中性子フラックスの両者を、Heを動作ガスとするガス検出器 (Time Projection Chamber, TPC) を用いて同時計測する。中性子ビームのフラックスは、He動作ガスに 10^{-6} 程度添加した ^3He の $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ 反応を検出することにより導出するが、その不確かさは主に ^3He の存在量の精度に依存する。よって中性子寿命を0.1%で導出するには、TPC内のHeガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の決定精度を0.1%以下まで向上させることが必要不可欠である。

質量分析計を用いた $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の測定技術は、地球惑星科学の分野で発展してきた。これは、岩石や鉱物、火山ガスや温泉水などの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が、地球の脱ガス史や現在のマントル中の不均質構造の解明、火山活動度のモニタリングなどに幅広く応用できる有用なトレーサであることによる。しかし現在まで、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は大気中のHeのもつ値を基準とした相対値としてのみ用いられ、その絶対値については十分に検討されてこなかった。近年、地球大気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が経年的あるいは地域的に変動している可能性も指摘されている (Sano *et al.*, *Geochim. Cosmochim. Acta* 2010) ことから、大気中Heを一次標準としない測定スキームの確立が望まれている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、中性子寿命の問題を解決するために必要な、0.1%を超える高精度での $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比絶対値測定を実現するために、既存の希ガス専用質量分析計に徹底的に改良を施し、超高精度 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比分析システムを構築することを目的とした。このシステムを用いて中性子寿命測定に用いるTPC動作ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を測定し、中性子寿命を高精度に決定することを通して、ビッグバン元素合成などの、宇宙標準モデルの検証に貢献

することを目指した。

3. 研究の方法

TPC動作ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比測定には、Sumino *et al.* (*J. Mass Spectrom. Soc. Jpn.*, 2001)で報告している、ダブルコレクターを備えた単収束磁場型希ガス質量分析計 (VG5400) を用いるが、得られる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比に付随する、計数率から許容される統計誤差を超えた誤差の主要因を特定するために、様々な条件でHeスタンダードガス (HESJ) の測定を行った。その結果、質量分離用の磁場が室温に大きく左右されることが分かったため、電磁石に保温シールドを設置し温度の安定化を図り、さらに高分解能・高安定度の磁束計 (Group 3 社製テスラメータDTM151-PG) を導入し、その測定値を元にフィードバックをかけるよう磁場制御用のプログラムを書き換えた。また磁場の変動の ^3He 計数値への影響を最小限にするため、イオン光学の調整を ^3He に最適化した。

さらに改良した質量分析計により得られる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の確度を検証するために、国際原子力機関 (IAEA) が配分している標準水試料中のトリチウム濃度を ^3He 蓄積法により測定した。

4. 研究成果

イオン光学の調整の結果、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の変動を0.1%に抑えるために許容される磁場の変動幅が、調整前の < 4 ppmから $5 \sim 15$ ppmと広がった。磁場そのものの変動も、温度の安定化と磁束計を用いたフィードバックにより、 23 ppmから 12 ppm程度と $1/2$ 程度に

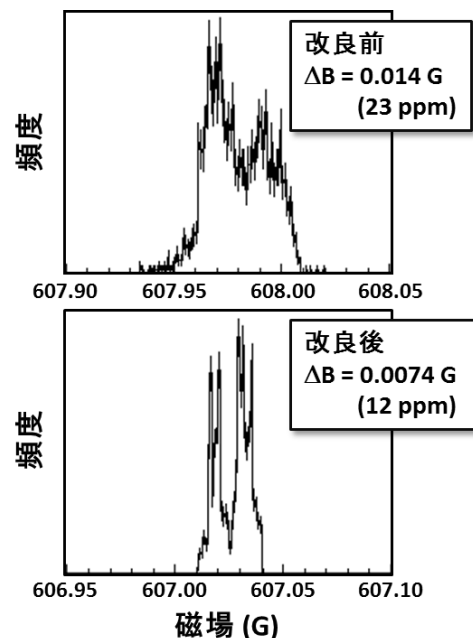


図1. Heのピーク中心で測定を続けた際の磁場の変動。改良後に明瞭となった二つのピークは、磁場制御側のデジタル/アナログ変換回路の1ビット分に対応している。

なり、制御側のデジタル/アナログ変換回路の1ビット分の揺らぎが明瞭に見えるまでになった(図1)。これらにより、HESJの一回あたりの測定精度は0.08%となり、目標である0.1%以下を達成できた。

IAEA標準水試料のトリチウム濃度の決定については、トリチウムから半減期12.3年で生成する ^3He を蓄積する時間が十分に取れず、また試料に当初から含まれている He の除去が十分に達成できないなどの問題はあったものの、複数の試料でおおむね推奨値と矛盾ない結果が得られ、本研究で用いた分析システムによる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の確度が確認できた。

一方で一回の測定あたりの精度が向上したことにより、質量分析計における ^3He の検出感度が時間とともに変動することが明らかになった。そこで中性子寿命測定に用いたTPC動作ガスとHESJを交互に複数回測定することで、 ^3He の検出感度の時間的変動の相殺を試みたところ、同一試料の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の繰り返し測定再現性は0.1%を下回った。またこの ^3He の検出感度の変動は、 ^3He イオンの検出器(二次電子増倍管)への入射位置に大きく左右されることが分かった。そこで二次電子増倍管に替えて、マイクロチャンネルプレート(MCP)の導入を検討した。通常MCPでは検出器の全面積に占めるチャンネル開口部の割合が60%程度であるため、検出効率が入射イオンの位置に大きく依存する。しかし開口部に加工を施し開口率を90%以上にすればこの問題は克服でき、従来の二次電子増倍管よりも広い範囲に入射するイオンに対して、高くかつ安定した効率でイオン検出が可能になると期待される。このようなMCPを浜松ホトニクスとの協力を得て設計・製作した。製作に時間を要したために研究期間内には予察的な評価しかできなかったが、おおむね期待した性能が得られている。

上記のように、中性子寿命測定用のTPC動作ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を、要求される精度(0.1%以下)で測定できる態勢は整った。残る問題は、一次標準として用いているHESJの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比そのものが0.5%の精度でしか決定されていないこと(Matsuda *et al.*, *Geochem. J.*, 2002)であり、今後は純粋な ^3He と ^4He の精密混合により、0.1%以下の精度で $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比既知の標準ガスを複数調製し、それらを用いてHESJの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を決定し直す必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Bajo K., Sumino H., Toyoda M., Okazaki R., Osawa T., Ishihara M., Katakuse I., Notsu K., Igarashi G. and Nagao K. (2012) Construction of a newly designed small-size mass spectrometer for helium isotope

analysis: Toward the continuous monitoring of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in natural fluids. *Mass Spectrometry*, **1**, A0009, doi: 10.5702/massspectrometry.A0009 (査読有).

[学会発表](計7件)

K. Mishima, T. Yamada, N. Higashi, K. Hirota, T. Ino, Y. Iwashita, R. Katayama, M. Kitaguchi, R. Kitahara, H. Oide, H. Otono, R. Sakakibara, Y. Seki, T. Shima, H.M. Shimizu, T. Sugino, N. Sumi, H. Sumino, K. Taketani, G. Tanaka, S. Yamashita, H. Yokoyama, and T. Yoshioka (2014) Neutron lifetime measurement with pulsed beam at JPARC: Overview. *4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan*, 2014年10月7日~10日, ハワイ島(アメリカ合衆国).
T. Yamada, N. Higashi, K. Hirota, T. Ino, Y. Iwashita, R. Katayama, M. Kitaguchi, R. Kitahara, K. Mishima, H. Oide, H. Otono, R. Sakakibara, Y. Seki, T. Shima, H.M. Shimizu, T. Sugino, N. Sumi, H. Sumino, K. Taketani, G. Tanaka, S. Yamashita, H. Yokoyama, and T. Yoshioka (2014) Neutron lifetime measurement with pulsed beam at J-*PARC*: TPC and DAQ. *4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan*, 2014年10月7日~10日, ハワイ島(アメリカ合衆国).

山田崇人, 片山領, 東直, 横山晴道, 角野浩史, 三島賢二, 山下了, 榊原理紗, 杉野智昭, 広田克也, 清水裕彦, 北口雅暁, 田中元気, 角直幸, 音野瑛俊, 吉岡瑞樹, 北原龍之介, 岩下芳久, 生出秀行, 嶋達志, 関義親, 竹谷薫, 猪野隆 (2014) J-*PARC*/BL05 中性子寿命測定実験: 系統誤差の評価. *日本物理学会 2014 秋期大会*, 2014年9月18日~21日, 佐賀大学(佐賀県佐賀市).

三島賢二, 山下了, 山田崇人, 片山領, 東直, 横山晴道, 角野浩史, 榊原理紗, 杉野智昭, 広田克也, 清水裕彦, 北口雅暁, 田中元気, 角直幸, 音野瑛俊, 吉岡瑞樹, 北原龍之介, 岩下芳久, 生出秀行, 嶋達志, 関義親, 猪野隆, 竹谷薫 (2014) J-*PARC*/BL05 中性子寿命測定実験: 中性子フラックスの決定. *日本物理学会 2014 秋期大会*, 2014年9月18日~21日, 佐賀大学(佐賀県佐賀市).

三島賢二, 山下了, 山田崇人, 生出秀行, 片山領, 東直, 横山晴道, 角野浩史, 櫻井大, 音野瑛俊, 猪野隆, 竹谷薫, 有本靖, 武藤豪, 清水裕彦, 榊原理紗, 酒井健二, 嶋達志, 日野正裕, 北口正暁, 吉岡瑞樹, 松本悟, 関義親, 岩下芳久, the NOP Collaboration (2013) J-*PARC* パルス中性子ビームを用いた中性子寿命測定実験. *日本物理学会第68回年次大会*,

2013年3月26日～29日, 広島大学 (広島県).

三島賢二, 山下了, 山田崇人, 生出秀行, 片山領, 東直, 横山晴道, 角野浩史, 櫻井大, 音野瑛俊, 猪野隆, 竹谷薫, 有本靖, 武藤豪, 松村宏, 豊田晃弘, 清水裕彦, 酒井健二, 嶋達志, 日野正裕, 北口正暁, 吉岡瑞樹, the NOP Collaboration (2012) J-PARC における中性子寿命測定実験:現在までのデータ取得と今後の計画. 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年9月11日～14日, 京都産業大学 (京都府).

山田崇人, 生出秀行, 片山領, 東直, 横山晴道, 角野浩史, 三島賢二, 山下了, 櫻井大, 音野瑛俊, 猪野隆, 竹谷薫, 有本靖, 武藤豪, 松村宏, 豊田晃弘, 清水裕彦, 酒井健二, 嶋達志, 日野正裕, 北口正暁, 吉岡瑞樹, the NOP Collaboration (2012) J-PARC 中性子寿命測定実験 : TPC データ解析の現状と今後の方針. 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年9月11日～14日, 京都産業大学 (京都府).

6. 研究組織

(1)研究代表者

角野 浩史 (SUMINO, Hirochika)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号 : 90332593

(3)連携研究者

三島 賢二 (MISHIMA, Kenji)
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・特任助教
研究者番号 : 20392136