

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25247032

研究課題名(和文)反陽子ヘリウム原子を用いた陽子・電子質量比の精密測定

研究課題名(英文) Precision determination of proton-to-electron mass ratio using antiprotonic helium atoms

研究代表者

早野 龍五 (Hayano, Ryugo)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・名誉教授

研究者番号：30126148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,000,000円

研究成果の概要(和文)：CERN研究所の反陽子減速器において「反陽子ヘリウム原子(ヘリウム原子核に、反陽子と電子が一個ずつ束縛された準安定な中性原子)」の精密レーザー分光を行い、基礎物理定数の一つである(反)陽子・電子質量比を高精度で決定することを目指した。レーザー分光で得た複数の共鳴線の中心周波数と、三体の量子電磁力学計算結果との比較から、反陽子と電子の質量比を、相対標準不確かさで0.8ppb(ppbは十億分の1)で決定した。これは、CODATA2010で推奨されている陽子・電子質量比と同等以上の精度である。結果は、2016年度にScience誌に発表した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to determine the (anti)proton-to-electron mass ratio, one of the fundamental constants, to high precision by means of laser spectroscopy of antiprotonic helium atom (a metastable neutral atom consisting of an antiproton, an electron and a helium nucleus). The work was done at the antiproton decelerator facility (AD) of CERN. By comparing the transition frequencies of several accessible transitions to those obtained by the three-body quantum electrodynamics calculations, we determined the antiproton-to-electron mass ratio to a relative precision of 0.8 ppb (parts per billion), i.e., as precise as the proton-to-electron mass ratio recommended by the CODATA2010 fundamental constant adjustment. The result was published in 2016 in the Science magazine.

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験

キーワード：素粒子(実験) 原子物理学実験 基礎物理定数 CERN 反陽子

1. 研究開始当初の背景

われわれは、先行研究¹⁾において「反陽子ヘリウム原子（ヘリウム原子核に、反陽子と電子が一個ずつ束縛された準安定な中性原子）」の精密レーザー分光を行い、基礎物理定数の一つである（反）陽子・電子質量比を世界最高精度で決定することを目指してきた。これまでの研究では、反陽子を温度 10-15K 程度のヘリウムガス中で反陽子ヘリウム原子を生成していたため、レーザー共鳴線の線幅は、10-15K の熱運動に起因するドップラー幅で決まっていた。分光精度をあげるには、ドップラー幅を抑えることが必須であった。

2. 研究の目的

CERN 研究所の反陽子減速器において反陽子ヘリウム原子のレーザー分光を行い、遷移周波数の測定結果と三体量子電磁力学計算結果との比較から、反陽子・電子質量比を、陽子・電子質量比に匹敵する精度で決定し、科学技術委員会 CODATA の基礎物理定数決定に貢献することを目的とする。

具体的には、研究開始の時点で、陽子・電子質量比は²⁾ 1836.152 672 45(75) (相対標準不確かさは 4.1×10^{-10})、一方、反陽子・電子の質量比は³⁾ 1,836.152 673 6(23) (相対標準不確かさは 1.4×10^{-9}) であったので、後者の精度を前者のそれに近づけることが研究の目的である。

3. 研究の方法

「当初の背景」で記した通り、従来は 10-15K のヘリウムガス標的中に反陽子を静止させて反陽子ヘリウム原子を生成していた。生成された反陽子ヘリウム原子は標的中のヘリウムと衝突を繰り返して 10-15K に熱化され、その熱運動によるドップラー幅が、レーザー分光における共鳴線幅の主な要因となっていた。

ドップラー幅を減らして共鳴線幅を狭くし、遷移周波数決定精度を向上するため、本研究では

- 1) 1.5-1.7K に冷却したヘリウムガスを標的として反陽子ヘリウム原子を生成し、ドップラー幅を減らすことと、
- 2) 互いに逆方向に運動する二光子を反陽子ヘリウム原子に吸収させて遷移を起こさせる「二光子分光法」を用いることで、さらにドップラー幅を減らす手法で共鳴線幅を狭くし、反陽子・電子質量比の決定精度を向上することを目指した。

ヘリウムは、CERN の LHC 加速器で、超伝導電磁石の冷却に用いられていると同様な冷却器を組み込んだクライオスタットをによって、目標とする 1.5-1.7K に安定的に冷却した。

通常の二光子分光は、同じ周波数の光子を原子の両側から吸収させることで行うが、反陽子ヘリウム原子の場合は、遷移確率が低すぎる。そこで、図 1 に示すように、 ν_1 、 ν_2 と二色のレーザーを用意して始状態 (n, l) と、終

状態 $(n-2, l-2)$ の遷移を起こすことにした。この際、中間に位置する $(n-1, l-1)$ の実状態と、二光子の仮想状態の差 $\Delta \nu_d$ を調整することで、遷移確率を上げることが可能である。

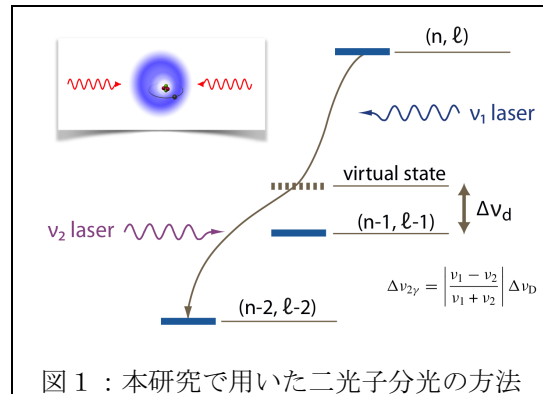


図 1：本研究で用いた二光子分光の方法

4. 研究成果

2016 年に Science 誌に発表した論文⁴⁾で、反陽子・電子質量比を 1836.152 673 4(15) と決定した。この相対標準不確かさは 8×10^{-10} で、従来の反陽子・電子質量比の精度を約 2 倍向上し、陽子・電子質量比の精度に近づいた結果となっている。この結果は 1.5-1.7K に冷却した標的を用い、反陽子ヘリウム 4 原子と反陽子ヘリウム 3 原子の合計 13 の単光子遷移周波数測定から求めたものである。

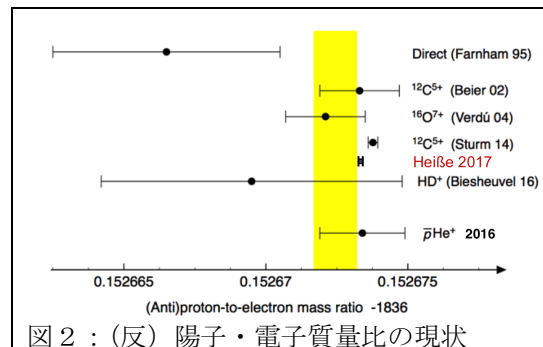


図 2：（反）陽子・電子質量比の現状

（反）陽子・電子質量比の現状を、図 2 にまとめる。一番下に示す pHe⁺2016 が、Science 誌に掲載された本研究の成果で、黄色の帯は、CODATA2010 の陽子・電子質量比である。両者は互いの不確かさの範囲内で良い一致を示し、また、本研究の精度（不確かさ）は陽子の精度に迫った。これは、所期の成果である。

一方、本研究開始以降に、炭素 12 の 5 価イオン 1 個をペニングトラップ中に捕獲し、そのサイクロトロン周波数と電子スピン回転周波数を同時に測定する手法によって、陽子・電子質量比の測定精度が大幅に向上し（図中の Sturm 14)⁵⁾、それを反映した CODATA2014 では、陽子・電子質量比が 1836.152 673 89(17) (相対標準不確かさは 9.5×10^{-11}) となった。最新結果は図に HeiBe で示すように⁶⁾、さらに精度が向上している。ここで注目すべきは、新しい陽子・電子質量比は、CODATA2010

の値（黄色の帯）から有意にずれていることである。反陽子の測定による独立なチェックが期待されている。

Science 誌掲載の結果は、二光子分光を用いる以前のものであり、本研究では計画通り、二光子分光のデータも収集している。

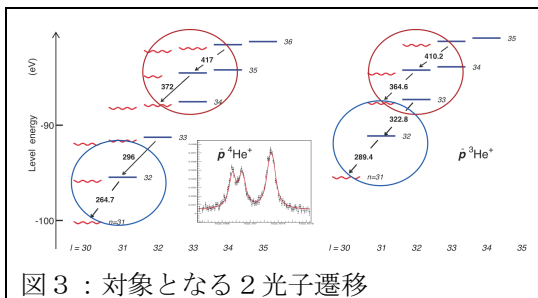


図3：対象となる2光子遷移

図3に示すのは、本研究で対象としている2光子遷移で、反陽子ヘリウム4で(36, 34)→(34, 32)と(33, 32)→(31, 30)の2本、反陽子ヘリウム3で(35, 33)→(33, 31)と(33, 32)→(31, 30)の2本ある。図の中央に示すのは、2017年度に収集した反陽子ヘリウム4の(36, 34)→(34, 32)遷移の共鳴線で、原子の微細構造分裂が十分に分離されている様子を示している。標的の冷却と、二光子分光の成果である。

二光子分光の最終結果を出すには、系統誤差をはじめとする種々のチェックが必要で、まだしばらく時間を要するが、現時点での見積もりでは、相対標準不確かさは、CODATA2010の陽子・電子質量比と同程度（Science誌に発表したものよりも2倍の向上）となる見込みである。

結論として、本研究の最終結果がまとまれば、当初の目的は十分に達成できると考えられるが、その間に陽子・電子質量比の決定精度が格段に向上したため、今後、更なる技術開発を行って、反陽子・電子質量比を向上させる必要性が生じたと言える。

(参考文献)

- 1) R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, E. Widmann, Rep. Prog. Phys. 70, 1995-2065 (2007).
- 2) CODATA2010, <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/archive2010.html>
- 3) M. Hori et al., Nature 475, 484-488 (2011).
- 4) M Hori, H Aghai-Khozani, A Soter, D Barna, A Dax, R Hayano, T Kobayashi, Y Murakami, K Todoroki, H Yamada, D Horvath, L Venturelli, Science 354 (2016) 610-614
- 5) S. Sturm et al., Nature 506, 468 (2014).
- 6) F. Heiße et al., Phys. Rev. Lett. 119, 033001 (2017)

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 8件)

- ① H Aghai-Khozani, A Bianconi, M Corradini, R Hayano, M Hori, M Leali, E Lodi Rizzini, V Mascagna, Y Murakami, M Prest, E Vallazza, L Venturelli, H Yamada, Measurement of the antiproton-nucleus annihilation cross-section at low energy、査読有、Nuclear Physics A970 (2018) 366-378、doi: 10.1016/j.nuclphysa.2018.01.001
- ② H Aghai-Khozani, M Corradini, R Hayano, M Hori, M Leali, E Lodi-Rizzini, V Mascagna, Y Murakami, M Prest, L Solazzi, E Vallazza, L Venturelli and H Yamada, New results of the antiproton-carbon annihilation cross section measurement at low energies、査読有、EPJ Web of Conferences, 130 (2016) 07014-1-3、doi: 10.1051/epjconf/201613007014
- ③ K Todoroki, D Barna, R Hayano, H Aghai-Khozani, A Soter, M Corradini, M Leali, E Lodi-Rizzini, V Mascagna, L Venturelli, V Prest, L Vallazza, D De Salvador, M Hori, Instrumentation for measurement of in-flight annihilations of 130 keV antiprotons on thin target foils、査読有、Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A835 (2016) 110-118、doi: 10.1016/j.nima.2016.08.026
- ④ M Hori, H Aghai-Khozani, A Soter, D Barna, A Dax, R Hayano, T Kobayashi, Y Murakami, K Todoroki, H Yamada, D Horvath, L Venturelli, Buffer-gas cooling of antiprotonic helium to 1.5 to 1.7 K, and antiproton-to- electron mass ratio、査読有、Science 354 (2016) 610-614、doi: 10.1126/science.aaf6702
- ⑤ M Hori, A Soter, H Aghai-Khozani, D Barna, A Dax, R S Hayano, Y Murakami, H Yamada, Method for laser spectroscopy of metastable pionic helium atoms、査読有、Hyperfine Interact (2015) 233: 83、doi:10.1007/s10751-015-1163-7
- ⑥ T Kobayashi, D Barna, R S Hayano, Y Murakami, K Todoroki, H Yamada, A Dax, L Venturelli, N Zurlo, D Horvath, Observation of the 1154.9 nm transition of antiprotonic helium、査読有、J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 46 (2013) 245004、doi: 10.1088/0953-4075/46/24/245004
- ⑦ S Friedreich, D Barna, F Caspers, A Dax, R S Hayano, M Hori, D Horvath, B Juhasz, T Kobayashi, O Massiczek, A

Soter, K Todoroki, E Widmann and J Zmeskal, Microwave spectroscopic study of the hyperfine structure of antiprotonic ^3He 、査読有、J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 46 (2013) 125003、doi:10.1088/0953-4075/46/12/125003

- ⑧ M Hori, A Soter, D Barna, A Dax, R S Hayano, S Friedreich, B Juhasz, T Pask, E Widmann, D Horvath, L Venturelli, N. Zurlo, Sub-Doppler Two-Photon Laser Spectroscopy of Antiprotonic Helium and the Antiproton-to-Electron Mass Ratio、査読有、Few-Body Systems 54 (2013) 917-922、doi:10.1007/s00601-013-0653-x

[学会発表] (計 9 件)

- ① R S Hayano, Physics of ASACUSA: the spectroscopy of antiprotonic helium, 2nd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics, 2017/06/04-2017/06/09 Cracow, Poland, 招待講演
- ② R S Hayano, Probing fundamental symmetry using antimatter, The 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, 2015/11/07~2015/11/12, Osaka, Japan, 招待講演
- ③ 早野龍五, 光と反粒子を使って対称性を探る, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015/03/21~2015/03/24, 早稲田大学 (東京都), 招待講演
- ④ R S Hayano, CPT tests with antihydrogen and antiprotonic helium atoms, The sixth international conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics (TCP2014), 2014/11/28~2014/11/29, RIKEN (埼玉県), 招待講演
- ⑤ R S Hayano, CPT tests with antihydrogen and antiprotonic helium atoms, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 2014/10/07~2014/10/11, Hawaii, USA, 招待講演
- ⑥ R S Hayano, Physics of ASACUSA - the spectroscopy of antiprotonic helium, Questioning Fundamental Physical Principles, 2014/05/06~2014/05/09, CERN, Switzerland, 招待講演
- ⑦ R S Hayano, Weighing the Antiproton: Precision Laser Spectroscopy of Antiprotonic Helium Atoms, 7th International conference on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA 2014), 2014/03/14~2014/03/16, 日本科学未来館(東京都), 招待講演
- ⑧ R S Hayano, Experimental studies of

exotic atoms, NUSTAR Annual Meeting 2014, 2014/03/03~2014/03/07, Darmstadt, Germany, 招待講演

- ⑨ R S Hayano, ASACUSA Overview, 11th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP2013), 2013/07/10~2013/07/15, Uppsala, Sweden, 招待講演

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早野 龍五 (HAYANO, Ryugo)
東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授
研究者番号：30126148

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()