

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：特別推進研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20002003

研究課題名（和文） エキゾチック原子の分光による基礎物理量の精密測定

研究課題名（英文） Precision measurement of fundamental physical constants using exotic-atom spectroscopy

研究代表者

早野 龍五 (HAYANO RYUGO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：30126148

研究成果の概要（和文）：

反陽子ヘリウム原子（ヘリウム原子核に反陽子と電子が束縛された準安定原子）の精密レーザー分光により、反陽子と電子の質量比を  $10^{-9}$  の高精度で決定した。この結果は科学技術データ委員会 CODATA に提供され、基礎物理定数 CODATA2010（理科年表や高校理科教科書などにも掲載されている基本的な物理量）の決定に貢献した。これにより、当初目標が達成された。

研究成果の概要（英文）：

Using the precision laser spectroscopy of antiprotonic helium (metastable atom made of a helium nucleus, an antiproton and an electron), the antiproton-to-electron mass ratio was determined to a fractional precision of  $10^{-9}$ . This was used in the CODATA2010 adjustment of fundamental physical constants, thereby fulfilling the initial goal of this project.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	59,700,000	17,910,000	77,610,000
2009年度	53,600,000	16,080,000	69,680,000
2010年度	62,300,000	18,690,000	80,990,000
2011年度	49,300,000	14,790,000	64,090,000
2012年度	34,300,000	10,290,000	44,590,000
総計	259,200,000	77,760,000	336,960,000

研究分野：原子核物理学実験

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理（4301）

キーワード：反陽子、K 中間子、レーザー分光、X 線分光、CERN、J-PARC、基礎物理定数

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 反陽子ヘリウム原子（ヘリウム原子核+電子+反陽子の三体系）のレーザー分光による反陽子・電子質量比測定精度が相対標準不確かさで  $10^{-9}$  に近づき、科学技術データ委員会 (CODATA) が4年ごとに更新している基礎物理定数への貢献が可能になりつつあった。

(2) “K 中間子と原子核の深い束縛状態”（強い相互作用による分子状態）存在の有無が論争になっている。それを理解する基本的な量

として、K 中間子ヘリウム4原子の X 線分光を行い、K 中間子と原子核のポテンシャルが深いことを示唆した以前の実験が誤りであることを示した。理解を完全なものにするため、ヘリウム3での測定が待たれていた。

## 2. 研究の目的

(1) 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精密レーザー分光を行い、基礎物理定数の一つである陽子・電子質量比を世界最高精度で決定し、科学技術デ

ータ委員会 (CODATA) による基礎物理定数推奨値の決定に貢献することを目指す。

(2) J-PARC 大強度陽子加速器施設において、K 中間子ヘリウム 3 原子の X 線精密分光実験を行い、K 中間子と原子核の強い相互作用パラメータ決定する。これは現在論争になっている “K 中間子と原子核の深い束縛状態” を論じる上で欠かせない測定である。

### 3. 研究の方法

(1) 反陽子ヘリウム原子のレーザー分光を、スイス CERN 研究所の反陽子減速器施設 (AD) において行う。従来の研究で分光精度の限界要因であったドップラー幅を減らすため、二光子分光などの各種手法の開拓と、安定化レーザーの開発を行う。

(2) K 中間子ヘリウム-3 原子の X 線分光を、J-PARC において行う。これは J-PARC で K 中間子ビームを用いた最初の実験となる予定である。K 中間子用ビームライン (K1.8BR) と、液体ヘリウム 3 標的を建設し、高分解能シリコン・ドリフト X 線検出器 (SDD) によって高精度分光を行う。

### 4. 研究成果

(1) 反陽子ヘリウム原子の従前の分光法で精度向上の妨げとなっていたドップラー幅を減少させるため、図 1 に示す二色二光子分光法を開発した。その結果、図 2 に示すように、単光子の場合と比較して線幅を大幅に減少することに成功し、分光精度が高まった。

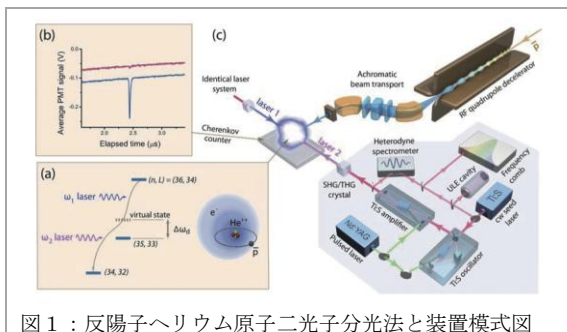


図 1 : 反陽子ヘリウム原子二光子分光法と装置模式図

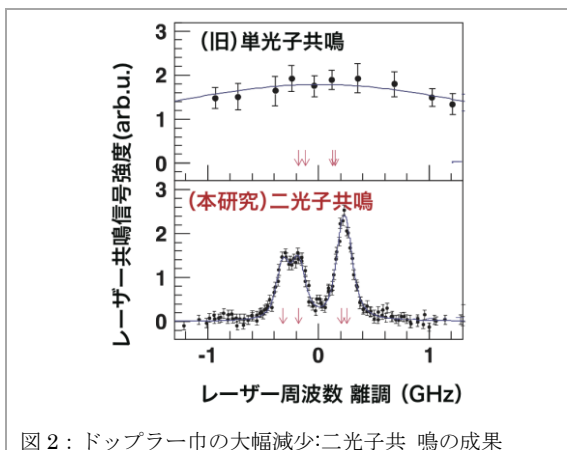


図 2 : ドップラー巾の大幅減少:二光子共鳴の成果

これに基づき、(反)陽子・電子質量比を  $M_p/m_e = 1836.1526736 \pm 0.0000023$  (相対標準不確かさ  $1.2 \times 10^{-9}$ ) と決定した (図 3 の赤: 論文 3)。

この結果と、陽子・電子質量比 (図 3 の緑) との比較により、CPT 対称性が高精度で検証された。一方、CPT 対称性が  $10^{-9}$  程度で破れているとは考えにくいので、これを仮定すれば、我々の結果を陽子・電子質量比と読み替え、基礎物理定数の決定に利用することが出来る。

CODATA は、後者の立場から我々のデータを基礎物理定数 CODATA2010 の調整に用いており、その詳細が最近の論文 (Mohr et al., “CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2010”, Rev. Mod. Phys. 84, (2012) 1527-1605) に明記された。これにより、本研究の当初目標は十分に達成された。

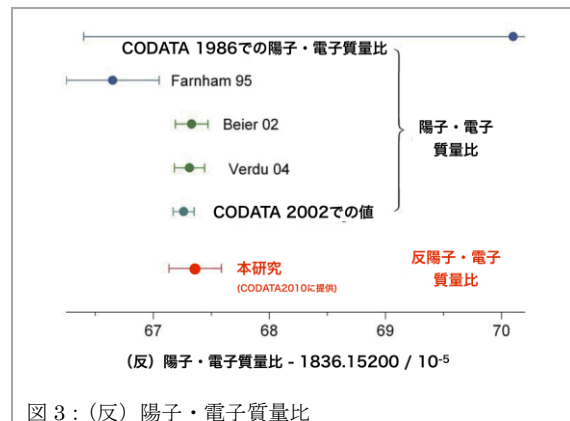


図 3 : (反) 陽子・電子質量比

(2) K 中間子ヘリウム原子に関しては、(a) J-PARC の K1.8BR ビームラインを建設し、K 中間子の取り出しに成功し、ビームラインの調整を終えた。(b) 液体  $^3\text{He}$  標的を製作し、冷却・液化試験を行い、安定稼働することを確認した。(c) X 線測定用のシリコン・ドリフト検出器 (SDD) および前置増幅器を液体  $^3\text{He}$  標的のクライオスタットに組み込み、冷却した状態で J-PARC でビームテストを行い、所期の分解能を達成していることを確認した。しかし、J-PARC 加速器のビームが実験開始可能強度に達しないまま、東日本大震災で J-PARC が被災し、研究期間内には実験実施に至らなかった。

しかし、SDD 試験を兼ねて、イタリアの DAΦNE 加速器でも、K 中間子原子の X 線分光実験を推進してきた。その結果、K 中間子ヘリウム 3 (論文 5)、K 中間子水素 (論文 2)、の三種類の K 中間子原子の X 線の測定に成功した。測定された X 線の強い相互作用シフトと幅は、どれも最近の理論計算の予言の範囲で、K 中間子と原子核の間の「深い」ポテンシャルの存在は支持しないものであった。

## 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)

以下、代表的な論文(全て査読あり)

1. T. Yamazaki, S. Hirenzaki, R. S. Hayano and H. Toki, “Deeply bound pionic states in heavy nuclei”, Phys. Reports 514, 1-87 (2012).
2. M. Bazzi, G. Beer, L. Bombelli, A.M. Bragadireanu, M. Cargnelli, G. Corradi, C. Curceanu, A. d’Uffizi, C. Fiorini, T. Frizzi, F. Ghio, C. Guaraldo, R. S. Hayano, 他 24 名, “Kaonic hydrogen X-ray measurement in SIDDHARTA”, Nucl. Phys. A881, 88-97 (2012).
3. M. Hori, A. Soter, D. Barna, A. Dax, R. S. Hayano, 他 7 名, “Sub-Doppler two-photon laser spectroscopy of antiprotonic helium and the antiproton-to-electron mass ratio”, Nature 475, 484-488 (2011)
4. S. Friedreich, D. Barna, F. Caspers, A. Dax, R. S. Hayano, 他 9 名 “First observation of two hyperfine transitions in antiprotonic  $^3\text{He}$ ”, Phys. Lett. B 700, 1 (2011).
5. M. Bazzi, G. Beer, L. Bombelli, A.M. Bragadireanu, M. Cargnelli, G. Corradi, C. Curceanu, A. d’Uffizi, C. Fiorini, T. Frizzi, F. Ghio, B. Girolami, C. Guaraldo, R. S. Hayano, 他 23 名, “First measurement of kaonic helium-3 X-rays, Physics Letters B 697, 199-202 (2011).
6. R. S. Hayano and T. Hatsuda, “Hadron properties in the nuclear medium”, Reviews of Modern Physics 82, 2949-2990 (2010).
7. R. S. Hayano, “Spectroscopy of antiprotonic helium atoms and its contribution to the fundamental physical constants”, Proc. Japan Academy Series B 86, 1-10 (2010).
8. R. S. Hayano, “Antiprotonic Helium Atoms”, Nucl. Phys. News 19, 18 (2009).

[学会発表] (研究代表者による国際学会招待講演 23 件, 学生等による国内外学会発表 62 件, 計 85 件)

代表的な招待講演

1. R. S. Hayano, “Weighing the antiproton: precision laser spectroscopy of antiprotonic helium

atoms”, 5th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics, Groningen (The Netherlands), June, 2012.

2. R. S. Hayano, “Meson-Nucleus bound states”, Hadrons in the Nuclear Medium, ECT\*, Trento (Italy), May, 2012.
3. R. S. Hayano, “Hadronic Atoms”, 10th International Conference on Low Energy Antiproton Physics: LEAP2011, Vancouver (Canada), April, 2011.
4. R. S. Hayano, “Kaonic-Helium X-Rays”, International Nuclear Physics Conference: INPC2010, Vancouver, Canada, July, 2010.
5. R. S. Hayano, “Testing the CPT symmetry using slow antiprotons”, 3<sup>rd</sup> Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan: HAW09, Waikoloa, Hawaii, October, 2009.
6. R. S. Hayano, “ASACUSA-future opportunities”, New Opportunities in the Physics Landscape at CERN, CERN, May, 2009.
7. R. S. Hayano: “Kaonic helium atoms”, PANIC08, Eilat, Israel, November, 2008.
8. R. S. Hayano: “Antiprotonic and kaonic Helium Atoms”, Precision Spectroscopy of Simple Atoms 2008, Windsor, Canada, July, 2008.

[産業財産権]

○取得状況(計2件)

1. 欧州特許  
発明者: Hayano 他  
番号: EP1775576  
取得日: 18.04.2007  
名称: “Laser analytical instrument, laser analytical method, and gas leak inspection instrument”
2. 米国特許  
発明者: Hayano 他  
番号: US 7,663,122 B2  
取得日: Feb.16, 2010  
名称: “Laser analytical instrument, laser analytical method, and gas leak inspection instrument”.

[その他]

受賞

早野龍五: 第54回仁科記念賞、「反陽子ヘリウム原子の研究」2008年12月  
早野龍五: 第62回中日文化賞、「反陽子ヘリウム原子の発見と研究」2009年5月

ホームページ等

<http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/hayano>

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/story/rigakuru/>

world/04/01.html (「反陽子の質量を高精度に計測する」東大理学部 HP)

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/movie.html?name=hayano20110304> (東大理学部ビデオ)

## 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・教授

研究者番号 : **30126148**