

平成 25 年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成 25 年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成 25 年 4 月 26 日現在

研究代表者 氏 名	早野 龍五	所属研究機関・ 部局・職	東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究課題名	反水素原子の分光		
課題番号	15002005		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 早野 龍五（東京大学・大学院理学系研究科・教授）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成 15 年度	94,200 千円
平成 16 年度	85,000 千円
平成 17 年度	70,250 千円
平成 18 年度	85,320 千円
平成 19 年度	54,000 千円
総 計	388,770 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)～(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

2003 年度-2007 年度の特別推進研究は、反水素原子と反陽子ヘリウム原子の分光による CPT 対称性 (物質・反物質の対称性) の高精度検証を目的として行われたものである。

そのうち、反水素原子については、研究期間内に分光を行うには至らなかったが、研究期間中に建設した装置を用いて研究期間終了後に行った研究により、1s 基底状態にある反水素原子を多重極磁場中で最大 1000 秒閉じ込めることに成功し、最終的な目標であった 1s⇌2s 準位のレーザー分光実現のための重要なステップが達成された (研究期間終了後に発表した論文の No. 4)。

一方、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原子) の分光については、研究期間中に飛躍的な発展があったため、その成果を踏まえ、2008 年度-2012 年度に、特別推進研究「エキゾチック原子の分光による基礎物理量の精密測定」を行った。

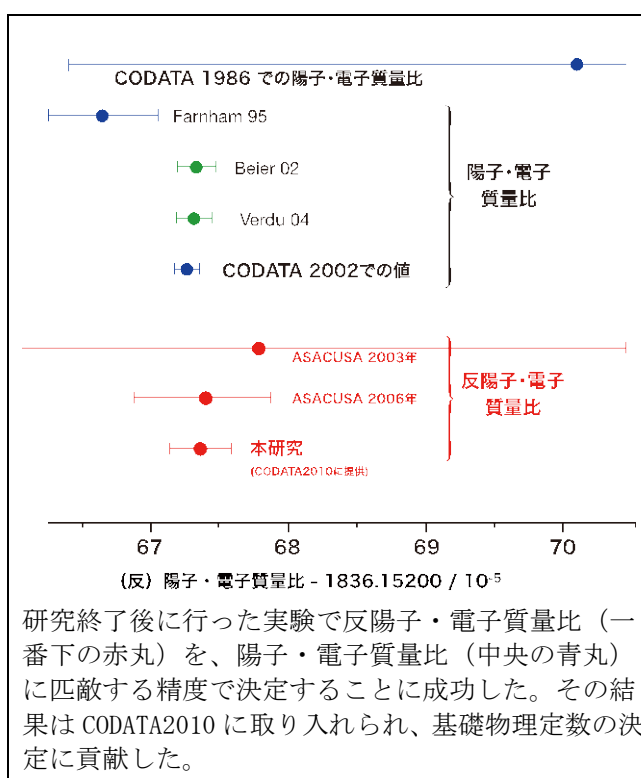
この研究では、反陽子ヘリウム原子の二光子レーザー分光により、反陽子・電子の質量比を、 $1836.1526736 \pm 0.0000023$ と 9 桁以上の精度で決定することに成功した (研究期間終了後に発表した論文の No. 10)。この精度は、重要な基礎物理定数の一つである陽子・電子質量比に匹敵する。両者は実験の不確かさの範囲内で良い一致を示しており (右図の中央の青丸が陽子・電子質量比の最新値、一番下の赤丸が反陽子・電子の質量比の最新値)、これによって CPT 対称性が高精度で検証された。

一方、CPT 対称性が (少なくとも 9 桁程度の範囲では) 破れていないと仮定すれば、我々の反陽子・電子質量比測定結果は、CODATA (科学技術委員会) が 4 年ごとに見直しを行なっている基礎物理定数の決定に用いることが出来る。CODATA では CODATA 2006 の時点から、我々の結果をリドベルグ定数や、陽子・電子質量比などの決定に用いており、CODATA2010 においても、右図に示した最新結果を採用した。

また、反水素原子、反陽子ヘリウム原子以外にも、K 中間子や π 中間子などが原子核に束縛されたエキゾチック原子 (奇妙な原子) の研究が強い相互作用の基礎的な理解に有用であることから、2008-2012 年度の特別推進研究では、J-PARC およびイタリアの DAΦNE 加速器を用いた K 中間子原子分光実験と、理研の RIBF 加速器を用いた π 中間子原子分光実験に取り組んでいる。

2013 年度以降も基盤研究 A「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」により、更なる高精度化を目指した取り組みを進めている。

なお、反陽子ヘリウム原子の研究成果により、研究期間終了後の 2008 年に、早野は第 54 回仁科記念賞を受賞した。



1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

2008年度以降、WEB OF KNOWLEDGEに収録されている関連論文数は55編、それらの、自己引用を除く被引用数の合計は354回である。また、2008年度以降の国際会議での招待講演は以下の通りである。

R.S. Hayano: “Kaonic Helium Atoms”, 10th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction, Krakow, Poland, June 6–10, 2008.

R.S. Hayano: “Antiprotonic and kaonic Helium Atoms”, PSAS2008, Windsor, Canada, July 22– 26, 2008

R.S. Hayano: “Kaonic helium atoms”, EXA08, Vienna, Austria, September 15–18, 2008.

R.S. Hayano: “Kaonic helium atoms”, PANIC08, Eilat, Israel, November 9–14, 2008.

R.S. Hayano: “Exotic helium atoms”, SENDAI08, Sendai, Japan, December 15–17, 2008.

R.S. Hayano, “ASACUSA-future opportunities”, New Opportunities in the Physics Landscape at CERN, CERN, May 12, 2009.

R.S. Hayano, “Precision experiments at lowest energies for fundamental tests and constants”, Heraeus Seminar, Bad Honnef (Germany), Jun 15, 2009.

R.S. Hayano, “Hadron Properties in the Nuclear Medium”, 5-th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, Beijing, Sep 21, 2009.

R.S. Hayano, “Testing the CPT symmetry using slow antiprotons”, HAW09, Waikoloa, Hawaii, Oct 2009.

R.S. Hayano, “Experimental study of hadron properties in the nuclear medium”, High-energy hadron physics with hadron beams, Jan 8, 2010, KEK, Japan.

R.S. Hayano, “Hadrons in Nuclear Medium, experimental studies”, New Frontiers in QCD, Feb 25, 2010, YITP, Kyoto, Japan.

R.S. Hayano, “Kaonic atom experiments”, 12th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon, Williamsburg, USA, May 31, 2010.

R.S. Hayano, “Kaonic atoms and nuclei”, Chiral10 Workshop, Valencia, Spain, June 21, 2010.

R.S. Hayano, “Kaonic-Helium X-Rays”, 2010 International Nuclear Physics Conference, Vancouver, Canada, July 5, 2010.

R.S. Hayano, “Kaonic-Helium X-rays”, NAPP 2010 - 3rd International Conference on Nuclear and Particle Physics with CEBAF at Jefferson Lab, Dubrovnik, Croatia, Oct 3, 2010.

R.S. Hayano, “Hadronic Atoms”, 10th International Conference on Low Energy Antiproton Physics, Vancouver (Canada), April 27, 2011.

R.S. Hayano, “20 years of antiprotonic helium”, International Conference on Exotic Atoms and Related Topics — EXA2011, Vienna (Austria), Sep. 5, 2011.

R.S. Hayano, “Kaonic Atoms”, Strangeness Nuclear Physics 2012, Tokai (Japan), Feb. 13, 2012.

R.S. Hayano, “Testing fundamental symmetries using the spectroscopy of exotic atoms”, The 4th Yonsei-Tokyo Joint Workshop, Seoul (Korea), Feb. 17, 2012.

R.S. Hayano, “Testing fundamental symmetries with antiprotons”, Workshop on Perspectives of Fundamental Physics, Heidelberg (Germany), March 30, 2012.

R.S. Hayano, Meson-Nucleus bound states, Hadrons in the Nuclear Medium, ECT*, Trento (Italy), May 17, 2012

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 21, 2012

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）**(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）**

1. 研究種目名：特別推進研究
研究課題名：エキゾチック原子の分光による基礎物理量の精密測定
研究期間：2008年度-2012年度
研究期間全体の配分額：259,200千円
2. 研究種目名：基盤研究（A）
研究課題名：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
研究期間：2013年度-2017年度
研究期間全体の配分額：31,000千円

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

研究開始当初、反陽子ヘリウム原子の分光は、陽子と反陽子の質量の相対比較
 $(M(\text{陽子}) - M(\text{反陽子})) / M(\text{陽子})$
に基づく CPT 対称性の検証に有用であると考えていた。

しかし、特別推進研究で、反陽子ヘリウム原子分光に用いるレーザー周波数を、光周波数コムによって絶対校正できるシステムを完成させ、遷移周波数の絶対値を高精度で決定できるようになった（それ以前は波長計による波長測定を行っていた）。

これにより、我々の測定を、基礎物理定数の決定に用いることが出来るという発想が新たに生じ、CODATA の基礎物理定数表への貢献が可能になった。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

本研究の研究成果が学界等にもたらした最大の貢献は、反陽子ヘリウム原子分光による基礎物理定数の決定である。

基礎物理定数とは、プランク定数、微細構造定数、重力定数、素電荷など、物理法則に普遍的に現れる量を指し、その値の高精度決定は、精密実験および関連する理論の精華であり、その結果は理工学の広汎な分野における測定の基礎となっている。

研究期間中に発表した論文のNo. 5の結果が、科学技術委員会によるCODATA 2006推奨値 (CODATA recommended values of the fundamental physical constants) に取り上げられ、その詳細を記した論文 P.J. Mohr *et al.*, *Reviews of Modern Physics* 80, 633-730, 2008 : 引用回数443) において

「水素原子、重水素原子、反陽子ヘリウム原子の遷移周波数から、リドベルグ定数、陽子・重陽子の荷電半径、電子の原子質量の情報が得られる」

と、反陽子ヘリウム原子が基礎物理定数決定に用いられていることが明記された。

また、研究期間後に発表した論文No. 10も、同様にCODATAの最新値CODATA 2010に採択され、最近出版された論文 P.J. Mohr *et al.*, CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010, *Reviews of Modern Physics* 84, 1527-1605, 2012 では、3ページにわたって反陽子ヘリウム原子の分光結果がどのように基礎物理定数決定に用いているかが記されている。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	N. Madsen et al., Spatial distribution of cold antihydrogen formation, Phys. Rev. Lett. (2005) 033403	反陽子・陽電子の混合領域から生成する反水素原子の空間分布について	62
2	M. Hori et al., Direct measurement of transition frequencies in isolated pbar-He+ atoms, and new CPT-violation limits on the antiproton charge and mass, Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 123401	反陽子ヘリウム原子分光による CPT 対称性の検証精度を反陽子線形減速器を用いることで一層高めた	62
3	G. Andresen et al., Antimatter plasmas in a multipole trap for antihydrogen, Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 023402	反水素原子生成に用いる反陽子と陽電子のトラップ中での挙動	61
4	M. Amoretti et al., High rate production of antihydrogen, Phys. Lett. B 578 (2004) 23	反水素原子の生成率を従来よりも一層高めた	61
5	M. Hori et al., Determination of the antiproton-to-electron mass ratio by precision laser spectroscopy of pbar-He+, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 243401	光周波数コムを用い、反陽子ヘリウム原子のレーザー分光精度を飛躍的に高め、CPT 対称性を検証	53
6	LV. Jorgensen et al., New source of dense, cryogenic positron plasmas, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 025002	反水素原子生成に用いる陽電子トラップの技術詳細について	52
7	M. Amoretti et al., Antihydrogen production temperature dependence, Phys. Lett. B 583 (2004) 59	反水素原子生成率のプラズマ温度依存性から、反水素原子の生成機構について考察した	51
8	M. Amoretti et al., The ATHENA antihydrogen apparatus, Nucl. Instr. Meth. A 518 (2004) 679	「冷たい」反水素原子生成に世界で初めて成功した装置の詳細	51
9	M. Amoretti et al., Positron plasma diagnostics and temperature control for antihydrogen production, Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 055001	反水素原子生成における陽電子プラズマの温度・密度などのパラメータの測定と、その制御	43
10	RS. Hayano et al., Antiprotonic helium and CPT invariance, Reports on Progress in Physics 70 (2007) 1995	反陽子ヘリウム原子分光による CPT 対称性の検証(レビュー論文)	26

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	M. Bazzi et al., Kaonic helium-4 X-ray measurement in SIDDHARTA, Phys. Lett. B 681 (2009) 310	Φ 中間子崩壊で生じる低速K-中間子を用い、K中間子ヘリウム4原子の脱励起X線エネルギーを精密に測定	37
2	M. Bazzi et al., A new measurement of kaonic hydrogen X-rays, Phys. Lett. B 704 (2011) 113	Φ 中間子崩壊で生じる低速K-中間子を用い、K中間子水素原子の脱励起X線エネルギーを精密に測定し、強い相互作用パラメーターを決定	26
3	GB. Andresen et al., Confinement of antihydrogen for 1,000 seconds, Nature Physics, 7 (2011) 558	反水素原子を多重極磁場中で1000秒閉じ込めることに成功	24
4	GB. Andresen et al., Evaporative Cooling of Antiprotons to Cryogenic Temperatures, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 103003	反水素原子生成に用いる反陽子を蒸発冷却によって低温にすることに成功	23
5	GB. Andresen et al., Compression of antiproton clouds for antihydrogen trapping, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 203401	反陽子プラズマに回転電場を加え、プラズマの直径を小さくする手法について	22
6	GB. Andresen et al., Production of antihydrogen at reduced magnetic field for anti-atom trapping, J. Phys. B 41 (2008) 011001	反水素原子の磁場閉じ込めの準備として、従来より低い磁場中での反水素原子生成率を調べた	15
7	GB. Andresen et al., Antihydrogen formation dynamics in a multipolar neutral anti-atom trap, Phys. Lett. B 685 (2010) 141	反水素原子生成領域に、反水素原子閉じ込めのための多重極磁場をかけた場合の、反水素生成への影響	14
8	M. Fujiwara et al., Temporally controlled modulation of antihydrogen production and the temperature scaling of antiproton-positron recombination, Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 053401	陽電子プラズマ温度を人為的に上下させることにより、反水素原子をパルス状に生成し、反水素生成機構を解明	12
9	T. Pask et al., Improved study of the antiprotonic helium hyperfine structure, J. Phys. B 41 (2008) 081008	レーザー・マイクロ波分光による反陽子ヘリウム原子の超微細構造の解明と、反陽子磁気能率の決定	8
10	M. Hori et al., Two-photon laser spectroscopy of antiprotonic helium and the antiproton-to-electron mass ratio, Nature 475 (2011) 484	反陽子ヘリウム原子の二光子分光による、反陽子・電子質量比の決定と、その基礎物理定数決定への貢献	7

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

特別推進研究及びその後の進展で得られた、陽子・電子質量比の精密決定と、その基礎物理定数 CODATA 2006 及び CODATA 2010 への貢献により、研究成果が社会に還元されている。基礎物理定数は、日本では理科年表をはじめとして、高校の理科教科書にも掲載されるばかりでなく、基礎科学の測定や、工学の精密測定に必須の数値群である。

また、特別推進研究で開発した大強度パルスレーザー技術をもとに、水素燃料電池スタックからの微量な水素ガス漏れの空間分布を可視化する方法を開発し、日・米・欧の特許を取得した。

早野龍五, 他, 日本特許取得 W02006006628 (2006/01/19), “レーザ分析装置、およびレーザ分析方法、並びに気体漏れ検査装置”

Hayano et al., 欧州特許取得 EP1775576 (18.04.2007), “Laser analytical instrument, laser analytical method, and gas leak inspection instrument”

Hayano et al., 米国特許取得 US 7,663,122 B2 (Feb.16, 2010), “Laser analytical instrument, laser analytical method, and gas leak inspection instrument”

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポストク等の研究終了後の動向を記述してください。）

特別推進研究初期に大学院生として関わった博士は、2004年に「反陽子を生成する新装置の建設に貢献、生成された反陽子の精密な測定」という業績で東京大学総長賞を受賞。その後、東京大学大学院理学系研究科原子核科学研究センターの助教を経て、現在は同講師として、不安定核ビームを用いた核構造・天体核合成反応の研究者として活躍中である。

特別推進研究の初期にポストクとして関わった博士は、2004年にカナダの TRIUMF 研究所の常勤研究員、2008年よりカナダのカルガリー大学の併任准教授となった。現在はカナダで反水素原子研究チームをとりまとめ、CERN 研究所の ALPHA 実験チームの中核メンバーとして活躍中である。

特別推進研究に大学院生として関わった博士は、2009年3月に「反陽子ヘリウム原子のオーグジュ崩壊率の研究」で博士号を取得後、経済産業省に就職。2011年の東日本大震災後は環境省に出向し、除染に関する業務に携わった。

特別推進研究にポストクとして関わった博士は、2007年度にヨーロッパ科学財団より第四回ヨーロッパ若手研究者賞（European Young Investigator Awards : EURYI）を受賞し、本拠地をミュンヘンのマックスプランク量子光学研究所 MPQ に構えた。MPQ においては、引き続き CERN 研究所における反陽子原子の研究を中心テーマとしており、2012年にはヨーロッパリサーチカウンシル ERC の Starting Grant を獲得し、W2 教授待遇でグループを率いている。