

## 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：82401

研究種目：特別推進研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19002004

研究課題名（和文） 反水素原子と反水素イオンによる反物質科学の展開

研究課題名（英文） Evolution of antimatter science with antihydrogen atoms and antihydrogen ions

研究代表者

山崎 泰規 (YAMAZAKI YASUNORI)

独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室・上席研究員

研究者番号：30114903

研究成果の概要（和文）：本研究は、我々の独自開発になるカuspトラップによる反水素原子生成とスピン偏極反水素ビームの取り出し、マイクロ波分光により自然の最も基本的な対称性である CPT 対称性の厳密なテストを目指すものである。2010 年にはカuspトラップ中で反水素の大量合成を実現し、2011 年にはマイクロ波分光にむけた実験を開始した。その成果は、やはり同時並行で進めていた多重極磁気瓶への反水素捕捉と相俟って英国物理学会発行の Physics World 誌において Breakthroughs of the year2010 の第一位であると高く評価された。

研究成果の概要（英文）： This project aims for a stringent CPT symmetry test employing a so-called CUSP trap scheme, where a spin-polarized slow antihydrogen beam can be extracted. With the extracted beam, a high precision microwave spectroscopy can be realized. In 2010, we have succeeded to synthesize a large number of antihydrogen atoms in the cusp trap, which was selected as the best research of the ten breakthroughs in 2010 by Physics World together with the trapping of antihydrogen atoms in a magnetic bottle, to which the principal investigator was also involved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	71,100,000	21,330,000	92,430,000
2008年度	63,700,000	19,110,000	82,810,000
2009年度	66,500,000	19,950,000	86,450,000
2010年度	58,200,000	17,460,000	75,660,000
2011年度	39,900,000	11,970,000	51,870,000
総計	299,400,000	89,820,000	389,220,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：反水素、反物質、CPT 対称性、非中性プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

物理学の最も基本的な対称性である CPT 対

称性はこれまで多く素粒子物理学の分野で議論されてきた。最も厳密な比較は CP 対称性の破れでよく知られている K 中間子と反 K

中間子の比較であるとされており、 $|m(K^0)-m(N^3)|/m(K)<6\times 10^{-19}$  という相対精度が報告されている。ここで  $m(K^0)$  は  $K^0$  中間子の質量である。絶対精度に換算すると、 $|m(K^0)-m(N^3)|c^2 < 4.0\times 10^{-19}\text{GeV}$  となる。これは確かにわずかな量であるが、例えば  $K$  中間子の CP 対称性の破れ量が  $\text{Im}(m_{12})\sim 1.1\times 10^{-17}\text{GeV}$  程度であることを考えると、CPT 対称性は CP 対称性の破れの数%程度の精度でしか確かめられていないことが分かる。より高精度の CPT 対称性テストが必要なことはほぼ明らかである。そこでさらに高精度が期待できる原子物理学的な分光に注目する。例えば、水素原子の 1S-2S 遷移は  $\Delta E/E < 4.2\times 10^{-15}$  の精度で知られている。これは  $\Delta E < 4.5\times 10^{-23}\text{GeV}$  に対応しており、分光的手法は CPT 対称性について極めて高精度の情報を提供すると考えられる。幾つかのグループが反水素 ( $\bar{se}^+$ ) の高精度分光を目指した研究を進めているが、我々は特に反水素の超微細遷移に注目している。これは  $\Delta\mu/\mu\sim 10^{-3}$  でしか知られていない反陽子の磁気モーメントを反陽子内の磁化分布にまで立ち入って  $10^{-6}$  以上の相対精度、すなわち、 $10^{-21}\text{GeV}$  の精度で決定し、最も高精度の CPT 対称性テストを実現するためである。なお、超微細遷移は、1S-2S 遷移より CPT 対称性の破れにより敏感であるとの理論的予測があり、その意味でも追求すべき物理量であると考えられる。

本研究開始時点で我々は他グループより一桁以上高い効率で反陽子の捕捉・冷却に成功しており、また、超微細遷移の高精度測定を可能にする CUSP トラップ法を提案し、実験装置を設計・製作して反水素合成実現に向けた研究を進めていた。

## 2. 研究の目的

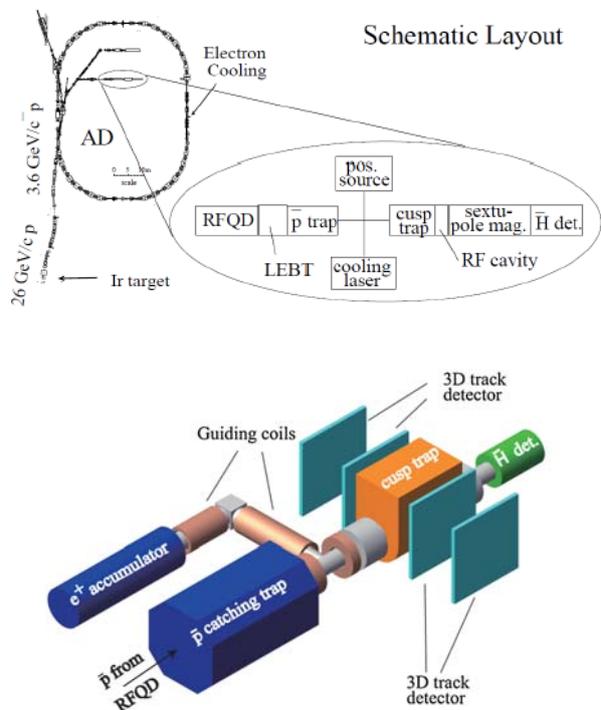
(1)反陽子磁気モーメントの高精度決定と CPT 対称性テスト：カスプトラップにより、基底状態にある冷たい（数 10 K 程度）反水素原子を高い効率で生成し、low-field seeking 状態にある反水素原子を質の高いビームとして引き出す。反水素原子の超微細構造分裂を高精度測定し、反陽子の磁気モーメントをこれまでより 4 桁以上高い精度で決定する。なお、超微細遷移は反陽子の内部構造（クォークレベル）に関わる CPT 対称性にも敏感である。さらに、磁気トラップに捕捉された反水素の 1S-2S 分光は不均一磁場のため高精度分光が困難だと予想される。

(2)反水素イオンの生成と反物質-物質間の重力相互作用：水素負イオン ( $pe^-e^-$ ) の反物質である反水素正イオン ( $se^+e^+$ ) を合成し、これをレーザー冷却した  $Be^+$ イオンにより共同

冷却する。陽電子をレーザー脱離させることで極低温の反水素原子を生成し、その自由落下を観測することで、反物質(反水素原子)と物質(地球)間の重力相互作用研究がはじめて現実のものになる。

## 3. 研究の方法

下図のように、CERN の反陽子減速リング (AD: Antiproton Decelerator) から供給される 5.3MeV のパルス状反陽子ビームを高周波四重極減速装置 (RFQD: Radio Frequency Quadrupole Decelerator) によりさらに 100keV 付近まで減速し、これを高性能ペニング型トラップに捕捉・冷却・整形した後、独自開発の CUSP トラップに輸送し、陽電子と混合することで反水素原子を合成する。カスプ磁場によりこれを集束させつつ下流に引出し、マイクロ波分光する。

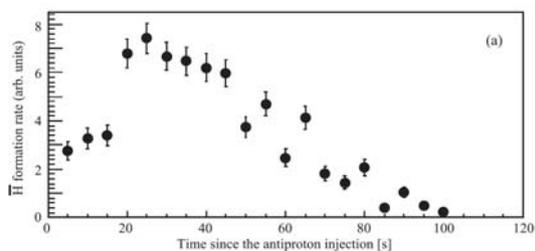


重力相互作用研究は、Saclay の P. Perez らと検討を進め、2007 年に Letter of Intent を CERN の SPSC に提出し、その後 Gbar 共同研究として認められた。特に陽電子蓄積用技術と実験装置は我々の主導の元に進めている。

## 4. 研究成果

本研究代表者らが原理提案から実験装置開発・実験までを進めている CUSP トラップ法により反水素の高効率合成を実現した。以下、主要な成果を箇条書きにする。

- a. 不均一な磁場分布を持つカスプトラップ中で電子、陽電子、反陽子の回転圧縮をはじめて実現した。
- b. 数百 eV という反陽子としては超低エネルギーの DC ビーム引出に成功し、He, Ne, H<sub>2</sub>等の原子分子との衝突実験を実現した。数 keV 領域ではじめて信頼できるイオン化断面積を得た。
- c. カスプトラップ中での反水素の大量合成に成功した。下図に反水素合成率の混合直後からの時間依存性を示す。合成は大量の反陽子を残したまま 100 秒前後で止まっており、如何に反水素の温度を低く保ったまま反応を持続させるかが今後の課題になっている。この成果は、次の項目 d とともに 2010 年度の Breakthroughs of the year の第一位として Physics World 誌



(英国物理学会出版) に評価された。

- d. 中心付近で磁場一様性の高い八重極磁気瓶中での反水素捕捉に成功した。上記 c と同様高く評価された。
- e. 陽電子と反陽子の蒸発冷却に成功し、従来の電子冷却法からさらに一桁近く低い温度を実現した。反陽子数を維持したまま低温化を図り、反水素数を飛躍的に増大することが今後の課題になっている。
- f. 反陽子の自動共鳴励起に成功した。これが、磁気瓶への反水素捕捉を現実のものとするキーテクノロジーになった。一方、反水素の合成率と反水素の温度は二律背反の関係にあり、今後の課題となっている。

#### 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 28 件)

\*全て査読有り

1. G. B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, "Search for trapped antihydrogen, Physics Letters B 695 (2011) 95-104.

2. G. B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, "Auto-resonant excitation of antiproton plasmas", Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 025002.
3. T. Mohamed, Y. Yamazaki, *et al.*, "Fast electron accumulation and its mechanism in a harmonic trap under ultrahigh vacuum conditions", Physics of Plasmas 18 (2011) 032507.
4. G. B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, "Centrifugal Separation and Equilibration Dynamics in an Electron-Antiproton Plasma", Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 145001.
5. G. B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, "Confinement of antihydrogen for 1,000 seconds", Nature Physics 7(2011)558-564.
6. H Imao, Y Kanai, N Kuroda, H Higaki, H. A. Torii, Y Matsuda, Y Nagashima, Y Yamazaki, *et al.*, "Positron accumulation and manipulation for antihydrogen synthesis", J. Phys. Conf. Ser. 225(2010)012018.
7. H. Knudsen, H. A. Torii, Y. Kanai, N. Kuroda, Y. Yamazaki, *et al.*, "Target Structure Induced Suppression of the Ionization Cross Section for Very Low Energy Antiproton-Hydrogen Collisions", Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 213201.
8. G.B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, "Antihydrogen formation dynamics in a multipolar neutral anti-atom trap", Phys. Lett. B685 (2010) 141-145.
9. G. B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, "Evaporative Cooling of Antiprotons to Cryogenic Temperatures", Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 013003.
10. H. Higaki, N. Kuroda, Y. Kanai, H. A. Torii, Y. Matsuda, Y. Yamazaki, *et al.*, "A tank circuit monitoring a large number of antiprotons in musashi", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan
11. G. B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, "Trapped antihydrogen", Nature 468 (2010) 673-676.
12. Y. Enomoto, N. Kuroda, H. Higaki, Y. Kanai, H. A. Torii, Y. Nagashima, Y. Matsuda, Y. Yamazaki, *et al.*, "Synthesis of Cold Antihydrogen in a Cusp Trap", Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 243401.
13. D P van der Werf, Y Yamazaki, *et al.*, "Antimatter transport processes", J. Phys. Conf.257(2010)012004.
14. H. Knudsen, N. Kuroda, H. A. Torii, Y. Yamazaki, *et al.*, "On the double ionization of helium by very slow antiproton impact", Nucl. Instrum. Methods B267 (2009) 244-247.
15. C.L.Cesar, Y.Yamazaki, *et al.*,

- “Antihydrogen Physics at ALPHA/CERN”, *Can. J. Phys.* 87(2009)791-797.
16. G. B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, “Magnetic multipole induced zero-rotation frequency bounce-resonant loss in a Penning-Malmberg trap used for antihydrogen trapping”, *Physics of Plasmas* 16 (2009) 100702.
  17. G. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, “Antiproton, positron, and electron imaging with a micro-channel plate/phosphor detector”, *Rev. Sci. Instrum.* 80 (2009) 123701
  18. G. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, “Production of antihydrogen at reduced magnetic field for anti-atom trapping”, *J. Phys. B* 41 (2008) 011001.
  19. G. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, “A novel antiproton radial diagnostic based on octupole induced ballistic loss”, *Phys. Pl.* 15 (2008) 032107.
  20. M. Shibata, A. Mohri, Y. Kanai, Y. Enomoto, and Y. Yamazaki, “Compact cryogenic system with mechanical cryocoolers for antihydrogen synthesis”, *Rev. Sci. Instrum.* 79 (2008) 015112.
  21. L.V. Jorgensen, Y. Yamazaki, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods B* 266(2008)357-362.
  22. G. B. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, “Compression of Antiproton Clouds for Antihydrogen Trapping”, *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 203401.
  23. N. Kuroda, H. A. Torii, M. Shibata, Y. Nagata, D. Barna, M. Hori, D. Horvath, A. Mohri, J. Eades, K. Komaki, and Y. Yamazaki, “Radial compression of antiproton cloud for production of intense antiproton beams”, *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008) 203402.
  24. H. Saitoh, A. Mohri, Y. Enomoto, Y. Kanai, and Y. Yamazaki, “Radial Compression of a Non-Neutral Plasmas in a Cusp Trap for Antihydrogen Synthesis”, *Phys. Rev. A (Rapid Comm)* 77 (2008) 051403.
  25. M. C. Fujiwara, Y. Yamazaki, *et al.*, “Temporally Controlled Modulation of Antihydrogen Production and the Temperature Scaling of Antiproton-Positron Recombination”, *Phys. Rev. Lett.* 101 (2008) 053401.
  26. H. Knudsen, N. Kuroda, H. A. Torii, Y. Yamazaki, *et al.*, “Ionization of helium and argon by very slow antiproton impact”, *Phys. Rev. Lett.* 101 (2008) 043201.
  27. G. Andresen, Y. Yamazaki, *et al.*, “Antimatter Plasmas in a Multipole Trap for Antihydrogen”, *Phys. Rev. Lett.* 98 (2007) 023402.
  28. R. Funakoshi, Y. Yamazaki, *et al.*, “Positron plasma control techniques for the production of cold antihydrogen”, *Phys.Rev.A*76(2007) 012713.
- [学会発表] (計 3 5 件)  
以下招待講演のみ詳細を記す
1. Y. Yamazaki, “Synthesis and spectroscopy of antihydrogen with the cusp trap: A progress report from MUSASHI/ASACUS”, POSMOL 2009, 2009/7/29-8/1, Toronto, Canada
  2. Y. Yamazaki, “Atomic processes accessible with ultra slow antiprotons: present status and future perspectives”, WE-Heraeus Seminar Atomic Theory for fundamental interactions and simple systems in strong field, 2009/1/18-21, Bad Honnef, Germany
  3. Y. Yamazaki, « Étude de l’antimatière à l’aide de l’antimatière », 30 mars 2009, Laval Univ., Quebec, Canada.
  4. Y. Yamazaki, “Antihydrogen synthesis for the CPT symmetry test: Listen to the whisper of nature”, Cold atoms and molecules, 2009/6/23-26, Kyoto, Japan
  5. Y. Yamazaki, “Atomic physics involving antiprotonic complex: antihydrogen atoms and antiprotonic atoms”, CAARI, 2008/8/10-15, Fort Worth, USA
  6. Y. Yamazaki, “Atomic physics with slow antiprotons and antihydrogen atoms”, WE Heraeus Physics School: Highly Charged Ions and Antiprotons, 2008/4/4-12, Bad Honnef, Germany
  7. Y. Yamazaki, “Antihydrogen”, 16<sup>th</sup> National Congress on Atomic and Molecular Physics, 2007/1/08-11, Mumbai, India.
  8. Y. Yamazaki, “反水素の生成と CPT”, 2007 August 04, Fundamental Physics using Atoms, 京都
  9. Y. Yamazaki, “Synthesis of cold antihydrogen atoms for CPT symmetry test: A short summary”, Seminar at Institute of Modern Physics, Lanzhou, 2007/7/06
- [図書] (計 2 件)
- ① *Cold antimatter plasmas and application to fundamental physics*, AIP Conf. Series 1037 (2008), eds., Y. Kanai and Y. Yamazaki
  - ② 新物理学事典 (第 3 章原子物理学) 講談社

p.175-219 (2009). 山崎泰規

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 泰規 (YAMAZAKI YASUNORI)

独立行政法人理化学研究所・山崎原子物理研究室・上席研究員

研究者番号：30114903

(2) 研究分担者

松田 恭幸 (MATSUDA YASUYUKI)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：70321817

(3) 連携研究者

金井 保之 (KANAI YASUYUKI)

理化学研究所・専任研究員

研究者番号：00177487

黒田 直史 (KURODA NAOFUMI)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：10391947

鳥居 寛之 (TORII HIROYUKI)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：20302838

檜垣 浩之

広島大学・先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：10334046

長嶋 泰之

東京理科大学・理学部・教授

研究者番号：60198322