

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔研究進捗評価用〕

平成24年度採択分

平成27年5月31日現在

研究課題名（和文） **反水素の超微細遷移と反陽子の磁気モーメントに関する研究**

研究課題名（英文） Hyperfine splitting of antihydrogen and Magnetic moment of antiproton

課題番号：24000008

研究代表者

山崎 泰規 (YAMAZAKI YASUNORI)

理化学研究所 原子物理特別研究ユニット・ユニットリーダー



研究の概要：反物質である反水素と反陽子の性質を研究し、対である水素原子、陽子と比較することにより、我々のすむ時空が、最も基本的な CPT 対称性を備えているかをこれまでにない精度でテストする。この研究はまた、見渡す限りの宇宙がなぜ物質だけからなるかを解明する手がかりを与えるかもしれない。

研究分野：数物系科学、物理学、原子物理学、素粒子物理学

キーワード：反物質科学、CPT 対称性、反水素、反陽子、高精度実験

1. 研究開始当初の背景

(1) 自然は P, CP, T などの離散的な対称性を場合によっては持たないことが知られているが、CPT を破る現象はこれまで見つかっていない。一方、CPT 対称性を保証する標準模型では説明できない物理現象が次第に明らかになりつつある。新しい物理への胎動が始まっている。

(2) 実験に目を転ずると、観測技術が飛躍的に進み、これまで考えられなかったような高精度の研究が可能になりつつある。基礎物理学の課題に新しいアプローチが拓けつつある。

2. 研究の目的

(1) CPT 対象な場合、ペアとなる物質と反物質の性質（寿命や質量、電荷や磁気モーメントの絶対値等）は、正確に一致する。高精度の観測を実現するには安定な系が必要で、反水素と水素、あるいは、反陽子と陽子の対は絶好の研究対象になる。

(2) 反水素の超微細遷移、あるいは、反陽子の磁気モーメントは3桁程度でしか知られておらず、また、水素の超微細遷移も理論計算は5桁目までしか再現できない。これが当面のターゲットとなる。

3. 研究の方法

(1) 独自開発したカスプトラップ法は、集束したスピン偏極冷反水素ビームを生成することができる。これにより、均一な低磁場領域に反水素を引出し、マイクロ波分光により超微細遷移周波数を高精度決定する。

(2) 陽子の磁気モーメントの直接測定は4年前に世界ではじめて実現した。さらに、昨年、二重ペニングトラップ法を現実のものとし、陽子の磁気モーメントを ppb の精度で決定した。これを反陽子に適用する。

4. これまでの成果

(1) 陽電子蓄積法の改善を進め、ほぼ2桁蓄積効率を向上した。反陽子-陽電子混合法の改善と高周波励起法の開発により、反水素合成率を高め、合成持続時間を長くすることによって（図1参照）、反水素ビームを2.7m下流まで引き出すことに成功した。

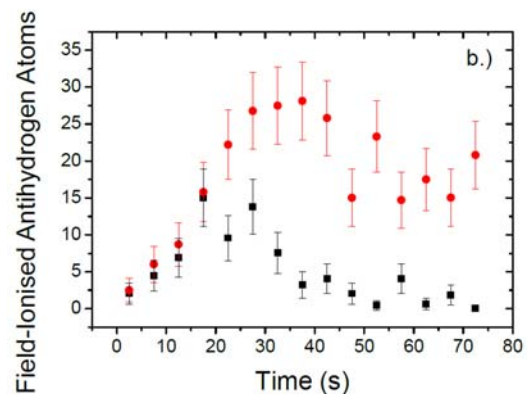


図1：反水素生成レートの時間依存性。■は単純な反陽子-陽電子混合の場合。●は高周波励起法を適用した場合。数10秒以降の反水素生成率が大幅に改善している。

反水素ビームを確認した後、カスプトラップ装置の大改造を敢行し、集束力の高い超伝導二重カスプ磁石の導入、半円筒形の3D反陽

[4. これまでの成果 (続き)]

子消滅位置トラッカーの開発と導入、反陽子と陽電子の操作 (捕捉・冷却・混合等) のための多重円筒電極群の更新、GBO 単結晶板を用いた高 s/n 比反水素ビーム検出器の開発と導入を進めた。時間的に非常にタイトであったが、すべての機器がほぼ設計通り、あるいは、それ以上の性能を持って稼働させることに成功した。2014 年度はこれらの更新された機器を駆使することで、おそらく基底状態にある反水素ビームの引出にも成功した。なお、反陽子捕捉トラップから二重カスプトラップへの反陽子の断熱的輸送は陽電子の加熱を抑え冷反水素を高い効率で生成するのに必須であるが、これまでより遙かに低い 15eV 付近での輸送も高い効率で成功している。

(2) 二重ペニングトラップ法を開発を進め、陽子の磁気モーメントを ppb の精度で決定することに成功した。これは、水素原子の超微細遷移測定により得られたより 3.5 倍高い世界最高精度となっている (図 2 参照)。

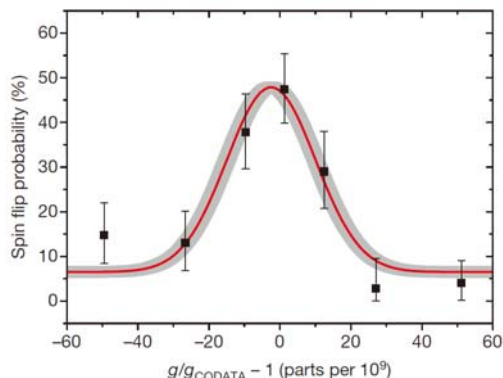


図 2 : 陽子の磁気モーメントの高精度測定。

単一反陽子の操作技術開発も極めて順調に進み、反陽子と負の水素イオンを順次入れ替えながらサイクロトロン周波数を精密測定することで、反陽子の質量電荷比をこれまでにない精度で測定することに成功した。ここで開発された手法は、高い精度を維持したまま一回の測定時間を大幅に短縮できるため、質量電荷比の日周変化を研究対象にすることがはじめて可能になった。この研究は空間の等方性についての知見を提供し、CPT 対称性とも深いつながりを持っている。今後大きく発展すると期待される。

5. 今後の計画

(1) 反水素ビームの強度増強、低温化のため、反陽子の断熱的輸送も含め、最適化を進める。その後、超微細遷移マイクロ波分光似

とりかかると。本研究課題期間内に所期の精度を達成したいと考えている。

(2) 既に陽子について成功している二重ペニングトラップ法を反陽子に適用し、ppb の精度で反陽子の磁気モーメントを決定する。質量電荷比、さらには、磁気モーメントの日周変化に注目して測定と解析を進める。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)
(研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線)

(1) Y. Nagata and Y. Yamazaki, A novel property of anti-Helmholz coils for in-coil syntheses of antihydrogen atoms: formation of a focused spin-polarized beam, *New J. Phys.* 16, 083026_1-10 (2014).

(2) A. Mooser, S. Ulmer, K. Blaum, K. Franke, H. Kracke, C. Leuteritz, W. Quint, C. C. Rodegheri, C. Smorra, J. Walz, Direct high-precision measurement of the magnetic moment of the proton, *Nature* 509, 596-599 (2014).

(3) N. Kuroda, S. Ulmer, D.J. Murtagh, S. Van Gorp, Y. Nagata, M. Diermaier, S. Federmann, M. Leali, C. Malbrunot, V. Mascagna, O. Massiczek, K. Michishio, T. Mizutani, A. Mohri, H. Nagahama, M. Ohtsuka, B. Radics, S. Sakurai, C. Sauerzopf, K. Suzuki, M. Tajima, H.A. Torii, L. Venturelli, B. Wuenschek, J. Zmeskal, N. Zurlo, H. Higaki, Y. Kanai, E. Lodi Rizzini, Y. Nagashima, Y. Matsuda, E. Widmann and Y. Yamazaki, A source of antihydrogen for in-flight hyperfine Spectroscopy, *Nature Communications* 4089_1-6 (2014).

(4) S. Ulmer, IUPAP Prize in Fundamental Metrology for work on Proton and Antiproton Magnetic Moment measurements, 2014/8

(5) Y. Yamazaki and S. Ulmer, CPT symmetry tests with cold p and antihydrogen, *Ann. d Physik* 525, 493-504 (2013).

(6) 山崎泰規, 第 5 2 回東レ科学技術賞 (エキジチックなビームによる原子物理学と反物質科学の開発的研究) 2012/3.

(7) 山崎泰規, 第 1 5 回松尾財団宅間宏記念学術賞 (冷反水素の生成・制御登坂物質科学の展開) 2011/10.

ホームページ等

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/asacusa/wiki/>

http://asacusa.web.cern.ch/ASACUSA/asacusaweb/antihydrogen_cusp/main.shtml