

平成 22 年 3 月 31 日現在

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）Developments of antimatter science with antihydrogen atoms and antihydrogen ions

研究代表者 山崎 泰規 (YAMAZAKI YASUNORI)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：30114903

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：反物質科学、反水素生成・分光、反陽子、陽電子、非中性プラズマ

1. 研究計画の概要

本研究グループの独自開発になるカスプトラップ法を軸に、(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、および、(2) 反水素イオンの生成と反物質-物質間の重力相互作用研究を進める。

(1)のため、冷反水素原子ビームを生成し、超微細遷移を高分解能マイクロ波分光する。反陽子の磁気モーメントをこれまでより桁高い精度で決定すると共に、反陽子の内部構造に関わる Zemach 効果についても知見を得る。これにより従来にない精度で物質 - 反物質間の CPT 対称性をテストする。(2)反水素イオンは正に帯電しているため、レーザー冷却されたイオンにより共同冷却することができる。これをレーザー脱離させ、極低温反水素原子として自由落下させることで、反物質(反水素原子)と物質(地球)間の重力相互作用研究を現実のものとする。

なお、本研究の基盤設備である(1)四重極高周波減速器、(2)大容量反陽子蓄積器、(3)反水素生成用カスプトラップ、(4)大容量陽電子蓄積装置は本グループのこれまでの開発研究により整備を終え、稼働状態にある。

2. 研究の進捗状況

本研究が開始されてから、以下に列記するような機器開発を行い、また成果を得た。

- (1) 反陽子蓄積条件の最適化を進め、 10^7 個の反陽子を安定に蓄積、冷却することに成功した。これは当研究グループがこれまでに保持していた反陽

子蓄積数記録を更新するものである。

- (2) 一成分反陽子雲の回転圧縮に世界で初めて成功した。また、これとは別に、電子との 2 成分プラズマの圧縮にも成功した。いずれも反水素合成、操作に必須の技術課題である。
- (3) カスプトラップへの反陽子輸送を 90% という高い効率で実現し、数百万個の反陽子を不均一磁場を持つカスプトラップ中で安定蓄積、冷却することに成功した。
- (4) 反水素合成確認用の大面積 2 次元トラック検出器を設計製作した。ほぼ設計通りの性能を得た。
- (5) 反水素原子分光用の 6 重極磁石の設計、製作を終えた。2010 年度から実戦投入の予定である。
- (6) 30eV という超低エネルギーの直流反陽子ビーム生成に世界で初めて成功した。
- (7) 数 keV - 数 10keV 領域の反陽子によるヘリウム原子のイオン化断面積の正確な測定に成功し、長年の問題であった理論予測との乖離問題を明白に解決した。
- (8) カスプトラップ中への反陽子と陽電子の同時閉じこめ、冷却、操作(圧縮)、さらに安定的混合に成功した。いずれも不均一磁場を持つカスプトラップ中では初めての成功例となっている。
- (9) トラップ中の反陽子数の非破壊測定に世界で初めて成功した。
- (10) カスプトラップ中での冷却された反陽子と陽電子の混合時に消滅する反

陽子の消滅位置分布の時間変化を分析し、反水素生成に関わる時間帯を特定した。

- (11)2008, 2009 両年度は、反陽子生成加速器が不安定性で、かつ、肝心のタイミングで全所停電があるなど、せっかく得られたビームタイムが有効に使えず、カスプトラップによる反水素生成の確認には後一步で及ばなかった。
- (12)8 重極磁場中での反水素合成には成功した。反水素捕獲への重要なステップとなっている。
- (13)反水素イオン生成に関わる研究を進め、陽電子大量生成、陽電子蓄積、ポジトロニウムの高密度生成、の3つに分けて研究開発を進めた。

3. 現在までの達成度

やや遅れている: いくつかの要因があるが、最大のもは AD, PS 等加速器の不調、故障で、ビーム供給割合は 50%前後にとどまっている。そのためもあって、結果的に反水素合成の確認には至らなかった。が、反陽子と陽電子の安定的捕捉と操作、両者の混合、消滅信号の観測等、カスプトラップ中で必要となるほとんどの操作には成功し、カスプトラップ法の優位性を証明した。遅れているとはいえ、他グループの進捗スピードと比較すると、数倍を達成していると考えている。

4. 今後の研究の推進方策

2010 年度から LHC が本格稼働したので、入射器である PS(プロトンシンクロトロン)の運転も今後は安定し、従って、我々の実験もスムーズに進むと考えている。

以上を勘案し、2010 年度初等には後一步と迫っている反水素合成を確認する。確認に成功し次第、反水素のマイクロ波分光実験にとりかかる。既に反水素の磁気モーメント分析用 6 重極磁石、スピンドリップ用キャビティ等の手配は終わっており、残された 2 年を分光研究にかける。反物質 - 物質間の重力相互作用研究は反水素イオン生成にかかっており、2(13)に記したように、高効率生成法の開発研究を 3 つの柱に分けて精力的に進める。

5. 代表的な研究成果

(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 16 件)

Antihydrogen formation dynamics in a multipolar neutral anti atom trap, G.B. Andresen, P.D. Bowe, J.S. Hangst, Y. Yamazaki(他 32 名), Phys.Lett. B685, 141 -

145 (2010). 査読有

Ionization of Helium and Argon by Very Slow Antiproton Impact, H. Knudsen, H. P.E. Kristiansen, N.Kuroda, Y.Nagata, H.A. Torii, Y.Yamazaki, H.Imao(他 9 名), Phys. Rev.Lett.101, 043201(1-4) (2008). 査読有

Temporally Controlled Modulation of Antihydrogen Production and the Temperature Scaling of Antiproton-Positron Recombination, M. C. Fujiwara, J. S. Hangst, Y. Yamazaki, (他), Phys. Rev. Lett. 101, 053401(1-4) (2008) 査読有

Radial Compression of a Non-Neutral Plasmas in a Cusp Trap for Antihydrogen Synthesis, H.Saitoh, A.Mohri, Y.Enomoto, Y.Kanai, and Y.Yamazaki, Phys. Rev. A (Rapid Comm.)77, 051403(1-4)(2008) 査読有

Radial compression of antiproton cloud for production of intense antiproton beams, N. Kuroda, H.A. Torii, M. Shibata, Y. Nagata, D. Barna, M. Hori, D. Horvath, A. Mohri, J. Eades, K. Komaki, and Y. Yamazaki, Phys. Rev. Lett. 100, 203402(1-4) (2008) 査読有

[学会発表](計 9 件)

[図書](計 1 件)

[その他]

耳をすまし、反物質のささやきを聞く、産経新聞、2009 年 5 月 26 日

『よたよた反陽子』の雲を自在に操作-高効率で大量の反水素生成へ重要な一歩-、日経プレスリリース、2008 年 5 月 2 日

ASACUSA moves towards new antihydrogen experiments」CERN Courier 2008, February, p.9

超高速粒子を止めて、誰も見たことのないものを見る、RIKEN NEWS #319, 2008, 1 月号

現代物理の常識を揺るがす反物質:「自然のささやき」を聞き真理に迫る、日経ムック

Even better mousetraps: First test with new ASACUSA trap show promise for future antihydrogen beam experiments, CERN Bulletin 2007, December

アウトリーチ活動:

東大駒場オープンキャンパスにて「反物質の世界」

理化学研究所一般公開にて「反物質の世界」

ホームページ情報:

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

<http://www.riken.jp/r-world/research/lab/wako/atomic/index.html>