

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2022

課題番号：19KK0075

研究課題名（和文）反水素原子の超微細構造分光によるCPT対称性の探究

研究課題名（英文）Investigating CPT symmetry with Antihydrogen Spectroscopy

研究代表者

松田 恭幸（MATSUDA, Yasuyuki）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：70321817

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,200,000円

研究成果の概要（和文）：CERN AD（反陽子減速器）に新たに設置された ELENA減速蓄積リングから引き出される高強度・高輝度の低速反陽子ビームを最大限に活用し、効率的に蓄積・冷却し、冷えた反水素原子を大量に原子ビームとして引き出すための開発を行った。
ELENAからのビーム特性に最適化された反陽子減速装置を新たに設計・設計するとともに、反陽子を蓄積するための多重電極ペニングトラップを更新し、同時に実験装置をリモートで制御する体制を整えることで、ADの運転期間中24時間継続してビームを無駄なく利用できる体制を整えた。1年間に用いることができる反陽子数を飛躍的に増大させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の宇宙に物質は存在するが反物質はほとんど存在しないのは何故か、という謎を解明するために、我々はもっとも単純な物質である水素原子と、もっとも単純な反物質である反水素原子の性質の違いを精密に調べるための研究を CERN AD 施設において行ってきた。
本研究においてはADにおいて新たに ELENA が稼働するのに合わせ、この装置から供給される反陽子ビームを最大限に利用するために既存の装置を大幅に更新・改良し、実験に利用できる反陽子の数を飛躍的に向上させることに成功した。反水素分光実験の精度を大きく向上するとともに、反陽子と原子間の散乱実験等の他の研究の可能性も拓くこととなった。

研究成果の概要（英文）：Taking advantage of the newly installed ELENA deceleration ring at the Antiproton Decelerator facility at CERN, we have developed a new apparatus to realize intense antihydrogen atomic beam. An additional deceleration scheme has been implemented to match the beam character from ELENA, and the multiring penning trap, which stores antiprotons has been vastly improved so that efficient catching and cooling of antiprotons are realized. The new apparatus has enabled us to carry out experiments 24hours/7days, partly thanks to controlling circuits which can be handled off-site, boosting the available amount of the antiprotons for antihydrogen experiments and others.

研究分野：低エネルギー素粒子物理学実験

キーワード：反水素 反陽子 CPT対称性 マイクロ波分光 超微細構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々の宇宙において物質が優勢である理由は何か、という謎を解き明かすために、我々 ASACUSA 国際共同実験では最も単純な反物質である反水素原子の精密な分光を行い、これを (最も単純な物質である) 水素原子と比較すべく、これまでも研究を進めてきた。

反水素原子の精密測定を行うためには大量の反陽子を実験に用いることが必要であり、こうした実験を行うことができるのは、CERN 研究所の反陽子減速器 (AD) が世界で唯一の場所となる。これまでの実験遂行上の課題の一つは AD から供給される 5.3MeV の反陽子を捕捉・蓄積する際の効率の低さであったが、本研究の開始時点において、AD に付随する新たな反陽子減速リングである ELENA の建設が進められており、反陽子の捕捉効率の飛躍的な向上を果たすために実験装置の新規開発・改良が急務となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、

(1) ELENA から反陽子蓄積器までの輸送ビームラインにおいてビームをハンドリングするために必要なビームプロファイルモニターの制作

(2) 改良型反陽子蓄積・冷却トラップの開発による反陽子蓄積効率と冷却効率の向上

(3) 反水素合成用カスプトラップの改良による反水素原子合成効率の向上

(3) 反陽子蓄積トラップ、反水素合成用カスプトラップをはじめとする実験装置のリモート制御による実験遂行効率の向上

を始めとする技術開発を行い、他資金あるいは他の共同研究者によって進められている、ELENA からのビームパラメータに最適化された反陽子減速器、反水素マイクロ波印可装置、反水素検出装置等の改良と併せて、反水素合成効率の飛躍的な増加と、反水素分光精度の向上を目的とした。

3. 研究の方法

(1) ビームプロファイルモニターについては、反陽子ヘリウム原子のレーザー分光実験のために先行して開発が進められてきた 20 μm 径の極細金属ワイヤーからの 2 次電子放出を利用したデザインを踏襲し、制作することとした。

(2) 反陽子蓄積・冷却トラップにおいては、これまで用いていた多重リング型電極の改良を行い、上流部で ELENA からの反陽子ビームを捕獲したのちに下流部の蓄積・冷却トラップに輸送するスキームの実現を図ることとした。これまでは一つのトラップを用いて反陽子の捕獲・蓄積と冷却を行っていたため、反陽子を冷却するフェイズに入ると、AD から継続的に供給されている反陽子を利用することができなくなってしまうのが大きな問題であった。この分離によって ELENA からの反陽子を最大限に活用することが可能となる。

(3) これまで AD においては、1 日を 8 時間ずつ 3 つの時間帯に分割し、AD で行われている実験プロジェクトが順番にビームを利用するという形態で運転をおこなってきた。ELENA の運転開始後は、すべての実験プロジェクトに 1 日 24 時間継続してビームを供給できるようになる。反陽子蓄積・冷却トラップや反水素合成用カスプトラップ等の運転をリモート制御できるように改良を行い、場合によっては日本国内から実験に参加できる体制を整えることで、これらのビームを最大限に活用できるようにした。

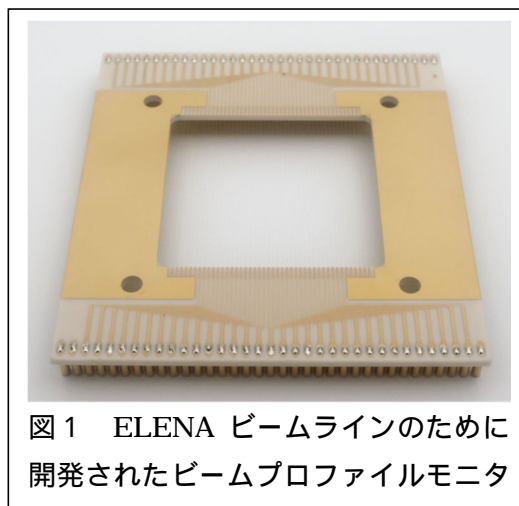


図1 ELENA ビームラインのために開発されたビームプロファイルモニター

4. 研究成果

ELENA からの反陽子ビームをモニターするためのプロファイルモニターは 2019 年から順次ビームラインにインストールされ、2020 年には反陽子と同じ正電荷とほぼ同じ質量を持つ H⁺ イオンを用いて試験が行われた。ほぼ満足すべき性能が得られたが、一部に極細金属ワイヤーの破損が見られ、修理等を行った。2021 年以降の実験ではこのモニターを用いて ELENA からの反陽子ビームのモニターを行ったが、これまでのモニターと異なり準非破壊的にプロファイルを測定できる点、また、モニター点が多いこともあって、実験を行うためのビームのチューニングに要する時間を大きく短縮することができた。

反陽子蓄積・冷却トラップの直前には、新たにドリフトチューブ型エネルギー調整機を設置した。この目的は ELENA から供給される反陽子ビームのエネルギーを、もっとも捕獲しやすいエネルギーに調整するためである。このエネルギー調整機の設置と、反陽子蓄積・冷却トラップの

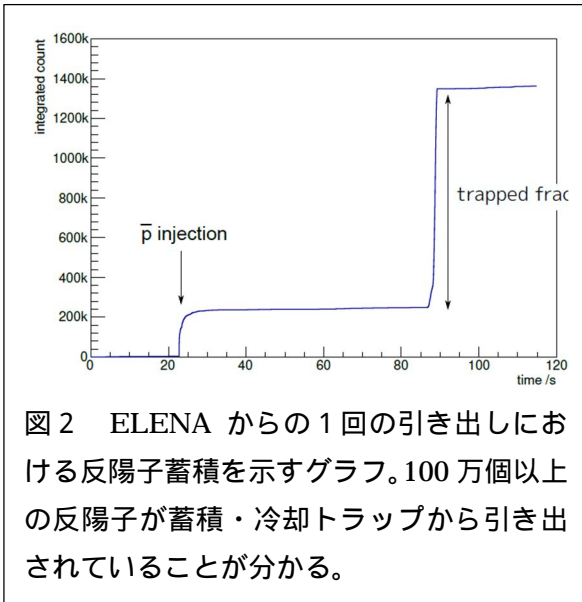


図2 ELENA からの1回の引き出しにおける反陽子蓄積を示すグラフ。100万個以上の反陽子が蓄積・冷却トラップから引き出されていることが分かる。

改良により、ELENA からの1回の反陽子引き出しで 100 万個以上の反陽子を捕獲することに成功した。これは ELENA を用いて実験を行っている他研究グループと比較しても 10 倍以上高い効率である。

反水素合成用カスプトラップについては、まったく新しい設計の多重円筒電極を新たに制作し、導入した。1つ目の大きな改善点は反陽子雲と陽電子雲を蓄積・制御し、反水素を合成する上流部の電極の内径を 80mm から 34mm へと小さくしたこと、制御用電圧をかけることができる4分割電極の位置を増やしたことである。これによって反陽子雲と陽電子雲の蓄積ポテンシャルのコントロールが容易となるとともに、大量に捕獲した反陽子と陽電子の(強磁場中における)蒸発冷却を試みることができるようになった。2つ目の大きな改善点は反水素原子の電場によるイオン化(フィールドイオン化)を行う

ためのメッシュ電極を導入したことである。ビームとして引き出された反水素原子の主量子数分布をより精度よく測定することが可能となり、上流部のプラズマ制御の高度化と合わせて、

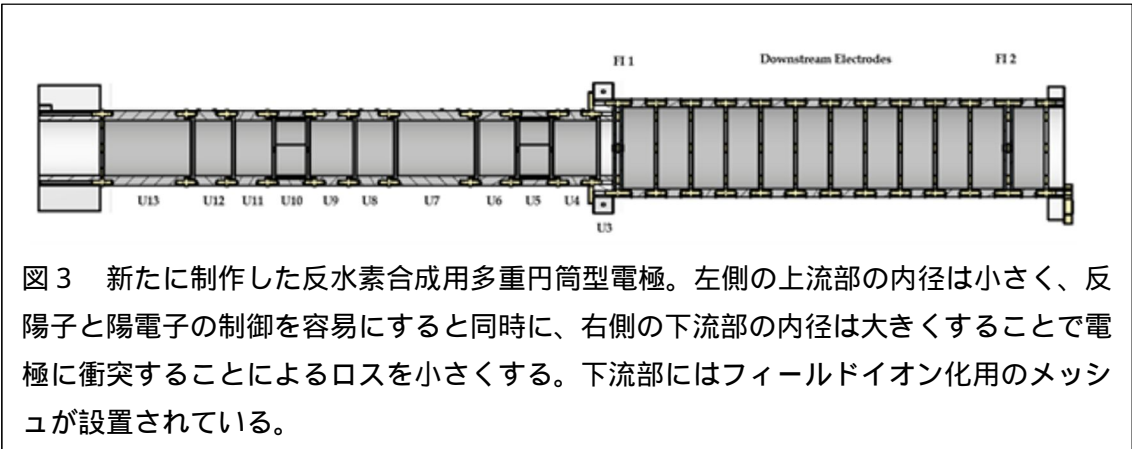


図3 新たに制作した反水素合成用多重円筒型電極。左側の上流部の内径は小さく、反陽子と陽電子の制御を容易にすると同時に、右側の下流部の内径は大きくすることで電極に衝突することによるロスを小さくする。下流部にはフィールドイオン化用のメッシュが設置されている。

より低い温度で、かつ主量子数が小さい反水素を合成するためのパラメータ探索を行うことが可能となった。

この電極への電源等からのノイズの混入を防ぐために、極低温下で動作する低域通過フィルタを導入した。また、設置時にはビーム軸と磁場軸と電極軸の間のアラインメントを調整することによって、反陽子プラズマと陽電子プラズマの加熱を抑制した。

これらのセットアップの性能試験は陽電子の代わりに電子プラズマを用いて行われた。この過程において、外部からのマイクロ波領域のノイズがビームを引き出す開口部から流入しており、これが大きな加熱要因となっていることが判明した。急遽、反水素原子の引き出しを妨害しない(約 80%の透過度を持つ)メッシュ状のシールドを導入した結果、大きなこれまで 120K 程度までしか冷却されなかった電子プラズマを、その数を失わないままで(パッシブに)35K 程度にまで冷却することに成功した。このことは基底状態の反水素原子の大量合成という目標において非常に大きなステップと言える。さらに、蒸発冷却を行うことによって 8K 程度にまで冷却することにも成功し、陽電子数が確保できればこれまでない反水素原子の大量合成が可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 B. Kolbinger et al. | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 Measurement of the principal quantum number distribution in a beam of antihydrogen atoms | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The European Physical Journal D | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjd/s10053-021-00101-y | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 M. Tajima et al. | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Antiproton beams with low energy spread for antihydrogen production | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 JOURNAL OF INSTRUMENTATION | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/14/05/P05009 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 C. Malbrunot et al. | 4. 巻 935 |
| 2. 論文標題 A hydrogen beam to characterize the ASACUSA antihydrogen hyperfine spectrometer | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A | 6. 最初と最後の頁 110-120 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/J.NIMA.2019.04.060 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 V. Kraxberger et al. | 4. 巻 1045 |
| 2. 論文標題 Upgrade of ASACUSA's antihydrogen detector | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment | 6. 最初と最後の頁 167568 ~ 167568 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2022.167568 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 C. Amsler et al. | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 Reducing the background temperature for cyclotron cooling in a cryogenic Penning?Malmberg trap | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physics of Plasmas | 6. 最初と最後の頁 083303 ~ 083303 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0093360 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計1件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 黒田直史 |
| 2. 発表標題 ELENA 反陽子ビームの高効率トラップ用ドリフトチューブの開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 鳥居 寛之 (TORII Hiroyuki) (20302838) | 東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授 (12601) | |
| 研究分担者 | 田島 美典 (TAJIMA Minori) (20821838) | 国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・特別研究員 (82401) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 | | | |
|---------|------------------|--------|-------|------|
| オーストリア | ステファンマイヤー研究所 | ウィーン大学 | | |
| スイス | 欧州原子核研究機構 (CERN) | | | |
| イタリア | 核物理研究所 (INFN) | ブレシア大学 | ミラノ大学 | 他1機関 |
| ドイツ | マックスプランク研究所 | | | |