

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01930

研究課題名(和文)大強度超低速反陽子ビームによる反水素原子高精度分光

研究課題名(英文) Precision spectroscopy of antihydrogen using intense low energy antiproton beam

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) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：CERN ADに新たに設置された ELENA 減速蓄積リングのポテンシャルを最大限に活用すべく、新たにドリフトチューブ型反陽子ビームエネルギー調整器を制作し、反陽子蓄積トラップの入射部に設置した。ELENA からの1回の反陽子引き出しあたり100万個以上という非常に高い効率で反陽子を捕獲し、大強度・超低速の反陽子ビームを生成することに成功した。パルス状に引き出した反陽子と陽電子を混合することで低音の反水素原子をパルス状に生成され、S/N 比の良い反水素原子分光を行うことができる。また、DC状に引き出すことで反陽子との原子核反応や原子散乱実験も可能となり、反陽子を用いた様々な研究に貢献できる。

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存在しない」という宇宙における物質と反物質の非対称性の源を確かめるため、我々はもっとも単純な反物質である反水素原子の分光を行うべく研究を続けており、本研究において高効率で反陽子を捕獲することに成功したことによって、実験で利用できる反陽子の数は飛躍的に向上し、この謎の解明に大きく前進した。我々が(対消滅せずに)宇宙に存在するのは物質と反物質の間に非対称性があるためだと言うことができ、この課題は人類が古来から自らに問いかけてきた問題に、物理学の立場から応えようとするものと言える。その意味で、この謎の解明は大きな社会的な意義を持つ

研究成果の概要(英文)：We have constructed a drift-tube type beam energy adjuster at the upstream of the antiproton storage trap. By tuning injection energy to the storage trap, we have succeeded to capture more than 1 million antiprotons per injection from ELENA, and to extract an intense antiproton beam with low energy. Pulsed extraction enables us to make an pulsed antihydrogen beam after mixing with positron cloud, and this pulsed nature of the antihydrogen beam is the key to achieve high-precision microwave spectroscopy of antihydrogen atoms. DC extraction is also possible, and it will open possibilities to study nuclear reaction or atomic collision process with antiproton.

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

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。AD においては ALPHA 共同実験が反水素原子を磁気瓶中にトラップし世界初となるマイクロ波分光に成功しているがその精度は低く、さらなる向上のためには、反水素原子をビームとして引き出し、磁場がない環境下でマイクロ波を印加し分光を行うことが必要である。そこで我々は高強度の反水素原子ビームを実現するための技術開発を進めてきた。

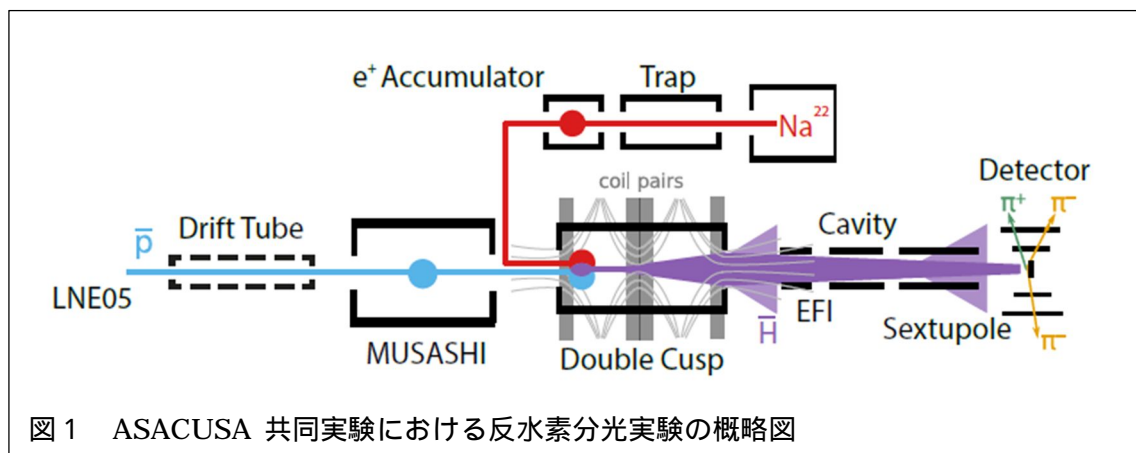
一方で AD における実験遂行上の課題の一つは AD から供給される 5.3MeV の反陽子を捕捉・蓄積する際の効率の低さであったが、本研究の開始時点において、AD に付随する新たな反陽子減速リングである ELENA の建設が進められており、反陽子の捕捉効率の飛躍的な向上を果たすために実験装置の新規開発・改良が急務となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、ELENA から供給される反陽子ビームのエネルギー、バンチ幅等の特性に合わせたビームエネルギー調整器を設計・制作し、反陽子蓄積トラップにおける捕獲効率の飛躍的な向上を果たすことを目標とした。これによって得られる高強度・低エネルギーの超低速反陽子ビームは、反陽子蓄積トラップの下流に設置された反水素合成トラップ中で陽電子と混合され、パルス状に反水素原子を生成する。このパルス的な時間情報を用いて、反水素の分光を S/N が良い環境下で行うことが可能となる。

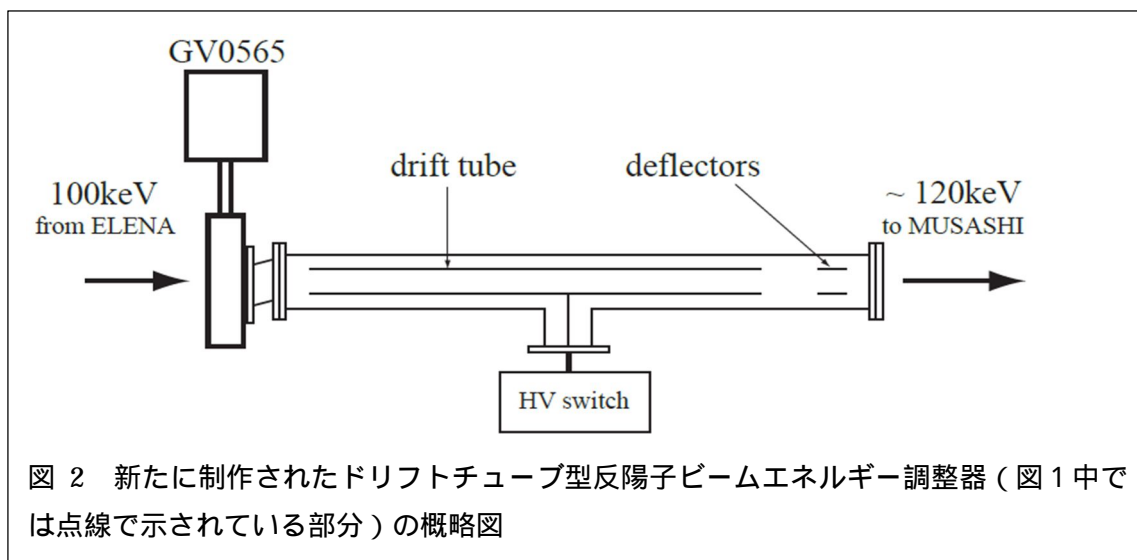
3. 研究の方法

下に ASACUSA 共同実験のセットアップの模式図を示す。



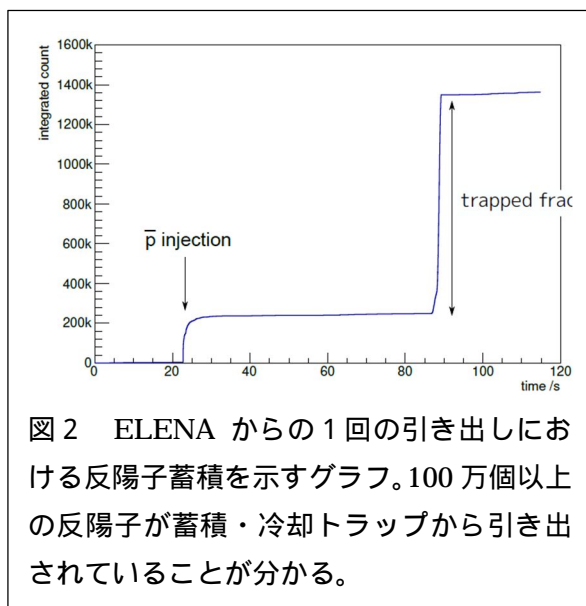
左側の ELENA からの輸送ビームライン (LNE05) から入射した反陽子ビームは、MUSASHI 反陽子蓄積トラップにおいて捕獲、冷却され、パルス状にダブルカusp反水素生成トラップに入射される。ダブルカusp反水素生成トラップにはあらかじめ陽電子が入射され蓄積されており、反陽子と陽電子を最適な条件で混合することによって反水素原子がパルス状に生成され、右側に引き出される。基底状態の反水素原子のうち、特定の超微細準位にある原子はダブルカusp状の磁場によって収束されマイクロ波を印加するキャビティに導かれるが、それ以外の準位にある反水素原子は磁場によって拡散されるので、キャビティまで届かない。マイクロ波が印加されていなければ、反水素原子はそのまま右側に飛行を続け、最終段に置かれた検出器で検出されるが、キャビティ内のマイクロ波によって超微細準位間の遷移が起きた場合には、検出器の手前にある六重極磁石によって拡散され、検出器には届かない。これによって遷移周波数を求めることができる。このセットアップのカギは、反水素原子がパルス状に生成されることによって、検出器の S/N 比が大きく向上することである。バックグラウンドが多い加速器施設中の実験であるため、S/N 比の向上は大きな意味を持つ。もう一つのカギは、マイクロ波を印加する場所に強い磁場がなく、したがって磁場による遷移の広がりが少ないことである。このことは原理的に磁気瓶中の分光実験を上回る精度で分光実験を行うことができることを保証する。

MUSASHI 反陽子蓄積トラップは高真空度を保つ必要があるため、ELENA からのビームラインの間には薄膜を置き、真空を分ける必要がある。また、反陽子の入射位置をトラップの軸に合わせるためのプロファイルモニタも必要となる。研究計画申請時においては、二つの真空を分ける機能と ELENA からの反陽子ビームの減速の機能を兼ねる減速膜と、ELENA からのビームラインのために開発した透過型のプロファイルモニタを用いて捕捉効率を高める計画であったが、低エネルギー反陽子と原子核との反応断面積の実測データは乏しく、GEANT や SRIM 等のシミュレーションコードの信頼性も我々が問題とする数 keV 領域では高いとは言えないことが問題であった。すなわち、シミュレーションで定めた減速膜の厚さが最適なものではなかったことが判明した場合、別の厚さの減速膜に交換するためには、高真空を破る作業が必要となり、数週間のロスとなる。そこで、これまでも実績がある PET 薄膜を用いたプロファイルモニタを継続して利用し、ELENA からのビームのエネルギーを自由に変更できるドリフトチューブ型反陽子ビームエネルギー調整器を新たに開発することとした。PET 薄膜を用いたプロファイルモニタは真空を分けるための薄膜とプロファイルモニタの機能を兼ねることになる。



ELENA からの反陽子ビームのエネルギーは 100keV、バンチ幅は 75ns とされており、このバンチの中の反陽子の 95% 以上のエネルギーを自在に変更することができる。PET 薄膜の厚さから、120keV が最適な入射エネルギーと見込まれるため、図では加速される形になっている。また、エネルギー調整器の下流部にはビームステアリングのための電極を配置した。

4. 研究成果



ドリフトチューブ型エネルギー調整器の設置によって 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蓄積トラップ内に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り、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となった。

一方で、ELENA からの反陽子ビームの特性が想定より大きく変動することがあることも明らかとなり、ELENA からのビームの軸とビームエネルギー調整器の軸がずれることによる捕獲効率の低下が起り得ることが判明した。上流の輸送ビームライン中には我々が開発した透過型プロファイルモニタを多数設置しており、ステアリングのための電極を利用して調整は可能であるが、こうしたビームチューニングを短時間のうちに行うための手順の確立が課題となる。

反陽子蓄積トラップの下流に設置され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、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

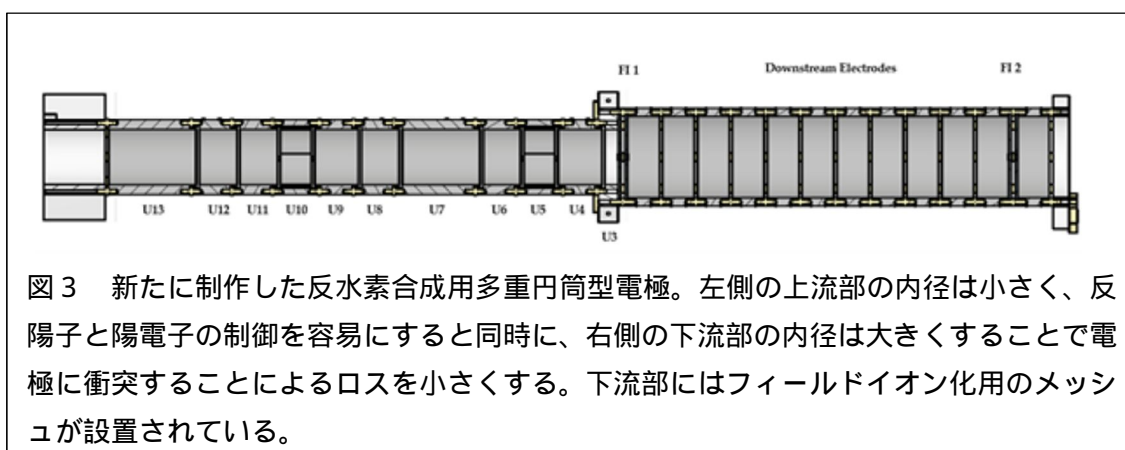


図3 新たに制作した反水素合成用多重円筒型電極。左側の上流部の内径は小さく、反陽子と陽電子の制御を容易にすると同時に、右側の下流部の内径は大きくすることで電極に衝突することによるロスを小さくする。下流部にはフィールドイオン化用のメッシュが設置されている。

(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 程度までに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にない反水素原子の大量合成が可能となる。

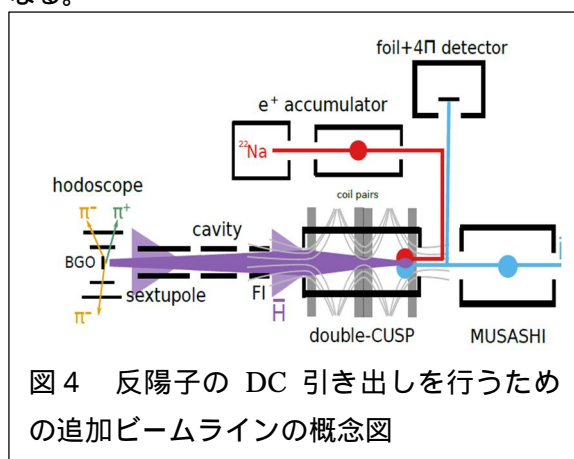


図4 反陽子の DC 引き出しを行うための追加ビームラインの概念図

先に述べた通り、反陽子蓄積トラップからは DC 状に反陽子を引き出すことも可能であり、これを用いることで、反陽子と原子核との反応断面積や反陽子と原子との散乱断面積の測定が可能となる。特に、反陽子と原子核の低エネルギー(～数十 keV)における反応断面積については実験データが不足しており、また数少ない実験データには GEANT や SRIM 等のシミュレーションとの食い違いが見られる。この問題を解決するための実験を行うべく、DC ビームラインの設置が進められている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kolbinger B. 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 91-1, 91-14
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 Amsler C. 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

1. 著者名 Kraxberger V. 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

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西諒真
2. 発表標題 反陽子荷電半径測定のためのマイクロ波分光装置の開発 2
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

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

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			
イタリア	INFN研究所	ブレシア大学	インサブリア大学	
スイス	CERN研究所			
ドイツ	マックスプランク研究所			