

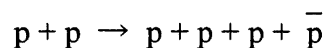
論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 市岡利康

序

本論文は、全6章、及び、appendix から成っている。第1章は、一般論、歴史的経緯、等、本研究の位置づけ、意義を理解するに必要となる学問的背景が簡単に記述されている。第2章は、本研究が開始されるに至った諸状況、特に最近 CERN で運転が開始された反陽子減速器 AD(Antiproton Decelerator)の現状と、これに関わって我が国を中心として進められている ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons) 計画についてまとめている。第3章は、本研究の理論的基礎付けを与え、機器設計のガイドラインを与える非中性プラズマの概念、性質について、これまで知られているところを申請者の理解する範囲でまとめている。第4章は、本研究に用いた装置の設計思想と具体的な構造、材質、の選定がどのようにしてなされたか、について議論している。第5章は本研究の中心部であって、上の装置を使って実際に申請者が行った実験、及び、実験によって得られた結果についてまとめると共に、実験結果が意味するところを主に定性的に解析している。第6章は全体のまとめとなっている。

ここで研究対象としている超低速反陽子ビームは、数 10GeV の陽子と原子核の衝突において生じる



反応により生成される数 GeV の反陽子をストレージリングにかき集め、stochastic cooling と減速、電子冷却を繰り返すことにより数 10 秒から数分といった巨視的時間をかけて数 MeV とした後、RFQ (radio frequency quadrupole) 減速器により数 10keV に、そしてさらに電磁トラップ中での電子冷却により数 10K まで冷却した後、数 eV の単色ビームとして取り出すことによって用意される。最終的なビームエネルギーは生成時の 10 億分の 1 以下という粒子発生装置としてはほとんど例のないものとなっている。このような超低速反陽子ビームは、プロトニウム ($\bar{p}p$) をはじめとする反陽子原子の生成ダイナミクスの解明、準安定状態で真空中に生成される反陽子原子の精密分光、ひいては、反水素の大量生成と CPT 対称性の検証等、といったこれまで実行不可能であった新しい研究を可能にすると期待される。

論文申請者は、上に述べた超低速反陽子ビーム開発において、最終段の数10keVの反陽子の電磁トラップへの捕捉と冷却に関わる実験装置を設計、製作し、さらに、負の水素イオンを用いて冷却実験を行うことにより、その性能を確かめている。

反陽子を閉じこめるために設計された電磁トラップは、多重リングトラップと呼ばれる独特のものである。多重リングトラップは、(1)通常のペニングトラップに比べて格段に荷電粒子捕捉体積が大きく、(2)同時に捕捉領域内に外部電場が印加可能であるため、通常の井戸型トラップと異なり大型化し多数の粒子を捕捉しても、閉じこめ性能が劣化しないと言う著しい特徴を持っている。この2つの特徴を兼ね備えることにより、本研究で必要となる大量の反陽子捕捉、電子冷却が可能となった。一方、多重リングトラップは構造が複雑で、高い加工精度が要求されると同時に、極高真空条件下、液体ヘリウム温度下において、これを運転可能にする必要がある。これには多くの技術的困難が伴ったが、本申請者はこれらの問題を順次解決し、ほぼ所期の目的を達成した電磁トラップの作成に成功している。

反陽子の冷却はあらかじめ電磁トラップに蓄えられたプラズマ状態にある電子との衝突によって達成される。ところで、強磁場中に捕捉された電子はシンクロトン放射により自動的に冷却されるため、反陽子+電子の混合系は短時間のうちに(本研究の条件下では10秒程度)環境温度(本研究の場合は数10K)程度まで冷却されることになる。そのような電子プラズマが多重リングトラップ内でどのように振舞い、また、どのようにコントロールできるかには、知られていないことが多数あった。論文申請者は、井戸型トラップの研究で知られていた回転電場を加える方法を援用し、電子プラズマの動径分布をコントロールする事に成功した。また、プラズマの重心運動をモニターすることにより、プラズマに含まれる粒子数を決定した。このような非破壊的手法によるプラズマ診断は、実際に反陽子の冷却を行うとき、必須の技術となる。また、実験の過程で、多重リングトラップの閉じこめ性能は、予想通り井戸型トラップより優れていることも示している。

論文申請者は、このように電子プラズマのコントロールに成功した後、負の水素イオンの電子冷却実験を行っている。負の電子イオンは束縛エネルギーが浅く、電子脱離断面積が大きいため、大変扱いにくいイオンであるが、トラップ全体を400K付近でベークした後、10K程度まで冷却することにより、残留ガスを極力減らし、実際に負の水素イオンを電子冷却する事に成功した。この際、上で述べた非破壊のプラズマ診断法をフルに使い、負の水素イオン打ち込み後の電子プラズマ温度の時間依存性を詳細に観測すると共に、モデル計算が、この振る舞いを再現できることを示した。これは、観測している現象が、概ね実験者のコントロール下にあることを示しており、超低速反陽子ビーム発生装置として十分使用可能であることを裏付けている。

結び

本研究は、10数人の研究者が関わる中型の実験的研究であるが、論文申請者は、研究テーマの設定、解析等実験の全般に関わり主体的に分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断される。よって、審査委員会は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと判定した。