

論文審査の結果の要旨

氏名 黒田直史

本論文は6章からなり、第1章は超低速反陽子を必要とする学術的背景、第2章は実験装置、第3章は反陽子の蓄積・閉じ込め実験結果、第4章は蓄積反陽子の冷却、第5章は超低速反陽子の引き出しと輸送、について述べられており、第6章は結語である。

反陽子を大量に電磁トラップ中に捕捉し、超低速ビームとして引き出すことは、反水素原子の大量生成や、物質と反物質との束縛系である反陽子原子の生成などの研究に欠かすことのできない実験技術である。これらのことから、長年大強度超低速の反陽子が必要とされてきた。本論文は欧州原子核研究機構 (CERN) において、それを実現した研究の集積である。

まず反陽子生成は26GeVの陽子をイリジウム標的に衝突させ、陽子-陽子衝突で生成させている。生成された反陽子の運動エネルギーは、生成の閾値エネルギー付近においても GeV 程度あり、超低速エネルギーにするためには9桁もエネルギーを下げる必要がある。本研究では、CERNで稼働中の反陽子減速器(AD) を用い、それと高周波四重極減速器(RFQD)、多重電極トラップ(MRT) 及び超低速反陽子輸送ビームラインを組合せるという手法により、反陽子を電磁トラップ内に大量に捕捉、冷却し、トラップから超低速反陽子ビームとして引き出すことに成功している。

実験に用いた装置の概略は以下の通りである。AD 内で5.3 MeV まで減速された反陽子は、1 ショット当たり 2×10^7 個取り出される。これをRFQD で110 keVまで減速し、さらに2.5 T の超伝導ソレノイド磁場中に設置されているMRT に入射している。その際MRT の上流に設置した減速箱(膜厚 $90 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 二枚重ね) を通過させることにより、反陽子をさらに10 keV 以下まで減速している。MRT は、円筒状の電極を14 個、同軸上に配置し、静電場と静磁場の組合せによって荷電粒子を閉じ込めるペニングトラップ型の電磁トラップで、それぞれの円筒電極に独立にポテンシャルを与えることが出来る構造である。これによって、回転楕円体プラズマの平衡状態の外部電位に一致する調和ポテンシャルを外から与えることが出来、プラズマを安定に閉じ込めている。10 keV の反陽子の捕捉は二つの反陽子捕捉用電極のポテンシャルを時間的に変位させる方法を用いて行なっている。このようにしてトラップ内に捕捉された反陽子を予めトラップに閉じ込めていた電子プラズマとの衝突の繰り返しで、次第に冷却される。強磁場中にトラップされている電子はシンクロトロン放射によって自動的に冷却されるため、結果的には反陽子と電子はともに環境温度程度にまで冷却されている。

本実験において、これまでに閉じ込めた反陽子の数は最大でAD からの1 ショット当たり、 1.2×10^6 個である。これは従来他のグループによるRFQD を用いずに減速箔のみで反陽子を捕捉、ペニングトラップに閉じ込めた値、 2.5×10^4 と比べれば約50 倍の高効率になっている。また、論文申請者らはAD からの反陽子ビームを蓄積する技術も試みており、5 ショットの蓄積で最大 4.8×10^6 個の反陽子を閉じ込めることに成功している。この数はこれまでに蓄積された反陽子数としては過去最大のものである。

さらに論文申請者らは、この反陽子の冷却過程を、電子プラズマの静電振動の時間変化から、非破壊的に観測することに成功している。プラズマを閉じ込めている調和ポテンシャルを形成している電極の一つからパルスを印加して電子プラズマの軸対称モードを間欠的に励起し、その振動の周波数変化を、他の電極から読み取る方法を考案した。観測された(3,0) モードの周波数の反陽子入射直後からの時間変化からそれを電子温度に換算し、電子プラズマは反陽子の入射によって最初の5 秒程度の間0.6 eV 程度まで熱せられ、その後10 秒以上その温度を保った後、入射から35 秒程度経過した頃には元の温度に戻っていることを明らかにした。これを反陽子ビームと電子プラズマの非弾性散乱過程と電子プラズマの冷却過程を考慮したレート方程式を解くことによりほぼ説明している。さらに、プラズマの温度、形状に依存性を持たないことが知られている(1,0) モードの周波数を反陽子入射直後から測定し、周波数は低い側にシフトしていることを発見している。これは、反陽子が冷却され、調和ポテンシャル内に電子と共にトラップされると反陽子の作る場によって実効的に調和ポテンシャルが浅くなる為と解釈している。同時に本来の(1,0) 周波数より400 kHz 程低いところに、反陽子雲と電子雲の遠心分離に起因していると考えられる、もう一つの振動モードを初めて観測している。

このように本論文は大強度超低速反陽子ビームの生成に成功した貴重な研究であり学術的価値は極めて高い。

なお、本論文は、山崎泰規・小牧研一郎氏らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験立案、遂行、解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。