

# 論文の内容の要旨

論文題目 Manipulation of ultraslow antiprotons and first application to atomic collisions

(超低速反陽子の操作と原子衝突への適用)

氏名 永田祐吾

超低速 (10 eV–1 keV) の反陽子ビームを用いるとそれによる原子のイオン化実験、反陽子ヘリウム原子のようなエキゾチック原子の生成の実験、反水素原子の生成、それを用いた精密分光による CPT 対称性のテストなど、様々な実験研究が可能となる。本研究では超低速反陽子ビームの高効率引き出しに成功し、それを用いて初めて 250eV という超低速反陽子–原子衝突実験を行った。さらに数～数十 keV 領域反陽子による原子衝突も行った。

反陽子は数 GeV の高エネルギー陽子陽子衝突によって生成されるため、生成時には高いエネルギーを持つ。そのため超低速の反陽子の生成のためには数段階の減速の手順を踏む必要がある。実験は CERN (欧州素粒子原子核研究機関) で行った。CERN において生成された約 3 GeV の反陽子は AD (Antiproton Decelerator; 反陽子減速器) で確率冷却及び電子冷却を受けながら約 5 MeV まで減速され、我々に供給される。その後さらに RFQD (Radio Frequency Quadrupole Decelerator; 高周波四重極減速器) によっておよそ 110 keV まで減速される。そして、それら 110 keV の反陽子は反陽子トラップに入射される。

反陽子トラップは主に、PET 製減速膜と超伝導ソレノイド磁石と多重リングトラップ (MRT) 及び電子銃で構成されており、一様磁場と MRT 内に形成される 50V の調和ポテンシャルを用いて荷電粒子を捕捉することができる。反陽子トラップに入射した反陽子は MRT 直前の減速膜で 10 keV 程度に減速され、図 1 に示してある UCE と DCE に  $-13$  kV の高電圧を印加することによって MRT 内に捕捉される。捕捉された反陽子雲は、あらかじめ導入された電子との衝突によって冷却される。ここで電子は 2.5 T の磁場中でシンクロトロン放射によって環境温度まで冷却されており、反陽子雲も同じ程度まで冷却され、結果、反陽子は MRT の 50V 調和ポテンシャル内に捕捉される。

超低速反陽子ビームは、MRT の調和ポテンシャルを変化させて、反陽子雲をトラップの外に引き出すことによって生成される。しかしながら、反陽子は超伝導ソレノイド磁石の出口付近でその軌道が大きく広がるため円筒電極の内壁と接触し、高効率での外部への輸送は難しかった。それを回避するために回転高周波を反陽子に適用した。調和ポテンシャルを形成する電極の一つは方位角方向に四分分割されており、90° ずつ位相をずらした回転高周波をかけることができる。反陽子雲を MRT で電子冷却した後、調和ポテンシャルの開閉を瞬間的に行うことによって電子のみを排除し、200 kHz 以上の広い範囲の固定回転高周波をかけることにより、反陽子雲の径圧縮が初めて観測された。径圧縮は 200s 程度で飽和した。さらに、高周波を掃引することにより、50s 程度で固定回転高周波と同程度の圧縮率で飽和した。この反陽子雲の径圧縮によって、反陽子ビームの超伝導ソレノイド磁石出口付近での広がりを回避し、高効率で 250 eV 反陽子の引き出すことができた。ビーム生成の 1 回の手順（約 5 分）では  $3 \times 10^5$  個の反陽子を最下流までに輸送することに成功した。

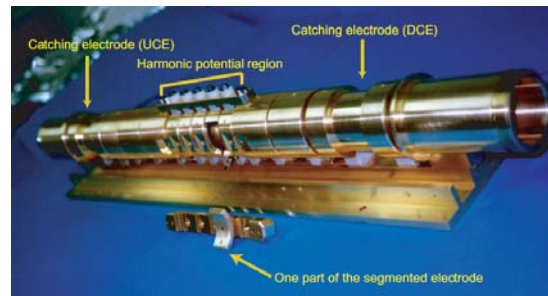


図 1: 多重リング電極 (MRT)

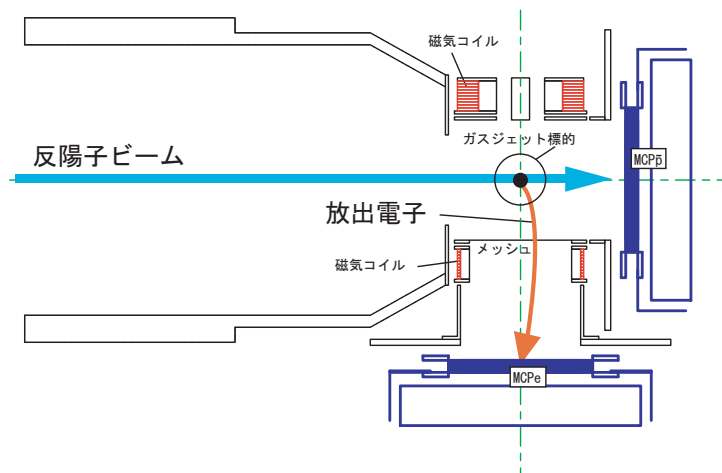
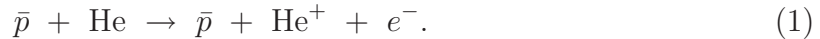


図 2: 飛行時間分析器の概要図

次に、生成した超低速反陽子ビームを用いて He 原子イオン化実験を行った。反応式は



となる。この実験を行うために、衝突真空槽と He ガスジェット標的を開発行った。そのガスジェット標的の密度は  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  という高密度で、その直径は約 9 mm となった。この He ガスジェット標的と生成した超低速反陽子ビームとを交差させ、イオン化実験を行った。しかし、イオン化の反応確率は  $\sim 10^{-4}$  と低いため、検出器系が重要となってくる。理論計算によると、超低速反陽子のヘリウム原子衝突による放出電子は全方向にほぼ一様に散乱し、そのエネルギーは主に 5 eV 程度以下であることが予想されている。我々はイオン化事象の検出数を増やすために、これら放出電子の高効率の捕集が可能な飛行時間分析器の開発を行った。

図 2 に飛行時間分析器の概要図を示した。反陽子は図左側から入射し、図右側のマイクロチャンネルプレート (MCP $\bar{p}$ ) で検出され、放出電子は図の下方に輸送されて別のマイクロチャンネルプレート (MCPe) で検出される。磁気コイルによって電子の輸送方向に向かう磁場が生成され、その磁場は放出電子の磁場に垂直な向きの運動を束縛し、放出電子の分析器外への漏れを防いでいる。加えて、反陽子軌道に影響を与えない程度の電圧を印加することによって、電子捕集効率は 5 eV 以下の電子に対して 98% 以上となり、高効率で捕集可能となった。また、周りをプラスチックシンチレータで囲み、反陽子の対消滅によって生成したパイ中間子を同時に検出することで、反陽子の同定を行った。図 3 は MCPe と MCP $\bar{p}$  で検出されたシグナルの飛行時間差のスペクトルである。黒丸はガス標的との衝突で得られたスペクトル、赤四角はガス標的無しで得られたスペクトルである。青三角はその差で、黒実線は 0 ns から 1000 ns までガウス関数でフィットした結果である。期待される飛行時間差である約 150 ns の位置にピークが見られた。入射反陽子数  $6.3 \times 10^6$  個に対し、約 220 個のイオン化事象の検出に成功した。また、共同実験として Aarhus のグループと Aarhus Ionization Apparatus (AIA) を用いて超低速反陽子の再加速による数 ~ 数十 keV の領域での He 衝突実験を行った。

図 4 に反陽子衝突による He 原子のイオン化断面積及び、反陽子 He 原子生成断面積を示す。青四角、緑丸は以前に測定されたイオン化断面積である。それ以外は理論計算によるもので、反陽子エネルギーが  $\sim 30\text{eV}$  以上の場合は He 原子のイオン化断面積を示し、一方、 $\sim 30\text{eV}$  以下では反陽子 He 原子生成断面積を示す。黒丸と茶色三角が、それぞれ今回測定した 250 eV 反陽子と、数 keV 領域の反陽子による He 原子のイオン化断面積である。数 keV 領域で得られたイオン化断面積は最近の理論研究と合致した。250eV では、反陽子 He 原子生成断面積と、keV 領域のイオン化断面積をつなぐような位置にイオン化断面積が得られた。

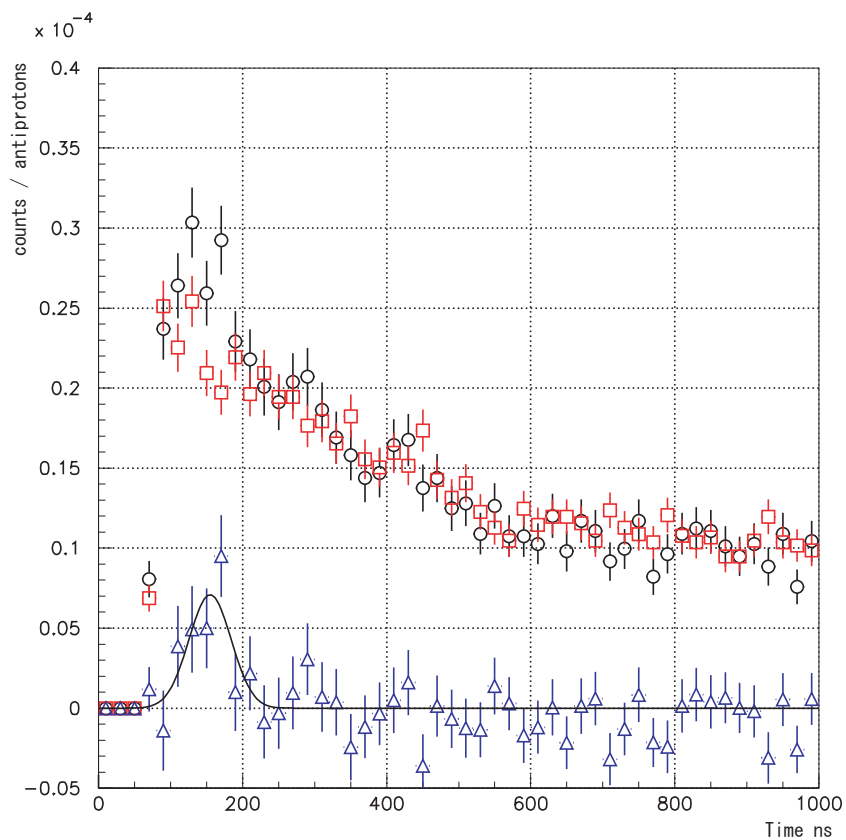


図 3: 放出電子と反陽子の飛行時間差

黒丸はガス標的との衝突で得られたスペクトル、赤四角はガス標的無しで得られたスペクトルで、青三角はその差で、黒実線は 0 ns から 1000 ns までガウス関数でフィットした結果である。

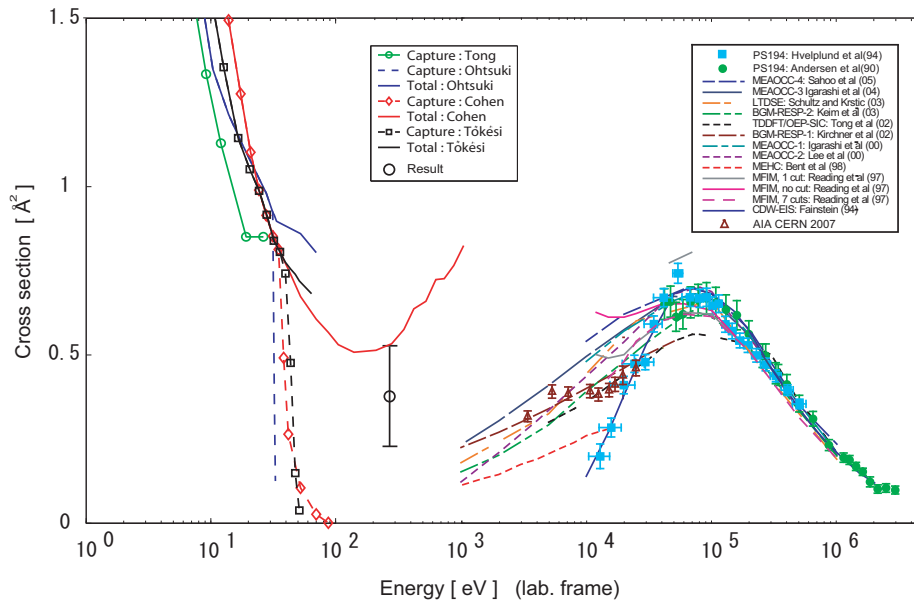


図 4: イオン化断面積及び、反陽子 He 原子生成断面積

青四角、緑丸は以前に測定されたイオン化断面積である。それ以外は理論計算によるもので、反陽子エネルギーが  $\sim 30\text{eV}$  以上の場合には He 原子のイオン化断面積を示し、一方、 $\sim 30\text{eV}$  以下では反陽子 He 原子生成断面積を示す。黒丸と茶色三角が、それぞれ今回測定した  $250\text{ eV}$  反陽子と、数-数十 keV 領域の反陽子による He 原子のイオン化断面積である。