

## 論文の内容の要旨

論文題目 Antihydrogen production in cusp trap  
(カスプトラップ中での反水素の合成)

氏名 榎本 嘉範

反水素原子は反陽子1つと陽電子1つからなる最も単純な反物質原子である。2002年のATHENA及び ATRAP によるネスティッドペニングトラップ（一様磁場と入れ子構造になった静電ポテンシャルを組み合わせた荷電粒子トラップ）中での冷たい反水素の大量合成以来、この反水素原子の分光を通して、物質-反物質の違い（CPT 対称性）を解明しようとする研究への道がひらけた。しかしながら反水素原子は電氣的に中性のため、反陽子-陽電子の再結合により合成された途端に四方に飛び散ってしまい、このままでは分光実験等の精密測定には利用できない。一方で反水素原子は磁気モーメントをもつため、非一様磁場を用いれば運動を制御することができることが知られている。そこで我々は分光実験に利用可能な、反水素原子を引き出せる新たな反水素源として、カスプトラップと呼ばれるカスプ型の非一様磁場と入れ子型の静電ポテンシャルを組み合わせたトラップを開発した。

図 1 (a) にカスプトラップ及びこの中で生成された反水素原子を用いた分光実験の概念図を示す。反水素原子は予めカスプトラップ中にためこまれた陽電子中へ反陽子を入射することによって合成する。出来上がった反水素原子はトラップより抜けだしてくるが、このうち陽電子のスピンの磁場と反平行で磁場の弱い方向へ行くほどエネルギー的に安定な状態（low field seeking state, LFS）にいる原子はカスプ磁場によって中心軸上へ収束される。一方で陽電子のスピンの磁場と並行で磁場の強い方向へ行くほどエネルギー的に安定となる状態（high field seeking state, HFS）にいる原子は反対に中心軸から遠ざかる方向へ力を受ける。したがって中心軸に沿ってスピン偏極した反水素原子が取り出されることになる。

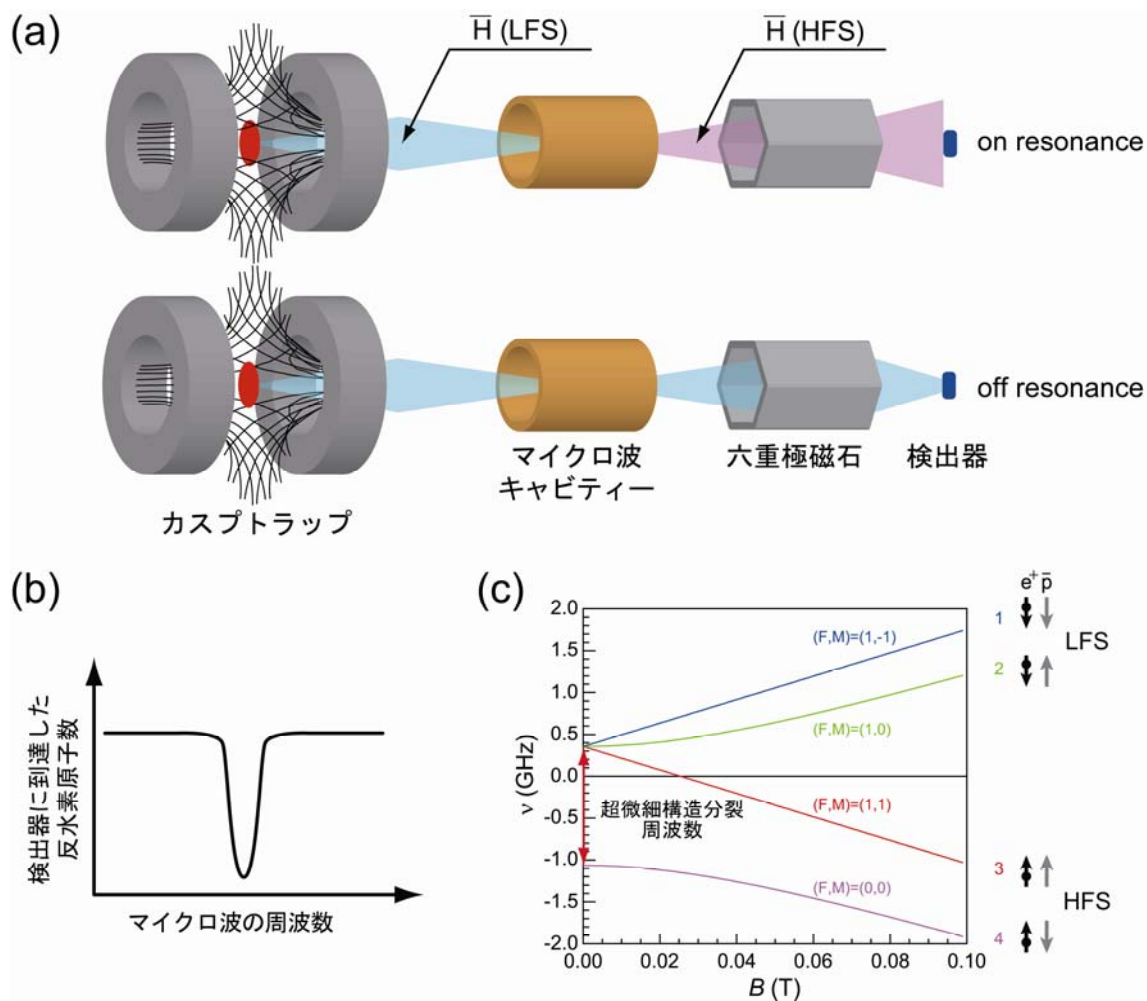


図 1 カスプトラップを用いた分光実験の概念図。

この反水素原子はマイクロ波キャビティー、スピン状態選別用の六重極磁石を通して検出器へと導かれる。マイクロ波キャビティーにかけるマイクロ波の周波数を掃引しながら、検出器へ到達する反水素原子数を観測すると、マイクロ波の周波数と反水素原子の遷移周波数が一致すると、スピン選別用の六重極磁石により反水素原子の軌道が変更され、検出器へ到達する原子数が変わる。したがって横軸にマイクロ波の周波数、縦軸に検出器へ到達した反水素原子の数をプロットすると図 1 (b) のようなグラフが得られ、ディップ位置から反水素原子の遷移周波数を知ることができる。例えば基底状態の反水素原子のエネルギー準位は磁場の関数として図 1 (c) のようになっており、この手法を用いて赤の矢印で示した反水素原子の基底状態の超微細構造分裂周波数を求めることができる。我々の実験系ではこの値を  $10^{-6}$  程度の精度で測定できると期待されている。

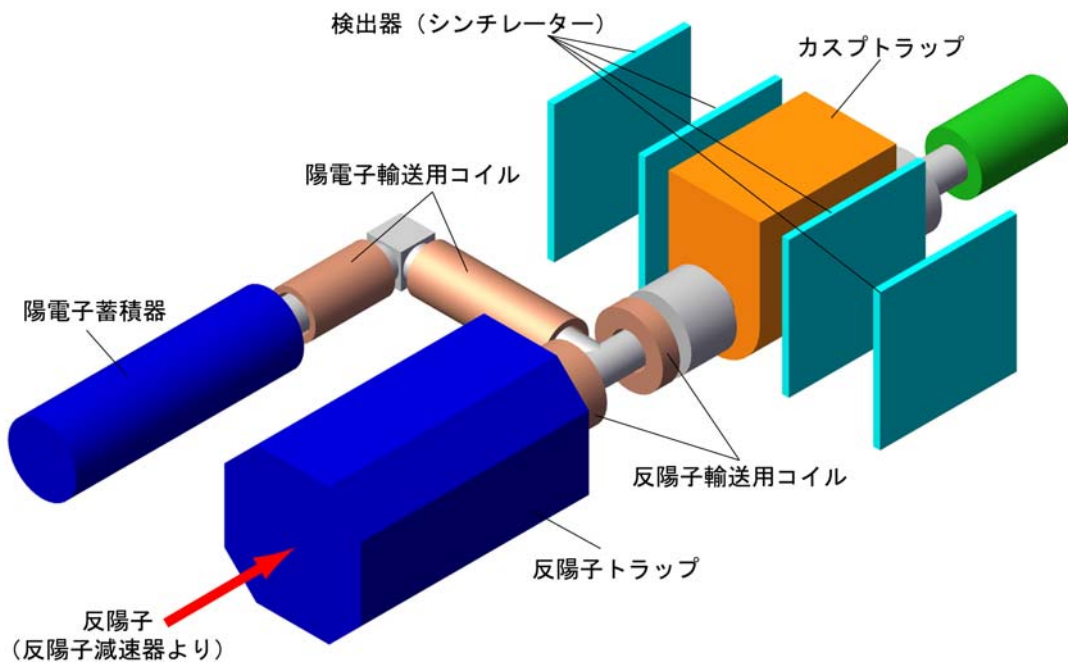


図 2 実験装置の模式図。

上記目標を達成するためには、反水素原子を効率よく生成することが不可欠である。反水素原子の生成レートは陽電子、反陽子の密度が高く温度が低いほど大きくなることが知られているため、そのような荷電粒子群をいかにカスプトラップ中に準備できるかが鍵となる。図 2 に本研究で用いた実験装置の模式図を示す。我々はすでに CERN の反陽子減速器 (AD) から供給されるエネルギー 5.3 MeV の反陽子を減速、捕捉、冷却し最大で  $10^7$  個の冷たい (sub eV) 反陽子を蓄積可能な荷電粒子トラップ (反陽子トラップ) を開発しており、ここに蓄積された反陽子をパルス状にして撃ち出すことにより、カスプトラップ中へ大量 ( $10^5 - 10^6$  個) の反陽子を供給することができる。また陽電子については、放射性元素である  $^{22}\text{Na}$  から放出される陽電子を、タングステン多結晶モデレータとバッファーガスにより減速し、荷電粒子トラップ中へためこむことができる陽電子蓄積器を開発した。この陽電子蓄積器は 50 秒おきに  $2 \times 10^5$  個の陽電子をパルス状にして引き出すことができる。これらの反陽子および陽電子は輸送用コイルによって作られた磁場にガイドされて、カスプトラップへと輸送される。さらにカスプトラップの周囲を囲むようにシンチレーターが設置されており、反陽子の消滅数及び消滅位置を検出することができるようになっている。

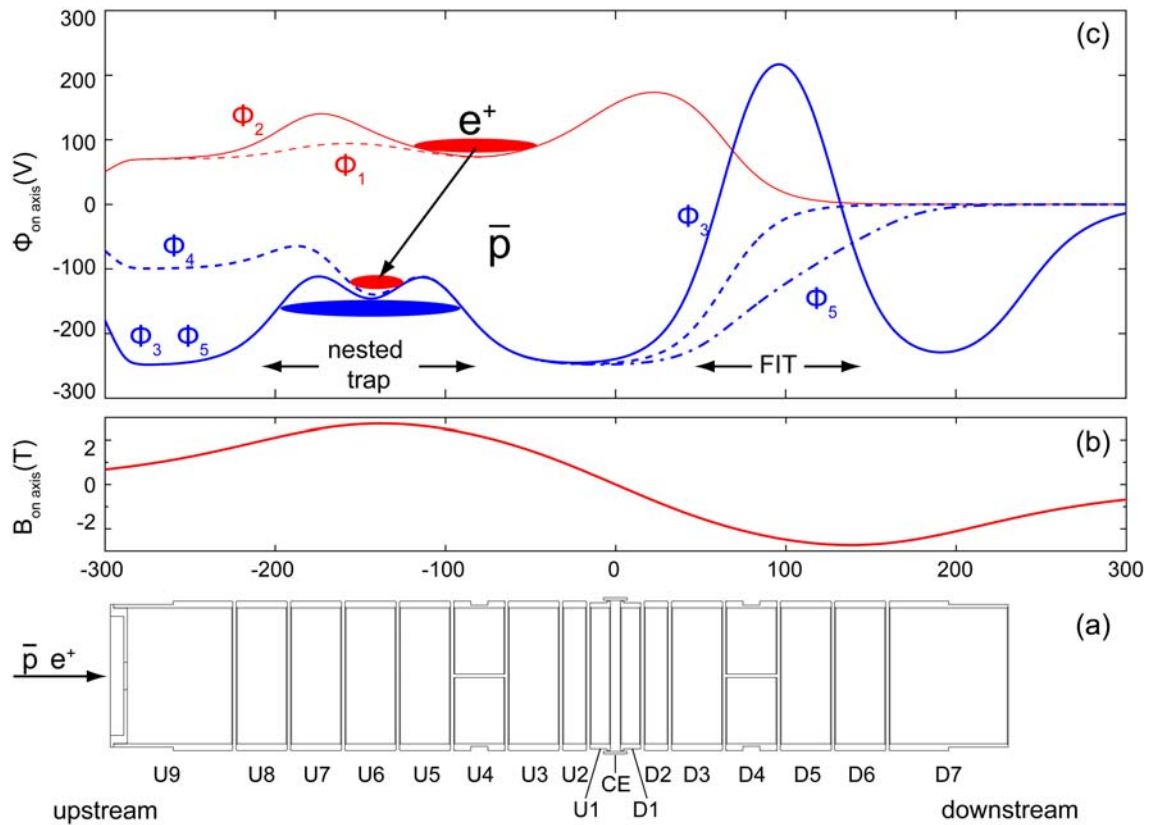


図 3 (a) 多重円筒電極の断面図、(b) 軸上での磁場分布、(c) 軸上での電位分布。

図 3 (a) に反水素原子の合成及び検出に使われる多重円筒電極の断面図、(b) に軸上での磁場分布、(c) に電位分布を示す。はじめに  $\phi_2$  で示された電位分布がカスプトラップ内に用意され図左側からエネルギー約 100 eV の陽電子が入射される。入射に合わせて電位分布は  $\phi_1$  に変更され、陽電子は電極 U2 付近まで進み、そこで電位障壁によって跳ね返される。跳ね返った陽電子が再び図左側へにげ出してしまう前に素早く電位分布を  $\phi_1$  に戻し、陽電子を電位井戸中へ捕捉する。多重円筒電極は約 2 T の強い磁場中に置かれているため、捕捉された陽電子はシンクロトロン放射により自動的に冷却され、電位井戸の底へと落ち着く。この操作を 40 又は 60 回程度繰り返し  $4\sim 6 \times 10^6$  個の陽電子をカスプトラップ中にためこむ。同時に回転電場を印加し陽電子雲を動径方向に圧縮する。この手法は一様磁場を用いた荷電粒子トラップでは“rotating wall technique”としてよく知られている手法であるが、我々は不均一磁場をもつカスプトラップにもこの手法を適用し  $10^8$  e<sup>+</sup>/cm<sup>3</sup> という高密度の陽電子雲を生成することに成功した。次に電位分布を  $\phi_3$  に変更し反陽子の入射に備える。反陽子入射に合わせて電位分布を  $\phi_4$  に変更し、陽電子の時と同様に入射された反陽子が逃げ出してしまう前に、素早く電位分布を  $\phi_3$  に戻す。このようにして閉じこめられた反陽子は陽電子との衝突により冷却され、陽電子はシンクロトロン放射で冷却されることによって、互いの相対エネルギーは自動的に減少していき、やがて再結合して反水素原子が生成される。できた反水素のうち高励起状態でかつ図右側へ

飛んできたものは、図 3 (c) で FIT (field ionization trap) と示された領域にて、深い井戸を生成する強い電場によって再電離される。再電離によって陽電子を引き離された反陽子はこの電位井戸中へ捕捉される。反陽子-陽電子の混合開始から適度な時間経過した後に電位分布を  $\phi_5$  に変更し、FIT 中に蓄積された反陽子を排出して、シンチレーターでその消滅信号を観測することにより生成および再電離された反水素原子の数を得る。

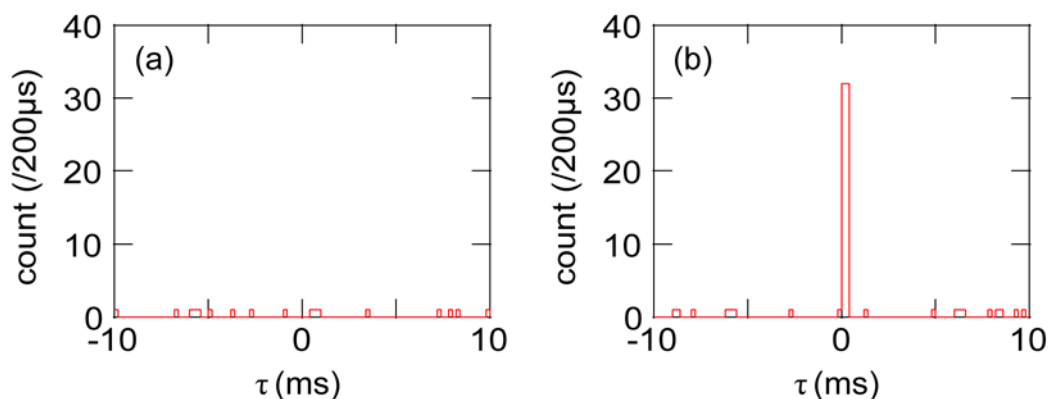


図 4 電位分布を  $\phi_5$  に変更した時刻を 0 として前後 10 ミリ秒のシンチレーターのカウント数。(a) 反陽子のみをカスプトラップ中に 50 秒間閉じ込めた場合、(b) 陽電子とともに反陽子を閉じ込めた場合。

図 4 に電位分布を  $\phi_5$  に変更し、FIT 内に蓄積された反陽子を排出した時のシンチレーターのカウント数を示す。横軸は時間で 0 は電位分布を  $\phi_5$  に変更した時刻を表している。図 4 (a) は陽電子無しで反陽子のみをカスプトラップ中に閉じ込めたとき、図 4 (b) は陽電子と反陽子の両方を閉じ込めたときの結果である。いずれの測定においても陽電子の有無以外は全く同じ操作を行ったにもかかわらず、陽電子ありの場合は電位分布の変更と同期したピークが現れ、なしの場合には現れない。また陽電子雲を RF 電場にて加熱した場合、たとえ陽電子と反陽子を同時に閉じ込めても図 4 (b) のようなピークは現れなかった。このことから反水素原子の合成がカスプトラップ中で行われていることが確認された。

さらに 5 秒おきに電位分布を  $\phi_3$  から  $\phi_5$  へ変更し、5 秒間に FIT 内に蓄積された反陽子数を数える事によって、反水素原子の生成レートの時間発展を測定した。この測定より、 $3 \times 10^6$  個の陽電子に対し、 $3 \times 10^5$  個の反陽子を入射した場合、反水素原子の生成レートは時間と共に増加し約 30 秒付近で最大値を迎え、その後は減少していくことがわかった。また入射する反陽子数を増やすと（減らすと）生成レートが最大を迎える時刻が遅くなる（早くなる）という測定結果がえられた。これは反陽子入射によって温められた陽電子が冷却に要する時間が、反陽子数の増加（減少）に伴って長く（短く）なるためと考えられる。一方で生成レートが 30 秒経過以降減少する理由に関しては、反陽子-陽電子の軸方向の分離によるものであることが反陽子消滅信号の位置情報から示唆された。加えて観測された消滅信号数の FIT 電場強度に対する依存性と、

2次元電場分布を考慮に入れた反水素原子の再電離確率の計算より、合成された反水素の主量子数が45から50付近であるという結果を得た。さらに入射された反陽子の内最大で約7%が反水素原子に変換されていることを確認した。

以上のように、不均一磁場をもつカスプトラップ中での反水素原子の合成に世界で初めて成功した。この反水素ビーム源の開発によって、いよいよ反水素原子の分光実験が現実のものとなる。