


 小特集 反水素研究とプラズマ物理

## 6. 反水素の閉じ込めと引き出しを主眼とする次期トラップ

金井保之<sup>1)</sup>, 毛利明博<sup>1),2)</sup>, 堀 正樹<sup>3)</sup>  
 (1)理化学研究所, 2)レーザー技術総合研究所, 3)CERN)

Next Generation Traps for Confinement or Extraction of Antihydrogen Atoms

KANAI Yasuyuki<sup>1)</sup>, MOHRI Akihiro<sup>1),2)</sup> and HORI Masaki<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>RIKEN, Wako 351-0198, Japan

<sup>2)</sup>Institute for Laser Technology, Osaka 550-0004, Japan

<sup>3)</sup>CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

(Received 27 September 2004)

Conditions required for magnetic confinement of antihydrogen atoms are briefly described. Then, several ideas of antihydrogen confinement in minimum-B fields are introduced with some comments. Two methods for extracting antihydrogen atoms from their synthesized region are also described. Paul trap with a superconducting wall cavity has the potential to trap antihydrogen atoms in a space with no steady magnetic field.

**Keywords:**

antihydrogen, nonneutral plasma, confinement, trap, hyperfine structure, spin-polarization, minimum-B, magnetic multipole, extraction, cusp, electric octupole, Paul trap, super-conducting cavity

### 6.1 $B=0$ を持たない極小磁場配位など現在提案されている反水素トラップ, カスプトラップ

中性原子を磁気光トラップや磁気トラップにトラップし [1], 極低温まで温度を下げ Bose-Einstein 凝縮 (BEC) などの研究に利用されるようになり久しい. 反水素原子をトラップすることも原理的には中性原子をトラップすることと同じであるが, そこには反水素原子特有の困難さが存在する. ここでは, 反水素原子であることの困難さとトラップに利用される磁場中での反水素原子 (水素原子) の性質の概略を述べ [2], 反水素原子をどのような磁気トラップを用いることで閉じ込めたりビームとして取り出すことができるかを述べる.

反水素原子は地球上では安定に存在しておらず, 加速器で加速された重イオンと重い原子の衝突 [3] あるいは低温の反陽子と陽電子の再結合過程によって生成しなくてはならない. この点が, BEC などで利用されている中性原子をトラップする場合と決定的に違う. 中性原子のトラップでは, 熱運動している無数の中性原子の中のほんの一部分をレーザービームで減速してトラップしているが [1], 反水素原子のトラップでは, 数万から100万個程度の反陽子と陽電子の再結合で反水素原子を生成し, その反水素原子を効率的に閉じ込めなければならない. 第5章で述べられているように, CERN で ATRAP グループおよび ATHENA グループにより生成された反水素原子は, 均一磁場と電場により閉じ込めた陽電子と反陽子の再結合過程により作られている. この場合, 反水素原子が合成された瞬間に閉じ

込め力が働かなくなって, その動きをわれわれが制御することができなくなってしまう.

では, どのようにすれば反水素原子をトラップあるいはビームとして取り出すことができるのであろうか? 反水素原子をトラップする原理は一般の中性原子のものと同じである. 基底状態の中性原子のトラップでは, 不均一磁場中に中性原子を置き磁場との相互作用あるいはレーザーとの相互作用により空間的に閉じ込めを行う [1]. 磁場中の反水素原子のエネルギー (基底状態の超微細構造) は Fig. 1 のようになる. 図中の a と b (c と d) の状態は反水素原子の磁気モーメントが磁場に平行 (反平行) である, いわゆる High field seeking states: HS 状態 (Low field seeking states: LS 状態) にある場合を示す. 反水素原子の超微細構造それ自体も研究の対象であるが, ここでは反水素原子と水素原子の磁場中でのエネルギーは同じだとしている (少なくとも  $10^{-3}$  の精度では一致している [4]). 反水素原子の持つ磁気モーメントを用いて磁場で閉じ込める場合には, HS 状態と LS 状態を同時にはトラップできないし, トラップされた反水素原子は必然的にスピン偏極したものとなる. 自由空間内で磁場の極大領域は作れないから, 磁場極小領域に LS 状態の反水素原子だけを閉じ込めることになる. 実際の反水素原子トラップでは, 反水素原子生成に必要な陽電子プラズマと反陽子を閉じ込めて再結合させるために電場・磁場に課せられる条件と, 生成された中性の反水素原子を制御するための磁場条件を同時に満たさなくてはならず, ここに通常の中性原子のトラップにはない困難

authors' e-mail: kanaiyasuyuki@riken.go.jp, akimohri@crux.ocn.ne.jp, mhori@nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp

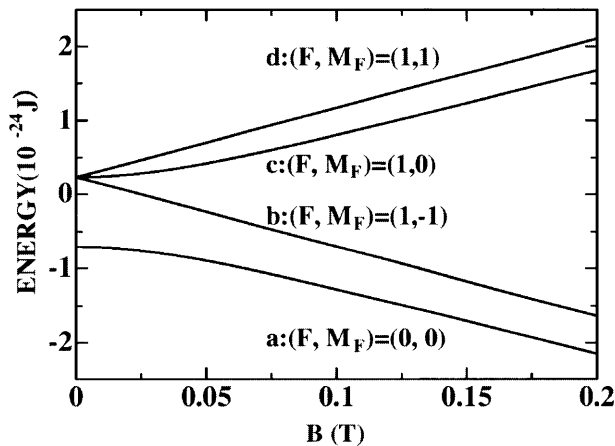


Fig. 1 Energy levels of the ground state of hydrogen in a static magnetic field, where the energy levels are labeled a-d,  $F$  is the total angular momentum and  $M_F$  is the projection of  $F$  on the magnetic field axis.

が存在する。

磁場によりトラップ可能な反水素原子の最大エネルギーを温度換算で  $T_{\max}$  とすると

$$\kappa_B T_{\max} < \mu \Delta |B| \quad (1)$$

となる。ここで、 $\mu$  は反水素原子の磁気モーメントの絶対値、 $\kappa_B$  はボルツマン定数、 $\Delta |B|$  はトラップの磁場の深さである。基底状態にある反水素原子の場合、 $\Delta |B| = 1$  T では  $T_{\max} \sim 0.6$  K 程度となる。励起状態の反水素原子の場合には軌道角運動量による磁気モーメントが大きな値を持ちうるので、トラップの磁場の深さが同じであってもより温度の高い励起状態反水素原子をトラップすることが可能となる ( $M_J \gg 1$  の場合、 $\mu \sim M_J \mu_B$ ,  $M_J$ : 磁気量子数,  $\mu_B$ : ボーア磁子)。もちろん、大きな磁気量子数を持つ励起状態の反水素原子を選択的に作ることはできないが、トラップ中で生成された励起反水素原子を効率的に捕捉できる可能性を示している。中性原子を磁場がゼロの領域が存在する場所に閉じこめる場合に問題となるのが、いわゆる Majorana 遷移 [5] である。上記で述べたように、磁場に反平行な磁気モーメントを持つ LS 状態の反水素原子は磁場の極小部分に閉じ込めることが可能となる。しかし、磁場の極小部分に磁場ゼロ点が存在すると、その付近を反水素原子が横切ると、磁場の変化 (方向および強度) 時間に比べ反水素原子のラーモア歳差周期が長いと、磁気モーメントは磁場の変化に追従できなくなってしまう。つまり、磁場に反平行な磁気モーメントを持つ反水素原子をトラップしても、ラーモア歳差運動に比べ速くゼロ磁場付近を通過してしまうと、磁気モーメントの向きが磁場に平行になってしまつて (Majorana 遷移) トラップ中に保持できなくなってしまう。長時間トラップする場合にはこの効果を考慮する必要があり、水素原子を磁気トラップに閉じ込める場合には、磁場がゼロにならないような構造にした実験 [6] もあるが、Majorana 遷移の起こる領域が磁場ゼロの付近の非常に限られた領域であるので、通常のトラップでは影響がないという見積もりもされている [1]。

反水素をつくって制御するために必要な事項としては (1) 極低温陽電子プラズマが閉じ込められて低速反陽子との混合状態がつかれる、(2) 混合状態は反水素合成に必要な時間持続できる、(3) 反水素を閉じ込める場合は合成直後に Min-B 配位内におかれること、(4) 反水素をビームとして取り出す場合には合成後に適切な制御磁場内におかれること、等があげられるが、これらすべての要件を現実に両立させるためにはかなりの工夫がある。エネルギー分布をしている反水素の高エネルギー成分粒子まで閉じ込めようとすると  $\Delta |B|$  を大きくしなければならなくなる。また、測定のやりやすさから閉じ込める領域を小さくして反水素密度を上げようとする、大きな磁場勾配が必要となって磁場コイルの力学的強度を上げなければならない。

ここでは、提案されている反水素のトラップと引き出しについて数例を紹介する。

**[非軸対称 Min-B, Ioffe bars]** (3) 項の Min-B 配位はいわゆる開放系として核融合分野で研究されてきた [7] し、中性原子閉じ込めとしても考えられた [8]。ミラー磁場と直線導線多極磁場でつくられる Min-B 配位: Ioffe bars [9] は核融合閉じ込め史での一里塚でもあった。反水素合成に応用するためには (2) 項との両立が必要である。第 5 章で述べられている nested Penning trap では、低温の陽電子と反陽子を閉じ込め重畳させて反陽子合成を可能にするために必要な粒子閉じ込め状態は十分に持続できた。それは配位の軸対称性と磁場の一様性に依っている。多極磁場を重畳して非軸対称配位にした場合には非中性プラズマの閉じ込めの劣化が一番大きな問題点となる。4 重極と Penning trap の電場の重畳場では粒子軌道には安定なものがあるとされるけれども [10]、非中性プラズマ状態では磁場の一様性からのわずかのずれが粒子散逸を早め [11]、4 重極磁場誘起の共鳴粒子輸送 [12] も生じる。このような問題を避けるために閉じ込めは両側の均一磁場で行って反水素合成は中央においた Ioffe-Prichard trap で行う案もある [13]。極数を大きくして軸付近の均一性をあまり犠牲にしない案 [14] では、軸付近は nested Penning trap として外側に 10 極磁場をおいて合成される Min-B で反水素を閉じ込める。これらの方式はあくまで案であつて系全体についての理論的検討や実験的検証は今後の課題である。

**[軸対称 Min-B]** 軸対称性をもつ Min-B 配位の一つは一樣磁場  $B_0$ 、 $B_0$  を局所的に打ち消すリング電流の磁場  $B_R$ 、軸方向電流磁場  $B_\theta$  の 3 つの磁場の重畳でつくれる [15, 16]。できる極小磁場領域は軸をまわるドーナツ状のものとなる (Fig. 2 参照)。 $B_0$  と  $B_R$  でできる  $B = 0$  円を  $B_\theta$  によって有限値にして Majorana 遷移が起こらないようにする。丁度ポロイダルヘリオトロン [17] に軸電流磁場を重ねて  $B = 0$  点を  $B_\theta$  でなくしたものである。適当な条件では非中性プラズマは外部印加径方向電場で中空円筒の形状となり、その外縁は Min-B 領域からも離れる。このプラズマが陽電子と反陽子の重畳領域のものであると、生成される反水素が Min-B 領域に捕捉される。平衡状態は求まっているが、安定性や輸送の検討はまだである。やはりここでも [11] で指摘されている磁場不均一による粒子の散逸増加

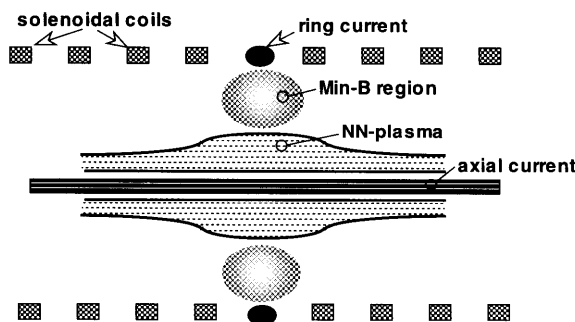


Fig. 2 Cylindrically symmetric minimum-B Penning trap (Dubin's trap).

が心配である。

上記の軸電流用導体を円筒にして、円筒内に nested Penning trap を組み込む案もある [18]。できた反水素は円筒導体のスリットからでて外側にある Min-B 領域に捕捉される。

**【反水素を引き出すトラップ、カusp】** 生成された反水素をトラップの外に取り出すことができれば、十分広いスペースで種々の計測をすることが可能になる。現在提案されているなかで定常電磁場を主として用いるものとしては、nested Penning trap の変形と、カusp磁場と軸対称 8 重極電場を重畳したものがあ

る。nested Penning trap 中央部の陽電子と反陽子が重畳する領域の磁場コイルと電極に隙間をあけて、合成された反水素をそのまま外部に取り出す方法 [18] では、反水素を立体角を大きくした大口径の 6 極磁場を集めて、スピン反転を起こさせる高周波キャビティとの組み合わせで偏極反水素の磁気モーメントを精密に計ることを考えている。出てくる反水素原子の捕集率は小さいが実現性の高い方法と思われる。

カusp磁場による中性プラズマの閉じ込めでは、 $B = 0$  点付近で粒子軌道磁気モーメントの断熱性が破れて、粒子の磁力線に沿った散逸を防ぐ有効な手段がない。しかし、非中性プラズマについては、系から発散する粒子を電場で抑えることができる。この電場としては軸対称 8 重極を主としたものを用いる [19]。Fig. 3(a) に用いるカusp磁場と 8 重極電場の等ポテンシャルを示す。閉じ込めた陽電子プラズマはサイクロトロン放射冷却するとともに自己電荷で内部に反陽子を捕捉する電場を形成すると期待される。中心付近で合成された反水素の LS 状態のものは磁場勾配で外部に収束しながらスピン偏極ビームとして出てくる。Fig. 3(b) に示すように適切なカusp磁場をつくるとかなりの収率で取り出すことができる [20]。  $B = 0$  点があるが、この場合は合成した反水素は直ちに放出されるので Majorana 遷移は問題にはならない。また、エネルギーの低い粒子を閉じ込めることも可能になる。現在超伝導コイル磁場で電子を使った予備実験が理研で行われている。

(執筆: 金井保之, 毛利明博)

## 6.2 超伝導高周波トラップを用いた反水素の合成

従来の実験では反陽子と陽電子を数テスラの磁場中に封

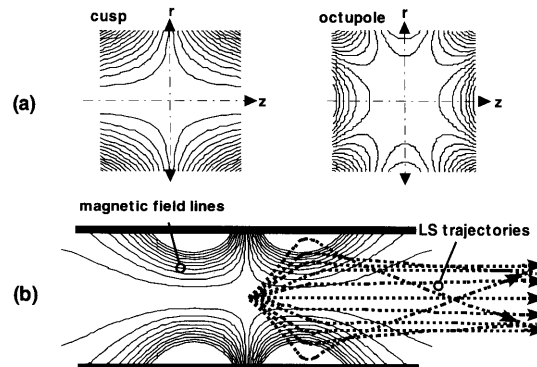


Fig. 3 Cusp trap. (a) Magnetic field lines of a cusp and equipotential surfaces of an electric octupole. (b) Trajectories of outgoing spin-polarized antihydrogen atoms at LS (d in Fig. 1) state from the cusp trap.  $|B|_{\max} = 3.8$  T, Bore radius = 6.5 cm,  $T_{\text{H}} = 10$  K.

じ込めて反水素を合成した。それに対して、無磁場の環境下で反水素を合成するポルトラップを用いる手法が考案され開発されている [21]。ポルトラップ中に捕獲された反陽子や陽電子は、高周波電場の影響で装置の軸中心に収束されるので、従来のペニングトラップなどに比べて容易に高い粒子密度が実現でき、反水素をすばやく合成できる。またゼロ磁場中で合成された反水素は、ゼーマン効果などを受けないために、より高い精度で分光できる。一方、AD で生成される高い運動エネルギーをもった反陽子を捕獲して大量に貯蔵するためには、ポルトラップ内に数 MV/m の高周波電場を実現する必要がある。これに関しては、超伝導ニオブウム製の高周波空洞で構成されたポルトラップを用いることで、この問題を克服しようとしている。合成された反水素は、トラップの外へ放出されるが、これらを 1.4 GHz で共鳴する別の高周波空洞に導入して、反水素原子の基底状態の超微細構造を  $10^{-6}$  の精度で測定することが可能になる [22]。

(執筆: 堀 正樹)

## 参考文献

- [1] H. Metcalf and P. van der Straten, Physics Report **244**, 203 (1994); H. Metcalf and P. van der Straten, *Laser Cooling and Trapping* (Springer 1999).
- [2] *The Spectrum of Atomic Hydrogen ADVANCES*, ed by G.W. Series (World Scientific 1988).
- [3] G. Baur *et al.*, Phys. Lett. B **368**, 251 (1996).
- [4] A. Kreissl *et al.*, Z. Phys. C **37**, 557 (1988).
- [5] E. Majorana, Nuovo Cimento **9**, 43 (1932).
- [6] H.F. Hess *et al.*, Phys. Rev. Lett. **59**, 652 (1987).
- [7] D. Post, Nucl. Fusion **27**, 1579 (1987).
- [8] D.E. Prichard, Phys. Rev. Lett. **51**, 1336 (1983).
- [9] Y.V. Gott, M.S. Ioffe, V.G. Tel'Kovskii, Nucl. Fusion Suppl. **3**, 1045 (1962).
- [10] T.M. Squires, P. Yesley and G. Gabrielse, Phys. Rev. Lett. **0031-9007** (2001).
- [11] A.A. Kabantsev *et al.*, Phys. Plasmas **10**, 1628 (2003).
- [12] E.P. Gilson and J. Fajans, Phys. Rev. Lett. **90**, 015001 (2003).
- [13] C.A. Ordonez *et al.*, Phys. Plasmas **9**, 3289 (2002).
- [14] J. Fajans and A. Schmidt, Nucl. Instrum. Methods. Phys.

- Res. A **521**, 318 (2004).
- [15] M.H. Rizk, Plasma Phys. **11**, 1021 (1969).
- [16] D.H.E. Dubin, Phys. Plasmas **8**, 4221 (2001).
- [17] K. Uo *et al.*, Phys. Fluids **5**, 1263 (1962).
- [18] H. Widmann *et al.*, *The Hydrogen Atom: Precision Physics of Simple Atomic Systems*, ed. S.G. Kahrshenbolm *et al.*, (Springer-Verlag, Berlin, Heiderberg, 2001) p.528.
- [19] A. Mohri, *et al.*, Jpn J. Appl. Phys. **37**, L1553 (1998).
- [20] A. Mohri and Y. Yamazaki, Europhys. Lett. **63**, 207 (2003).
- [21] M. Hori, R.S. Hayano, W. Pirkel and E. Widmann, "Radiofrequency Paul trap for antihydrogen production"(unpublished).
- [22] E. Widmann, R.S. Hayano, M. Hori and T. Yamazaki, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **214**, 31 (2004).