

2006年11月24日
独立行政法人 理化学研究所
国立大学法人 東京大学

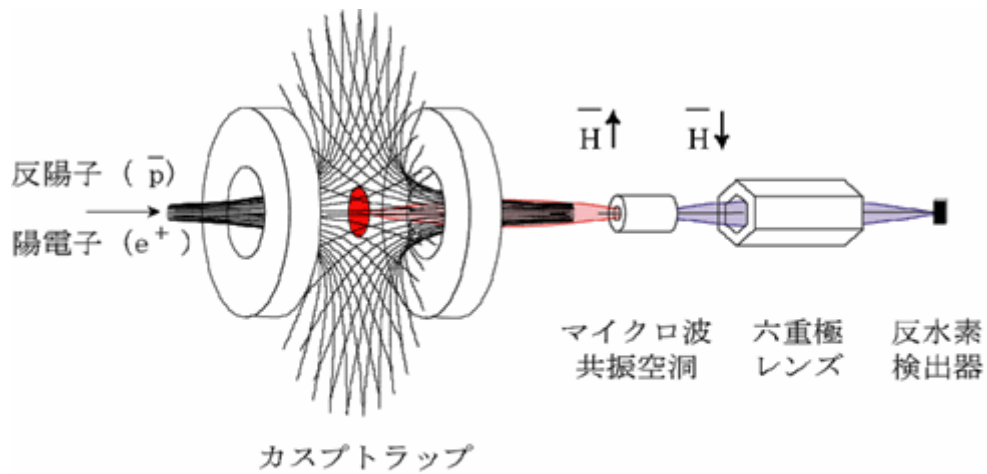
冷たい「のろのろ反水素原子」の生成に新手法

- 自然のささやきに耳を傾ける第一歩 -

宇宙や私たちが住んでいる地球などに存在しているものは“物質”です。宇宙の創世記には、“物質”と“反物質”が生成・消滅を繰り返し、消滅せずに残ったのが現存する粒子や原子や分子などのような“物質”であると言われていています。そして、“反物質”は宇宙の片隅に残っている可能性が議論されてきましたが、観測はできず、仮想のものとされてきました。しかし最近、反粒子やそれらからできた反原子で構成する反物質を人工的に作り上げることができるようになり、長年謎とされてきた反物質の性質や振る舞いを知ることができるようになりつつあります。反物質を知ること、すなわち私たちの世界を知ることにつながります。さらに、物質と反物質がどの様に違うかを知ることにより、なぜ物質からできている私たちがここにいるのかといった存在の根元に関わる疑問にも答えることができるようになります。

理研中央研究所山崎原子物理研究室や東京大学の研究グループは、開発した「カスプトラップ法」により、最も簡単な反物質である“反水素原子”を、ミリケルビンという絶対ゼロ度に近い極低温まで冷やして蓄積できることを示しました。これは、物質と反物質の違いについての自然のささやきを大変高い感度で観測することを可能にします。

またカスプトラップ法は、“反水素イオン”を生成する能力があります。反水素イオンは物質と共存できる初めての反物質と言えますが、これにレーザー冷却されたイオンを混合すると、マイクロケルビン領域の反水素原子を得ることもできます。宇宙を支配している重力と反物質の感系が初めて明らかになる、というわけです。宇宙の成り立ちの謎への挑戦も一歩ずつ進んでいきます。



$\bar{H}\uparrow$ 強い磁場を好む磁気モーメントを持った反水素原子
 $\bar{H}\downarrow$ 弱い磁場を好む磁気モーメントを持った反水素原子

(図) 反水素原子の生成と補足をする装置

2006年11月24日
独立行政法人 理化学研究所
国立大学法人 東京大学

冷たい「のろのろ反水素原子」の生成に新手法

- 自然のささやきに耳を傾ける第一歩 -

◇ポイント◇

- ・ 開発したカスプトラップ法は反物質の生成のみならず冷却にも有効
- ・ 基礎物理学で重要な「対称性」の高感度テスト実現に向けた新たな方法
- ・ 反物質研究が新たな段階へ

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）と国立大学法人東京大学（小宮山宏総長）の研究グループは、独自開発してきた「カスプトラップ法」という方法で、絶対零度に極めて近いミリケルビン領域という極低温の基底状態^{*1}にある反水素^{*2}原子を効率的に生成できることを明らかにしました。これは、基礎物理学で重要な“反物質研究”に新たな手法を提供することになります。この成果は、理研中央研究所山崎原子物理研究室の山崎泰規主任研究員（東京大学院総合文化研究科広域科学専攻教授）、永田祐吾ジュニア・リサーチ・アソシエイト（東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻大学院生）と米国ハーバードスミソニアンセンターのThomas Pohl（トーマス・ポール）博士らの研究成果です。

ビックバンから始まったと考えられている私たちの世界は、物質と反物質が等量存在するはずですが、広く宇宙を見渡してみても、“物質”ばかりで構成されているようです。この不思議な現状を理解するため、高エネルギー粒子による激しい衝突現象を用いて様々な研究が進められてきました。本研究では発想を逆にし、極低温の反水素原子を生成し、格段に高い感度と精度を実現して、“自然のささやき”に耳を傾けようとしています。

最も簡単な反物質である反水素原子は、反陽子^{*3}と陽電子^{*4}から構成されていますが、これを空間の一点に固定し観察することは、反物質世界と私たちの物質世界を比較する研究、特に最も基本的な“CPT対称性^{*5}”を研究する際に必須の実験技術です。しかし、“物質”である通常の中性粒子を真空中に捕まえることですら、最先端の技術を要します。これまでに報告された反水素原子の生成は、蓄積効果のない装置を用い、(1)反水素原子の消滅信号を検出することで、あるいは、(2)反陽子と陽電子にもう一度分解することで、それ以前に反水素原子が存在していたこと推測していたもので、反水素原子を直接観察したものではありませんでした。

研究グループは、開発を進めているカスプトラップ法が、反水素原子の元となる反陽子と陽電子を安定に蓄積でき、これを高い効率で反水素原子に変換できるばかりではなく、絶対零度に近いミリケルビン領域という極低温に冷却・蓄積できることを示しました。これにより反水素原子の性質をゆっくりと時間をかけて観測できる環境が整ったわけで、自然界の大きな謎の解明に一步近づくと期待されます。“生きた”反水素原子の研究は、まさに始まろうとしています。

本研究の成果は、米国の科学雑誌『*Physical Review Letters*』11月24日号に掲載されます。

1. 背景

最も簡単な反物質は、反粒子である反陽子 (\bar{p} : ピーバー) と陽電子 (e^+ : イープラス) が結合した反水素原子 ($\bar{p} e^+$) です。この反水素原子の性質を詳しく観測し、水素原子と比べることにより、私たちを取巻く物質の世界と、反物質で構成される世界が同じか違うか、さらに違うとすればどのように違うのか (物理学では、「対称性」と呼ばれます) を探ることが出来るようになります。このような対称性は、それ自身で大変興味深い基礎物理学の重要な研究対象ですが、同時に、私たちの住むこの宇宙がなぜ物質だけで出来ているのか、についての基本的な情報を提供すると期待されます。

これらの謎に挑戦するため、研究グループは、大変冷たい“よたよた”状態の反陽子を大量に生成する方法を開発してきました。研究グループは、スイスのジュネーブにあるヨーロッパ原子核研究所 (CERN: セルン) で、高周波 4 重極減速器 (RFQD: Radio Frequency Quadrupole Decelerator) と多重電極トラップという装置を組み合わせ、従来の 50 倍から数百倍高い効率で低速反陽子を蓄積し、数ケルビンにまで冷却する手法を開発しました (平成 16 年 11 月 2 日プレス発表: 極低温陽電子の高効率蓄積に新方式)。

さらに研究グループは、この大量の反陽子を用いて反水素原子を効率的に生成し、水素原子と詳細に比較するため、平成 14 年に「カスプトラップ法」を考案し、その開発をすすめてきました。

これまでの研究で、カスプトラップ法は、(1)使用する磁場が軸対称性を持っているため、反陽子、陽電子プラズマを安定に蓄積、かつ、操作可能で、(2)反水素原子を効率的に生成・蓄積でき、(3)スピン偏極した反水素原子をビームとして引き出せることが明らかになっていました。

2. 研究手法と成果

反水素原子冷却の原理は、以下のようなものです。

- (1) カスプトラップは、ソレノイドコイル 2 個を同軸上に置き、電流の向きを逆にしたもので、中心でゼロとなる軸対称な磁場を形成します (図 1)。この軸対称性のため、反水素原子の“原料”である反陽子と陽電子を高い密度で大変安定に蓄積できます。このことは、カスプトラップ法が他の反水素合成法^{*6}より遙かに優れている点です。
- (2) この様に高い密度の陽電子群と反陽子を混ぜ合わせると、いわゆる 3 体結合反応により、高い励起状態に反水素原子が生成されます。
- (3) 高励起状態にある反水素原子は、その状態に対応した高い磁気モーメントを持って (強い磁石になって) いるので、容易にカスプトラップの磁場に捉えられ、トラップ中で振動運動をします。
- (4) この様に振動運動をしている反水素原子は、磁場の弱くなる中心付近では速く動き、振幅が最大になる磁場の強いところではほぼ止まっています。すなわち、反水素原子はほとんどの時間を大きな振幅を持った位置で過ごすこととなります。さらに、低い励起状態への遷移の確率は磁場と共に大きくなります。この二つの効果が相俟って、低い励起状態への遷移はほぼ最大振幅のあたりで起こることとなります。低い励起状態にある反水素原子の磁気モー

メントは小さくなり、ポテンシャルエネルギーも小さくなり、結果的に冷却されるというわけです。

今回の理論計算によると、例えば 15 ケルビンで形成された反水素原子は 400 ミリケルビンまで冷却できることが分かりました (図 2)。これは、反陽子や陽電子の蓄積温度である液体ヘリウム温度 (4 ケルビン) よりはるかに低い温度への反水素原子生成が可能であることを示した初めての報告となっています。

今回の研究は、カスプトラップ中での反水素原子の振る舞いを注意深く考察し、極低温基底状態にある反水素原子が生成できることを明らかにしました。このことは、当初の研究目的である CPT 対称性テストを大変高い精度で実現できるばかりでなく、反水素原子に陽電子が結合したイオン“反水素イオン ($\bar{p}e^+e^+$)”生成への道を拓きます。反水素イオン ($\bar{p}e^+e^+$) は、負の水素イオン (pe^-e^-) の反物質ですが、これは正に帯電しているので、様々なイオンと安定に混合することのできる初めての反物質となります。

従って、例えば反水素イオンとアルカリ土類イオンを混合し、アルカリ土類イオンをレーザー冷却することでマイクロケルビン領域の反水素イオンを得ることも可能です。(原子物理研究室でも不安定ベリウム (Be) イオンのレーザー冷却に最近成功しています。) 冷却の後、反水素イオンの陽電子一個をそっと剥がしますと、やはりマイクロケルビン領域にある極低温の反水素原子が生成されます。これは、反物質が物質である地球との重力相互作用、反物質のボーズアインシュタイン凝縮^{*7}などこれまで想像の世界にあった研究を実現する第一歩となります。いくつもの未踏の領域を研究する基本的な技術を提供する極めて重要な装置として使えることがわかります。

3. 今後の展開

以上のように、本研究は、ミリケルビン領域の極低温反水素原子が効率的に生成できることを明らかにしました。これは反水素原子の蓄積を容易にすると共に、CPT 対称性テストの実験精度を大幅に向上します。さらに、カスプトラップ中では反水素イオンが生成でき、レーザー冷却法と併用することにより、さらに絶対零度に近いマイクロケルビン領域の反水素原子生成も可能になります。これは反物質と物質の重力相互作用の実験的研究を初めて可能にするとともに、反物質のボーズアインシュタイン凝縮状態実現への道も拓けます。反物質研究が新たな段階に入ると言えます。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

中央研究所 山崎原子物理研究室

主任研究員 山崎 泰規

(東京大学院総合文化研究科広域科学専攻 教授)

ジュニア・リサーチ・アソシエイト (JRA) 永田 祐吾

(東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 大学院生)

Tel : 048-467-9428 / Fax : 048-467-8497

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

<補足説明>

※1 基底状態と励起状態

原子は飛び飛びのエネルギー状態にすることができるが、そのうち最もエネルギーの低い状態を基底状態、それよりエネルギーの高い状態を励起状態と呼ぶ。基底状態にある反水素原子では、陽電子と反陽子が高い密度で重なっているため、互いの内部が最もよく見える。従って、CPT 対称性を高い感度で研究するには、基底状態にある反水素原子が不可欠となる。

※2 反水素

反陽子（陽子の反粒子）と陽電子が水素様に結合した原子で、物理学の基本的対称性を高精度で検証するために適した系として注目されている。

※3 反陽子

陽子の反粒子。質量、スピンは陽子と同じだが、電荷、及び、磁気モーメントは逆符号になっている。1955年、Bevatron（ベバトロン）という加速器からの56億電子ボルトの陽子を用いて、Chamberlain（チェンバレン）らにより発見されました。

※4 陽電子

陽電子は、電子の反粒子。質量、スピンは電子と同じ値を持つが、電荷及び磁気モーメントは、電子と逆符号。また、電子と同様、物質を構成する素粒子の一つである。1929年にディラックにより理論的に予言され、この3年後、アンダーソンにより、宇宙線の中に発見された。電子と出会うと、光となって消滅（対消滅）してしまう。そのため、物質中では、 10^{-10} 秒という非常に短い時間しか存在できない。

※5 CPT 対称性

物理学において最も基本的だと考えられている対称性。荷電共役変換（C）、空間反転（P）、時間反転（T）の3つの変換を同時に行うことを意味する。水素と反水素の振る舞いに違いが見つかれば、CPT 対称性が破れていることになる。

※6 反水素原子合成法

これまでに実現されたのはネスティッドトラップ法と呼ばれる一様磁場を用いたもので、反水素原子を合成することはできても、蓄積することはできなかった。蓄積効果を持つ方法としては、ソレノイドによる一様磁場とミラーコイルを組み合わせた、さらに軸のまわりに不均一な磁場分布を発生させるイオッフエ・バーを配置した構造がよく知られている。これは元々大量にある通常の中性粒子の一部を閉じ込

めには大変有効な方法。しかし、反水素原子生成のように、その原料となる2種類の荷電粒子(反陽子と陽電子)を同時に安定に閉じ込める必要がある場合には、色々な困難を生じる。現在、軸まわりの磁場分布を調整することにより、荷電粒子の安定閉じ込め条件を最適化する研究が精力的に進められている。このほかパウルトラップと呼ばれる高周波を用いた合成法も提案されているが、やはり蓄積効果は持たない。

※7 ボーズアインシュタイン凝縮

多数の原子を非常に低温にするとその波動性が顕著になり、互いに波が重なるようになる。これがボーズ統計に従う粒子である場合、すべての原子が同じ状態に落ち込むようになる。この様な状態をボーズアインシュタイン凝縮といい、いくつかの原子では既に実現されている。これまで反水素原子は生成するだけで精一杯だったが、反水素イオンをマイクロケルビンの領域まで冷却することができると、ボーズアインシュタイン凝縮の可能性が急に現実味を帯びてくる。

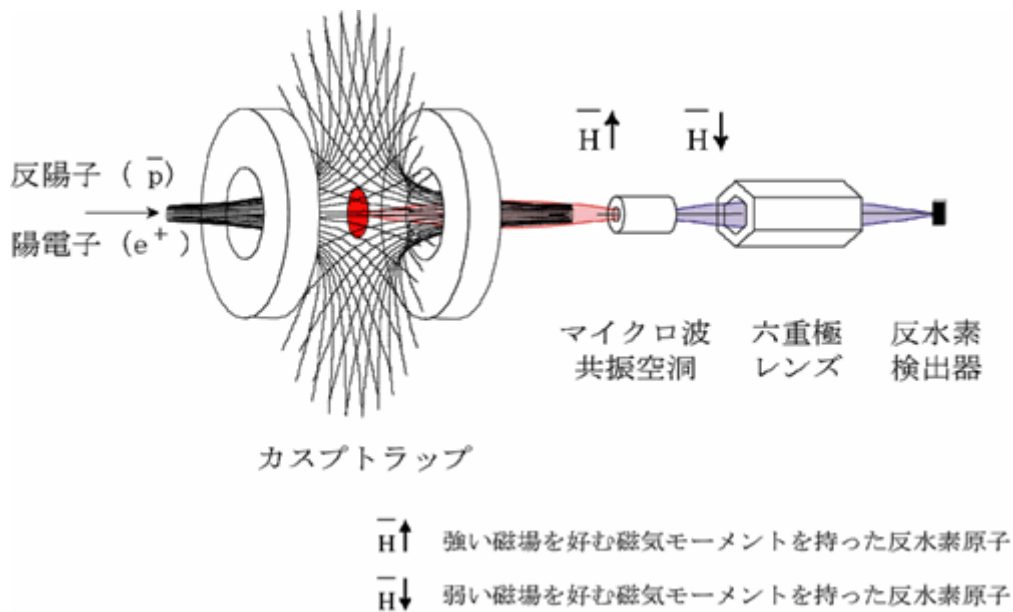


図1 カスプトラップと引き出された反水素ビームのスピンの遷移を測定する装置の概念図

同軸上に並べられた2つのコイルに逆向きの電流を流すことにより、中心でゼロとなる軸対称の磁場を形成する。この様な磁場配置の場合、反陽子や陽電子などの荷電粒子は安定に蓄積され、両者が重なる中心部付近で反水素原子が合成される。生成された反水素原子の一部は、スピン偏極した極低温の反水素原子ビームとして引き出され、六重極レンズにより反水素原子検出器に収束される。マイクロ波共振空洞に掛けるマイクロ波の周波数を調整してスピン遷移を誘起すると、六重極レンズは反水素ビームが発散させるので、検出器へ到達する反水素原子が減少し、スピン遷移の引き起こされたことが分かる。この遷移周波数の測定精度は反水素ビームが冷たければ冷たいほど上がり、本研究からさらに高精度のCPT対称性テストの実現できることが明らかになった。

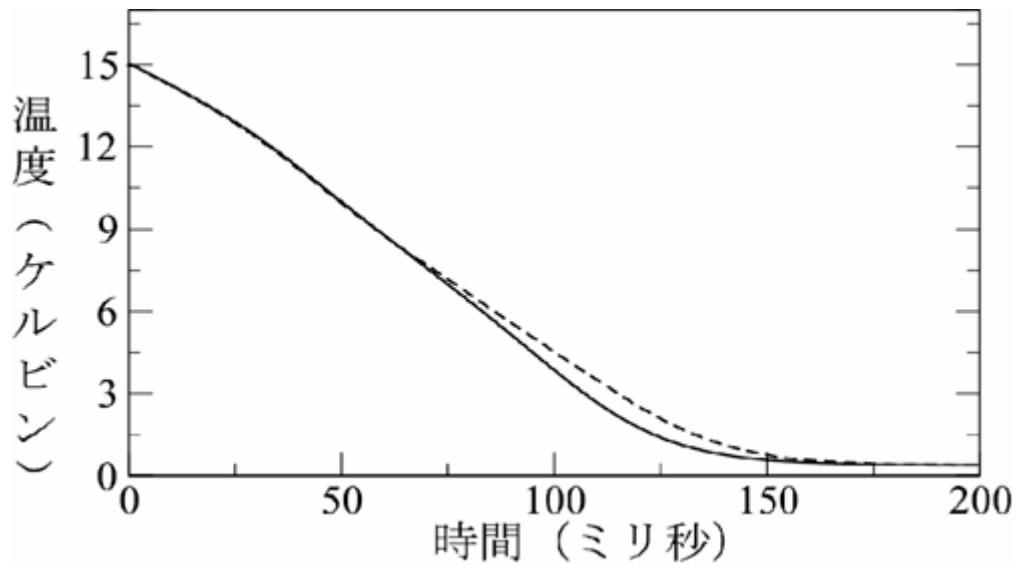


図2 励起状態に生成された反水素原子の温度の蓄積時間依存性

励起状態（主量子数が 44、磁気量子数が 43）に反水素原子が生成された場合の、蓄積されている反水素原子の温度の蓄積時間依存性。150 ミリ秒程度でほぼ平衡に達していることが分かる。