

小特集 反水素合成から反水素物理へー反陽子，陽電子の冷却・中性化とトラップー

6. 反水素原子の閉じ込めと分光

藤原 真琴

TRIUMF カナダ国立素粒子原子核物理学研究所，カルガリー大学

(原稿受付：2012年12月6日)

反水素原子を用いた精密測定は現代物理の根本をなす基礎概念の検証に有効である。反水素を長時間閉じ込めることができると、今までまったく不可能、あるいはきわめて困難だった精密測定が可能になると考えられる。最近反水素の閉じ込めが ALPHA 実験によって達成され、またマイクロ波によって分光的測定が初めて行われた。本章ではこれらの成果を中心として、反水素閉じ込めおよびそれを使った測定について解説する。

Keywords:

cold antihydrogen, atom traps, annihilation detector, microwave and laser spectroscopy

6.1 はじめに

超低速の反水素原子、いわゆる「冷たい」反水素が初めて生成されてから約10年が経った[1]。この10年で反水素研究は著しい発展を遂げている。本章では ALPHA 実験の最近の成果[2-4]とそれに至る経緯を中心に、私見を交えながら反水素閉じ込めおよび分光実験について解説する。

反水素研究の究極の目標は、物質・反物質間の対称性の精密検証にある。なかでも CPT (荷電共役・パリティ・時間変換) 対称性は、現代素粒子物理の根底をなす基本対称性である。量子力学、特殊相対論、確率の保存、スピン統計等、極めて基本的な仮定が正しいという前提で、CPT 定理が証明されている[5]。CPT 定理によると、物質系と反物質系の寿命、質量、エネルギー準位等は等しくなければならない。逆に、例えばもし水素原子と反水素原子のエネルギー準位に違いがみつければ、CPT 定理の前提となる基本仮定が間違っていることになる。

また CPT とは別に、一般相対論の弱等価原理によると、反物質の重力作用は物質と同じであるはずである。もし例えば反物質を自由落下させた時の重力加速度が物質のそれと異なれば、アインシュタインの一般相対論の根本原理が修正を迫られる。

このように、反水素原子を用いて高精度実験を行うことができれば、物理の基本原理の精密検証が可能になる。反水素実験の素粒子物理的意義についてのさらなる議論については[6]を参照されたい。

反水素の精密実験には現在2つの異なるアプローチが試みられている、一つは反水素をビームにして取り出し、磁場・電場の影響の少ないところで測定を行うことをめざすアプローチであり[7]、もう一つは反水素を磁気トラップ中で生成し、その場に閉じ込めて測定を行うものである[2-4]。前者は本特集の他の章に詳しい。本章では、後者に

焦点を当てて解説する。ここで、両者のアプローチは必ずしも相互排他的ではないことを記す。反水素ビームを作る過程で(一時的にせよ)反水素をトラップすること、また磁気トラップに閉じ込められた反水素を低磁場中に引き出すことは原理的には可能であり、各実験グループは必要に応じてこれらのアプローチを組み合わせるだろう。

6.2 ATHENA から ALPHA へ

ALPHA 実験は現在 CERN 研究所の反陽子減速施設(AD)に位置する幾つかの実験のうちの一つであり、前身の ATHENA 実験から発展した。ATHENA による反水素生成の詳細は前特集の拙著[8]を参照されたい。

ATHENA 実験が作り出すことに成功した冷たい反水素[1]は低速ではあったが、すぐ壁に当たって消滅してしまうものだった。反水素生成から消滅までの数マイクロ秒の飛行時間を利用したレーザー実験も試みたが、うまくいかなかった(レーザー反応の欠如から逆に反水素生成過程に対する知見が得られた[9])。

ATHENA 実験が終了した2004年ごろに結成された ALPHA 実験の第一の目標は、とにかく反水素を一時的にせよ閉じ込めるということであった。たとえば1秒程度の閉じ込め時間でも、ATHENA 実験での飛行時間に比べると10万倍以上も長い時間を実験のために享受できるのである。ちなみに ALPHA という名前は筆者が提案したもので、Antihydrogen Laser PHysics Apparatus の略である。実はその前に、ALE (Antihydrogen Laser Experiment) というビールの一種に掛けた名前も提案していたのだが、これは採用されなかった。2004年ごろに筆者はカナダに移り、ALPHA に参画するグループを結成した。カナダグループは現在、ALPHA 国際共同実験の1/3以上を占める最大グループとなっている。

ALPHA 実験を始めるにあたって筆者らが特に重要視したのは、検出器系である[10, 11]。後述のように、反水素閉じ込めおよび分光を行うにあたって様々な困難が予想される中で、反水素消滅反応を高感度、低雑音および位置敏感に検出することの重要性を我々は強く感じていた。一般に複雑な実験装置を作るには様々なトレードオフが必要であるが、我々は検出器を優先する設計思想を採用したのである。我々の競争相手である ATRAP 実験は、他の面、例えば電極の温度を極冷化するということを優先した。これまでのところ、我々の作戦が功を奏しているようである。

ALPHA 実験の概要を大まかに説明する。AD から、約 5 MeV の運動エネルギーを持つ反陽子のビームのパルスがほぼ 100 秒ごとに供給される。これらの反陽子はペニングトラップで捕獲され、冷たい電子とのクーロン散乱によって冷やされる。さらに反陽子と電子の混合プラズマに回転電場をかけることにより動径を圧縮する[12]。その後、電子を除去し、蒸発冷却を行って[13]、低温反陽子プラズマを用意する。これとは別に陽電子は、まずバッファガスによる蓄積器で貯められた後、トラップ中心部に輸送され、さらには蒸発冷却によって冷却される。冷たい反陽子と陽電子のプラズマを後述の自動共鳴過程[14]を利用して混合し、反水素原子を生成する。生成された反水素のほとんどは磁気トラップの深さよりも高い運動エネルギーをもつのでトラップ壁に当たって消滅する。だがもし 0.5 K 以下の反水素が存在すれば、Ioffe 型磁気トラップ[15]に閉じ込められる。トラップ中に残っている荷電粒子（反陽子、陽電子）を除去するために、電場パルス印加する。この段階でトラップ中に存在するのは閉じ込められた反水素原子のみの「はず」である。反水素閉じ込めを検出するために、磁気トラップを構成する超伝導磁石を意図的にクエンチして反水素をトラップから開放し、壁で消滅させる。この信号を消滅反応検出器で検出することによって、反水素の閉じ込めを同定する（図 1）。

6.3 反水素閉じ込めへの道のり

反水素閉じ込めを達成するまでに、ALPHA 実験開始から 5 年、ATHENA 実験による反水素生成から数えると 8 年もの月日を必要とした。なぜそんなに時間がかかったのか。

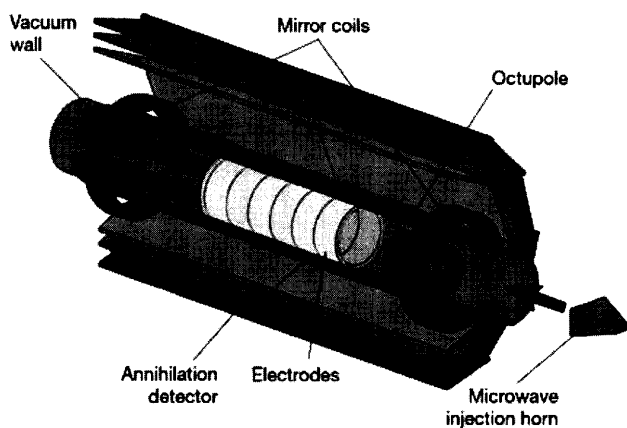


図 1 ALPHA 実験概要図。

反水素閉じ込めを達成するための原理的困難さは、関連した物理過程の特徴的なエネルギースケールを比較することによって理解できる。まず第一のスケールはプラズマ物理からくる。反水素を生成するためには、ペニングトラップに保持された大量の荷電粒子（反陽子・陽電子）を混ぜ合わせる必要があるが、これらの荷電粒子は非中性プラズマとして空間電荷による数 eV のオーダのポテンシャルエネルギーを持ち、これが一つのスケールを与える。それに対し、反水素を閉じ込める磁気トラップの深さは $\mu \Delta B$ で与えられる。ここに、 μ は反水素の磁気モーメント、 ΔB はトラップ中の磁場の最大値と最小値の差を示す。 ΔB は最先端の超伝導磁石技術を用いても、1 T 程度が限度であり、すなわちトラップの深さは数 10 マイクロ eV（温度にして約 0.5 K）程度となり、これが 2 つめのエネルギースケールを与える。2 つの特徴的スケール間の約 5 桁もの違いこそ、反水素閉じ込めを困難にしてきた大きな要因である。

これに比べて、ATHENA 実験等での反水素原子の生成自体は、プラズマのエネルギースケールと原子の束縛エネルギースケールが同等の数 eV であるため、今から考えると比較的容易だったといえるかもしれない。

ALPHA 実験において反水素閉じ込めを達成するには、前述のエネルギースケールの違いの他にもさまざまな困難を乗り越える必要があった。いくつかの例をここに記そう。まず荷電粒子用のペニングトラップと中性原子の磁気トラップが同じ空間で両立できるか、という問題がある。反水素を閉じ込めるには、磁気トラップ中で反水素を生成することが必要だが、そもそも反水素生成には反陽子と陽電子の保持が必要である。荷電粒子プラズマのペニングトラップによる閉じ込めは、O'Neil の閉じ込め定理[16]により、軸対称な系において成り立つことが示されているが、Ioffe 型磁気トラップの磁場構成は軸対称性を強く破るので O'Neil の定理は成り立たない。すなわち、磁気トラップに不可欠の磁場勾配が反陽子、陽電子の閉じ込めを妨げる可能性があるのである。この影響をできるだけ小さくするために、ALPHA 実験では 2 つのことを行った。まず動径方向の原子閉じ込めに、一般的に使われる四重極磁場ではなく八重極磁場を用いた[17]。動径方向の位置を R とすると、磁場強度は四重極で R 、八重極で R^3 に比例するため、プラズマが閉じ込められている軸付近 ($R=0$) では八重極による磁場の摂動は四重極に比べて軽減される。さらに、回転電場によりプラズマ動径の圧縮をすることにより[12]、動径磁場の磁場の影響をさらに極小化することができた。

また、これまで反水素の生成は 3 T や 5 T という強磁場のソレノイド中で行われてきたが、ALPHA 実験では 1 T の比較的低磁場中で反水素をつくることに成功した[18]。磁気トラップの深さは前述のように ΔB に比例するが、基底ソレノイド磁場が大きいほど、トラップ中の最小磁場も大きくなり、これによりトラップの深さが小さくなる。このためトラップの深さを最大にするには基底磁場 B ができるだけ小さい状態で反水素を生成することが望ましい[19]。しかしながら陽電子のシンクロトロン放射による自

己冷却の速さは B^2 に比例するので、3 T から 1 T に磁場を下げると冷却効率は約 1 桁低くなる。反水素の生成率は陽電子の温度のべき乗に反比例するので、低い基底磁場において簡単に反水素がつくれるかどうかは自明ではなかった。

反水素閉じ込めのためには当然、反陽子と陽電子のプラズマ温度ができるだけ低いほうが望ましい。我々は蒸発冷却によって低温プラズマを達成した[18]。蒸発冷却とはカップに入ったコーヒーが冷める機構である、集団の平均より高い運動エネルギーをもっている粒子が優先的に逃げ出すことにより、残された粒子の運動エネルギーの平均が下がり、冷却がおきる。蒸発冷却はボース・アインシュタイン凝縮研究等で中性原子の冷却に広く使われている。ALPHA 実験は蒸発冷却を反物質はおろか（低温の）荷電粒子に適用したはじめての例である。これにより、反陽子、陽電子プラズマともに、平衡状態以下の温度に冷却することが可能になった。

ATHENA における反陽子・陽電子混合は反陽子に数ボルトの運動エネルギーを与えて陽電子プラズマに打ち込むという、かなり荒っぽいものであり、これにより生成された反水素もある程度大きな速度をもつと考えられる[20]。前述のように、磁気トラップはきわめて浅いため、もっと穏やかに反陽子・陽電子を混合し、できる限り低速の反水素を生成する方法が望まれた。我々は非線形物理の分野で知られている自動共鳴という過程を利用して、反陽子プラズマを陽電子に導入する手法を開発した[14]。一般に駆動を与えた非線形振動子においては、その振動の振幅は駆動周波数によって決定され得る。我々は反陽子プラズマの軸方向振動を非線形静電ポテンシャル中で励起する際に、駆動周波数を変えることによって、その振幅を精密に自動共鳴的に制御することができることを示した。相互作用のない単独粒子領域でこれを行うのは比較的容易であると思われるが、クーロン力によって強く相互作用するプラズマ領域でそれができるかどうかは自明ではない。最新の理論によると、あるパラメータ領域では非中性プラズマでも自動共鳴制御が可能であると示唆された[21]。我々は反陽子プラズマを使ってこれを実験的に実証した。自動共鳴により、反陽子を陽電子中に「そっと」打ち込み、超低速の反水素を生成することに成功したのである[14]。

6.4 反水素閉じ込めの兆候

2005年に承認され2006年夏に実験を開始した ALPHA 実験だが、以上のような開発を通じて、2009年秋までに反水素閉じ込めおよびその検出の可能性が見込める実験条件を達成した[22]。これは反陽子・陽電子プラズマの密度、温度、検出系の効率等を考慮すると、数多くの試行を繰り返した場合、反水素閉じ込め事象が数イベント観測されてもおかしくないということである。

我々の実験では予想される反水素閉じ込め率がきわめて小さいため、稀な信号事象を大きなバックグラウンドの中からみつけ出すということが必要となる。このために設計・建設したかなり大掛かりな反水素消滅検出器[6]は、約 3

万チャンネルの両面シリコン・ストリップ検出器から成り、反水素中の反陽子消滅で生じる高エネルギー粒子（主にパイ中間子）の軌跡を検出することで、反水素消滅の位置が測定できる[23]。重要なバックグラウンドの一つは検出器を突き抜けた宇宙線が反水素消滅信号を模倣するというものである。

この手の稀事象測定で重要なのは、いわゆる「実験者のバイアス」をできるだけ排除することにある。これは測定において意識・無意識のうちに、例えば理論予想や期待に合うか合わないかにより、データ選択、信号選定条件の決定等にバイアスがかかることをさす。科学史においてはバイアスに導かれた誤りの例は数多い。現代素粒子実験ではこのような実験者バイアスを最小化するために、ブラインド（目隠し）解析を行うことが主流となりつつある。我々の場合、具体的には信号事象と背景事象の選別条件の決定を、実際の反水素閉じ込め実験のデータを用いずに（すなわちブラインドで）行い、代わりに独立した校正実験データを用いることによりバイアスを最小化した解析を行った[23]。

我々の信号選定条件とは、例えば検出されたパイ中間子の数、その軌跡のトポロジー、反陽子消滅の位置等である。解析の具体例を挙げよう。測定された反陽子候補事象の消滅位置分布は真の反陽子かあるいは偽の宇宙線かによって異なるので、選別条件の一つとして動径方向の位置 R を用い、ある値 R_c を閾として反陽子らしき事象と宇宙線らしき事象を区別する（実際には様々な変数について同様の選別をし、多次元解析を行う）。さて、合理的に選ぶ R_c の値は一義的には決まらず、多くの最終的には実験者の主観で決まる（例えば切りのいい数字、 $R_c = 4 \text{ cm}$ など）。このとき R_c 決定の判断を、零ないしは数事象しかない実際の実験のデータを見ながら行くと、特にもし閾値近くに候補事象が存在する場合などは、実験者が閾値を微調整することにより、その事象を反陽子らしい事象として受け入れる、または宇宙線らしいと排除することが可能になり、ここに実験者のバイアスが入り込む余地がある。このような事態を防ぐために、ブラインドかつバイアスのない解析方法が望まれるのだ。この手のブラインド解析は素粒子実験以外ではまだ馴染みが薄く、ALPHA 実験内で筆者らが提唱した際にはかなりの抵抗を受けた。実際、AD 実験の中で、ブラインド解析を行っているのは、いまのところ ALPHA だけのようなのである。このようなバイアスを最小化したデータの取り扱い、結果の統計的確かさを定量的に論ずるための前提条件でもある。

さて選別条件閾値の選択は盲目的にやる限りにおいては、バイアスはいかに避けられないのであるが、その閾値、例えば R_c の値が測定に最適だとは限らない。我々は、無バイアスかつ、測定の統計的確かさの期待値が最大になる選択条件の閾値を求める方法を考案した。一般に稀収量測定においては、測定結果の統計的確かさは、測定ごとに変動する（測定回数が多い極限では、平均の値に収束する）。我々はある妥当な範囲で信号収量を仮定し、計算機上で大量の模擬実験を繰り返すことにより、測定回数が多い極限では最

大の統計的確かさを与える選別条件の閾値を求めた。つまり我々の閾値の選択は無バイアスかつ、(平均すると)最適化されているのだ[23]。

2009年の実験では反水素閉じ込めの試行を約200回繰り返した。上に述べた注意深いブラインド解析の結果、宇宙線背景事象の期待値の0.14 イベントに対して、反水素閉じ込め候補事象が6 イベント観測された[22]。これは、ポアソン統計によると、5.6 シグマの統計的確かさで、反陽子消滅反応を検出したことになる。我々は反水素閉じ込めを観測したのだろうか？

実はここで、別の重大なバックグラウンドが存在する。前述のように我々の検出器は、反水素原子を構成する反陽子の消滅を検出するものであり、検出器信号のみでは反水素と反陽子の消滅を区別できない。すなわち、もし反陽子があるからの形でトラップされており、それが磁気トラップ遮断時に消滅すれば、偽の閉じ込め信号を与え得る。もちろん、前述のように磁気トラップをシャットダウンする前に、電場を印加して荷電粒子を除去する努力をするのであるが、もし軸方向運動量に対する動径方向運動量の比(すなわちピッチ角)が十分に大きい反陽子が存在すれば、その反陽子は磁気ミラー効果によって磁気トラップ中に強く閉じ込められ、我々が印加可能な強さの電場では取り除くことができない。

我々はミラー捕獲された反陽子が存在し偽信号を与える可能性をあらゆる角度から検討した。結論としては、その可能性はきわめて低いと推定された[22]。特に詳細なシミュレーションによって反陽子と反水素の磁気トラップ内での軌道を計算すると、消滅反応の位置および時間分布に違いが出ることが予測された。この計算との比較から、我々の実験データは反水素閉じ込めを強く示唆していた[22]。この時点で反水素閉じ込め検出と結論づけるかどうかで ALPHA 内でかなりの議論になった。しかしながら、ミラー捕獲された反陽子による偽信号がないとは実験的には証明することはできなかった。このため我々は保守的立場を貫き、「閉じ込めと矛盾のない兆候が得られた」という立場を表明するに留めた。この時期、国際会議等でこの話をする、保守的すぎるのではないか、というコメントを何度も頂戴したが、今でも正しい選択だったと思っている。ちなみに、この兆候を報告した論文[22]は査読に時間ががかり、結局受理されたのは翌年反水素の閉じ込めを発表した後、という少しタイミングの悪い話になってしまった。

6.5 反水素閉じ込めの検出

翌年2010年には、反陽子・陽電子プラズマの状態を改善し、その温度をさらに下げることができた。これにより約300回の試行のうち、背景事象の予測数1.4に対し、38イベントの反水素候補事象を観測した[2]。前年の6イベントより大幅な増加である。より重要なことに、前年は除外することのできなかったミラー捕獲された反陽子によるバックグラウンドの可能性を実験的に否定することができた。このために我々が行ったのは、磁気トラップを遮断し反水

素を放出する際中に電場をかけるということである。もし(電荷をもつ)反陽子が存在すれば、この電場によって消滅の位置が変位するはずであるが、(中性の)反水素原子ならこの電場を感じないので、消滅位置に変化はないはずである。この方法に筆者が思い至ったのは、シミュレーションで反水素と反陽子の消滅パターンがなぜ違うのかということに対する考察からであったが(これは各々の軌道の特徴的周波数とトラップ遮断の時間スケールの違いによることが分かった)、後から考えるとこれはまったく当たり前の方法でなぜもっと早く思いつかなかったのかと思ったものだ。しかし、ここで重要なことは、以前のように磁気トラップ中で電場をかけるだけでは、いくら高い電場をかけても原理的に除去できない大きいピッチ角を持つ反陽子の分布が存在するが(反陽子の初期条件はわからないことに留意せよ)、磁気トラップを遮断しながら電場をかけると、最終的には磁気ミラー効果を与える磁気勾配自体が存在しなくなるので、反陽子は電場の影響を受けて偏向されることになるという点である。もちろん、ミラー捕獲された反陽子が電場により偏向を受ける振る舞いは詳細なシミュレーションを行うだけでなく、意図的にミラー捕獲した反陽子を用いて実験的に確認した。これにより、まったく疑いのない形で実験的にミラー捕獲反陽子バックグラウンドの可能性を排除することができたのである。これをもって、我々の検出した信号は閉じ込められた反水素が放出された際に壁に当たって消滅したものであると確信し、世界で初めての反水素閉じ込め成功を発表するに至った。この成果は、Nature 誌に発表され[2]、ASACUSA 実験での反水素生成[7]とともに英 PhysicsWorld 誌2010年の最大の物理ブレイクスルーに選ばれるなど、世界的な反響を呼んだ。逆に言うところのような大きな反響が予想される結果だったゆえ、慎重に慎重を重ねたのである。なお、消滅検出器の位置感性がその設計時に予想もしない形でバックグラウンドを排除する決め手になったのは興味深い事実である。

6.6 反水素の閉じ込め1000秒

ALPHA の最初の反水素閉じ込めの時間は約0.2秒であった。0.2秒というのは、封じ込められていない反水素の飛行時間に比べると何桁も長く、様々な測定を行うのに十分な時間であろう。しかしながら、引き続き実験において、我々は反水素を1000秒間にもわたり閉じ込めることに成功した[3]。実のところ、原理的な閉じ込め時間はもっと長い可能性があるが、この測定は時間がかかるため、まだ詳細には行われていない。

私が解析および執筆を担当したこの論文は Nature Physics 誌の表紙を飾ったが、長時間の閉じ込めの他にいくつかの興味深い観測を報告したのでかなり長い論文となった。まずひとつは反水素の捕獲効率を約5倍向上したことである。「零を微調整することはできない」という格言があるが、小さいなりに閉じ込めの信号が見えだすと、時間はかかるが様々な最適化を始めることが可能になる。このおかげで2010年末までには300以上の閉じ込め事象を観測する

ことができた。向上した捕獲率によって、我々は反水素閉じ込め過程を調べるに十分な統計を得た。特に磁気トラップの遮断時に反水素が漏れ出す時間分布をみることににより、トラップされた反水素の運動エネルギー分布を推定することができた。運動エネルギーが大きい反水素はトラップ遮断後早く漏れ出してくるが、それが小さい反水素は遅れて漏れ出す。シミュレーションとの比較により得られた分布は3次元マクスウェル分布の低エネルギー部分であることが示唆され、その本来の平衡温度は磁気トラップの深さ (0.5 K) よりもずっと大きいと示唆された。この分布は、物理的には反陽子が陽電子プラズマ中で熱平衡化した後に反水素が生成される、という描像を支持する。これに対して、今までの他の実験の観測は反陽子が熱化する前に反水素生成が起きることを示唆していた[20]。トラップされた反水素を調べることににより、反水素の生成過程に関する知見が得られたのである。

この間、色々とシミュレーションと実験データを比べている内に、上記のように反水素消滅の時間分布だけでなく、消滅の位置分布も反水素の運動エネルギーと相関を持つことに気づいた。この理由は最初、明白ではなく筆者の頭を悩ませたが、本実験のいくつかの動的特徴に起因していることに気づいた。特に重要なのは、閉じ込められた反水素原子の軸方向と動径方向の運動の結合が弱いということであり、また消滅の時間分布は動径運動エネルギーと、位置分布は軸運動エネルギーと主に相関がある、ということである。前者はIoffeタイプの磁気トラップの一般的特徴であり、後者は我々のトラップの遮断方法の詳細によることが分かった。これからさらに、消滅の位置分布と時間分布の測定を組み合わせることにより、非等方的なエネルギー分布を測定することができるとことが導かれる。そのような非等方的分布は、例えば1次元のレーザー冷却や、断熱冷却によって作られる可能性があり、後に述べる重力実験などに役に立つかもしれない。ここでも、またもや位置敏感な検出器が予想を超えた働きをしているのである。

長時間閉じ込めの重要な帰結として、基底状態の反水素が作られたと予想されることが挙げられる。ペニングトラップ中でのプラズマ混合による反水素生成は三体再結合反応が優勢であると考えられ[24]、この反応で反水素は高い励起状態に作られる。しかし精密分光を行うには基底状態の反水素を用意する必要がある。励起状態からの脱励起率を計算すると、控えめに見積もっても、1秒もあればほぼ完全に脱励起が起きる。つまり反水素を閉じ込めることによって、我々は基底状態の反水素を作ることに成功したと考えられる。

6.7 反水素超微細構造のマイクロ波分光

2011年に ALPHA 実験はマイクロ波を用いて、初めて反物質原子の分光的測定に成功した[4]。これは筆者らカナダグループが立案・主導した測定である[19]。

強磁場中では、反水素のエネルギー準位は4つの超微細構造に分離し、これらは束縛エネルギーの大きい順に通常

a, b, c, d 準位と表記される。磁気トラップにはcとdの状態が閉じ込められ、aとbの状態にある反原子はトラップから放出される。この実験はマイクロ波をトラップされた反水素原子に照射することによって、閉じ込め可能な準位(c,d)から、不可能な準位(a,b)への共鳴遷移を誘導し、超微細構造を測ることを目的とした。

2011年の時点で、1回の試行あたり平均して約1個の反水素を閉じ込められるようになっていた。2011年の夏にカナダで製作したマイクロ波導入装置を ALPHA 実験に取り付け、実験を開始した。

マイクロ波分光を行うにあたってまず必要になる知識は外部から導入するマイクロ波のトラップ中心部への伝播効率である。ALPHA 装置は元々精密マイクロ波分光をやるために設計されたものではなく、マイクロ波は短い円筒からなるペニングトラップ用の電極が多数連なる部分を通りぬけなければならない。各部分で反射、干渉も起こるため、伝播効率を理論的に求めるのは難しい。我々は、ペニングトラップに保持された電子プラズマをマイクロ波検出センサーとして使うことにより、トラップ中心部でのマイクロ波電場の強度を推定する手法を開発した。電子のサイクロトロン周波数に合わせたマイクロ波を送ることにより、電子プラズマは加熱され、その温度の上昇を、プラズマモードの検出による非破壊的プラズマ診断により測定する。プラズマ加熱の度合いからマイクロ波電場が求められる。この手法によって、数W程度の比較的低電力のマイクロ波源でも共鳴実験が可能であろうことが予測できた。

超微細構造の準位差は磁場の強さに依存するので、分光実験を行うには、トラップ中心部の磁場の強さを知ることが不可欠である。我々は、トラップ内部での磁場測定にも電子プラズマのサイクロトロン共鳴を利用した。周波数を変えながらマイクロ波を電子プラズマに照射し、プラズマの加熱をモニタする。加熱が最大となる周波数から基底磁場の強さが求められる。

デモンストレーション実験とは違い、実際に分光測定をやろうとすると、反水素閉じ込めを数週間にわたって再現性をもって定常的に行える状況が必要となる。ALPHA 実験のように複雑な装置の組み合わせである実験はすべての部分を同時に作動させるのはそれほど容易ではない。2011年晩秋によくそのような状況に達した。6.8節のように ALPHA 装置は2011年の終わりに取り壊される予定になっていたので、マイクロ波実験を一から始めて成功に導くために我々に与えられた時間はきわめて限られていた。

実際の実験ではトラップされた反水素にマイクロ波を連続して180秒照射し、反水素が残存するかどうかをトラップを遮断することによって測定した。共鳴遷移が起きれば反水素は放出され、トラップ遮断時まで生き残れないが、マイクロ波が非共鳴であれば、反水素は最後まで生き残る。この測定を消失 (disappearance) モードと名づけた。その結果を表1に示す。

約100回ずつの試行において、共鳴周波数のマイクロ波を照射した場合は、非共鳴の場合やマイクロ波を照射しない場合に比べて反水素の残存率が明らかに小さくなってい

表1 マイクロ波共鳴消失モード結果.

	試行回数	残存反水素検出数	収率
共鳴	103	2	0.02 ± 0.01
非共鳴	110	23	0.21 ± 0.04
μ 波なし	100	40	0.40 ± 0.06

る。この結果はマイクロ波による反水素原子の超微細遷移と矛盾はしない。しかし、これだけでその証明としては弱いだろう。

このため消失モードと同時に、マイクロ波共鳴によりトラップから放出された反水素の消滅の直接検出測定 (appearance, 発現モード) も試みた。しかしながらこの測定は信号が宇宙線の背景事象に埋もれて、困難を極め、これまでに使ってきた標準的な解析方法ではかなりの統計を貯める必要があった。

2011年のビームタイムの最後によりやくすべての部分がうまく動作し、まさにこれから統計を貯めようというときに、CERNの加速器が壊れてしまい、実験が突然終了してしまった。特にマイクロ波実験を主導してきたカナダグループにとってはこれは途方もないショックであった。しかしながら、我々はあらたな解析方法を開発することによって、最終的に説得力のある結果を得ることができた(図2)。この解析には最近ヒッグス粒子探索等の素粒子実験で使われ始めた多変量解析の中でも、決定の木 (decision tree) と呼ばれる統計手法の一種を取り入れた。もちろん、信号選別条件の選択等はブラインドかつバイアスのない方法で行い、注意深く様々な効果を考慮した。

なお表1で非共鳴とマイクロ波なしとの間に違いがあることに当初、頭を悩ませたが、実際は非共鳴といっても一部、弱いながらも共鳴反応が起こり、180秒間という長い反応時間中には反水素が共鳴放出され得ることに気づいた。詳細なシミュレーションおよび図2の発現モード測定もこ

の解釈を支持している。

最終結果が反水素分光の成功を示した時は、嬉しいというよりも正直ほっとした感が強かった。マイクロ波実験を発案・主導してきた者として失敗は許されないとの思いが強かったからである。

さてこの実験結果にはどんな意義があるのか。まず、我々は原子状反物質の内部構造を探ることに初めて成功した。これにより(長時間の閉じ込めにより)理論的に予測されていたことではあるが、基底状態の反水素原子の存在を初めて実験的に示した。またCPT定理の予言では反水素のスペクトラムは水素のそれと等しいはずであるが、反水素原子を用いてこの予言を検証する第一歩を踏み出した。今回の分光の精度は共鳴測定と非共鳴測定の周波数の差で与えられ、これは100 MHz程度の精度 ($\Delta f/f \sim 3 \times 10^{-3}$) と、まだまだ低いものであるが、精度を2桁程度向上することは現在の手法の延長により可能だと考えている。今回の実験では反水素中の陽電子のスピンを反転させたが、この遷移は磁場トラップ中の磁場の不均一性の影響をまろに受ける。我々は現在、反陽子のスピン反転による磁場不均一性に影響を受けない分光手法を開発しており、これによりさらなる高精度の分光が可能になると期待している。

おそらく今回の実験の最も重要な成果は、一回あたり1個程度のきわめて少ない数でも、一旦反水素を閉じ込めてしまえば、反物質消滅反応の高効率検出を通して分光実験が可能である、ということを実証したことであろう。尚、ASCAUSA 実験で現在開発中の反水素ビームによる超微細構造分光[7]は極めてエレガントな実験であり、我々のトラップ中で行われる測定とは相補的な関係にある。

ALPHAの直接の競争相手である ATRAP 実験は2012年の3月、ALPHAの発表から1年数ヶ月後に、反水素閉じ込めを主張する論文を発表した[25]。残念ながら ATRAP 実験は位置敏感な反水素消滅検出器を持たないので、反水素閉じ込めを説得力をもって示すのは、なかなか大変だと思われる。この論文では例えば、ALPHAが2年近くかけて調べあげたミラー捕獲された反陽子によるバックグラウンドの有無についての実験的証拠は示されていない。また実験の再現性にも問題があるとグループ自身が認めている。ATRAP 実験が反水素分光を達成するにはまだ少し時間がかかるかもしれないが、複数の実験がお互いをチェックし合うことはきわめて重要であり、ATRAP 実験の進展を大いに期待している。

6.8 現状と展望

最初の ALPHA 装置は2011年末をもって撤去され、我々は現在全く新しい装置、ALPHA-2を建設中である。ALPHA-2の最大の目的は反水素のレーザー分光実験を行うことである(初期 ALPHA 装置ではレーザー導入は不可能だった)。ALPHA-2 中心部のクライオスタットは TRIUMF 研究所で設計され、同研究所とカルガリー大で製造された。また我々カナダグループはいくつかのレーザー実験を主導すべく、レーザーの開発にも取り組んでいる。ここ数年の間に反水素のレーザー分光を達成したいと考えて

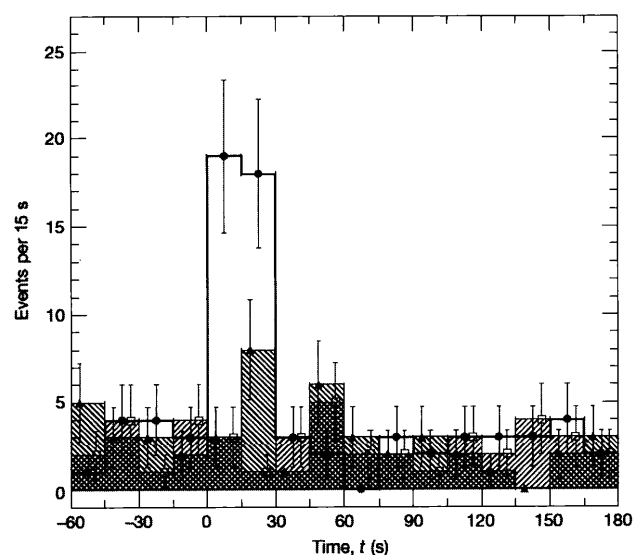


図2 マイクロ波共鳴出現モードで検出された反水素消滅信号。●は共鳴、▲は非共鳴、□はマイクロ波なしのデータを示す。

いる。

筆者の将来的な関心は、閉じ込めた反水素を用いて反物質に作用する重力を測れるか、ということにもある。反物質重力は以前から興味のあるテーマだったが、なにせ重力相互作用はきわめて弱いために、具体的な実験を考えるのも恐れをなしていた面がある。しかし、反水素の閉じ込めが1000秒もの長時間可能になると、状況が一気に変わった。これは筆者が執筆を担当した[3]でも強調したことだが、レーザー冷却等を通して、重力の効果が明らかになる温度まで反水素を冷却することが、原理的に可能になったのである。(反)水素のレーザー冷却には122 nmというきわめて波長の短いレーザーが必要となるが、技術的困難によりこの波長で高出力のレーザーは現在存在していない。閉じ込め時間が長ければ、現存の技術で達成可能な低出力レーザーでも冷却が可能になるのである。カナダグループは既にこのレーザーの開発に着手している。さらに筆者らはALPHA-2装置の実験条件における現実的なシミュレーションで20 mK程度まで反水素を冷却することが可能であることを示した[26]。すでにAD施設では2つの反物質重力実験が承認されているが、いずれも反水素を閉じ込めずに、未だ実証されていない野心的な手法を用いることを提案している。筆者は現在、トラップされ、レーザー冷却された反水素を用いて競争力のある重力実験が可能であるかどうかの検討を行っている。

閉じ込められた反水素原子による物理はまだ始まったばかりだが、今後さらなる発展が期待される。

参考文献

- [1] M. Amoretti *et al.*, Nature **419**, 456 (2002).
- [2] G.B. Andresen *et al.*, Nature **468**, 673 (2010).
- [3] G.B. Andresen *et al.*, Nature Phys. **7**, 558 (2011).
- [4] G.B. Andresen *et al.*, Nature **483**, 439 (2012).
- [5] G. Lüders, Ann. Phys. **2**, 1 (1957).
- [6] M.C. Fujiwara *et al.*, AIP Conf. Proc. **1037**, 208 (2008).
- [7] Y. Enomoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 243401 (2010).
- [8] 藤原真琴: プラズマ・核融合学会誌 **80**, 1027 (2004).
- [9] M. Amoretti *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 213401 (2006).
- [10] M.C. Fujiwara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 065005 (2004).
- [11] M.C. Fujiwara, AIP Conf. Proc. **793**, 111 (2005).
- [12] G.B. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 203401 (2008).
- [13] G.B. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 013003 (2010).
- [14] G.B. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 025002 (2011).
- [15] D.E. Prichard, Phys. Rev. Lett. **51**, 1336 (1983).
- [16] T. M. O'Neil, Phys. Fluids **23**, 2216 (1980).
- [17] G.B. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 203402 (2007).
- [18] G.B. Andresen *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **41**, 011001 (2008).
- [19] M.C. Fujiwara *et al.*, Hyperfine Interactions **172**, 81 (2006).
- [20] G. Gabrielse *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 073401 (2004); N. Madsen *et al.*, *ibid.* **95**, 155001 (2005).
- [21] I. Barth *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 155001 (2009).
- [22] G.B. Andresen *et al.*, Phys. Lett. B **695**, 95 (2011).
- [23] G.B. Andresen *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **684**, 73 (2012).
- [24] M.C. Fujiwara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 053401 (2008).
- [25] G. Gabrielse *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 113002 (2012).
- [26] P.H. Donnan *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **46**, 025302 (2013).