

いよいよ始まる反水素分光実験 ALPHA 実験 (CERN) でのトラップした反水素による CPT の検証

東京大学大学院理学系研究科, CERN

石田 明

ishida@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

TRIUMF – Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics

藤原 真琴

Makoto.Fujiwara@triumf.ca

2015 年 2 月 26 日

1 はじめに

反水素 (\bar{H}) は、水素の「反物質」であり、反陽子 (\bar{p}) と陽電子 (e^+) の束縛系である。場の理論においてもっとも基本的な対称性の一つである CPT (荷電共役・空間反転・時間反転) 対称性が保存しているとする、その質量やエネルギー準位は水素と厳密に同じになる。

この「反物質」を用いた実験が、現在 CERN の反陽子減速器 (AD; Antiproton Decelerator) にて行われている。本年いよいよレーザーやマイクロ波を用いた精密分光が開始されるということで、ますます関心が高まっている。

本稿では、反水素研究の現状について、CERN における ALPHA (Antihydrogen Laser PHysics Apparatus) 実験を中心に解説する。ALPHA-1 として 2012 年の Run までに得られた結果と、装置を刷新し ALPHA-2 として新たに 2014 年の Run で得られた結果を紹介し、今後の展望について言及し、全体のまとめを述べる。ALPHA 実験の初期の状況については [1] を、ALPHA 以外の実験に関しては総説 [2] などを参照されたい。

2 反水素を用いた CPT 対称性の精密検証

2.1 CPT 対称性の検証

反水素を用いた実験の目的は、CPT 対称性の精密検証である。CPT 対称性は、CPT 定理 [3] において保証されており、ほかの対称性とは一線を画す。それは、定理の前提が、ローレンツ不変性、ユニタリティ、局所性、スピン統計などの基本的なものだけだからである。そのため、CPT 対称性の検証は、局所場の理論自体という、物理学の根本原理の検証となる [4]。低エネルギーにおいて場の量子論は著しい成功を収めており、CPT 対称性が破れている可能性は非常に小さい。しかし、プランクスケールでは破れていないとは限らない。量子重力理論などでは自然に CPT 対称性を

破る可能性があり [5,6]、CPT 対称性の検証はプランクスケールの物理を探る重要なプローブである。

反水素を使った CPT 対称性の検証は、エネルギー準位を水素と比較することによって行う。水素の 1S-2S 分光や基底状態の超微細構造が、それぞれ 4.5×10^{-15} [7,8]、 7.0×10^{-13} [9] という驚異的な精度で測定されている。反水素による CPT 検証の最大の利点は、反水素でこれらのエネルギー準位を精密測定し、水素と比較することで、モデルに拠らない、非常に高い精度での検証が可能になることである。

CPT 対称性の検証ではしばしば、Colladay と Kostelecký によって提唱された、ローレンツ不変性・CPT 対称性を破る有効場の理論 (SME; Standard-Model Extension) [10] が用いられる。SME は標準理論と一般相対論を包含し、ローレンツ不変性・CPT 対称性を破るすべての可能な項がラグランジアンに含まれている。現在のところ CPT 対称性の破れは発見されていないので、各種実験結果はこれらの項の係数に対する制限として解釈される [11]。SME に拠れば、仮に反水素で水素と同様の精度での測定ができた場合、プランクスケールでの破れを探索するのに十分な感度がある。反粒子を用いた CPT 対称性の検証としてはほかに、中性 K 中間子やニュートリノ、反陽子を用いた実験などがあるが、反水素による精密検証はこれらとは相補的かつ重要な役割を果たす。なお、SME では物質での精密測定などからも制限がつけられている。

2.2 反陽子減速器 (AD)

「反物質」を用いた研究は、世界で唯一 AD においてのみ可能である。というのも、反水素生成に必要な低エネルギーの反陽子を供給できる施設が、AD のみだからである。最初の反水素原子の生成は、1995 年に AD の前身である

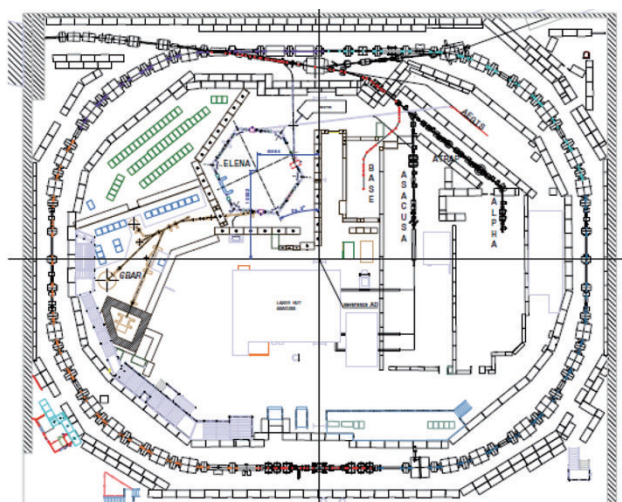
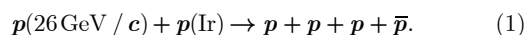


図 1 反陽子減速器 (AD) ビームライン [14]。現在建設中の ELENA や、GBAR のビームライン建設予定地も示されている。

CERN の LEAR 施設で報告され [12], 1997 年には Fermilab でも同様の報告がなされた [13]。しかしこれらの少数の反水素は相対論的であったため、精密分光には適さなかった。その後、LHC への資源集中のため LEAR は運転が停止されたが、1999 年に、日本を中心とした諸国の貢献により、反物質研究に特化した AD が建設されたのである。

AD ではまず、図 1 に示すように、PS (Proton Synchrotron) からくる 1 サイクルあたり $\sim 1.5 \times 10^{13}$ 個の運動量 $26 \text{ GeV}/c$ の陽子 (p) を、長さ 50 mm の Ir (イリジウム) ターゲット (水冷) に当て、以下の反応により、 \bar{p} を生成する。



この反応に必要なビームの最低運動エネルギーは 6 GeV 程度 (生成粒子を 1 GeV で取り出すとして) であるが、 \bar{p} の生成量を上げるため、 $26 \text{ GeV}/c$ のビームを用いている [2]。ここで生成された \bar{p} は電磁ホーンによって収束され、 $\sim 5 \times 10^7$ 個、運動量 $3.57 \text{ GeV}/c$ 、横方向エミッタンス $\sim 200 \pi \text{ mm mrad}$ 、運動量拡がり $\Delta p/p \sim 6\%$ の \bar{p} となって減速リングに入射される。ここからさらに図 2 のように、2 度の確率冷却 (Stochastic cooling), 2 度の電子冷却 (Electron cooling) および各冷却間の減速を経て、最終的に $\sim 3 \times 10^7$ 個、運動量 $100 \text{ MeV}/c$ (運動エネルギー 5.3 MeV)、横方向エミッタンス $\sim 0.8 \pi \text{ mm mrad}$ 、運動量拡がり $\Delta p/p < 7 \times 10^{-5}$ の \bar{p} が、1 サイクルあたり得られる。1 サイクルは約 100 秒である。このビームは $100 - 200 \text{ ns}$ のバンチであり、速い取り出しで現在 6 つある実験のいずれかに供給される。

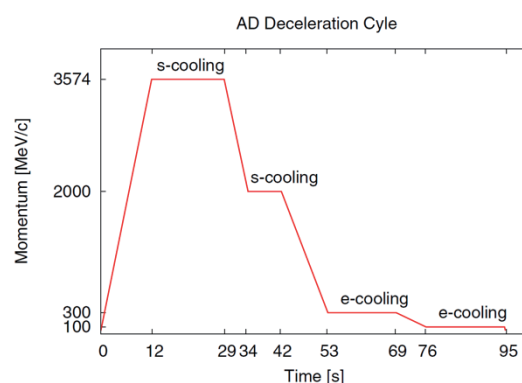


図 2 AD の時間構造 [15]。“s-cooling”は、確率冷却，“e-cooling”は、電子冷却。

ここからさらに数 keV までエネルギーを落とすため、2 種類の方法が使われている。一つは、ALPHA や ATRAP で用いられている、degrader 方式である。ステンレス鋼やアルミニウムの薄膜を通すことで、反陽子数として 99.9% を失ってしまい、わずか 0.1% しか得られないものの、 $\sim 10^4$ 個の数 keV の \bar{p} が得られる。もう一つは、ASACUSA (Antiproton Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons) で用いられている、RFQD (RadioFrequency Quadrupole Decelerator) である。これにより 25% の \bar{p} を、 $10 - 120 \text{ keV}$ の運動エネルギーで得ることが可能になっている [2]。なお、現在既に建設が進んでおり、2017 年にも物理運転開始が予定されている ELENA (Extra-Low ENergy Antiproton ring) では、新しいシンクロトロン減速器で運動量 $13.7 \text{ MeV}/c$ (運動エネルギー 100 keV) まで減速し、電子冷却を用いて 2.5×10^7 個、 $300 \text{ ns} \times 4$ バンチ、 $\Delta p/p \sim 10^{-4}$ 、横方向エミッタンス $3 \pi \text{ mm mrad}$ を達成する予定である [15]。これにより ALPHA や ATRAP では反陽子トラップ数が 100 倍になると期待されている。

3 ALPHA-1～反水素の定常的なトラップ～

3.1 ATHENA から ALPHA へ

2002 年、ALPHA の前身である ATHENA 実験において、非相対論的な (「冷たい’) 反水素の生成に成功し [16]、反水素の生成過程などに関する様々な研究が行われた。しかし、目的の CPT 検証に向け精密分光実験を行うためには、反水素を定常的にトラップすることが必要である。そこで新たに ALPHA コラボレーションを結成し、反水素のトラップ実験へと進んだのである [1]。ALPHA 実験は、現在 8 ヶ国、16 機関、約 50 名からなる国際共同実験で、藤原が ALPHA 全体の約 $1/3$ を占めるカナダグループの代表として、また石田は 2013 年より日本学術振興会海外特別研究員として参画している。ALPHA 初期の段階では、日本からは東大から早野氏、理研から山崎氏が参加されていた。

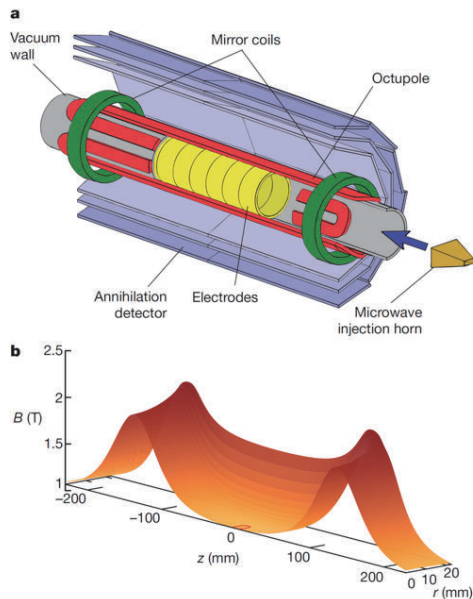


図3 ALPHA-1 実験装置 [17]。(a) 装置概略図 (ノンスケール)。図中、反陽子と陽電子を混ぜて反水素を作るための mixing trap 電極 (Electrodes, カラー:黄), 動径方向の磁場トラップを作るための八重極 (Octupole) 磁石 (カラー:赤, 図4), 軸方向の壁を作るための Mirror coils (カラー:緑), 反陽子消滅で生成した (おもに) 荷電 π 中間子を検出するための3層からなるシリコン検出器 (Annihilation detector, 図5), スピン反転実験を行うためマイクロ波を印加するホーン (Microwave injection horn) が描かれている。なお, 図には描かれていないが, 反陽子を捕獲するための反陽子 catching trap 電極が左に, 陽電子蓄積装置からの陽電子を捕獲するための positron trap 電極が右にある。また, ベースとなっている1Tの磁場は, シリコン検出器の外側にあるソレノイドコイルが生成している。(b) トラップ中心付近の磁場分布。軸方向は, トラップ中心を0にとっている。赤線は, トラップ中心から0.35mTの範囲 (後述のマイクロ波周波数にして10MHz) の領域を示しており, マイクロ波スピン反転実験では, 大体この内側にトラップされた反水素のみ, 共鳴することができる。

本稿では触れないが, 早野・山崎両氏は ASACUSA 実験において反物質研究をアクティブに展開されている。

第3節では, トラップに向けた ALPHA フェーズ1実験 (ここでは ALPHA-1 と呼ぶ) とその成果について解説し, 第4節で, いよいよ分光に向けて動きだした ALPHA-2 について解説する。

3.2 ALPHA-1 全体像

ALPHA-1 実験装置図を図3に示す。ALPHA-1 では一つのメイン超伝導ソレノイドの中に, 反陽子捕獲部・陽電子捕獲部・反水素トラップ部がある。荷電粒子のトラップには, ペニングトラップ (動径方向は強い静磁場に巻き付け, 軸方向は電場で壁を作る) を, 電気的中性な反水素のトラップには, 図3(b)で示したような磁場勾配によるトラップを用いる。磁場勾配でのトラップは, 磁気エネルギー



図4 ALPHA-1 八重極超伝導コイル写真 [18]

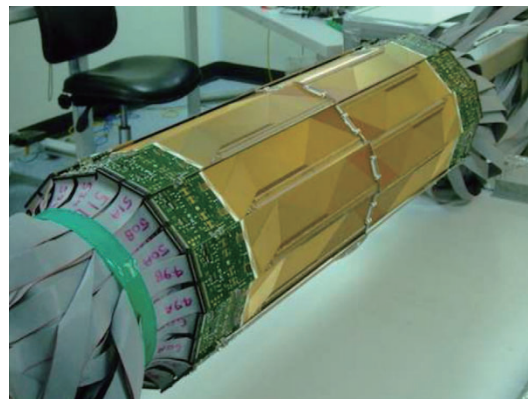


図5 ALPHA-1 シリコン飛跡検出器写真 [20]。中央の長方形部分 (カラー:金) に, マイクロストリップと読み出し部を繋ぐ導線が見える (シリコンウェハーとマイクロストリップはビーム軸側にあるので写真では見えない)。外側の長方形部 (カラー:緑) はオンボード読み出し回路, そこから延びるケーブル (灰色) で検出器外の DAQ システムへアナログ/デジタル信号を送る。

$-\mu \cdot B$ (ここで μ は反水素の磁気モーメント, B は磁場) を利用する。本実験では, 磁場極小部にトラップするため, 磁場が小さいほどエネルギーが小さくなる状態 (low-field seeking) のみがトラップされる。

基底状態の反水素では, 磁場トラップの深さは, 温度にしてわずかに $0.7(\text{Kelvin/Tesla}) \times \Delta B$ である。ここに ΔB は最大磁場と最小磁場の差を示す。トラップ効率を上げるためには, 磁場トラップをなるべく深くするとともに, 生成する反水素の温度をなるべく低くしなければならない。そこで ALPHA-1 では, 八重極コイル (図4) ・ミラーコイルに超伝導コイルを使用し, それぞれ 1100 A, 750 A を流し, $\Delta B = 0.8\text{T}$ の磁場トラップを作っている。なお, ここで八重極コイルを用いるのは, 大きな磁場勾配によって磁場が不均一になることによる, プラズマの不安定化を防ぐためである。これらのコイルの冷却には, 4.2 K 液体ヘリウムを使用している。さらに, 液体ヘリウムで冷却された真空槽壁に電極を一部熱接触させ, 電極温度 8 K を達成している。

また, 生成された反水素は, 残留ガスと消滅してしまうため, 超高真空を得ることが必要である。残留ガスは主として室温部分の真空容器表面からの放出ガスである。これは 150 l/s のイオンポンプで真空引きし, 室温部分の真空度 10^{-10} mbar (10^{-8} Pa) を達成することで抑えている。トラップ部については, 電極温度 8 K を達成しているので, 実効的に放出ガスがなく, むしろ強力なクライオポンプと

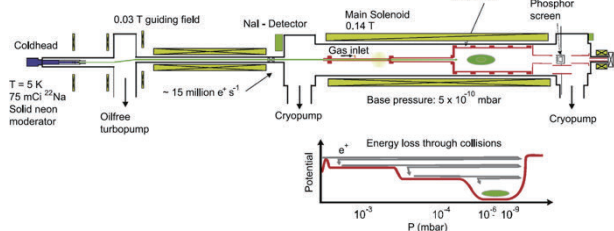


図6 ALPHA-1 陽電子蓄積装置 [21]。左端、冷凍機の先に陽電子線源 (^{22}Na) があり、陽電子は固体ネオンモデレータによって減速され、右の蓄積装置に送られる。蓄積装置中には少量の窒素ガスを流しており、電極 (上図カラー:赤) を用いて下図のような静電ポテンシャルを掛けている。ここで下図の横軸がガス圧になっているが、これは各位置におけるガス圧を示しており、軸方向の位置は上図と同じである。灰色の矢印は、陽電子が窒素ガスと衝突しながらエネルギーを失い、静電ポテンシャル中にトラップされていく様子を示している。“Phosphor screen” は陽電子のプロファイルを調べるための蛍光板であり、真空窓外にある CCD カメラで撮影する。反水素生成に用いる際はこのスクリーンは上がっており、ビームライン (カラー:赤) を一直線につなげる。

して働いている。トラップ部の真空度は現在利用できる真空計では測定できないが、反陽子の寿命から $10^{-13} - 10^{-14}$ mbar であると推測されている [19]。

トラップ壁で消滅した反水素、反陽子の検出には、シリコンストリップ飛跡検出器 (図5) を用いる。メインソレノイドのボア内にあり、トラップの真空槽や低温槽の外側にある。1モジュールあたり 512 ストリップ、全 60 モジュールで計 30720 ストリップで構成されている。ヒット位置分解能は、動径および方位角方向が $65 \mu\text{m}$ 、軸方向が $253 \mu\text{m}$ である。ALPHA-1 では、30195 ストリップ (98.3%) が正常に稼動した (正常稼動しなかったもののうち 512 ストリップは、1モジュールでのケーブル接続不良による)。

3.3 ALPHA-1 における反水素生成

まず、AD から来た反陽子を反陽子捕獲部に捕獲し、反陽子プラズマの大きさをコントロールするとともに、電子を使った冷却を行う。反陽子を入射する前に予め電子をトラップしておき、反陽子はトラップ入射後、電子とのクーロン相互作用によって運動エネルギーを電子に渡し、冷却される。電子自身は、強磁場中でシンクロトロン放射によって自発的に冷却され、トラップ壁と熱平衡になる。この電子は、反陽子を反水素トラップ部に送る前に、 ~ 100 ns のパルス電場によって、軸方向のトラップ壁を短時間取り除くことで除去される (電子の質量が軽いためすぐにトラップ領域から離れることを利用)。

一方、それとは独立に、陽電子は図6に示した陽電子蓄積装置に蓄積される。ALPHA ではいわゆる Surko 型と呼

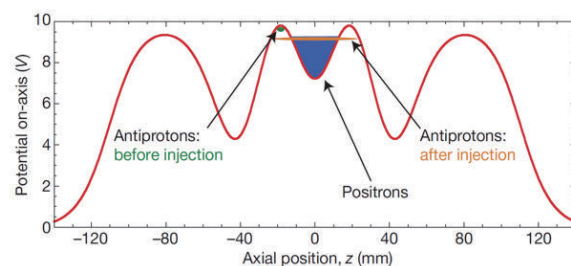
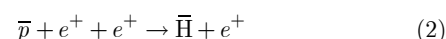


図7 ALPHA-1 反水素トラップ部の静電ポテンシャル [22]。実線で (カラー:赤) 示したのがポテンシャルで、陽電子は中央 (カラー:青) 部にトラップされ、反陽子は中央左 (カラー:緑) にトラップされる。その後、“autoresonance”によって反陽子の軸方向プラズマ運動を励起し、徐々に反陽子の運動エネルギーを上げ、陽電子と混ぜる (その際の反陽子の分布が“after injection” (カラー:橙) で示されている)。

ばれるものを使用している。窒素中で約 30%の陽電子を寿命 3–4 分にわたり減速することができる。窒素ガスは 1200 l/s のクライオポンプ 2 台で常時引いており、陽電子を送り出す際は、ガスを止めて真空引きし (25 秒間で 10^{-8} mbar まで引く)、静電トラップ右壁を取り除き、図右端のコイルに強磁場 (1 T) をかける。こうして送られた陽電子は、メインソレノイド中の陽電子捕獲部に再捕獲される。その後陽電子はシンクロトロン放射によって自発的に冷却される。

そして、反陽子捕獲部に捕獲された反陽子が反水素トラップ部に移動され、図7に示したような静電ポテンシャル中にトラップされる。このとき反陽子の温度は $200 - 400$ K であるが、その後反陽子は蒸発冷却 (evaporative cooling) によって 40 K まで冷却される (詳細は [23])。こうして反陽子をトラップした隣に、陽電子捕獲部から陽電子を移動してトラップした後、磁場トラップ用のコイル (八重極・ミラー) に電流を流し、磁場トラップを形成する。プラズマ操作中、トラップ磁場は邪魔であり、均一な磁場が要求されるため、混合の直前に磁場トラップを形成するのである。

それから、反陽子の運動エネルギーを、新たに開発した “autoresonance” という方法を用いて緩やかに上昇させる (詳細は [24])。これにより、必要最小の運動エネルギーで反陽子を陽電子と反応させることができる。反水素の生成反応は、



のような三体反応であると考えられる [25]ので、プラズマを小さくし密度を上げることも重要なのである。プラズマの大きさを制御する方法については [26]を参照されたい。

3.4 ALPHA-1 における主な成果

ALPHA-1 において得られた主な成果について紹介する。

3.4.1 世界初の反水素トラップ (2010年)

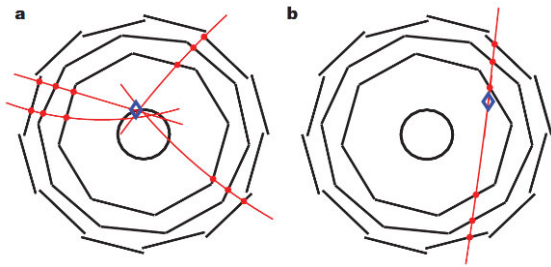


図8 ALPHA-1における反水素消滅反応候補イベントディスプレイ (a) と、宇宙線イベントディスプレイ (b) [22]。軸方向から見たもので、中央の円はトラップ壁を、直線は各シリコン検出器を、ドット (カラー:赤) はヒット位置を、実線 (カラー:赤) は再構成された粒子飛跡を、菱形 (カラー:青) は再構成されたバーテックスを示す。反陽子消滅反応では、(a) のように多数の飛跡が見られ、バーテックスはトラップ壁付近になるが、宇宙線イベントでは (b) のように飛跡の数が少なく、バーテックスがトラップ壁と無関係になる。

ALPHA-1の最初の目的は反水素のトラップであったわけだが、これは2010年に達成された [22]。この際、反陽子と陽電子の混合は1秒間行われ、次いで計4回、500 V/m のパルス電場によって荷電粒子を除去した。これには172ms かかった。その後、トラップ磁場用のコイルをクエンチさせることで、磁場トラップを除去し、トラップされた反水素があったかどうかを調べた。このクエンチの時間スケールは ~ 10 msである。もしトラップされた反水素があった場合には、反水素はクエンチ直後にトラップから解放され電極に衝突するので、反水素中の反陽子の消滅反応 (図8) が検出されるはずである。

2006年に実験を開始したALPHA-1実験であるが、ATRAPとの激しい競争の末、果たして2010年に反水素消滅反応は検出されたのであった。図9に、クエンチ後に検出された消滅反応 (候補) を、時間および軸方向位置 (z) に対してプロットしたものを示す。消滅イベント選択条件の決定はブラインド解析に基づく。荷電粒子を除去するため、172ms間のパルス電場を既に掛けていたので、本来単体の反陽子は残っていないはずであるが、一つひとつのイベントディスプレイのみでは、反水素の消滅なのか反陽子の消滅なのか区別できない (なお、陽電子の対消滅はALPHAでは検出できない)。そこで、もしミラーコイルによるミラー効果で反陽子がトラップされてしまい、残留していたとしても、反水素と区別できるよう、クエンチ直前から静電バイアスをトラップに印加した。バイアスの大きさは500 V/mであり、反陽子が左 (z 負方向, 反陽子ビーム側) に動くようかけた場合 (「左バイアス」), 反陽子が右 (z 正方向, 陽電子蓄積装置側) に動くようかけた場合 (「右バイアス」), バイアスをかけなかった場合 (「バイアスなし」) の

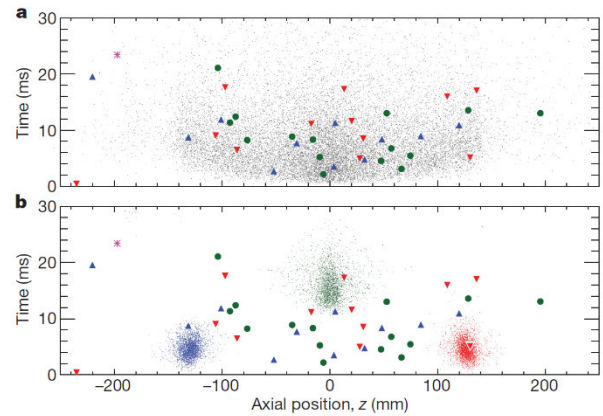


図9 ALPHA-1で検出された反水素消滅候補イベント [22]。横軸は再構成されたバーテックスのトラップ軸方向位置を、トラップ中心に対する相対位置で示したものである。縦軸はトラップ磁場コイルをクエンチしてから時間。大きなマーカーについて、丸 (緑) は「バイアスなし」、上向き三角 (青) は「左バイアス」、下向き三角 (赤) は「右バイアス」、スター (紫) は意図的に陽電子を高温にした際のイベントを示す (上下図共通)。また、小さなドットで示されたのはMCシミュレーションであり、上図はトラップされた反水素について期待される分布を、下図 (左から青, 緑, 赤。色はデータと共通で、バイアス条件を示す) は、ミラーコイルに閉じ込められた反陽子が消滅した際に期待される分布を示す。バイアス条件については本文参照。

三つのバイアス条件で測定した。また、意図的に高温の陽電子と混合し、反水素ができないようにした場合も測定した。反水素の場合、バイアス条件に無関係にイベントが見られるはずであり、反陽子の場合、バイアス条件によってイベント分布が偏るはずである (図9のシミュレーション)。また、高温の陽電子では反水素ができないため、パルス電場で反陽子が除去できているとすると、イベントは観測されないはずである。

図9に示してあるように、データは反水素とコンシステントであった。これにより、少なくとも172ms間、世界で初めて反水素をトラップしたことが確認されたのである。なお、このときの計335試行 (反陽子と陽電子を混ぜてトラップ磁場を作り、クエンチするまで) でのイベントレートは、1試行あたり0.11イベント (計38イベント) であった。また、高温陽電子 (計246試行) で1イベント観測されているが、これは宇宙線を誤って反陽子消滅イベントと識別してしまう期待値 (0.46 ± 0.01 イベント) と無矛盾であった。

実のところ、既に2009年のデータで、212回の試行において6事象の反水素候補イベントが、宇宙線バックグラウンドに対して 5.6σ の有意性で観測されていた。しかし、前述のミラー捕獲された反陽子によるバックグラウンドを (シミュレーションによるとほとんど有り得ないと見られたが) 実験的に完全に排除することができなかった。静電バイア

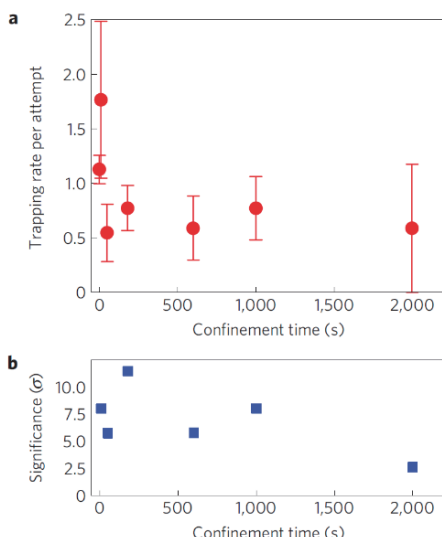


図10 ALPHA-1における反水素の閉じ込め [30]。(a) 1試行あたりトラップされた反水素数を、閉じ込め時間の関数として示したもの。誤差棒は統計のみであり、検出効率の誤差は含んでいない。また、単にイベント数の平方根となっている。(b) 有意水準を、正規分布における標準偏差に変換して示したもの(片側検定)。これは(a)図から直接求められたのではなく、ポアソン分布を仮定した最尤法に基づいて計算している。また、閉じ込め0.4秒のデータは、 $\gg 20\sigma$ なのでプロットしていない。

スによる測定を思いついて、この反陽子バックグラウンドを完全排除するまでに2年近くの努力を要したのである。なお、競合するATRAP実験は粒子飛跡検出器をもたずバックグラウンドの排除に苦労しているようである。ALPHAによる積極的な素粒子物理的実験手法の採用がこれまでのところ成功の鍵となっていると考えられる。

3.4.2 1000秒間のトラップ(2011年)

さて、このように2010年のトラップでは172ms間トラップに閉じ込めることに成功したが、これは精密分光実験を行うにはいささか短い。普通の原子では、ALPHA-1程度の低温のトラップ内では10—30分にわたってトラップできることが既知であった[27—29]が、反水素の場合は、残留ガスとの消滅で失われることもあり、自明ではなかった。そこで、どのくらいの時間閉じ込めが可能であるかを測定した[30]。

図10に、トラップされた反水素の数(検出されたイベント数と、再構成および識別も含めた検出効率 0.57 ± 0.06 によって計算された値)を、閉じ込め時間の関数としてプロットしたものを示す。ここで閉じ込め時間とは、荷電粒子除去のパルス電場が印加されてから、トラップ磁場コイルをクエンチするまでの時間である。

この結果、1000秒の閉じ込めで 8.0σ の有意なイベントが見られ(宇宙線バックグラウンドのみという仮説をp-value 10^{-15} で棄却)、2000秒でも 2.6σ (p-value 4×10^{-3})で有

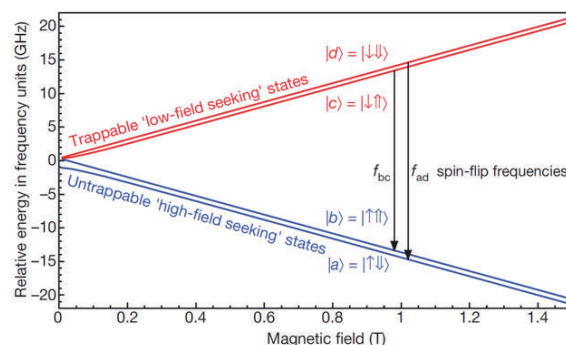


図11 静磁場中における基底状態反水素のエネルギー準位図(CPT対称性を仮定)[17]。一重矢印は陽電子のスピンを、二重矢印は反陽子のスピンを示す。また、エネルギー準位間を結ぶ矢印は、ALPHA-1で可能な遷移を示す。

意なイベントが観測された。これは精密分光測定には十分であり、また重力測定という可能性も視野に入る値である。このNature Physics誌の表紙を飾った論文は、藤原が解析、執筆を担当した。

3.4.3 マイクロ波による反水素スピン反転(2012年)

前述のように、ALPHA-1実験は反水素捕獲の実証を目的として設計されたが、カナダグループは当初から反水素のマイクロ波分光を提案、主導してきた[31]。1000秒もの間反水素をトラップできると判明し、いよいよマイクロ波による反水素基底状態におけるゼーマン遷移(陽電子のスピン反転)実験が可能となった[17]。

図11に、静磁場中における基底状態反水素のエネルギー準位を示す。ALPHAのような磁気トラップでは‘low-field seeking’な状態のみがトラップされるが、マイクロ波により $|c\rangle \rightarrow |b\rangle$ (周波数 f_{bc})および $|d\rangle \rightarrow |a\rangle$ (周波数 f_{ad})の遷移を誘導すると、トラップできない‘high-field seeking’になるため、トラップから抜け出し、電極で消滅することを利用して測定する。この遷移が確認できれば、基底状態の反水素をトラップしている実験的証拠となる。また、この周波数の差が基底状態の超微細構造(1420.4MHz)に対応するため、この測定は超微細構造精密測定につながる実験でもある。

図12に、反水素トラップ磁場の不均一性を考慮したゼーマン遷移曲線を示す。マイクロ波周波数は、最初の15秒間で低いほうの掃引 f_{bc} を、その後の15秒間で高いほうの掃引 f_{ad} をする形で、計30秒間で1セット、これを6セット繰り返し、180秒間掃引した。掃引後、トラップコイルをクエンチし生き残った反水素の数を測定した。

ALPHA-1装置はもともと設計段階ではマイクロ波分光に最適化されていなかったため、この実験を遂行するには様々な開発を行う必要があった。たとえばトラップ中*in situ*でのマイクロ波や磁場のキャラクタライゼーションは、サイ

クロトロン共鳴による電子プラズマの共同加熱現象を利用するという独自の手法を開発した [32]。

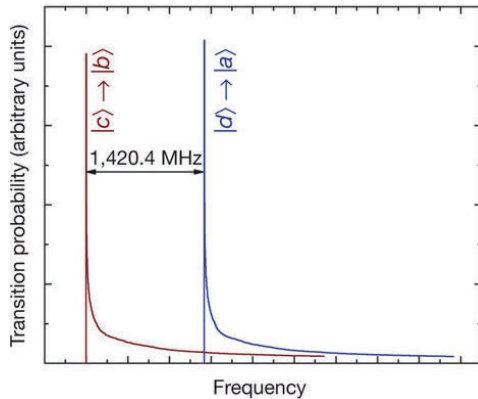


図 12 ゼーマン遷移曲線 [17]。実験は、磁場はトラップ中心の極小点の磁場値で $B_{\min}^{\text{axis}} = B^A = 1.0322(3)\text{T}$ および $B_{\min}^{\text{axis}} = B^B = 1.0358(3)\text{T}$ の 2 点、周波数は $(f_{bc}^A, f_{ad}^A) = (28.2755, 29.6959)\text{GHz}$ および $(f_{bc}^B, f_{ad}^B) = (28.3755, 29.7959)\text{GHz}$ の 2 点で行った。このほかマイクロ波の周波数を共鳴ピークから -100MHz ずらした off-resonance 測定、またマイクロ波を印加しない測定も行った。印加したマイクロ波パワーは 700mW であった。

この測定の解析方法は 2 通り考えられる。一つ目は掃引後のクエンチ時における反水素検出数を調べる方法である。この場合、遷移が起ると反水素がトラップから放出され、クエンチ時には検出されなくなるので、‘disappearance mode’の解析と呼んでいる。もう一つは掃引に同期した消滅現象の数を調べる方法である。この場合、遷移が起ると検出される反水素の数が増えるので、‘appearance mode’の解析と呼んでいる。

Disappearance mode 解析の結果を、表 1 に示す。On-resonance では、off-resonance に比べ反水素検出率が明らかに減少している（この差が統計的ふるつきである確率は 1.0×10^{-5} ）。このことは、マイクロ波による反水素中の陽電子スピン反転遷移が起こったことを強く支持する。

しかしながら、世界で初めての観測を行うのに disappearance だけでは証拠が弱いであろう。そのため、当初から appearance mode の検出も目標としていた。だが、測定時間を $\sim 30\text{ms}$ に絞って宇宙線バックグラウンドに対する S/N を高められる disappearance mode とは違い、appearance は 180 秒もの間、連続測定が必要で S/N が格段

表 1 Disappearance mode 解析結果のまとめ [17]

条件	試行数	反水素検出数	反水素検出率
On-resonance	103	2	0.02 ± 0.01
Off-resonance	110	23	0.21 ± 0.04
マイクロ波なし	100	40	0.40 ± 0.06

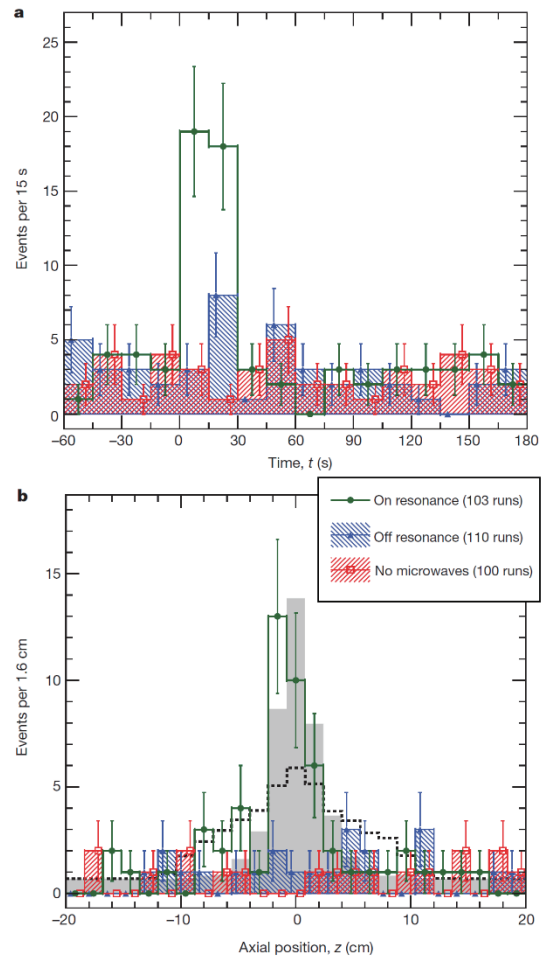


図 13 マイクロ波掃引に同期した、反水素消滅候補事象の分布 [17]。(a) は事象数を掃引開始からの時間の関数として、(b) は軸方向位置の関数として示している。(a) で、宇宙線によるバックグラウンドの期待値は、1 試行あたり各ビン 0.026 ± 0.005 イベントである。(b) のうち、灰色のヒストグラムは、スピン反転した反水素がトラップから抜け出した場合のシミュレーション、破線はトラップされた反水素が残留ガスと消滅した場合のシミュレーションである。これらのシミュレーションは、ヒストグラムの面積が on-resonance と等しくなるよう規格化してある。

に悪い。そのため、われわれは大量の統計を貯める準備をしていた。しかし、不運にも CERN の加速器が故障し、この年のビームタイムが途中で終了してしまっただけで、かなり、がっかりした事態であったが、幸いにも、multivariate analysis を駆使することにより、S/N を約 10 倍改善することができ、appearance mode の検出に成功した。この解析の結果を、図 13 に示す。マイクロ波を印加しはじめてからの 30 秒間に集中して（これはシミュレーションと合致する）、on-resonance において off-resonance と比べて有意に (p-value 2.8×10^{-5}) 多いイベントが観測され、反水素スピン反転遷移が起こったことを直接的に支持する結果が得られた。

なお、disappearance mode で off-resonance の反水素検出率が、マイクロ波なしに比べて有意に (p-value 6×10^{-3})

減っていることによりかなり頭を悩ました (表 1)。しかし、実は off-resonance といっても $|c\rangle \rightarrow |b\rangle$ 遷移曲線のゼロでない長いテールを拾っている可能性があると思いつき、実際に遷移確率を計算してみると、数十秒で遷移することが予測されることがわかった。事実、appearance mode でも、off-resonance でマイクロ波なしに比べて p-value 5.6×10^{-2} で多くの消滅イベントが見られる。これも 0–15 秒でなく、 $|c\rangle \rightarrow |b\rangle$ 遷移のテールを拾いうる 15–30 秒のほうで消滅イベントが見られることから、やはり $|c\rangle \rightarrow |b\rangle$ 遷移のテールであると考えられる。

この解析では当然、考え得るあらゆるバックグラウンドを検討した。特にスピン反転以外に、マイクロ波によって反水素の検出数が増減しうるものとして、たとえばトラップ電極が加熱され、放出ガスが発生してそのガスと反水素が消滅する過程を心配した。実際、フルパワー (700 mW) での 180 秒間のマイクロ波印加では、電極温度が 8 K から 11 K に上昇している。しかしこれは、基本的には on-resonance, off-resonance で変化しないはずであり、また図 13(b) に示したように、軸方向の分布は、残留ガスとの消滅よりも、トラップから抜け出した反水素の消滅であることを支持している。さらに、マイクロ波のパワーを変えて実験を行ったところ、700 mW の 1/16 のパワーでもフルパワーと矛盾しない結果が得られた。これらによって、放出ガスによって反水素検出数が著しく変化している可能性は否定できる。

本測定結果から、反水素基底状態の超微細構造の値として、

$$\Delta\nu_{\text{HFS}} = 1420 \pm 85 \text{ MHz} (6\%) \quad (3)$$

が得られる [33]。CPT 対称性の検証としては不十分な精度であるが、世界で初めて反水素のエネルギー準位が測定されたということは、大変意義深い。Nature 誌のエディターからは「歴史的」との評価を得た。実験的な重要性としては、平均して 1 試行あたり 1 個程度という極めて少数の反水素を用いてでも、分光測定が可能であることを実証したことであろう。カナダグループとしては、歴史的意義よりも何も、実験が最終的にうまくいったことに、とにかくほっとした。

3.4.4 反水素の電荷に対する実験的制限 (2014 年)

ALPHA-1 最後の結果として、反水素の電荷に対する実験的制限を初めて与えた [34]。CPT 対称性が保存していれば、反水素も水素と同様に極めて中性であるはずである (水素原子に関して直接検証した実験は見あたらないが、ヘリウム、水素分子、 SF_6 などにおいて $10^{-21}e$ (e は電気素量) 以下の電荷しか持たないことが分かっている [35])。この測定は ATHENA 時代から温めていたアイデアを 10 年越しで実現したものである。

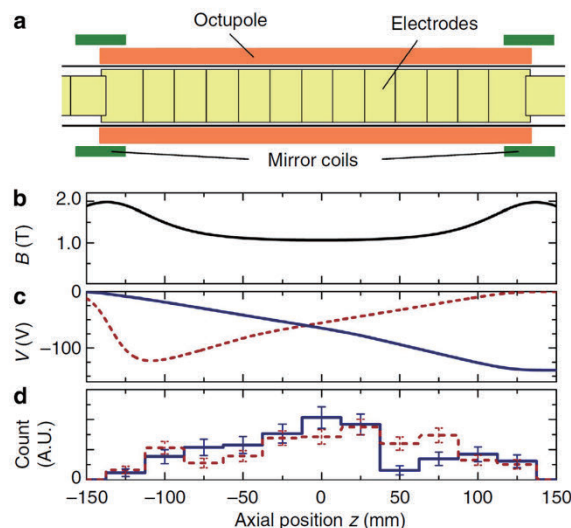


図 14 反水素電荷に対する制限を与える実験の概要図 [34]。横軸はすべての図に共通。(a) ALPHA-1 実験装置における反水素トラップ電極およびトラップ磁場コイル。(b) 軸上の静磁場分布。(c) 「右バイアス」(破線, カラー:赤), 「左バイアス」(実線, カラー:青) 条件における軸上の静電場分布。(d) 各バイアス条件における消滅事象分布。線種は(c)に対応。誤差棒は統計誤差を示している。

図 14 に、実験の概要を示す。図 14(c) に示したようなバイアスは、既に第 3.4.1 節で述べたように、反陽子を確実にトラップ領域から追い出すために使用している。しかし、このバイアスによって反水素がトラップ領域から出ないことを利用して、反水素の電荷に制限をつけることが可能なのである。

図 14(d) には、計 ~1300 回の試行で得られた、386 個のトラップされた反水素候補事象の分布が示してある。これから実際に電荷への制限をつけるには、シミュレーションを用いる必要がある。ここではその詳細は割愛させていただき、結果だけ述べると、反水素の電荷 Q_e に対し、68% CL で

$$Q = (-1.3 \pm 1.1(\text{stat.}) \pm 0.4(\text{syst.})) \times 10^{-8} \quad (4)$$

という制限を得ることができた [34]。反陽子の電荷は ASACUSA 実験により良く知られている [2] ので、この結果は陽電子の電荷に対する新しい制限と解釈することができる。

4 ALPHA-2

～レーザー分光に向けたアップグレード～

4.1 ALPHA-2 の全体像

ALPHA-1 実験において、反水素を定常的にトラップすることに成功し、いよいよレーザーやマイクロ波を用いた精密分光を目指した ALPHA-2 プロジェクトがスタートした。ALPHA-2 の反陽子捕獲・反水素トラップ装置図を図 15 に、写真を図 16 に示す。ALPHA-1 は分光に適した設計になっ

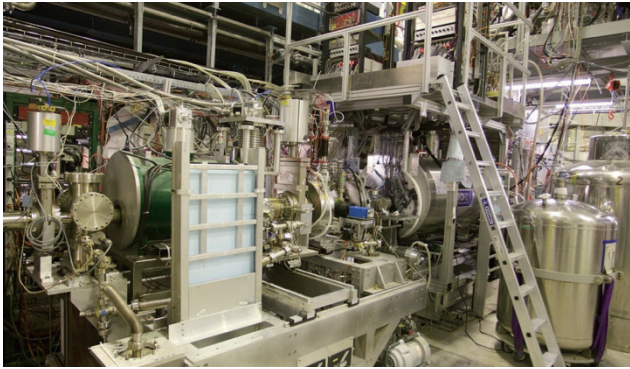


図 16 ALPHA-2 実験装置写真 (反陽子ビーム側から)。左に半分ほど見えている円柱状の磁石 (カラーでは緑) が、Catching Trap の超伝導ソレノイド。中央右奥に見えているのは Atom Trap の超伝導ソレノイド。右にあるのは 1000 L 液体ヘリウムデュワー。Catching Trap の手前にはプラスチックシンチレータ、Atom Trap の上には Si 検出器読み出しのための DAQ ラックである。

ていなかったため、ALPHA-2 では、全体的に大幅な装置の刷新を行った。以下で各部分について簡単に説明する。

4.2 Catching Trap

ALPHA-1 では一つの超伝導ソレノイドの中に、反陽子捕獲部・陽電子捕獲部・反水素トラップ部が一緒になっていたが、ALPHA-2 では、反陽子捕獲部を独立させた (Catching Trap)。図 15 の左半分、図 16 の超伝導ソレノイドとその周辺)。これにより、AD に同期した反陽子の捕獲と、陽電子や反水素のサイクルを独立して行うことができる。そのため、たとえば AD からの反陽子を次々に減速・捕獲し、Catching Trap 内に蓄積しつつ、必要に応じて反水素トラップ部に送るといった操作が可能になる。

Catching Trap は、2012 年 6 月に初めて反陽子を捕獲した後、全コミッショニングを終えた。2014 年の Run では反水素トラップに反陽子を送るルーチン作業をしっかりとこなした。

4.3 陽電子線源

ALPHA-2 ではより多くの陽電子を使用できるように、陽電子源を刷新した。図 17 に、陽電子源と陽電子蓄積装置の写真を示す。八角柱形の容器の中に、陽電子線源 (^{22}Na , 1.73GBq@06/2012) および鉛シールドが入っている。これをネオン (固体) デグラダによって減速し、陽電子蓄積装置に送っている。現在 ALPHA-2 の陽電子開発は、イギリスチームとともに、石田が中心的役割を果たしている。

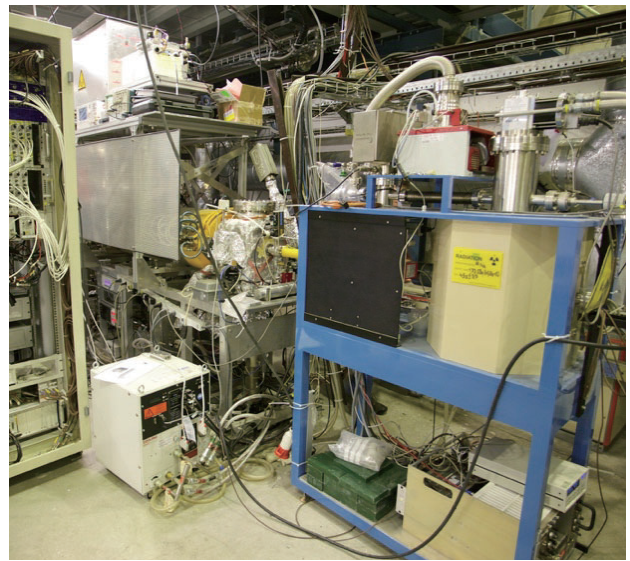


図 17 ALPHA-2 実験装置写真 (陽電子線源側から)。右半分が陽電子線源で、左が陽電子蓄積装置。その上に載っているのは大強度マイクロ波装置。

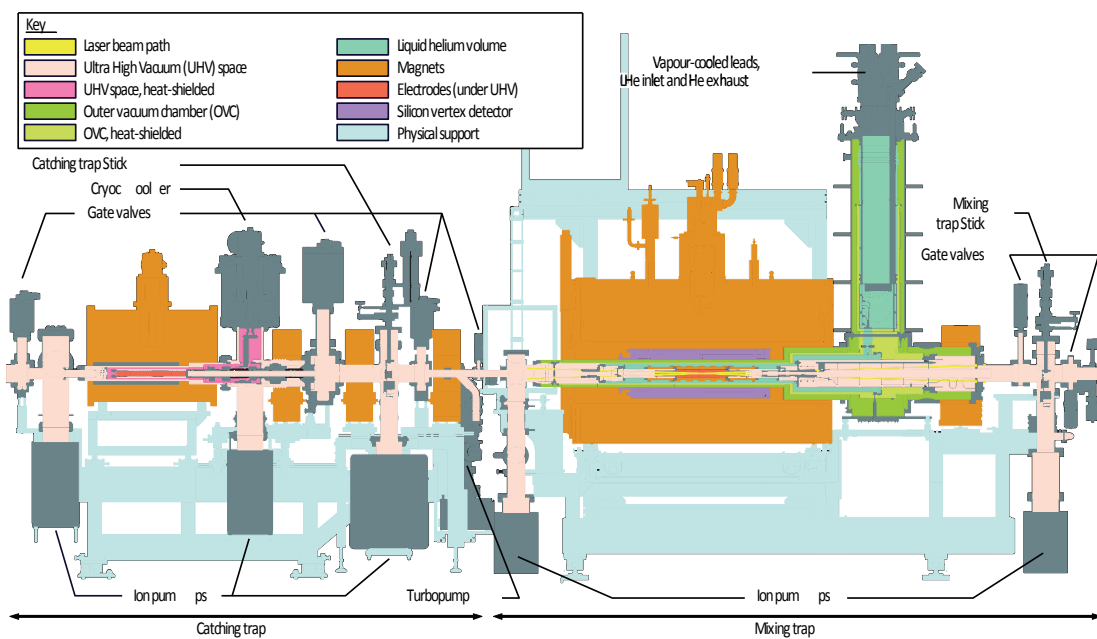


図 15 ALPHA-2 実験装置全体図。左半分が反陽子を捕獲・蓄積するための Catching Trap で、右半分が、反陽子と陽電子を混合し、反水素を生成・トラップするための Mixing Trap (Atom Trap) である。図の右外に、陽電子蓄積装置、陽電子線源がある。



図 18 ALPHA-2 Atom Trap 写真。左が反陽子ビーム側，右が陽電子線源側である。

4.4 Atom Trap

メインのトラップである，反水素トラップについても，超伝導ソレノイドとともに刷新した。図 18 に，トラップの写真を示す。Catching Trap によって捕獲した反陽子を受け取る部分と，陽電子蓄積装置からの陽電子を受け取る部分，それらを混ぜる部分の三つに分かれている。

特に重要なのが，図 19 に示したように，レーザーを入射するための道を通していることである。トラップした反水素とレーザーが効率よく反応できるよう，浅い角度で入射している。トラップ内には，レーザーキャビティを構成するミラー，ミラーを調節するピエゾ素子も設置している。また，マイクロ波を効率よく伝送するための導波管も，トラップ入り口まで設置してある。

このトラップは超高真空中にあり，かつ 4.2 K の液体ヘリウムで冷却されている。真空フランジ部にはレーザー窓やマイクロ波窓が取り付けられている。また，外部からの熱流入を抑える工夫も随所に施されている。

4.5 シリコン飛跡検出器

ALPHA-2 では，ALPHA-1 と同様，3 層からなるシリコンストリップ飛跡検出器を用いている。メインソレノイド

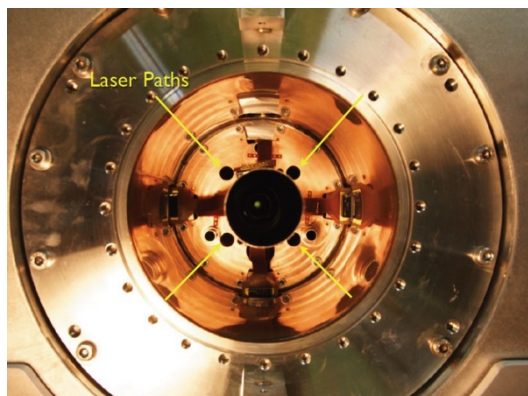


図 19 ALPHA-2 Atom Trap レーザーパス写真。超伝導磁石ボア内の真空装置内に設置し，陽電子線源側から見たもの。四つのレーザーパスが通してある。

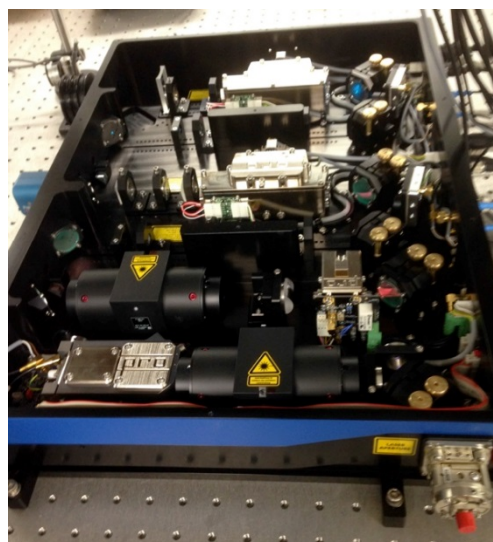


図 20 ALPHA-2 で使用する 243nm レーザー

のボア径が大きくなったため，12 モジュールを追加し，全 72 モジュールとなった。これまでのところ，全モジュールが正常に作動している。

4.6 レーザー

本実験で用いる主なレーザーは，Toptica 社製の 243nm レーザー (1S-2S の二光子遷移用) である (図 20)。ガス・液体は用いず，固体のみで作成されており，四次高調波を使用する。出力は～50mW 以上である。Atom Trap のキャビティは低温中でもフィネス～600 を達成している。

5 2014 年の結果と今後の展望

5.1 反水素のトラップ

2014 年の AD のビームタイムは，9 月中旬から 12 月上旬まで 1 実験あたり 8 週間 (1 日あたり 8 時間)+ α と，例年より大幅に短かった。刷新した ALPHA-2 の装置で，ALPHA-1 と同様に定常的に反水素をトラップできることを確認するのが，2014 年の一つ目の大きな目標であった。複雑なシステムであり，コミッショニングに時間がかかることが予想されていたが，わずか 6 週間のビームタイムで，最初の反水素トラップ候補事象を得ることに成功した。これは ALPHA-1 でコミッショニングからトラップ成功まで 5 年かかったことと比べるとわれわれ自身が驚くほど短い。

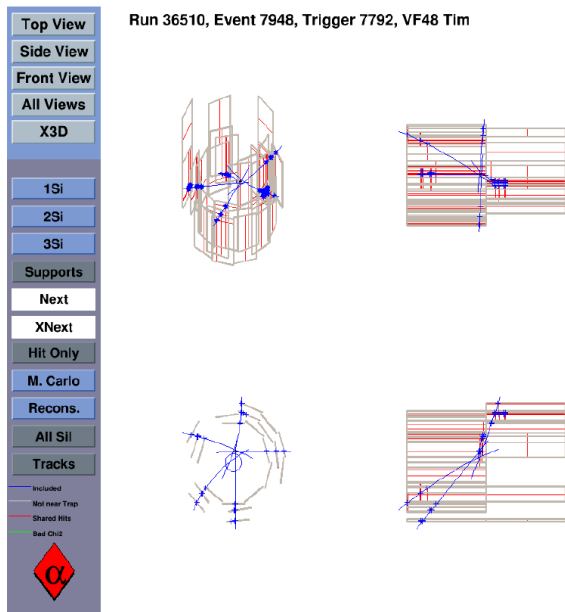


図21 2014年のRunで得られた、典型的なイベントディスプレイ。四つの図は、Si検出器を様々な角度から見たもの。

図21に、典型的な反水素トラップ候補イベントディスプレイを示す。左下の図が軸方向から見たものであり、中心の小さな円がトラップ壁である。バーテックスを見ると壁付近で消滅したイベントであると判断できる。また、5本のトラックがあり、宇宙線バックグラウンドである確率は極めて小さい。2014年の段階ではALPHA-1と同様、トラップ磁場を形成している超伝導磁石をクエンチさせてトラップを瞬時に($\tau \approx 10$ ms)消し去り、それに同期してトラップ壁と消滅するイベントを、トラップされた反水素と判断している。この同期時間幅は30msである。

ここからの数字はPreliminaryであるが、宇宙線を誤って反水素と認識してしまうレートは0.06Hz、IDまで含めた反陽子の検出効率は60%である。2014年のRunで、 ~ 140 イベントが検出され、従って ~ 230 個の反水素がトラップされた。1回のシフトでの平均で、1試行あたり最大2.4個の反水素のトラップに成功した。これはALPHA-1の1試行あたり0.7個に比べて3倍以上もよい結果である。なお、1時間に4回までの試行が可能である。

5.2 レーザー照射

2014年のRun中に、レーザー経路と制御システムを完全にALPHA-2に組み込み、低温でキャビティ長を制御し、243nmの共振にロックすることに成功した。そしてついに、1セット(On-resonanceでの測定とバックグラウンド測定)の原理実証(proof-of-principle)実験を行うことに成功した。この間、500秒にわたってキャビティは共振にロックされていた。Run後、周波数コムと参照外部キャビティの導入

が進んでいる。3月か4月には、改善したキャビティを低温で作動させることを計画している。

5.3 反水素の電荷 (Stochastic Heating)

ALPHA-1最後の結果として2014年に発表した、反水素の電荷に対する制限[34]を、ALPHA-2で更新すべく、Stochastic Heating[36]という手法を用いた実験を行った。発想としては、ランダムなパルス電場を反水素に印加した際、もし反水素が電荷を持っていれば、その電場によってトラップから抜け出すことを利用して、電荷に制限を与えようというものである。単純な、トラップから出るか出ないかという測定である。この2014年のRunの結果によって、制限を更新することが期待されている。

5.4 今後の展望

2015年のビームタイムは、7月上旬から11月中旬までのうち、12週間 $+\alpha$ の予定である。ALPHA-2の2015年中の展望として、まず、1S-2Sレーザー遷移を世界で初めて観測することが、最初の目標として掲げられる。また同時に、1試行あたりの反水素のトラップレートをさらに向上させることも、継続して目指す。並行して、カナダグループはLyman- α レーザー(121.5nm)による1S-2P遷移の観測および、反水素のレーザー冷却を達成するための準備を主導している[37]。レーザー冷却は高精度分光、および重力測定には不可欠である。

さらに、石田およびカナダグループを中心としてマイクロ波を用いて反水素中の陽電子をスピン反転させ(スピン反転すると反水素はトラップから出る)、トラップ磁場のクエンチに代わる反水素検出手法として確立させることも計画している。現在、トラップ磁石クエンチ後にトラップ温度が上昇するため、冷却を待つ時間によって実験できる頻度が制限されている。このマイクロ波による検出手法を導入することで、より多くの反水素が(実時間当たり)トラップ可能になることが期待されている。

ほかにも、石田らによる超微細構造精密測定に向けた高出力マイクロ波システムを導入中である。この測定はモデルによるが、1S-2S分光よりも、プランスケール物理に対する感度がよいという可能性も示唆されている[4]。

これらが2015年中に順調に進めば、いよいよCPT対称性の精密検証が可能になり、また将来的には反物質の重力実験も視野に入ってくる。最初の反水素生成から20年、トラップ達成から5年、反水素の物理は現在もっとも大きな節目を迎えている。

6 おわりに

本稿では、現在ますます注目を集めている反水素研究について解説した。特に、CERNのALPHA実験は、原子物理・プラズマ的手法に素粒子物理学的検出器や解析方法を組み合わせることにより、反水素に関する世界初の成果を連発してきた。分光用に装置を刷新したALPHA-2において、いよいよレーザーやマイクロ波を用いた精密分光が始まろうとしている。反水素を使ったCPT対称性の精密検証に向けて、この分野が熱く盛り上がっていることとその理由を、少しでもお伝えできたとすれば幸いである。

謝辞

ALPHA実験の同僚に感謝いたします。本稿執筆の機会を与えて下さった、高エネルギーニューズ編集委員の皆様感謝いたします。石田は平成25年度日本学術振興会海外特別研究員です。藤原の研究はカナダ政府NSERCおよびTRIUMF研究所によってサポートされています。

参考文献

- [1] 藤原真琴, 高エネルギーニューズ **27**, 37 (2008).
- [2] M. Hori and J. Walz, Prog. Part. Nucl. Phys. **72**, 206 (2013).
- [3] G. Lüders, Ann. Phys. **2**, 1 (1957).
- [4] M. C. Fujiwara, *Antihydrogen, CPT, and Naturalness*, arXiv:1309.7468 [hep-ph] (2013).
- [5] N. E. Mavromatos, Found. Phys. **40**, 917 (2010).
- [6] F. R. Klinkhamer, C. Rupp., Phys. Rev. D **70**, 045020 (2004).
- [7] C. G. Parthey *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 203001 (2011).
- [8] A. Matveev *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 230801 (2013).
- [9] S. G. Karshenboim, Phys. Rep. **442**, 1 (2005).
- [10] D. Colladay and V. A. Kostelecký, Phys. Rev. D **55**, 6760 (1997); Phys. Rev. D **58**, 116002 (1998).
- [11] V. A. Kostelecký and N. Russell, Rev. Mod. Phys. **83**, 11 (2011) [arXiv:0801.0287 [hep-ph]] and references therein.
- [12] Bauer *et al.*, Phys. Lett. B **368**, 251 (1996).
- [13] G. Blanford *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 3037 (1998).
- [14] T. Eriksson *et al.*, “AD Status and Consolidation Plans”, in *Proceedings of the International Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL2013)*, Mürren, Switzerland, pp. 36–39 (2013).
- [15] L. Bojtár, “Antiproton Decelerator Status Report”, in *Proceedings of the International Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL2009)*, Lanzhou, China, pp. 6–10 (2009).
- [16] M. Amoretti *et al.*, Nature **419**, 456 (2002).
- [17] C. Amole *et al.*, Nature **483**, 439 (2012).
- [18] W. Bertsche *et al.*, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **566**, 746 (2006).
- [19] X. Fei, *Trapping low energy antiprotons in an ion trap* (Ph. D. thesis), Harvard University (1990).
- [20] G. B. Andersen *et al.*, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **684**, 73 (2012).
- [21] C. Amole *et al.*, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **735**, 319 (2014).
- [22] G. B. Andresen *et al.*, Nature **468**, 673 (2010).
- [23] G. B. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 013003 (2010).
- [24] G. B. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 025002 (2011).
- [25] M. C. Fujiwara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 053401 (2008).
- [26] G. B. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 203401 (2008).
- [27] K. Helmerson, A. Martin, D. E. Pritchard, J. Opt. Soc. Am. B **9**, 483 (1992).
- [28] P. A. Willems and K. G. Libbrecht, Phys. Rev. A **51**, 1403 (1995).
- [29] H. Hess *et al.*, Phys. Rev. Lett. **59**, 672 (1987).
- [30] G. B. Andresen *et al.*, Nat. Phys. **7**, 558 (2011).
- [31] M. C. Fujiwara *et al.*, Hyperfine Interact. **172**, 81 (2006).
- [32] C. Amole *et al.*, New J. Phys. **16**, 013037 (2014).
- [33] M. D. Ashkezari, *Microwave Spectroscopy of Magnetically Trapped Atomic Antihydrogen* (Ph. D. Thesis), Simon Fraser University (2014).
- [34] C. Amole *et al.*, Nat. Commun. **5**, 4955 (2014).
- [35] G. Bressi *et al.*, Phys. Rev. A **83**, 052101 (2011).
- [36] M. Baquero-Ruiz *et al.*, New J. Phys. **16**, 083013 (2014).
- [37] J. M. Michan, M. C. Fujiwara, T. Momose, Hyperfine Interact. **228**, 77 (2014).