

CERN における ALPHA 反水素実験

Confronting CPT with Cold Trapped Antihydrogen

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

藤原 真琴

Makoto.Fujiwara@triumf.ca

2008 年 6 月 1 日

1. はじめに

「水素原子がすっかり分かってしまったら、物理全体がすっかり分かってしまったのも同然だ」と Weisskopf が言ったという逸話がある[1]。確かに(とりあえず今のところ正体の分からない暗黒物質と暗黒エネルギーを別とすると)、水素はわれわれの住む宇宙のもっとも豊富な構成要素であり、第ゼロ近似としてはこの説は正しいのかもしれない。実際、水素原子はもっとも精度よく調べられている系のうちの一つでありわれわれは実に多くのことをこのもっともシンプルな原子から学んできた。

では、水素の反物質である反水素を作って調べれば何が分かるのか? もちろん新しいモノができれば、その基本的性質(色、重さ、臭い、味?)を知ることがまず重要であることは論を待たない。しかし、もし大量の反水素をトラップし、さらにその性質を精密に測定することができれば、物理法則のもっとも根本的な対称性の一つである CPT(荷電共役・パリティ・時間変換)の精密検証が可能になるのである。

最初の反水素原子の生成は 1995 年に CERN の LEAR 施設で報告された[2]。1997 年には Fermilab で同様の報告がなされている[3]。これらの少数の反水素は高速に近い速度で生成されたため、精密測定には適さない。CERN は LHC 建設に資源を集中するため LEAR の運転を中止したが、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 (Antiproton Decelerator) 施設が建設された。2002 年に ATHENA 実験はハーバード大率いる同じく AD で走る ATRAP 実験との数年にわたる激しい競争の末、初めて「冷たい」反水素 (cold antihydrogen) をつくることに成功した[4]。ここで冷たいというのは、(たとえば相対論的エネルギーに比べて)反水素原子の持つ運動エネルギーが著しく小さいということである。これを機に低速反水素による新しい物理の展開が始まった。

2004 年にデータ収集を終了した ATHENA 実験に続いて、われわれは ALPHA という新しい実験を開始した。これま

での反水素は低速ながらも、すぐ壁に当たって消滅していた。ALPHA の目標は精密分光を可能にするために、反水素を定常的にトラップすることにある。

本稿では反水素の生成から、反水素トラッピングに向けた最近の反水素研究の状況を CERN における ATHENA と ALPHA 実験を中心として解説する。「海外通信」ということで研究事情なども織り交ぜていく。

2. CPT 対称性の検証

反水素研究の動機は、原子物理からプラズマ物理など、多岐にわたるが、ここでは素粒子物理の側面を議論する。さらに詳しくは、最近の解説[5]を参照されたい。素粒子の標準理論は物理現象の記述に輝かしい成功を収めてきたが、これが究極の物理法則だと信じる人は多くはない。自然の対称性を調べるのが新しい物理を探る上で有効な戦略であることは歴史が教えるところであるが、特に CPT 対称性は CPT 定理[6,7]において保証され、物理法則の離散的対称性のなかでも特別の位置を保つ。定理の前提となる条件が、場の量子論におけるユニタリティ、ローレンツ対称性、局所性、スピン統計など、極めて根本的なものだからである。故にたとえば EDM(電磁双極子能率)や、レプトンにおける CP の破れの探索など、標準理論を超えるが通常場の理論の枠内で許容可能な対称性の破れの探索とは意を異にする。CPT 検証は(有効)場の理論自体をふくむ、物理の根本原則を検証するのである。当然ながら可能性の問題としては、場の理論のこれまでの成功を考えると、CPT 保存の前提となる原理が間違っている可能性は小さい。しかし、これらの前提が、たとえばプランク・スケールで正しいとは限らない。ひも理論は非局所理論であるし、非可換幾何理論や量子ループ重力論は CPT やローレンツ対称性を破る可能性があることが知られている(たとえば[8,9])。

CPT 定理の帰結として、粒子と反粒子は同じ質量、寿命を持ち、原子と反原子ではエネルギー準位が同じであることが要請される。われわれの長期目標は水素と反水素を超

高精度分光で比較することにより、CPT の対称性の破れを探ることにある。なお、反水素の重力測定による一般相対論の等価原理検証実験も提案されているが、ここでは議論しない。

最近、Kostelecky らにより提唱された CPT とローレンツ対称性を破る有効場理論[10]が注目を浴びている。彼らが Standard Model Extension (SME) と大胆に命名したこの理論をもとにした数多くの実験が行われている[11]。SME のような有効場の理論の枠組み内では CPT の破れはローレンツ対称性の破れを伴うとされており、物質系でのローレンツ対称性を調べることにより、(反物質によらずに) CPT の破れのパラメータ空間を制限することができる。しかし、物質と反物質を直接比較することにより、よりモデルに依存しない CPT の検証が可能となる。

ではわれわれのような低エネルギー実験でどのような大きさの CPT の破れが期待できるだろうか？ 一つの推測としては、CPT 非保存相互作用によるエネルギーシフトは、ある高いエネルギー・スケールのべき乗で抑制され、

$$\Delta Energy \sim \frac{m^{n+1}}{\Lambda_{NP}^n} \quad (1)$$

と表され得るかもしれない[12]。ここで Λ_{NP} は CPT を破る新しい物理のエネルギー・スケール、 m は測定量に関連する低エネルギー物理のスケール、べき乗 n は新しい物理の次元に依存する。この式によると有意義な実験感度のベンチマークはプランク・スケールで抑制された観測量であろう。たとえば $n=1$ 、 $m=1\text{GeV}$ 、 $\Lambda_{NP}=10^{19}\text{GeV}$ とすれば、 $\Delta Energy \sim 10^{-19}\text{GeV}$ のオーダーになる。これは周波数に直すと約 20 kHz で、現在の原子分光実験で十分到達可能な精度である。つまり反水素分光には原理的にはプランク・スケールの物理を探り得る感度があるわけである。さらに、たとえば余剰次元が TeV スケールに存在すれば、もっと大きなレベルで CPT の破れが観測され得る可能性もあるだろう。

さて、このような理論的憶測はさておき、理論のバイアスを出来るだけ排して実験的に新しい物理を探るにはどのような手があるだろうか？ 加速器あるいは宇宙線などで高エネルギーの極限を探るのはもちろんだが、可能な限り高精度の測定を試みる、という手も当然ありうる。しかしどのような物理量を測ればよいか、予め分からないときにどうするか。実験的に高エネルギー、あるいは高精度に到達できる系があれば、とにかくそこを徹底的に調べるということは、意味があることだと思われる。いわば、暗闇で鍵をなくしたら、とりあえず少しでも明かりに近いところから探せ、ということである。前述の様に、水素原子は物理全体の中でももっとも精度よく調べられている系の一つであり、反水素原子との比較によって CPT を超高精度で検

証することには、理論的考察を抜きにしてもそれなりの実験的必然性があるのである。

宇宙におけるバリオン非対称

CPT の破れは宇宙論的な重要性をもつ可能性がある。宇宙における物質・反物質の非対称性は現代科学の一大問題である。これを説明するためには有名なサハロフの条件が必要条件である、という言い方がよくされるが、これは必ずしも正しくない。ここでサハロフの条件とは(1)バリオン数の破れ、(2)CおよびCPの破れ、そして(3)上記の反応が非熱平衡状態で起きること、であるが、もしCPTが破れていれば、熱平衡状態でもバリオン非対称が生成されるのである。たとえばトップ・クォークと反トップ・クォークの質量が 10^{-6} レベルで違っていると、観測されているバリオン非対称が説明できると指摘されている[13]。今のところトップの質量は1%程度の精度でしか測られていないことに注目すべきである。

3. 反水素原子の分光

近年の分光技術の発展により、水素原子のレーザー分光、特に $1s-2s$ 準位間の二光子分光は 10^{-14} レベルの驚異的な精度に達しており[14]、2005年にはこれに関連して Hänsch らにノーベル賞が授与された。また超微細遷移(有名な21cmマイクロ波)の測定も 10^{-12} 程度の精度が得られている[15]。もし1000個程度の反水素をトラップできれば比較的早い段階で 10^{-12} のレベルで $1s-2s$ 準位レーザー分光が可能になると Hänsch らは予想している[16]。この精度で既に陽電子の質量測定の精度を一気に4桁も向上できる[5]。またこれはエネルギー・シフトの感度としては数kHz、あるいは 10^{-20}GeV となる(式(1))。現在、水素原子分光による束縛系でのQEDの検証精度は陽子の内部構造(電荷半径など)からくる理論誤差によって制限されていて、このことがさらなる高精度実験を進めるための動機付けを弱めている(類似した例として、Gabrielse らによる電子 $g-2$ 測定によるQED検証も現在、独立した微細構造定数の値の精度により制限されている)。水素・反水素比較による基本対称性の検証においては、このような理論的不確定性はない。実験精度の向上が即、CPT定理検証精度の向上につながるのである。ちなみに、ここに挙げた Gabrielse や Hänsch は商売敵の ATRAP 実験の指導的メンバーである。われわれの競争の大変さを想像していただけるかと思う。

さて反水素分光による CPT 検証はその他の系での検証といかに競合できるか？ 一般には CPT を破る基本理論が分からないときに異なる系での実験的検証の有効性を比較することは容易ではない。よく引用されるのは中性 K 中間子と反 K 中間子の質量差と質量の比 $\Delta m/m \sim 10^{-18}$ であるが、たとえば、小林と三田[17]はこの系では CPT の検証と

しては10%程度にしかないと1992年の時点で主張している[18]。また Bigi は質量差を質量自身で割るということ自体に疑問を投げかけ、たとえば質量差を(動物の)象の体重で割るとそれほど違いはない、という意味のことを言っている[19]。式(1)による比較ではK中間子の質量差を周波数に直せば100kHz程度である。反水素をトラップできれば、これに比べて十分競合できる精度(数kHz)のCPT検証が期待できるのである。

さらに最近 村山はCPT検証の性能指数 (figure of merit) として粒子-反粒子の質量差ではなく、質量自乗の差を使うことを主張した[20]。この説によれば、ニュートリノ振動から得られる電子ニュートリノと反電子ニュートリノの Δm^2 の差が、K中間子系のそれよりも有効なCPT検証を与えることになる。同様の議論を反水素に当てはめると、たとえば反水素・水素分光比較による陽電子・電子の質量等価性の測定もK中間子系よりもより有効なCPT検証となり得るといえる。以上のいくつかの例は、反水素によるCPT検証が他の系と比較しても相補的かつ重要な役割を果たしうることを示している。

と、研究の動機付けの素粒子物理的側面を色々書いたが、反水素研究は原子物理やプラズマ物理研究者には興味を持ってもらいやすいが、TRIUMF研究所上層部を含め素粒子研究者のサポートを得るのはなかなか容易ではなく、私も日夜奮闘しているのである。

4. 反水素の生成

反粒子トラップ

ここから実験の側面の説明に入る。当然のことながら反物質は物質とぶつくと消滅するので、これを閉じ込めるには何らかの工夫をする必要がある。反水素原子の構成要素である反陽子と陽電子は電荷を持っているので、電磁力によるペニングトラップを使って閉じ込める。しかし反水素は中性なのでどうするか。幸い、反水素は磁気モーメントを持っているので、磁気トラップを用いての閉じ込めが原理的には可能である。しかし後述のように、これにはさまざまな困難を乗り越える必要がある。

一般に粒子をトラップするには閉じ込め力のほかに、最初の捕獲過程を工夫する必要がある。保存力系においては、トラップに入ってくるための運動エネルギーをもっている粒子は、何もしなければそのまま出ていってしまうからである。捕獲方法には(1)トラップ内に散逸過程がある(エネルギー損失を生じさせる)、(2)トラップの壁を動的に開閉する、(3)粒子の生成そのものをトラップ内で行う、などの方法があり、われわれは状況によりこの三つを使い分けている。

ペニングトラップでは、通常数テスラ程度のソレノイド磁場により荷電粒子を磁場軸に沿って閉じ込める。しかしこれだけでは粒子が両端から漏れ出てくるので、両端を電場でふさぐことにより三次元での閉じ込めを実現する。実は、ペニングトラップを使った研究では、トラップする粒子の数によって、かなりはっきりと業界が分かれており、たとえば言えば、原子物理と固体物理ほど興味の対象や実際の物理も異なってくる。単一粒子のトラップでは、粒子の運動を正確に予測できるため、荷電粒子の電荷質量比や磁気能率の精密測定が行える。粒子の数を増やすと、粒子間の相互作用や、自身の電荷による電場の影響が大きくなり、各粒子の運動を個別に記述することは困難となり興味の対象は(非中性)プラズマとしての多体問題の理解となる。反水素実験の場合はできるだけ大量の反陽子・陽電子が欲しいので、非中性プラズマの振る舞いを理解することが必要になる。

AD 反陽子減速施設

低速反陽子の物理は日本グループの主導的な貢献をはじめ、これまで様々な成果を出してきており、大強度の陽子加速器が計画、建設されるたびに反陽子施設の可能性が話題になるのは当然だと思われるが、CERNのADは現在のところ世界で唯一の低速反陽子施設である。かつてのLEAR Complexは四つの加速器を駆使して高輝度のビームを自在な時間構造で供給することができ、メゾン・スペクトロスコピーを中心として多目的に利用されたが、ADでは反陽子の減速・冷却(確率冷却および電子冷却)を単一のリングで行うため、約2分に一発 10^7 程度の粒子数のビームパルスが来るといった特殊な時間構造をもっている。LEARに比べると時間平均した反陽子数も桁数少なく、「LEAR施設の貧者版」と揶揄する人もいる。しかし、この時間構造は通常の原子核素粒子実験には使いづらく、逆に反物質研究のためにビームをほぼ独占することが可能になった。現在、1年約6ヶ月のビームを主に三つの実験で、通常1日8時間ずつ分けている。現在ADで走っている実験はわれわれのALPHAと競争相手のATRAPそして東大・理研の日本グループを中心としたASACUSA実験である。高エネルギー実験とは違い、われわれのような小規模の実験で6ヶ月間もビームが使えるのは実際かなり幸運なことである。少人数でやっているのだから、その分、体力勝負になる面はあるが。

反陽子と陽電子の捕獲と冷却

図1に示すように、ADからの $100\text{MeV}/c$ の反陽子ビームはまずdegraderで数keV以下に減速され、5kVの高電圧を使ってトラップの壁を動的に開閉することにより反陽子の捕獲を行う。これは前述した動的捕獲の一例である。実は減速材をつかった減速は効率の悪いやり方で、0.1%程

度の捕獲効率しかない。AD でお隣のビームラインの ASACUSA 実験では RFQ (高周波四重極) 減速器を使って高効率を得ている[21]。

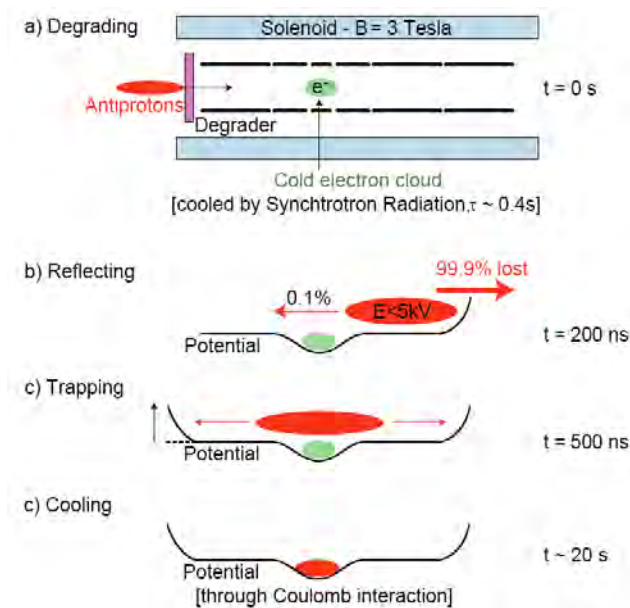


図 1 反陽子のペニングトラップによる動的捕獲と電子冷却[22]

捕獲された反陽子は冷たい電子とクーロン相互作用することによって、 $\ll eV$ の低温まで冷やされる。電子自身は強磁場中でシンクロトロン放射により自発的に冷却される。電子冷却後、電子をトラップから除去し、反陽子を混合トラップに移動させる。

陽電子の方は、まず独立した蓄積装置に溜めた後に、ALPHA 装置本体の混合トラップに送り込まれる。陽電子蓄積装置は、いわゆる Surko 型トラップといわれ、ナトリウム 22 放射線源からの陽電子がトラップ中のバッファガスによってエネルギー損失をすることにより捕獲を実現する。これは散逸捕獲の一例である。蓄積装置から本体へは、パルス電圧を使って壁を開閉する動的過程によって陽電子を送り込む。

反水素の生成と検出

この様にして準備した反陽子と陽電子は、混合トラップにおいて混ぜ合わせる(図2)。このとき、電荷の符号が違う粒子を同時に閉じ込めるために、トラップのポテンシャル壁が二重の入れ子になった、いわゆるネステッド・ポテンシャルを用いるが、この構造は Gabrielse らによって提案された。反陽子と陽電子の相互作用から反水素原子が生成されると、反水素は中性のためペニングトラップから漏れ出て壁にあたる。反水素消滅事象を検出するため、ATHENA ではシリコン・ストリップ検出、および分割された CsI 結晶を用いた。前者で反陽子消滅からの荷電粒子(主にパイオン)、後者で陽電子消滅からの 511 keV ガンマ線を検出した。反陽子と陽電子が同時に同じ場所で消滅したと

いうデータをもって反水素生成・消滅の証拠とした。この解析の詳細については、たとえば日本語でも文献[23,24]で解説したの参照されたい。

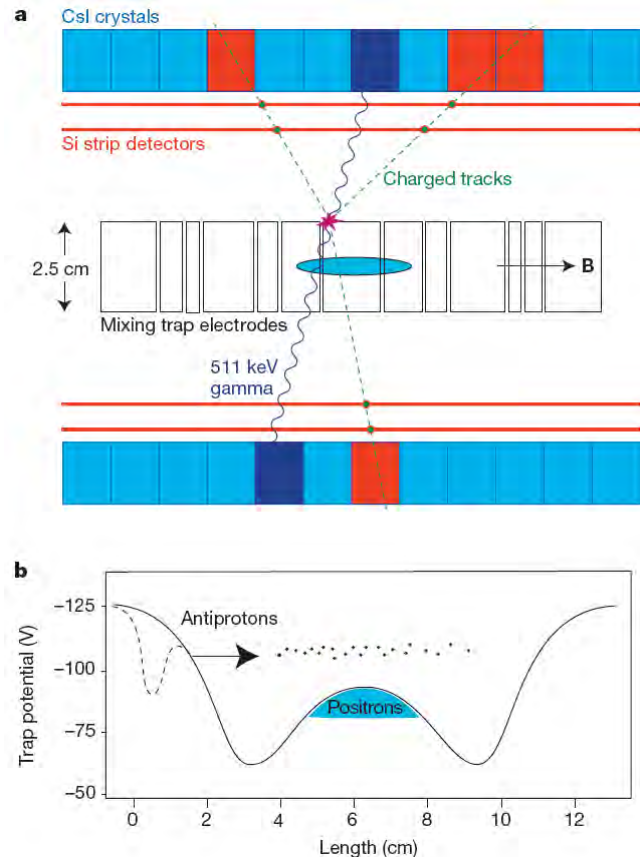


図 2 反水素原子の生成と検出[4,23,24]

さて、さきほどからトラップ中で粒子を動かすと述べたが、このような粒子操作は口で言うのはやさしいが、実際には一つの動作を習得するのにビームを使って何週間もかかることもあり、ビームタイムの多くの時間は粒子操作方法の開発に使われている。

ここで少しトラップ中での粒子操作について一般的なことを述べる。われわれのトラップ電極の数は 40 ほどあり、粒子操作の最適化のための変数としてはそれぞれ電圧の値、電圧変動の時間スケール、さらに用いる粒子数、粒子密度、粒子温度などがあり、最適化問題としては膨大なパラメータ空間となる。もちろん理論を参考にするのだが、通常非中性プラズマ実験は数個の電極で粒子をほとんど移動させずに行われることが多く、われわれの作業は試行錯誤に近い。不幸中の幸いではあるが、反粒子の場合は操作に失敗してトラップから粒子を失うと、華々しい消滅反応を観測できるという利点がある。この反物質の特性を利用して、プラズマ粒子の損失過程についてのユニークな研究も行っている[25,26]。

このようにして ATHENA 実験はハーバード大率いる同じ AD の ATRAP 実験との激しい競争の末に世界で初めて

の冷たい反水素生成に成功したわけだが、実のところ AD 実験開始後数年の間、ATRAP からは華々しい途中経過が伝わってくるにもかかわらず ATHENA の方は進展が思わしくなく、グループの士気はかなり低くなっており、あきらめの雰囲気も見られた。しかし、周りの士気が低いというのは、逆にやる気のある若手にとってはチャンスともいえ、一ポスドクだった私は、自ら志願して Run Coordinator になって現場の指揮を取る立場に就いた。しかし国際共同実験ではよくあることだと思うが、責任はあるが権限はない、という立場はなかなかつらいところもあり、バカンス・家族などを大事とする欧州文化もあって、なだめすかして皆さんに働いていただく以外になかなか手はない。もちろん自分が他人より多く働くというのは大前提であるが。幸い 2002 年には経験豊富な研究者が CERN に駐在してくれたこともあり、反水素生成の成功につながったときには正直ほっとした。

5. パルス化した反水素源

ATHENA 実験は 2004 年にデータ収集を終了した。ATHENA では 2002 年の反水素生成の成功以来、反水素の生成過程などに関する様々な研究を行ってきたが、ここでは反水素生成のパルス化に成功したという、最近私が行った解析の結果[27]について少し詳しく述べる。

ペニングトラップにおいて、陽電子に高周波 (RF) をかけて加熱することにより反水素の生成を抑制することが可能であるということを既にわれわれは知っていたが、RF を周期的にかけることにより、反水素生成をパルス化することに成功した。図 3 に反水素生成の時間変調の証拠を示す。反水素検出器による反水素生成信号が RF オフのとき (灰色) と RF オンのとき (白) で大きく変調されていることがわかる (上図)。下図は反水素消滅の軸方向の位置を表し、この位置分布がパルス反水素生成の証拠の一つとなる。

さてパルス反水素源ができると、パルス・レーザーやマイクロ波など、他のパルス装置との組み合わせが可能になる。さらにパルス現象の時間発展を詳しく調べることで、反水素生成の仕組みに関する情報が得られることを示した。

ここで少し反水素生成過程の原子物理についておさらいをする。反陽子と陽電子が結合して反水素になるには、束縛エネルギーを何らかの形で放出してやる必要があり、エネルギー・運動量保存のために、第三の粒子が必要となる。これには主として二つの方法があり、光子を放出する放射性再結合 (宇宙の多くの水素原子はこうやってできた)、および周囲の陽電子を蹴り飛ばす三体再結合である。陽電子の温度 T と密度 n に対する依存性はそれぞれ、 $nT^{-0.6}$ 、

$n^2T^{-4.5}$ だと予想される。ATHENA での反水素の生成率は 500 Hz にもおぼろ (これは放射性再結合の予想より一桁以上大きい)、陽電子の低温および高密度のため、三体再結合が優勢だと考えられているが、これまでの測定ではその決定的な実験的証拠が得られていない。

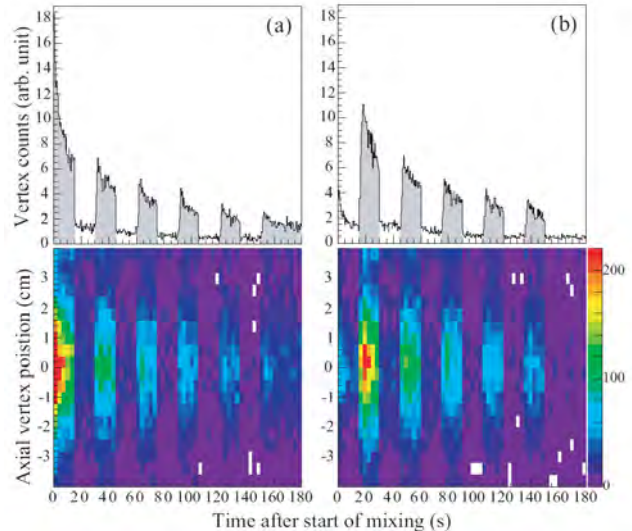


図 3 パルス化した反水素原子の生成[27]

今回のデータは反水素生成の温度依存性に関する重要な情報を与える。図 4 (a) にパルス現象の時間発展の詳細を示す。 $t = 0$ において、RF 加熱を停止すると、陽電子はシンクロトロン放射によって指数関数的に冷却される (図中で T と表示された曲線、オンライン版では緑線)。これにもない抑制されていた反水素の生成が立ち上がる (error bars)。陽電子冷却の温度を知ることにより、反水素生成の温度依存性が推論できる。反水素生成の時間発展を

$$R(t) = A \cdot \left[\Delta T \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + T_0 \right]^{-P} + Bk \quad (2)$$

の式を仮定してフィットしたのが、 $R \sim T^{-1.2}$ と示された曲線 (オンライン版では赤実線) である。ここで式 (2) の [] の中の項が陽電子の温度 T の時間発展を示す。 ΔT (加熱温度) と τ (シンクロトロン冷却時定数: 3 T 磁場中では 0.5 秒程度) はオフライン・プラズマ実験により測定した値を入力値として使った。フィット・パラメータは、反水素生成の温度依存性のべき乗スケーリング P 、平衡状態温度 T_0 、バックグラウンド Bk 、ノーマライゼーション A である。われわれのフィットは反水素の生成率が T^{-1} 程度の温度依存性を持つことを示唆している。これに対して、従来の三体再結合から予想される $T^{-4.5}$ を仮定すると、反水素生成の立ち上がりはずっと遅れることになる ($R \sim T^{-4.5}$ と示された曲線、オンライン版では青線)。フィットモデルによる系統効果を調べるために式 (2) で $T_0 = 0$ と固定し、フィット領域を高温に限定したフィットを点線 (オンライン版では赤点線) で示す。さらに、加熱温度を変えて測定した

ものが図4(b)である。われわれのモデルの単純さを考えると、データとの一致はかなりよいといえる。様々な系統誤差を考慮し、 $T^{-1.1\pm 0.5}$ という依存性が得られた。反水素原子を使った実験で系統誤差をこのように詳しく考慮した解析を行った例はまだあまりない。

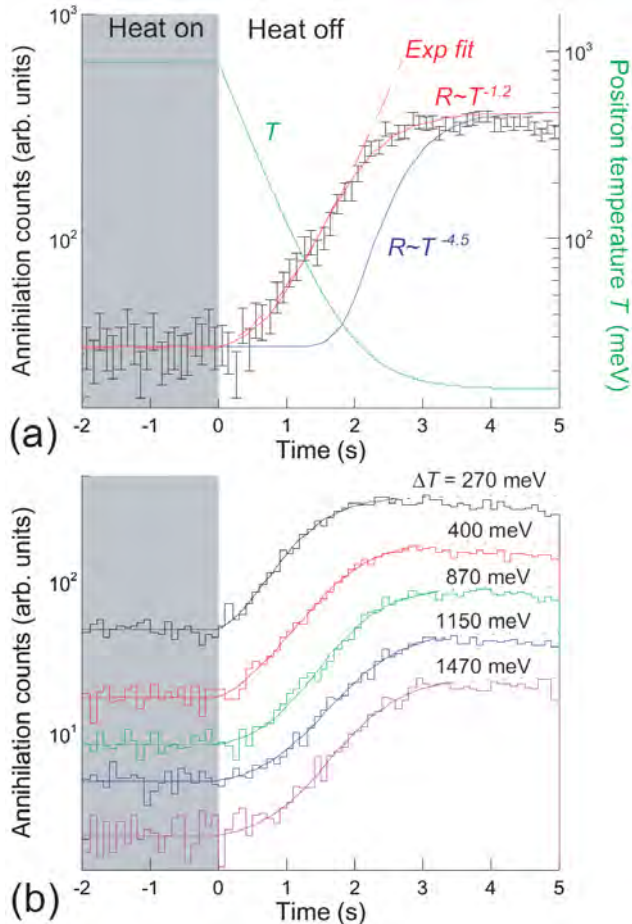


図4 反水素生成の温度依存性解析[27]

さて、通常の三体再結合からの予想との違いについては、われわれの反応過程が、定常状態から大きくずれることから定性的には説明できる。 $T^{-4.5}$ は定常状態での値であるが、われわれのトラップされたプラズマでの実験では定常状態に達する前に反水素はプラズマから抜け出してくる。しかし、このような反水素生成の温度依存性がべき乗法則に乗るとするのは驚きであり、現在プラズマ理論家を巻き込んでこれを説明すべく私も頭を悩ませている。実はこのような薄いプラズマでの実験は普通の物質原子を用いた系でもあまり行われていないのである。このように、ペニングトラップ中の反水素生成過程はそれ自身が面白い現象であるが、その理解は反水素分光によるCPT検証に向けて実際的な意味でも重要である。精密分光には基底状態にトラップされた反水素が必要とされるが、反水素の量子状態は生成過程に強く依存するからである。

図3に示すような反水素のパルス生成現象を数年前に最

初に発見したときは、反物質でこんなことができるのか、とわれながらかなり驚いたものだが、最近の Phys. Rev. Lett. の査読では、「パルス現象自体は特に驚くに値しないので、再結合過程の物理結果に焦点を置くべし」とのコメントがついた。あまり驚かれなくなってということは、反水素研究も数年の間にすっかり市民権を得たと喜ぶべきなのかも知れない。

6. ATHENA から ALPHA へ

このように ATHENA は冷たい反水素を大量に作り出し様々な測定を行ったが、反水素研究を次の段階に推し進めるには、どうしても反水素を定常的にトラップすることが必要である。これを成し遂げるため、ATHENA 実験の終了後、われわれは新しいコラボレーションを結成した。ALPHA - Antihydrogen Laser Physics Apparatus という名は私が考えた。実は最初は ALE - Antihydrogen Laser Experiment という名前を提案していたのだが、ビール的一种である ale との語呂合わせの受けがメンバーにはあまりよくなかった。ちょうどそのころ私も理研のポストドクから TRIUMF のスタッフに職が変わり、カナダから ALPHA 実験に参画する努力を始めた。幸い、短期間の間にカナダの主要5大学から10名程度の研究者の賛同を得、また予算獲得にも成功したので、ALPHA-Canada グループを結成し、早い段階からの本格的な参加が可能になった。ALPHA は40人弱の規模で、全体の約3割を占めるカナダグループは、Si センサーを除く検出器、DAQ、解析ソフト、と ALPHA の原子核・素粒子の側面のほぼすべての責任を負っている。さらに ALPHA-Canada は水素原子のマイクロ波分光やパルス・レーザー分光の専門家を擁する学際チームとして、反水素の分光方法の開発にも主導的貢献をしている。現在、日本からも東大原子核の早野氏と理研原子物理の山崎氏が ALPHA に参加されている。

中性磁気トラップ

反水素をトラップするために ALPHA が用いる磁気トラップについて少し述べる。前述のように、中性(反)原子はペニングトラップでは閉じ込められないので、反水素の磁気モーメント μ と磁場 B との相互作用を閉じ込め力に用いる。磁気エネルギーは $U = -\mu \cdot B$ と書け、三次元中で磁場の極小を作ると反水素の閉じ込めが可能になる。しかしながら、問題はトラップの井戸の深さが極めて浅いということである。ペニングトラップでは keV 程度の井戸の深さは容易に達成できるが、反水素磁気トラップでは磁気相互作用の弱さのため $0.7 \times \Delta B$ (Kelvins) 程度の深さしかない。ここで ΔB は磁場強度の最大値と最小値の差であり、現在の超伝導技術では数 T が限度である。つまりわれわれは 1K 程度以下の冷たい反水素を作り出す必要があるのである。

われわれの課題の困難さは、関連するエネルギースケ-

ルを比較することによって明らかになるだろう。反水素の生成のために必要な非中性プラズマの特徴的なエネルギースケールはその空間電荷であり、円筒型プラズマの場合 $E \sim en_L / (4\pi\epsilon_0)$ で与えられる。ここに e は粒子電荷、 n_L は単位長さあたりの粒子密度である。これは10eVのオーダーの物理である。別の言い方をすれば、トラップされた非中性プラズマには10eV程度のエネルギーがポテンシャルエネルギーの形で詰め込まれており、これらは容易にプラズマ粒子の運動エネルギーに変換されて粒子を加熱する。中性原子トラップの深さが0.1meV程度であることを考えると、プラズマ過程の操作を 10^{-5} の精度で行う必要があることになる。トラップされたプラズマには様々な不安定性や振動のモードが存在し、それらが外部環境とカップルするとすぐに温度が上がってしまう。これらを出来るだけ抑えながら、反水素を生成するのはなかなか簡単ではないのである。実際、ATHENAでの最初の反水素生成ではそこまでのトラップ制御は出来ず、生成された反水素の速度分布はかなり大きい値であることが示唆されており、われわれは様々な新しい方法による反水素の生成を検討・試行している。

ALPHAの八重極トラップ

また別の問題として、反水素をトラップするためには、反水素生成のためのペニングトラップと中性原子用の磁気トラップを共存させる必要性が挙げられる。中性トラップのための一般的な方法では四重極磁場をつかうが、そのような磁場をペニングトラップに組み合わせると、後者による荷電粒子の閉じ込めが出来なくなるという可能性が示唆された[28]。これがもし本当なら反水素を生成する前に反陽子と陽電子を失うことになるので重大問題となる。われわれALPHAでは八重極磁場を使うことによりこの問題が軽減できることを予想し、ブルックヘブン研究所と共同で特製の超伝導磁石の製作を行った。BNLはコイルを一層巻くごとにエポキシで固めるという特殊な技術を持っている。この八重極磁場と重ね合わせたペニングトラップ中で粒子の安定性を反陽子と陽電子で実証したのがALPHAの最初の物理結果となった(図5)[29]。

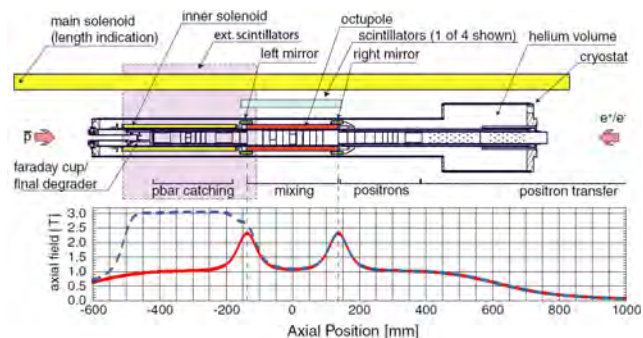


図5 ALPHA実験の概要図[29]

7. ALPHAの粒子検出器

ALPHAでは様々な粒子検出器を使っているが、その種類は粒子計数用、イメージング用などに分けられる。まず、計数用検出器では反陽子の消滅事象を計数することにより反陽子の数を計ることができる。トラップされた反陽子を開放しトラップ壁に当ててやると、消滅反応により数個の荷電粒子(パイオン)が生成される。これらのパイオンを検出するためにいくつかの検出系を用いている。もっとも簡単なものは、シンチレータを光電子増倍管(PMT)で読み出す外部消滅検出器で、これを磁石の外に置いている。トラップ磁石からの漏れ磁場が100 Gaussほど存在するので、ミュンヘンなどで三重に遮蔽したPMTを使っている。この検出器は、たとえば[29]の物理測定に使われた。実はこの外部シンチレータアレイ用のPMT十数個は、予算節約のためTRIUMFに転がっていた20年ほど昔のPMTの山から使えるものを見つけ出して再利用している。

反水素生成などの比較的微弱な信号を検出するには、ソレノイド磁石ボア中、トラップの近くにも検出器を置きたい。しかし通常のPMTは当然磁場中では使えない。Siストリップ検出器は磁場中でも使用可能であるが、後述のように、メーカーの生産の遅れにより、われわれは別のシステムを非常に短期間の間に開発する必要にせまられた。

われわれがまず試みたのは、BNLでのKIPIO実験の電磁力ロリーメータ用にTRIUMFグループが開発したシステムを転用することであった。これは穴の開いたシンチレータに通した波長変換ファイバーによって光を読み出すシステムであるが、残念ながらわれわれのテストでは十分な量の光子を取り出すことは出来なかった。代わりにわれわれが開発したのは、シンチレータを直接APD(雪崩光ダイオード)に接続して読み出すシステムである(図6)。

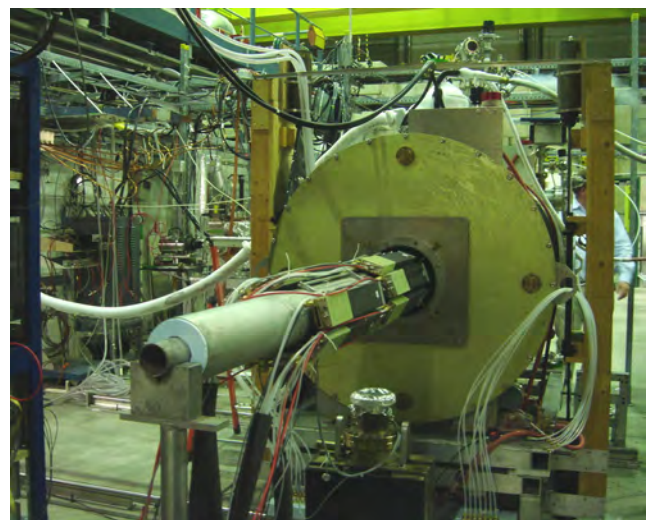


図6 APD読み出し反水素消滅検出器と超伝導ソレノイド

T2K 実験などで使われる Si PM についても検討したが、浜松ホトニクス製の製品はまだ商品化されていなかったこともあり、時期尚早と判断した。APD のゲインを安定させるために、冷却水を用いて検出器の温度を 0.1 度以内に制御している。この検出器を用いて、われわれは低磁場での反水素の生成、検出に成功した(図7)[30]。

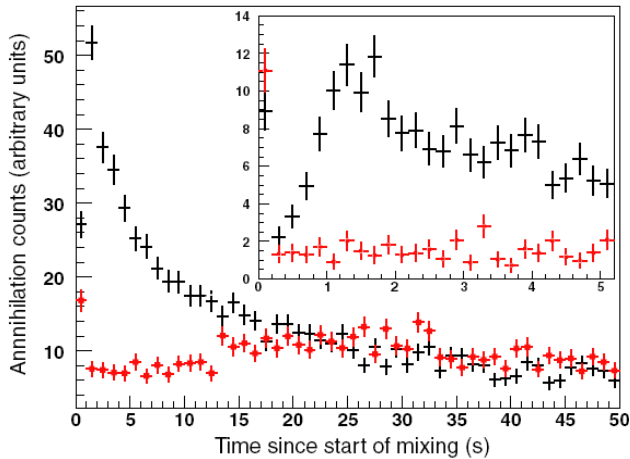


図7 低磁場における反水素生成信号およびバックグラウンド[30]

Si パーテックス検出器

ALPHA 実験の設計思想上の重要な特徴の一つは Si パーテックス検出器による反陽子消滅イメージングの能力である。ATHENA で示されたように[4,25]、これは反水素生成の検出だけでなく、関連したプラズマ過程の研究にも大きな威力を発揮する。さらに、最初のトラップされた反水素の検出は、バックグラウンドに埋もれた稀事象を探し出すことになると予想される。反水素の分光実験には、さらなる稀事象の検出が必要とされるだろう。このためには、位置敏感な消滅検出によるバックグラウンドの除外が極めて重要になる。まさにこのために、われわれは磁気トラップと共存可能なシリコンストリップ検出器を開発しているのである。

反陽子消滅パーテックスの測定には、比較的低運動量のパイオン(平均 $400 \text{ MeV}/c$ 程度)の軌跡を検出することが必要であるが、最大の難点は磁気トラップの構造上、トラップから見て超伝導磁石の外側にしか検出器を置くことができないということである[31]。当然、多重散乱が多くなり、さらにシリコン第一層が消滅反応点から離れてしまう。はたして、このような状況でパーテックス検出が出来るか? まず大まかな計算により、数 mm 程度の精度は出そうであると評価した[32]。これはコライダ実験ではお話しにならないであろうが、われわれにとっては十分有益なのである。その後 TRIUMF グループが中心となって詳細なシミュレーションを行い、これをもとにパーテックス検出器を設計した。建設は Si センサーとハイブリッドは英リバプール大、

それ以外の読み出し電子回路、DAQ、解析ソフトは TRIUMF が担当している。両面読み出しの縦 11.5 cm 、横 6 cm のセンサーを 2 枚縦につなげて一つのパッケージとし、これを 60 枚、3 層に巻いている。 z 方向 230 ミクロン 、 $r-\phi$ 方向 800 ミクロン のストリップピッチにより片面 256 チャンネルずつ、計 512 チャンネルを四つの ASIC で読み出している。チップには Belle でも使われた IDAS の VAITA をセルフ・トリガーモードで使う。ADC にはモントリオール大で開発した多チャンネル・デジタイザを使用することにより全 ASIC を並列に読み出している(Belle ではハイブリッド上の ASIC を直列につないで読み出しているそうである)。コントロール、トリガーなどのモジュールは TRIUMF で開発した。トリガーについては FPGA 上で大まかなイベントトリガー認識をする能力も備えているが、実践でどれだけ役に立つかはバックグラウンドのレベルによる。全部で約 3 万チャンネルを読み出す電子回路と DAQ をほとんど自前で作るエンジニアや技官を擁する TRIUMF 研究所のインフラには感謝している。

Si 検出器コミショニング

Si センサー建設については残念ながらメーカーによる納品が遅れに遅れており、ようやく 2007 年末に 6 台のパッケージ(全体の 10 分の 1)が出来上がり、これを実際の反陽子ビームでテストすることに成功した。3 週間の間反陽子消滅パイオン軌跡を再構築するところ(図8)まで行ければ上出来だと考えていたが、幸いコミッションを早急に達成し、限られた立体角ではあったがこの検出器を新しいプラズマ過程の物理測定に使うことができた[26]。

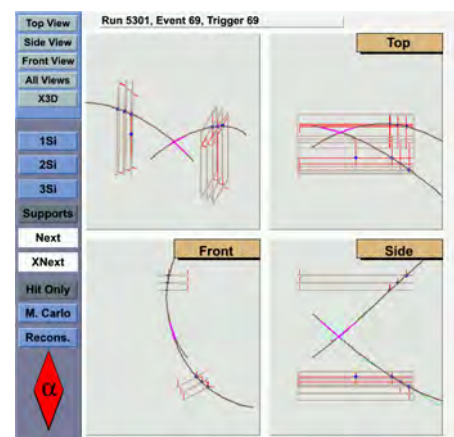


図8 Si 検出器による反陽子消滅事象検出[5]

図9に示すのは八重極磁場における損失過程の軸方向の反陽子消滅パーテックス位置である。通常のペニングトラップでは磁場(および電場)が軸対称性を持ち、このことが粒子封じ込めの重要な条件となっているが、八重極磁場はこの対称性を破り、粒子損失を誘導することが予測される。(この粒子損失は四重極磁場ではさらに深刻で、八重極

ではかなり軽減されている)。Si 検出器で測定した軸方向の反陽子消滅位置は、この粒子損失モデルの予測と一致する。さらに、消滅の方位方向と軸方向の二次元位置分布の予備的結果を図 10 に示す。このよう粒子損失が空間的に集中するというのもモデルの予測するところである。われわれはこのモデルに基づいて、プラズマ形状測定的手法を開発し[26]、これを新しいプラズマ操作法[33]の測定に用いることができた。

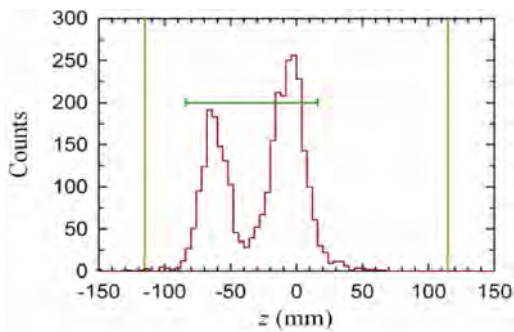


図 9 Si 検出器による 8 重極磁場中での反陽子損失過程[26]

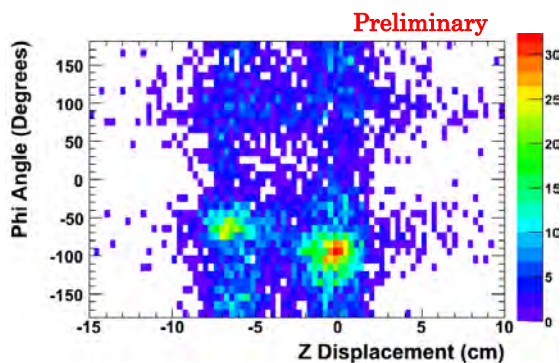


図 10 反陽子消滅の二次元位置分布の予備的結果[5]

さて、反陽子消滅事象を再構築する上で重要なステップの一つはパイオン・トラックのパターン認識である。反陽子消滅からは 3 個程度の荷電パイオンと 2 個程度の中性パイオンが生成されるが、後者からのガンマ線が超伝導磁石などの物質中で電子・陽電子に変換され、結局平均すると 10 個程度の荷電粒子が検出器を通り抜ける。現在トラック認識の効率を高めるために、解析ソフトウェアの改良を重ねている。また、磁場中でのトラックを測定するのに、検出器は 3 層しかないので、アラインメントが重要である。現在、この効率を上げるため、CMS 実験で使われるソフトを試しているところである。このあたり、色々和高エネルギー研究者のお知恵を拝借したいところである。

8. ALPHA 実験の現状と展望

ALPHA 実験は CERN から 2005 年 6 月に正式に承認された。その後 1 年ほどの間にほとんどなにもない状態から始

めて主要部分の建設を行い 2006 年 8 月にはファースト・ビームを迎えた。実験のサイクルが短いというのは、われわれのような小規模な実験の最大のメリットの一つであるが、それでもかなりの突貫工事であった。それ以来短期間の間に、ここに述べたように、磁気中性トラップ中での荷電粒子の安定性[29]、低磁場での反水素の生成の達成[30]、反陽子プラズマの新しい測定法[26]および操作法[33]の開発など、反水素トラップへ向けて重要なマイルストーンを達成してきた。また毎年ビームタイムの合間のシャットダウンの間にアグレッシブに装置の改良を重ねている。

今これを書いている段階(2008 年 6 月はじめ)で、われわれは 6 月後半にはじまる今年のランの準備中である。特に Si 検出器全体の約 2/3 が CERN に持ち込まれ、TRIUMF グループを中心にコミッションに忙しい(図 11)。今年のランではこの検出器を使って本格的な反水素トラップを試みる予定である。また、反水素トラップの成功時に備えて、水素レーザーの専門家を擁する ALPHA カナダグループは反水素超微細準位のマイクロ波分光のための開発を推進している。

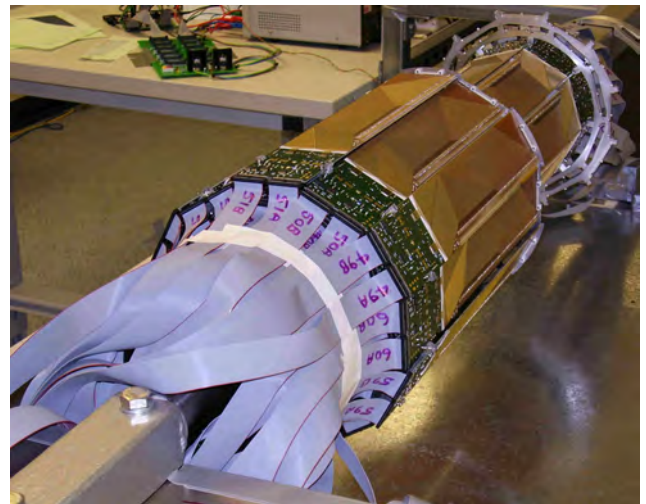


図 11 2008 年ラン用の Si 検出器

反水素トラップ達成、そして精密分光への道のりはまだまだ長いかもしれない。しかしわれわれは楽天的に努力をつづけるのである。

9. 最後に

本稿では、反水素研究の素粒子物理的意義、ATHENA 実験の反水素生成、および ALPHA 実験の現状についてくだけた話を交えながら解説した。その他、海外通信ということで日本との研究の違いなどについても書いて欲しいという依頼を受けたが、私は日本では主に高専で教育を受け、大学院から海外に出て物理を始めたので、日本での研究経験があまりない。私の印象としては、国ごとの違いよりも、

分野あるいはグループ間の違いの方が大きいのではないかとされる。ALPHAには幅広い分野の研究者がいるので、分野が違うことによる文化ギャップを埋めるのに苦労する側面もある。しかし、学際研究にはこのようなギャップを補って余りあるメリットがある。本稿でも触れたような低温物理から原子物理、レーザー・マイクロ波、プラズマ、素粒子まで、色々な分野の物理や実験技術を学べるのはこの実験の特権である。必要とあらば初級の教科書から紐解いて、他分野の勉強をしているのである。学生のときにもっとマジメに勉強をしておけば、と後悔もしますが。

反水素研究は競争が激しくプレッシャーもきついが、夢のある分野であり、実験をやっていることに楽しめる。新しい分野を一緒に切り拓いてやろうという気概のある日本の若い方が是非、留学やポスドクなどの機会をとらえて参加されることを期待して筆を置きたい[34]。

謝辞

私に反水素研究の機会を与えて頂いた早野龍五氏、山崎泰規氏、また反水素研究と一緒にやってきた船越亮氏をはじめ ATHENA、ALPHA 実験の同僚に感謝いたします。ALPHA-Canada はブリティッシュ・コロンビア大、カルガリー大、モントリオール大、サイモン・フレーザー大、ヨーク大、および TRIUMF の共同チームです。私の研究はカナダ NSERC および TRIUMF によってサポートされています。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へ感謝いたします。

参考文献

-
- [1] D. Kleppner, Phys. Today **52**, 11 (1999). 実は本人はこの話を否定しているようである。
- [2] Bauer *et al.*, Phys. Lett. B **368**, 251 (1996).
- [3] G. Blanford *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 3037 (1998). 実は Fermilab グループは CERN のイベントはほとんどバックグラウンドだったはずだと主張している。
- [4] M. Amoretti *et al.*, Nature (London) **419**, 456 (2002).
- [5] M.C. Fujiwara *et al.*, arXiv:0805.4082.
- [6] G. Lüders, Ann. Phys. **2**, 1 (1957).
- [7] R.F. Streater, A.S. Wightman, *PCT, spin statistics and all that*, (Benjamin/Cummings, 1964).
- [8] I. Mocioiu, M. Pospelov, Phys. Rev. D **62**, 107702 (2002).
- [9] R.C. Meyers, M. Pospelov, Phys. Rev. Lett. **90**, 211601 (2003).
- [10] D. Colladay, V.A. Kostelecky, Phys. Rev. D **55**, 6760 (1997); **58**, 116002 (1998).
- [11] V. A. Kostelecky, N. Russell, arXiv:0801.0287
- [12] M. Pospelov, Hyperfine Interact. **172**, 63 (2006).
- [13] A.D. Dolgov, Y.B. Zeldovich, Rev. Mod. Phys. **53**, 1 (1981); A.D. Dolgov, Phys. Rep. **222**, 309 (1992).
- [14] M. Fischer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 230802 (2004).
- [15] S.G. Karshenboim, hep-ph/0305205.
- [16] T.W. Hänsch and C. Zimmermann, Hyperfine Interact. **76**, 47 (1993).
- [17] M. Kobayashi, A.I. Sanda Phys. Rev. Lett. **69**, 3139 (1992).
- [18] この後 K 中間子系での実験が進展したが、それでも CPT 検証の精度は 10^{-5} 程度だとされる。Y. Takeuchi, S.Y. Tsai, Int. J. Mod. Phys. A **18**, 1551 (2003).
- [19] I.I. Bigi, Nucl. Phys. A **692**, 227c (2001).
- [20] H. Murayama, Phys. Lett. B **597**, 73 (2004).
- [21] われわれは反陽子捕獲効率を改善するための新たな冷却リング ELENA を提案している。
- [22] M.C. Fujiwara *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **532**, 229 (2004) [hep-ex/0401039].
- [23] 早野龍五, 堀正樹, 藤原真琴, 物理学会誌 **58**, 166 (2003).
- [24] 藤原真琴, プラズマ核融合学会誌 **80**, 1027 (2004).
- [25] M.C. Fujiwara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 065005 (2004).
- [26] G. Andresen *et al.*, Phys. Plasmas **15**, 032107 (2008).
- [27] M.C. Fujiwara *et al.*, submitted to Phys. Rev. Lett.
- [28] J. Fajans *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95**, 155001 (2005).
- [29] G. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 023402 (2007).
- [30] G. Andresen *et al.*, J. Phys. B **41**, 011001 (2008).
- [31] M.C. Fujiwara, Hyperfine Interact. **172**, 81 (2006).
- [32] M.C. Fujiwara, AIP Conf. Proc. **793**, 111 (2005): arXiv:hep-ex/0507082.
- [33] G. Andresen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, 203401 (2008).
- [34] 宣伝で恐縮ですが、私のグループでも給費付きの院生のポジションを随時募集しています！