

物質世界？ 反物質世界？

Keyword: 反物質科学

最近まで、反物質を大量に生成し、利用することは、サイエンス・フィクションの話題であった。しかし、CERNの反陽子減速器施設では、反水素原子の生成が日常となり、分光研究も可能となりつつある。水素原子と反水素原子のスペクトル比較によるCPT対称性の高精度検証、反物質の自由落下実験、反陽子原子を用いた基礎物理定数決定などの現状と、今後の展望を紹介する。

1. 反物質—CERNにおける7つの実験

最近CERNは、ヒッグス粒子の発見で注目されているが、世界で唯一「反物質」の研究が可能な場所でもある。これまでも反水素原子（反陽子と陽電子の束縛状態）の生成¹⁾などは世界中のメディアで大きく扱われ関心も高い。

反物質の研究の現場は「反陽子減速器」(図1)である。反陽子を捕獲・蓄積するために建設されたリングを、捕獲・減速用に改造したもので、2000年に実験が開始された。

減速器は円周188 mで、反陽子をエネルギー2.8 GeVで捕獲した後5.3 MeVに減速し、100 ns幅のパルスで取り出す。これが100秒周期で繰り返され、パルスあたりの反陽子数は約2,000万個である。

進行中の4つの実験と、準備中の3つの実験の一覧を、表1に示す。このうち、反水素原子の分光と反陽子の磁気能率測定は、CPT対称性の検証を目指したものである。場の理論では荷電共役(C)、空間反転(P)、時間反転(T)の3つの同時反転のもとで、物理法則は不変に保たれ(CPT定理)、その帰結として、粒子質量=反粒子質量、粒子寿命=反粒子寿命、などが導かれる。

CPT検証で重要なのが反水素原子である。水素原子の

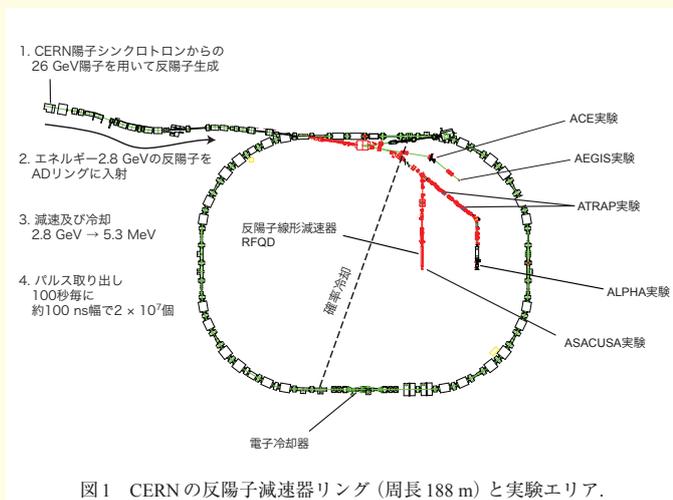


図1 CERNの反陽子減速器リング(周長188 m)と実験エリア。

1s-2s単位間隔はレーザー、基底状態の超微細分裂はレーザーを用いて、どちらも14桁以上の絶対精度で測定されている。その手法を反水素分光に適用すれば、高精度なCPT検証実験が可能となる(図2)。また、陽子と反陽子の磁気能率比較も、CPT検証手法として期待されている。

一方、反水素原子の自由落下実験は、反物質に対する弱い等価原理(WEP)の検証を目指したものである。反陽子のように電荷を帯びた粒子では電磁場の影響が巨大なため、自由落下実験は不可能であったが、反水素原子が生成できるようになり、自由落下実験が射程に入ってきた。では、反水素はどのように合成するのだろうか。

2. 反物質の合成

反水素原子は、反陽子と陽電子を電磁トラップ中で混合することで合成される。まず、反陽子減速器から取り出された反陽子を^{*1}減速材を通して電磁トラップ^{*2}で捕獲し、「電子冷却」する。^{*3}一方、²²Na線源で発生させた陽電子を希薄な窒素ガスを満たした電磁トラップ中で減速・捕獲する。

こうして準備した反陽子と陽電子を「入れ子トラップ^{*4}」中で混合すると反水素原子を合成できる。¹⁾

問題は、こうして作られた反水素原子は、たちまち電極の壁に衝突して消滅することである。分光を実現するには、低速反水素ビームを作るか、反水素原子を閉じ込める必要があるが、それが実現したのはごく最近のことである。

3. 反水素原子の閉じ込めと分光

ALPHA実験は、図3の装置を建設し、反水素の閉じ込めを目指した。反水素原子が磁気能率 μ を持ち、不均一磁場中で力 $F = \nabla(\mu \cdot B)$ を受けることを用いるのである。

図3の中心の「入れ子トラップ」で反水素を合成する。ソレノイド(図には示されていない)、八重極コイル、ミ

表1 CERNの反陽子減速器施設における実験。*印の実験は、準備中。これらの詳細については、総説2を参照されたい。

実験グループ	主目的
ATRAP	反水素原子のレーザー分光
ASACUSA	反陽子ヘリウムと反水素原子の分光
ACE	反陽子消滅の生物学的効果
ALPHA	反水素原子のレーザー分光
AEGIS*	反水素原子の自由落下
GBAR*	反水素原子の自由落下
BASE*	反陽子の磁気能率

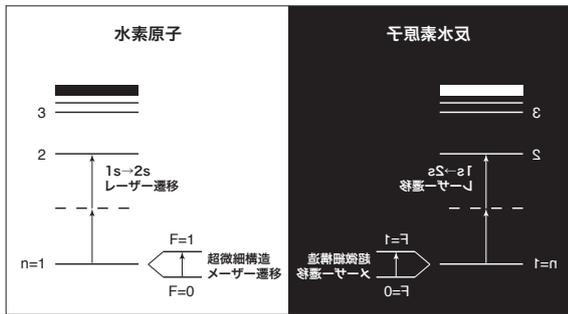


図2 水素原子の1s-2sレーザー二光子遷移周波数と、基底状態の超微細分裂周波数は、どちらも14桁を超える高精度で測定されている。反水素原子の対応する遷移周波数の測定によるCPT対称性検証は、反物質研究の重要な目標である。

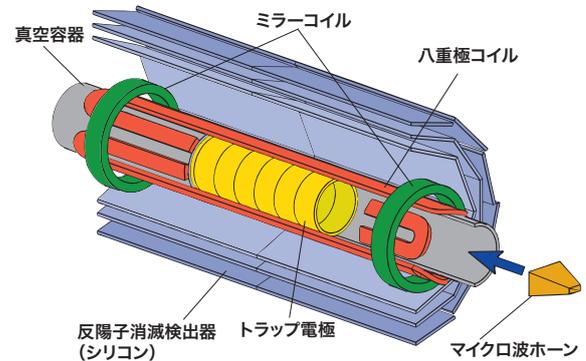


図3 反水素原子の閉じ込めと、マイクロ波共鳴に成功したALPHA実験装置。文献3より。

ラーコイルにより、装置の中心で $B_0 \sim 1$ T、コイル近傍で $B_1 \sim 2$ Tの不均一磁場が作られている。 $\mu(B_1 - B_0)$ は温度にすると約1 Kに相当する。

装置中心部分の温度は約10 Kであり、生成した反水素原子のほとんどは捕獲されず、瞬時に消滅する。しかし、十分長い時間待ってからミラーコイルの磁場を下げ、同期した消滅事象を探す手法で、少数ではあるが、反水素が捕獲されていることが示された。

更に、反水素原子の超微細分裂に対応するマイクロ波パルス照射し、陽電子スピンを反転させると、同期して反陽子消滅率が増加した。³⁾ 反水素原子の磁気能率が反転し、トラップから逃げたと考えられる。精度は低いですが、反水素原子のマイクロ波分光が可能になったのである。ALPHAは、1s-2sのレーザー分光を目指し、装置の改造を行っている。一方、ASACUSAは、非一様なカusp磁場トラップ中で反水素原子の生成に成功しており、⁴⁾ これを偏極ビームとして取り出してマイクロ波空洞に打ち込み、超微細分裂周波数を測定することを目指している。

4. 反陽子Heのレーザー分光と基礎物理定数

反陽子ヘリウム原子（ヘリウム原子の2個の電子のうち1個を反陽子で置換したもの）のレーザー分光は、ASACUSAが取り組んできた独自性の高い研究である。この奇妙な原子の分光によって、反陽子・電子質量比が、陽子・電子質量比に迫る 10^{-9} の相対精度で決定された。⁵⁾ これはCPT対称性の検証である一方、逆にCPT対称性を仮定すれば、基礎物理定数の一つである陽子・電子質量比の高精度決定とみなすこともできる。科学技術委員会CODATAは、後者の立場から、反陽子ヘリウム原子の実験結果を、基礎物理定数決定に用いている。⁶⁾ 精度向上の努力は更に続いており、近日中に反陽子・電子質量比精度が、陽子の

それを凌駕すると期待される。

5. 将来展望

反陽子減速器における実験開始から13年が経過し、ようやく反水素原子分光の可能性が見えてきた。これを受け、CERNは反陽子を5.3 MeVから0.1 MeVに電子冷却しながら減速する超低速反陽子リングELENAの建設を決め、数年後の完成を目指し、建設作業を進めている。完成すれば、反物質研究が一層加速されると期待される。^{*5)}

参考文献

- 1) 早野龍五, 堀 正樹, 藤原真琴: 日本物理学会誌 **58** (2003) 166.
- 2) M. Hori, *et al.*: Prog. Part. Nucl. Phys. **72** (2013) 206.
- 3) C. Amole, *et al.*: Nature **483** (2012) 439.
- 4) 黒田直史, 檜垣浩之, 山崎泰規: 日本物理学会誌 **66** (2011) 594; Y. Enomoto, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 243401.
- 5) 堀 正樹, 早野龍五: 日本物理学会誌 **67** (2012) 575; M. Hori, *et al.*: Nature **475** (2011) 4e84.
- 6) P. J. Mohr, *et al.*: Rev. Mod. Phys. **84** (2012) 1527.

早野龍五(東京大学理学系研究科)

(2013年8月3日原稿受付)

*1) ASACUSAは独自に建設した線形減速器によって、反陽子を5.3 MeV→0.1 MeVに減速した上で、トラップに打ち込んでいる。このため、他の実験よりも捕獲反陽子数が2桁近く多い。

*2) 超伝導ソレノイド磁場で、荷電粒子を磁場と垂直方向に閉じ込め、電極で磁場と平行な方向に「蓋」をしたもの。

*3) トラップにあらかじめ電子を入れておく。電子はシンクロトロン放射でエネルギーを失い「冷えて」いる。反陽子は冷えた電子とのクーロン散乱で冷却される。

*4) ソレノイド磁場と、フタコブラクダの背のような形状の静電ポテンシャルを重ねたもの。「こぶ」の部分に反陽子を、こぶの間の谷間に陽電子を捕獲し、徐々に両者を混合する。典型的には、 10^4 個の反陽子と 10^8 個の陽電子の混合で、毎秒100個程度の反水素原子が生成する。

*5) ASACUSAは独自に線形減速器を建設し、活用してきたが、ビーム冷却せずに減速するため、ビーム強度、輝度ともにELENAが優れている。