

レーザー光による「反物質原子」操作に初めて成功

百瀬 孝昌 〈カナダプリティッシュコロンビア大学化学科 momose@mail.ubc.ca〉

藤原 真琴 〈カナダ TRIUMF Makoto.Fujiwara@triumf.ca〉

物質が光を吸収したり放出したりするとき、エネルギーとともに運動量の吸収、放出が起こる。この運動量の変化のために、わずかではあるが、光から物質に力を及ぼすことができる。この効果を用いた光による物質の運動制御が、レーザー技術の発展に伴って可能になった。特に、レーザー光による原子操作および原子冷却の技術は、ノーベル賞級の現象の観測をいくつも可能にし、近年の原子物理学を大きく発展させてきた。

ディラックが導いた相対論的量子力学によって予言されたように、物質には必ずその反物質がある。例えば、陽電子は電子の反物質としてよく知られている。では、反物質も物質と同じように、光を使ってその運動を制御できるだろうか？

理論的には、反物質も物質と同じようにその運動を光で制御できると考えられている。しかしながら、我々の宇宙には反物質がほとんど存在しないため、このことを実験的に直接検証することは、これまでほとんど不可能と考えられていた。

CERN (欧州原子核研究機構) を実験拠点とする ALPHA 国際共同研究グループ (Antihydrogen Laser Physics Apparatus) は今回、このレーザー光の力を用いた反物質の操作に世界で初めて成功したことを報告した。最も簡単な原子である水素原子の反物質である「**反水素原子**」を実験室で作成し、緻密に制御されたレーザー光を照射することで、反水素原子の運動を通常の物質と同様に制御できることを実証した。さらに、この手法によって反水素原子を絶対零度付近にまで冷却できることが確認された。

ALPHA グループはこれまでに、反水素原子の電子遷移および超微細構造遷移の分光に初めて成功し、反水素原子の構造を精密に調べる新しい手法を示してきた。原子内の電子は、原子核と電子の相互作用に

よって特定のエネルギー構造を持つが、現在の標準模型理論では、水素原子と反水素原子は厳密に同じ周波数の光を吸収・放出することを予言している。そして、これまでの ALPHA グループの実験では、電子遷移において、12桁の精度の範囲内で遷移周波数は一致していた。

しかしながら、現在の宇宙空間で観測できるほとんどのものは物質の粒子でできており、それと同数あるはずの反粒子の物質はほとんど存在していない。このことから、物質と反物質の振る舞いにはわずかな違いがあるはずであり、その違いが遷移周波数の差として観測されると期待されている。

今回成功した**レーザー冷却**によって、反水素原子の運動をほぼ停止させることができ、レーザー光との相互作用時間を長くすることで、反水素の内部構造をより精密に測定できる。これにより、水素原子と反水素原子の遷移周波数の違いを、さらに一桁から二桁以上、精度を向上させて調べることが可能にした。

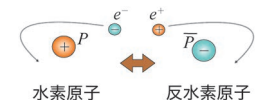
水素原子と反水素原子の挙動にほんのわずかでも違いが見つければ、物質と反物質の不均衡を説明する手がかりが得られる。さらに、宇宙を構成する基本粒子とそれらを支配する力を記述する物理学の理論「標準模型 (Standard Model)」の大前提である、**CPT 対称性**や、ローレンツ不変性が破れている可能性が出てくる。

今回の反物質原子のレーザー冷却の成功により、基礎物理学の根幹に関わる反物質研究が飛躍的に進展すると期待されている。例えば、現在 CERN で進行中の、地球の重力が反物質にどのように力を及ぼすかを調べる実験を、さらに高精度で行えるようになった。また反物質を用いた新しい量子技術の開発、あるいは反物質でできた分子の創生など、様々な反物質応用研究の可能性が今後新たにひらけると期待されている。

用語解説

反水素原子：

水素原子は、正電荷を持つ陽子一個と負電荷を持つ電子一個がクーロン場で安定構造を保った原子である。これに対し反水素原子は、陽子の反物質である負電荷を持つ反陽子一個と、電子の反物質であるポジトロン (陽電子) 一個からなる、水素原子の反物質原子である。



ALPHA グループでは、高エネルギー粒子の衝突で発生した反陽子を捕捉し、ナトリウムの崩壊でできる陽電子と結合させて、水素原子の反粒子を生成している。生成される反水素原子は、通常物質と接触して対消滅してしまわないように、磁場で作った捕獲装置に閉じ込めている。

レーザー冷却：

レーザー冷却とは、指向性の良いレーザー光を使って気体原子の温度を絶対零度近くまで冷却する手法のことをいう。原子が光を吸収・放出する過程を繰り返すことによって、光の運動量を原子に受け渡す効果を使っている。

CPT 対称性：

CPT 対称性は電荷 (C)、パリティ (P)、および時間 (T) を同時に反転させる変換に対して物理法則が対称であることをさす。現在の物理理論では、「全ての物理現象で CPT 対称性が保存される」という CPT 定理が成り立っていると考えられている。