量子電磁力学

陽子のサイズはもっと小さい!?

A chink in the armour?

JEFF FLOWERS 2010年7月8日号 Vol. 466 (195-196)

エキゾチック原子系の分光学によって、陽子の大きさが測定された。
測定結果はこれまでにない高い精度で得られたが、従来の測定方法で得られた値とは一致しなかった。

米国の著名な物理学者リチャード・ファインマンはかつてこんな皮肉をいった。「物理学者たちの研究がこれほどうまくいっているのには訳がある。彼らは水素原子とヘリウムイオンを研究し、そこでやめたからだ」。ドイツのマックス・プランク量子光学研究所のRandolf Pohlらは今回、*Nature* 2010年7月8日号213ページに掲載された研究で水素原子を再び調べた[1]。正確にいえば、調べたのはエキゾチックな（つまり軌道電子を電子以外の荷電粒子で置き換えた）種類の水素原子だ。そして驚くべき結果を得た。

彼らは陽子の大きさを測定した。この測定は、光と物質がどのように相互作用するかについての理論、量子電磁力学（QED）の厳密なテストになる。量子電磁力学は、あらゆる物理理論の中で最も正確に物理量を予言した実績があるものの、いくつかの計算上のテクニックに基づいており、そのテクニックの正当性は理論が作られてから60年以上経っても完全には立証されていない。Pohlらの測定は、以前のどの方法よりも高感度な新しい方法を使った。その結果は、これまで最も正確とされてきた方法で得られた結果と有意に差があり、両方の測定方法の基礎になっている量子電磁力学の計算に疑いを抱かせる。

量子論は主に元素、特に原子状態の水素（陽子と電子の束縛状態）のスペクトル線を説明する試みのなかで発展した[2]。水素は単純な2体系であり、ほかの多電子原子よりも著しく単純な構造をもつ。とはいえ、理論的に解明するには数十年の研究が必要だった。

1947年に米国の物理学者ウィリス・ラムとロバート・レザフォードによって行われた高精度な水素分光は、水素原子の当時の理論的記述は不完全であることを示し[3]、量子電磁力学という新理論につながった[4]。新しい理論の予言の中には、原子の2つの電子軌道のエネルギー準位がわずかに異なるはずだという指摘があった。それまでの理論ではこの2つの軌道のエネルギー準位は同じだとされていた。ラムとレザフォードはこのエネルギー準位の差を実験で測定し、現在ではこの差はラムシフトとよばれている。量子電磁力学は非常な精度で物理量を予測し、その後発展した「場の理論」の原型でもあった。しかし、その数学的な基礎は盤石ではなく、実験による検証はまだ活発に続いている。

Pohlとスイスのポール・シェラー研究所の共同研究者たちは、「ミューオン水素」でラムシフトを測定した[1]。ミューオン水素というのは、通常の水素原子の電子をミューオン（ミュー粒子）で置き換えたものだ。ミューオンは電子と似た粒子で、電子と同じ電荷をもち、電子の207倍重く、不安定だ。ミューオンの質量が重いために、ミューオン水素の原子としての大きさは水素よりも小さく、ミューオンは陽子とずっと大きな相互作用をする。このため、水素を使うよりも高精度に陽子の構造を探ることができる。ミューオン水素を使った実験は、

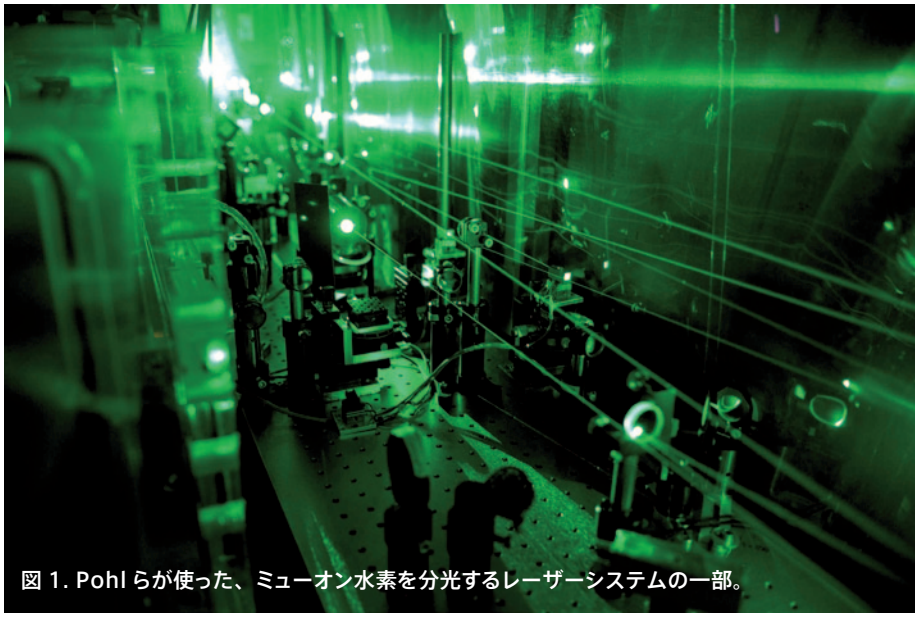

図1. Pohlらが使った、ミューオン水素を分光するレーザーシステムの一部。

F. REISER & A. ANTOGNINI, PAUL-SCHERRER-INST.

 ©2010 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

測定の不確かさを著しく小さくする可能性があるとして以前から提案されていたが、実験がとても難しいために今まで成功していなかった。

ポール・シェラー研究所には強度の高いミューオン源がある。ミューオンのパルスは水素ガスの中で止められ、その一部がミューオン水素を作る。そのさらに一部は比較的長く生き延びる状態、準安定状態になる。準安定状態の寿命は約1マイクロ秒だ。この寿命の間にミューオン水素は強いレーザーパルスにさらされる（図1）。

レーザーの周波数が正確に調整されていれば、ミューオン水素はこのパルスによって最初の準安定状態からラムシフト分だけエネルギーの高い状態へ遷移する。エネルギーの高い状態はすぐにX線光子を放出して基底状態に移るので、このX線を検出することで、この遷移現象を検出することができる。検出を狭い時間枠で行えば、バックグラウンドのX線やほかに生まれた意図しない状態やミューオンの崩壊などのシグナルから、レーザーで誘起されたX線放出を見分けることができる。レーザーの周波数を変えながら、ミューオン水素とレーザーを何度も繰り返して相互作用させることにより、遷移エネルギーを高精度に測定することができ、その結果から陽子の大きさを計算できる。

陽子の大きさは、以前は、電子を陽子で散乱させて直接的に測定するか、水素原子の分光によって間接的に測定されていた。電子散乱の結果の分析は複雑で、データはあまりよく一致しない。それでも、スイスの物理学者Ingo Sickが世界各地で測定されたデータを集め、最も確からしい数値を報告している[5]。国際科学会議（ICSU）科学技術データ委員会（CODATA）は、2006年版のレポートで、水素分光のデータを収集するとともに、さらに、それとSickのまとめた電子散乱データを組み合わせた結果も求めた[6]。Pohlらの新しい結果は、こうした以前の方法を組み合わせた結果と比べ、有意な差（標準偏差の5倍）があったのだ（図2）。

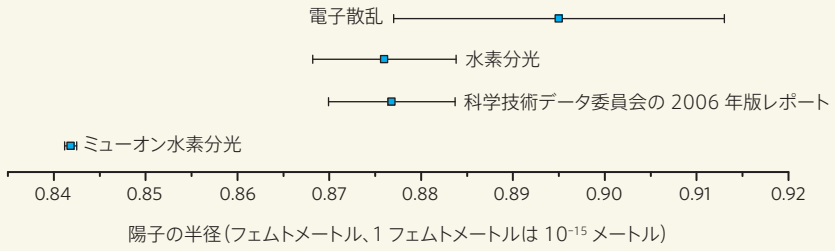

図2. 陽子の大きさ（半径）。陽子の大きさの測定方法にはさまざまなものがあり、それらの測定結果の比較。ここに示したのは、電子散乱[5]、水素分光（科学技術データ委員会の2006年版レポートによる[6]）、両者の組み合わせ（同）、そしてミューオン水素分光によるPohlらの新しい測定結果[1]である。バーは1標準偏差の不確かさを示す。ミューオン水素による結果と科学技術データ委員会の結果（それまでのすべての測定をまとめた値）には、標準偏差の約5倍の開きがある。

この不一致の原因は今のところわかっていない。電子散乱は最も直接的な測定方法だが、そのデータの解釈には疑いを差し挟む余地がある。水素分光とミューオン水素分光の場合、そのいずれの場合も、実験データから陽子の大きさを求めるためには長く複雑な量子電磁力学上の計算が必要だ。Pohlらは、遷移エネルギーの測定結果を陽子の大きさに結びつける方程式の導出において、30を超える項を考慮した。これほど複雑な計算では誤りの可能性はいつもある程度存在し、その可能性の大きさを見極めるのは難しい。水素分光では、陽子の大きさとリュードベリ定数を導き出すため、さまざまな遷移エネルギーが測定されている。水素においては、今回報告されたミューオン水素と異なり、実験での遷移スペクトル線幅よりも小さな測定精度が必要になる。だから、遷移の詳細を高度の正確さでモデル化しなければならない。これも誤りの原因となりうる。

今回の不一致の解決は、水素、ミューオン水素、ミューオン重水素のほか、今回と同様の「単純原子系」[7]、つまり束縛された2粒子の系についての今後の研究によってなされる可能性が最も高い。こうした系は単純で、計算はもっと複雑な系に比べれば容易なため、その物理現象を調べることが可能だ。異なる系では異なる側面が現れる。水素原子は、最もよく知られた2体系だ。ミューオニウム（1個の反ミューオンと1個の電子の束縛状態）、ポジトロニウム（1個の陽電子と1個の電子の束縛状態）などの系も研究されており、これらの研究は原子核をもたない系の量子電磁力学を調べることになる。ヘリウムイオン（1個のアルファ粒子と1個の電子）と反水素（1個の反陽子と1個の陽電子）の研究も基礎的な物理学に関する理解をさらに深めてくれる。

もしも今回Pohlらが行った高精度の測定や計算に誤りが見つからず、彼らの実験結果がこれまでの結果と一致しないことが確かめられれば、彼らは巨大加速器の高エネルギー衝突によらずに、素粒子物理学の標準模型では説明できない現象を発見したことになるのかもしれない。■

（翻訳：新庄直樹）

Jeff Flowers、国立物理学研究所（英国）。

1. Pohl, R. *et al. Nature* **466**, 213–216 (2010).
2. Rigden, J. S. *Hydrogen: The Essential Element* (Harvard Univ. Press, 2002).
3. Lamb, W. E. Jr & Retherford, R. C. *Phys. Rev.* **72**, 241–243 (1947).
4. Dyson, F. J. *Phys. Rev.* **75**, 486–502 (1949).
5. Sick, I. *Phys. Lett. B* **576**, 62–67 (2003).
6. Mohr, P. J., Taylor, B. N. & Newell, D. B. *Rev. Mod. Phys.* **80**, 633–730 (2008).
7. Flowers, J. L., Margolis, H. S. & Klein, H. A. Contemp. Phys. **45**, 123–145 (2004).

©2010 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved