

反水素原子のラムシフト分光による反陽子荷電半径の測定

Lamb shift measurement of antihydrogen atom for determining the charge radius of antiproton

(原子衝突学会推薦)

代表研究者 東京大学 黒田 直史 The University of Tokyo Naofumi KURODA
協同研究者 チューリッヒ連邦工科大学 クリヴェッリ パオロ ETH Zurich Paolo CRIVELLI

Precise spectroscopic study of the Lamb shift in antihydrogen atoms will extract the charge radius of antiproton, which has never been experimentally investigated. The measurement has been planned at a beamline at CERN AD ELENA (Extra Low ENergy Antiproton ring) which will provide intense low energy antiproton beams. At one of the beamlines, antihydrogen atoms in excited states will be produced via a charge exchange reaction between antiproton and positronium (a bound state of e^- and e^+). We developed the microwave system and the Lyman alpha detector to perform the Lamb shift spectroscopy. The beam of 2S state antihydrogen atoms is quenched by a strong electric field, and the emitted Lyman alpha light is detected. When a microwave irradiated on antihydrogens is tuned to the Lamb shift, which stimulated transitions from the metastable 2S state into the short-lived 2P state. Thus, the number of the event with the Lyman alpha is decreased. Since the AD ELENA has not been in operational yet, we have constructed a normal hydrogen source to perform the Lamb shift spectroscopy of hydrogen atoms as a "control" experiment.

研究目的

水素原子の反物質である反水素原子の $2S_{1/2}$ - $2P_{1/2}$ ラムシフトの分光を通じて陽子の反粒子である反陽子の荷電半径を初めて実験的に測定するとともに、陽子との比較による CPT 対称性の検証を行うことが本研究の目的である。

反水素原子の分光実験は、近年精力的に行われており、1S-2S 間遷移や 1S-2P 間遷移、そして基底状態超微細構造などが実際に測定されている。本研究で初めて測定しようとする反水素原子の 2S-2P 間ラムシフトからは、反水素原子核、すなわち反陽子の電氣的な広がり(荷電半径)を得ることができる。陽子の荷電半径と比較することで大きさについての CPT 対称性の検証が行える[1]。

通常の水素原子のマイクロ波によるラムシフトの

直接測定では3%の精度で陽子の荷電半径が得られている[2, 3]。複数の光学的遷移を組合せて導出する方法もあり、2%の精度で荷電半径が求められている[4]。荷電半径を知る他の実験手法として、電子線による散乱実験があり、分光実験と同程度の精度が得られ[5]、互いに一致しているとみられた。近年、ミュオンと陽子の束縛状態であるミュオン水素原子の分光学的研究から導出された陽子の荷電半径がこれまで知られていたものよりも数%程有意に小さいことが示されており[6]、核子の大きさ自体、重要な研究対象となっている。

研究経過

本研究は、チューリッヒの P. Crivelli 氏らとの共同研究であり、反水素原子のラムシフト分光[7,8]の

ための装置を開発した。この装置を用いた分光手法は、水素原子において初めてラムシフトを測定した原子線法[2]を元にしたものを想定している。これは、反水素原子という、限られていてかつ通常物質に触れると消滅してしまう反物質に適用できる手法である。

反水素原子は、電子と陽電子の束縛状態であるポジトロニウムと反陽子の荷電交換反応によって生成されるものを利用する。反陽子については CERN の ELENA を活用する。これまでの反水素や低速反陽子をつかった実験では、同じく CERN の AD (反陽子減速器)を用いていた。AD は $100 \text{ MeV}/c$ 、運動エネルギーにして 5.3 MeV の反陽子ビームを供給していたが、反水素原子の合成に使うには、エネルギーがあまりにも高過ぎ、効率的ではなかった。新たに建設された ELENA は強度をほぼ保ったままエネルギーを 100 keV にまで下げ、 200 ns ほどのパルス状のビームとして供給する。この大強度の低エネルギー反陽子ビームを静電的に 6 keV まで減速し、ポジトロニウムと衝突させる。

一方のポジトロニウムは、電子加速器からの 9 MeV の電子ビームをタングステン標的に照射して陽電子を生成し、それを一旦イオントラップ中に蓄積する。十分な数が溜まるとそれをシリカ標的に打ち込んでポジトロニウムを生成する。ポジトロニウムの寿命程度の時間のあいだに反陽子ビームが交叉できるようにタイミングを合わせている。

反陽子とポジトロニウムの荷電交換反応で生成された反水素原子の量子状態は分布をもつが、本研究に必要な $2S$ 状態の収量はちょうどこの 6 keV の衝突エネルギー付近でピークとなる。

ポジトロニウムと反応しなかった反陽子、 $2S$ 状態を含む反水素原子、それにごくわずかの反水素イオンがほぼ 6 keV のエネルギーのまま標的から出てくる。静電的にそれらを分離し、それぞれ別の実験に供される。本研究にはこの中性の反水素原子ビームが用いられる。

ラムシフト分光装置は、マイクロ波を印加し、 $2S_{1/2} \rightarrow 2P_{1/2}$ への遷移を起こさせる部分と、ライマン α 光を検出する部分からなる。後者は、 $2S$ 状態の反水素原子に強い電場をかけることで $2S_{1/2}$ と $2P_{1/2}$ のシュタルク混合を起こさせて $2P_{1/2}$ から基底状態へ脱励起させ、その際に出る真空紫外光(ライマン α 光)を検出するものである。MCP(Micro-Channel Plate) の表面

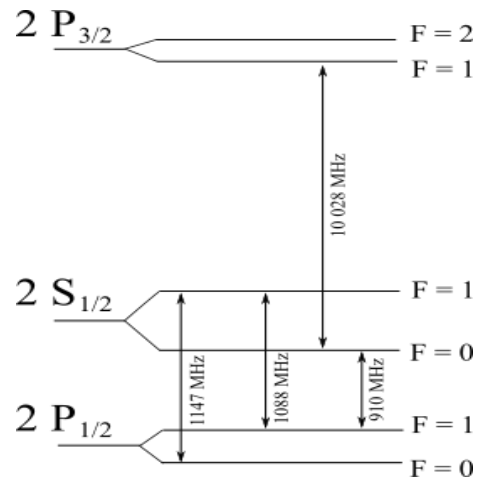


Figure 1 A schematic diagram of hyperfine structure for (anti-)hydrogen atom in n=2 state

を CsI で覆っており、紫外光があたると出る光電子を MCP で増幅、検出できる。検出効率は 40%程である。ビームを中心軸にした四角柱の四つの各側面に正方形の MCP を配置して 46%をカバーできるようになっている。

マイクロ波装置は、ライマン α 光検出器の手前に設置されている。平行に配した無酸素銅の極板で構成され、導波管のようになっている。反水素合成チャンバーに直接接続するため、 10^{-10} mbar 程度以下の真空が保たれている。ビームに対して上下に 30 mm の間隔で設置された極板それぞれに位相を反転させた RF を印加する。極板間には最大 10 V/cm 程度の電場がかかり、 $2S_{1/2}$ から $2P_{1/2}$ への遷移を誘起する。遷移がおこると $2P_{1/2}$ 状態は短寿命なため、ライマン α 光検出器に到達するまえに $1S$ 状態へ脱励起する。このため、ライマン α 光検出器では見えなくなる。印加するマイクロ波の周波数を変えていき、ライマン α 光のみ見えなくなる箇所を探すことでラムシフトに対応する周波数を求めることができる。

開発した装置でのラムシフトの測定精度は、数百から千 ppm 程度に限られると予想される。これは、 $2S$ および $2P$ 状態それぞれに伴う超微細構造による(図 1)。これらのエネルギー間隔は近接しており、実際にはこれらの超微細準位が重なったものが測定されることで線幅が広がり上記の測定精度に帰結するとみられる。

そのため、追加の共振器を用いて $2S$ 状態のうち $F=1$ のものは先に脱励起させてしまう。図 1 にあるように $2S_{1/2}$ の $F=1$ から $2P_{1/2}$ の $F=0$ および 1 へは、

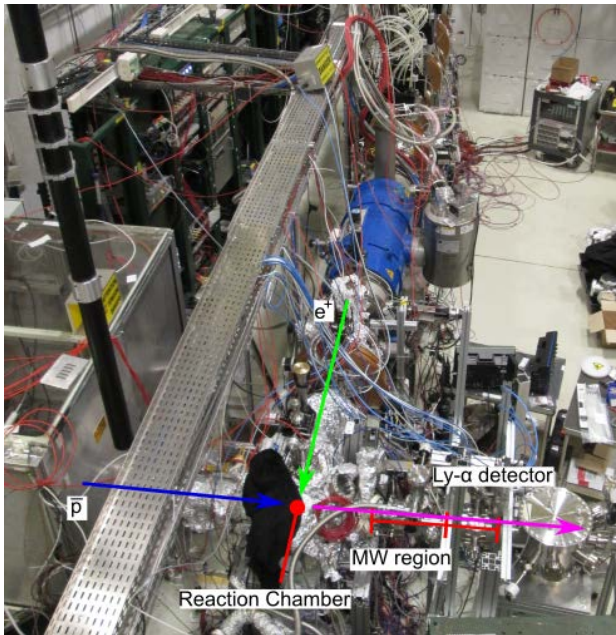


Figure 2 The experimental setup for the microwave spectroscopy at CERN

1088MHz, 1147MHz の遷移周波数に対応し、 $2P$ 状態の自然幅もあるため 1110MHz 程度のマイクロ波でこの二つを遷移させられる。装置では、振幅 20V/cm 程度がかかり、 $F=1$ の状態を 1%以下にできる。これによって 910MHz 程度の周波数に対応する $2S_{1/2} F=0$ から $2P_{1/2} F=1$ 間の遷移だけを測定できる。

2018 年夏に、開発したこの測定装置一式を図 2 に示すように CERN の反水素ビームラインに設置した。図 2 の上から陽電子ビームが反水素合成チャンバー (Reaction Chamber) 内のシリカ標的に打ち込まれ、ポジトロニウムが生成される。これに合わせて ELENA からの反陽子ビームが図の左から入射し、ポジトロニウムとの衝突による荷電交換反応で反水素原子が生成される。

ELENA は 2016 年から建設が始まり、やや遅れたものの 2018 年初めに建設は完了した。同じ 2018 年より水素負イオンや反陽子での試運転が行われ、反陽子の 5.3 MeV から 100 keV への減速、100keV での電子冷却などの調整が続けられた。本研究で使用するビームラインへの反陽子ビーム供給は 2018 年の夏と予定されていたが、結局ユーザへの供給はなく 2018 年の運転は終了した。そのため、反水素原子ビームは得られていない。

そこで我々は、反陽子ビーム供給が開始されるまで水素原子のラムシフトの測定を行うこととし、ビ

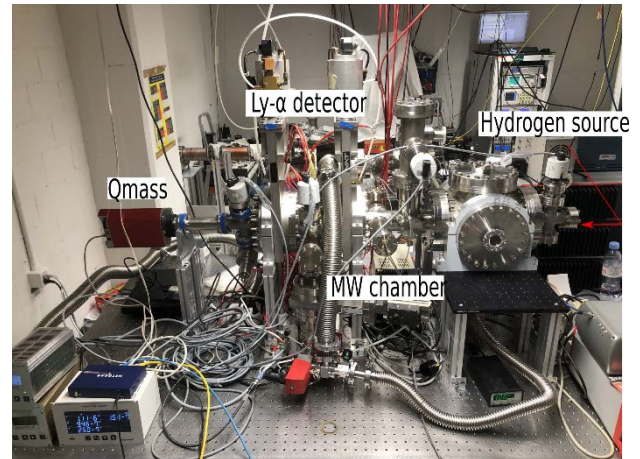


Figure 3 The microwave system with the hydrogen source

ームタイム終了後に装置を取り外して、2019 年の冬にチューリッヒに持ち運んだ。

図 3 にあるように、現在、マイクロ波装置とライマン α 光検出器、また水素原子を検出するための四重極質量分析計を一つにして水素原子源につなげるようになっている。水素原子源は、水素分子を解離させて生成した基底状態の水素原子線を出す。分光に必要な励起状態原子を得るために、マイクロ波装置の手前で電子線衝撃によって励起状態を得る仕組みに作りかえている。また、バックアップとして、共同研究者がポジトロニウム分光実験に用いているライマン α レーザーも打ち込めるようにしてあり、レーザーでの励起も試せるようになっている。

考察

ELENA の正式稼動が当初の予定より遅れ、反水素原子の測定に進められていないが、前述のように ELENA が稼動し反陽子ビームの供給が始まるまでの間、水素原子を用いて設計精度での分光を確かめる実験を進めることとした。現在一次帰国しているが、再渡航して図 3 のセットアップで水素原子のラムシフト分光を行う。

反水素原子の分光で見積られる不確かさの最大のもは統計であるが、水素原子では統計による不確かさは小さくでき、系統的なシフトの要因として AC シュタルクシフトがまず挙げられる。これは 100kHz のオーダーである。一次と二次のドップラーシフトはそれよりも小さいとみられる。超微細構造準位を選択した状態での線幅は 160MHz 程度であり、

水素原子源での測定ではラムシフトを少なくとも 100ppm の精度で、陽子荷電半径に直すと 10%での測定が可能と見積っている。これは水素原子でのラムシフト直接測定のこれまで報告された最も精確な測定の数倍程度である。

反陽子ビームの供給が始まり、反水素原子での測定を行う場合、統計が重要な要因になる。ELENA の実質稼働率が 80%程度と仮定して、一日のビームタイムでおよそ 100 イベント弱と想定され、ELENA の運転二ヶ月分程度で上に挙げた 100ppm でのラムシフト測定が可能になると見積っている。

参考文献

1. V.A. Kostelecky and A.J. Vargas, "Lorentz and CPT tests with hydrogen, antihydrogen, and related systems", Phys. Rev. D, 92:056002 (2015).
2. W.E. Lamb and R.C. Retherford, "Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method", Phys. Rev., 72:241 (1947).
3. S.R. Lundeen and F.M. Pipkin, "Separated Oscillatory Field Measurement of the Lamb Shift in H, n=2", Metrologia, 22:9 (1986).
4. S.G. Karshenboim, "Precision physics of simple atoms:

QED tests, nuclear and fundamental constants", Phys. Rep., 422:1 (2005).

5. G.G. Simon, Ch. Schmitt, F. Borkowski, and V.H. Walther, "Absolute electron-proton cross sections at low momentum transfer measured with a high pressure gas target system", Nucl. Phys. A, 333:381 (1980).

6. R. Pohl et al., "The size of proton", Nature, 7303:213 (2010).

7. P. Crivelli, D. Cooke, M.W. Heiss, "Antiproton charge radius", Phys. Rev. D, 94:052008 (2016).

8. N. Kuroda, D.A. Cooke, P. Crivelli, H. Higaki, G. Janka, Y. Matsuda, B. Radics, and C. Regenfus, "Lamb shift measurement of antihydrogen for determining the charge radius of antiproton and a stringent test of CPT symmetry", J. Phys. Conf. Ser., 875:022054 (2017).

研究の発表

口頭発表

1. 黒田直史、西諒真、松田恭幸、Paolo Crivelli, Gianluca Janka: 反陽子荷電半径測定のための反水素原子ラムシフト分光にむけて、日本物理学会年会、福岡、2019 年 3 月