

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料  
〔研究進捗評価用〕

平成20年度採択分

平成23年5月25日現在

研究課題名（和文） **エキゾチック原子の分光による  
基礎物理量の精密測定**  
研究課題名（英文） Precision measurement of fundamental  
physical constants using exotic-atom  
spectroscopy

研究代表者

早野 龍五 (HAYANO RYUGO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授



研究の概要：エキゾチック原子とは、原子核に反陽子などの負電荷粒子が束縛された奇妙な原子で、その精密分光によって種々の基礎物理量が決定できる。本研究では、反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光による、（反）陽子・電子質量比と、K中間子ヘリウム原子のX線分光によるK中間子と原子核の相互作用パラメータの精密測定を行う。

研究分野：原子核物理学実験

科研費の分科・細目：物理学 - 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理 (4301)

キーワード：反陽子、K中間子、レーザー分光、X線分光、CERN、J-PARC

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 反陽子ヘリウム原子（ヘリウム原子核+電子+反陽子の三体系）のレーザー分光による反陽子・電子質量比測定精度が相対標準不確かさが $10^{-9}$ に近づき、科学技術データ委員会（CODATA）が4年ごとに更新している基礎物理定数への貢献が可能になりつつあった。  
(2) “K中間子と原子核の深い束縛状態（強い相互作用による分子状態）存在の有無が論争になっている。それを理解する基本的な量として、K中間子ヘリウム4原子のX線分光を行い、K中間子と原子核のポテンシャルが深いことを示唆した以前の実験が誤りであることを示した。理解を完全なものにするため、ヘリウム3での測定が待たれていた。

### 2. 研究の目的

(1) CERN 研究所の反陽子減速器において、反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光を行い、基礎物理定数の一つである陽子・電子質量比を世界最高精度で決定し、科学技術データ委員会（CODATA）による基礎物理定数推奨値の決定に貢献することを目指す。  
(2) J-PARC 大強度陽子加速器施設において、K中間子ヘリウム3原子のX線精密分光実験を行い、K中間子と原子核の強い相互作用パラメータを決定する。これは現在論争になっている“K中間子と原子核の深い束縛状態”を論じる上で欠かせない測定である。

### 3. 研究の方法

(1) 反陽子ヘリウム原子のレーザー分光を、スイス CERN 研究所の反陽子減速器施設(AD)において行う。従来の研究で分光精度の限界要因であったドップラー幅を減らすため、二光子分光などの各種手法の開拓と、安定化レーザーの開発を行う。  
(2) K中間子ヘリウム-3原子のX線分光を、J-PARCにおいて行う。これはJ-PARCでK中間子ビームを用いた最初の実験となる予定である。K中間子用ビームライン(K1.8BR)と、液体ヘリウム3標的を建設し、高分解能シリコン・ドリフト X線検出器（SDD）によって高精度分光を行う。

### 4. これまでの成果

(1) 反陽子ヘリウム原子の従前の分光法で精度向上の妨げとなっていたドップラー幅を減少させるため、下図に示す二色二光子分光法を開発した。その結果、図2に示すように、単光子の場合と比較して線幅を大幅に減少することに成功し、分光精度が高まった。

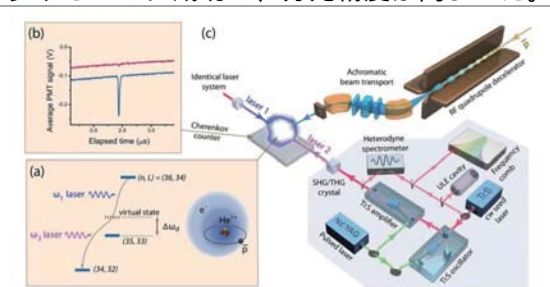


図1：反陽子ヘリウム原子二光子分光法と装置模式図

〔 4 . これまでの成果 ( 続き ) 〕

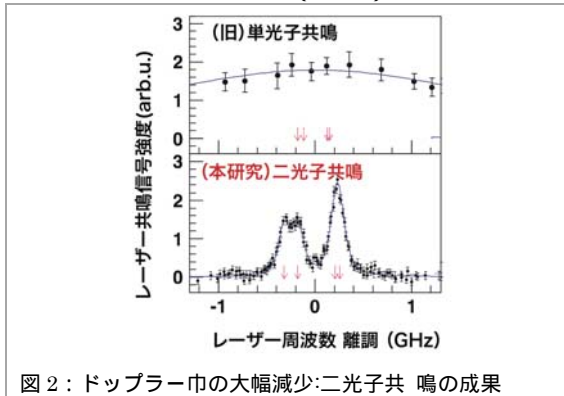


図 2 : ドップラー巾の大幅減少:二光子共 鳴の成果  
これに基づき、(反)陽子・電子質量比を  $M_p / m_e = 1836.1526736 \pm 0.0000023$  ( 相対標準不確かさ  $1.2 \times 10^{-9}$  ) と決定した ( 図 3 ) 。この値は基礎物理定数推奨値 ( CODATA 2010 ) の決定に用いられることが確定している ( 当初目標を達成 ) 。

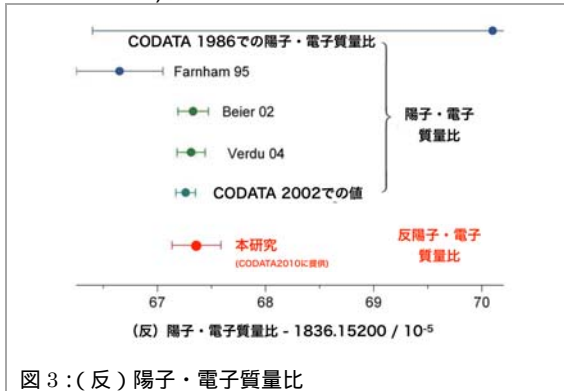


図 3 : ( 反 ) 陽子 ・ 電子質量比

( 2 ) K 中間子ヘリウム原子に関しては、( a ) J-PARC の K1.8BR ビームラインを建設し、K 中間子の取り出しに成功し、ビームラインの調整を終えた。( b ) 液体  $^3\text{He}$  標的を製作し、冷却・液化試験を行い、安定稼働することを確認した。( c ) X 線測定用のシリコン・ドリフト検出器 ( SDD ) および前置増幅器を液体  $^3\text{He}$  標的のクライオスタットに組み込み、冷却した状態で J-PARC でビームテストを行い、所期の分解能を達成していることを確認した。しかし、J-PARC 加速器のビームが実験開始可能強度に達しないまま、東日本大震災で J-PARC が被災した。

J-PARC での実験と平行し、SDD 試験を兼ねてイタリアの DA NE 加速器でも、K 中間子原子の X 線分光実験を推進してきた。当初は J-PARC 実験が先に完了する予定であったが、結局イタリアにおける測定が ( 精度は J-PARC でめざしたレベルに達しないものの ) 先に実現した。

5 . 今後の計画

H22 年度に増額申請を行って、標的ヘリウムガスを 1.5K に冷却するための装置改造を行った。その効果は絶大で、図 4 に示すようにドップラー幅が大幅に減少し、分光精度が

向上した。現在、この標的を用いて反陽子ヘリウム 4 原子と 反陽子ヘリウム 3 原子のすべての共鳴線 ( 12 本 ) のデータを収集しており、完成すれば ( 反 ) 陽子 ・ 電子の質量比精度は現在の数倍向上する。

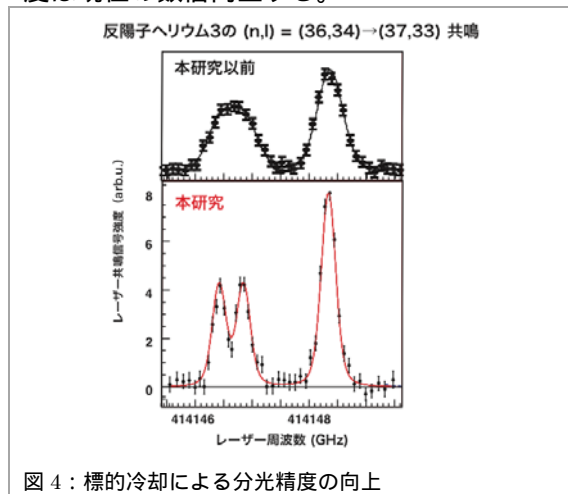


図 4 : 標的冷却による分光精度の向上

6 . これまでの発表論文等 ( 受賞等も含む )  
( 研究代表者は二重線、研究分担者は一重線、連携研究者は点線 )

- ( 1 ) 早野龍五、「反陽子ヘリウム原子の研究」にて 2008 年度仁科記念賞受賞。
- ( 2 ) 早野龍五、「反陽子ヘリウム原子の発見と研究」にて第 62 回中日文化賞。
- ( 3 ) M. Hori, A. Soter, D. Barna, A. Dax, R. Hayano, 他 7 名, Sub-Doppler two-photon laser spectroscopy of  $p\text{He}^+$  and the antiproton-to-electron mass ratio, Nature 掲載決定
- ( 4 ) M. Bazzi, G. Beer, L. Bombelli, A.M. Bragadireanu, M. Cargnelli, G. Corradi, C. Curceanu, A. d'Uffizi, C. Fiorini, T. Frizzi, F. Ghio, B. Girolami, C. Guaraldo, R.S. Hayano, 以下 23 名, First measurement of kaonic helium-3 X-rays, Physics Letters B 697 (2011) 199-202.
- ( 5 ) R.S. Hayano and T. Hatsuda, Hadron properties in the nuclear medium, Reviews of Modern Physics 82 (2010) 2949-2990.
- ( 6 ) R.S. Hayano, Spectroscopy of antiprotonic helium atoms and its contribution to the fundamental physical constants, Proc. Japan Academy Series B 86 (2010) 1-10.

ホームページ等

- <http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/hayano>
- <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/story/rigakuru/world/04/01.html> ( 「 反陽子の質量を高精度に計測する 」 東大理学部 HP )
- <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/movie.html?name=hayano20110304> ( 東大理学部ビデオ )