

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20740164
 研究課題名（和文）
 周波数コムを用いた精密レーザー分光によるベリリウム不安定同位体の荷電半径測定
 研究課題名（英文）
 Charge radii measurements for beryllium isotopes by precision laser spectroscopy using a frequency comb
 研究代表者
 高峰 愛子 (Takamine Aiko)
 独立行政法人理化学研究所・低速 RI ビーム生成装置開発チーム・基礎科学特別研究員
 研究者番号：10462699

研究成果の概要（和文）：

ベリリウム同位体一個イオンの原子準位を超精密レーザー分光することにより、中性子ハロー核 Be-11 を含むベリリウム同位体の二乗平均荷電半径を核モデルに依存することなく系統的に決定した。分光測定と同時にレーザー周波数を周波数コムで測定することにより、Be⁺-7,9,10,11 の 2s²S_{1/2}-2p²P_{3/2} 転移の絶対周波数を 3×10⁻⁹ 以下の精度で決定し、荷電半径を 2% の精度で決定した。

研究成果の概要（英文）：

The absolute frequency of 2s²S_{1/2}-2p²P_{3/2} transition for beryllium isotopes including the neutron halo nucleus Be-11 was measured by high precision laser spectroscopy with the laser frequency calibration by a frequency comb. From the results, the charge radii for Be isotopes, Be⁺-7,9,10,11, was systematically determined with accuracies less than 2%.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 ・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：高周波イオンガイド、低速 RI ビーム、イオントラップ、レーザー分光、ベリリウム同位体、荷電半径

1. 研究開始当初の背景

重イオン加速器技術の発達により研究対象となる原子核の領域が急速に広がり、不安定核ビームを利用した研究が盛んに行われている。特に軽い中性子過剰核に対する研究が進み、その中にはコア核のまわりに価中性子が大きく広がっている中性子ハロー核と呼ばれるものが発見された。これは、中間エネルギー全反応断面積測定による同じ質量数の安定核よりも大きい物質半径をもつことや、核破砕片の運動量分布が小さいことなどから見出された。ただし、これらは核反応という強い相互作用に基づくプローブを用いた実験による結果であるため、導出された各半径は核モデルに依存する。ハロー核に対してその陽子分布と中性子分布を独立に分光学的に測定された例はまだなかった。

ハロー核がどの程度広がっているかと同時に、ハロー核子の存在によってコア核がその構造にどの程度影響を受けるかということも実に興味深い問題である。コア核の構造を決める重要なパラメータの一つとして荷電半径が挙げられる。核内の陽子分布の広がりすなわち荷電半径を調べるためには、適切な原子準位間の光学遷移周波数の同位体シフト測定による荷電半径測定が不安定核に対しては現在唯一の測定方法である。光学戦士の同位体シフトは、質量シフトと体積シフトの2成分から成り、体積シフトから直接荷電半径を導き出せる。中重核では体積シフトが大部分を占めるため、これまでも多くの測定がなされてきた。一方、軽い核では測定される同位体シフト(数 10 GHz)における体積シフトの寄与は数 MHzと極めて小さく、また高精度の計算を要求される特殊質量シフト(複数電子の相関に起因)との分離が難しいため、同位体効果による荷電半径測定は不可能であるとされてきた。しかし、近年原子物理の理論計算によって特殊質量シフトが He, Li, Be に対し荷電半径を導出するに十分な精度でなされ、磁気光学トラップ中に捕獲した He 同位体のレーザー分光、Li 同位体のレーザー共鳴イオン化法により、中性子ハロー核 He-6,8, Li-11 を含め荷電半径が測定された。Be 同位体では唯一の安定核である Be-9 に対してのみ電子散乱およびミュオン原子を用いた荷電半径の測定しかなされていなかった。

本研究代表者らのグループでは、高エネルギー重イオンビームの破砕反応で生成される 1 GeV 程度の高速不安定 Be 同位体イオンを高周波イオンガイドで高効率に減速・冷却し、イオントラップ中に捕獲し、レーザー分光で

その $2s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2}$ 転移周波数を 3×10^{-8} の精度で決定することに 2006 年の時点で成功していた。しかし、それは Be 同位体間の荷電半径変化を議論するには不十分な精度であり、より高い精度で $2s-2p$ 転移周波数を測定する必要があった。

2. 研究の目的

Be 同位体の正の一価イオンの $2s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2}$ 転移周波数を超精密レーザー分光することによって、中性子ハロー核 Be-11 を含む Be 同位体の二乗平均荷電半径を核モデルに依存することなく系統的に測定することが目的である。それと同時に Be-7,11 の超微細構造を光学的に測定することでその同位体効果から中性子ハロー核 Be-11 の価中性子分布を導出する実験を進め、中性子ハロー核 Be-11 の陽子・中性子分布を完全に解き明かす。

Be 同位体は

- ・中間エネルギー全反応断面積測定実験による物質半径測定
- ・レーザー分光による核モデルに依存しない荷電半径測定
- ・超微細構造分光を用いた Bohr-Weisskopf 効果測定による価中性子半径測定

という3種の測定が可能な唯一の元素であり、物質半径・荷電半径・価中性子半径を独立に測定できる。陽子・中性子の核内分布を電磁相互作用プローブを介して独立に求めることで、ハロー核の構造を鮮明に解き明かし、核子相関の理解への礎のひとつとなることを目的とした。

3. 研究の方法

高エネルギー重イオンビームの破砕反応によって生成される 1 GeV 程度の高エネルギー重イオンビームの破砕反応によって生成される高エネルギーのベリリウム同位体を高周波イオンガイド法で高効率に減速・冷却し、多重極高周波イオンビームガイドで超高真空中へと輸送し、イオントラップ中に捕獲してレーザー冷却することで極低温まで冷却する。レーザー冷却は周波数掃引の際に冷却と加熱が非線形的に起こってしまうため、典型的なレーザー冷却スペクトルは共鳴周波数のまわりで非対称型を持ち、更に、冷却レーザーのパワーによるシフトや広がりが起こるため、高精度分光には不向きである。そこで、冷却用レーザーと弱いプローブ用レーザーを交互に照射し、冷却用レーザーでイオンの冷却を保ちつつ、プローブ用レーザーだけを照射している間だけイオンからの蛍光を観測しながらプローブ用レーザーの周波数を掃引することで、ドップラー幅を十分に抑え、かつ光シフト・広がりを抑えた、自然幅(18MHz)に近い対称型のスペクトルを得る。また、プローブ用レーザーの周波数を蛍光の観測と同時に周波数コムで測定することで、同位体間の差である同

位体シフトだけでなく、各同位体における 2S-2P 遷移周波数の絶対値を決定する。また、荷電半径測定と並行して、価中性子半径決定に必要な超微細構造定数の測定を Be-7,11 の正の一価イオンに対して行う。これはレーザー・マイクロ波二重共鳴法を用いて、基底状態 $2s^2S_{1/2}$ の超微細構造分離を直接測るものである。円偏光レーザーでレーザー冷却すると、同時にイオンは光ポンピングされ、磁気サブ量子数最大もしくは最小の状態へ分布が偏り、閉じた冷却遷移間で吸収・緩和のサイクルを繰り返すため強い蛍光を観測する。そこへ超微細構造分離に共鳴するマイクロ波を照射すると、ポンピングで偏った分布が崩れるため、観測する蛍光強度の減少が見られる。よって、マイクロ波の周波数を掃引することで、共鳴周波数を中心とした下向きのローレンツ型スペクトルを得ることができるので、超微細構造定数を決定することができる。また、この測定を、超微細構造定数を 10 桁の精度で決定されている Be⁺⁹ に適用することで、荷電半径測定の際にも印加している磁場のイオン雲の位置での値を測定することができる。

4. 研究成果

研究方法で述べた、2S-2P 遷移周波数測定の手法を、1mT 程度の低磁場中でベリリウム同位体 Be^{+7,9,10,11} の $2s^2S_{1/2}$ - $2p^2P_{3/2}$ 転移に適用し、半値全幅が 40~80 MHz のローレンツ型スペクトル観測に成功した。そのスペクトルの中心値から磁場によるゼーマンシフトと超微細構造分離によるシフトを補正することで、 $2s^2S_{1/2}$ - $2p^2P_{3/2}$ 転移(重心間)の絶対周波数を 3×10^{-9} 以下の精度で決定し、理論計算による質量シフトの値を引くことで、中性子ハロー核 Be-11 を含む平均二乗荷電半径を核モデルに依存することなく 2% の精度で系統的に決定した。2006 年に CERN の ISOLDE 施設で測られた Li 同位体の荷電半径シーケンスと同様に、中性子が 6 個のところ荷電半径が極小値をもつことが観測されたため、N=6 は安定線近傍では見られない魔法数の候補と成り得ると考えられる。(以上に関してまとめた論文を現在執筆中である。)

また、これに並行して、Be^{+7,11} の超微細構造定数をレーザー・マイクロ波二重共鳴法により決定した。Be-11 は Be-7 や 9 と違い核スピンの $1/2$ であるため、超微細構造分離は $F=0,1$ となり、 $m_F=0 \rightarrow 0$ の(1 次のオーダーで)磁場に依存しない遷移を測定することができる。現在、我々の実験系でのレーザー・マイクロ波二重共鳴法によるスペクトルの幅は、主に磁場分布の不均一さによって決まっているため、 $m_F=0 \rightarrow 0$ 遷移を測定することで、実際に Be-7 よりも狭い幅のスペクトルを Be-11 に対し測定することに成功した。これにより、基底状態 $2s^2S_{1/2}$ 準位の超微細構造

定数を Be^{+7,11} に対しそれぞれ $5 \times 10^{-7}, 3 \times 10^{-8}$ の精度で決定した。(これについてまとめた論文は近日学術論文誌へ投稿予定である。)これらの値は Bohr-Weisskopf 効果を議論するに十分な精度であると考えられるが、これまでに測定されている Be-11 の核磁気モーメントの値(CERN の ISOLDE で β -NMR 法により測定された値)の精度が足りないために Be-9,11 間の超微細構造異常のエラーが大きく、議論できるに至らない状況である。また、Be-7 には β -NMR 法は適用できないため、核磁気モーメントはこれまでに測定されておらず、他の方法で測定する必要がある。すなわち、価中性子半径を導出するためには、Be-7,11 の核磁気モーメントを精度良く測定することが課題として残っている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

“Precision laser spectroscopy of Be isotopes and prospects for SLOWRI facility at RIKEN” M. Wada, A. Takamine, T. Sonoda, P. Schury, K. Okada, and SLOWRI Collaboration, *Hyperfine Interactions* **196**, 43 (2010). (査読有)

“Isotope shift measurement of $^{11,9,7}\text{Be}^+$ ”, A. Takamine, M. Wada, K. Okada, T. Nakamura, P. Schury, T. Sonoda, V. Lioubimov, H. Imura, Y. Yamazaki, Y. Kanai, T. Kojima, A. Yoshida, T. Kubo, I. Katayama, S. Ohtani, H. Wollnik, and H.A. Schuessler, *European Physical Journal A* **42**, 369 (2009). (査読有)

“Precision Measurement of the Hyperfine Structure of Laser-Cooled Radioactive 7Be^+ Ions Produced by Projectile Fragmentation”, K. Okada, M. Wada, T. Nakamura, A. Takamine, V. Lioubimov, P. Schury, Y. Ishida, T. Sonoda, M. Ogawa, Y. Yamazaki, Y. Kanai, T.M. Kojima, A. Yoshida, T. Kubo, I. Katayama, S. Ohtani, H. Wollnik, and H.A. Schuessler, *Physical Review Letters* **101**, 212502 (2008). (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

“Be同位体の荷電半径と超微細構造定数の測定”, 高峰愛子, 和田道治, 岡田邦宏, 園田哲, Peter Schury, 飯村秀紀, 山崎泰規, 金井保之, 小島隆夫, 久保敏幸, 片山一郎, 大谷俊介, Hermann Wollnik, Hans A. Schuessler, 岡山大学, 日本物理学会(第 65 回年次大会), 2010 March

“Precision laser and microwave spectroscopy of radioactive Be isotopes provided from a projectile fragment separator RIPS”, A. Takamine, M. Wada, T. Sonoda, T. Nakamura, Y. Yamazaki, Y. Kanai, T.M. Kojima, T. Kubo, K.

Okada, P. Schury, H. Imura, I. Katayama, S. Ohtani, H. Wollnik, H.A. Schuessler, Waikoloa, Hawaii, US, Third Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 2009 October

“Precision Isotope Shifts (E0, M1) Measurements of Be Isotopes”, A. Takamine, Arctic FIDIPRO-EFES Workshops, Saariselk, Finland, 2009 April

“Be同位体のレーザー分光”, 高峰愛子, 阪大豊中キャンパス, 第5回「停止・低速不安定核ビームを用いた核分光研究」研究会, 2008 December

“超精密レーザー分光によるBe同位体の荷電半径の系統的測定”, 高峰愛子, 和田道治, 中村貴志, 岡田邦宏, 園田哲, 飯村秀紀, Peter Schury, Vladimir Lioubimov, 山崎泰規, 金井保之, 小島隆夫, 吉田敦, 久保敏幸, 片山一郎, 大谷俊介, Hermann Wollnik, Hans A. Schuessler, 山形大学, 日本物理学会(2008年秋季大会), 2008 September

“Isotope shift measurements of $^{11,10,9,7}\text{Be}^{+}$ ”, A. Takamine, M. Wada, K. Okada, T. Nakamura, P. Schury, T. Sonoda, V. Lioubimov, H. Imura, Y. Yamazaki, Y. Kanai, T. Kojima, A. Yoshida, T. Kubo, I. Katayama, S. Ohtani, H. Wollnik, and H.A. Schuessler, Ryn, Poland, The Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses, 2008 September

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

高峰 愛子 (Takamine Aiko)

独立行政法人理化学研究所・低速R I ビーム生成装置開発チーム・基礎科学特別研究員
研究者番号：10462699

(2)研究分担者

(3)連携研究者