

令和元年6月20日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03996

研究課題名(和文)中性子ハロ核の価中性子分布半径の光学的測定

研究課題名(英文)Optical measurement of the valence neutron distribution radius of the neutron halo nucleus

研究代表者

高峰 愛子 (Takamine, Aiko)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・研究員

研究者番号：10462699

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：中性子ハロ核Be-11の価中性子分布半径を精密レーザー分光による光学的に測定することを目的とし、高周波イオンガイド法を用いた低速RIビーム生成装置の開発およびレーザー分光装置の開発を行った。低速RIビーム生成装置として高周波イオンガイド法を用いたガスセルの開発を行い、Csイオンを用いたオフライン試験においてオンライン実験へ移行できる十分な引き出し効率を確認した。また、313nmレーザーを生成する共振器の最適化を行っているところであり近々に完成が見込まれている。低速不安定核生成装置と併せ、本研究で最終目的としていたBe同位体不安定核のオンライン分光実験を数年内に遂行できる目処が立ったと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、汎元素超低速不安定核イオンビームを提供する土台が日本において築きあげることができ、今後その応用は原子核物理にとどまらず、固体物性物理研究や放射線医療まで多岐に涉ることが期待される。更に、これまで周波数標準などを目的として発展してきた最尖端の超高精度原子分光法を不安定核構造研究へ応用するものである本研究は、トラップ原子・イオンに対する超高精度原子分光を用いた原子核構造研究、ひいては新世代の精密原子核分光という新たな領域を産み出すことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：Aiming at the optical measurement of the valence neutron distribution radius of the neutron halo nucleus Be-11, the gas catcher cell using RF ion guide method to provide slow RI beams and laser spectroscopy apparatus have been developed. It was confirmed that we can extract Cs ions from the gas cell with an enough efficiency to apply for online experiments. Besides that, the development of 313 nm laser system is expected to be completed in the near future. These results will enable us to conduct the high precision laser spectroscopy for Be-11 to deduce hyperfine anomaly of Be-11 in a few years.

研究分野：原子核物理

キーワード：高周波イオンガイド 不安定核 レーザー分光 イオントラップ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

原子スペクトルには原子核スピンやそれに伴う電磁モーメント、その核内分布を反映した微細な分離や同位体間でのシフトが現れるため、原子準位の詳細な研究からとりわけ原子核基底状態の静的特性を引き出すことができる。例えば、原子準位の光学転移周波数の同位体シフトすなわち、超微細相互作用の  $E0$  項の同位体シフトから原子核の荷電半径を原子核モデルに依存せず導出することができる。よく知られているように、オンライン同位体分離器とコリニアレーザ一分光法技術の発達により、広い範囲の短寿命核に対し基底状態もしくは長寿命アイソマー状態の荷電半径が系統的に測定され原子核物理に大きく貢献した。このアナロジーでひとつ高次の同位体効果として、超微細相互作用  $M1$  項による超微細構造異常、すなわち核磁気モーメントで規格化した超微細構造定数の同位体シフトがある。これは原子の価電子が原子核内に非一様な分布の磁場を生成するために、超微細構造定数は原子核内の磁化分布を反映した値になるという Bohr-Weisskopf 効果が支配的に効いている。この超微細構造異常に原子理論計算を適用することで原子核の荷電分布および磁化分布の畳み込みである Zemach 半径を導出でき、原子核の磁化半径を評価することができる。荷電分布は原理的に陽子分布を反映する一方、磁化分布は中性子分布にも感度を持ち、特に中性子奇核の価中性子の軌道径を探るプローブとなりうる。

$^{11}\text{Be}$  は中間エネルギー核反応断面積が異常に大きいことや価中性子の運動量分布が小さいことなどから中性子ハロー核であることが見出されたが、それらはまだ完全には理解されていない核力をプローブとした測定であり、その測定結果から陽子・中性子分布広がりや導出するには原子核モデルが必要であるため、電磁プローブを用いた独立な検証が待たれている。 $^{11}\text{Be}$  の磁化は価中性子であるハロー中性子がほとんど担うので、 $^{11}\text{Be}$  の超微細構造異常を決定することで、明確に理解されている電磁相互作用から確度高く中性子ハロー構造を観測できることになる。原子光学転移の同位体シフトは不安定核を含め 600 種もの核種に対し決定されているが、超微細構造異常は 70 種ほどしか決定されておらず、このうち半減期が 1 時間未満のものはたった 6 種しかない。これは、超微細構造異常を決定するには核磁気モーメント  $\mu_I$  と磁気双極子超微細構造定数  $A$  との両方を (典型的には  $10^{-4}$  の) 高精度で独立に測定する必要があるからである。 $^{11}\text{Be}$  の超微細構造異常は 0.01 % のオーダーであることが理論的に予測されている。従って、超微細構造異常を有意に得るには  $\mu_I$  と  $A$  の両方を独立に  $10^{-5}$  より高い精度で測定する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究代表者らは既に  $^{11}\text{Be}^+$  (半減期 14 秒) および  $^7\text{Be}^+$  (半減期 53 日) の原子基底状態の超微細構造定数  $A$  をそれぞれ  $3 \times 10^{-8}$ 、 $5 \times 10^{-7}$  もの高精度で測定している。 $^{11}\text{Be}$  の核磁気モーメントは欧州原子核研究機構 (CERN) の ISOLDE 施設において  $\beta$ -NMR 法により測定されているが、その精度は  $5 \times 10^{-4}$  にとどまっており、その値と我々の測定した  $A$  定数から超微細構造異常を評価すると、 $^{11}\Delta^9 = (A_{11}I_{11}/\mu_{11}) / (A_7I_7/\mu_7) - 1 = (-2.2 \pm 4.7) \times 10^{-4}$  と有意な値は得られておらず、少なくとももう一桁以上高い精度で  $^{11}\text{Be}$  の核磁気モーメントを測定する必要がある。また、 $^7\text{Be}$  の崩壊様式は軌道電子捕獲であるため  $\beta$ -NMR 法は適用できないので、本研究による手法が  $^7\text{Be}$  の核磁気モーメントを超微細構造定数とは独立に決定できる唯一の方法である。更に、 $^7\text{Be}$  の超微細構造異常を測定し  $^{11}\text{Be}$  との比較を行うことで  $^{11}\text{Be}$  のハロー核構造を明確に示すことができるという意味においても  $^7\text{Be}$  に対する測定は重要な意味を持つ。中性子ハロー核  $^{11}\text{Be}$  および  $^7\text{Be}$  の核磁気モーメントを  $10^{-5}$  よりも高い精度で測定し超微細構造異常を決定し、その結果を  $\text{Be}^+$  イオンに対する非相対論的 QED 理論を用いた精密原子理論計算と組み合わせ  $Zemach$  半径を導出し磁化半径を評価することを最終目的とした。そのために、イオントラップ中に捕獲しレーザー冷却した  $\text{Be}^+$  に対し、原子基底状態  $2s\ 2S_{1/2}$  の核スピンと原子スピンとの結合が解ける強磁場中 ( $\sim 1.0$  T) においてレーザー・マイクロ波・RF 波を用いた多重共鳴法を適用することで、超微細構造分離間の核スピンフリップ転移周波数および電子スピンフリップ転移周波数をそれぞれ  $10^7$  および  $10^6$  より高い精度で測定する。

### 3. 研究の方法

入射核破砕反応分離器から供給される高エネルギー不安定 Be 同位体ビームを、100-300 mbar の He ガスを充填した高周波イオンガイドガスセル中で熱化する。この時、He は他のどの元素よりもイオン化ポテンシャルが高いため、入射イオンは正イオンの状態に落ち着くので静電場を使って陰極へ素早く導くことができる。ただし濃いガス中ではイオンは電気力線に沿って動くため、そのままでは電気力線の終点である陰極へぶつかって失われてしまう。それを避けるために円環電極群からなる陰極の各円環に逆位相の高周波電圧を印加することで、イオンを電極へ失うことなく  $\phi 0.7$  mm のガスセル出口ノズルから引き出すことができる (高周波イオンガイド法)。正イオンの状態で引き出した超低速不安定核ビーム ( $\sim eV$ ) は高周波多重極ビームガイドによって多段の排気装置からなる差動排気を経て輸送し、超伝導マグネット内の線形 Paul トラップへと捕獲する。捕獲した Be イオンをトラップ内で素早くレーザー冷却し、以下に述べる方法で超微細構造分離間の高精度分光実験を遂行する。

中性子ハロー核  $^{11}\text{Be}$  および  $^7\text{Be}$  の核磁気モーメントを  $10^{-5}$  より高い精度で決定するために、1.0 T 程度の強磁場中でレーザー・マイクロ波・RF 波を使った多重共鳴法を  $^{11,7}\text{Be}^+$  イオンの基底状態

$2s\ ^2S_{1/2}$  に適用する。

強磁場中では  $^{11}\text{Be}^+$  イオン基底状態  $2s\ ^2S_{1/2}$  の超微細構造準位は核スピンと原子スピンの結合が解け、外部磁場強度に対し図1のように Zeeman 分裂する。イオントラップ中に捕獲した  $^{11}\text{Be}^+$  を  $2s\ ^2S_{1/2} - 2p\ ^2P_{3/2}$  転移に共鳴する 313 nm の例えば  $\sigma^+$  の円偏光レーザーでレーザー冷却すると、 $(m_j, m_i) = (+1/2, +1/2)$  状態への光ポンピングが起こり、イオンが冷却転移準位間で励起・脱励起を繰り返し、1 イオンあたり毎秒 100 万個以上の光子を放出するため強い蛍光が観測される。従って少数個のイオンに対しても適用でき、生成量が制限される不安定核イオンに対し非常に有効な観測手段である。ここに超微細構造間に共鳴するマイクロ波 (図1の  $\nu_{e1}$ ) を照射し電子スピンフリップ転移 ( $\Delta m_j = -1$ ) を起こして  $(m_j, m_i) = (-1/2, +1/2)$  状態へイオンの分布を移すと蛍光の減少が観測される。そこへ更に核スピンフリップ転移 ( $\Delta m_i = -1$ ) に共鳴する RF 波 (図1の  $\nu_{n1}$ ) を照射し核スピンフリップ転移を起こすと蛍光の更なる減少が観測される。電子スピンフリップ転移周波数  $\nu_{e1}$  を Rabi 法を用いたレーザー・マイクロ波二重共鳴法から、核スピンフリップ転移周波数  $\nu_{n1}$  を Ramsey 法を用いたレーザー・マイクロ波・RF 波三重共鳴法を適用することで、それぞれイオンから放出される強い蛍光を介して非常に高感度・高精度に測定することができる。同様にして、 $\sigma^-$  偏光のレーザーを使えば  $\nu_{e2}, \nu_{n2}$  を測定できる。こうして得られた共鳴周波数を Breit-Rabi の式にフィッティングすることで核磁気モーメントを高精度で決定することができる。この手法はベリリウム不安定核イオンである  $^9\text{Be}^+$  に対して既に実証済みであり、その核磁気モーメントに対し  $1 \times 10^{-7}$  もの測定精度を達成している。

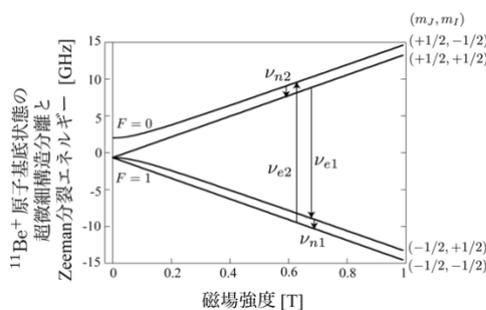


図1:  $^{11}\text{Be}^+$  原子基底状態の超微細構造の Zeeman 分裂

#### 4. 研究成果

本研究を遂行するには低速不安定核イオンビームを供給する装置、イオントラップ、および冷却レーザーが必要となる。本研究期間内では、高周波イオンガイド法を用いてヘリウムガス中に停止した不安定核イオンを高効率で引き出し超低速の不安定核ビームを生成するための、ガスキャッチャー装置の開発を大いに進めた。このガスセルではガス中に停止させたイオンを DC 電場で一段目の RF カーペット上へ集めた後、二段式の RF カーペットを使ってイオンを集めて  $\phi 0.7$  mm の引き出し穴から引き出すことで、エミッタンスの小さい高品質な低速不安定核イオンビームを供給する。一段目 RF カーペットのサイドに DC 電極を配置し、そこでは横方向に距離分の1に比例するような DC 電場を生成することで極力少ない面積に不安定核を集め、高周波電場を印加する必要のある面積を小さくし、軽い元素に対しても十分適用可能な高い周波数で共鳴するようなデザインにした。RF カーペットに関しては、一段目の RF カーペットから雨樋のように収集した不安定核イオンを二段目の RF カーペットに落とし、RF 電場と 4 位相の AF 電場を印加することで生み出される搬送波にイオンをロックすることで、高速でイオンを下流へと輸送することができるデザインとした。空間電荷効果の主な原因であるヘリウムイオンは一段目の電極で失われると期待されるため、2 段目の AF+RF 電極では空間電荷効果の影響を大幅に抑えられると目論んでいる。当初は、二段目での輸送に必要な搬送波への適用可能範囲を超える高い引き出し電圧が一段目と二段目の間に必要であることが判明したが、一段目の RF カーペットデザインに改良を重ねることで、表面電離型イオン源で供給する Cs イオンを用いた輸送試験において一段目と二段目を合わせてトータルで 50% 以上の引き出し効率を確認している。また、ガス圧を上げると高周波イオンガイド法の特長により輸送効率が著しく低下する現象がこれまで見られていたため、200 mbar 程度までの He ガス圧下でしか実用に耐えないとの見立てがあったが、従来より電極間隔を更に小さくした (0.1 mm) RF カーペットを使用することにより、300 mbar においても十分な効率 (一段目 RF カーペットにおいて 100% 近く) での輸送が可能となることを確認した。従って、オンライン実験における停止効率もまた改善することが見込まれる。これにより高周波イオンガイドガスセルを使ったオンライン実験へ移行する目処が立った。2019 年度後期にはオンラインコミッシングを開始する予定であり、これを経てイオンガイドガスセル性能の更なる高度化を目指す。並行して、レーザー分光実験に必要なレーザーの開発を進めた。不安定核イオンビームを用いたレーザー分光実験には長時間安定に駆動できるレーザーが必須であり、そのために半導体レーザー群と波長変換装置から成る全固体レーザーシステムを構築した。現在、313nm を生成する共振器の最適化を行っているところであり近々に完成が見込まれている。上のガスセルと併せて、本研究で最終目的としていた Be 同位体不安定核のオンライン分光実験を数年内に遂行できる目処が立ったと言える。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① 高峰愛子, Marco Rosenbusch, 和田道治, Peter Schury, Jun-young Moon, 園田哲, 小島隆夫, 渡邊裕, 片山一郎, 上野秀樹, 石山博恒, “理研 RIBF SLOWRI 施設における RF イオンガイドガスセル開発”, 日本物理学会 第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14 日-17 日, 九州大学
- ② A. Takamine, “Prospects for laser spectroscopy project at the SLOWRI facility in RIKEN RIBF”, 2018 KPS Fall Meeting, 2018 年 10 月 24-26 日, Changwon Exhibition Convention Center, Korea
- ③ A. Takamine, “Laser spectroscopy project at the SLOWRI facility in RIKEN”, 20<sup>th</sup> Northeastern Asian Symposium, 2018 年 9 月 18-19 日, Hilton Nagoya

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：今村 慧

ローマ字氏名：(Kei Imamura)

所属研究機関名：明治大学

部局名：研究・知財戦略機構

職名：研究推進員

研究者番号 (8 桁)：70783158

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：和田 道治

ローマ字氏名：(Michiharu Wada)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。