

論文の内容の要旨

論文題目 Precision Laser Spectroscopy of Unstable Beryllium Isotopes
Using an RF Ion Guide System
(高周波イオンガイドを用いた不安定ベリリウム同位体の精密レーザー分光)
氏名 高峰愛子

自然界に安定に存在する原子核は 274 種類にすぎないが、理論的に存在が予測されている原子核は 7000 種にも達し、そのうち存在が確認されている不安定核は 2000 種に及ぶ。近年の重イオン加速器技術の発展に伴い、高速不安定核ビームを高強度で生成することが可能になり、不安定核の研究が盛んに行われている。軽い核領域での中性子過剰核に対する研究が特に進み、安定核では見られない特異な現象・性質が次々と見いだされ、物質の構成要素である原子核に対する描像が変化している。例えば、原子核の半径は約 $1.2 \times A^{1/3}$ fm (A は質量数) であることが安定線付近の原子核に対する常識であった。しかし、原子核反応断面積の測定から、中性子数が過剰な ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$ などの原子核は、同じ質量数の安定核よりも大きい半径を持つ事が見いだされ、更に価中性子の分離エネルギーや運動量分布が小さいことから、通常核と同じ様に飽和した核子密度をもつ芯原子核と、それをとりまく希薄で大半径の中性子層(中性子ハロー)からなる二重構造を持つことが知られている。しかし、これは核力というまだ十分には理解されていない力をプローブとした測定であるので、電磁プローブを用いた独立な検証が待たれている。原子核内の磁化分布の差異は原子の磁気超微細構造定数の同位体効果に現れる (Bohr-Weisskopf 効果)。これを利用して価中性子が広がっていることを電磁的に証明することができる。一方、原子核の荷電半径測定に伝統的に用いられてきた電子散乱法、K-X 線測定法、ミュオン原子分光法では短寿命で生成率の低い不安定核に対しては適用困難であり、これまでのところ不安定原子核の荷電半径測定は、高分解能レーザー分光法でのみ測定されている。本研究の目的は高エネルギー重イオンにより生成されたあらゆる元素の不安定核イオンのトラップと精密レーザー分光法を開発し、原子核構造研究の新しい手法を確立することである。

従来、低速不安定核ビームは高エネルギー陽子ビームとターゲットイオン源を用いたオンライン同位体分離器 (ISOL) でつくられていたが、その方法では拡散・イオン化過程を経るため、得られる核種には化学的性質や寿命による大きな制限があった。一方、理研 RIPS に代表されるビーム入射核破砕片分離器はそのような制限が少なく広範な陽子数・中性子数の不安定核を提供する。ただしこういった装置

では入射核破砕反応を用いるため、生成される不安定核ビームのエネルギーは高く、そのまま単純に減速して低エネルギー実験を行うのは不可能である。そこで我々は高周波イオンガイド法を考案し、ビーム入射核破砕片分離器からのあらゆる元素の高速不安定核ビームを高効率で減速・冷却・捕集する技術の開発を世界に先駆けて進めてきた。

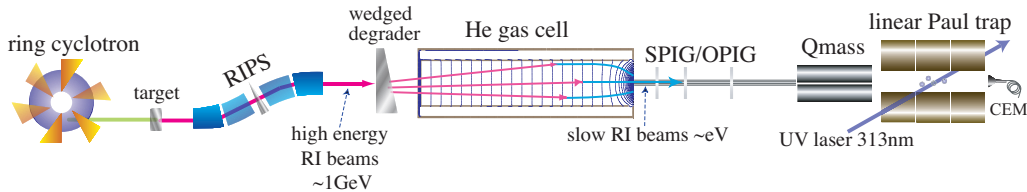


Fig. 1: 本研究の実験装置の全体図

本実験装置の全体図を Fig. 1 に示す。理化学研究所におけるビーム破砕核分離器 (RIPS) からの 1 GeV 程度の高速不安定核ビームをエネルギー減衰板で数 MeV まで減速させた後、26~133 mbar 程度の He ガスで満たされた長さ 2 m のガスセル内で熱化させる。この時、He のイオン化ポテンシャルが高いため、He ガス中で熱化したイオンの殆どは正の一価イオンの状態を保つので、電場で操作して引き出すことができる。ところが、濃いガス中ではイオンは電気力線に沿って動くので、単純な静電場だけではイオンは電気力線の終点である陰極に吸い込まれ失われる。そこで、陰極を多数の微細円環電極で構成し (これを RF カーペットと名付けた)、そのそれぞれに高周波電位を印可して高周波勾配電場を生み出すことによってイオンを陰極から引きはなしておく斥力を生じさせる、イオンを陰極に吸い込ませることなく引き出し出口へと運ぶことができる (この手法を高周波イオンガイドと名付けた)。

高周波イオンガイド法を用いたオンライン試験において ${}^8\text{Li}^+$ の最大収量 26kcps (ビーム破砕核分離器からの不安定核ビームを低速ビームとして引き出すものとしては現時点で世界最大) を達成しており、応用実験に十分な性能を示すようになった (Fig. 2)。ここで入射ビーム強度の増加に従い、引き出し効率が下がる現象が見られたが、その原因に関しては長年定性的な解釈のみが提案されていた。我々は入射ビームが生成する大量の空間電荷によるものと考えた事により、この現象を初めて定量的に解明した。

ガスセルから引き出されたイオンを精密分光のために、作動排気を介した六重極もしくは八重極イオンビームガイドを用いて超高真空領域にある分光用イオントラップまで輸送した。60 cm のイオンビームガイドを用いた輸送試験において、イオン輸送にはガスセル内のガス圧をガスセル試験の最適ガス圧であった 133 mbar の 10 分の 1 程度にしなければならないといった問題が生じた。そこでイオンビームガイドの棒として高抵抗素材である CFRP (炭素繊維強化樹脂) を用いて、輸送方向に静電場を重畳できるようなイオンビームガイドを製作した。それを用いた予備試験において 2 kcps 以上の ${}^8\text{Li}^+$ イオンを輸送できている事を確認した。これは不安定 Be 同位体の精密分光に十分な性能である。同時に高分解能レーザー分光のための装置開発を進め、イオンビームガイドで輸送した不安定核 Be 同位体イオンを He ガス冷却により分光用イオントラップ中へと高効率に捕獲した。このように ${}^{10}\text{Be}^+$ イオンをイオントラップ中へ捕獲し、He ガスを排出後、レーザー冷却スペクトルを観測することに成功した。これは生成時には GeV という高エネルギーであった ${}^{10}\text{Be}^+$ ビームを meV 以下にまで冷却したことになる。また、He ガス冷却した状態のまま高分解能レーザー分光を行い、 10^{-8} の精度で ${}^{10}\text{Be}^+$ と ${}^7\text{Be}^+$ の $2s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2}$ 電子双極子遷移周波数の測定を成功させた。Be の安定核は ${}^9\text{Be}$ のみなので、これまで他の Be 同位体に対して電子双極子遷移周波数は未知であり、これが世界で初めての成功となる。また、 ${}^9\text{Be}^+$ に対しても、弱磁場中で測定することにより、過去の強磁場中での測定値を修正した。結果を Tab. 1 に示す。

本研究で開発した装置・手法と、既に安定核イオン ${}^9\text{Be}^+$ に対して成功しているレーザー冷却イオ

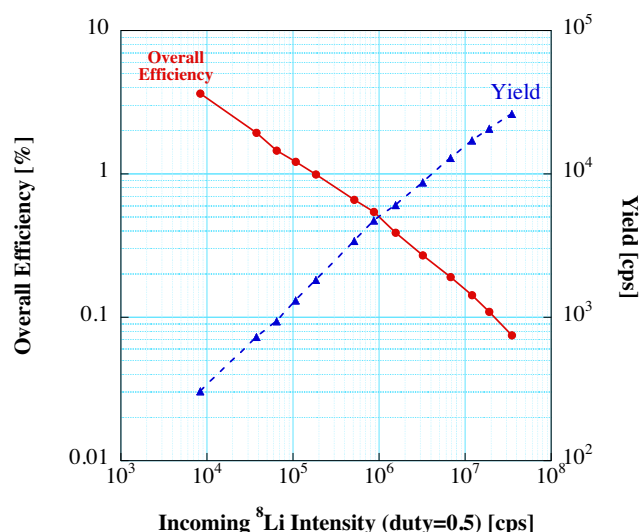


Fig. 2: 入射 $^8\text{Li}^+$ 強度に対する低速 $^8\text{Li}^+$ イオンの引き出し効率と収量

Tab. 1: $^{7,9,10}\text{Be}$ に対する $2s\ ^2S_{1/2}-2p\ ^2P_{3/2}$ 遷移周波数

A	ν [GHz]
7	957 347.369(124)
9	957 396.515(14)
10	957 413.839(35)

ンのレーザー・マイクロ波二重共鳴法を用い、 $^{7,11}\text{Be}$ の超微細構造定数と磁気モーメントを測定する実験が近い将来実現可能となる。更に、レーザー・レーザー二重共鳴法を用いて不安定 Be 同位体の $2s\ ^2S_{1/2}-2p\ ^2P_{1/2}$ 電子双極子遷移周波数を 10^{10} 以上の精度で測定して荷電半径を決定することも可能となる。これまで荷電半径の測定がなされたハロー核は2-中性子ハロー核 ($^6\text{He}, ^{11}\text{Li}$) だけであり、 ^{11}Be の荷電半径の測定がなされれば、1-中性子ハロー核に対し初めてのものとなる。 ^{11}Be は1-中性子ハロー核の典型例として理論的にも様々な洞察がなされており、これらの測定はそれらと組み合わせて、原子核モデルの検証となると共に、原子核物理学の大きなテーマである核力の理解に対する礎となりうる。これらの実験に Be 同位体のレーザー冷却用周波数を知ることは必須条件であり、それは本研究によって初めて得られた。