

光学的手法による不安定原子核の精密分光

和田 道 治

Precision Spectroscopy of Unstable Nuclei by Optical Methods

Michiharu WADA

Optical spectroscopy has been widely used for nuclear structure studies, especially for the static electromagnetic properties of nuclei such as nuclear charge radii and electromagnetic moments. High sensitivity and high precision of optical spectroscopy allows us to study even unstable nuclei. Nuclear properties determined by optical spectroscopy are often nuclear model independent since the fundamental interaction is well determined. Hyperfine interactions in isolated atoms play important roles in the interconnection between atomic spectroscopy and nuclear structure. In this report, recent topics on light nuclei and a new facility for dedicated optical spectroscopy of unstable nuclei are introduced.

Key words: nuclear laser spectroscopy, unstable nuclei, laser cooling, charge radii, nuclear moments

原子核構造の研究において、光学的手法による原子準位の精密分光が多大な貢献をしてきた^{1,2)}。光学的手法によって不安定核を含む多数の原子核の静的電磁特性、例えば電磁モーメント、スピン、荷電半径を網羅的かつ高精度に測定することが可能であり、これまでに、およそ46元素の600種類の不安定原子核が光学的方法で測定されてきた(図1)³⁾。これらの測定は相互作用が明確な電磁相互作用を用いた不変の量であり、多種多様な原子核モデルを検証することができる。原子核は、自然に存在するわずか250余りの安定核と、自然には存在せず理論的には1万種類もあると予想されている不安定原子核からなり、高感度の光学的分光法が、ごく少量しか測定試料が得られない不安定原子核の核構造解明に大きな寄与をする。

光学的方法の感度の高さは、原子核反応に比べて圧倒的に反応断面積が大きいこと、ビーム(光子)強度が高いこと、1個の原子を多数回測定可能であることによる。典型的な原子核反応の断面積は 10^{-24} cm²であるのに対して、原子の共鳴吸収断面積は 10^{-8} cm²にも達し、1 mWの可視光レーザーの光子数は0.5 mAもの陽子ビーム強度に匹

敵する。容易に飽和強度を超え、すべての励起可能な試料原子を励起できるばかりでなく、1個の原子の励起脱励起を何度も観測することも容易である。このような条件は原子核反応では到底達成できないことである。

光学的分光の高感度性はとりわけイオントラップのような蓄積装置によって、よりいっそう顕著なものとなる。レーザー冷却可能な条件下では単一原子でも高いS/N比の分光を実行できる。自由空間に閉じ込めることは、感度ばかりでなく精度の点でも大きな利点がある。空間に孤立した原子に対する測定は物質中における測定のような曖昧性の余地がないこと、観測するプローブの波長より小さい領域に閉じ込めておくだけでドップラー広がりを排除できることにより、高精度・高確度の測定が可能となる。後者はラム・ディッケ条件⁴⁾とよばれるもので、簡単にいえば観測する波長より小さい振幅の振動はみえないということである。マイクロ波の分光では一般的な大きさのトラップに閉じ込めるだけで達成でき、可視光域でも、数mm程度の小型トラップに強く束縛したイオンに対するレーザー冷却によってマイクロメートルの振幅を実現して達成されて

(独)理化学研究所山崎原子物理研究室(〒351-0198 和光市広沢2番1号) E-mail: mw@riken.jp

いる⁵⁾。

本稿では、精密原子分光からどのような原子核の情報をどのような方法で得るのか、その原理といくつかの最新の実験について解説する。さらに、精密原子分光を広範な元素の不安定同位体に適用するための実験施設の開発について述べる。

1. 超微細相互作用—原子と原子核の架け橋—

原子スペクトルにおけるごく微細な分離構造として発見された超微細構造は、核スピンの発見の起源である。Pauli は、長岡半太郎らによる水銀原子の超微細構造のゼーマン分離の測定をもとに、核スピンの存在を提唱した⁶⁾。一般に超微細相互作用は、原子の軌道電子および外場が原子核の位置に生成する電磁場と原子核の電磁モーメントとの相互作用である。既知の原子核をプローブにして磁性、電子スピン状態等の物性研究に広く使われているが、ここでは、もっぱら孤立原子の超微細構造から不安定原子核の電磁特性を測定する方法について議論する。

孤立原子において、軌道電子と原子核の電磁相互作用によって原子準位に分離およびシフトが生じる。分離の数は、軌道電子のスピン量子数 (J) と核スピン量子数 (I) の結合量子数 $\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$ によって $F = |I - J|$ から $F = |I + J|$ までの $2I + 1$ 本 ($I \geq J$ の場合) あるいは $2J + 1$ 本 ($I \leq J$ の場合) に分離する。さらに外部磁場があればそれぞれが $2F + 1$ 本にゼーマン分離する。よって超微細構造のスペクトル線の観測によって核スピンを決定できることになる。さらにおのおの分離およびシフトの大きさは、相互作用の多重度によって分類され、表1に示すように対応する原子核の電磁モーメントに比例する。その比例係数、例えば磁気双極 (M1) 相互作用項においては原子核の位置に軌道電子が生成する磁場 $B(0)_J$ 、電気四重極 (E2) 相互作用項においては電場勾配の値が別に求められれば原子核の電磁モーメントを決定できる。具体的には、同位体間でこの比例係数はある精度で一定であると近似できるため、安定核の核モーメントを参照することにより不安定核のモーメントを導出することができる。

この比例係数が同位体間で厳密には一定でないことは、超微細場が原子核の有限な広がりの中で一様でない事実に起因しており、超微細構造異常 (hyperfine anomaly) とよばれる。磁気双極 (M1) 項の超微細構造異常は Bohr-Weisskopf 効果⁷⁾ とよばれ、核内磁化分布の同位体間の変化のプローブとなる。

電気単極項 (E0) は原子核の電荷の有限な広がりのため

にエネルギー準位のシフトとして観測される。原子核内におけるクーロンポテンシャルは点電荷の場合の $1/r$ からずれて r^2 の依存性を持ち、大きい核ほど浅くなる (図2)。このため原子核内に有限の存在確率をもつ s 電子が関与する準位は、その電子密度を $\rho_e(0)$ とすれば $2\pi/3 Ze^2 \rho_e(0) \langle r^2 \rangle$ だけシフトし、その大きさは平均二乗半径に比例する。分離と違ってシフトを測定するには、原点すなわち点電荷の場合の準位エネルギーを知る必要があり、一般にそれは容易ではない。さらに原子核の質量の寄与、すなわち電子の換算質量および複数電子系ではそれらの相関によるシフト、相対論効果や QED 効果などの寄与も引き算しなければならない。幸い、重い核では荷電半径による寄与が優勢で数 GHz 以上にもなるため、少なくとも同位体間で転移エネルギーを比較すること (いわゆるアイソトープシフト測定) によって平均二乗半径の差 ($\delta \langle r^2 \rangle$) を決定できる。安定核の荷電半径は電子散乱やミュオン原子法によって精度よく測定されており⁸⁾、それを参照して絶対値を求める。一方最近では、後述するように電子数3個以下のごく軽い核では理論的に質量依存項や種々の補正項を高精度で計算できるようになり⁹⁾、高精度の光学分光のみから荷電半径を直接導き出すことが可能となった。

光学的方法は、直接超微細構造を分光するばかりでなく光ポンピング法による核偏極の生成のための強力な手法である。例えば、円偏光レーザーによって弱磁場中の電子と原子核のスピンの結合した状態の原子を照射すると最大の磁気量子数の準位にポンピングされ、ここでは、原子核も完全に偏極している。必要であれば断熱的に強磁場に移動し、電子と核の結合を解いてやればそのまま物質中に打ち込んでも偏極は物性的に緩和されるまでの間保つことができる。偏極した核のベータ・ガンマ分光では、励起準位のスピン・パリティ決定の確度を増すことができる¹⁰⁾。さらに、ベータ線の放射方向の非対称性をプローブにして、外部磁場下での NMR 法で直接核モーメントを測定することにも広く使われている¹¹⁾。

2. 軽い元素の荷電半径

光学的方法による不安定核研究の最新のトピックスは、He, Li の不安定同位体の荷電半径の測定であろう。軽い元素の中性子過剰不安定核において、陽子と中性子の分布に顕著な差異があり、余分な中性子がコアのまわりに薄くかさのように分布していることが見いだされている¹²⁾。この現象は、谷畑らによって ¹¹Li の中間エネルギー反応における全反応断面積が異常に大きいことから発見され¹³⁾、以降、一大研究分野を形成している。全反応断面積の測定

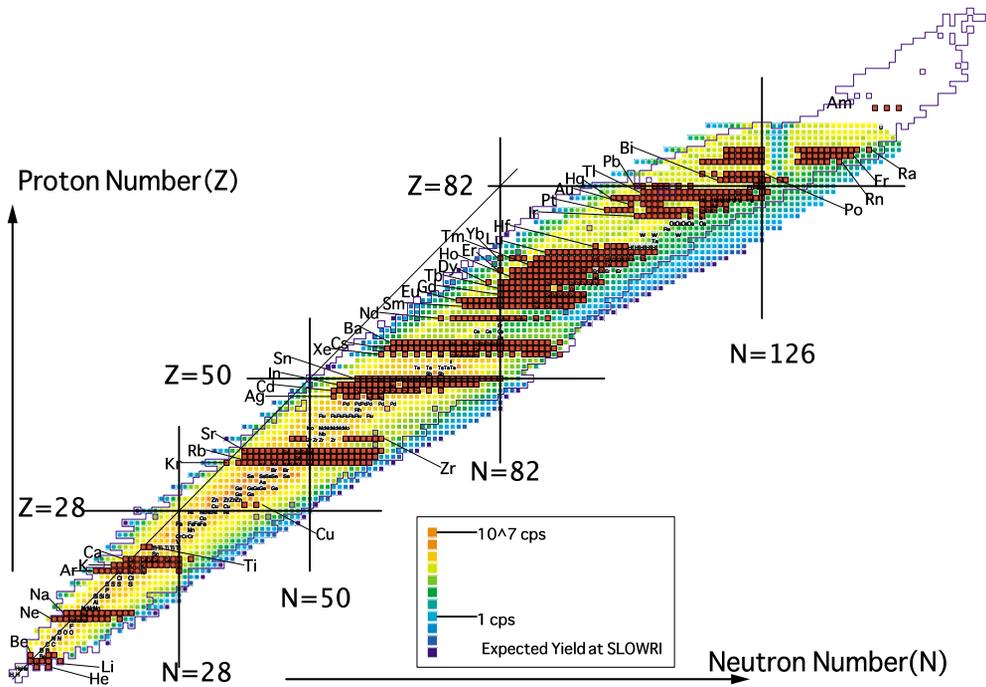


図1 光学的方法で分光がなされた不安定原子核。濃く塗りつぶした600余りの核種が該当する¹⁻³⁾。四角い枠は理化学研究所で建設中の新しい低速RIビーム生成施設(SLOWRI)で得られる核種と予測される強度を示す。実線で囲われた領域はこれまでに存在が確認され半減期がわかっている核種。

表1 超微細構造定数と原子核の電磁的特性。

相互作用	I, J	分離定数	原子核の情報
電気単極 (E0)		$2\pi/3 Ze^2 \rho_c(0) \langle r_c^2 \rangle$	$\langle r_c^2 \rangle$ 平均二乗荷電半径
磁気双極 (M1)	$\geq 1/2$	$A = \mu_I B(0)_I / (IJ)$	μ_I 核磁気モーメント
電気四重極 (E2)	≥ 1	$B = eQ_s V_{zz}^a$	Q_s 電気四重極モーメント
磁気八重極 (M2)	$\geq 3/2$	C	Ω 磁気八重極モーメント

^a V_{zz} は原子核の位置における電場勾配。

では、文字通り陽子中性子を区別しない核物質全体の大きさを、しかも理論的原子核モデルを導入して求めるものであり、中性子だけが広がっていることを直接測定することはできなかった。光学的方法による荷電半径の測定が待たれていたが、従来、軽い核では核の広がりによる小さな効果 (~1 MHz) を、 $\sim 10^{15}$ Hz の転移エネルギーから、質量に依存する大きな効果 (>10 GHz) を引いたうえで求めることは困難とされていた。近年の精密レーザー分光技術の発展によって、不安定核原子であっても 10^{-10} 以上の精度で分光することが可能となると同時に、理論原子物理学の進歩によって、少数電子系において質量依存項やその他の補正項を高精度で計算できるようになり、直接荷電半径を測定できるようになった。

ヘリウムの中性子過剰同位体 ^6He (半減期 807 ms), ^8He (半減期 119 ms) の測定は、アルゴン国立研究所のグループによって磁気光学トラップを用いて行われた。GANIL の加速器ビームの照射で生成された He 同位体は

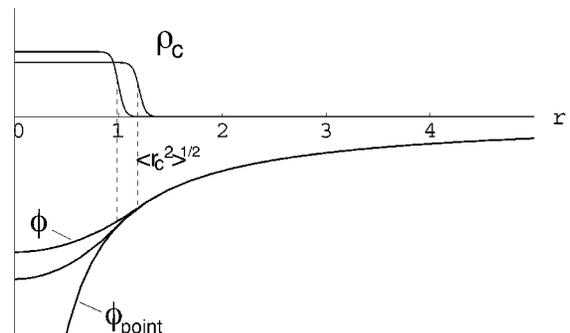


図2 原子核の荷電分布 (ρ_c) とそれによって生成されるクーロンポテンシャル。点電荷の場合 $\phi \propto 1/r$ だったものが、有限な荷電分布のために核内では放物線形になる。

ターゲットから拡散し、高周波放電によって準安定準位 (2^3S_1) へ励起された後、 2^3P_2 準位への 1083 nm レーザー光によってトラップされる。別の 389 nm プロブ光によって $3^3P_{0,1,2}$ 準位への転移を 60 kHz の精度で決定し、 ^4He との荷電半径の差を 0.7% の精度で決定した^{14,15)}。

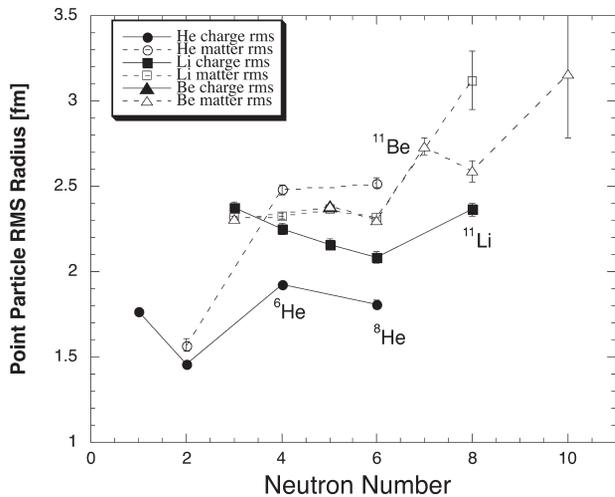


図3 He, Li, Be 同位体の点粒子換算平均二乗半径の実験値¹⁴⁻¹⁷.

リチウム同位体のレーザー分光は GSI のグループによって TRIUMF で行われた¹⁶⁾。オンライン同位体分離器からの Li イオンビームはいったん熱いグラファイトに打ち込まれ、蒸発してきた中性 Li 原子に対して共鳴イオン化分光がなされた。基底準位から励起準位 ($2^2S_{1/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$) へ、対向する 2 本のレーザーを用いたドップラーフリー二光子吸収によって測定され、共鳴の検出はその励起準位からの共鳴イオン化法によって高感度かつ高選択度をもって行われた。この転移の ^{11}Li , ^7Li 間のアイソトープシフトは $\delta\nu^{11,7} = 25101.226(124)$ MHz と測定され、質量依存項の理論値 $\delta\nu_{\text{MS}}^{11,7} = 25101.812(121)$ MHz を差し引き、荷電半径 $2.467(37)$ fm を得た。

He と Li の荷電半径測定結果¹⁴⁻¹⁶⁾ を He, Li, Be の物質半径測定結果¹⁷⁾ と合わせて図 3 にまとめた。ここでは相互の比較のために点粒子換算平均二乗半径を用いた。物質半径はおおむね単調に増加し、 $^{6,8}\text{He}$ や ^{11}Li のようないわゆる中性子ハロー核においては大きく跳ね上がっているのに対して、荷電半径はむしろ中性子数増加によって減少する傾向さえみられ、ハロー核における跳ね上がりも小さいことが明瞭にわかる。さまざまな原子核モデルによってこれらのハロー核の構造が計算されてきたが、荷電半径の測定によって明解に取捨できることになる。ここで強調すべき点は、反応断面積から物質半径を導出する時点ですでに核モデルが必要であるのに対して、光学的方法による荷電半径測定は核モデルに依存せず決定できる量であることである。

He, Li に続くのはベリリウム同位体である。中性 Li 原子と同電子配位の 1 価イオンは、イオントラップを用いた精密分光に適しており、また原子構造の理論計算が高精

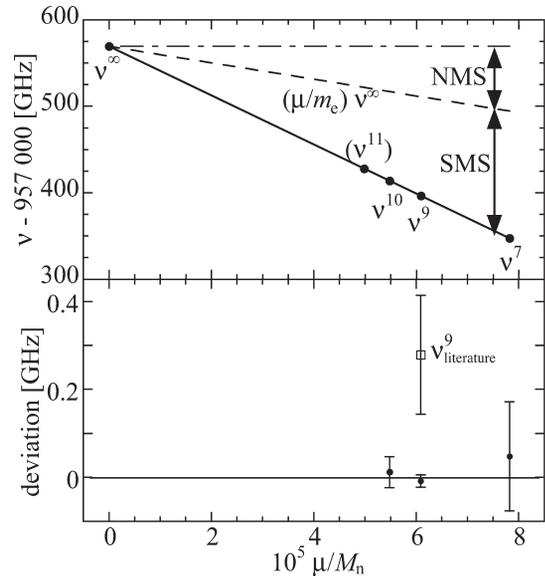


図4 ベリリウム同位体のアイソトープシフト¹⁸⁾。ここでは、原子核の広がり効果(体積効果)は測定精度に比べて小さいため無視し、電子の換算質量に起因する質量シフト(NMS)と複数電子の相関に起因する質量シフト(SMS)を導出した。それに伴い、次なる未知核種 $^{11}\text{Be}^+$ イオンの共鳴周波数 ν^{11} を予言することができる。

度で可能である。筆者らは、理化学研究所の加速器施設において不安定 Be 同位体のトラップおよびレーザー分光を進めており、これまでに $^{7,10}\text{Be}^+$ のレーザー分光に成功している¹⁸⁾。現時点では、ガス冷却状態のイオンに対しての分光のため、測定精度は 10^{-8} 程度であり、荷電半径を導出するには十分な精度が得られていないが、安定核が ^9Be しかない Be のアイソトープシフトをはじめて測定したことになる。具体的には、質量無限大の極限の $2s^2S_{1/2} \rightarrow 2p^2P_{3/2}$ 転移エネルギー $\nu^\infty = 957569.55(28)$ MHz と、この準位間の質量偏極パラメーターの差 $\kappa = 1884.5(46)$ GHz を決定した。これは、短寿命同位体 ^{11}Be のレーザー冷却のためにあらかじめ共鳴周波数を 10 MHz 以下の確度で知るための前提条件でもある(図 4)。

ベリリウム同位体の荷電半径を導出するためには、測定精度をさらに 2 桁上げる必要がある。それにはレーザー冷却が必須である。図 5 に、レーザー冷却された $^7\text{Be}^+$ のスペクトルを示す。この Be イオンにとって、生成時に 1 GeV もの超高温であったものが、減速・ガス冷却・レーザー冷却を経て、実に $1 \mu\text{eV}$ 以下まで 10^{-15} 倍もの運動エネルギーの減衰がなされたことに相当する。この図にみられるように、レーザー冷却自身が非線形な過程であるため、このスペクトル自身から共鳴周波数を導出するには適していない。実際にはもう 1 本の弱いプローブ光を用いて冷却光と交互に照射しながら測定することが必要になる。現在その

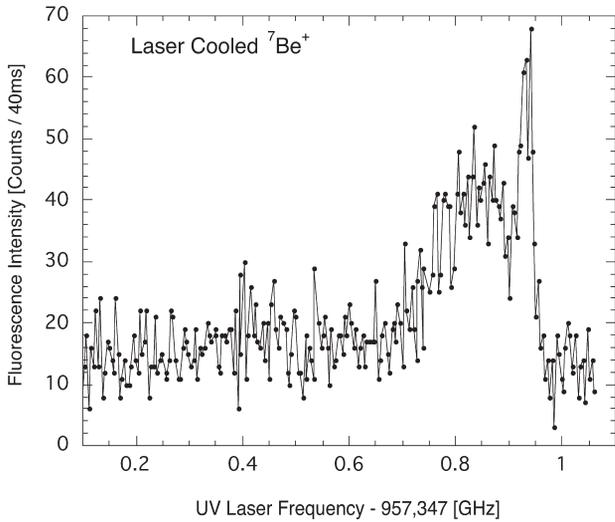


図5 不安定ベリリウム同位体 ${}^7\text{Be}^+$ のレーザー冷却スペクトル。

準備を進めているところである。

ベリリウムにおいては、荷電半径の測定による陽子の分布ばかりでなく、磁気超微細構造異常すなわち超微細構造の磁気双極項 (M1) の同位体効果によって原子核内の磁化の分布の違いを導出できる。表1に示したように M1 項の分離定数 A は、核磁気モーメントと軌道電子が原子核の位置に生成する磁場との積で表される。この磁場はとりわけ接触項 (contact term) とよばれる不對の s 電子による寄与が大きく、かつそれは原子核の大きさの範囲内でも厳密には一様ではない。一方原子核も点磁子ではなく有限の分布をもつことから、 A の値は点磁子の場合 A_{pd} に比べて $-\epsilon_{\text{BW}}$ だけ小さくなる ($A = A_{\text{pd}}(1 + \epsilon_{\text{BW}})$)。一般に A_{pd} の値を知ることは困難なので同位体間での A の値と核 g 因子 ($g = \mu_I/I$) の比を比較することによって、 ϵ_{BW} の同位体間の差 $\Delta\epsilon_{\text{BW}}$ を求めることになる。ベリリウムの同位体のうち、 ${}^{11}\text{Be}$ は、1 個の価中中性子が芯のまわりに弱い束縛状態でかさのようになっていると考えられている。この価中中性子が核磁気モーメントの多くを担っていることから、まさに超微細構造異常が大きくみられることが期待され¹⁹⁾、それは価中中性子が広がって分布していることの直接測定に該当する。筆者らはこの事実に着目し、準備を進めてきた。核 g 因子と超微細定数 A を独立に 10^{-6} の高精度で測定するためには、強い磁場下で超微細構造の磁気準位を精密に測定する方法が適している。そのために超伝導磁石を用いた複合型イオントラップを製作し²⁰⁾、レーザー・マイクロ波多重共鳴法によって高精度に測定できるようになった²¹⁾。図6に測定に用いる転移と測定例を示す。現在不安定 Be 同位体イオンの超微細構造測定がまさに進行中である。

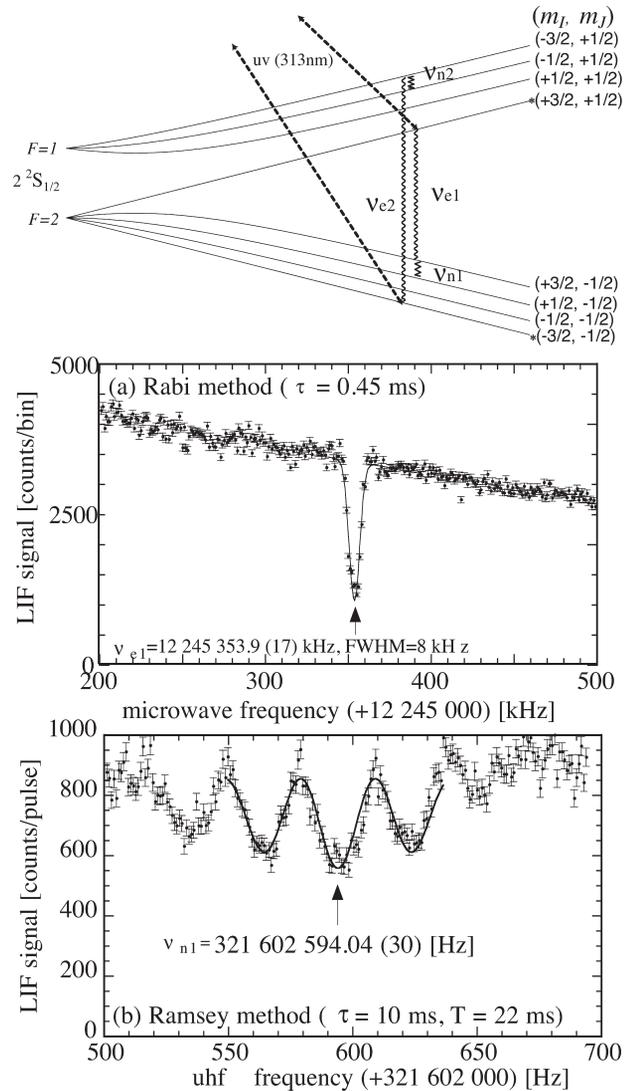


図6 ${}^9\text{Be}^+$ イオンの基底準位の超微細構造のゼーマン分離とその測定スペクトル。電子スピンフリップ転移周波数 ν_{e1} , ν_{e2} , 核スピンフリップ転移周波数 ν_{n1} , ν_{n2} の4つの周波数を測定することによって超微細構造定数 A , 核 g 因子 g_I を独立に高精度で決定できる²¹⁾。

3. 汎元素の低速 RI ビーム生成施設—SLOWRI—

前章では、最新のごく軽い元素の実験について述べたが、歴史的には重い元素について多くの光学的手法、とりわけコリニアレーザー分光法、共鳴イオン化分光法による測定がなされ、魔法数効果、核の変形、形状共存、偶奇ふらつきなどの事実を解明してきた。一方、図1から明らかのように、全元素のおよそ半分の元素の同位体、しかも比較的安定線に近い核種しか測定がなされていない。これは、主として光学的分光に適した低速のビームが一部の元素しか得られないという問題に起因している。

低速の不安定核ビーム (RI ビーム) は、これまで ISOL (isotope separator on line) という装置で生成されてきた。この方式では、加速器からのビーム (おもに陽子ビ-

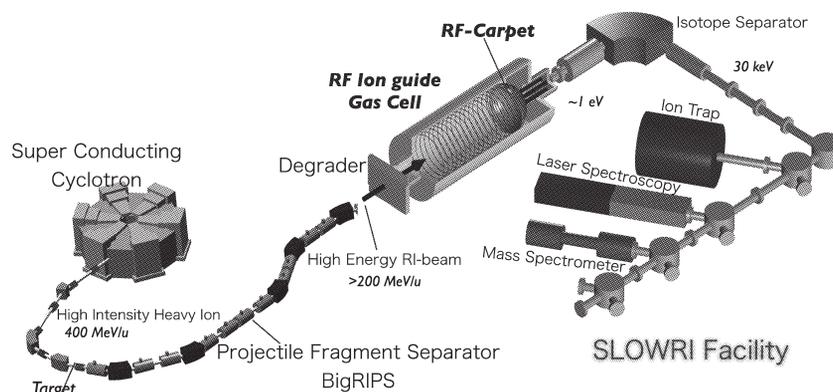


図7 RF イオンガイド法による低速不安定核ビーム生成施設の概念図。

ム)で生成標的を照射し、標的中に生成された不安定核原子を熱拡散で標的の表面まで輸送し、そこから蒸発した原子をイオン源でイオン化(通常1価)し、静電加速(50 kV程度)の後、電磁石による質量分離器で目的の同位体イオンを取り出す。この過程において、その効率は元素の化学的性質に強く依存し、生成後イオンビームとして取り出すまでに要する時間も元素によって大きく異なる。

近年、中間エネルギー重イオンビームを用いた入射核破砕片分離法が開発され、極短寿命核を含んだ4000種類もの核種を取り出すことができるようになった。この方式では、核子あたり100 MeV程度のビームを薄いターゲットに照射し、ビームイオンの一部が剥ぎ取られて出てくるビームをそのまま電磁分析器で選り分ける。この方式の鍵は、出力ビームの速度がほぼ一定かつ荷電状態が全裸もしくはそれに近いとみなせることである。これによって双極電磁石による磁気剛性分離において質量数と荷電数の比(A/Z)で分離することができる。さらに減速板を透過させると、質量と荷電によって異なるエネルギー減衰が起るため、もう一度双極電磁石で分離すれば原理的には単一の核種を選り分けることができる。この方式では、生成分離過程に化学過程がなく、飛行時間以外の時間損失もないので、生成される全元素の同位体を得ることができる。

ところが、この分離器で得られる不安定核ビームはエネルギーが核子あたり100 MeV程度と高く、かつその広がりには数%にも及び、光学的分光には全く適していない。筆者らは、入射核破砕片分離器から得られる高速不安定核ビームを高効率で減速冷却し低速不安定核ビームもしくはトラップされた不安定核イオンを得るための新しい手法—RF イオンガイド法—を開発した²²⁻²⁴⁾。

高速不安定核ビームは、いったん厚い減速板を透過させエネルギーを核子あたり数 MeV まで粗減速する。この減速法では0~10 MeV まで大きなエネルギー広がりをもつ

のでそのままでは使えない。そこでこのビームを0.1気圧程度のHeを充填したガスセル中で熱化させ、それを静電場と不均一RF電場を用いて真空中に導き出す。ガス中でのイオンのドリフト運動は電気力線に沿うため、単純な静電場だけでは必ずイオンは陰極に吸い付いてしまいセルの外へ引き出すことができない。そのため、RFイオンガイド法では、陰極としてRFカーペットと名付けた多数の円環電極からなる電極を用い、その円環に交互に位相の異なる高周波電圧を印加する。電極表面には不均一高周波電場が生成され、表面から跳ね返すような平均電場、いわゆるイオンバリアーによって電極の表面に触れることなく中心の出口ノズルへと導かれる。

このような原理に基づく新しい低速不安定核ビーム生成施設建設計画が理化学研究所の加速施設RIBFにおいて進行中である(図7)。ここでは、イオントラップばかりでなく、コリニアファーストビーム法によるレーザー分光や、質量測定、崩壊様式測定等、高純度低速不安定核ビームの特性を生かした研究が計画されている。

4. 光学的原子核分光の将来

分光可能な原子核の種類を広げるためには、ビーム生成法ばかりでなく、分光技術の開発も重要である。最後に、核分光のための新しい光学的手法を紹介したい。

理化学研究所の松尾・古川らは、超流動液体ヘリウム中の中性原子の新しい分光法を開発した。液体ヘリウム中の原子は周囲のヘリウムの圧力を受けて吸収スペクトル線が大きく(数十nm)シフトし、かつ10nm以上に広がったものになる。一方、脱励起時の蛍光はほぼ真空中のスペクトル線に近い波長となる。一見精密分光には向かないようにみえるが、励起光と脱励起光の波長が大きく異なる点は、実用上大きなS/N比の向上に貢献する。光学的転移の分光には向かないが、基底準位の超微細構造は大きな影

響を受けることなく精密分光できることが示された²⁵⁾。ごく少数しか得られない不安定核の新たな高感度分光法として期待される手法である。

京都大学の中嶋は、パルスレーザーを用いた新しい核偏極法を提案している²⁶⁾。円偏向した極短パルスレーザーで微細構造の区別なく同時に励起すると、励起準位において軌道角運動量とスピン角運動量との間の相互作用によって、スピン偏極度が分離エネルギーによって決まる短い周期で変化する。これは関与する全原子において同期している。第一パルスで励起の後、一定の遅延をもって別のパルスレーザーでイオン化することによって偏極を固定することができる。この方式では、パルスレーザーを用いるため、波長や原子準位構造的に分光が難しかった元素にも適用しやすいという利点もある。Sr原子の電子スピン偏極についてすでに実験的に確認されており²⁷⁾、原子核の偏極の検証が待たれる。

原子核全体からすると、これまでに何らかの方法でアクセスできている核種はまだほんの一部である。光学的手法による高感度・高精度の核分光は、低速ビーム生成技術と新しい分光法によって今後大きく展開していくことが期待される。

本稿を終えるにあたり、共同研究者各位に謝意を表したい。とりわけ岡田邦宏、中村貴志、高峰愛子の各氏の尽力なしには実験は遂行できなかつた。また片山一郎、大谷俊介、山崎泰規の各氏には、研究開始当初から多年にわたり熱心なご支援をいただいた。実験は、電気通信大学レーザーセンター、理化学研究所仁科センターの施設を使用して行われている。ここに感謝する。

文 献

- 1) E. W. Otten: "Nuclear radii and moments of unstable isotopes," *Treatise on Heavy-Ion Science*, Vol. 8, ed. D. A. Bromley (Plenum Press, New York, 1989) pp. 517-638.
- 2) H.-J. Kluge and W. Nörtershäuser: "Lasers for nuclear physics," *Spectrochim. Acta B*, **58** (2003) 1031-1045.
- 3) J. Billowes: "Laser spectroscopy with cooled beams," *Nucl. Phys. A*, **752** (2005) 309c-316c.
- 4) R. H. Dicke: "The effect of collisions upon the Doppler width of spectral lines," *Phys. Rev.*, **89** (1953) 472-473.
- 5) J. C. Bergquist, W. M. Itano and D. J. Wineland: "Recoilless optical absorptions and Doppler sidebands of a single trapped ion," *Phys. Rev. A*, **36** (1987) 428-430.
- 6) W. Pauli: "The theoretical significance of the satellites of some spectrum lines and the effect on them of magnetic fields," *Naturwissenschaften*, **12** (1924) 741-743.
- 7) A. Bohr and V. F. Weisskopf: "The influence of nuclear structure on the hyperfine structure of heavy elements," *Phys. Rev.*, **77** (1950) 94-98.
- 8) H. DeVries, C. W. DeJager and C. DeVries: "Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering," *Atom. Data Nucl. Data*, **36** (1987) 495-536.
- 9) Z.-C. Yan and G. W. F. Drake: "Bethe logarithm and QED shift for lithium," *Phys. Rev. Lett.*, **91** (2003) 113004-(1-4).
- 10) Y. Hirayama, T. Shimoda, H. Izumi, A. Hatakeyama, K. P. Jackson, C. D. P. Levy, H. Miyatake, M. Yagi and H. Yano: "Study of ^{11}Be structure through β -delayed decays from polarized ^{11}Li ," *Phys. Lett. B*, **611** (2005) 239-247.
- 11) E. Arnold, J. Bonn, A. Klein, R. Neugart, M. Neuroth, E. W. Otten, P. Lievens, H. Reich, W. Widdra and the ISOLDE Collaboration: "Quadrupole moment of ^{11}Li ," *Phys. Lett. B*, **281** (1992) 16-19.
- 12) P. G. Hansen and B. Jonsen: "The neutron halo of extremely neutron-rich nuclei," *Europhys. Lett.*, **4** (1987) 409-414.
- 13) I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, Y. Shida, N. Yoshikawa, K. Sugimoto, O. Yamakawa, T. Kobayashi and N. Takahashi: "Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light p-shell region," *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1985) 2676-2679.
- 14) L.-B. Wang, P. Mueller, K. Bailey, G. W. F. Drake, J. P. Greene, D. Henderson, R. J. Holt, R. V. F. Janssens, C. L. Jiang, Z.-T. Lu, T. P. O'Connor, R. C. Pardo, K. E. Rehm, J. P. Schiffer and X. D. Tang: "Laser spectroscopic determination of the ^6He nuclear charge radius," *Phys. Rev. Lett.*, **93** (2004) 142501-(1-4).
- 15) P. Mueller, I. A. Sulai, A. C. C. Villari, J. A. Alcántara-Núñez, R. Alves-Conde, K. Bailey, G. W. F. Drake, M. Dubois, C. Eleóon, G. Gaubert, R. J. Holt, R. V. F. Janssens, N. Lecesne, Z.-T. Lu, T. P. O'Connor, M.-G. Saint-Laurent, J.-C. Thomas and L.-B. Wang: "Nuclear charge radius of ^8He ," *Phys. Rev. Lett.*, **99** (2007) 252501-(1-4).
- 16) R. Sánchez, W. Nörtershäuser, G. Ewald, D. Albers, J. Behr, P. Bricault, B. A. Bushaw, A. Dax, J. Dilling, M. Dombisky, G. W. Drake, S. Götte, R. Kirchner, H.-J. Kluge, T. Kühl, J. Lassen, C. D. Levy, M. R. Pearson, E. J. Prime, V. Ryjkov, A. Wojtaszek, Z.-C. Yan and C. Zimmermann: "Nuclear charge radii of $^9,^{11}\text{Li}$: The influence of halo neutrons," *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 033002-(1-4).
- 17) I. Tanihata, T. Kobayashi, O. Yamakawa, S. Shimoura, K. Ekuni, K. Sugimoto, N. Takahashi, T. Shimoda and H. Sato: "Measurement of interaction cross sections using isotope beams of Be and B and isospin dependence of the nuclear radii," *Phys. Lett. B*, **206** (1988) 592-596.
- 18) T. Nakamura, M. Wada, K. Okada, A. Takamine, Y. Ishida, Y. Yamazaki, T. Kambara, Y. Kanai, T. M. Kojima, Y. Nakai, N. Oshima, A. Yoshida, T. Kubo, S. Ohtani, K. Noda, I. Katayama, V. Lioubimov, H. Wollnik, V. Varentsov and H. A. Schuessler: "Laser spectroscopy of $^{7,10}\text{Be}^+$ in an online ion trap," *Phys. Rev. A*, **74** (2006) 052503-(1-5).
- 19) T. Fujita, K. Ito and T. Suzuki: "Hyperfine anomaly of Be isotopes and anomalous large anomaly in ^{11}Be ," *Phys. Rev. C*, **59** (1999) 210-214.
- 20) T. Nakamura, S. Ohtani, M. Wada, K. Okada, I. Katayama and H. A. Schuessler: "Ion dynamics and oscillation frequencies in a linear combined trap," *J. Appl. Phys.*, **89** (2001) 2922-2931.
- 21) T. Nakamura, M. Wada, K. Okada, I. Katayama, S. Ohtani and H. A. Schuessler: "Precision spectroscopy of the Zeeman splittings of the $^9\text{Be}^+ 2^2\text{S}_{1/2}$ hyperfine structure for nuclear structure studies," *Opt. Commun.*, **205** (2002) 329-368.
- 22) M. Wada, Y. Ishida, T. Nakamura, Y. Yamazaki, T. Kambara, H. Ohyama, Y. Kanai, T. M. Kojima, Y. Nakai, N. Ohshima, A. Yoshida, T. Kubo, Y. Matsuo, Y. Fuku-

- yama, K. Okada, T. Sonoda, S. Ohtani, K. Noda, H. Kawakami and I. Katayama: "Slow RI-beams from projectile fragment separators," Nucl. Instrum. & Methods B, **204** (2003) 570-581.
- 23) A. Takamine, M. Wada, Y. Ishida, T. Nakamura, K. Okada, Y. Yamazaki, T. Kambara, Y. Kanai, T. M. Kojima, Y. Nakai, N. Oshima, Y. Yoshida, T. Kubo, S. Ohtani, K. Noda, I. Katayama, P. Hostain, V. Varentsov and H. Wollnik: "Space-charge effects in a catcher gas cell of an rf ion guide," Rev. Sci. Instrum., **76** (2005) 103503-1-6).
- 24) 和田道治: "SLORI—汎用低速 RI ビーム生成法—," 日本物理学会誌, **61** (2006) 248-255.
- 25) T. Furukawa, Y. Matsuo, A. Hatakeyama, Y. Fukuyama, T. Kobayashi, H. Izumi and T. Shimoda: "Measurement of a long electronic spin relaxation time of cesium atoms in superfluid helium," Phys. Rev. Lett., **96** (2006) 095301-1-4).
- 26) 中嶋 隆: "パルスレーザー誘起スピン偏極," 日本物理学会誌, **62** (2007) 230-237.
- 27) Y. Matsuo, T. Kobayashi, N. Yonekura and T. Nakajima: "Photoionization characteristics of Sr into $5skl$ continua through the spin-resolved ion detection by laser-induced fluorescence," Jpn. J. Appl. Phys., **46** (2007) 1181-1185.

(2008年3月11日受理)