素粒子原子核研究所活動報告(1)和光原子核科学センター 2025 年 6 月 16 日

和光原子核科学センター(WNSC)は、天然には存在しない短寿命の原子核を人工的に合成 し、宇宙における重元素合成過程の解明を目指した実験研究や、全原子核領域にわたる網羅 的質量測定を推進している。理研 RIBF 施設内に設置した元素選択型質量分離装置 KISS(KEK Isotope Separation System)は、原子核同士の多核子移行反応により合成される短寿 命核をビームとして供給する共同利用施設として運営されており、合成された短寿命核の 核分光実験を実施している。KISS では現在その高度化を目指した KISS-1.5 計画を推進して おり、実験室の整備、ドーナツ型ヘリウムガスセルの開発、ビームラインのデザインなどを 進めている。また、KISS および RIBF 施設の他の装置(GARIS-II、BigRIPS-SLOWRI)におい て、様々な原子核反応により合成された短寿命核に対して多重反射型飛行時間測定式 (MRTOF)質量分光器による精密質量測定を実施している。

(1) 大型ドーナツ型ヘリウムガスセルの開発状況

KISS/KISS-1.5 では多核子移行反応で生成した中性子数 N = 126 周辺やウラン周辺の中性 子過剰な短寿命核の核分光実験を推進するために、大強度の重イオンビーム ¹³⁶Xe/²³⁸U を利 用可能な大型ドーナツ型ヘリウムガスセル (Doughnut-shaped He gas cell: DSHeGC、図1(a) 参照)を開発してきた。

ガスセル内に停止した短寿命核イオンは、図 1(a)に緑矢印で示した DC 電場でガスセル周 辺部に配置した 10 基の RF ワイヤーカーペット(RFWC)表面に輸送される。その後、時計回 りと反時計回りの RF 進行波(青矢印、RF traveling wave: RFTW)で短寿命核イオンを出口孔 まで約 0.1 秒で輸送することで、これまでの 10~100 倍の量の短寿命核イオンビームを生成 できる。



図 1 (a)ドーナツ型ヘリウムガス(DSHeGC)内構造。短寿命核イオン輸送効率を上げるため に、一次ビームはガスセル中心にあるドーナツ孔を通過する工夫を施している。(b) 新たに DC 電極 B を設置した DSHeGC。

前回の実験では、DSHeGC内に打ち込まれた一次ビーム由来のイオンが誘起する電場が DC電極Aの作る電場より強いため、また時計回りおよび反時計回りのRFTWが干渉して いるため、イオン制御に困難な点があった。これらを改善するために、図1(b)に記したよう に時計回りおよび反時計回りのRFTWの干渉を防ぐDC電極Bを導入した。またRFTWに よるイオン輸送補助用ガス流れをDSHeGC内に作る工夫も行った。これにより、DC電極B とRFWCで作る電場によるイオン輸送制御および2種類のRFTWによるイオン輸送制御が 前回よりも容易になった。今後は、更に効率よくイオン輸送制御出来る構造の工夫を施し、 中性子過剰核の精密質量測定を中心とした核分光実験を進めていく。

(2) レニウム(Re、Z=75)同位体のガスセル内レーザー共鳴イオン化核分光による核構造研究

レーザー共鳴イオン化核分光法は、生成量の少ない短寿命核の核構造研究する上で非常 に有効な手段である。レーザー分光法により原子の超微細構造(HFS)を調べることで、原子 核の波動関数を反映する物理量である原子核スピンと電磁気モーメントの測定、また原子 核の形状を反映する物理量である荷電半径の変化量の導出が可能となる。

我々が KISS で核構造研究を行っている重い領域、中性子数 N=116-118 近傍の高融点元 素(原子番号 Z = 72-78)原子核では中性子数および陽子数に応じて、その形状がプロレー ト変形(縦長)、オブレート変形(横長)および球形等に形状変化することが知られている。 現状、世界の短寿命核施設において KISS のみがこの重い高融点元素のレーザー分光を行え る施設である。この利点を活かして、これまで系統的なレーザー共鳴イオン化核分光実験を 推進してきた。

系統的研究の一つとして、レニウム同 位体¹⁹⁰Reの基底状態(半減期 3.1 分) ^{190g}Reと準安定状態(半減期 3.2 時間、励起 エネルギー204 keV) ^{190m}Re のガスセル内 レーザー共鳴イオン化核分光を KISS に て実施した。図2に準安定核 187 Re($I^{p}=5/2^{+}$, N = 112)と短寿命核^{190g}Re および^{190g+m}Re の HFS 分布の測定結果を示す。¹⁸⁷Re の HFS 分布は良く知られている典型的な ₽ = 5/2⁺の HFS 分布のため、今回の測定によ るレーザー核分光の応答関数の導出が可 能である。この応答関数を適用すること で^{190g,190m}ReのHFS 分布を精度よく解析 できる。^{190g}Re は半減期 3.1 分でベータ崩 壊する。崩壊時に放出されるベータ線の 計数のレーザー波長依存性を測定するこ



図 2 KISS で測定した HFS 分布(a)¹⁸⁷Re、 (b)^{190g}Re、(c)^{190g+m}Re。縦線(黒)は各共鳴原子遷移 の位置と強度。

とで図 2(b)を得ることができる。^{190m}Re の半減期 3.2 時間はオンライン実験中に崩壊を測定 するには長いため、精密質量測定器 MRTOF を用いてイオン検出する。^{190m}Re の励起エネル ギーは 204 keV と小さいため、MRTOF では ^{190g}Re と分離して識別することが困難である。 そのため、イオン計数のレーザー波長依存性を測定すると、基底状態と励起状態が混ざった HFS が観測される(図 2(c)参照)。図 2(a)を見ると非常に幅の広い HFS 分布が測定されている が、図 2(b)、(c)では HFS 分布の幅が減少していることから、磁気モーメントの値が小さく なっていることがわかる。今後、原子核理論との比較から ^{190g,190m}Re のスピンと磁気モーメ ントおよび核構造を議論する予定である。

(3) 中性子過剰なタングステン同位体の同位体シフト測定

理論的に予測されている中性子数N ≈ 116におけるタングステン同位体の形状遷移を検 証するため、KISS を用いて¹⁸⁶⁻¹⁹⁰W (N = 112 – 116)のガスセル内レーザー分光による同 位体シフト測定を行った。測定対象の核種は、核子当たり10.75 MeVの¹³⁶Xe ビームを厚さ 10 mmのイリジウム標的(天然同位体比組成)に入射し、多核子移行反応により生成した。 反応生成物はアルゴンガスセル(約 60 kPa)中に捕集され、ガスセル出口における2段階の レーザー共鳴イオン化により元素選択的にイオン化し取り出した。イオンは、20 keV に加 速後、双極電磁石によって質量分離され、下流の質量分光器系(MRTOF-MS)へ導入された。 MRTOF-MS による精密質量測定から、核種の同定とイオン数の計測を行った。各同位体に ついて、共鳴レーザー波長を掃引しながらイオン数を測定することで共鳴スペクトルを取 得した。

図3に、本実験で測定した¹⁸⁶W および¹⁹⁰W のスペクトルを示す。Voigt 関数によるフィ ッティングの結果、同位体シフトを約0.4 GHz の精度で決定することができた。他の同位体 についても現在解析を進めている。今後、同位体シフトから原子核の平均二乗荷電半径を導 出し、原子核の密度汎関数理論に基づく計算値との比較を通じて形状遷移についての理解 を深める。



図 3¹⁸⁶W(上)および¹⁹⁰W(下)の共鳴スペクトル

(4) MRTOF-MS を用いた N~Z 線近傍不安定核の精密質量測定: I型 X 線バーストにおける 早い陽子捕獲過程への影響

I型X線バーストは連星系を構成する中性子星の表面において伴星からの降着ガスを燃料とした爆破的核燃焼によって引き起こさせる天体現象である。X線バーストの観測と理論予想を比較することで中性子星に関する情報を引き出すことができる。速い陽子捕獲過程(rp 過程)はX線バーストを駆動する主な核燃焼過程の一つである。rp 過程の進み方は関わる原子核の性質に強く依存しているが、それらの原子核の性質には必要な精度で実験的に決定されていないものも多く、理論予想に無視できない不確かさが残っている。

本研究では rp 過程の終端の候補である ZrNb サイクルと呼ばれる閉じた反応系の形成に 大きな影響をもつ ⁸⁴Mo とその周辺核種の精密質量測定実験を行なった。実験は 2024 年 7 月に理化学研究所の RIBF 施設、超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS の ZeroDegree スペ クトロメーター下流に設置されている多重反射型飛行時間式質量分析器(MRTOF-MS)を含 む実験セットアップを使用して実施した。結果としてN = Z核 ⁸⁸Ru、⁸⁴Mo、および ⁷⁸Y の核 異性体状態の質量を初めて実験的に決定した。また ⁸³Nb および ⁷⁹Y についてはその質量値 の不確かさをそれぞれ 162 keV と 80 keV から 10 keV 程度まで低減した。

ZrNb サイクル形成に関する重要な物理量である⁸⁴Moの α 粒子分離エネルギー(S_a)を初めて実験的に決定した。図 4 に Ru, Tc, Mo, および Nb の S_aを示す。Mo 以外の 3 系列については実験的に知られている範囲において中性子数に対して単調に変化しているが、Mo につ



図 4Ru、Tc、Mo、および Nb 同位体系列のα粒子分離エネルギー。黒丸と赤丸はそれぞれ AME20 の値と今回の実験結果を示し、白丸はAME20 で評価された外挿値を表している。 既知のAME20データを用いた線形近似の結果を目安として示す。Moについては、FRDM92 および FRDM12の理論予測もプロットされている。

いては⁸⁴Mo(N = Z)において有意にこの傾向から外れている。これは Mo 同位体系列における低 S_aの島の存在をしている。低い S_a(⁸⁴Mo)は ZrNb サイクルの形成を促進する方向ではあるが、得られた値は通常の X 線バーストのシナリオで ZrNb サイクルの形成が起こるには不十分である。従って本実験の結果から ZrNb サイクルは rp 過程の終端ではないと結論できる。

また実験で得られた新しい質量値の rp 過程に対する影響を見るため X 線バーストのシ ミュレーションを行なった。図 5 に X 線バーストで生じた灰における存在量分布の計算結 果を示す。図中灰色の帯は文献値(AME20)の不確かさによる存在量分布の変動幅に対応して おり、赤色の点の誤差棒は本実験で得られた質量値に由来する不確かさである。AME20 で 存在の可能性が示唆されていたA = 82におけるピーク構造は消失し、A~80 – 90領域におけ る不確かさを大きく低減できていることが分かる。これは本実験によって rp 過程計算の精 度が大きく向上したことを表している。



図 5 シミュレーションによる X 線バーストの灰における存在量分布。灰色と濃い灰色の 帯は、AME20 データを 3σ と 1σ の範囲内で 4 つの核種(⁸⁸Ru、⁸⁴Mo、⁸³Nb、⁷⁹Y)の質量を 変化させた場合の存在量の変動範囲を表す。

(5) 宇核連研究会 2025 の開催

星の進化と元素の起源は密接に関係しており、その包括的な解明には天文学、天体物理 学、惑星科学、原子核物理学、素粒子物理学などの多岐にわたる分野の連携が重要となる。 分野横断的に最新の研究活動と今後の研究課題を共有して議論するため、素核研 WS、JST ASPIRE プロジェクト、理研数理創造プログラム iTHEMS、東京大学理学研研究科附属原子 核科学センターの共催で元素合成と星の進化に関する研究会「宇核連研究会 2025 ~元素の 起源天体と星の化学進化~」を3月24日から26にかけてKEK つくばキャンパスで開催した。大学院生や若手研究者を含む約70名の研究者が参加して活発な議論を行い、更なる研究の発展を目指してこれまで交流が無かった分野の研究者たちが新たなネットワークを築く良い機会となった。



図 6 宇核連研究会 2025 の集合写真。