

素粒子原子核研究所活動報告(2) 短寿命核グループ 2021年3月10日

短寿命核グループ活動報告 (2020.6.11 報告からのアップデート)

短寿命核グループでは宇宙における重元素合成過程の解明を研究の柱とし、素核研・和光原子核科学センター(WNSC)を研究基盤として研究活動を進めている。WNSCは、理研 RIBF 施設内に独自の短寿命原子核研究施設 KISS を運営し国内外の研究者に対して共同利用実験環境を提供すると同時に、それを用いた短寿命原子核の分光研究と、KISS 及び他の RIBF 施設の装置 (GARIS, BigRIPS-SLOWRI)において多重反射型飛行時間測定式質量分光器 (MRTOF-MS) 用いた網羅的質量測定プロジェクトを推進している。

重元素の起源の研究は、重力波や天体分光などの「観測」と、関与する原子核の特性を調べ上げる「実験」と、そのデータを演繹して元素合成ネットワークを追う「理論」の3つの柱からなり、このプロジェクトはその「実験」を担うものである。合成に関与する原子核は千種類以上あり、その多くは未知の短寿命原子核である。そのような原子核を生成・分離し、質量・半減期・励起状態・崩壊様式などの特性を網羅的に測定することを目指している。

元素合成において特に注目されている領域は、白金や金の起源にかかわる中性子数 $N=126$ 近傍の中性子過剰核である。この領域の原子核は、タンタル、タングステンなどの高融点元素からなり、CERN の ISOLDE のような従来型の短寿命核ビーム施設では得ることが困難であった。KISS は、多核子移行反応(MNT)とガスキャッチャーセル、レーザー共鳴イオン化法を組み合わせ、難元素の中性子過剰核を良質の RI ビームとして提供できるユニークな施設となっている。

2020年春以降、COVID-19の感染拡大に伴い、9月末に至るまで理化学研究所内での実験が一切できなくなり、おおいに支障をきたしたが、在宅勤務期間を有効に活用し、1. 論文の出版、2. 装置の改良を漸次進め、活動再開後の11月-12月には、3. 新しい施設(BigRIPS-SLOWRI)での網羅的質量測定を開始することができた。さらに、4. 次世代施設 KISS-2 を目指した準備研究を進めている。図1に KISS 及び RIBF の GARIS, BigRIPS-SLOWRI において WNSC が 2017-2020 に主導して研究した原子核を示す。

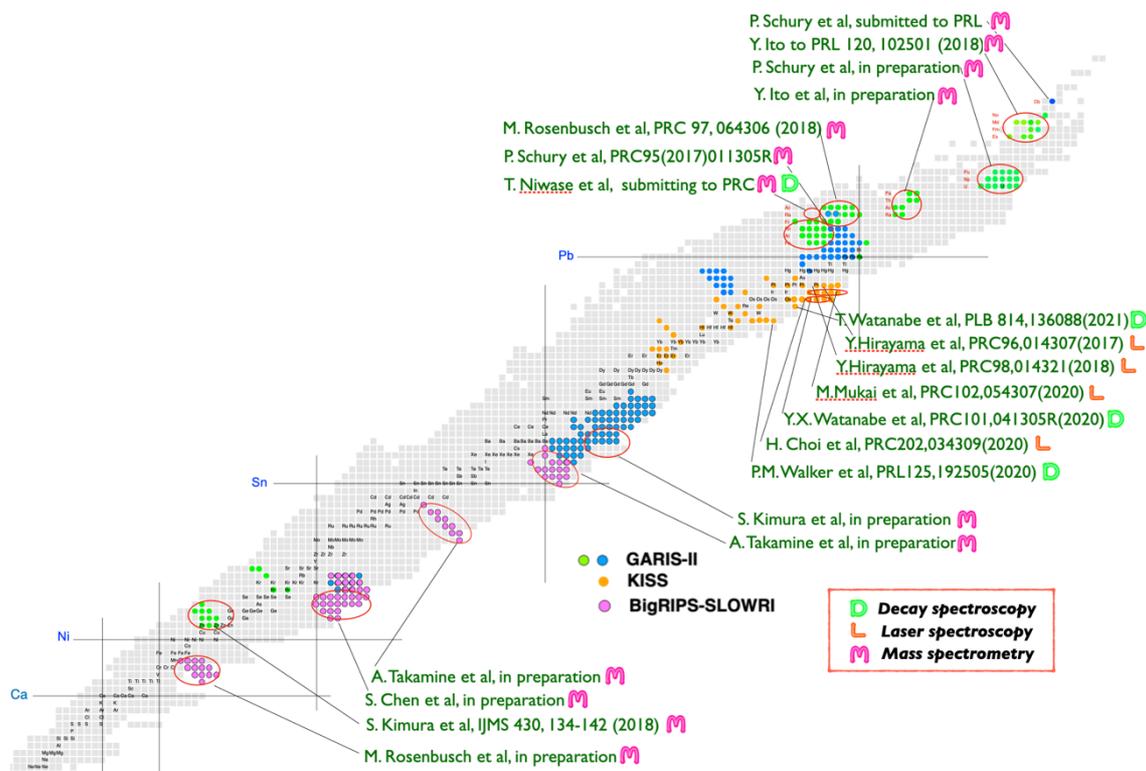


図1 KISS, GARIS, BigRIPS-SLOWRI における WNSC の主な研究成果(2017-2020)

1. KISS の特徴を生かした幾つかの物理論文の出版

1) P.M. Walker et al., “Properties of ^{187}Ta Revealed through Isomeric Decay”, Phys. Rev. Lett. 125, 192505 (2020)は、高融点元素の中性子過剰原子核 ^{187}Ta の核異性体 $^{187\text{m}}\text{Ta}$ の高純度ビームを引き出すことのできる KISS によって実現したもので、 γ 線および X 線の測定からその準安定準位の崩壊寿命を決定し、プロレート変形を保持しながら基底準位に崩壊することを明らかにした。さらに中性子過剰な ^{189}Ta ではオブレート変形している可能性を示唆した。なお、この研究成果は、11月11日にサリー大、KEK、理研で共同プレスリリースを行った。

2) H. Watanabe et al., “Beta decay of the axially asymmetric ground state of ^{192}Re ”, Phys. Lett. B 814, 136088 (2021)及び、

3) Y.X. Watanabe et al., “Deexcitation gamma-ray transitions from the long-lived $I\pi=13/2+$ metastable state in ^{195}Os ”, Phys. Rev. C 101, 041305(R)(2020), 103, 019902 (2021)は、同じく高融点元素レニウムとオスミウムの中性子過剰短寿命核 ^{192}Re , ^{195}Os 核異性体からのガンマ線分光に初めて成功し、この領域の特徴的な核構造を解明した。

4) H. Choi et al., “In-gas-cell laser ionization spectroscopy of $^{194,196}\text{Os}$ isotopes by using a multireflection time-of-flight mass spectrograph”, Phys. Rev. C 102, 034309 (2020)及び、

5) M. Mukai et al., “In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of $^{196,197,198}\text{Ir}$ ”, Phys. Rev. C 102, 054307 (2020). は、KISS のガスセル内でのレーザー共鳴イオン化の際の共鳴波長から、原子核の電磁能率、核スピン、荷電半径と変形度を求めた研究である。従来共鳴検出には β 線 γ 線の強度が用いられてきたが、寿命が長い同位体には適用できなかった。新規に導入した MRTOF によって同重体・核異性体を分別してしかも同時に観測できるため、イオン計数によって能率よく測定できるようになった。

2. 実験装置改良

1) KISS におけるレーザー共鳴核分光の分解能を飛躍的に上げて、電磁能率と荷電半径測定の精度および適用範囲を広げるために、ガスセルから射出するジェットにおいて共鳴イオン化する新しい方式の開発を継続している。これには 2020 年度に整備した新しい色素レーザーが大きく貢献することが期待できる。

2) MRTOF の同重体・核異性体分別能力を生かして、純粋な核異性体ビームを使って $\beta \gamma$ 分光を行うことや、MRTOF による識別子をつけて同時に複数の同重体・核異性体の分光実験を行えるようにするよう、KISS ビームラインの配置換えを開始した。 $\beta \gamma$ 検出器群を可動式にし、KISS ビームをそのまま、もしくは MRTOF で分別・標識付後の双方で使えるようにすることを目指している。(図2)

3) 新しい検出器、 β ToF 及び γ ToF の開発を進めている。これまで MRTOF の飛行時間検出器に α 線検出器を仕込んだ α ToF は超重元素の超高選別度の質量測定や、質量標識付き α 崩壊分光に大変高い性能を示してきた。現在これを拡張し、 β 線を検出できるようにした β ToF と、 γ 線検出器群の中心のテープ上に打ち込まれたイオンの2次電子を利用して ToF 検出器にする γ ToF の導入を目指している。これらを用いることで様々な崩壊モードの原子核に対して MRTOF を生かした核種識別分光が可能となり、分光研究におけるデータの確からしさと測定能率を飛躍的に向上させることが期待される。

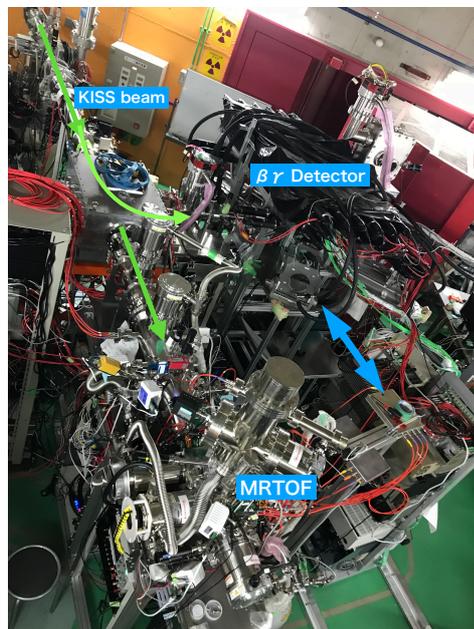


図 2 再配置中の KISS 測定室

3. MRTOF を用いた網羅的質量測定の進展

WNSC では理研仁科センターの低速 RI ビーム生成装置開発チームと共同で、RIBF の基幹装置である入射核破砕片分離器 BigRIPS に高周波ガスセルを用いた低速 RI ビーム施設(SLOWRI)を整備している。ここでは BigRIPS が提供する広範囲の原子核に対して MRTOF を用いて能率よく高精度質量測定を実施することができる。装置は末端のビームダンプ位置に置かれており、

パラサイトで質量測定実験を行うことができる。2020年11-12月には、上流のインビーム γ 実験のパラサイトで装置のオンライン試験を実行した。高周波ガスセル装置、イオントラップ装置、MRTOF装置ともに初回から高い性能を示した。重い元素では全効率1%を超え、質量分解能は50-80万を達成した。実際に70余の原子核(図1の紫印)の質量の測定に成功し、中でも88As, 89As, 112Moについては初の質量測定に、86Ge, 90Se, 91Se, 59Cr, 57V, 58V, 59V, 56Tiについては一桁以上精度を上げたことに相当する。



図3 コロナ禍の実験風景

この結果をうけて、12月に行われた課題採択委員会では2件のBigRIPS-SLOWRIのMRTOF質量測定計画(N=126近傍核、78Ni近傍核)が採択された。2022年秋には実施できる予定であるとともに、パラサイト実験は4月から随時継続して進めていく。

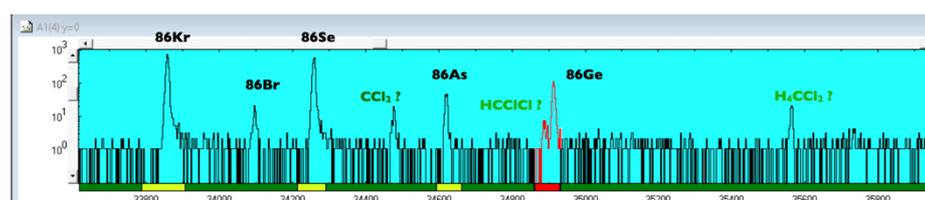


図4 質量測定試験実験中のToFスペクトル例(A=86同重体)

4. KISS-2へむけて

宇宙における元素合成研究のゴールはウランの起源の探訪である。この原子核は核図表のウランの南東(より中性子過剰)に位置し、RIBF, FRIB, FAIRなどの世界最先端の施設で使われている破碎反応や核分裂反応では原理的に到達することができない。可能性があるのは、RIビームによる融合反応か、KISSで開発研究をしてきた多核子移行反応(MNT)とされている。MNTは、低エネルギー反応であり、独特の広い角度分布を持ち、極めて大きな多重度を持つことが特徴であり、大強度ビーム使用の困難、高効率分離の難しさが大きな障害であった。

KISS-2では、1)特徴的な角度分布を逆手に取った一次ビーム分離器の導入、2)高周波ガスセルとMRTOFの組み合わせで「敢えて分離せずに全て同時に測定する」ことを実現し、この研究分野のGame Changerたることを期待している。

現行のKISSにおいてもウランビームおよびウラン標的を用いたMNT試験を開始するべく準備を進めている。KISS-2の技術面を含めた検討は、KEK・理研・JAEA・東大などの広いメンバーからなる検討会議を頻繁に開催しており、2021年夏前にはCDRをまとめる予定である。