

相対論的エネルギー重イオン蓄積リングを用いたエキゾチック核の質量精密測定 Precision Mass Measurement of Exotic Nuclei at the Storage Ring

プロジェクト代表者：山口貴之（理工学研究科・准教授）

T. Yamaguchi (Graduate School of Science and Engineering, Associate Professor)

1 はじめに

本研究はドイツ重イオン科学研究所(GSI)の高エネルギー重イオン加速器施設を利用して、エキゾチックな不安定原子核の質量と寿命を系統的に精密測定するものである。

質量は原子核物理学にとって最も基礎的な量であり、様々に提案されている原子核の統一モデルを検証する重要な役目を担っている。例えば、いわゆる質量公式と呼ばれる現象論的定式が多々提案されているが、安定線から離れるにつれて、公式によっては1MeV以上もエネルギーが異なっている。また、系統的な質量精密測定によって殻構造の変化、すなわち魔法数の変化や核の変形度を議論することができるし、質量から計算される束縛エネルギーによって原子核の存在領域や崩壊モードを議論することもできる。例えば、 ^{45}Fe という陽子過剰な不安定核に2陽子放出という新しい崩壊モードが存在することが示唆され、実際ごく最近実験的に確認されている。

質量は星の終焉で起こる超新星爆発での元素合成過程、いわゆるr-プロセスを理解する上でも非常に重要な量であると認識されている。r-プロセスでは、原子核が高温高密度中で中性子を急速に吸収する過程と β 崩壊する過程との競合によってその道筋が決定される。特に、NiやSnといった魔法数近傍では原子核が安定になるため、r-プロセスの道筋に大きな影響があることが知られている。本研究ではまさにr-プロセスに関与する中性子過剰なエキゾチック核である ^{135}Sn 周辺の原子核をターゲットとした。

この研究は、GSIの将来計画であるFAIR(Facility for Antiproton and Ion Research)の中の原子核分野(NuSTAR: Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions)国際共同研究のひとつILIMA(Isomeric beams, Lifetimes and Masses collaboration)として位置づけられている。日本からは著者を代表として新潟大や筑波大とともに貢献している。

2 実験

実験は2006年7月から8月まで予備実験も含めて2週間以上にわたって行った。高エネルギー重イオンシンクロトロンSISで核子当たり約400MeVまで加速したウランビーム ^{238}U をベリリウム標的板(Be)に照射し、核分裂反応を用いて ^{135}Sn 核をはじめとする周辺の中性子過剰な不安定核を2次ビームとして生成した。2次ビームには一般に様々な核が含まれている。 ^{135}Sn を選択するために、核破砕片分離装置FRS(Fragment Separator)を利用した。2次ビームの分離はBp- ΔE -Bp法に基づいている。ここでBpは磁気剛性率(magnetic rigidity, $\propto A/Z$), ΔE はエネルギー

一損失を示す。分離装置FRSのBρを目的の¹³⁵Snに調整することでバックグラウンドは除去される。最終的に¹³⁵Snを含む2次ビームを蓄積リングに入射した。

質量は蓄積リングを周回するイオンの周波数(f)から求められる。一般に周波数(f)は次のように書ける。

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{\gamma_t^2} \frac{\Delta(m/q)}{m/q} + \frac{\Delta v}{v} \left(1 - \frac{\gamma^2}{\gamma_t^2}\right)$$

ここで m , q , v , γ はそれぞれイオンの質量、電荷、速度、相対論的エネルギーを示し、 γ_t は蓄積リングのトランジションエネルギーを表す。この実験では蓄積リングに入射される2次ビームのエネルギー γ がトランジションエネルギー γ_t と等しくなるよう調整する。よって上式の第2項の寄与が消去され、周波数が質量に比例することになる(等時性法, IMS: Isochronous Mass Spectrometry)。イオンの周期は蓄積リング内に設置したTOF(飛行時間)検出器を用いて測定した。TOF検出器は約10 μ g/cm²厚の極薄の炭素薄膜とMCP(マルチチャネルプレート)からなる。イオンが薄膜を通過すると発生する2次電子をMCPでとらえ通過時間とする。本実験では最新デジタルオシロスコープ(テクトロニクス社, サンプルングレート40GS/s, 周波数帯域15GHz)を用いてTOF検出器からのパルスを記録した。

これまでの実験と比較して本実験の特徴は、核破砕片分離装置FRSの運動量アクセプタンスを10⁻⁴まで狭めることによって、蓄積リングに入射される粒子の速度を精密に決めたところにある。これにより質量決定精度を今までより約10倍向上させることに成功した。

3 結果と展望

今回の実験により予備的な結果としてではあるが、中性子過剰な数十の原子核の質量を新しく決めることができた。さらに、これまでの質量精度は10⁻⁵程度であったが、今回10⁻⁶まで精度を向上させることができた。中間報告として2つの論文を発表している[1, 2]。全データは数テラバイトにも及ぶため、最終結果を得るべく現在解析中である。

参考文献

[1] Yu.A. Litvinov et al., Nucl. Phys. A787 (2007) 315c.

[2] R. Knoebel et al., Proc. International Symposium on Nuclear Physics (Tours 2006), Sep5-8, 2006, France.