

多価イオンを用いた量子力学的スピン選択則の検証

エキゾチック核の寿命と質量の精密測定

プロジェクト代表者：山口貴之（理工学研究科・准教授）

1. はじめに

本研究は多価イオン状態でのベータ崩壊（電子捕獲）の寿命とスピンの関連性をイオンの価数を変化させて調べるものである。

通常原子核は中性で電子に覆われているため、ベータ崩壊では崩壊電子とニュートリノは核外へ放出される。ところが軌道電子をすべて剥ぎ取った状態では、崩壊電子にパウリ禁止律が働かず、電子はK殻にとどまりニュートリノのみが核外へ放出されるというエキゾチックな崩壊モード（束縛状態ベータ崩壊）が起こる。価数個分の電子の静止質量の変化に起因して崩壊のQ値が変わるため位相空間因子も変化し、例えば、中性な ^{163}Dy 原子（安定に存在する）の半減期が50日へと変化したり、宇宙時計として有名な ^{187}Re では 5×10^9 年から9桁も速くなったりすることが報告されており、星の中心部に於ける熱いプラズマで起こる元素合成の理解に大きな影響を与えている。

本研究ではまず陽電子崩壊と電子捕獲の競合過程に着目する。完全に電子が剥ぎ取られた裸のイオン状態と水素様イオンとの比較により、電子捕獲の確率が電子スピンを含めた系全体でどのように変化するか調べる。対象とする原子核は ^{64}Cu と ^{140}Pr である。これらは互いに磁気モーメントの符号が異なるため、始状態での電子スピンを含めた基底状態の全スピンの異なる。それによって、 ^{64}Cu と ^{140}Pr の崩壊はそれぞれ禁止遷移と許容遷移となり、中性原子とはまったく異なる崩壊定数を持つはずである。

また、軌道電子の有無でQ値が変化するため、裸のイオンのアルファ崩壊に於いても、崩壊定数が中性状態とは変化すると予想される。理論計算によるとFr, Rn領域で、約10%程度崩壊定数が変化すると予想されている。

2. 実験

ドイツ重イオン科学研究所（GSI）は、重イオンシンクロトロンSIS、核破砕片分離装置FRSおよび蓄積リングESRの組み合わせによって、これらの実験を行うことができる唯一の加速器施設である。ESRでは、Schottky Mass Spectrometry（SMS法）とIsochronous Mass Spectrometry（IMS法）を用いて、エキゾチック核の質量と寿命の精密測定を行ってきた。この一連の実験は、GSIの将来施設 FAIR[1]

（Facility for Antiproton and Ion Research）において主要な国際共同研究プロジェクトの一つであるILIMA（Isomeric beams, Lifetimes and Masses collaboration）へと拡張されて

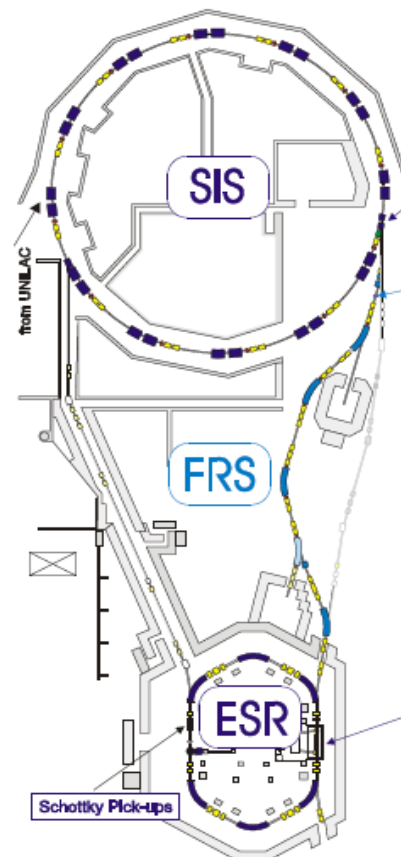


図1 GSIの加速器施設

いる。日本からは埼玉大学を中心に新潟大学および筑波大学から参加している。

GSIの加速器施設を図1に示す。重イオンシンクロトロンSISからの ^{238}U ビーム(核子当たり約500-700MeV/u、 10^9 個/パルス)をBe生成標的(約 2g/cm^2)に照射して、核分裂反応あるいは核破砕反応によって目的のエキゾチック核を生成する。生成標的からは様々な反応生成物が生成されるが、核破砕片分離装置FRSを用いて、飛行中に $B\rho\text{-}\Delta E\text{-}B\rho$ 法によって不要なイオンを除去し、目的のイオンからなるビームを選別する。得られたビームを蓄積リングESRに入射する。ESR中では、確率冷却法と電子冷却法を用いて、入射したすべてのイオンの速度を一定にする。周回周期はイオンの質量(M/Q)にのみ依存するため、Schottkyパワースペクトルのピーク位置から質量、ピーク面積の時間依存性から寿命を決定することができる(SMS法)。

3. 結果および展望

3-1. 検出器開発

平成19年度は蓄積リング中での周回周期を精密測定するための検出器開発を行った。ESRで使用しているTOF検出器は、厚さ約 $10\mu\text{g/cm}^2$ の炭素薄膜とMCPからなる。イオンが炭素薄膜を通過すると、そこで2次電子が発生する。発生した2次電子を電場と磁場を用いてMCPに導き、MCPの高速パルスから時間情報を得る(IMS法)。この検出器に代わりうる高時間分解能検出器として、ミクロンオーダー厚の極薄シンチレータを開発した。放射線医学総合研究所に於いて、核子当たり200MeV/uのXe, Kr, Feビームを用いてTOF検出器の特性を試験した。その結果、使用した全てのビームに対して時間分解能100ps以下を得た[2]。

3-2. エキゾチック核の質量測定

r-processの反応過程を決定するために、r-process領域の中性子過剰なエキゾチック核の質量測定の解析を進めている。質量測定のデータはテラバイトにも及ぶため、将来計画ILIMAのためにも解析ソフトウェアの開発は重要である。19年度は、サンプリングレート40GSのデジタルオシロスコープ(テクトロニクスTDS6154C)のデータ解析ソフトウェアを開発した。解析の結果、8個のエキゾチック核の質量をはじめて決定することに成功した[3]。

3-3. アルファ崩壊の寿命と軌道電子

アルファ崩壊の崩壊定数に対する電子遮蔽の影響を調べるために、 ^{213}Fr と ^{212}Rn のアルファ崩壊の寿命を精密測定した。結果は現在解析中である。電子捕獲の実験は20年度行われる予定である。

参考文献

[1] http://www.gsi.de/fair/index_e.html.

[2] S. Nakajima, T. Kuboki, M. Yoshitake et al., "Development of a time-of-flight detector for the Rare-RI Ring project at RIKEN", Nucl. Instrum. Methods B, doi:10.1016/j.nimb.2008.05.085.

[3] B. Sun, R. Knoebel, Yu.A. Litvinov et al., "Nuclear Structure Studies of Short-Lived Neutron-Rich Nuclei with the Novel Large-Scale Isochronous Mass Spectrometry at the FRS-ESR Facility", Nucl. Phys. A, submitted.