

氏 名	中島 真平
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	博理工甲第 726 号
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	等時性蓄積リング (ESR) を用いた短寿命中性子過剰核質量の直接測定
論文審査委員	委員長 教 授 鈴木 健
	委 員 教 授 吉永 尚孝
	委 員 連携教授 櫻井 博儀
	委 員 連携教授 本林 透
	委 員 准教授 山口 貴之

論文の内容の要旨

質量は、原子核の束縛を示すエネルギー指標であり、統一的な原子核モデルを構築するために不可欠な要素である。これまでに安定核の質量データから原子核のモデルが構築され、経験的な質量公式がいくつか考えられている。しかしながら、これらの公式は不安定核に対しては常に外挿となり、実験値から数 MeV ($\Delta m/m \sim 10^{-4}$) もずれてしまう。また、原子核の質量は宇宙の元素存在比を解明する上での重要な要素である。Fe(鉄) から U(ウラン) までの元素がどのようにしてできたのか? のモデルとして、超新星爆発の際に生じる膨大な圧力や熱といったエネルギーによって多量の中性子が捕獲され、U(ウラン) までの重い核が生成される過程(r-process) が考えられている。しかしながら、r-process は中性子過剰不安定核を経由する反応である為、測定データが少ない。元素合成過程には、多くの理論モデルが考えられているが、ばらつきが大きく、統一的には理解されていない。

本研究では、中性子過剰核 ^{133}Sn (スズ) 領域の原子核の質量を精度 $\Delta m/m \sim 10^{-6}$ を目的とし測定を行った。 ^{133}Sn は陽子数が 50 であり、原子核の魔法数に位置する。そのため不安定核の殻構造の観点から非常に興味深い領域である。また、 ^{133}Sn 周辺は超新星などの星の中で起こる元素合成過程(r-process) が経る中性子過剰領域であり、元素合成過程の解明に重要な情報となる。

質量測定は安定核から離れるほど精度が低くなる。測定を困難にしている要因は、不安定核の生成確率の低さと寿命の短さが挙げられる。本研究ではこれらの要因を考慮し、ドイツの研究所 GSI にて実験を行った。GSI では、破碎片分離装置(FRS)と蓄積リング(ESR)を組み合わせ、二つの質量測定方法で不安定核の質量を高精度で測定することができる。一つは、Schottky Mass Spectroscopy (SMS) 法と呼ばれ、粒子の速度を Electron Cooler により $\Delta v/v \sim 3 \times 10^{-7}$ (v : は粒子の速度) まで冷却し、ESR を周回する周回周期から質量を決定する。この手法では、冷却時間の制限がかかり、寿命が数秒以上の原子核に限られる。もう一つの手法は、Isochronous Mass Spectrometry (IMS) 法と呼ばれ、ESR を周回する粒子の速度によらず周期が一定となるアイソクロナス状態に調整することで、短寿命な原子核を測定できる手法である。本研究では寿命

が1秒以下の不安定核を測定するため、IMS法による測定を行った。従来のIMS法では $\Delta m/m \sim 10^{-5}$ を達成しているが、本研究ではさらに不安定核の運動量幅を $\Delta p/p \sim 1.5 \times 10^{-4}$ に狭めることで $\Delta m/m \sim 10^{-6}$ を目指した。本研究は、Uの核分裂反応を利用し、IMS法によるr-process領域原子核質量測定として初の試みである。

安定核である ^{238}U をシンクロトロン(SIS)により411MeV/uまで加速し、 $1\text{g}/\text{cm}^2$ の ^9Be (ベリリウム)標的へ照射し、核分裂反応により不安定核を生成する。標的を通過時にほとんどの粒子は電子が全て剥がれた状態になるが、小さい確率で電子が1つか2つ束縛されたままの状態の不安定核も存在する。生成された不安定核をFRSにより磁気剛性率が等しいものだけを取り出し、ESRへ入射する。このとき、FRSの磁場を382MeV/uの $^{133}\text{Sn}^{50+}$ に合わせ、スリットにより運動量幅を $\Delta p/p \sim 1.5 \times 10^{-4}$ に狭めた。20秒毎に不安定核をESRへ入射し、4日間でおおよそ13,000 shot測定した。不安定核の周回周期はおおよそ500ナノ秒であり、ESRの一部に設置した飛行時間検出器によって通過時間を記録した。飛行時間検出器は不安定核が通過する領域に $17\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜を配置し、不安定核が薄膜を貫通する際に発生する二次電子を電磁場によりMicro Channel Plate(MCP)に誘導する。MCPからシグナルをサンプリングレート40GS/sのオシロスコープTektronix TDS 6154Cにて1ミリ秒間($\sim 2,000$ 周回)記録し、オフラインにて解析を行った。

オシロスコープに周回毎に記録されたシグナルを不安定核の周回周期ヒストグラムに直し、Al(アルミニウム)からBa(バリウム)領域の原子核61核種の周回周期ピークを得た。周回周期から質量へは、質量が既知な核種を参照し相対的に決定した。中性子過剰核領域の既知核の多くが、 β -endpoint測定から得られた値であり誤差が大きく、参照核として用いることで系統誤差が大きくなってしまう。本測定の誤差も主に系統誤差で決まっている。これまでの質量とのおおきな隔たりは近年の測定にもみられており、近年penning trapにより直接測定された $^{105-107}\text{Nb}$ 同位体では、それぞれ943(100)、905(200)、1205(400)keVも異なっている。本研究では既知核として、少なくとも2つの実験で一致しており、かつ誤差が50keV以下である核種をAME2003及び、近年のJYFLTRAPのデータから22核種選抜し用いた。

以上の解析により参照核以外の39核種の質量を決定し、そのなかで新しく5つの核種の質量を決定した。以下は測定した核種である。

新しく決定した5核種：

$^{85,86}\text{As}$ (ヒ素)、 ^{138}Te (テルル)、 ^{141}I (ヨウ素)、 ^{143}Xe (キセノン)

参照核 22核種：

^{89}Br (臭素)、 $^{91,93}\text{Kr}$ (クリプトン)、 $^{94,95}\text{Rb}$ (ルビジウム)、 $^{96,97,98}\text{Sr}$ (ストロンチウム)、 $^{99,101}\text{Y}$ (イットリウム)、 ^{103}Zr (ジルコニウム)、 ^{105}Nb (ニオブ)、 $^{109,110}\text{Mo}$ (モリブデン)、 $^{111,112}\text{Tc}$ (テクネチウム)、 ^{115}Ru (ルテニウム)、 $^{119,120}\text{Pd}$ (パラジウム)、 $^{132,133}\text{Sn}$ (スズ)、 ^{143}Cs (セシウム)

その他測定した34核種：

^{33}Al (アルミニウム)、 ^{73}Cu (銅)、 ^{76}Zn (亜鉛)、 $^{78-80}\text{Ga}$ (ガリウム)、 ^{83}Ge (ゲルマニウム)、 $^{83,84}\text{As}$ (ヒ素)、 $^{86-88}\text{Se}$ (セレン)、 ^{88}Br (臭素)、 ^{94}Kr (クリプトン)、 ^{97}Rb (ルビジウム)、 ^{100}Sr (ストロンチウム)、 $^{100}\text{Y}^*$ (イットリウム)、 ^{101}Zr (ジルコニウム)、 ^{107}Nb (ニオブ)、 ^{110}Mo (モリブデン)、 $^{113}\text{Ru}^*$ (ルテニウム)、 ^{118}Rh (ロジウム)、 $^{122}\text{Ag}^*$ (銀)、 $^{125}\text{Cd}^*$ (カドミウム)、 $^{133,135}\text{Sb}$ (アンチモン)、 $^{135-137}\text{Te}$ (テルル)、 $^{137,139}\text{I}$ (ヨウ素)、 $^{140,141}\text{Xe}$ (キセノン)、 ^{146}Ba (バリウム)

論文の審査結果の要旨

本研究は、中性子過剰核 ^{133}Sn (スズ) 領域の原子核の質量を精度 $\Delta m/m \sim 10^{-6}$ を目的とし測定を行ったものである。

^{133}Sn は陽子数が 50 であり、原子核の魔法数に位置する。そのため不安定核の殻構造の観点から非常に興味深い領域である。また、 ^{133}Sn 周辺は超新星などの星の中で起こる元素合成過程 (r-process) が経る中性子過剰領域であり、元素合成過程の解明に重要な情報となる。質量測定は安定核から離れるほど精度が低くなる。測定を困難にしている要因は、不安定核の生成確率の低さと寿命の短さが挙げられる。本研究ではこれらの要因を考慮し、ドイツの重イオン科学研究所 (GSI) にて実験を行った。GSI では、破碎片分離装置 (FRS) と蓄積リング (ESR) を組み合わせ、二つの質量測定方法で不安定核の質量を高精度で測定することができる。一つは、Schottky Mass Spectroscopy (SMS) 法と呼ばれ、粒子の速度を Electron Cooler により $\Delta v/v \sim 3 \times 10^{-7}$ (v : は粒子の速度) まで冷却し、ESR を周回する周回周期から質量を決定する。この手法では、冷却時間の制限がかかり、寿命が数秒以上の原子核に限られる。もう一つの手法は、Isochronous Mass Spectrometry (IMS) 法と呼ばれ、ESR を周回する粒子の速度によらず周期が一定となるアイソクロナス状態に調整することで、短寿命な原子核が測定できる手法である。

本研究では寿命が 1 秒以下の不安定核を測定するため、IMS 法による測定を行った。従来の IMS 法では $\Delta m/m \sim 10^{-5}$ を達成しているが、本研究ではさらに不安定核の運動量幅を $\Delta p/p \sim 1.5 \times 10^{-4}$ に狭めることで $\Delta m/m \sim 10^{-6}$ を目指した。本研究は、U の核分裂反応を利用し、IMS 法による r-process 領域原子核質量測定として初の試みである。

実験手法は以下のものであった。安定核である ^{238}U をシンクロトロン (SIS) により 411 MeV/u まで加速し、 1g/cm^2 の ^9Be (ベリリウム) 標的へ照射し、核分裂反応により不安定核を生成する。生成された不安定核を FRS により磁気剛性率が等しいものだけを取り出し、ESR へ入射する。このとき、FRS の磁場を 382 MeV/u の $^{133}\text{Sn}^{50+}$ に合わせ、スリットにより運動量幅を $\Delta p/p \sim 1.5 \times 10^{-4}$ に狭めた。20 秒毎に不安定核を ESR へ入射し、4 日間でおおよそ 13,000 shot 測定した。不安定核の周回周期はおおよそ 500 ns 秒であり、ESR の一部に設置した飛行時間検出器によって通過時間を記録した。飛行時間検出器は不安定核が通過する領域に $17\text{ }\mu\text{g/cm}^2$ の炭素薄膜を配置し、不安定核が薄膜を貫通する際に発生する二次電子を電磁場により Micro Channel Plate (MCP) に誘導する。MCP からの誘導電荷のもたらした信号をサンプリングレート 40 GS/s のオシロスコープ Tektronix TDS 6154C にて 1/1000 秒間 ($\sim 2,000$ 周回) 記録し、オフラインにて解析を行った。

オシロスコープに周回毎に記録されたシグナルを不安定核の周回周期ヒストグラムに直し、Al (アルミニウム) から Ba (バリウム) 領域の原子核 61 核種の周回周期ピークを得た。周回周期から質量へは、質量が既知な核種を参照し相対的に決定した。なお誤差だが、中性子過剰核領域の既知核の多くが、 β -endpoint 測定から得られた値であり誤差が大きく、参照核として用いることで系統誤差が大きくなってしまう。本測定の誤差も主に系統誤差で決まっている。これまでの質量とのおおきな隔たりは近年の測定にもみられており、近年 penning trap により直接測定された $^{105-107}\text{Nb}$ 同位体では、それぞれ 943(100)、905(200)、1205(400) keV も異なっている。

本研究では既知核として、少なくとも 2 つの実験で一致しており、かつ誤差が 50 keV 以下である核種を AME2003 及び、近年の JYFLTRAP のデータから 22 核種選抜し用いた。以上の解析により既知核以外の

39 核種の質量を決定した。

本測定で新しく5つの核種、 $^{85,86}\text{As}$ (ヒ素)、 ^{138}Te (テルル)、 ^{141}I (ヨウ素)、 ^{143}Xe (キセノン) の質量を決定し、各種理論模型との比較を行った。

以上、本論文の研究は、査読制度のある国際学術雑誌に1編掲載され、このほか発表者自身による物理学会での報告がある。本論文に関連する研究として、査読制度のある国際学術雑誌に1編の既発表論文もある。また査読制度のある国際学術雑誌に1編の英文で掲載された本研究に関する上記の発表論文は論文提出者が中心的役割を演じていることからして、本論文は十分に学位論文に値すると判断され、学位論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。