

原子核質量研究の現状

ーRIBF-ULIC Symposium: Physics of Rare-RI Ring に参加してー

日本原子力研究開発機構

先端基礎研究センター

重原子核反応フロンティア研究グループ

小浦 寛之

koura.hiroyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

2011 年 11 月 10～12 日に理化学研究所（理研：和光市）の RIBF 棟にてシンポジウム「RIBF-ULIC Symposium: Physics of Rare-RI Ring」が開催された。これは天体核物理及びその関連分野に関する国際シンポジウムである OMEG 11（The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies）のサテライトシンポジウムに位置され、原子核質量測定に関する研究に焦点をあてて議論を行ったものである。本稿ではシンポジウムで取り上げられた原子質量研究に関する話題を中心に紹介する。なお ULIC は理研の共用促進・産業連携部（User Liaison and Industrial Cooperation）を意味する。

現在理研 RI ビームファクトリー（RIBF）では大型基盤実験装置の一つである「稀少 RI リング（Rare-RI Ring）」の製作が計画されており、この稀少 RI リングでどのような研究テーマが展開できるか、技術的な側面も含めて議論を行おうというのが研究会の主旨である。稀少 RI リングの大きな目的は、稀少 RI（不安定核と同義）の質量測定であり、研究会では不安定核の質量測定の現状が紹介され、稀少 RI リングを用いてどの領域の質量測定を目指すのかが議論された。同時に寿命測定、核反応測定など、質量測定以外に稀少 RI リングで展開できそうな研究テーマについても議論（後述）がなされた。

筆者が理研での蓄積リングによる原子質量測定のプロジェクトメンバーに接することになったのは 2003 年頃で、当時理研から筑波大に移って間もない小沢顕さんが TARN II 勉強会を月一回程度のペースで開いていて、その講師に招かれたのが最初である。TARN II とは東京都田無市（現在西東京市）にあった東京大学原子核研究所（核研）にあった蓄積リングのことで、核研の改組（KEK と東大 CNS に分かれる）とキャンパス返還に伴い、

TARN II の磁石を再利用して理研で新たに原子核実験が出来ないかを検討しているところであった。丁度その頃理研では RI ビームファクトリー (RIBF) が建設中であり、後に稼働が始まる 2006 年に向けて建屋を建設するところであった。筆者はその時理研に居て (2001~2004 年)、リニアック棟から見える建設現場で RIBF 棟が組み上げられている様子を見ていたことを記憶している。蓄積リングは RIBF 計画の次期計画における設置装置の一つとして超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) の下流側に設置を計画しており、設置を目指して現在に至っている。

その後「蓄積リングにおける元素合成、不安定核の研究 (2004 年 3 月、筑波大学)」などいくつかの研究会などを経て議論を進め、今回の国際研究会もその流れの一つと捉えることが出来る。

講演者は 25 名で日本の関係者の他、ドイツ、米国、中国からの発表であり、概ね GSI、CERN 等でのこれまでの実験の成果と、理研のこれからの実験の成果を中心とした発表がなされた。

2. 評価済み質量 Atomic Mass Evaluation (AME)

シンポジウムの最初のセッションでフランス原子核及び素粒子物理国立研究所 (IN2P3) の Meng Wang (王猛) 氏が評価済み質量 Atomic Mass Evaluation (AME) の講演を行った。原子質量の実験データは各研究機関で報告されるが、一般に質量値は基準とする原子の質量との相対値が測られるものであり、異なる実験で核種が重複する質量関係式を与え、また実験における誤差がそれぞれ付される。そこでこれら各原子の質量値を“評価”し、評価済み質量値を求める必要が生じる。これは我々がイメージするところの核データの作業であり、この作業は大量の作業を必要とする。そのような誤差付きの実験結果を整理して、評価済みの推奨値質量データとして提供しているのは CSNSM-IN2P3 の原子質量データセンター (AMDC) である。Wang 氏の説明によると質量分析の結果と核反応 Q 値の結果を結びつけて (測定手法は後述) 質量表を得た初期 (おそらく最初) の試みは M.S. Livingston と H.A. Bethe による 1937 年の仕事で、 ^{40}Ar までの質量分析と核反応のデータを結びつけた[1]。その後 1950 年代初期に若手の A.H. Wapstra (写真 1) を含むグループが多く (直接間接を含めて) 質量関係式から最小 2 乗法を用いて多くの核種の質量値を“評価”し、評価済み質量値を求めてきた。この方法による最初の原子質量表は 1955 年に公開され、その後事実上唯一のグループとして活動を継続してきた。以下は Wang 氏の講演の中で紹介したこれまでの評価済み質量データの一覧である。

- A.H. Wapstra, Physica **21** (1955) 367 and 385; J.R. Huizenga, Physica **21** (1955) 410
- F. Everling, L.A. König, J.H.E. Mattauch, A.H. Wapstra, Nucl. Phys. **18** (1960) 529

- L.A. König, J.H.E. Mattauch, A.H. Wapstra, Nucl. Phys. **31** (1962) 18
- J.H.E. Mattauch, W. Thiele, A.H. Wapstra, Nucl. Phys. A **67** (1965) 1, 32 and 73
- A.H. Wapstra and K. Bos, At. Data Nucl. Data Tables **19** (1977) 175
- A.H. Wapstra, G. Audi and R. Hoekstra, Nucl. Phys. A **432** (1985) 185
- G. Audi and A.H. Wapstra, Nucl. Phys. A **565** (1993) 66
- C. Borcea, G. Audi, A.H. Wapstra and P. Favaron, Nucl. Phys. A **565** (1993) 158
- G. Audi, A.H. Wapstra and M. Dedieu, Nucl. Phys. A **565** (1993) 193
- G. Audi, A.H. Wapstra, Nucl. Phys. A **595** (1995) 409
- G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A.H. Wapstra, Nucl. Phys. A **624** (1997) 1
- G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A.H. Wapstra, Nucl. Phys. A **729** (2003) 3
- A.H. Wapstra, G. Audi and C. Thibault, Nucl. Phys. A **729** (2003) 129
- G. Audi, A.H. Wapstra and C. Thibault, Nucl. Phys. A **729** (2003) 337

評価済みデータ (AME) は概ね 10 年以内に更新され、多くの研究者に利用されている。現時点で最後の公開となったのは 2003 年度で、残念なことに Wapstra は 2006 年 12 月 2 日に亡くなってしまった。その時点の共同研究者である G. Audi だけではこの仕事を継続して行うことが難しいという話も聞き、筆者を含め原子質量研究関係者はこのプロジェクトの継続を心配していたが、最近になって中国出身の Wang 氏がこの仕事を引き継いだのである。今回 Wang 氏により AME プロジェクトの現状が紹介された。評価者としての実験者とのやり取りのメールを紹介し、その中で実験論文の数値（精度に関連した部分）のタイプミスを発見、指摘したり、実験論文に載っていない生情報を問い合わせたりと核データ評価作業の実際を紹介し、具体的で面白い内容であった。Wang 氏は現在 AME の 2013 年版の公開に向けて精力的にプロジェクトを推進していることを約束していた。現在暫定の 2011 年版が Web 公開しており、



写真 1 : Prof. Aaldert H. Wapstra
(24 Apr. 1923 ~ 2 Dec. 2006)

URL: <http://amdc.in2p3.fr/masstable/filel.html>

からダウンロード可能である。

図 1 に AME から得られた、それまでの原子質量既知核種の変遷を載せる（1988 年以降）。1988 年で 1659 核種であった既知質量原子（核）が、2003 年に 2228 核種、2011 年に 2377 核種までが評価済み質量値として載せられている。図から中性子過剰側、不足側と安定核から離れた領域に広がっていることが分かる。

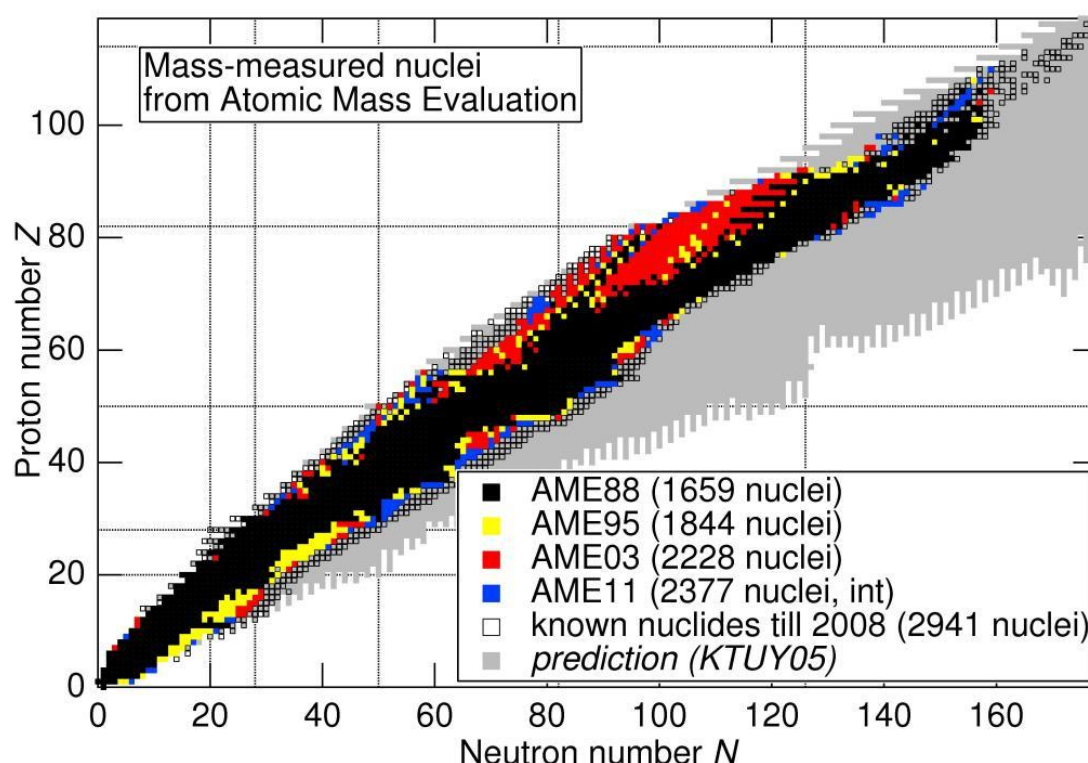


図 1：評価済み質量が得られた核種。1988 年以降のものを載せた。既知核は原子力機構核図表 2010[2]から、理論予測は KTUY 質量公式[3]のものを用いた。

3. 原子質量と理論研究

原子質量は原子核のもつ最も基本的な量である。原子質量は質量とエネルギーの同等性 $E = mc^2$ のために原子のもつ全エネルギーである。そのため、原子核の安定性を決定し、またその崩壊を支配し、反応の起こりやすさに決定的な影響をもつ。核分裂、核融合を考える場合、利用されるエネルギーは原子核の結合エネルギーによるものなので、実質的には原子核の質量の性質が極めて重要となる。核図表上での広範囲の質量値の系統的測定は原子核の大域的性質を理解するのに極めて重要である。前述の図 1 には質量模型計算による原子核の存在しうる領域が示されているが、それに比べて既知領域がまだまだ限定された領域であることがわかる。中性子過剰核側の質量研究が重要視される一つは超新星爆発における速中性子捕獲過程（r 過程）元素合成が挙げられる。図 2 は現在太陽系で観測されている元素同位体の存在比である。このような存在比がどのようにして

実現されるか、そしてウラン、トリウムといった重元素が鉛、ビスマスから孤立して存在しているのはr過程元素合成によるものと考えられている。現在のところこれに関わる核種のほとんどが質量未測定（図 1 の右下方の灰色領域）なので原子核理論をもとに計算を行っているが、そこで理論、特に反応、崩壊を司る原子質量（の差）の不定性の問題が生じる。現在の不安定核研究を行う多くの研究室・グループが元素の起源の解明を研究目的の一つに挙げることが多い。

シンポジウムでは天体核物理の概要として国立天文台の梶野敏貴氏からガンマ線バーストにおけるr過程元素合成という内容で、ガンマ線バーストの起源の問題からアミノ酸が左手系である起源とニュートリノとの問題まで、天体核物理の観点から幅広い解説を行った。

筆者は原子質量公式の現状という内容で講演を行った。一つは現在提案されている様々な

質量公式（模型）の性質・予測精度の問題を概説的に解説し、最新の評価済み質量値 AME2011 を含めた異なる年代の評価済み質量値に対する精度の変遷を示した。もう一つはr過程元素合成計算の質量公式依存性であり、従来から問題になっていた質量数 110 近傍のr過程生成量が理論計算で極度に不足する問題が、標準的な質量公式とされて比較利用されている FRDM 公式[5]が示すこの領域の質量値の振る舞いの特異性によるもので（筆者は理論計算上で急激な原子核形状の変化によるものと考えている）、一方 TUIY[6]、KTUY 公式[3]などではそれは見受けられずこの領域の核構造の再考を促し、またr過程計算を通して理論質量値を評価することが出来ることを示した。同時にそれゆえに実験による質量測定的重要性を指摘した。

中性子過剰核側の質量研究で興味深いのは核物質（Nuclear matter）の性質と関連させた研究である。ここでいう核物質はウランとか核分裂生成物といったものではなく、陽子と中性子が多量に存在すると仮定された物質で、例えば超新星爆発後などに生成されると考えられる中性子星が挙げられる。また、原子核を圧縮した時の圧縮率、陽子中性

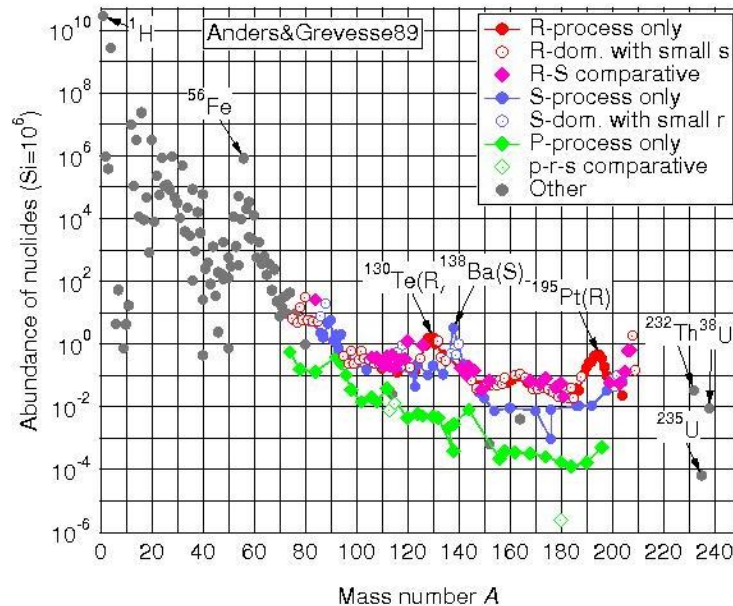


図 2：太陽系の元素の同位体数[4]。赤系統の核種及び ^{232}Th 、 $^{235,238}\text{U}$ のアクチノイド 3 核種が r 過程に関わる核種とされる。

子比が異なる原子核における表面の中性子スキンの性質などは、核物質を記述する状態方程式（原子核密度とエネルギーの関係を表す）の性質に影響し、様々な理論計算が発表されている。愛知淑徳大の親松和浩氏は、原子核の状態方程式と原子核質量測定の間を議論し、原子核密度における対称エネルギーの密度微分である L という量が状態方程式を特徴付け、それが質量値の差分量である 2 陽子分離エネルギー測定[7]（や質量値で決まる中性子ドリップラインの位置[8]）から制限を与えられないかを議論した。質量測定と状態方程式を関連付ける視点は実験関連の人たちにも興味を持ってもらったようで、質量測定の新たな意味付けとして期待している。

4. 原子質量と実験研究

4.1 半減期測定

今回のシンポジウムで大きなトピックの一つは西村俊二氏（理研）のグループによる中性子過剰核の半減期測定である。BigRIPS の下流に検出器をおき、質量数 110 中性子過剰核である ^{110}Zr をはじめとする、 ^{105}Sr 、 ^{112}Nb など 18 個の中性子過剰不安定核の寿命を世界で初めて測定したもので、RIBF の性能の高さを示すとともに、 r 過程元素合成に関わるこの領域の原子核の性質を理解する一旦になった。西村氏の結果は、実験で得られた半減期が FRDM 質量公式で計算された理論半減期より 2~3 倍短いというものであり、 r 過程が FRDM 模型で予想されたものよりより速く反応が進むことを示唆している[9]。今後は半減期測定をさらに中性子過剰核側に広げることと、これらの核種の質量測定を実施することを期待している。

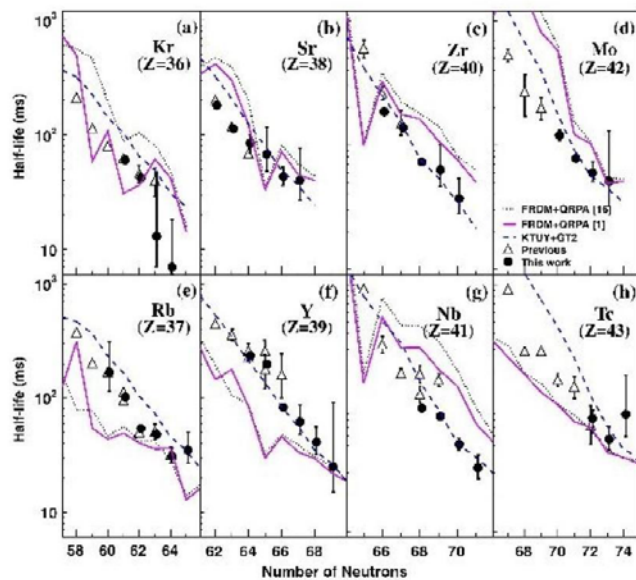


図 3 : β 崩壊半減期。白三角は従来の実験値、黒丸が今回得た実験値。青点線は FRDM+QRPA 計算による β 崩壊半減期理論値、青破線は KTUY+GT2 による β 崩壊半減期理論値。FRDM+QRPA は実験結果に対して外れる例が多い。一方 KTUY+GT2 は実験値の傾向を比較的良く再現しているようである。図は参考文献[9]より。

4.2 原子質量測定

このシンポジウムでは質量測定の施設についての紹介が多くなされた。ここで紙面を少し割いて、原子質量測定の原理を紹介する。

質量を求めるための実験は、大きく 2 種類に分けられる。ひとつは飛行している原子に横から力（電場や磁場による）を受けて方向を変えるのを測定するもので、慣性質量の差を得るものである。伝統的には質量分析器によるもので上記の軌道変化を直接測定していた。近年ではイオントラップ及び蓄積リング法と呼ばれる方法が主流である。どちらも磁場中のイオンのサイクロトロン振動数を測定する原理であり、それぞれ目的に応じて用いられている。

もうひとつは崩壊や反応の Q 値を測定するものである。 Q 値は崩壊や反応による運動エネルギー増加高であるのでこれによりエネルギーの関係が得られる。そしてエネルギーと質量の同等性を用いて原子質量間の関係式として表される。 Q 値による方法は、崩壊が基底状態－基底状態崩壊かどうかは核構造と照らし合わせて考察しないとわからないというのが問題で、特に超重核領域ではかなりの核種の α 崩壊 Q 値が得られているが、それが基底状態なのか確定できないので、基底状態質量として与えることがほとんど出来ないのが現状であり、質量を直接測定する重要性が認識されている。

イオントラップ

イオントラップとは電磁場を用いてイオンを空間に閉じ込める装置であり、ペニングトラップ (Penning Trap) とは静電場と静磁場を用いてイオンを閉じ込める方法で、考案したオランダのペニング (F.M. Penning, 1894~1953) の名にちなむ。具体的には原子をイオン化させて、これは強い一様な磁場中に弱い静電場を与え、磁力線のまわりを回転させる。その時サイクロトロン振動数

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{qB}{m} \quad (1)$$

を起こすので、その振動数を測ることにより比電荷 q/m 、そして質量 m を得るというものである。高精度 (10^{-6} を十分下回る) の質量値を得ることが出来る。

蓄積リング

蓄積リングにイオン化した原子核を閉じ込めて原子核崩壊や質量を測定する研究はドイツの GSI が中心となって進められている。蓄積リング内では回転するイオンの周波数変化は

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

で表される。 α は蓄積リングの形状で決まる量である。第 2 項が消えれば比電荷 m/q が得

られるので、質量を求めることが出来る。周回する粒子の速度を揃える、つまり $\Delta v \rightarrow 0$ とすると第 2 項が消える。ショットキー質量分析 (Schottky Mass Spectrography, SMS) は電子冷却することにより周回する粒子の速度を揃える方法で、これは場合によって 1 粒子でも検出が可能と高効率で 10^{-7} 程度以下の高分解能を持つのが利点である。ただし電子冷却に時間が必要なため (今のところ 10 秒程度)、短寿命核の測定が出来ない。一方 $\alpha=1/\gamma^2$ として第 2 項を消す方法も考えられ、等時性質量分析 (Isochronous Mass Spectrography, IMS) はこれにあたる。磁場系等の調整の難しさで分解能を落としている (10^{-5} 程度) が、電子冷却が必要ないため例えば 1 ミリ秒以下の短寿命でも測定可能であるのが利点であり、不安定核測定に関しては都合がよい。

4.3 各研究機関での質量測定の実状

以下、今回のシンポジウムで紹介された各研究機関の質量測定の実状について紹介する。

GSI

GSI の蓄積リング ESR は様々な成果を出しており、この分野を先導しているといえよう。ESR は SMS、IMS を目的に応じて切り替えて利用できるようになるなど汎用性にも長けている。GSI 関連の講演者数人がこの仕組みの説明とこれまでの成果について紹介していた。

ペニングトラップ質量測定としては重イオン電磁分離器 SHIP (Separator for Heavy Ion Products) の下流にイオンをトラップする SHIPTRAP を開発した。SHIP ではこれまで超アクチノイド原子核を多く合成してきた (そして現在も) 実績がある。質量測定としては一昨年 $^{252,253, 254}\text{No}$ の報告があり [10,11]、昨年ロシアで開催されたシンポジウム TAN11 (ソチ、9 月) では $^{255,256}\text{Lr}$ の質量測定の結果も合わせて報告している。

なお、原子質量測定と素粒子物理との融合研究として Klaus Blaum 氏 (マックスプランク研究所) の発表を紹介しておく。彼らの興味はニュートリノの性質である。一つはニュートリノがマヨラナ粒子 (粒子と反粒子が同じ) なのかディラック粒子 (異なる、標準理論はこちら) なのかを実験的に確かめることで、2 重 β 崩壊の Q 値をペニングトラップを用いた精密測定 (0.1 keV 程度以下) で測ることによる検証実験を提案している。もう一つはニュートリノの質量の測定で、 ^3T の β 崩壊のカリープロットの精密測定を行うもので KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) と読んでいる。伝統的な方法であるが、理論の不定性が入らないのが利点といえる。0.2 eV の精度で求めることを計画している。

CERN

ペニングトラップに関して、CERN のペニングトラップである ISOLTRAP が質量測定に関して実績があり、Sarah Naimi 氏 (IN2P3、現在理研) が質量測定から得られる原子核形状の変化の遷移や、中性子過剰核での基底状態単一粒子状態の反転といった原子核構造と関連させる形での話題を提供していた。また、Robert Wolf 氏 (ドイツグレイスヴァルト大学) は ISOLDE (CERN) におけるペニングトラップ (ISOLTRAP) の構成と、例として質量未測定核種 ^{81}Zn の質量測定の結果について紹介した。

蘭州

中国科学院 (CAS) の現代物理研究所 (Institute of Modern Physics, IMS) の Yu-Hu Zhang 氏は蓄積リングでの IMS による質量測定を紹介した。彼らの IMS での分解能は 10^5 程度とそれほど高くないが、短寿命でも測れる利点を生かし、 ^{58}Ni や ^{78}Kr といった安定中性子不足核ビームを用いた中性子不足核の測定を行い、 $N = Z$ 近傍で $N < Z$ となる核種について、これまで質量未測定であった核種の測定を行っていた。これらの核種は陽子・中性子のアイソスピン対称性の研究に重要であり、また、星の元素合成における速陽子捕獲過程 (rp 過程) に関連する核種としても重要である。

彼らは $1 f_{7/2}$ 軌道 (陽子または中性子数 21~28 に相当)、 $1 f_{5/2}$ 軌道 (同 33~38 に相当) の質量値についてアイソスピン多重項が高次で破れているようであることを指摘するなど話題と提供していた。

ANL

ATLAS (Argonne Tandem Linac Accelerator System) の Scientific Director の Guy Savard 氏 (ANL) は ^{252}Cf の核分裂生成物を利用して中性子過剰核を作る CARIBU (Californium Rare Ion Breeder Upgrade) プロジェクトを紹介した。 ^{252}Cf は通常の意味で利用可能な最重の中性子過剰核であることが利点であることが主張であり、これを用いて彼らが CPT (Canadian Penning Trap) と呼ぶペニングトラップでの質量測定を計画している。

理研

理研で計画されている蓄積リングでは IMS ベースで装置構築をする方針で、小沢氏がその概要を説明し、今後の展望について紹介した。RIBF の地下 2 階に SHARAQ (Spectroscopy with High-resolution Analyzer and RadioActive Quantum beams) があり、その下流の奥に TARN II で使われていたマグネットを再利用して構築する計画である。目標としては核種の例として 2 重魔法数であるとされる質量未測定核 $^{78}_{28}\text{Ni}_{50}$ (半減期 110ms) を挙げ、RIBF でのビームの実績をもとにすると 1 日に 3 個程度リングに導き出せそうだと

という見つもりを示し、測定が可能であるという見解を述べていた。

蓄積リングに頼らない質量測定として理研の和田道治氏が提案した方法を紹介する。理研では多反射時間飛行法 (MR-TOF) による質量測定法が開発されていて、これはシリンダ内でイオンを多往復させ、時間飛行法で質量を測定しようというアイデアである。筆者が理研にいた 2000 年初め頃には開発がなされていて、長さ 60cm 程のシリンダを開発していた。装置がコンパクトでシンプルであり、構成からくるシステムティックエラーも比較的少なく、また短時間 (数ミリ程度以下) で高精度 (10^{-7} 程度) の質量測定を可能にするという利点がある。RIBF の上流の BigRIPS から得られる高エネルギー RI ビームを減速冷却し、イオントラップ中に停止させて下流で ISOL で引き出して測定する。BigRIPS により大強度の中性子過剰核を得ることができ、その点で期待されるが、高エネルギー (例えば 300 A MeV) の RI を一旦止める必要がある点が難点かもしれない。

もう一つ和田氏が提案したのは MR-TOF を気体充填型反跳分離装置 (GARIS) の下流に付けて超重核の質量測定をしようというアイデアである。超アクチノイド (原子番号 104 以上) 領域の原子核の質量は α 崩壊連鎖を利用して質量値を得ることが考えられるが、原子核崩壊は必ずしも基底状態ー基底状態崩壊をするという訳ではないので直接測定が重要となる。理研リニアック (RILAC) + GARIS で用いられるビームは比較的低エネルギー (5 A MeV 以下) であり、停止または低速にするのは都合が良く、また得られる超重核の収量は 113 番元素合成の実績[12]のとおり現在世界最高といえる。この領域の直接質量測定は前述の通り GSI の SHIPTRAP で報告がされており、ロシアの Dubna でも計画されている。理研ではこの提案されたセッティングで彼らをしのぐ超アクチノイド領域での質量測定が期待される。

5. 終わりに

以上、研究会で紹介された話題をもとに構成したので、原子質量研究紹介としてみると多少偏った紹介になってしまったかもしれない。装置の細部にあまり踏み込まず、また、理研に設置する予定のガンマ線測定装置 EURICA など、質量測定以外のトピックには触れなかった。関連の内容に興味をもたれた方はシンポジウムのホームページ[13]を参照されたい。

参考文献

- [1] M.S. Livingston, H.A. Bethe, Rev. Mod. Phys. **9**, 245 (1937).
- [2] T. Tachibana, H. Koura and J. Katakura, Chart of the Nuclides 2010, Japanese Nuclear Data Committee and Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Agency (2010).
- [3] H. Koura, T. Tachibana, M. Uno and M. Yamada, Prog. Theor. Phys. **113**, 305 (2005).
数値表は [URL:http://wwwndc.jaea.go.jp/nuclldata/mass/KTUY04_J.html](http://wwwndc.jaea.go.jp/nuclldata/mass/KTUY04_J.html) より入手可能。
- [4] E. Anderes and N. Grevese, Geochim. Cosmochim. Acta **53**, 197 (1989).
- [5] P. Möller, J.R. Nix, W.D. Myers and W.J. Swiatecki, At. Data Nucl. Data Tables **59**, 185 (1995).
- [6] T. Tachibana, M. Uno and M. Yamada and S. Yamada, At. Data Nucl. Data Tables **39**, 251 (1988).
- [7] K. Oyamatsu and K. Iida, Phys. Rev. C **81**, 054302 (2010).
- [8] K. Oyamatsu, K. Iida and H. Koura, Phys. Rev. C **82**, 027301 (2010).
- [9] S.Nishimura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 052502 (2011).
- [10] M. Block *et al.*, Nature **463**, 785 (2010).
- [11] M. Dworschak *et al.*, Phys. Rev C **81**, 064312 (2010).
- [12] K. Morita *et al.*, J. Phys. Soc. JPN **73**, 2593 (2004).
- [13] URL: <http://indico.riken.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=527>