

科学と技術のための核データ国際会議 (ND2022)

(3) 核分裂

東京工業大学
ゼロカーボンエネルギー研究所
石塚 知香子
chikako@zc.iir.titech.ac.jp

埼玉大学理工学研究科
江幡 修一郎
ebata@mail.saitama-u.ac.jp

1. はじめに

本稿では ND2022 の会議内容のうち、核分裂に関連するセッションについて報告する。核データ研究分野の中で最大規模の本会議は、内容別で 10 以上のパラレルセッションに分かれていた。核分裂のセッション (Fission) は日本時間で 7 月 25 日から 7 月 28 日までに 8 つのブロック (Fission I ~ VIII) で開催され、52 の発表が予定されていた。当日 7 件の発表が取り下げられた。日本からは 5 件の発表があった。発表会場は COVID-19 の世界的蔓延により、ヴァーチャルな環境 Gather. Town で行われた。以下では、各発表の中で筆者各人の印象に残ったもの、及び筆者らの発表内容について、その概要を記す。

2. 平均場模型を利用した核分裂現象の記述 (江幡修一郎)

核分裂現象を理論的に記述する試みは世界中で行われているが、よく利用されている理論模型は主に 3 つ程度に大別される様に思う。核子を自由度として核分裂現象の記述を試みる平均場模型、原子核の形を自由度とした確率的な運動方程式 (Langevin 方程式) を解く模型、Hauser-Feshbach 模型を基軸にした統計崩壊計算が挙げられる。それぞれ記述したい現象が異なり、核分裂現象を反応の時間スケールで大別すれば、上記の模型が対応している。筆者の印象に残った研究内容を大別した系統に分けて紹介し、関連する実験的研究も紹介し、最後に筆者の発表した内容を紹介する。

動的な平均場模型計算で最も先進的な研究の一つは、時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov 理論(TDHFB)に基づく、核分裂現象の記述であろう。その膨大な計算コストにより世界でも実行できる研究グループは少ないが、ワシントン大学の A. Bulgac 氏のグループはその一つである。彼らは自身の模型を時間依存超流動局所密度近似 (TD Superfluid Local

Density Approximation; TDSLDA) と呼ぶが、密度依存した有効相互作用を用いた TDHFB 計算と同等のものである。核分裂のポテンシャル面における鞍点から、原子核のダイナミクスをこの模型では記述していく。計算された密度は核子密度だけではなく、対密度の時間発展も同時に示され、核分裂現象における対相関、核超流動性の重要性を主張していた。また、動的模型によって得られた分裂片の全運動エネルギーや角運動量分布も計算され、Hauser-Feshbach 計算へインプットすると、測定される中性子多重度と無矛盾な結果が得られている。原子核理論物理としても最近 10 年で最も進展している研究の一つである。

ND2022 において、Langevin 計算による核分裂現象の記述は、東京工業大学のグループと関西大学のグループが発表していた。よく利用されている Langevin 計算では二中心殻模型計算で得られるポテンシャルの形状を原子核の形状自由度として扱い、核分裂現象の動的計算が行われている。取り扱う形状自由度に特色があり、東京工業大学グループでは 4 次元の形状自由度が扱われている。関西大学の岡田氏はカッシーニ卵形線 (Cassinian oval) による形状記述を利用し、より高次元の形状を取り扱う模型を発表した。実際に 5 次元の形状自由度を取り入れフェルミウム-256, -258 の非対称核分裂と対称核分裂片の質量数分布を定性的に示す事に成功していた。

Hauser-Feshbach 計算は核分裂後の核分裂片の特性を反映した測定値を計算する為によく用いられる模型計算である。Los Alamos グループの A.E.Lovell 氏によって発表された Hauser-Feshbach Decay Model コード BeoH は核分裂片の励起エネルギー、スピン及びパリティを初期条件にして、可能な軽分裂片と重分裂片のペアの分布を計算する事が出来る。ND2022 では第一中性子放出後の核分裂だけでなく、多段中性子放出後の核分裂片への拡張が紹介された。また BeoH は遅発中性子収量や独立収量及び累積的収量を一貫して計算する事が出来る。

どの模型計算においても、インプットとアウトプットのいずれにおいて、核分裂片の励起エネルギーやスピン・パリティの情報が重要になっている。実際に ND2022 で発表された実験的研究の多くが、核分裂片の核データの高精度化を目的としたものだった。Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) の R. Malone 氏, A. Tonchev 氏, A. Ramirez 氏ら、及び National Metrology Institute of Germany, PTB の E. E. Pirovano 氏らにより、核分裂片収量の入射中性子エネルギー依存性を調べる実験的な技術の発展が報告された。

核データ研究分野における核分裂現象の主な動機は、原子力の応用をより安全かつ安定に実現する事にあるだろう。一方で核分裂現象の物理を理解する事を目的とする原子核物理の研究分野では別の動機がある。それは宇宙における元素組成比を得る為に、高速中性子捕獲反応過程(r-process)の終端における重い核分裂性核種の分裂片の収率を予測することである。これら分裂片が再度 r-process 上の源になり、また分裂片から放出される中性子収量も r-process の環境決定に重要となる。この点について LLNL の N. Shunk 氏

によって報告された。特に密度汎関数理論を用いた平均場模型による大規模計算と、元素合成過程上の核反応ネットワーク計算を合わせた結果を報告した。同様の動機を持った実験的研究もルーマニアの IFIN-HH の D. Filipescu 氏によって報告された。特に光による中性子放出や核分裂の核反応断面積を測定する為の実験技術の進展が報告された。

最後に筆者の発表内容について紹介する。この研究は核分裂片の荷電偏極を微視的平均場模型で導出する事を目的としている。これまでに静的な平均場計算を行い、原子核変形の自由度(2次元：四重極変形，八重極変形)に関するポテンシャルエネルギー面を計算し、分裂する配位と密度から荷電偏極を導出していた。微視的な計算によって原子核の殻構造を反映した荷電偏極であったが、既存のデータライブラリ(Wahl's systematics)とは全く異なる結果であった。実際に Hauser-Feshbach 計算にその結果を入力したところ、中性子収量の測定値を再現する事は出来なかった。そこで新しく動的方法を用いて、等エネルギー面を初期配位として核分裂片の配位を計算したところ、中性子収量に重要な軽い及び重い核分裂片に現れる有限の荷電偏極を得る事が出来た。今後は、より精緻な計算を行うと共に他の核分裂性核種へ適用・応用し、一般的な微視的理論による核分裂現象の記述を提案していきたい。

3. 核分裂収率に関する研究(石塚知香子)

核分裂収率のエネルギー依存性については、核変換技術の最適化や新型炉の設計、燃焼度決定の高精度化、核医学検査薬の製造効率の向上などを見据え、近年その重要性が高まっている。このような世情を反映してか、Fission Session でも関連する講演が多くあった。他に核分裂収率の超高精度測定に関する報告も多かった。講演数も多く注目度が高いと思われたのは核分裂片の角運動量に関する研究である。これらの話題の中から本節では筆者が興味を持った講演を手元のメモを基にいくつかピックアップして紹介する。

7月26日には LLNL の A. Tonchev 氏から LLNL-LANL-TUNL Collaboration の概要について講演があった。この Collaboration は核分裂生成物の収率を高精度測定すると共に、半減期も測定することを目的としている。LLNL-LANL-TUNL Collaboration からは他に R. Malone 氏、A. Ramirez 氏、J. Silano 氏を合わせて4件の発表があった。Tonchev 氏の講演では累積収率の中性子エネルギー依存性に関する導入が語られた後、LLNL-LANL-TUNL Collaboration による $^{235,238}\text{U}$ および ^{239}Pu に対して $E_n=2.0\text{ MeV}$ の中性子を入射した場合の独立収率の測定値に関する報告があった。測定値は ENDF/B-VII.1、JEFF-3.1、JEFF-3.3 と比較して示された。 ^{238}U では、 ^{90}Kr 、 ^{139}Xe の測定値が3つの評価済ライブラリと比べて有意に大きな値であった。その他のいくつかの核分裂生成物でも評価済ライブラリとの有意な差異があった。 ^{235}U の中性子誘起核分裂では誤差範囲内で主要ライブラリと測定値が良く合致していたが、 ^{90}Kr 、 $^{98\text{m}}\text{Y}$ 、 ^{147}La について収率の測定値と主要ライブラリ値の間に有意な差異があった。 ^{239}Pu の場合はウランの場合と異なり、

どの核分裂生成でも概ね主要ライブラリ値と測定値が良い一致を見せていた。同日にあった R. Malone 氏の講演では、 ^{238}U に $E_n=6.5\text{ MeV}$ の中性子を入射した際の中性子誘起核分裂の独立収率を GEF と比較した暫定的な結果が示された。この場合では、 ^{98}Rb 、 ^{93}Sr 、 ^{101}Mo 、 ^{105}Ru で測定値が GEF よりも有意に大きな値となっており、一方でその他の多くの核種で GEF より測定値はやや小さな収率を与えていた。

7月27日の Fission Session では、LOHENGRIN Spectrometer での ^{235}U の熱中性子誘起核分裂の核分裂収率に関する新しい測定結果について、CEA の M. Houdouin-Quenault 氏から報告があった。この測定では、ウランの核分裂収率を共分散行列も含めて 2-3%の誤差で測定することを目指しており、質量収率の結果を見ると、軽い核分裂片の分布は詳細なピーク構造も含めて概ね JEFF-3.3 と良く一致しているのに対して、重い核分裂片のピークの肩の部分 ($A=139-144$) で JEFF-3.3 よりも有意に低い値となっているのが気になった。また実験で得られた共分散行列の様子が示された点も非常に興味深い。

7月28日の Fission Session では、SOFIA experiment の進捗について CEA の A. Chatillon 氏から報告があった。SOFIA experiment では不確かさ 5%以下の精度で独立収率を与えることを目標としていて、2021 年時点では Pt から Th に至る 100 種の中性子欠損核の核分裂システムを測定対象としている。今回の講演で特に注目すべき情報は ^{235}U に $E_n=8.9\text{ MeV}$ の中性子を入射した場合の累積収率に関するデータについてのもので、 E_n に対して累積質量収率 $Y(A)$ が線形相関を示さないことで知られる ^{99}Mo の測定データである。TUNL との $E_n=8.9\text{ MeV}$ との累積質量収率の比較を見ると、 ^{99}Mo だけでなく ^{92}Zr 、 ^{92}Sr 、 ^{105}Ru の軽い核分裂片の分布が全体的にクーロン励起の SOFIA の方が中性子入射の TUNL よりも大きな値となっており、一方で重い核分裂片の分布は両者でほぼ一致していた。

以上のような核分裂収率に関する報告の他、核分裂片の全運動エネルギーの中性子エネルギー依存性やその分散についての測定データなど ND2022 では興味深い講演が沢山あった。その中で特に議論に上がることが多かった角運動量に関する講演の中から特に印象に残ったものを、ここでひとつだけ紹介したい。CEA の O. Serot 氏は、球形の核分裂生成物の角運動量について実験と理論の両面から報告した。まず ILL の質量分離器 LOHENGRIN を用いて、 ^{235}U と ^{241}Pu の熱中性子誘起核分裂での ^{132}Sn の Isomeric Ratio の測定結果について報告があった。これを再現するように FIFRELIN で ^{132}Sn のスピンを決めると、運動エネルギーの増加に伴ってスピンの減少することが分かった。更に Serot 氏の講演では、平均角運動量を運動エネルギーの関数として捉えた場合と、中性子エネルギーの関数とした場合の各々で議論を展開しており、この点が特に面白かった。

最後に筆者の所属する千葉研究室の講演が三件あったので、その概要を講演順に紹介したい。筆者は 4 次元ランジュバン模型の結果に基づいて構築した半現象論的収率モデルの概要と、収率モデルを r-process 元素合成に適用した際の定量的な変化について報告した。当研究室博士課程の陳敬徳氏は、反対称化分子動力学模型を用いて複合核 ^{252}Cf 、

^{236}U 、 ^{240}Pu の核分裂を模擬した際に得られる角運動量分布や全スピン等の結果を示した。これらの結果は J. Randrup 氏の結果とも良く一致していた。同じく当研究室博士課程の島田和弥氏は ^{235}U の中性子誘起核分裂における平均全運動エネルギーの中性子エネルギー依存性を再現するように改良された 4 次元ランジュバン模型について紹介し、チャンス核分裂を考慮した際の定量的な変化や、全運動エネルギーと核分裂片の形状との関連について報告した。

4. おわりに

本稿では紙面に限りがあるため、筆者らが一週間ほとんど寝ずに視聴した核分裂に関する講演のうち、ほんの一部だけしか取り上げられなかった。実際にはどの講演でも、特に質疑応答の際に勉強になる議論が多く、それを全てお伝えできないことを歯がゆく思う。また ND2022 はコロナ禍のためにヴァーチャル環境での開催となった為、勝手がわからず苦戦することも多かった。ただ講演者にはネットワーク環境が悪化したときに備えて事前にプレゼン動画の提出が義務付けられており、これで聞き逃した講演も動画で視聴できるのでは！？と期待したものの、蓋を開けてみるとスライド資料しか公開されていない場合が多く、甘い期待は見事に裏切られた。中には講演を楽しみにしていながら、寝落ちしてしまったものもある。是非次回はオンサイトで参加したいものだ。