

令和 6 年 5 月 14 日現在

機関番号：82401
研究種目：研究活動スタート支援
研究期間：2022～2023
課題番号：22K20373
研究課題名（和文）中性子過剰領域における核分裂機構の解明およびrプロセス元素合成計算への応用

研究課題名（英文）Elucidation of the fission mechanism in the neutron-rich region and its application to the r-process calculation

研究代表者
田中 翔也（Tanaka, Shoya）
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・特別研究員

研究者番号：10963176
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：rプロセスは宇宙における元素合成過程の1つで、鉄より重い原子核を生成する主要な起源であるがその詳細は理解されていない。その中で核分裂はrプロセスの終端を決めるなど重要な役割を果たす。しかし、元素合成経路に存在する中性子過剰核は実験的に到達できない領域であり、理論による評価に頼る他ない。本研究では従来の現象論的模型を超えて、新たに動力学模型と統計模型を組み合わせることで核分裂およびそれに伴う即発中性子放出の計算を行った。実験データのある領域に加えrプロセス計算に繋がる中性子過剰核領域へとモデルを拡張することで、実験でいくつか報告されている特異な分裂モードを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

rプロセス計算に使用される従来の核分裂模型は現象論的なものが主であったが、本研究では原子核構造や動力学的効果を考慮した新たな核分裂理論模型を構築することで、未知領域であった中性子過剰核を核分裂の評価を可能とした。本研究成果は実験に先立ち、中性子過剰核における核分裂という未知領域を開拓するものであり、原子核反応実験に指針を与えることが出来た。また、安定の島へ到達するためには中性子過剰核領域の核物理の理解が必須であり、本研究によってrプロセス経路における中性子過剰領域の核物理を押さえることは、新元素の合成や安定の島への到達に資する成果となった。

研究成果の概要（英文）：Nucleosynthesis by the rapid-neutron-capture process, the so-called r-process, represents for cosmic origin of the heaviest elements beyond the iron-group peak, but its details are not understood. The neutron-rich nuclei in the elemental synthesis process are not experimentally accessible, so we rely on theoretical evaluations. Nuclear fission plays a key role in the termination of the r-process path. In this study, beyond the conventional phenomenological model, we calculated fission and prompt neutron emission by combining the dynamical model with the statistical model. By extending the model beyond the region of experimental data to the neutron-rich nuclear region leading to r-process calculations, several experimentally reported specific fission modes were elucidated.

研究分野：原子核物理

キーワード：核分裂 動力学模型 統計模型 rプロセス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽系の元素組成がどのように形成されたのかは未だ明らかになっていない。元素合成にて、速い中性子捕獲過程 (rapid neutron capture process, r プロセス) は鉄より重い金や白金、ウランなどを合成する主要な起源である。r プロセスは他の過程と異なり、元素合成の経路が安定核から大きく外れた中性子過剰領域に存在する。その中で核分裂は r プロセスの終端を決め、核分裂リサイクルによって最終的な元素組成へ影響を与えるなど、重要な役割を果たす。核分裂において原子核が質量対称に分裂するか非対称に分裂するかで、生成される核種が大きく異なるため、中性子過剰領域の分裂モードの変化を調べることで r プロセス計算にとって非常に重要である。しかし、中性子過剰領域の核分裂は実験的に測定が困難であるため、これまでの r プロセス計算における核分裂の評価は簡易的なモデルや統計モデル計算が主流であった。ゆえに、より厳密に中性子過剰領域の核分裂を評価可能な理論モデルの開発が求められている。

申請者はこれまで動力学模型を用いて安定核に近い核分裂片質量分布の実験データをよく説明する成果をあげている。また、フェルミウム原子核について、質量数が 257 から 258 へ変化した際に発生する急激な分裂モードの変化についても、分裂経路の違いから説明することに成功した。この結果はウランなどの原子核においても中性子過剰側では、分裂モードが安定領域に比べて変化することを強く示唆するものであった。

そこで申請者は「中性子過剰領域ではどのような核構造が存在し、どのような核分裂の観測量が示されるのか？」を本研究課題の核心をなす学術的な「問い」として設定し、研究を実施した。

2. 研究の目的

この学術的な「問い」に答えるため、以下の2点を本研究の目的とする。

目的1: 動力学模型を用いて中性子過剰領域における核分裂の描像を解明する。

目的2: r プロセス計算に向けたより洗練された新しい核反応・崩壊率データを構築する。

先行研究で採用されている統計模型や分裂点模型では核分裂する原子核の始状態と終状態しか分からないが、申請者が開発している動力学模型では原子核が核分裂するまでの変形の時間発展を評価するため、変形経路の違いから分裂モードの変化を捉えられる。

r プロセス計算に使用するデータベースにおいて、動力学模型を採用して構築した例はない。ここで基礎とする核理論の手法は、従来の天体核反応データベースのものより先進的である。動力学模型を用いて中性子過剰領域の核分裂描像を明らかにし、元素合成計算と原子核の理論計算を有機的につなげることで新たに標準となる核分裂データベースが構築されれば、原子核物理分野のみならず宇宙核物理分野へのインパクトは非常に大きい。

3. 研究の方法

r プロセス計算では核分裂後に生成される原子核の核種や放出される中性子の数が重要となる。これまで r プロセス計算へ用いられてきた現象論的な核分裂理論模型を超えて、本研究ではランジュバン方程式を採用した散逸揺動定理に基づく動力学模型を用いて核分裂の評価を行った。さらに動力学模型と Hauser-Feshbach 統計模型を組み合わせることで核分裂に伴う即発中性子放出の計算を可能とした。統計模型には汎用核データ計算コード (CCONE) を採用している。r プロセス計算では核分裂生成物の核種を決定する必要があるため、分裂片の電荷比を質量比と同様とする UCD (Unchanged charge density) 仮定を採用し、分裂片の質量数だけでなく陽子数を評価した。この陽子数に基づき分裂片の全運動エネルギーをクーロン力と分裂前に原子核の持っている運動エネルギーの和として評価した。

4. 研究成果

(1)

質量数が 235 のウラン原子核 (U-235) に中性子が入射し、U-236 の複合核 (励起エネルギーは 9 MeV とする) が形成された場合の核分裂理論計算を行った。このとき動力学模型を用いて適切な物理パラメータを用いて計算を行い、主に核分裂片の質量収率 (Fission Fragment Mass Distribution: FFMD) と総運動エネルギー (Total Kinetic Energy: TKE) を評価した。その結果、理論計算結果によって実験値を再現することに成功した。理論模型に導入されたランダムな性質は、ポテンシャルエネルギー面上で核分裂イベントごとに異なる軌道を与え、十分な数の異なる軌道を積み重ねることで核分裂片の質量収率を生成し、実験データと直接比較することが可能な幅を持ったデータとなる。このときそれぞれの軌道において、原子核がポテンシャルエネルギー面上の核分裂点に到達した場合を核分裂と定義している。この励起エネルギーの値である 9 MeV は数値計算の効率を考慮して採用したもので、実験よりも相対的に高くなる可能性があるが大きく逸脱するものではなく、先行研究で採用されている値や、マルチチャンス核分裂の閾値よりも低い値である。

(2)

(1)と同様の計算をウランの中性子過剰核である U-250 と U-255 の中性子誘起核分裂にも適用し

た。即発中性子放出前の一次核分裂収率と即発中性子放出後の独立核分裂収率の計算を行った。U-250 の収率は 2 つの異なる質量非対称核分裂モードによる 4 つのピーク (2 つの強いピークと中程度の 2 つのピーク) を示した。一方、U-255 の収率は質量対称核分裂による 1 つのピークとなった。本研究に近い質量数を持つフェルミウム (Fm) の同位体 Fm-254, 256, 258 においても同様の遷移 (同位体の中性子数が増えると FFMD のピークが複数から単一へ変化する傾向) が実験的に示唆されており、他の幅広い元素においても報告されている。U-250 の核分裂における TKE 分布にて、約 150 MeV と 180 MeV に 2 つの異なるピークが見られた。一方で U-255 の核分裂では 175 MeV 付近に単一のピークが見られるだけであった。U-250 で見られる 2 つのピーク構造は、FFMD に 4 つのピーク構造を持つ質量非対称核分裂を行うことに由来し、分裂時に発生するお互いの原子核の距離に依存して決められる。また、エネルギー保存を考慮すると、分裂片の TKE が小さい場合は分裂片の総励起エネルギー (Total Excitation Energy: TXE) が大きく、TKE が大きい場合は TXE が小さくなる。すなわち、U-250 の核分裂で発生する二つの原子核の持つ励起エネルギーは U-255 よりも大きいという結果が得られた。

(3)

(1)、(2) で得られた動力学モデルによる核分裂計算の結果は、その後の Hauser-Feshbach 統計モデル計算にスムーズに接続され、分裂後の崩壊過程を計算した。U-236 の即発中性子放出多重度は原子核の殻構造や動力学的な効果が反映され、分裂片の質量数に対する依存性など実験値をよく再現した結果が得られた。また、即発中性子の平均放出個数は 2.57 個であり、実験値である 2.42 個とよく一致している。即発中性子放出数の質量数に対する変化を見てみると $A = 70 \sim (130)$ から $110 \sim (160)$ 付近まで増加し、 $A = 110 \sim (160)$ から $120 \sim (170)$ まで減少する結果が得られた。この傾向は鋸歯構造と呼ばれ、従来手法による再現が困難であった。ピークの位置が実験データから少しずれるものの、実験の全体的な傾向を再現している。この鋸歯構造の物理的起源はよくわかっていなかったが、 $A = 120$ 付近で中性子放出が抑制される現象は、原子番号 50 番のスズ同位体由来する強力な殻効果によるもので、その分裂片の崩壊と粒子放出が弱まっていることが、本研究によって定性的に理解できた。このように、動力学的効果と原子核の殻構造によるポテンシャルの強い影響によって、中性子放出多重度の分布が特徴づけられている。しかし、これらの領域の実験結果はまだ大きなばらつきを示しているため、実験と理論モデルの両面からさらなる検討が必要である。

(4)

r プロセスに関係するが実験データが得られない非常に中性子過剰なウラン同位体 (U-250, 255) について、核分裂およびそれに伴う中性子放出を計算し理論予測を行った。質量非対称核分裂の U-250 では平均中性子放出個数は 4.18 個、質量対称核分裂の U-255 では 3.43 個という結果が得られた。この結果から、即発中性子放出個数は必ずしも核分裂する原子核の中性子数とともに増加するわけではなく、核分裂モードと TKE 分布を理解することが重要であると分かった。また、これらの中性子過剰核の結果は U-236 とは大きく異なるものである。主な違いは、U-236 で観測された鋸歯構造が消えていることである。その代わりに、U-250 では $A \sim 125$ に新たなピークが見られ、U-255 では軽いフラグメントと $A \sim 144$ から大量の中性子が放出されることが分かった。計算結果を解析すると、これらは少数の特定の原子核からの寄与ではなく、多くの核分裂片からの寄与によるものであった。つまり、これは原子核の構造ではなく核分裂片の励起エネルギーに大きく依存している。例えば U-250 の結果にて、即発中性子の放出は $A \sim 100$ と 150 の原子核が中程度の二重ピークで支配的である。これは TKE が比較的低く、TXE が高いためである。質量分布で単一ピークしか示さない U-255 の場合、TKE が高く、それに対応する TXE が比較的小さいと予想されるため、中性子は主に即発中性子放出数が比較的小さい。本研究により、実験的に同定されていない中性子過剰の U 同位体は、安定線に沿った原子核の核分裂よりも高い即発中性子数を示す可能性を示した。しかし、中性子過剰の U-255 の場合のように、核分裂モードと TKE 分布によっては、即発中性子数は中性子数とともに単調増加しないと予測される。

(5)

動力学モデルと統計モデルを組み合わせることで、新たに核分裂過程と分裂片からの即発中性子放出を一つの枠組みで評価することができた。この結果は原子核物理分野のみならず宇宙核物理分野へのインパクトは非常に大きい。今後は、理論モデルにおける各種パラメータの調整及び中性子過剰核への適応性に関する議論を行い、安定核種において存在する実験データを再現するベンチマークを行う。その結果を踏まえて中性子過剰核への適応に向けたパラメータセットの構築し、いくつかの中性子過剰核の核分裂を評価する。

この理論モデルを使用して網羅的に中性子過剰核の核分裂を評価し、原子核の中性子数が増えた場合に安定核に比べて核分裂のメカニズムに変化が現れるのかを調べ、その変化の傾向や規則性について議論する。また、研究の過程で動力学モデル計算に採用している微視的モデルの計算精度および適用範囲を検証する。

r プロセス計算へ利用可能な数値データに必要な核分裂片の質量数および荷電分布、運動エネルギー、即発中性子数、寿命などを核種毎に評価し、核分裂データベースを構築する。また、本

研究で構築したデータベースを使用した r プロセス計算を行う。その結果と他の理論模型を採用した時との変化について議論し、核分裂に関する評価量が元素組成へ与える影響を調べ、計算精度の向上を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tanaka Shoya, Nishimura Nobuya, Nishimura Itoshi, Aritomo Yoshihiro	4. 巻 279
2. 論文標題 The evaluation of the fission mode and fragment yields of neutron-rich nuclei by the dynamical model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 11021 ~ 11021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202327911021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka S., Nishimura N., Minato F., Aritomo Y.	4. 巻 108
2. 論文標題 Postfission properties of uranium isotopes: A hybrid method with Langevin dynamics and the Hauser-Feshbach statistical model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054607~054618
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physrevc.108.054607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 田中翔也
2. 発表標題 Fission fragment yields of neutron-rich nuclei evaluated by the Langevin model calculation
3. 学会等名 2022年度核データ研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中翔也
2. 発表標題 ランジュバン計算と統計模型を用いた核分裂収率および即発中性子の評価
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中翔也
2. 発表標題 動力学模型による中性子過剰核の核分裂収率計算
3. 学会等名 原子力学会2023年春の年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Tanaka
2. 発表標題 Nuclear fission of neutron-rich nuclei based on a dynamical model toward r-process calculation
3. 学会等名 FUSION23, International Conference on Heavy-Ion Collisions at near-barrier energies (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Tanaka
2. 発表標題 Fission yields of neutron-rich nuclei evaluated by the dynamical model
3. 学会等名 Joint RIKEN/N3AS Workshop on Multi-Messenger Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Tanaka
2. 発表標題 Post-fission properties of uranium isotopes: a hybrid method with Langevin dynamics and the Hauser-Feshbach statistical model
3. 学会等名 The 2023 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics of the American Physical Society and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------