

博士學位論文

内容の要旨

及び

審査結果の要旨

令和6年3月

近畿大学大学院
総合理工学研究科

学位論文審査結果の報告書

氏名 天野 翔太

生年月日 1996年 4月 19日

本籍(国籍) 大阪府

学位の種類 博士(工学)

学位記番号 第 233 号

学位授与の条件 学位規程第5条該当
(博士の学位)

論文題目

重・超重核生成における融合および核子移行過程の理論的研究

学位論文受理日 2024年 1月 22日

学位論文審査終了日 2024年 2月 3日

審査委員

(主査) 野上 雅伸

(副主査) 若林 源一郎

(副主査) 有友 嘉浩

指導教員 有友 嘉浩

論文内容の要旨

超重元素合成において、従来の重イオン融合反応を用いた手法では、119番以降の元素合成の成果確率が大きく望めないのが現状である。そこで近年、重イオン衝突による多核子移行(Multi-nucleon transfer: MNT)反応が注目されている。この手法は、超重元素合成だけでなく、中性子過剰核の生成や代理反応手法として大きな関心を集めている。しかし、MNT反応は新規的な手法かつ複雑な反応過程ゆえにいくつかの不定性を残している。

本論文では重核および超重核の生成における融合過程および核子移行過程に焦点を当て、入射核が無遠慮から標的核に近づく過程から相互作用を起こし、核分裂を終えるまでの核反応ダイナミクス、融合反応機構や準核分裂反応機構に関する研究成果である。本論文で一貫して用いた動力学模型(二中心殻模型とランジュバン方程式)の最大の特徴は、反応過程中の原子核の形状を相互作用時間ごとに追うことができる点である。原子核の形状を追うことは核反応ダイナミクスを明らかにする上で非常に重要である。原子核衝突実験では理論計算とは対照的に、反応過程中の原子核のメカニズムを直接確認することができない。反応後の物理量を観測し、それらの観測量から原子核がどのような反応課程を辿ったのかを推察するしかできない。一方、動力学模型では、反応課程を一つ一つ解析可能である。

本論文では、理論結果と実験結果を比較しながら準核分裂反応および他核子移行反応に焦点を当て、理論計算による解析を行い、そのメカニズムを明らかにしようとしている。

論文は全7章から構成されており、研究の背景、実験の状況、動力学模型の解説、計算手法の説明、準核分裂過程、融合反応過程、多核子移行反応、および最近測定されたMass Angle Distribution (MAD) についての議論、計算による解析について記述している。

第1章では、これまでの超重元素合成の歴史を解説し、さらに現在の研究課題である原子番号119番以降の新元素に向けた課題について述べている。また最近再注目を集めている多核子移行反応についてその概略を解説している。最後に本論文の全体を通しての目的を記述している。各章に対する研究の背景と目的は、それぞれの章の冒頭に詳細に述べている。

第2章では、本論文で使用した理論模型について解説している。ここでは、原子核の形状を二中心間模型によって記述し、液滴模型による巨視的ポテンシャルの計算、二中心殻模型による微視的ポテンシャルの計算について述べ、これらを利用して計算する動力学模型のひとつであるランジュバン方程式について解説している。また最近、研究が活発化してきている多核子移行反応についても適用できるように計算コードを改良した

部分について解説し、さらに実験の測定値である散乱角についてその定義や計算手法を述べている。

第3章では、超重元素領域の融合断面積の不定性について述べ、その不定性を取り除くために、実験で測定される準核分裂の実験データに基づいた理論計算を行い、融合分裂過程の詳細なメカニズムを解明しようとしている。この解析の中で、準核分裂には今まで知られていなかった二つのモードが存在し、結果的にはそのモードの違いにより、精度の高い融合断面積の評価が可能であることを示している。また、このモードの違いは、融合分裂反応の時間スケールにも差を与えており、原子核のくびれ(ネック)の成長の時間スケールと相関があることを初めて明らかにしている。

第4章では、原子核衝突初期におけるネック形成のダイナミクスに着眼し、原子核物理と流体力学の領域横断的な研究について論じている。第2章で説明した理論模型を用いて、原子核衝突に対してごく初期にネック形成がどのように進行するかを調べた結果、水滴の場合と同じように粘性-慣性クロスオーバー現象が原子核の場合にも確認できることを明らかにしている。同時に、ネック形成のダイナミクスから原子核の粘性係数の値の推定した結果、巨大双極子共鳴の実験データから抽出される粘性係数の値と同等な値であることを導いている。

第5章では、第2章で説明した理論模型を用いて、重イオン融合反応で起こる融合阻害をネック形成と関連付けて論じている。計算結果から、原子核同士の衝突初期にネックが拡張を開始する場合、この拡張現象によって系の融合が妨げられていることを明らかにしている。ネックの役割が、融合ダイナミクスにとって決定的に重要であると結論づけている。

第6章では、第5章および第3章の研究成果をもとにして、本論文で得られた最も重要な結果を論じている。まず、核子の移行に関連するネック拡張の開始時間を詳細に調べ、モデルに含まれるネック拡張開始時間の不定性を取り除いたのち、本章の主要目的である変形標的核の様々な配向角度における衝突についての議論を行っている。計算結果では、変形標的核との衝突時の配位の違いからネック断面積に差があり、先端衝突(0°)と側面衝突(90°)の核子移行数が異なることを明らかにしている。

第7章では、各章で述べたことをまとめ、本論文の総括としている。この研究結果は、最新の実験データの解析も含め、準核分裂および多核子移行反応のメカニズムの解明および核新元素合成の理論構築に重要な結果となっている。

論文審査結果の要旨

近年、アメリカ、ロシア、ドイツ、フランス、日本、中国、韓国をはじめとする世界各国による強力な大型加速器の建設および増強が行われ、これら大型実験施設を用いて作り出される自然界に存在しない不安定な原子核の研究が活発化している。核図表の安定曲線（ハイゼンベルクの谷）から遠く離れた原子核を生み出し研究することは、宇宙元素創生や組成の成り立ち、新元素の合成、さらには放射性廃棄物の処理にも関連した、非常に話題性の高い研究である。日本では、特に理化学研究所における RIBF を使った大規模な研究が広く知られている。上記の研究課題を達成することには、原子番号が 90 程度の領域の重元素、さらには 104 以上に焦点を当てた超重元素領域の原子核において、中性子過剰核の生成が不可欠であり、実験による様々な試行錯誤が繰り返されている。

安定な原子核から遠く離れた不安定な中性子過剰核を生成するには、従来行われてきた加速した入射核を標的核に衝突させ融合させる「融合反応」では不十分である。実験で利用できる入射核も標的核も安定な原子核であり、その原子核同士を融合させて生成した複合核は、やはり中性子数は安定な原子核と大きく変わらないからである。そこで、入射核を標的核に正面衝突させるのではなく、擦らせるような反応によって核子を移行させる「多核子移行反応」が注目を集めている。標的核にアクチノイド原子核を使用し、入射核に酸素からカルシウム等、様々な組み合わせの実験が行われ、多くの実験データが報告されている。しかし、多核子移行反応の詳細なメカニズムは、依然として不透明であり、また実験データの解析や解釈なども喫緊の課題となっている。

このような状況のもと、本論文では重核および超重核の生成における融合過程および核子移行過程に焦点を当て、原子核反応のダイナミクスの解明に向けた理論研究について報告している。理論模型として原子核の形状の時間発展を追う半古典的な動力学模型を採用し計算を行い、さらに計算コードの開発改良をすることによって最新の実験データと比較を行っている。このことから得られた実験データの意味や有用性を提案している。これらの成果は、まだほとんど研究が行われていない重・超重原子核に関連する核子移行反応および核分裂機構や核構造など、実験と理論的研究の両方に大きく貢献できると考える。

本論文は全 7 章から構成されており、研究の背景、実験の状況、動力学模型の解説、計算手法の説明、準核分裂過程、融合反応過程、多核子移行反応、および最近測定された Mass Angle Distribution (MAD) についての議論、計算による解析について記述している

第 1 章では、これまでの超重元素合成の歴史を解説し、さらに現在の研究課題である原子番号 119 番以降の新元素に向けた課題について述べている。また最近再注目を集めている多核子移行反応についてその概略を解説している。これらは準核分裂過程や多核

子移行反応の研究の重要性を理解するための解説であり、本研究の目的につながっていくように明確に述べている。

第2章では、本論文で使用した理論模型について解説している。ポテンシャルエネルギーの計算手法やランジュバン方程式の説明している。このことは理論計算を行う上で不可欠な知識であり熟知しておかなければいけない事項であるが、記述は正確で明確である。また多核子移行反応を扱うために改良した理論模型の部分を正しく記述している。

第3章では、超重元素領域の融合断面積の不定性について述べ、その不定性を取り除くために、実験で測定される準核分裂の実験データに着目し、理論計算との整合性を議論することで、融合断面積の高精度な評価を試みると同時に、準核分裂過程の反応機構の解明を目指している。この解析の中で、今まで知られていなかった二つの準核分裂モードを見つけ出している。準核分裂の反応メカニズムを詳細に解析することは、精度の高い融合断面積の評価が可能であることを示している。また、このモードの違いは、融合分裂反応の時間スケールにも差を与えており、原子核のくびれ(ネック)の成長の時間スケールと相関があることを初めて明らかにしておる、非常にインパクトの強い結果となっている。

第4章では、原子核衝突初期におけるネック形成のダイナミクスに着眼し、原子核物理と流体力学の領域横断的な研究について明確に論じている。原子核は有限量子多体系である一方、ウランなど重い原子核ではその性質の特徴を水滴とのアナロジーで記述する方法がとられてきたが、その融合メカニズムについて水滴との比較で議論した研究は初めてである。また、水滴の場合と同じように粘性-慣性クロスオーバー現象が原子核の場合にも確認できることを見つけ出したことも特筆すべき点である。さらにこのような研究から導き出された原子核の粘性係数は、巨大双極子共鳴の実験データから導き出された粘性係数と同等である結果となり、原子核の粘性について非常に重要な結果であると言える。

第5章では、重イオン融合反応で起こる融合阻害をネック形成と関連付けて論じている点が新しい解析である。計算結果から、原子核同士の衝突初期にネックが拡張を開始する場合、この拡張現象によって系の融合が妨げられていることを明らかにしている。ネックの役割が、融合ダイナミクスにとって決定的に重要であると結論づけており、理論計算による研究では、初めて報告された結果となっており独自性の高いものである。

第6章では、第5章および第3章の研究成果をもとにして、本論文で得られた最も重要な結果を論じている。本章の主要目的である変形標的核の様々な配向角度における衝突についての議論を行っている。計算結果では、変形標的核との衝突時の配位の違いからネック断面積に差があり、先端衝突(0°)と側面衝突(90°)の核子移行数が異なることを明らかにしている。議論の展開および結論への導き方は論理的であり、またこのような解析を行った研究は初めてであり、変形核を標的核に使用する利点が明確に示され、この分野の研究には非常に重要な結果となっている。

第7章では、各賞で述べたことをまとめ、本論文の総括としている。この研究結果は、最新の実験データの解析も含め、準核分裂および多核子移行反応のメカニズムの解明および核新元素合成の理論構築に重要な結果となっており、また今後の新元素合成の実験計画に十分貢献できるものである。

以上のことから、本論文は、博士(工学)の学位論文に十分値すると認めた。