

氏名(本籍地)	関澤 一之			
学位の種類	博士(理学)			
学位記番号	博甲第 7220 号			
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 25 日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理解物質科学研究科			
学位論文題目	Multinucleon Transfer Reactions and Quasifission Processes in Time-Dependent Hartree-Fock Theory (時間依存 Hartree-Fock 理論による多核子移行反応と準核分裂過程)			
主査	筑波大学教授	博士(理学)	中務 孝	
副査	筑波大学教授	理学博士	矢花 一浩	
副査	筑波大学教授	博士(理学)	小沢 顕	
副査	筑波大学講師	理学博士	橋本 幸男	
副査	筑波大学客員教授	理学博士	宮武 宇也	

論 文 の 要 旨

本論文は、核子多体系として捉えた原子核の量子ダイナミクスを記述することができる時間依存ハートリー・フォック理論に基づいて、低エネルギー原子核衝突で起こる核子移行反応と準核分裂現象を理論的に記述し理解するとともに、自然界には安定に存在しない原子核を生成する手段としてこれらの過程を用いる可能性に関する研究をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景として、低エネルギー原子核衝突の様相、特に多核子移行反応と準核分裂過程に関する実験と理論の研究の現状が述べられ、本研究で用いる時間依存ハートリー・フォック理論の概要が述べられている。その後、本研究の目的が述べられている。

第2章では、本研究で用いる時間依存ハートリー・フォック理論とその計算法が詳細に述べられている。始めに理論の枠組みとして、ハートリー・フォック理論とともに密度汎関数理論の立場からの基礎づけと、実際の計算で用いられる Skyrme 相互作用が説明されている。その後、具体的な計算で用いる実空間・実時間計算法、大規模計算を効率的に行うための並列計算手法、原子核衝突の初期状態を設定し、衝突計算を遂行する手順などが説明されている。

第3章から第5章までは、時間依存ハートリー・フォック理論を多核子移行反応に対して用いた結果が報告されている。第3章では、粒子数射影の方法を用いて多核子移行反応断面積を計算する方法が説明され、実験的に断面積が測定されている $^{40,48}\text{Ca}+^{124}\text{Sn}$ 、 $^{40}\text{Ca}+^{208}\text{Pb}$ 、 $^{58}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$ の反応に対する解析結果が示されている。これらの解析により、移行する核子数があまり多くない場合には、時間依存ハートリー・フォック理論により多核子移行反応断面積を定量的に記述できることが明らかとなった。また、入射パラメータが大きい場合には反応の Q 値に応じて陽子と中性子が移行する方向が決まるのに対して、入射パラメー

タの小さい反応では反応の途中でまずネックが形成され、その後にネックの切断により陽子と中性子が同方向に移行するという、核子移行をもたらす反応機構の変化が起こることが示されている。第4章では、時間依存ハートリー・フォック理論による計算から得られる反応後の波動関数に粒子数射影の演算子を用いた、粒子数の固有状態にある波動関数に対して、さまざまな物理量の期待値を求める方法が論じられている。この方法を $^{24}\text{O}+^{16}\text{O}$ の反応に適用し、移行核子数毎に角運動量や励起エネルギーの期待値を調べることで、反応機構に関する知見が得られることが示されている。第5章では、4章で得られた方法を用いて反応後のフラグメント原子核に対して励起エネルギーの期待値を計算し、その値を元に反応後の粒子放出効果を考慮して得られた多核子移行反応断面積が示されている。3章で示された結果と比較し、粒子放出効果を取り入れることの重要性和、それを考慮しても残る実験と理論の不一致に関する考察が述べられている。

第6章から第8章では、時間依存ハートリー・フォック理論を、より重い原子核どうしの衝突で起こる多核子移行から準核分裂に至る反応過程に対して応用した結果が示されている。入射核と標的核の電荷積がおよそ1600を越える衝突では、核融合過程は抑制され小さい入射パラメータの反応において準核分裂過程が起こる。時間依存ハートリー・フォック理論に基づく計算は、このような反応の様相を正しく記述することが述べられている。第6章では、 $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ 衝突が解析されている。 ^{238}U は、プロレート変形を持つ原子核として知られているが、計算の結果、変形軸方向と入射方向の関係によりネック形成と準核分裂のダイナミクスが大きく変化することが述べられている。また計算により、放出核の運動エネルギーと移行核子数の関係を示す実験結果が良く再現されることが示されている。第7章では、 $^{238}\text{U}+^{100,124,132}\text{Sn}$ 衝突における多核子移行と準核分裂過程の解析がなされている。実験のなされている $^{238}\text{U}+^{124}\text{Sn}$ 衝突では10以上の陽子移行過程が観測されている。計算の結果は ^{238}U の変形軸方向と入射方向の関係に反応ダイナミクスが強く依存することを示しており、観測されている多数の陽子移行が、 ^{238}U の変形軸方向と入射方向が平行となる反応に起因することが明らかにされている。また、すべての系に対する計算で、初期配位よりも終状態で質量数の非対称性が増す逆準核分裂過程が現れることが報告されている。このような反応が、他の方法では生成が困難な超ウラン核の生成に有効であることが示唆されている。第8章では、 $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$ 反応の解析がなされている。この反応は、宇宙元素合成のr過程を理解する上で重要と考えられている中性子数が126の中性子過剰な不安定原子核を生成するために有効と考えられている。さまざまな入射エネルギーと入射パラメータに対して反応計算が行われ、それらの結果がラザフォード軌道での最近接距離という単一のパラメータだけに依存することが明らかにされた。また、その最近接距離に応じて、準核分裂時の核子移行が正逆の両方向に起こることが見出され、これらが衝突時に発生する表面振動に関係することが示唆されている。

第9章では、まとめと今後の展望が述べられている。本研究のまとめとして、時間依存ハートリー・フォック理論に基づく計算が、多核子移行と準核分裂過程に対して有効であり、射影演算子の方法と組み合わせることで、実験で得られる断面積と直接比較できることが述べられている。また今後の展望として、核子移行に起因する核分裂過程を考慮することの必要性、入射・標的核の核構造及び反応により生成された原子核の構造が反応過程に与える影響の分析、射影演算子の方法を核子数のみではなくパリティや角運動量に拡張すること、さらに時間依存ハートリー・フォック理論には含まれないさまざまな相関効果を取り入れた拡張を行うことの重要性が述べられている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

時間依存ハートリー・フォック理論は、低エネルギー原子核衝突で起こる核融合反応や深部非弾性散乱、及び原子核の巨大共鳴などの振動励起状態を調べる方法として、これまで多くの研究がなされてきたが、多核子移行過程に対する本格的な適用は本研究が初めてのものである。本論文は、時間依存ハートリー・フォック理論により、少数核子が関与し直接反応と見なせる核子移行過程から、多数の核子が関与する多核子移行過程、さらに量子大振幅集団運動とみなせる準核分裂過程まで、単一の枠組みに基づき、実験で得られる反応断面積を系統的に分析し、この理論の有効性と限界を明らかにしている。また、準核分裂過程に対して得られた、変形軸と入射方向による反応機構の変化や、質量平衡化及び逆方向への核子移行過程の存在などの知見は、原子核ダイナミクスの観点からも、新奇な不安定原子核を生成する手段を探る上でも、大変興味深い。また、本論文では、射影演算子の方法と時間依存ハートリー・フォック理論を組み合わせる方法論の発展がなされており、理論面において新たな進展が含まれ、さらに極めて大規模な数値計算が遂行されており、計算物理学の観点からも高く評価できる。このように、本論文で示された内容は、原子核物理学の理論的研究を大きく発展させるものであり、学術的に高く評価できる。

〔最終試験結果〕

平成27年2月18日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。