

| | |
|----------|-----------------------|
| 氏 名 | 小 野 章 ^{あきら} |
| 学位(専攻分野) | 博 士 (理 学) |
| 学位記番号 | 理 博 第 1599 号 |
| 学位授与の日付 | 平成 7 年 3 月 23 日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第 4 条第 1 項該当 |
| 研究科・専攻 | 理学研究科物理学第二専攻 |
| 学位論文題目 | 反対称化分子動力学による重イオン反応の研究 |

論文調査委員 (主 査) 教授 玉垣良三 教授 今井憲一 教授 井上 信

論 文 内 容 の 要 旨

申請論文は反対称化分子動力学 (AMD) を重イオン衝突の微視的シミュレーション法として導入し、それを用いて、中間エネルギー重イオン衝突でのフラグメント生成などの反応機構を微視的に解明し、核子やフラグメントのフローの分析により高温高密度核物質の性質に関する知見を得る目的で行われた研究である。

申請者が採用した理論形式である AMD は、系の波動関数をガウス波束のスレーター行列式で表現し、その時間発展を時間依存変分原理から導かれる運動方程式によって決定する枠組みであり、Feldmeier や堀内らにより重イオン反応の微視的シミュレーションのために提案されたものである。しかし、実際に中高エネルギー重イオン衝突に適用するには、さらに二核子衝突を入れることが不可欠である。本研究では核子の物理座標を新たに導入することにより、目的とする研究に AMD を適用可能にした。これにより、この物理座標の空間にはパウリ禁止領域が現れ、二核子衝突におけるパウリブロッキングは自然にとりいれられた。

申請論文では、このように重イオン衝突シミュレーション法として定式化された AMD を用いて多角的に行われた中間エネルギー重イオン衝突の研究が記述されている。まず、入射エネルギー 28.7 MeV/u の $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 衝突におけるフラグメント生成と反応機構を研究した。AMD の枠組みは、生成されるフラグメントのアイソトープ分布の実験結果を良く再現する事が示された。特に、 α 粒子の大きな生成断面積が再現されたことにより、AMD がシェル効果を記述できる事が実証された。質量分布の定量的な再現には、AMD の動力的計算で生じた励起したフラグメントの統計崩壊を考慮することが重要であったが、計算では動力的段階でも大量の α 粒子が生成しており、AMD は動力的なフラグメント生成におけるシェル効果を記述できている。フラグメントの質量数分布は殆ど二核子衝突断面積には依存しないのに対し、フラグメントの運動量分布は、確率衝突過程に強く依存している。特に、このような比較的低エネルギー

ギーでの周辺衝突でも“関与者—傍観者”描像に近い入射核破碎反応が起こっていることが実験からわかっているが、それを AMD で再現するためには、二核子衝突だけでは不十分で、核子- α 衝突のような多体的な確率的衝突過程を導入すれば再現できることがわかった。

次に、入射エネルギーが数十から 150 MeV/u 程度までの中間エネルギー領域でのフローを $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 衝突と $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ 衝突について研究した。この研究の特徴は、核子のフローだけでなく重陽子や α 粒子などのフローにも着目した点、及び単に核物質の状態方程式依存性を調べるだけでなく、フラグメントの生成機構や確率的衝突断面積依存性の効果にも注目した点である。有効核力として Gogny 力を用いた AMD の計算結果は、反応の多様なデータの特徴を再現している。その大要は以下の通りである (1) 核子のフローに比べてフラグメントのフローの絶対値が大きいという実験結果が再現された。粒子の生成時刻の分類から、この成功はフローに二成分があることによることが明らかになった。第一成分は確率的衝突を経て動力学的に放出された核子のフローであり、平均場の効果が掻き消されているためにその絶対値は小さい。第二成分は動力学的な反応過程で生成された励起したフラグメントのもつフローであり、平均場の効果を強く受けて絶対値は大きい。(2) 動力学的に生じた重陽子のフローの振る舞いは、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 衝突と $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ 衝突で異なることがわかったが、それは動力学的な重陽子の生成機構の違いによるものであることが判明した。即ち、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ではほとんどの重陽子が平均場の効果で生成しているの、そのフローは第二成分にはほぼ等しいが、 $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ では多くが動力学的な核子のコアレッセンスによって作られたのでフローは第一成分に近い。(3) フローの確率的衝突断面積に対する依存性を調べた。確率的衝突断面積が大きくなると、フローの角度は殆ど変わらないが、励起したフラグメントの運動量分布の減衰した成分が増大する。その結果として、バランスエネルギー以下の入射エネルギーでは、通常定義のフローは確率的衝突断面積に依存することになっている。しかし、これ以上の入射エネルギーでは、この依存性はかなり小さく、二核子衝突断面積の理論的不定性に結果が影響されないことになる。(4) 以上の知見を背景に、核物質の状態方程式を考察している。 $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ 衝突の場合に、軟らかい状態方程式 (非圧縮率 $K = 228$ MeV) と運動量依存性をもつ平均場を与える Gogny 力を用いたときの結果と硬い状態方程式 ($K = 373$ MeV) と運動量依存性のない平均場を与える SKG 2 力を用いたときの結果を比較してみると、前者はフローの実験を再現するが、後者は実験と一致しない。従って、平均場の運動量依存性がない硬い状態方程式は実験と矛盾することが結論された。

申請論文は、理論的枠組みの AMD の構成に始まりそれを用いた現象分析の結果と考察よりなる 5 編の発表論文に基づいて記述されている。なお、参考論文 1 編は本論文に関係した内容の先行論文である。

論文審査の結果の要旨

原子核同士が衝突しておこす核反応においては、多くの自由度が関与し多彩な現象が現れる。中高エネルギー領域になると、核衝突の結果多くのフラグメントが生成され、その様相の中に反応生成機構と原子核が高温高密度において物質としてもつ性質が反映している。このような様相の中から意味のある知見を得るには、反応の動的過程、フラグメントの生成過程、その崩壊過程を時間・空間的に追究する必要がある。そのような理論的手法として、近年シュミレーションの方法が盛んに用いられてきている。申請者の

研究は、このような方向においてなされた研究である。それは以下に述べるように、理論的手法の面でもまた得られた結果の面でも、現在最も高い到達点にある。

シミュレーションによるアプローチの理論的枠組みの面では、次の諸点の考慮が肝要である。即ち、フェルミ粒子の複合系である原子核の反応でのパウリ原理の役割、中高エネルギーの反応過程で重要さを増す二核子衝突の効果、反応前の核及び生成フラグメントの主要な性質の記述、現実的な二核子間有効相互作用の採用である。申請論文では、従来よく用いられてきた分子動力学的手法では、反対称化が欠落していたが、AMDの枠組みによりこれを完全にとりいれ、且つ二核子衝突も考慮する理論を構成した。大量の α 粒子の生成という特徴をAMDによる計算で再現できたことに示されているように、動力学的なフラグメント生成における殻構造的効果を記述できていることは、従来の研究を超えた本研究の新しく且つ重要な進歩である。申請者の用いた有効相互作用は、現象全般の分析を通じて実験事実と整合し且つ現実的な状態方程式を与える面からも適切であったと言える。

申請論文が記述する結果は、5編の発表論文に掲載された内容の集大成であり、実に豊富である。論文前半で扱った入射エネルギー 28.7 MeV/u の $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 衝突では、この理論的枠組みの適用性が様々な角度から調べられ、論文内容の要旨に述べたように、AMDの優れた点が具体的に示されている。論文後半で扱った対象は、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 系のより高いエネルギー領域の反応及びより大きな系である $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ の衝突である。ここでは核子のフローとフラグメントのフローの特徴的な差異、重陽子の生成過程の両系での違い、平均場の効果の特徴、フローの確率的衝突断面積への依存性等が、実験結果を再現出来た根拠と共に述べられている。状態方程式に関する知見では、軟らかい状態方程式と運動量依存性をもつ平均場を与える有効核力という組み合わせが現実的であるとの結論を下しているが、核子、軽核、フラグメント生成過程の全体的把握の基礎にしての結論だけに、説得力がある。

このように申請論文は、中高エネルギーの重イオン衝突に対し、新しい強力な理論的手法を構成し、それを用いた総合的な分析により、反応機構と粒子・フラグメント生成過程の深い理解をもたらした研究である。分析で示された理論の適用性と信頼性は、今後この理論的枠組みの更なる発展として、より大きな系の原子核衝突や中間子・アイソバーが関与する重イオン反応等への研究の広がりと共に、今まで専ら近似理論で行われてきた核子系の反応の研究に新しい視角を提供する等が期待される。

以上申請論文は、申請者が開発した新しい理論的手法を用いて重イオン核反応の動的過程の微視的研究を行い、近年活発に展開されつつあるこの分野の進展に重要な貢献をしたものである。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関連した研究分野について試問した結果、合格と認めた。