

学 位 論 文 題 名

Fragment Formation in Light-Ion Induced Reactions

(軽イオン入射反応におけるフラグメント生成)

学位論文内容の要旨

核反応の示す現象は、非常に多彩であり、衝突係数、入射エネルギー、入射核と標的核の種類等により大きく変化する。しかし、系に与えられるエネルギーが大きくなるにつれて、原子核が離合集散してフラグメントが生成されるという特徴的な様相が現れる。したがって、核反応の機構、生成物の収量及び性質には、フラグメント生成過程が本質的に重要な寄与をする。

しかしながら、フラグメント生成過程の研究は、その重要性にも関わらず、非常に困難である。その要因は、フラグメント生成機構が多様であるという事と、その理論的分析が難しいという事が挙げられる。フラグメント生成機構としては、以下のようなものが考えられており、反応に関与する原子核の性質を反映したものも数多くある。(1)核反応で形成された高温高密度物質が膨張し、低密度状態に至った時にフラグメントが生成される。(2)コアラッセンス機構により、位相空間の近傍にたまたま複数の核子が近づいた時にフラグメントが生成される。(3)入射核や標的核の基底状態や励起状態が、生成されるフラグメントに近い構造を持っている時に、フラグメントが生成される。(4)反応の途中で、ネック、ドーナツ等の形状不安定な状態が形成され、それが分裂する。(5)反応の途中で起こる、削り取る、くっつく、ひきちぎる等の機構によりフラグメントが生成される。核反応では、以上のような機構が、量子力学の支配する多粒子系で起こり、フラグメント生成を理論により正しく記述するためには、多粒子相関を正確に取り扱う必要がある。

量子多体系の動力学を記述する代表的な理論として、時間依存ハートリー・フォック理論(TDHF)があるが、これは揺らぎを無視した平均的な粒子の決定論的な時間発展のみを記述する平均場理論であるため、様々なフラグメントへの破碎過程を記述することはできない。そこで、粒子を波束で表現し、平均場と多粒子相関の両方を取り入れて、ハドロンの自由度により、フラグメント生成を記述可能な微視的シミュレーション理論として、分子動力学が開発された。分子動力学は、反応機構を仮定せずに、フラグメント生成を記述でき、反応機構の良く分からない未知の現象を取り扱うことが可能であるため、フラグメント生成機構の研究に広く用いられている。

しかし、分子動力学では、粒子の軌道の時間発展を記述する運動方程式自体が、波束粒子の中心の位置と運動量についての古典ニュートン方程式となるので、核反応で生じる非平衡状態から基底状態近傍のフラグメントへの量子力学的な緩和過程がうまく記述できていない可能性がある。このような分子動力学の欠点は、量子効果が非常に重要になる低エネルギー核反応や反応中で生じる残留核の非平衡性が非常に強くなる高エネルギー核反応におけるフラグメント生成過程を記述する際に問題となる。

本研究の目的は、このような分子動力学の欠点を量子力学的な揺らぎと非平衡なパーコレーション模型により改善し、低エネルギーにおける静止 Ξ^- 反応で起こるハイパーフラグメント生成過程と高エネルギーにおける陽子入射反応で起こる中間質量フラグメントの生成過程という実験的に興味ある現象が観測されている二つの軽イオン入射反応におけるフラグメント生成過程のメカニズムを明らかにすることである。

まず、申請者は、ストレンジネス量子数 -2 を持った珍しい原子核であるダブル・ハイパー核が発見された静止 Ξ^- 反応を分析した。静止 Ξ^- 反応では、ダブル・ハイパー核、ツイン・ハイパー核、シングル・ハイパー核等を含む様々なフラグメントが終状態で生成される。しかも、ダブル・ハイパー核の発見例は、これまでにわずか3例しかないので、その生成機構については、ほとん

どわかっていない。したがって、理論的にダブル・ハイパー核の生成確率及び生成機構を分析する手段として多数の終状態を取り扱えて、反応機構を仮定する必要がない分子動力学によるシミュレーションが強く求められている。

静止 Ξ^- 反応は、全体の励起エネルギーが、39.5MeVの比較的低エネルギーのフラグメント生成過程であり、量子力学的効果が重要になる。そこで、申請者は、核子のフェルミオンとしての性質(波動関数が反対称化される)を忠実に反映した波動関数の時間発展を記述し、量子力学的な側面を強くもった理論である反対称化分子動力学(AMD)を基盤として、量子揺らぎを含む分子動力学(AMD-QL)を新たに構築した。

AMD-QLでは、量子統計力学の要請により、波束中心を決める位相空間パラメータは、決定論的力に加えて確率論的力を含むランジュバン方程式によって記述される。このため、位相空間パラメータの統計性は、量子統計に従うものとなりフラグメントの励起エネルギーが古典統計と比較して小さくなり、安定したフラグメントができやすくなる。このことは、申請者による静止 Ξ^- 反応と同程度のエネルギー領域の陽子入射反応におけるフラグメント質量分布の分析を通して定量的に示されている。さらに、AMD-QLは、Lipkin模型の与えるハミルトニアン H の支配する系での集団座標の振幅の減衰というようなTDHFでは記述できない散逸現象も取り扱うことが可能である。

申請者は、AMD-QLに、複合核からのフラグメント生成を記述する統計崩壊模型を組み合わせた模型により、 ^{12}C を標的核とした静止 Ξ^- 反応の分析を行った。その結果、低励起エネルギーのもとで、ハイパー・フラグメントの生成過程を記述するには、量子的な揺らぎが、重要な役割を果たすことが明らかになった。すなわち、分子動力学の記述する短時間で起こる動的な過程において、揺らぎによって Λ 粒子が、系から放出されやすくなり、二つのシングル・ハイパー核が同時に生成されるツイン・ハイパー核等のフラグメント生成確率が増加するのである。また、実験的に注目されているダブル・ハイパー核の生成確率は、約10%であり、申請者の計算したハイパー・フラグメントの生成確率が、実験から示唆される値と一致することを示した。

次に、申請者は、入射エネルギーが12GeVの ^{197}Au を標的核とした陽子入射反応を分析した。この反応では、生成される中間質量フラグメント(IMF)の角分布において、側方70度方向にピークが見られるという奇妙な現象が観測されている。IMFは、ヘリウム原子核より重い多様な原子核であり、陽子が標的核に入射した後にできる高励起残留核の多重破碎反応(マルチフラグメンテーション)を通して生成される。したがって、もし、入射陽子によって前方に強く押された残留核が平衡状態に達しており、等方的にIMFが放出されるならば、IMFの角分布は前方にピークを持つはずである。つまり、IMF角分布における側方ピークには、高励起残留核の非平衡性が強く関与している可能性がある。

そこで、申請者は、非平衡な残留核の生成と、そのマルチフラグメンテーションを通じたIMFへの崩壊過程を分子動力学シミュレーションにより分析し、IMF角分布における側方ピークの機構を微視的な立場から初めて明らかにした。

12GeV陽子入射反応における残留核の生成過程において、粒子の運動には、平均場と複雑な二体衝突素過程の両方が重要な寄与をする。そこで、本研究では、まず、平均場中の粒子の時間発展を記述する量子分子動力学(QMD)に、12GeVの入射エネルギーで起こりうる全ての二体衝突素過程を含んだハドロニック・カスケード模型(JAM)を組み込み、残留核生成過程の記述を可能にした。さらに、非平衡な残留核のマルチフラグメンテーション過程を記述すべく、QMDより得られる粒子の位相空間の情報を用いて、局所的な励起エネルギーを見積もり、これにより、粒子間結合を切断してフラグメンテーションを記述する非平衡なパーコレーション模型(NPM)を構築した。

QMD+NPM模型は、適切なパラメータを選ぶことにより、フラグメントの質量分布の実験値を再現する。さらに、生成されたフラグメント集団のクーロン力による膨張過程を考慮すると、フラグメントのエネルギー分布の実験値をも再現することを示した。QMD+NPM模型を用いた分析によると、IMFは残留核の内部で粒子衝突のあまり起こらない領域で生成されやすく、IMFの生成位置分布は、中心衝突でドーナツ型、周縁衝突で三ヶ月型になる。このようなIMFの配位で、IMF間にクーロン力が働くと、IMFは側方に押し出されてIMFの角分布は側方ピークになる。これが、申請者の発見した、IMF角分布における側方ピークの新しいメカニズムである。

周縁衝突では、反応時間が経過するにつれて、残留核が急速に熱平衡に達し、IMF 角分布が前方ピークを示すようになる。このことは、12GeV 陽子入射反応では、IMF 生成が非常に短い時間(約 20fm/c)で起こっているという新しい可能性を示唆している。

以上のように、本論文では量子統計性、あるいは非平衡状態からの破碎を取り入れたモデルを構築し、これを用いて軽イオン入射反応でのフラグメント生成について分析した。これにより実験で観測されている現象の理解を深めるとともに、通常の描像では理解できない動力的な起源をもつフラグメント生成機構を提案したものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 加 藤 幾 芳

副 査 教 授 和 田 宏

副 査 教 授 岡 部 成 玄

(北海道大学情報メディア教育研究総合センター)

副 査 助 教 授 大 西 明

学 位 論 文 題 名

Fragment Formation in Light-Ion Induced Reactions

(軽イオン入射反応におけるフラグメント生成)

核反応におけるフラグメント生成の研究は、高励起状態における原子核の性質を知るために不可欠であるが、その理論的記述には事象毎の揺らぎや粒子相関を取り入れることが必要であり、近年原子核物理学においては反対称化分子動力学 (AMD) などに代表される微視的シミュレーション理論が開発されてきた。しかし、通常の分子動力学は波束中心の運動を記述するため、量子力学的な揺らぎや、反応後期におけるそれぞれのチャネルへの分岐をうまく記述できていない可能性がある。

本論文において著者は、(1) 量子力学的な揺らぎを取り入れた分子動力学の開発と静止 π^- 反応への適用、および(2) 非平衡パーコレーション模型の開発と高エネルギー陽子入射反応への適用を行なった。

前者では量子統計平衡と無矛盾な模型を提案し、模型のパラメータを通常核の反応で決定した上で、静止 π^- 反応でのハイパーフラグメント生成において、量子揺らぎにより Λ 粒子が放出されやすくなることがダブル・ハイパー核生成確率が小さい理由であることを示した。この研究成果はすでに、実験グループによる2編の論文で新たに観測された2つの物理量(Λ 粒子の運動量分布、ダブル、およびツイン・ハイパー核生成確率)について実験データとの比較で参照されるなど、新しい手法による定量的に議論できるものとして評価されている。

後者では核子・ π 粒子・重陽子のスペクトルを再現する動的な模型の位相空間情報を用いたパーコレーション模型により、これまで20年間不明であった中間質量片の側方放出の増加の機構を明らかにした。

これを要するに、著者は量子統計性、あるいは非平衡状態からの破碎を取り入れた模型を構築し、これを用いて軽イオン入射反応でのフラグメント生成について分析し、実験で観測されている現象の理解を深めるとともに、通常の描像では理解できない動力学的な起源をもつフラグメント生成機構について新知見を得たものであり、分野の研究に対して貢献するところ大なるものである。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。