

学 位 論 文 題 名

Microscopic Simulation for
Strangeness Nuclear Physics

(ストレンジネス核物理における微視的シミュレーション)

学位論文内容の要旨

現在、重粒子（バリオン）は、中性子 (n)、陽子 (p) の他に、 Λ , Σ , Ξ , Ω , Λ_c^+ , $\Sigma_c(2455)$, Ξ_c^+ , Ξ_c^0 , Ω_c^0 , Λ_b^0 , など多くの種類の存在が確認されている。さらに、これらの共鳴状態もそれぞれのバリオンに対して約 10 種程発見されている。原子核物理の最近の研究対象は、これらの重粒子を含んだバリオン多体系すべての性質を研究することである。このような多体系の例として、ハイパー核、デルタ物質、ストレンジ物質、クォークグルーオンプラズマなどがある。ハイパー核は通常の原子核にハイペロンを 1 個以上含む原子核である。核子当たりの入射エネルギー数 10 GeV の高エネルギー重イオン反応では、デルタ物質が作られると予想されている。また、核物質は中性子と陽子の他に Λ -粒子を含んだほうが、安定に存在できると言われていて、このようなストレンジ物質が宇宙の中に安定に存在している可能性があることが示唆されている。超相対論的重イオン反応では、ハドロンの閉じこめが解放されて、クォークグルーオンプラズマ状態が生成されると予想されている。この状態を実験室で作ることによって、クォークの閉じこめ問題や、宇宙初期の状態を研究できると期待されている。

本研究の対象とするバリオン多体系はハイパー核である。ハイパー核は、例えば、 K^- 粒子を原子核に入射して、 π 粒子を捕まえることによって作ることができる。この反応は、原子核の中で、 $K^- p \rightarrow \Lambda \pi$ というストレンジネス交換反応が起こり、生成された Λ 粒子が原子核の中に止まり、 Λ ハイパー核を作ることになったものである。これまで、ハイパー核の研究は主に、その存在形態を調べるなど、低エネルギー領域が中心であった。最近では、ハイパー核生成反応における、高励起領域にも大きな関心が寄せられている。この領域では、どのような反応が起こっているのだろうか。この領域の研究には、 N -体系の自由度を陽に扱えるモデルが必要である。一方、重イオン反応では、最近めざましい進展があり、反応過程に特別な仮定をすることなしに、重イオン反応のダイナミックスの時間発展を追うことのできる、微視的輸送理論（微視的シミュレーション）が成功を修めてきている。微視的シミュレーションは、核子が作る平均場の中の運動を古典的に追い、さらに、平均場以外の効果を取り入れるため、2 体衝突項を確率的にいたったものである。重要な量子効果として、2 体衝突のパウリブロッキング、粒子生成、共鳴粒子の崩壊、粒子の吸収なども取り入れている。

本研究の目的は、ハイパー核反応の高励起領域を微視的シミュレーションを用いて、研究することである。具体的には、 K^- 粒子を原子核のクーロン軌道から吸収させる反応（静止 K^- 吸収反応）により生成されるハイパーフラグメントの生成率を実験と比べることにより、その生成機構を解明する。また、 (K^-, K^+) 反応の K^+ 粒子スペクトルを再現するため

には、多段階過程が重要であることを示す。最後に、静止 Ξ^- 吸収反応で生成されるダブル Λ ハイパー核の生成率を予言する。

本研究で用いた微視的シミュレーションは、量子分子動力学 (quantum molecular dynamics, QMD)、反対称化分子動力学 (antisymmetrized molecular dynamics, AMD)、核内カスケード (intra-nuclear cascade, INC) である。比較的エネルギーが高い場合は、原子核衝突は、核内核子間の 2 対衝突の積み重ねで記述されるものと期待されるため、そのような、2 対衝突のみをシミュレーションするモデルを核内カスケード計算と呼ぶ。2 核子が $r_{NN} = \sqrt{\sigma_{NN}/\pi}$ 以内の距離に近づくとときに実験的に決められた角分布に沿って、確率的に 2 核子を散乱させる以外は等速運動するものとする。2 対衝突においては、粒子生成も確率的に取り入れられている。比較的エネルギーが低い反応、あるいは、原子核衝突で生成される、フラグメントなどを調べたい場合には、核子がつくる平均場の効果が重要となってくる。2 対衝突に加えて、核子をガウス波束で表現し、その波束の中心が、平均場からの力を受けてニュートン方程式に従って運動するようにしたモデルが量子分子動力学と呼ばれるものである。QMD では、2 対衝突において 2 核子の位相空間が他の核子に占有されている場合には、パウリブロッキングされると見なし散乱を禁止する。この QMD にさらに核子のフェルミオン性をあらわに考慮するため反対称化を取り入れたモデルとして反対称化分子動力学がある。

K^- 粒子が原子核に吸収され、核子と反応して Λ あるいは、 Σ 粒子を作るとかなり高励起な状態が生成される。この状態から、ハイパーフラグメントとしていろいろな Λ ハイパー核が生成されることが知られている。最近、田村らが、この反応で生成されるハイパーフラグメントの ${}^4_\Lambda\text{H}$ の生成率をいろいろな原子核ターゲットで測定した。ハイパーフラグメントの生成機構を解明すべく、上記の微視的シミュレーションの 1 つである、AMD を適用したところ、標的核 ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ については、実験値を再現することができた。AMD シミュレーションは次のような反応機構を与える。 ${}^{16}\text{O}$ では、ハイペロン複合核が作られ、その統計崩壊により、 ${}^4_\Lambda\text{H}$ フラグメントが生成される。 ${}^{12}\text{C}$ では、 ${}^4_\Lambda\text{H}$ フラグメント生成率の約半分は、ハイペロン複合核からの統計崩壊からの寄与で説明され、残りはダイナミカルに ${}^{12}\text{C}$ が壊れ、比較的小さいハイパーフラグメントからの統計崩壊から生成される。 ${}^9\text{Be}$ では、ダイナミカルに生成されるハイパーフラグメントからの寄与と、直接 ${}^9\text{Be}$ 中のアルファ粒子と K^- が反応して、 ${}^4_\Lambda\text{H}$ が作られる機構とで説明される。また、QMD により、 π^- 運動量分布もよく再現できることを示した。これは、モデルが反応の全過程の時間発展をよく扱えていることを意味しているものである。

ストレンジネス $S=-2$ を持った系の研究をするため、 (K^-, K^+) 反応が最近、注目を浴びている。この反応は、はじめ、原子核の中に Ξ 粒子を作る、あるいは、ダブル Λ ハイパー核を作ることを目的としたものであったが、軽い核から重い核まで、 K^+ の運動量を測ったところ、 Ξ のプロダクションのみでは説明できない大きなスペクトルが見られた。現在、実験的にはこの反応によって生成されると予想される $S = -2$ の系は見つかっていないが、将来 $S=-2$ の系の生成機構を理解する上で、 (K^-, K^+) 反応における K^+ 運動量分布の解釈が強く望まれている。この問題は次のプロセスで理解できることを INC 計算で示した。1) Ξ と $\Xi(1350)$ プロダクション、2) $\phi(a_0, f_0)$ プロダクションとその崩壊: $\phi(a_0, f_0) \rightarrow K^- K^+$ 、3) 2 段階過程: $K^- N \rightarrow MY(*)$, $MN' \rightarrow K(*)Y(*)$ ここで、 $M = \pi, \rho, \eta, \omega, \eta'$, $Y = \Lambda, \Sigma$, $Y^* = \Lambda(1450), \Lambda(1520), \Sigma(1385)$ である。このような計算ができるのは、微視的シミュレーションを適用したためである。

以上のように、微視的シミュレーションは重イオン反応だけでなく、 K^- 粒子入射反応による、ハイパー核生成反応の理解にも、非常に有効なモデルであることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 川 健 三
副 査 教 授 和 田 宏
副 査 助 教 授 加 藤 幾 芳
副 査 講 師 大 西 明
副 査 助 教 授 岡 部 成 玄 (情報処理教育センター)

学 位 論 文 題 名

Microscopic Simulation for Strangeness Nuclear Physics

(ストレンジネス核物理における微視的シミュレーション)

ストレンジネスを含む原子核は、近年の原子核物理の一つのフロンティアとして注目を浴びているが、これまでの理論的な研究としてはその低励起状態のみが主たる研究対象となっていた。しかしながら、最近ではハイパー核生成反応における高励起領域にも大きな関心が寄せられている。この高励起領域では、少数の自由度のみが励起されるのではなく、多数の自由度が励起されて破碎につながるため、できる限り多くの自由度のダイナミクスをあらわに扱えるモデルが必要となる。一方、重イオン反応の分野では最近めざましい進展があり、反応過程に特別な仮定をすることなしに、重イオン反応のダイナミクスの時間発展を追うことのできる、微視的輸送理論 (微視的シミュレーション) が成功を修めてきている。本論文は、近年発達してきたシミュレーションの方法を用いることにより、ストレンジネスを含む原子核の生成反応について、特にその高励起状態に着目し、理論的に研究した結果をまとめたものである。

本論文で示された研究内容は、(1) 静止 K^- 吸収反応からのハイパーフラグメント生成機構の研究、(2) (K^-, K^+) 反応の反応機構の研究、(3) 静止 Ξ^- 吸収反応で生成されるダブル Λ ハイパー破片生成の研究、という3つの対象にわたる。以下では、学位論文の中心となっている (1)、(2) の内容の要旨をしめす。

(1) の静止 K^- 吸収反応から生成されるハイパーフラグメント ${}^4_{\Lambda}\text{H}$ の生成機構については、これまでは、まず熱平衡状態に達した複合核が形成され、そこからの統計崩壊によるものである、と理解されていたが、様々な標的核についての実験値を定量的に議論できる段階ではなかった。本論文では、微視的なシミュレーションにより、標的核の質量数の変化に伴い、主たる生成機構が、ハイペロン複合核生成、ダイナミカルな破碎、直接反応と変化する事、また、これらの生成機構の変化が標的核の構造を反映している事を明かにした。さらに、ここで行われたシミュレーション結果の妥当性が、反応の様々な段階から現れる π^- 粒子の運動量分布が実験値をよく再現する事、 ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ の生成確率の予言値が理論計算の後に行われた実験により測定された値を再現している事、の2点から支持されている。

(2) で扱われた (K^-, K^+) 反応は、ストレンジネス $S = -2$ を持った系の研究をするうえで現在特に注目されている。この反応は、はじめ、原子核の中に Ξ 粒子を作る、あるいは、ダブル Λ ハイパー核を作ることを目的としたものである。現在、実験的にはこの反応によって生成されると予想される $S = -2$ の系は見つかっていないが、将来 $S = -2$ の系の生成機構を理解する上で、 (K^-, K^+) 反応の反応機構、特にどのような核が残されるか、という問題は分野にとって重要な問題であると言える。しかしながら、これまで実験的に観測された K^+ 粒子のスペクトルを理論的に理解する事は困難であった。特に問題となっていたのは、残留核が大きな励起エネルギーをもつ領域であり、多自由度をあらわに取り扱える微視的な研究が待望されていた。本論文では、上記のスペクトルが通常扱われ

ていた1段階過程に加えて、一旦生成された重い中間子の崩壊、及び中間状態で中間子が伝搬する2段階過程を考慮に入れる事により、実験値が再現できる事を示した。このような評価は、素過程の断面積を定量的に評価し、反応機構についての特別な仮定をおかずに得られたものであり、信頼性が高いものである。この理解が正しいとすると、 (K^-, K^+) 反応では多数の様々なハイペロンの共鳴状態が生成されることを示唆しており、今後の実験的な研究を促すものとなっている。

以上のように、本論文で示された研究は、高励起状態のストレンジネスを含む原子核反応のダイナミクスの研究を、定量的に信頼できる形としては初めて可能にしたものである。さらに、本研究は微視的なシミュレーションをこの領域に適用した初めての研究であり、これらの2点から、大変優れた研究といえる。これを要するに、著者は、ストレンジネスを含む原子核反応の研究において、新しい方法を導入することにより、新しい知見を得たものであり、ハイパー核の研究に対して貢献するところ大なるものである。

よって審査員一同は、著者が北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。