

研究成果

従来の原子核物理学は、自然界に存在する原子核を対象とし、それらの構造・反応・崩壊の研究を通して、原子核の基本的な性質や核子多体系のダイナミクスを明らかにしてきた。近年、新しい原子核を人工的に合成することが可能になったことで、原子核物理学の研究対象は大きく広がっている。例えば、安定核・ハイパー核の生成により束縛限界での核子多体系の性質やバリオン物質の物性を調べることができるようになった。現在の原子核物理学は、我々の自然観を深め自然・物質に対する認識の新しい段階へと進むべく、そのフロンティアを日々拡大している。下図に示すように本研究室では、“クラスター構造に主眼をおいた原子核の構造・反応論”，及びそれらを用いた“元素合成過程の理解”という量子多体問題の側面，ハイペロンや中間子まで含めた，“バリオン多体系，ハドロン物質の物性理解”という量子物性の側面の両面から原子核の理論研究を行っている。

クラスター

パリティ非対称クラスター構造とアイソスカラー型双極励起強度
 実時間発展法による軽い4N核のクラスター構造の研究 3体模型を用いたN=Z奇奇核の研究
¹²Cの励起状態の2 α + α THSR模型による研究 中性子過剰炭素における直鎖クラスター状態とそのアルファ崩壊幅
 ネオン同位体におけるピグミー共鳴の構造と崩壊
 荷電交換遷移による⁶Heの2中性子相関の研究

原子核の運動量分布と多核子相関

少数体精密計算

不安定核

時間依存法による原子核応答の計算手法の研究
 三体計算による反K中間子重水素1sレベルシフトの研究 全反応断面積を用いた不安定核の中性子スキン厚

ストレンジネス核物理

原子核反応理論

三体散乱方程式による $\Lambda(1405)$ 生成反応の研究
 離散化連続状態結合チャネル法による中性子散乱の研究
 グラウバー理論による陽子非弾性散乱の研究

不安定核の構造

不安定核は、安定核における描像とは大きく異なる性質を持ち、陽子数と中性子数のバランスが崩れた極限状況下での原子核の構造やダイナミクスを知ることが出来る。研究室では、核構造模型を駆使することで、不安定核に特有な特異構造のひとつである、直鎖クラスター状態の研究や、新しいダイナミクスであるピグミー共鳴の研究を行っている。

中性子過剰炭素における直鎖クラスター状態とそのアルファ崩壊幅 馬場，木村

長年に亘って探査されている直鎖クラスター状態の候補が、¹⁴Cと¹⁶Cにおいて報告された。観測されたこれらの候補が、直鎖クラスター状態である事を立証するには、直鎖クラスター状態に固有な特徴を示す必要がある。そこで、崩壊モードと崩壊幅に着目した。反対称化分子動力学を用いた解析を行い、¹⁴Cと¹⁶Cの直鎖クラスター状態は大きな α 崩壊幅を持ち、Be同位体の励起状態に崩壊するという際立った特徴を示した。この崩壊モードは、観測された状態と一致しており、直鎖クラスター状態が初の同定となると期待している。

ネオン同位体におけるピグミー共鳴の構造と崩壊

壊 木村

26Neで観測されたピグミー共鳴(低励起E1共鳴)は、従来の1粒子1空孔描像では説明できず、問題となっている。そこで、反対称化分子動力学模型による解析を行った。まず模型を拡張し、核子を表す波束中心を僅かに動かすことで、E1共鳴を記述することに成功した。分光学的因子を求める事で、26Neのピグミー共鳴ではコア励起が起きていることを示し、従来の1粒子1空孔描像を超えていることを明らかにした。さらにその原因として、ピグミー共鳴が持つアイソスカラー成分が、コア核の四重極励起を誘発している事を示した。

ストレンジネス核物理の研究

ストレンジネスを含んだバリオン系の研究は中性子星内部状態に代表される、バリオン物性の深い理解につながる。その中で $\Lambda(1405)$ 共鳴構造の解明は長年の課題である。 $\Lambda(1405)$ はストレンジクォークを含む負パリティバリオンの中で最も質量が小さく、3クォーク模型的状态では説明ができない。一方 $\Lambda(1405)$ の質量はK-pの閾値(1432MeV)より約30MeV小さいことから、反K中間子と核子の準束縛状態と考えることができる。このような描像では反K中間子と核子の間に非常に強い引力が働き、反K中間子-原子核の準束縛状態の存在が指摘されている。そのような準束縛状態を調べるためには $\Lambda(1405)$ および反K中間子-核子間相互作用の解明が重要となる。

三体散乱方程式による $\Lambda(1405)$ 生成反応の研究

大西

現在、 $K-d \rightarrow n\Sigma n$ 反応における $\Lambda(1405)$ の探索がJ-PARC E31実験で行われている。そこで、三体の散乱方程式であるFaddeev方程式を解くことにより、この反応の $n\Sigma$ の質量分布に $\Lambda(1405)$ のシグナルがどのように表れるかを調べた。その結果、用いた反K中間子-核子間相互作用により $n\Sigma$ の質量分布が大きく異なることを示した。

三体計算による反K中間子重水素1sレベルシフトの研究

星野, 大西, 堀内

反K中間子原子は閾値近傍における反K中間子-核子間相互作用の情報を与えてくれる良い対象の一つである。本研究では、2011年のSIDDHARTA実験を再現する最新の反K中間子-核子相互作用を用いて、三体模型により反K中間子重水素の1sレベルシフトと崩壊幅を求めた。また、レベルシフトの計算においてK-と反K0の質量差の効果が重要であることを示した。

少数体精密計算

数体系のシュレーディンガー方程式を精度よく解くことにより、量子力学的多体系の研究を行っている。少数体手法は着目した自由度に対し信頼性の高い記述を可能とする。核力の特徴である短距離斥力やテンソル力などを直接取り込むことができるだけでなく、波動関数の漸近的振る舞いも正しく記述できる。我々は少数体手法の発展、応用を通して、基本的相互作用から出発した核子相関、原子核構造、反応研究及び宇宙核反応への応用について研究を行っている。

時間依存法による原子核応答の計算手法の開発

関根, 堀内

放射捕獲反応などの宇宙核物理で重要な反応では、多体の非束縛状態が寄与するが、理論計算で多体の非束縛状態を扱うことは一般に困難である。この研究では、明示的な非束縛状態の波動関数を用いずに応答関数を計算できる時間依存法を、多体問題を解くための強力な手法である相関ガウス関数を組み合わせることで、核子の自由度から原子核反応を調べる新たな手法の開発を行っている。この方法を2, 3核子系の光吸収反応に適用し、実験を再現することを示した。

荷電交換遷移による 6He の2中性子相関の研究

河村, 堀内

6He 原子核には、di-neutron相関と呼ばれる強い中性子相関の存在が理論計算によって示唆されているが、2中性子は束縛系を持たないため実験でそれを観測することは困難である。この問題に取り組むため、我々は 6He から 6Li への荷電交換遷移すなわちガモフテラー遷移とアイソベクタースピン単極子遷移に着目した。3体クラスターモデルによる解析により、アイソベクタースピン単極子遷移強度は2中性子相関の強さを表す指標となり得ることが分かった。

原子核の運動量分布と多核子相関 堀内

原子核内の短距離相関構造の理解の為、 4He 原子核の運動量分布の詳細な分析を行った。波動関数は現実的核力ポテンシャルから第一原理的に求め、相似繰り込み群法による有効相互作用から得られた運動量分布について議論し、多体相関の役割を明らかにした。テンソル力が引き起こす多体相関は有効相互作用の多体項を無視することにより失われるが、back-to-backの運動量分布においてはその影響は現れず、2体相関の情報を得るために有用であることを示した。

原子核反応理論

近年の実験技術の目覚ましい発展により、不安定同位体ビームを用いた原子核の研究が盛んに行われるようになった。中でも高エネルギー重イオン反応を用いた全反応断面積及び相互作用断面積は、理化学研究所のRIビームファクトリーに代表される最新の加速器により、 Ne , Mg を超える領域まで拡大している。これらの物理量は原子核の大きさ、空間的広がり深く関係しており、実験的、理論的にも重要な研究課題である。このような高エネルギー原子核反応に有効なグラウバー理論により反応機構及び原子核構造について調べている。また、低エネルギー原子核反応について、時間依存平均場や離散化連続状態チャネル結合法によって研究を行っている。

グラウバー理論による陽子非弾性散乱の研究 畠

山, 堀内

グラウバー理論を陽子非弾性散乱に適用できるように拡張した。内部波動関数として軸対称変形した調和振動子を仮定し、角運動量射影を行うことで $0+$ から $2+$, $4+$ といった回転励起状態への遷移を伴う散乱を評価できるようにした。2重変形魔法数をもつ 12C ,

20Ne, 28Siを標的核とし、微分非弾性散乱断面積の計算結果は実験データを良く再現した。また、原子核変形度と非弾性散乱断面積との関係について議論した。

全反応断面積を用いた不安定核の中性子スキン厚 堀内, 畠山

中性子スキン厚は中性子半径及び陽子半径の差によって定義され、その知見は中性子過剰核あるいは中性子星の性質、非対称核物質の状態方程式を理解するために重要である。本研究では全反応断面積に着目し、スキン厚との関係について議論した。原子核の全反応断面積に対する経験式を導き、その性質を踏まえた上でスキン厚を測定する方法を提案した。現在この手法の有効性をさらに重い核に対して調べているところである。重い入射核では電荷が大きくなるために、クーロン分解の効果が無視できない。そのため時間依存平均場模型によって得られた電気双極子応答によりクーロン分解を見積もり、重い核への適用可能性を評価し、その限界を指摘した。

離散化連続状態結合チャネル法による中性子散乱の研究》Ichinkhorloo

原子核の中性子散乱の信頼のおける記述は、原子核の構造を知るためだけでなく、原子力工学、医療への応用という意味でも重要である。本研究では複素JLM相互作用を用いた離散化連続状態結合チャネル法 (CDCC) を $6\text{Li}(4\text{He}-2\text{H})$, $7\text{Li}(4\text{He}-3\text{H})$ – 中性子散乱の弾性・非弾性散乱に適用した。その際に必要な正規化定数は弾性散乱断面積を再現するように決定した。その結果、非弾性散乱断面積や角分布の実験データをよく説明できることを示した。

クラスター物理

原子核では系が複数の部分系に分割されたクラスター構造が現れることが知られており、原子核構造の多様性や多核子相関を理解するための重要な研究課題となっている。特に近年では、 α 粒子がBose-Einstein凝縮を起こす α 凝縮状態や、不安定核でのクラスター状態の研究が活発に行われている。研究室では、反対称化分子動力学や α 凝縮波動関数といった理論模型を駆使し、 ^{12}C , ^{16}O といった比較的軽い原子核に現れる α 凝縮状態、 ^{24}Mg , ^{28}Si といった、より質量数の大きな核に現れるクラスター状態の研究を行っている。

パリティ非対称クラスター構造とアイソスカラ一型双極励起強度 千葉, 木村

非対称な内部構造を持つクラスター状態は、正負パリティ状態の対となって現れる。この対のうち正パリティ状態が単極遷移によって強く励起される事は良く知られている。本研究ではもう一方の負パリティ状態がアイソスカラ一型双極遷移によって強く励起される事を示した。クラスター模型の波動関数を用いて遷移強度を解析的に求め、負パリティ状態への遷移強度が単一粒子遷移強度と同程度に強いことを示した。さらに定量的評価を行うため、反対称化分子動力学模型を用い、 ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{44}Ti , ^{28}Si に現れるクラスター状態への遷移強度を求めた。

3体模型を用いたN=Z奇奇核の研究 堀, 木村

原子核の構成する最外殻の核子間には対相関が働くことが知られている。特に $N=Z$ の奇奇核では強いアイソスカラー型の対相関が生じ、価核子が重水素のような構造を作ることが予想される。そこで我々は3体模型を用いて $N=Z$ の奇奇核における対相関の解明を目指した。

実時間発展法による軽い4N核のクラスター構造の研究 今井, 木村

複数の α 粒子が同一の量子状態を占有する「 α 凝縮状態」の実験研究が、粒子数の多い系へと進展しつつある。ところが従来の理論模型では計算量が激増するため、粒子数の多い系の記述は困難である。我々はこの問題を解決するため、エルゴード定理に基づく、実時間発展による方法を開発した。この新しい模型により ^{12}C , ^{16}O のクラスター構造を調べ、束縛状態や幅の狭い共鳴状態が良く記述できることを示した。

12Cの励起状態の $2\alpha+\alpha$ THSR模型による研究 周

^{12}C では α 凝縮状態であるホイル状態が現れるが、近年、励起エネルギー10MeV近傍に 0_3^+ 状態と 0_4^+ 状態が観測され、これらの状態がどのようなクラスター構造を持つかが議論になっている。我々は $2\alpha+\alpha$ THSR(Tohsaki-Horiuchi-Shuck-Ropke)波動関数を重ね合わせることでこれらの状態を記述し、そのクラスター構造の解明を目指した。その結果、観測された 0_3^+ 状態と 0_4^+ 状態に対応する状態が10MeV近傍に得られ、 0_3^+ 状態はホイル状態のブリージングモード励起状態であることが分かった。この状態の存在は原子核におけるクラスター構造の多様性を示すものである。