

・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。

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”という量子物性の両側面から原子核の理論研究を行っている。

＜クラスター物理＞

原子核には、系が複数の部分系に分割されたクラスター構造の存在が知られており、原子核構造の多様性や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。研究室では、反対称化分子動力学や α 凝縮波動模型を駆使し、比較的軽い原子核に現れる α 凝縮状態や、アイソスカラー型遷移とクラスターとの関係を調べている。

＜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＞ 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、負パリティ状態がアイソスカラー型双極遷移によって強く励起されることを、解析的模型によって示した。さらに定量的な評価を行うため、反対称化分子動力学模型を用いて ^{28}Si の双極遷移強度を求め、クラスター状態が強く励起される事を示した。

＜実時間発展法による α クラスター構造の研究＞ 今井、多田、木村

^{12}C の励起状態には、 α 凝縮状態を含め様々なクラスター状態が存在することが予想されており、注目を集めている。しかし、従来の理論模型でこうした状態を記述するには、莫大な計算コストが必要となる。この問題を解決するため、波束の運動方程式を利用する、実時間生成座標法を開発した。数値計算を行うことで、この模型が ^{12}C の励起状態に現れるクラスター状態を一挙に記述出来る事を示した。さらに ^{16}O に適用するため、3体有効核力を導入する準備を行った。

＜THSR模型を用いた ^{12}C の 0^+ 励起状態の研究＞ 周

近年、 ^{12}C の励起エネルギー10MeV近傍に、新たな 0^+ 状態が観測され、これらがどのような構造を持つか議論になっている。そこで α 凝縮波動関数を多数重ね合わせることで ^{12}C の励起状態の解析を行った。その結果、 0^+_3 状態と 0^+_4 状態の存在を理論的に確かめた。また、それぞれの状態の波動関数を解析することで、 0^+_3 状態はホイル状態のブリージング励起であり、 0^+_4 状態は直鎖クラスター状態の候補である事を示した。

＜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し、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することができる。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。

《時間依存相関ガウス基底による原子核応答の記述》 関根、堀内

宇宙核物理で重要な反応では多体の非束縛状態の寄与が不可欠であるが、それらの状態の理論的取り扱いには一般的には困難である。本研究では、明示的な多体の非束縛状態を用いずに波動関数の時間発展から原子核応答を求める。そこで波動関数の時間発展を効率よく記述するために相関ガウス基底を陽に時間依存させた時間依存相関ガウス基底を新たに開発した。この基底関数で2、3核子系の光核反応がよく記述できることを示した。

《超対称変換による位相差等価ポテンシャルの生成》 荒井、堀内

原子核のクラスター模型で良く用いられる直交条件模型は、禁止状態の存在からごく軽いクラスターを含む系以外の適用は困難である。一方で斥力芯を持つ浅いポテンシャルは禁止状態が現れないため、多体系への適用が比較的容易である。本研究では多数の禁止状態が現れる $^{16}\text{O}+^4\text{He}$ ポテンシャルに対して超対称変換を用いることで禁止状態を取り除き、位相差等価ポテンシャルを生成した。変換前後のポテンシャルから得られる相対運動波動関数の比較のため、平均二乗根半径と電気遷移強度を計算し、物理量にどのような違いがあるかを議論した。

＜不安定核構造＞

中性子過剰不安定核では、安定核において得られた理解では説明できない現象や特異な構造が現れる。近年の国内外における多くの実験技術の急速な発展を受け、現在不安定核の研究は原子核物理の中心分野となっている。理論と実験の連携による新たな構造の発見が成されており、我々は比較的軽い不安定核を中心にその性質の理解について研究を進めている。

《炭素同位体における直鎖クラスター状態の崩壊モード》 馬場、木村

近年、 ^{14}C や ^{16}C において α クラスターが直線上に並んだ「直鎖クラスター」の候補となる共鳴状態が複数観測された。これらが直鎖クラスターである事を立証するため、反対称化分子動力学を用いて、その励起エネルギーや崩壊幅を理論的に求めた。得られた結果は実験と無矛盾であり、観測された共鳴が直鎖クラスターである可能性が高くなった。また、既知の直鎖クラスター状態とは余剰中性子の分子軌道が異なる、新たな直鎖クラスター状態の存在可能性を示した。

《3体模型を用いた核子対相関の研究》 堀、木村

最外殻を占有する核子間には対相関が働くことが知られている。特に $N=Z$ の奇奇核では陽子中性子間に強い対相関が生じ、重水素のような状態を形成す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。

《ボロミアン核における連続状態の構造》 Singh、堀内

中性子ドリップライン近傍には3体系になって初めて束縛する原子核が存在し、これをボロミアン核と呼ぶ。本研究では特にボロミアン核である ^{22}C に着目する。それぞれの部分系である

^{21}C の連続状態をあらわに用いて、 ^{22}C の束縛状態と連続状態を同時に記述し、ドリップライン近傍核の励起構造を統一的に記述することを目指している。

<ストレンジネス核物理>

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 クォーク模型の状態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(K)と核子(N)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。

《反 K 中間子重陽子のレベルシフトによる KN 相互作用の研究》 星野、大西、堀内

反 K 中間子原子は閾値近傍における反 KN 相互作用の情報を与える良い対象の一つである。本研究では 2011 年の反 K 中間子水素の実験を再現する最新の KN 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 エネルギーレベルシフト (純クーロン系とのエネルギー差) と崩壊幅を求めた。P 波まで含めた計算を行うことにより、実験で測定される X 線のエネルギーに対応した物理量を計算した。反 K 中間子重水素のレベルシフトは、未だ不定性の大きい KN 相互作用のアイソスピン 1 成分に対して、反 K 中間子水素より強い制限を与えることを示した。

《反 K 中間子原子核の精密少数体手法による研究》 大西、星野、堀内

反 K 中間子を含む 3-7 体原子核系について相関ガウス関数による変分計算を行い、軽い K 中間子原子核の構造の議論を行った。得られた精密波動関数の分析により、 KN 相互作用の強さによって K 中間子+6 核子からなる K 中間子原子核基底状態のスピnpリティが変わり得ることを示した。今後の実験により K 中間子原子核や KN 相互作用の性質の詳細な理解が期待される。

<原子核反応>

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ンネル結合法によって研究を行っている。

《モンテカルロ積分のグラウバー理論への応用》 長久、堀内

グラウバー理論は高エネルギー原子核散乱を記述するのに有効な理論であるが、その正確な評価は多重積分を含むため一般には困難である。本研究では、モンテカルロ積分を適用することで、多重積分を効率的に行うことを考えた。まずは簡単な $\text{p-}^{16}\text{O}$ 、 $\text{p-}^{12}\text{C}$ の全弾性散乱断面積、全反応断面積、微分弾性散乱断面積を求め、実験を再現することを確認した。今後は核-核散乱へ

の応用を考え、不安定核を含めた系統的解析を行う予定である。

《グラウバー理論による陽子非弾性散乱の研究》 畠山、堀内

先に述べたように多重積分を含むグラウバー振幅の評価は一般的に困難である。ここでは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非弾性散乱を評価できるようになった。計算のインプットは原子核の半径と変形度であり、これらは実験的に決定される。2重変形魔法数の ^{12}C 、 ^{20}Ne 、 ^{28}Si に対し、微分非弾性散乱断面積の計算結果は実験を良く再現することを確認した。

《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・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に代表される核物質の性質を理解するために重要である。本研究では原子核の全反応断面積について全質量領域に対する経験式を導き、その性質からスキン厚を測定する方法を提案した。また、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断面積を見積もり、クーロン力の大きい重い核への適用可能性を評価した。スキン厚の決定には陽子標的が最良で、今後の実験により不安定核の陽子・中性子半径の系統的理解が期待される。

《離散化連続状態結合チャンネル法による低エネルギー陽子散乱の研究》 Ichinkhorloo

原子核-中性子散乱の信頼のおける記述は、原子力工学、医療への応用としても重要である。本研究では離散化連続状態結合チャンネル法の $^{16}\text{O}+p$ 散乱への適用を考えた。 ^{16}O 波動関数は $^{15}\text{N}+p$ クラスタモデルで記述し、 $^{16}\text{O}+p$ の弾性散乱断面積の実験との比較を行い、その妥当性を確認した。今後は PET(positron emission therapy)への応用可能性を考え、陽電子源を生成する $^{16}\text{O}(p,pn)^{15}\text{O}$ 反応のエネルギースペクトル、角度分布、生成断面積等の解析を行う予定である。