

研究成果

当研究室では陽子、中性子（総称して核子）から成る量子力学的多体系である原子核を主な対象とし、その構造・反応・崩壊の理論的研究を通して、核子多体系の普遍的な性質やダイナミクスを明らかにすることを目標としている。近年、新しい原子核の人工的な合成や、ハイパー核の生成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。不安定原子核の構造、反応やその存在限界だけでなく、ストレンジネスを含んだバリオン物質の性質が調べられるようになってきた。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。第一原理計算による核力、核子多体ダイナミクスの理解、クラスター構造に主眼を置いた原子核構造や反応、実験に即した原子核反応理論の開発、応用など広い領域に渡って研究を行っている。また、ハイペロンや中間子まで含めた、“ハドロン多体系”という視点からも理解を進めている。

第一原理原子核理論

未知の原子核や宇宙核反応の信頼性の高い記述の為には、予言力のある核構造理論を構築し、それを反応理論へと接続することで実験観測量へと結び付けることが不可欠である。その意味で、核力から出発した第一原理計算は高い信頼性と予言力を持つ。本研究室では少数体系厳密計算を基に研究を行っている。本年、手法についてのレビュー論文が *Reviews of Modern Physics* 誌に出版された[*]。

6体計算による6He原子核の電気双極子励起構造の研究 三上, 堀内

6He原子核は4He原子核を芯として周りに2つの中性子が広がって分布するハロー構造を持つと考えられていて、ソフトモードと呼ばれる芯核と2価中性子間の振動モードの存在が予想されている。本研究では6Heを6体系として相関ガウス関数と確率論的変分法を用いて模型を仮定せずに扱い、電気双極子励起構造を研究した。得られた電気双極子遷移強度についてそれぞれ励起エネルギーが3 MeV、35 MeVの位置に2つピーク構造が見られた。電気双極子遷移密度の分析から、前者は表面付近、後者は全域で陽子と中性子が逆位相で振動していることが示された。これにより前者がソフトモード的状态であり、後者が巨大双極子共鳴的状态と考えられることが分かった。研究成果は原著論文にまとめているところである。

4Heのスピン双極子励起と単極子励起 堀内

本研究ではスピン双極子励起について、現実的核力を用いた完全な4体計算を行い、核力の性質、とりわけテンソル力がどのように実験観測量と結びついて現れるかを示した。弱相互作用により引き起こされるスピン双極子励起は基礎データとしても重要で、実験困難なニュートリノ-原子核反応への応用が期待されている。得られた強度関数はヘリウム4の負パリティ状態の共鳴パラメータに対応し、測定と矛盾しない共鳴エネルギーや崩壊幅が得られた。和則を考えることによりヘリウム4の基底状態におけるテンソル相関についての情報が得られることを指摘し、観測可能性について議論した。また、電子非弾性散乱によって引き起こされる単極子遷移について同様の解析を行い、実験と良い一致が得られた。最近単極子励起強度と3体力との関係が議論を呼んでいるため、更なる分析を進めて

いるところである。[*] J. Mitroy, S. Bubin, W. Horiuchi, Y. Suzuki, L. Adamowicz, W. Cencek, K. Szalewicz, J. Komasa, D. Blume and K. Varga “Theory and application of explicitly correlated Gaussians”, Reviews of Modern Physics 85, 693-749 (2013) *

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精度よく測れるようになってきている。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、O同位体を超えNe、Mgといった領域まで研究は拡大している。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。不安定核散乱実験は高エネルギーの原子核反応を介して行われる。そのような反応過程を記述する有効な理論であるグラウバー理論を発展、応用させ、原子核構造や反応機構について調べている。

高エネルギー原子核反応における多重散乱効果

畠山, 江幡, 堀内, 木村

グラウバー理論は本来多重散乱効果を含んだ理論であるが、通常ある種の近似を用いて断面積が評価されることが多い。完全なグラウバー理論を用いた先行研究は軽い核への適用に限定されていたが、本研究では3次元座標Skyrme-Hartree-Fock法で計算された波動関数を直接用い、広い質量領域を含む系統的計算を可能とした。1H, 4He, 12C標的に対し、入射核O, Ca, Ni, Sn, Pbによる断面積の計算結果は実験データを良く再現した。また、広く用いられている光学極限近似との比較を行い、多重散乱の効果を議論した。特に微分断面積の散乱角が大きい領域でその効果が強く現れることを示した。

全反応断面積を用いた不安定核の中性子スキン

厚 堀内

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性の性質、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。3次元座標Skyrme-Hartree-Fock法によって得られた91種の原子核に対し、陽子、炭素標的による系統計算を行った。低エネルギーでの核子-核子散乱の性質を反映し、陽子標的はスキン厚に敏感であり、一方炭素標的は物質半径に対してのみ感度があることが分かった。反応断面積を表現する経験式を導き、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。

CDCC法による中性子非弾性散乱の解析

Ichinkohorloo

Li+n反応の解析は基礎研究としての重要性だけでなく、例えばd-t融合反応炉への応用などに精度の良い核データが必要とされている。特に7Liは最もありふれた同位体(自然存在比92.5%)かつ、主要な3重水素生成物質である。本研究では離散化チャネル結合法(Continuum Discretized Coupled Channel; CDCC)による6,7Li(n,n')反応の解析を行った。6Li, 7Liはそれぞれ4He+d, 4He+tクラスターモデルで記述し、有効相互作用としてJeukenne-Lejeune-Mahaux (JLM)を適用した。理論計算は6,7Li+n全断面積をよく再現した。同様の枠組みで7Liの4.652MeV状態への非弾性散乱の分析を行い、5~24 MeVの

入射エネルギーの実験データを再現した。CDCCC法とJLM相互作用による解析は $6,7\text{Li}(n,n')$ データ評価に対して強力な手法であることが示された。

軽い核のクラスターや共鳴状態

質量数の軽い原子核は、系が複数の部分系（クラスター）に分割されたクラスター構造を持つことが知られており、原子核構造の多様性や多核子相関の強さを示す好例となっている。今年度は、 13C で3つの α クラスターが作る鎖状構造と 16O の α クラスター構造の研究を行なった。

13Cにおける直鎖クラスター状態 千葉, 木村

12C は励起状態に 3α クラスター状態が現れることが知られており、 12C に中性子が1つ加わった核である 13C がどのようなクラスター構造を持つかが注目されている。 13C の励起状態ではコア核である 12C と加わった中性子の自由度が結合し、 $9\text{Be}+\alpha$ や $12\text{C}(0+2)+n$ のような様々なクラスター構造が現れることが予想される。そこでAMDと調和振動子の $\text{SU}(3)$ 対称性に基づく拘束を組み合わせることによって、コア核と余剰中性子の励起自由度を取り入れた理論計算を行った。その結果、実際に $12\text{C}(0+2)+n$ クラスター構造を持つ状態を始めとする複数のクラスター状態が現れ、これらの状態が単極子遷移によって強く励起されることを示した。

12C+n+n+p+p 5体模型による16O低励起0+状態の解析 堀内

長年の未解決問題の一つとして、 16O の不思議な $0+$ という低励起状態の理論的記述の問題がある。 16O は代表的な2重閉殻核で、単純な殻模型の1粒子1空孔励起では、第一励起状態は負パリティ状態を持つと予想されるが、それに反し $0+$ 状態が第一励起状態として観測される。この状態は多粒子多空孔励起よりむしろ $12\text{C}+\alpha$ クラスター構造を持つと考えることが自然であることが $12\text{C}+\alpha$ 直交条件模型により示されている。このように一見異なった描像が共存する系を統一的に扱うのは困難であり、現行の大規模計算を持ってしても基底状態と同時に再現することは成されていない。完全な微視的計算は今のところ現実的ではないが、 α クラスターを仮定しない $12\text{C}+n+n+p+p$ 5体模型による解析は興味深い。計算の結果、基底状態と第一励起状態のエネルギーは実験と矛盾なく得ることができた。波動関数の解析から、基底状態は殻模型的であるが、励起状態では良く発達した α クラスター状態であることが示された。また、現在の大規模計算による記述法についての問題点を指摘した。

軽い核における α クラスター構造 Odsuren

$\alpha+\alpha$, $\alpha+n$ の散乱断面積を、Gauss関数基底法によって計算し、実験との比較を行なった。さらに、複素座標回転法(CSM)を用いることで、 $\alpha+\alpha+n$ の3体問題を解き、長年の未解決問題である、 9Be の $1/2+$ 状態の解析を目指した。

不安定核の構造

陽子数と中性子数のバランスが大きく崩れた不安定核は、地上に安定に存在する安定核とは大きく異なる構造を持つことが知られている。特に、安定核とは異なった魔法数が現れる「魔法数の消失と新魔法数の出現の問題」と、弱く束縛された中性子が量子トンネル効果によって非常に大きな軌道半径を持つ「中性子ハロー現象」はその代表格である。本研

究では、こうした問題のひとつ「N=28魔法数の消失」と炭素同位体の持つ八ロー構造に関して平均場理論と反対称化分子動力学を用いた研究を行った。

N=28魔法数の消滅と、変形共存現象 千葉, 江幡, 木村

陽子過剰核である ^{56}Ni は2重閉殻核であるにも関わらず、低励起領域では変形共存現象が見られ、高励起領域ではハイパー変形状態が存在している。これらの強く変形した状態とクラスター構造の関係は長らく議論されてきた。我々は低励起、高励起領域に現れる変形状態の構造を調べ、変形共存現象やハイパー変形状態とクラスター構造との関係を明らかにすることを目指した。その結果、我々は変形共存現象が振動励起及びpf-shell領域の4粒子4空孔励起で理解できることやg軌道に関わる複数の強く変形した回転帯が高励起領域に現れることを明らかにした。一方、中性子過剰領域でもN=28魔法数が消失していることが知られている。この問題に関して、魔法数N=28を持つ同中性子体(^{48}Ca , ^{46}Ar , ^{44}S , ^{42}Si)の2+励起状態を、原子核中での核子の超流動性を記述出来る時間依存平均場模型を用いて解析した。その結果、N=28を持ち球形核である ^{46}Ar に、非常に低い領域エネルギーを持つ2+状態が現れる事を明らかにした。この2+励起状態は、不安定各領域でN=28 shell gapが狭まる事で起る中性子の励起と、陽子側の空孔状態とが結合することによって現れる、新しい励起モードである事を示した。また、他の同中性子体においても同様のメカニズムによって、低エネルギー2+状態が出現することを予言した。さらに、同じ中性子過剰なN~28の不安定核の励起スペクトルを、反対称化分子動力学を使って解析した。その結果、魔法数の消失に伴って、基底状態の核変形のパターンが同位体毎に大きく異なる事、励起状態に異なった変形のパターンを持つ状態が共存すること(変形共存現象)を予言した。これらの結果は原著論文4編として投稿中・発表済みである。

炭素同位体における八ロー、変形の競合と芯励起の効果の研究 古立

近年、八ロー構造の研究はより質量数の大きな領域へと拡張している。 ^{22}C や ^{31}Ne など新たに八ロー構造が提案された核では、芯核が変形している可能性があり、そのような核では芯励起が容易に起こり得る。我々はこのような八ロー核の新様相を明らかにするため、同様の構造が期待できる炭素同位体の低励起状態を系統的に研究した。結果として、 ^{17}C の第一励起 $1/2+$ 状態に変形した ^{16}C 芯核を持つ八ロー的な構造が存在することがわかった。発達した3軸非対称変形を持つ基底 $3/2+$ 状態とは芯核の構造が異なっており、それがこれらの状態間の電磁遷移確率に及ぼす影響を議論した。

^{22}C における低励起電気双極子共鳴の研究 堀内

低励起における電気双極子共鳴は原子核の巨大共鳴に対しピグミー共鳴などと呼ばれ、近年中性子過剰核における中性子分布との関係が盛んに議論されている。中性子ドリフライン核である ^{22}C は我々が観測している最も重いポロミアン核である。非常に小さな2中性子分離エネルギーと、巨大な半径を持つことで知られ、弱束縛系の興味などから多数の理論計算がなされている。最近 $^{20}\text{C}+n+n$ 3体模型により、低エネルギーにおける大きな電気双極子共鳴の存在を予言する理論計算がなされた。現在までほとんどの研究は3体模型により行われているが、本研究ではSkyrme-Hartree-Fock法により芯核を仮定しない計算を行った。得られた低励起の電気双極子共鳴は巨大共鳴を超えるような大きなものとなり、芯核励起の重要性を示唆する結果が得られた。現在原著論文として投稿中である。

Scハイパー同位体における超変形状態の研究

木村

通常の原子核にハイペロンが加わった原子核(ハイパー核)では、元々の原子核の変形度合いに応じてハイペロンの束縛エネルギーが変化することが予想されている。そうした束縛エネルギー変化が最も大きくなる例として、極端に変形した状態(超変形状態)にハイペロンが束縛された場合の束縛エネルギー変化量を、Sc同位体を例として求めた。まず、反対称化分子動力学による解析によって、Scの通常核においても超変形状態が存在するとの理論的予言を行なった。さらに、そこにハイペロンが加わった場合、最大で1MeV程度の束縛エネルギー変化が期待できる事を明らかにし、更に予想される励起スペクトルを求めた。これらの結果は原著論文2編として投稿中・発表済みである。