

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が調べることができるようになってきた。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”という量子少数多体問題の側面と、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

- ・ $^{12}\text{C}+4\text{N}$ 5体模型による ^{16}O 低励起 0^+ 状態
- ・変形した芯核 + 数核子模型の定式化
- ・ $\text{N}=\text{Z}$ 奇奇核における 2 核子相関
- ・3 体模型による ^9Be の回転バンド
- ・ $\text{N}=\text{Z}$ 核のクラスター状態とアイソスカラー単極子励起
- ・ ^{12}C 核の基底状態に対するコンテナ描像
- ・炭素同位体における直鎖クラスター構造

・6 体計算による ^6He の電気双極子励起構造

不安定核

- ・中性子魔法数 28 を持つ同中性子体の四重極集団励起
- ・ ^{22}C 原子核の低励起電気双極子応答
- ・中性子過剰 Mg 同位体の変形と反応断面積
- ・グラウバー理論による変形原子核の陽子散乱
- ・全反応断面積を用いた不安定核の中性子スキン厚
- ・荷電変化断面積による陽子半径の導出

少数体精密計算

- ・少数体精密波動関数における調和振動子励起
- ・時間依存の方法による ^3He の電気双極子応答

ハドロン

- ・ハイパー原子核の超変形状態
- ・有限温度におけるメソン質量の変化

原子核反応理論

- ・時間依存平均場模型を用いた核融合反応
- ・高エネルギー原子核反応における多重散乱効果
- ・離散化連続結合チャンネル法による中性子散乱

不安定核の研究

陽子数と中性子数のバランスが大きく崩れた不安定核の研究では、安定核の研究で培われた原子核像の見直しを迫る現象が見出されており、現代の原子核研究において中心課題の一つとなっている。本研究室では、そうした現象の代表例である、束縛限界で起こる中性子ハロと、魔法数の消失に関する研究を進めている。

22C原子核の低励起電気双極子応答の研究 堀内

低励起における電気双極子共鳴と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。中性子ドリップライン核の一つである ^{22}C は非常に小さな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。現在までほとんどの研究は ^{20}C を芯核とした3体模型により行われているが、本研究ではSkyrme-Hartree-Fock法による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、それは弱束縛中性子励起に起因するものであることを示した。また、芯核励起の重要性を示唆する結果が得られた。

中性子魔法数28を持つ同中性子体の四重極集団励起の研究 江幡、木村

中性子過剰核では、安定核で成立している魔法数が消失する事が知られており、それに伴って固有の励起モードが出現する可能性がある。その候補として、中性子魔法数 $N=28$ の消失とそれに伴う、四重極集団性励起モードの出現を研究した。対相関を正しく取り扱える時間依存平均場模型を用いる事で、 ^{48}Ca , ^{46}Ar , ^{44}S , ^{42}Si の4核種に対して、四重極集団性励起モードのエネルギーと強度を求めた。魔法数 $N=28$ がよく成立する ^{48}Ca では、四重極集団性励起モードは低エネルギーには現れない。一方、不安定核である ^{46}Ar では $N=28$ のシェルギャップが狭まっており、その結果中性子の集団励起が誘引され、低エネルギーに強い励起モードが現れる事を示した。

中性子過剰Mg同位体の変形と全反応断面積 木村

中性子過剰なMg同位体、特に中性子数20の ^{32}Mg の近傍核は、魔法数に近い中性子を持つにも拘わらず大きく変形している事が知られている。また中性子数28を持つ ^{40}Mg の近傍核でも同様な理論予想がされている。そこで、全反応断面積の変化から、Mg同位体の変形度を見積もる試みを行った。反対称化分子動力学を用い、Mg同位体の変形度を求め、それを元に、変形Woods-Saxonポテンシャルから導出した波動関数と二重畳み込み模型により、全反応断面積を評価した。観測との比較から、中性子数19以上の核は軒並み大きく変形している事を示した。

ハドロン物理の研究

ハドロンの性質はクォーク・グルーオンによって決まるが、これをQCDから直接記述することは困難である。ハドロンが多体系を成すことで生じる性質の変化はハドロンの自由度とクォークの自由度を繋げ、QCDに基づくハドロン現象を理解するためのヒントを与える。また、核子を構成するアップ、ダウクォークだけでなくストレンジクォークを含むハイペロンの存在は核力だけでなくハドロン間相互作用一般の解明のために重要である。

有限温度におけるメソン質量の変化 今井

高温あるいは高密度ではクォークの性質であるカイラル対称性の回復によりハドロンの質量スペクトラムが変化することが知られている。対称性の回復に伴うシグマメソン・パイオンの質量変化を解析するため、 $O(4)$ 線形シグマ模型を用い、有限温度系へ適用した。平均場近似を越えて量子揺らぎを取り込むと、パイオンが大きな質量を持ってしまう問題が知られていたが、我々は散乱状態を考えることで軽い質量を再現できることを示し、この粒子の有限温度における質量スペクトラムの変化を解析した。通常、2フレーバーの系にお

けるカイラル相転移は2次相転移であると予想されているが、本研究では強い1次相転移であることが結論付けられた。

ハイパー原子核の超変形状態の研究 木村

通常の原子核にハイペロンが加わった"ハイパー原子核"では、ハイペロンと原子核を構成する核子との間の相互作用により、核構造の変化が起こりうる。その具体的な例として、Ar原子核とBe原子核にハイペロンが付け加わった場合を、反対称化分子動力学に基づいて調べた。Arハイパー核では核が極端に変形した「超変形状態」のエネルギーが大きく変化することを示し、またBe原子核の場合には基底状態のパリティが変わることを示した。

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が可能とし、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。

時間依存の方法による ^3He の電気双極子応答 関根、堀内

原子核の電磁気的な応答は構造や反応を調べる上で重要な情報源である。原子核は電磁場によって連続状態にも励起されるが、理論的に多体の連続状態を扱うことは一般的に困難である。そのため明示的に連続状態を必要とせずに電磁応答を求める方法が考案されてきた。本研究では、その一つである時間依存による方法で ^3He の電気双極子応答を求めた。時間を含むシュレーディンガー方程式を解く際には、複素レンジに拡張した相関ガウス関数による基底関数展開を用いた。計算結果は実験と良い一致を示し、方法の有効性を示した。研究の中間成果は日米合同学会の口頭発表にてなされた。

6体計算による ^6He の電気双極子励起構造の研究 三上 (H25.3修了)、堀内

^6He 原子核は ^4He 原子核を芯として周りに2つの中性子が大きく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低エネルギーと高エネルギーに2つのピークが現れた。遷移密度の分析から、前者は原子核内部では同位相、表面付近では逆位相の様相を見せ、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態であり、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。

少数体精密波動関数における調和振動子励起 堀内

殻模型は標準的な微視的原子核模型で、波動関数は1粒子調和振動子の積によるスレーター行列式で表現される。近年芯なし殻模型による第一原理計算が発展しているが、核力の高

角運動量成分を取り込むには多数の配位を混合する必要がある。本研究は精密波動関数を求める上で強力な方法の一つである相関ガウス基底+グローバルベクトル法に対し、波動関数に含まれる調和振動子量子数を計算する方法を開発し、4核子以下の系の精密多体波動関数の量子数分布を調べた。核力に特徴的な短距離斥力、テンソル力は高い調和振動子主量子数として現れ、特にクラスター状態についてはその分布が極端に広がることが明らかになった。

3体模型による ${}^9\text{Be}$ の回転バンドの研究 河村、堀内

最近 ${}^9\text{Be}$ 原子核の $J^\pi=9/2^-$ 励起状態が基底状態の回転バンドメンバーであるという実験結果が報告され、その状態が $\alpha+\alpha+n$ の3体クラスター状態であることが示唆された。それが実際にクラスター状態であるとするならば、3体クラスターを仮定した模型による理論計算で結果が再現できるはずである。それを確かめるために、 $\alpha+\alpha+n$ の3体クラスター模型による分析を行っている。

変形した芯核+数核子模型の定式化 堀内

芯核の回転励起を取り入れた芯核+数核子模型の定式化を行った。例として ${}^{12}\text{C}$ +数核子模型による計算を行い、エネルギー準位及び電気四重極遷移確率を計算した。芯核励起によりいくらか模型の改善は得られたが、芯核が変形した場合、芯核-核子間のパウリ原理の取り扱いを適切に行う必要性を示す結果が得られた。

${}^{12}\text{C}+n+n+p+p$ 5体模型による ${}^{16}\text{O}$ 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、 ${}^{16}\text{O}$ の不思議な 0^+ と呼ばれる低励起状態の理論的記述の問題がある。この状態は ${}^{12}\text{C}+\alpha$ クラスター構造持つと考えることが自然であるが、殻模型的な基底状態と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。ここでは α クラスターを仮定しない ${}^{12}\text{C}+n+n+p+p$ 5体模型による解析を行い、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、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方法についての問題点を指摘した。

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。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。このような断熱的反応過程を効率的に記述するグラウバー理論の発展、応用を通じて、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。

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られていたが、本研究では3次元座標Skyrme-Hartree-Fock(HF)法で得られた波動関数を直接使い、広い質量領域を含む系統的計算を行った。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。特に微分散乱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。研究成果は現在論文にまとめているところである。

グラウバー理論による変形原子核の陽子散乱の

研究 畠山、堀内

グラウバー理論を変形原子核-核子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、 $0+$ 状態に射影することで実験室系の波動関数を得た。波動関数の変形度の違いは微分散乱断面積の角度の大きいところで現れることを見た。光学極限近似では角度平均した密度分布が直接反映されるが、そのような近似をしない本解析では、密度以上の情報が現れていることを示した。中間報告は春の日本物理学会にて行われた。

全反応断面積を用いた不安定核の中性子スキン

厚 堀内、江幡、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。HF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的計算を行った。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と限界を指摘した。また様々な標的核の長所短所を議論し、現実的な測定法を提案した。

荷電変化断面積による陽子半径の導出 堀内、木

村

近年荷電変化断面積の系統的な測定が行われてきている。反応後の核子数が変化を観測する全反応断面積(相互作用断面積)が核半径を反映する物理量であることに対し、電荷が変化したもののみを測る荷電変化断面積は陽子半径に関係する量と期待される。本研究は反対称化動力学法によって得られた波動関数とグラウバー模型を用いて最新の実験データを解析し、中性子過剰Be, B同位体の陽子半径を決定した。

時間依存平均場模型(Cb-TDHFB)を用いた核融合反応の研究 江幡

低エネルギー核衝突反応における核対相関の効果を調べる為に対相関を自己無撞着に扱うCb-TDHFBと対相関を含まない模型(TDHF)を用いて核融合反応をシミュレートした。クーロン障壁を数MeV超える程度の低エネルギー反応シミュレーションを $220+220$, $52\text{Ca}+52\text{Ca}$, $220+52\text{Ca}$ に対して行い、Cb-TDHFBとTDHFの結果を比較した。その結果、対相関が核融合反応断面積を小さくする効果を持つ事が分かった。

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

非断熱的な反応を記述する信頼のおける理論の一つとして、離散化連続状態結合チャネル(CDCC)法が広く使われている。本研究ではCDCC法の応用として、 6Li 原子核に対する中性子弾性及び非弾性散乱の解析を行った。中性子- 6Li の散乱は、光学ポテンシャル模型及び畳み込み模型を用いて記述した。一般に光学ポテンシャルの虚数部の強度は決まらないが、実験との比較によりその強度を決定した。

クラスターの物理

原子核は系が複数の部分系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。本年は特に、近年実験的に探索可能になりつつある、原子核の高励起領域に現れるクラスター構造に関する研究を行った。

N=Z核のクラスター状態とアイソスカラー単極励起強度 千葉, 木村

N=Z核である 24Mg 、 28Si では、天体核反応で重要な α クラスター状態や分子共鳴状態の候補が観測されているが、その詳細は明らかになっていない。本研究ではアイソスカラー単極励起に着目し、これらのクラスター構造と単極励起強度の関係を反対称分子動力学に基づき議論した。その結果、観測された 24Mg の単極子遷移強度を再現することに成功し、クラスター状態が特に強く励起されることを見た。 28Si では単極子遷移の持つ選択則により、クラスター状態を選別できる可能性を示した。以上の結果は学会・国際研究会等で発表され、論文投稿中である。

炭素同位体における直鎖クラスター構造 馬場、千葉、木村

中性子過剰な炭素同位体では、余剰中性子によって、直鎖クラスター構造(α 粒子が3つ直線上に並んだ構造)が安定化する可能性が期待されている。そこで反対称化分子動力学により、中性子過剰炭素同位体に直鎖構造が存在するかどうか系統的に調べた。その結果、 16C の直鎖クラスター構造は特に安定である事を示した。また、 14C にも直鎖構造が存在する事を示し、ごく最近得られた実験情報と無矛盾であることを確認した。成果の一部は原著論文として発表された。

N=Z奇奇核における2核子相関の研究 堀、木村

偶偶核の基底状態は例外なくスピンパリティ $J^{\pi}=0^{+}$ であることが知られている。陽子数と中性子数が等しい魔法数の偶偶核に1つずつ陽子、中性子に加えた奇奇核では、重陽子クラスター構造を仮定すると基底状態は 1^{+} であると予想される。しかしながらこれらの原子核の基底状態には予想から外れたものが存在する。そこで重陽子クラスター構造を仮定しない3体問題を解くことで上記の原子核の基底状態の機構の解明を目指した。

12C核の基底状態に対するコンテナ描像 周

コンテナ描像は非局在したクラスターの動力学を理解するために提案され、そのような構造はTohsaki-Horiuchi-Schuck-Roepke (THSR波動関数) によって記述される。近年、我々は 2α 相関を取り入れた形でTHSR波動関数を拡張し、 ^{12}C の $2\alpha+\alpha$ クラスター構造の研究に適用した。拡張されたTHSR波動関数は従来のTHSR波動関数より 3α クラスターモデルとの重なりが大きくなった。これは、 2α 相関を 3α クラスターモデルに取り入れることにより ^{12}C の基底状態をコンテナ描像によって記述可能になること、 2α 相関が基底状態において重要であることを示している。