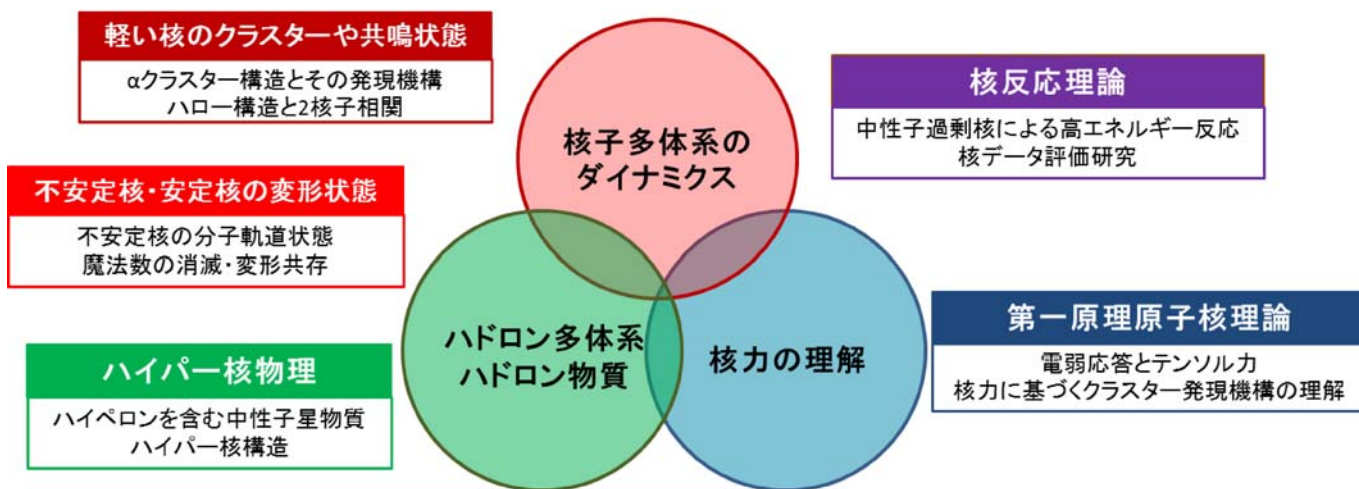


研究成果

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、高エネルギー重イオン反応を用いて宇宙初期の状態を再現することでその性質を調べたり、不安定核・ハイパー核の生成により束縛限界での多体系ダイナミクスやバリオン物質の物性が調べられたりしている。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、“不安定原子核、クラスター構造に主眼をおいた原子核の構造論・反応論”及び“第一原理計算による核力、核構造の理解”という原子核の量子多体系としての側面と、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。



不安定核, 安定核の変形状態

Be同位体に現れる様々な分子軌道 本間, 木村

Be同位体は分子状構造を持っており、発達した2 α クラスター芯の周りを余剰中性子が周回する特異な構造を持っている。この余剰中性子の軌道は“分子軌道”と呼ばれているが、現在のところ低励起状態の分子軌道のみが知られている。近年、不安定核の高励起状態の研究が大きく進展しつつあり、高励起な分子状構造の性質が明らかになると期待される。そこで、反対称化分子動力学(Antisymmetrized Molecular Dynamics; AMD)を用い、Be同位体の高励起状態に現れる、新しい分子軌道の存在を調べた。その結果、より角運動量の大きな分子軌道と、それに伴う高励起の回転帯の存在を予言し、既知の実験データの幾つかが説明出来ることを示した。

N=28魔法数の消滅と、変形共存現象 千葉, 木村

不安定核では $N=28$ 魔法数の消滅により様々な核変形が起こるが、その様相・原因解明が求められている。例えば中性子過剰核 43S では、強く変形した基底状態の存在が提案されている。これに対し、反対称化分子動力学(AMD)による解析を行った。結果、強く変形した基底状態に加え、三軸非対称な特異変形をした状態が第一励起状態となることを示し、中性子過剰核でのshell gapの縮小に伴う、強い陽子-中性子間相関が原因であることを明らかにした。また陽子過剰核である 56Ni は、2重閉殻核であるにも拘わらず、低励起領域で変形共存現象が起こり、さらに高励起領域ではハイパー変形状態の存在が議論されている。AMDによる解析を行い、観測された低励起の変形状態を定量的に再現することに成功し、4粒子・4空孔状態であることを示した。さらに、高励起状態にはハイパー変形状態に対応する状態が多数存在することを予言した。

クラスター状態を系統的に記述する理論模型の構築 千葉, 木村

原子核の励起状態には、クラスター状態が系統的に現れることが知られているが、その理論的記述では予めクラスター構造の存在を仮定して行われており、そうした仮定無く系統的にクラスター構造を記述する方法の開発が待たれている。そこで、調和振動子の $\text{SU}(3)$ 対称性に基づく拘束条件を開発し、様々なクラスター構造の系統的導出を試みた。試験的に 12C に適用し、基底状態におけるシェル構造とクラスター構造の共存や、励起状態に現れる 3α クラスターの三角形構造や鎖状構造を、仮定無しに記述することに成功した。

炭素同位体におけるハロー、変形の競合と芯励起の効果の研究 古立

近年、変形や芯励起を伴うハロー構造の研究が進展している。中性子過剰炭素同位体の低励起状態を系統的に研究し、ハロー的な一粒子状態と変形状態の混合や、それらが芯核に及ぼす影響を明らかにすることを目指した。結果として、 15C では一粒子的なハロー構造が支配的であるのに対し、 17C の第一励起状態では変形状態の成分が多く、ハロー構造の発達が小さいことを示した。また、変形状態とハロー的な状態では芯核の半径に異なる影響を与えることがわかった。

重い核の変形状態 Vidya

質量数 $A=120-200$ 程度の原子核を対象として、非対称回転子模型(asymmetric rotor model)と相互作用するボソン模型(Interacting Boson Model; IBM)の2つの理論模型に基づき、核構造の現象論的研究を行っている。本年は、原子核変形の対称性に着目し、準位構造や準位間の $E2$ 遷移確率を調べた。また、IBM(IBM-1, IBM-2)を用いて、中性子数 $N<82$ 領域の原子核についてcritical point symmetry $E(5)$, $X(5)$ の研究も行っている。

軽い核のクラスターや共鳴状態

安定核の高エネルギー領域に現れる共鳴状態では核子が弱く束縛されるため、構成粒子間の相関が核構造に及ぼす影響が強くなり、原子核は多様な構造を持ちうる。また束縛境界に近い原子核では、ほとんどの状態が共鳴状態であり、核子間の相関がより極端な形で現れ、通常核よりもはるかに豊かな構造が出現することが示されている。そのため、不安定核や安定核の共鳴・連続状態の構造を調べ、多粒子相関の様相や核構造の多様性の理解を目指す研究が、世界的に大きな潮流となっている。われわれはこの流れのなかで、クラスター模型や、 α クラスターを仮定しない少数体模型、そして共鳴状態を理論的に扱う手法である複素座標スケールリング法などを用いて、下記の4つのテーマに取り組んでいる。

安定核における分子軌道状態 鈴木, 木村

Be同位体において存在が知られる中性子による分子軌道状態が、他の原子核においても普遍的に存在するかどうかという問題は興味深い。近年では、クラスター構造をもつNe同位体の安定核においても分子軌道状態の存在が理論的に予言されており、なかでも ^{21}Ne 原子核には、その低エネルギー領域に $^{16}\text{O}+4\text{He}+n$ の3体クラスターで記述されるパリティ非対称な分子軌道状態の存在が指摘されている。これを検証するために、われわれは ^{21}Ne 原子核を $^{16}\text{O}+4\text{He}+n$ の3体クラスターによる直交条件模型 (Orthogonality Condition Model; OCM) で取り扱った。計算の結果得られた ^{21}Ne 原子核のエネルギー励起スペクトル、各状態間のE2遷移強度、電気四重極モーメントの値から、4つの回転バンド($K\pi=3/2\pm$, $K\pi=1/2\pm$)を同定した。また各回転バンドにおける原子核半径や分光学的因子の計算により、 $K\pi=3/2\pm$ の回転バンドが n 分子軌道状態に対応するパリティ2重項に、そして $K\pi=1/2-$ の回転バンドが σ 分子軌道状態に対応していることが推定された。加えて、 ^{21}Na におけるクーロン変位エネルギーの値は、回転バンド $K\pi=1/2-$ が σ 分子軌道状態であることを支持している。

α クラスターの発現機構 堀内

長年の未解決問題の一つとして、 ^{16}O の不思議な $0+$ という低励起状態がある。 ^{16}O 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。それに反して $0+$ 状態が第一励起状態として現れるが、唯一説明したのは $^{12}\text{C}+\alpha$ クラスター模型であった。このように2つの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、現行の大規模計算を持ってしても再現は不可能である。完全な微視的計算は難しいが、 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。波動関数成分の解析から、基底状態は殻模型的であるが、励起状態では α クラスターの発達を示唆する結果が得られた。現在さらに詳細な分析を進め、論文にまとめている最中である。

ハロー構造と2核子相関 栗原

$A=6$ 系 (^6He , ^6Li , ^6Be)を ($\alpha+2$ 核子) 模型で調べることを行い、この1年間は ^6Li 核のアイソスピン混合の問題を中心に研究を行ってきた。これまでの他の研究で、大きなアイソスピン混合の存在が示唆されてきており、複素座標スケールリング法を用いて3体共鳴状態を正確に解くことによって、アイソスピン混合がどのような機構で生じるか解明することが目指したものである。結果は、先行研究で示されるほど大きなアイソスピン混合を示すものではなかった。

軽い核における α クラスター構造 Odsuren

^5He や ^8Be , ^9Be をはじめとする2体または3体の α クラスター構造を持つ原子核の共鳴状態についての研究を行った。具体的には、複素座標スケールリングを施した直交条件模型 (Complex-Scaled Orthogonality Condition Model; CSOCM)を用いて束縛エネルギーや共鳴エネルギー、崩壊幅等を計算することで、これらの原子核の束縛状態・共鳴状態について調べた。今年度は2体 α クラスター構造を持つ核として、 ^8Be と ^5He の構造研究を行った。CSOCMの波動関数としてガウス基底関数を用いる計算と、調和振動子基底関数を用いる計算を行い、2つの方法で実験と無矛盾な結果が得られた。また、共鳴状態として $\alpha+n$ の2体クラスター構造を持つ ^5He では、散乱の物理量である位相差の計算を行った。現在

さらに詳細な分析を進めるとともに、3体 α クラスターとして 9Be の計算を行っている最中である。

第一原理原子核理論

4Heの電弱応答の第一原理計算 堀内

本研究では4Heの光吸収反応及び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付いて現れるかを示した。得られた光吸収断面積は実験値を広いエネルギー領域でよく再現した。また、反応閾値近傍の光吸収断面積では $3\text{He}+n$, $3\text{H}+p$ クラスター配位が重要となること、光吸収断面積の総和に対応するThomas-Reiche-Kuhn和則へは \square 中間子交換力、特にテンソル成分が主要な寄与を成すことを示した。この研究で得られた知見を元に様々な応答計算への応用、研究が進んでいる。特に弱相互作用により引き起こされるスピン双極子励起強度は実験困難なニュートリノ-原子核反応と関係することから、基礎データとして重要である。理論により得られたスピン双極子強度関数は4He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。また、和則を考えることにより4He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た。

6体計算による6He, 6Liの励起機構の研究 三上, 堀内

6He原子核では巨大双極子共鳴より低いエネルギー領域で小さな共鳴が観測されており、その起源については未だ一致した理解は得られていない。6He原子核は4Heを芯核として周囲に2中性子が存在するような典型的な2中性子 h_{111} 構造を持つと考えられていることから、芯核と周囲の2中性子が逆位相で振動するようなモードが起源ではないかと言われている。このような励起構造が自然に発現するのかどうかを明らかにするためには、従来行われてきたような4Heを不活性として考えるようなモデルでは不十分で、モデルを仮定しない6体系として詳しく解析する必要がある。本研究では相関ガウス関数と確率論的変分法を用いて6体計算を行った。現在までに半径や粒子密度を得、6He原子核の基底状態は4Heを芯核として周囲に中性子が広がっていることを示唆する結果を得ている。今後は励起状態を解析し、初めに挙げた小さな共鳴の起源を明らかにするとともに、6Liについても同様の解析を行い、6体系の励起機構の統一的理解を目指す。

Brueckner反対称化動力学を用いた ^{12}C のエネルギースペクトルの研究 森本

発達したクラスター構造を持つ ^{12}C の3 \square 閾値の上に観測されるHoyle状態を現実的核力から説明したい。本研究ではBrueckner反対称化分子動力学 (Brueckner AMD)による ^{12}C 核のエネルギースペクトルの計算を行った。現実的核力としてはArgonne V8'相互作用を用いることとし、Brueckner AMDに従えば、生成座標を用いてクラスター状態を記述し、そこでの有効相互作用(G-行列)を求めて、生成座標方程式を解く。得られた結果は、Hoyle状態のエネルギーにおよそ2 MeV 程足りず、その原因を検討している。

核反応理論

離散化チャネル結合法による中性子非弾性散乱 の解析 D. Ichinkhorloo

n-Li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 ${}^7\text{Li}$ 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 ${}^7\text{Li}(n,n'){}^7\text{Li}^*$ 反応の解析を行った。 ${}^7\text{Li}$ は $\alpha+t$ 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。理論計算は入射エネルギー8.17~24MeVの弾性散乱断面積をよく再現した。同様の枠組みで ${}^7/2$ -共鳴状態への非弾性散乱の分析を行い、測定の間角分布を再現することに成功した。さらに ${}^7\text{Li}$ の破碎中性子スペクトルを説明し、CDCC法とJLM相互作用による解析は ${}^7\text{Li}(n,n'){}^7\text{Li}^*$ データ評価に対して強力な手法であることが示された。また、1.0-150MeVの広いエネルギーの ${}^6,{}^7\text{Li} + n$ 反応についても評価を行っている。

中性子過剰核の全反応断面積の系統的解析 堀内

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。なか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り、酸素同位体を超え、ネオン、マグネシウムといったより重い同位体にまで研究は拡大している。sd殻を超えてpf殻に入る中性子過剰ネオンやマグネシウムの領域では、先行の構造計算から様々なエキゾチックな性質、例えば逆転の島、変形、新たなハロー構造などが示唆されており、精力的に研究が行われている。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となっている。本研究はそのような不安定原子核の全反応断面積の系統解析を、中性子過剰酸素、ネオン、マグネシウム、珪素、硫黄同位体に対して行った。高エネルギー反応過程はグラウバー理論で記述し、インプットとなる1粒子密度はSkyrme-Hartree-Fock法により求められた。非軸対称変形の効果も扱えるよう、計算は3次元座標上で行われた。得られた全反応断面積は最新の実験結果を含め既存の実験の傾向を再現し、入射核の大きさを良く反映することを確認した。半径の系統的振る舞いを説明するには変形の効果と低角運動量軌道が重要で、それは全反応断面積の振る舞いとよく対応することを示した。

ハイパー核物理

u, dクォークからなる陽子・中性子に限らず、他のフレーバーの自由度、例えばストレンジネスsの自由度をもつハイペロンを含む原子核(ハイパー核)を調べることは、単にsクォークを含む系を調べるということに留まらず、原子核物理にとって大きな意味を持つ。例えば一つは、 Λ 粒子は核子のPauli原理を受けず、原子核内部まで探索するプローブとなりうるため、芯となる原子核の性質をも明らかにしうることで、もう一つは中性子星などの高密度領域で核子の代わりに現れ、Fermi面を下げ状態方程式を軟らかくする働きをすることである。このようにハイパー核を調べることは原子核物理そのものを豊かにする期待がある。このような観点から、我々は各種ハイペロンを含む系として、有限多体系である原子核への束縛状態や無限系である核物質の性質を理解し、新たな知見を得るべく研究を進めてきた。

Λ 粒子をプローブとした核構造研究 井坂, 木村

質量数20程度のsdシェル原子核は、様々な構造を持つことが知られている。その一つである ${}^{24}\text{Mg}$ は、sdシェル核の中でも大きく変形した原子核であることが知られており、三

軸非対称(非軸対称)変形核の候補であると長年考えられている。しかし、原子核の三軸非対称変形を実験で直接確かめることは容易ではない。そこで我々は、 ^{24}Mg に Λ 粒子が加わった $^{25}\Lambda\text{Mg}$ ハイパー核の構造を理論的に予言・分析することで、 Λ 粒子をプローブとして芯核 ^{24}Mg の三軸非対称変形を確かめることが可能であることを理論的に示した。具体的には、 $^{25}\Lambda\text{Mg}$ のp軌道状態(一粒子軌道がp軌道に励起した Λ 粒子が ^{24}Mg に加わった状態)に着目し、反対称化分子動力学(AMD)モデルに基づき、 ^{24}Mg の三軸非対称変形のためp軌道状態が Λ 粒子の軌道の方向によって3つに分裂することを示した。これら3つのp軌道状態を実験で観測することで、芯核 ^{24}Mg の三軸非対称変形を実験的に確かめることが可能である。

ハイペロンを含む中性子核物質 椿原

我々は原子核の既知の性質を再現した上で、同じ枠組みで核物質を統一的に理解することが出来る相対論的平均場(Relativistic Mean Field; RMF)モデルに強結合格子QCDから解析的に導かれるカイラルポテンシャルという形でカイラル対称性を取り込み、これを用いた中性子星物質の状態方程式に対する研究を進めてきた。本年は、重粒子・中間子間の3体結合をモデルに取り入れた上で、ハイペロンを含む中性子星物質を実験データに基づいて解析することを目標とし、結果として、近年確定された非常に大きな中性子星の質量を有限核・核物質における経験的な性質を満たした上で説明しうることを示した。