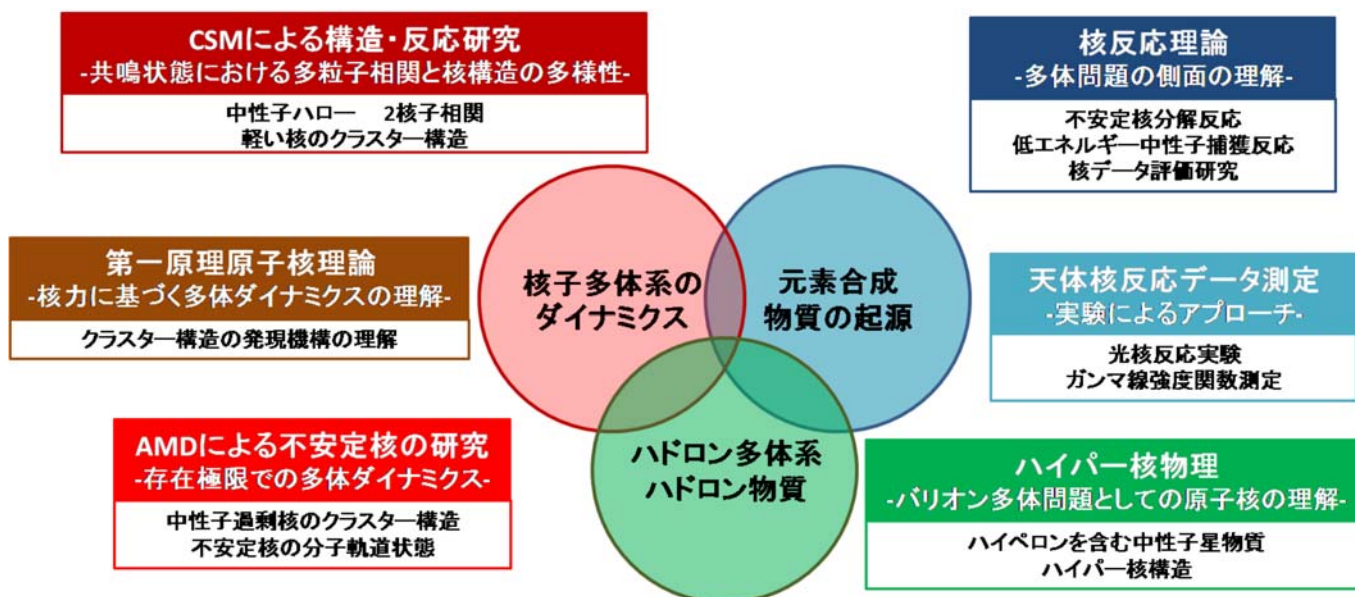


研究成果

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少数多体系の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、“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。また、北大工学部の持つ加速器施設や海外の加速器施設を使い、天体核反応率の導出などの実験も行っている。



AMDによる不安定核の研究 本間，古立，木村

近年、不安定核の研究が進み、安定核には見られない特異な構造や性質が次々と明らかにされてきている。我々は特に中性子過剰核の低励起領域から高励起領域に渡り現れる多様な構造を理解するため、Be, C, Ne同位体を対象にスペクトロスコピーを中心とした構造の研究を行った。これらの核における多様な構造の出現には、多数の余剰中性子が関与すると考えられるため、構造に仮定をおかず、多体系を系統的に取り扱える反対称化分子動力学(AMD)を理論模型として用いた。Be同位体の研究では、 ^{12}Be と ^{14}Be の高励起領域で、新たな一粒子軌道を持った状態の回転バンドが現れる事、原子核の変形に応じて一粒子軌道が異なった構造へと変化する事を示した。C同位体の研究では、 ^{16}C の3軸非対称変形から ^{20}C のoblate変形への変化が、低励起スペクトルとE2遷移確率の変化により確かめられることを示した。Ne同位体の研究では、励起スペクトルの解析及び反応断面積の評価を行い、 $N=20$ 魔法数の破れによって核の変形が起こり、反応断面積の増加として現われる事を示した。これらの結果は5編の論文として発表した(3編受理済)。

CSMによる構造・反応研究

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つ。また束縛限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、通常核よりも遥かに多様な構造が出現することが示されている。そこで、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、世界的に大きな流れとなっている。複素座標スケールリング法(CSM)は共鳴状態を理論的に扱う有効な手法であり、我々はクラスター模型とCSMを組み合わせる事で“ハロー構造と2核子相関”、“軽い核における α クラスター構造”、“安定核における分子軌道状態”などのテーマに取り組んでいる。

ハロー構造と2核子相関 栗原, 加藤

A=6系は α クラスターをコアとして $\alpha+N+N$ の3体構造を持つ系である。2つの価核子のアイソスピンの組み方により、A=6系には二中性子ハロー構造(T=1)や重陽子クラスター構造(T=0)といった様々な構造が現れることが知られている。このアイソスピンに依存して異なる構造の共存現象に着目し、我々は現実的核力を用いた3体模型と複素スケールリング座標法を組み合わせた模型を用いてA=6系の構造の系統的研究を行った。具体的には3体系に拡張した複素状態密度法(CLD)の解析を行い、複素座標スケールリング法だけでは極を特定する事の難しかった ${}^6\text{Li}$ の $1+2$ 状態の特定を可能にした。またこのCLDの解析から、 ${}^6\text{He}$ のソフトダイポールに対応すると考えられる $1-$ 状態や ${}^6\text{Li}$ のT=0状態のパリティ2重項のパートナーとなりうる負パリティ状態の探索を行ったが、これらの状態は発見されなかった。

軽い核における α クラスター構造 何東, 立石, Odsuren, 加藤

${}^5\text{He}$ や ${}^8\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$ 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、直交条件模型(OCM)とCSM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。3体 α クラスター構造を持つ核では、近年核医学分野においても重要な ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ 反応を理論的に記述するため、 ${}^9\text{Be}$ と ${}^9\text{B}$ の構造研究を行った。この反応で、 ${}^9\text{Be}$ は標的核なので、エネルギーが低い領域の共鳴状態が特に重要である。そこで、OCM+CSMを ${}^9\text{Be}$ に適用し共鳴エネルギーや崩壊幅を求め、実験と比較した。その結果、低励起状態であるスピンパリティ $1/2+$ 状態がOCM+CSMでは記述出来ないことが分かった。そこで、電荷に対する解析接続(ACCC)法とCLDを適用し、 ${}^9\text{Be}$ の $1/2+$ 状態の記述を試みた。電荷に対するACCC法とCLDから得られた結果より、 ${}^9\text{Be}$ の $1/2+$ 状態は通常の共鳴状態とは異なり、仮想状態である可能性があることを明らかにした。また、共鳴状態として $\alpha-n$ の2体クラスター構造を持つ ${}^5\text{He}$ では、散乱の物理量である位相差について、純粋な共鳴状態からの寄与を抽出した。さらに、この手法を $\alpha-\alpha$ のクラスター構造を持つ ${}^8\text{Be}$ に適用し、Schmidt-WildermuthポテンシャルとBuckポテンシャルの2つについて結果を比較した。その結果、 $2+$ 状態の共鳴幅が直交条件の取り方によって倍近く違いが現れる事が分かった。

安定核における分子軌道状態 鈴木, 木村

近年、Be同位体のみならず、クラスター構造をもつO同位体やNe同位体の安定核においても、中性子の分子軌道(MO)状態が存在することが理論的に予言されている。なかでも ${}^{21}\text{Ne}$ 原子核は低励起状態に ${}^{16}\text{O}+4\text{He}+n$ の3体クラスター状態が存在し、バレンス中性子が ${}^{16}\text{O}+4\text{He}+n$ の周りの分子軌道を占有するパリティ非対称なMO構造を持つ可能性が指摘されている。そのため、 ${}^{21}\text{Ne}$ 原子核は、バレンス中性子の運動がクラスター芯の構造に

及ぼす効果を調べるためにもっとも有効な系の1つである。本研究では、原子核におけるMO構造の性質を調べるために、 ^{21}Ne 原子核を $16\text{O}+4\text{He}+n$ の3体クラスターによるOCMで取り扱った。このようにクラスター芯を仮定した模型空間で少数体問題を厳密に解くことにより、 ^{21}Ne 原子核におけるMO構造についての詳細な理解を目指している。

第一原理原子核理論 森本, 加藤

現実的核力に基づくクラスター模型研究は、核力の特徴に基づいてクラスター構造形成のメカニズムを明らかにすることを目指している。AMDは原子核の平均場描写による殻模型的構造と分子的描写によるクラスター模型的構造を同一の枠組みで記述できる唯一のアプローチである。模型計算における有効相互作用は構造の変化に伴い複雑な状態依存性を持っていると考えられ、現在そのような有効相互作用は未知である。そこで、殻構造とクラスター構造を記述するAMD模型計算に必要な有効相互作用をBrueckner理論に基づき現実的核力から導く新しい理論 (Brueckner-AMD) が富樫によって提案された。この1年、森本が生成座標法(GCM)をBrueckner-AMDに適用することを完成させ、その有効性を ^8Be の α - α クラスター構造の計算で確かめた。さらに、この方法を ^{12}C に適用し、基底状態の殻的構造と励起 0^+ 状態のクラスター構造における有効相互作用の構造依存性を調べることを行ってきた。

ハイパー核物理

sクォークを含むストレンジネス多体系は、自然の物質階層の1つを成すが、その性質は未だ十分に明らかにされていない。例えば、sクォークを含むバリオンであるハイペロンが通常の原子核に束縛されたハイパー核は、通常の原子核とは異なったストレンジネス多体系固有の性質を示す興味深い研究対象である。特に次世代加速器J-PARCの本格稼働に伴い、ハイパー核に対する理論的研究の重要性が非常に大きくなっている。また、中性子星の内部には大量のハイペロンが存在すると考えられており、ハイパー核の実験結果に基づいた定量的な理解が求められている。そこで、我々はAMD模型や相対論的平均場(RMF)模型を用い、少数多体系であるハイパー核や無限系である中性子星物質の理論研究を行い、ストレンジネス多体系の広い範囲での理解を目指している。

sdシェル Λ ハイパー核構造 井坂, 木村

原子核に Λ 粒子等のハイペロンが加わることで、原子核は構造変化を起こすことが示唆されている。特に、質量数20程度のsdシェル Λ ハイパー核では、元の原子核が多種多様な構造の励起状態を持つため、 Λ 粒子が加わることで様々な構造変化が起こると期待される。この準位構造の変化は、J-PARC 実験によって将来確かめられ、理論での予言が必要である。そこで我々は、sdシェル核の中でも非常に大きく変形した原子核であるMgに着目して研究を行った。 ^{24}Mg は三軸非対称変形しており、励起回転帯ごとに特徴的な構造を持つと考えられている。本研究では、これに Λ 粒子が加わった $^{25}\Lambda\text{Mg}$ ハイパー核にAMD模型を適用し、基底回転帯と $K\pi = 2^+$ 回転帯の準位構造がどのように変化するかを調べた。その結果、 Λ 粒子が加わることで $K\pi = 2^+$ 回転帯の励起エネルギーが高くなることを示した。このような変化は、 Λ 粒子による三軸非対称変形の変化が回転帯により異なることによって生じるということを示した(誌上論文として発表)。

ハイペロンを含む中性子核物質 椿原

我々は強結合格子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RMF模型に取り込み、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。この模型を用いると、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ため、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が出来ると考えられる。本年は、バリオン間の三体結合をモデルに取り入れることで、近年確定された非常に大きな中性子星の質量を再現することを目標とした。フレーバー対称性の破れを含めて調べたところ、双方が中性子星の質量増大に大きく寄与することが分かった。また、 Σ -ハイペロンの中性子星での出現についても調べた。実験で計測された Σ -のAtomic Shiftを再現するようにモデル中の結合定数を定めると、フレーバー対称性から示唆される結合定数を用いた際よりも、低い粒子密度から Σ -粒子が出現し、中性子星の最大質量をある程度減少させる効果があることがわかった。

核反応理論 Ichinkhorloo, 松本, 山本, 加藤

原子核反応の研究は原子核の構造の情報を得ることのみでなく、宇宙物理学、天体核物理学における元素合成過程の解明、さらに原子力工学の分野の観点から原子核研究において重要になって来ている。この1年、次の3つの課題について進展があった。

3体分解反応

3体系のcomplex scaled Lippmann-Schwinger 方程式の解の表式を $a+p+n$ 系に適用し、 $a+d$ 散乱現象と $2H(a,\gamma)6Li$ 反応の解析を行った。その結果、低エネルギー $a+d$ 散乱ではdeuteronの分解チャンネルだけでなく、 $5He+p$ や $5Li+n$ の移行チャンネルも寄与していることが分かった。また、 $2H(a,\gamma)6Li$ 反応における $a+p+n$ 3体自由度の寄与が大きいことが示された。

低エネルギー中性子補核反応

殻模型の1つの拡張であるクラスター軌道核模型(COSM)を用いて、低エネルギー中性子捕獲反応断面積の研究を行った。COSMの問題点の一つは重心座標が取り除かれていないことによる反跳効果が正しく取り扱われないことであるが、山本は $17O(n,\gamma)18O$ 反応の解析で、その近似による断面積への効果があまり大きくないことを調べた。

核データ評価研究

核反応において重要な反応機構の1つである分解過程を精密に記述する離散化連続チャンネル結合法(Continuum-Discretized Coupled-Channels: CDCC)による核データの評価研究を行ってきた。Ichinkhorlooは $6Li(n,n')6Li^* \rightarrow d+a$ 反応および $7Li(n,n')7Li^* \rightarrow t+a$ 反応を分析してきた。この計算で、限られた実験データから得られた光学ポテンシャルを用いるよりもJLMと呼ばれる有効核力をfolding(畳み込み)して得られるポテンシャルを用いる方が実験データを系統的に再現することが明らかになった。これらの成果の一部は論文として公表され、全体がIchinkhorlooの学位論文としてまとめられた。

加速器施設を利用した原子核反応データ測定の系統的研究 牧永, 加藤

北大45MeV LINACの制動放射線を用いた原子核の実験的研究 牧永, 加藤

宇宙における元素合成過程を理解する為、又、加速器駆動核変換処理システム(ADS)利用時に発生する γ 線による影響を精度よく予測する為には、幅広い γ 線エネルギーに対する核データ測定が必要である。 (γ, n) 反応が中心的な役割を担うE1巨大共鳴領域(励起エネルギー15MeV付近)近傍では、高精度な測定が行われてきたが、 $(\gamma, 2n)$ 以上の測定データの系統的研究は未だ不十分である事が指摘されている。又、光入射の標的や生成物が核異性体である場合には、励起状態からの反応断面積(部分断面積)の測定データとその核物理理論による評価が重要となる。本研究では、本学45MeV電子線加速器と韓国ポハン加速器研究所(PAL)を用い、上記研究に最適な制動放射線源の開発、測定体系の開発及び核データ測定、解析手法の研究を行っている。今年度は、ポハン加速器研究所(PAL)及び本学45MeV電子線加速器を用いて、放射化実験を行った。

北大45 MeV LINACの中性子線を用いた原子核の実験的研究 牧永, 加藤

原子力分野で必要とされる、FPやMAに関連した中重核の中性子捕獲断面積の研究は世界的に行われてきた。また、天体中では、中性子捕獲・ベータ崩壊を繰り返しながらハイゼンベルグの谷に沿って元素を合成する過程(s過程)や進化の終焉である超新星爆発の高温で短時間の環境で起こる中性子捕獲(r過程)を理解する上では、中重核のみならず軽い核の中性子捕獲が重要である事が指摘されている。軽核の中性子捕獲断面積の測定データは、東工大の井頭や永井らが測定した $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}(n, \gamma)$ 反応断面積の例にあるように、過去の実験を大きく覆す新データ、新たな理論の必要性等、多くの課題を現在も抱えている。近年、本研究室を中心とし理化学研究所、九州大学、原子力機構と共同で行っている軽核の中性子捕獲断面積の理論評価の進展に伴い実験データの需要も高まっている。本研究では、北海道大学45MeV電子線加速器と韓国ポハン加速器研究所(PAL)を利用した、軽い核の中性子捕獲断面積測定を目指した開発を行っている。本年度は、本学45MeV電子線加速器施設を用いて中性子源の開発を行い、飛行時間法(TOF)による試験測定を行った。

Rosendorf 研究所における制動放射線を用いた光核共鳴蛍光散乱実験 牧永

光子ビームを利用した光核共鳴蛍光散乱(NRF: Nuclear resonance fluorescence)技術の応用が世界的に広まりつつある。原子核物理分野では、粒子閾値以下で起こるNRFの断面積の増加現象(ピグミー共鳴)の理解と天体核反応率に及ぼす影響に対する研究が盛んに行われている。一方、工学的応用では、NRF技術を用いた非破壊検査手法や核セキュリティに関する研究が盛んに行われている。また、原子炉等から排出される長寿命核分裂生成物(LLFP)の消滅処理の為の基礎となる核データとして、これまでは粒子閾値以上のガンマ線強度関数の系統的測定が行われてきたが、NRF領域のガンマ線強度関数も同じく重要である事が指摘されている。しかしながら、粒子閾値以下における光核共鳴蛍光散乱の系統的測定及び評価は十分に行われていない。本研究では、ドレスデン・ロッゼンドルフ研究所(HZDR)のELBE施設で発生される制動放射線源を用いて、中性子閾値以下における (γ, γ') 反応断面積の測定、及び理論評価を行っている。今年度は、 $^{181}\text{Ta}(\gamma, \gamma')^{181}\text{Ta}$ 反応断面積の測定を行った。