

III. 原子核物理研究部門

1. メンバー

教授	中務 孝、矢花一浩（量子物性部門兼務）
准教授	寺崎 順（HPCI 戦略プログラム）
講師	橋本幸男
助教	日野原伸生（国際テニユアトラック）
研究員	温 凱（数理物質系物理学域）、鷲山広平（数理物質系物理学域）
学生	大学院生 4 名、学類生 2 名

2. 概要

核子（陽子・中性子）の多体系である原子核の構造・反応・応答などの多核子量子ダイナミクスの研究を推進している。安定線（ハイゼンベルグの谷）から離れた放射性アイソトープの原子核の構造と反応、エキゾチックな励起状態の性質、様々な集団運動の発現機構など、未解決の謎の解明に取り組んでいる。原子核の研究は、フェルミ粒子の量子多体系計算という観点で、物質科学や光科学、冷却原子系の物理と密接なつながりをもつ。また、クォーク・グルーオンのダイナミクスを記述する格子 QCD に基づく核力の計算、軽い原子核の直接計算などが進展する中、素粒子物理学との連携も重要性が増している。ニュートリノの解明に向けたニュートリノレス二重ベータ崩壊の観測実験や、素粒子標準模型のテストに関わる実験などにも原子核理論の精密計算が不可欠とされている。また、元素の起源や星の構造にも原子核の性質は深く関わり、宇宙物理学とも密接に関係している。原子核物理部門のメンバーは、このような幅広い課題に取り組み、分野の枠を超えた研究を推進している。

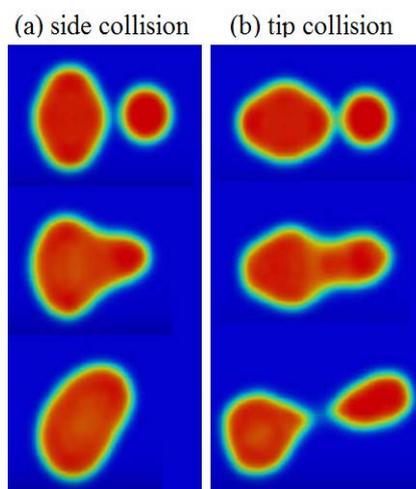
3. 研究成果

【1】 時間依存平均場理論による低エネルギー重イオン反応の研究

(1) 多核子移行反応・準核分裂過程に対する系統的な TDHF 計算（関澤、矢花）

低エネルギー原子核衝突は、融合反応と共に終状態で 2 つの分裂片に分かれる反応を利用した、安定に存在しない原子核を生成する手段として興味を持たれている。我々は時間依存 Hartree-Fock (TDHF) 法を用い、 $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U}$ 反応に対する詳細な計算を行った。この反応は、合成系が原子番号 120 の超重核となることや、 ^{238}U が大きな変形を持つことなどの観点から興味を持たれ、実験が行われてきた。この反応の特徴として、計算から以下のことを明らかにした。まず、反応の様相が、衝突時の U の方向に強く依存する。U の変形軸が入射方向と平行な場合には、長く伸びた複合系が形成され、比較的短い反応時間で分裂し、相対運動から内部運動へのエネルギー移行は小さくなる。この場合、重い分裂片が ^{208}Pb となる傾向が見られ、

魔法数が準核分裂ダイナミクスに大きな影響を与えることが見出された。一方、U の変形軸が入射方向に対し垂直な場合には、反応時間が長くなり、エネルギー移行も大きくなる。また、入射エネルギー依存性を調べたところ、バリア近傍の入射エネルギーでは準核分裂が主要であり核融合過程は見られなかったが、より高い入射エネルギーにおいて融合過程が見出された。右図に、計算によって得られた $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ 反応における密度分布の時間発展の様子を示す。衝突時の U の向きに応じ、反応の様相が大きく異なることが分かる。この知見は、 $Z=120$ の超重核を生成する反応への示唆を与えるものであると考えられる。



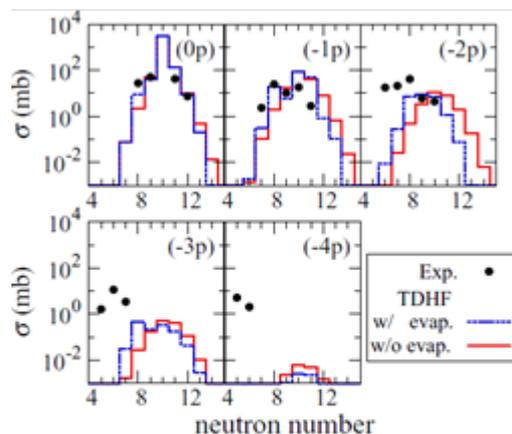
$^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ 反応の様子：

- (a) U の側面に衝突し、融合
- (b) U の先端に衝突し、分裂

(2) 質量の非対称な系における多核子移行反応の研究 (B. J. Roy 他 (BARC、インド)、 関澤)

中性子過剰な原子核を実験的に生成し、その性質を明らかにすることは、原子核物理学の重要課題の一つである。近年、多核子移行反応は、中性子過剰な不安定核の生成が期待できる反応として注目を浴びている。我々は、微視的な計算により反応機構を明らかにし、目的の不安定核を生成する最適な反応を予言することを目指し、研究を進めている。この目的を達成するため、2014 年末から、インドの実験グループとの共同研究を進めている。これまでに我々は、 $^{16,18,24}\text{O}+^{206,208}\text{Pb}$, $^{16,24}\text{O}+^{154}\text{Sm}$, $^{16}\text{O}+^{27}\text{Al}$ 反応に対する系統的な TDHF 計算を行った。その内、実験データの解析が完了した、 $^{18}\text{O}+^{206}\text{Pb}$ 反応

について、移行反応の角度分布、フラグメントの運動エネルギー分布、移行反応断面積に対する実験値と計算値の比較を行った。その結果、主要な反応過程について、TDHF 計算により定量的な記述が得られることが示された。しかし、平均値から離れた反応確率の小さい過程について、実験値とのずれが見出された。この結果は、分析した反応における、現在の計算に含まれていない多体相関の重要性を示唆している。現在は、大きく変形し



移行反応断面積の実験値との比較

た ^{154}Sm 原子核を標的核とした $^{16}\text{O}+^{154}\text{Sm}$ 反応に着目し、入射エネルギーを変えた結果を分析することにより、多核子移行反応における原子核の変形の効果を明らかにするための研究を進めている。

(3) 大振幅集団運動理論を用いた核反応ダイナミクスの記述 (温、中務)

線形領域を超える大振幅集団運動を扱う理論として、断熱近似型の理論が提案されているが、そのうちの 하나가、2000 年に提案された断熱自己無撞着集団座標法 (Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate Method: ASCC 法) である。この理論では、少数自由度の集団空間 (座標) の自己無撞着な抽出が可能であり、特に、過去の断熱時間依存平均場理論では不可能であった一意的な抽出ができる点が優れている。2014 年の秋から、この理論に基づいて、低エネルギーの多核子反応ダイナミクスを記述することを目指した研究を開始した。BKN 相互作用と呼ばれる有効相互作用を用いた 3 次元座標表示のコード開発を行い、昨年度に引き続き、今年度は、アルファ粒子と炭素 (融合核: 酸素)、アルファ粒子と酸素 (融合核: ネオン) の散乱・融合過程を記述する集団座標をマイクロに決定した。拘束条件付き平均場方程式と、その拘束演算子を決定する局所調和近似方程式を自己無撞着に解くことで、これを実現した。こうして、核反応の集団運動を支配するポテンシャルと質量パラメータが決定される。昨年度求めた 2 つのアルファ粒子の融合・分裂過程に対して決定した集団質量と同様、上記のより重い系においても、遠方で換算質量に一致することが示された。また、2 つの原子核が接触すると、換算質量が大きくなることが分かった。また、反応経路に対しても興味深い結果が得られている。通常行われるように、拘束演算子を四重極演算子や八重極演算子に仮定して反応経路を求めた結果と、ASCC 法によって自己無撞着に反応経路を決めた場合では、異なる経路が得られた。これは、系の動的な性質を反映した理論によって初めて可能になった成果と言える。

【2】 アイソスピン不変なエネルギー汎関数とアイソスピン対称性の破れ (中務、佐藤 (理研)、Dobaczewski (ワルシャワ大)、Satula (ワルシャワ大))

現在主流となっている原子核のエネルギー密度汎関数は、Skyrme 形式、Gogny 形式、共変形式 (相対的) の 3 つに大別されるが、どれも陽子と中性子の密度の汎関数としてエネルギーが与えられている。しかし、陽子や中性子はアイソスピンの第 3 成分の固有状態であり、アイソスピン空間における回転に対して不変ではなく、一般にはアイソスピンが任意の方向を向いた状態、すなわち陽子と中性子が混合した状態に拡張する必要がある。これを実行するため、昨年度までに、陽子・中性子を区

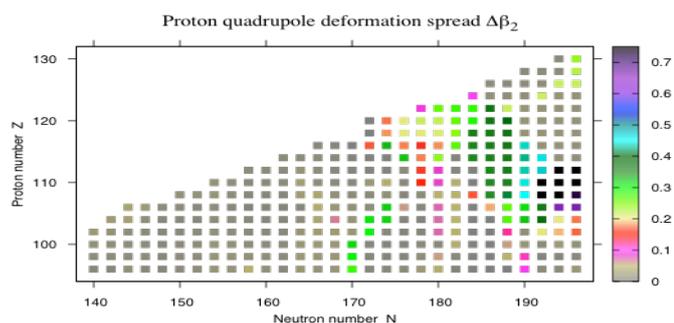
別せずに「核子」として扱う新しい Kohn-Sham 方程式と、それに対応する非対角要素を含むエネルギー汎関数を構築し、その計算コード開発を実施した。今年度は、開発したコードを利用して、アイソスピン対称性の破れを定量的に検証する研究を行った。

アイソスピン対称性は、原子核において近似的に成立する対称性であるが、電磁相互作用では破れていることが知られている。また、強い相互作用においても、u, d クォーク間に質量差が存在するためにわずかに破れている。この破れの度合いと核力との関係は、軽い原子核について調べられていたが、重い原子核における研究はほとんど無かった。我々は、アイソスピン不変なエネルギー汎関数にそれを破る汎関数を加えることでこれを実現し、実験データとの比較からその破れの大きさを評価した。荷電類似状態（アイソバリックアナログ状態）と呼ばれる状態を系統的に計算し、豊富な実験データとの比較を行い、新しいパラメータを2つだけ導入することにより、アイソスピン対称性を破る普遍的な汎関数を構築することに成功した。特に、質量依存性に現れるジグザグ構造等、特徴的な振る舞いが再現できており、また破れの大きさが重い原子核の質量に拡大されて現れるといった現象も明らかになりつつある。現在、より詳細な解析を実行中である。

【3】 超重元素領域におけるエネルギー密度汎関数の不定性（中務、Afanasjev(ミシシッピ州立大)、Ring(ミュンヘン工科大))

2015年6月から8月にかけて、米国・ミシシッピ州立大学の Anatoli Afanasjev 教授が研究室にサバティカルで滞在した。これを契機に、原子核のエネルギー密度汎関数の精度・不定性を明らかにする研究をスタートさせた。特に、陽子数が100を超える超重元素領域には、実験データが少ないために不定性が大きいと予想される。2015年の大晦日に、森田氏をグループリーダーとする理化学研究所の実験グループが元素番号113の命名権を獲得したニュースは記憶に新しいが、将来の実験の設計などにおいても、理論の不定性を明らかにしておくことは重要である。

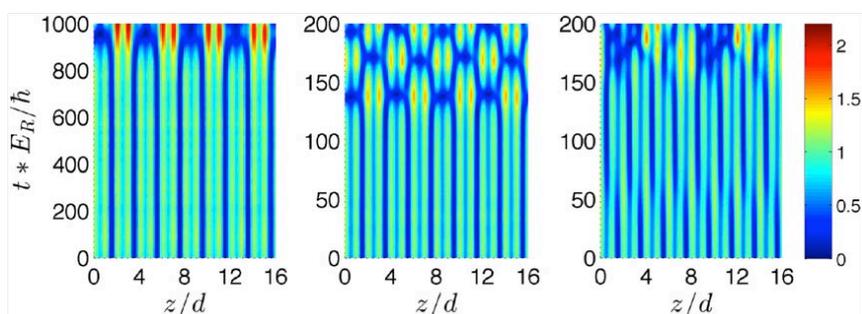
我々は、多くの異なる共変形式エネルギー汎関数を用いて軸対称性変形を取り入れた計算を実行し、理論予測のばらつきを評価した。その結果、以下の図に示すように、開殻配位 (open-shell configuration) に対応する多くの超重核の構造に対しては、ばらつきが非常に小さく、理論予測の信頼度が高いことが分かった。一方、閉殻配位 (closed-shell configuration) に近い原子核に対してのばらつきが大きい。また、変形を考慮しない計算によって示唆された中性子の魔法数 $N=172$ が、変形を考慮することによって消滅すること（すなわち、 $N=172$ の原子核のほとんどは変形していること）を示した。



超重核領域における変形度の理論予測不確定性

【4】 冷却フェルミ系における倍周期状態の安定性（中務、渡辺 (APCTP)、Yoon (APCTP)、Dalfvo(トレント大))

光格子にトラップされたフェルミ粒子の冷却原子系における対相関・超流動ダイナミクスを、周期性を取り入れた Bogoliubov-de-Gennes (BdG) 方程式を解くことで研究した。光格子のポテンシャルが距離毎に周期的である場合、通常、固体のバンド計算として良く知られているように、この周期 d に対応するブロッホ波動関数で記述される。しかし、対相関が対ポテンシャルを生み出す場合には、その機構が非線形であるために、ポテンシャルの周期が d ではなく、 $2d$ 、 $3d$ 、 \dots といった d の整数倍の周期のポテンシャルが現れる場合がある。これを倍周期状態と呼ぶ。これまでのボソン凝縮系の研究では、これらの倍周期状態は常にエネルギー的に高く、基底状態には現れないと言われていた。今回、フェルミ粒子系での対相関が比較的弱い BCS 的な状態においては、周期 d の状態よりも、倍周期状態のエネルギーが低くなる可能性を示唆した。また、倍周期状態の安定性を、時間依存 BdG 方程式を解くことで調査し（下図参照）、現在実験が可能となる時間スケールにおいて実現・観測が可能であることを示した。



TDBdG 計算による倍周期状態の安定性の検証。中央の図がユニタリ極限に対応し、左が BCS、右が BEC 側に対応。波動関数の時間発展（縦軸が時間）を表しており、左図は長時間変化しないことを示している。

【5】 リチャードソン模型における集団励起構造(中務、侃(M2))

原子核の励起状態の中で、スピン・パリティが 0^+ の状態の性質には多くの未解決問題が残っている。多重フォノン状態、クラスター状態、対振動状態など、原子核における 0^+ 励起状態は多様な様相を示すが、最近の実験でも、過去の伝統的な解釈を否定する実験データが数多く報告されている。これらのデータの蓄積にも関わらず、まだその本質が理解できていないというのが現状である。

我々は、対相関をもたらす集団的ダイナミクスにこの問題の本質があると考え、厳密解を求めることができる対相関模型（リチャードソン模型）を最初の手がかりとして、この課題に取り組んでいる。厳密解では、対凝縮によって基底状態が対回転スペクトルを生み出すことが示されたが、励起 0^+ 状態に対しては、対回転スペクトルが現れる場合と現れない場合があることが分かった。この違いを生み出す機構を理解するために、厳密解に加えて、準古典的なアプローチを取ることによって、そのダイナミクスを解析した。対回転は、対凝縮したフェルミ系で発現する集団運動（南部・ゴールドストーン・モード）であり、ゲージ空間での回転運動と見なすことができる。このような回転運動が現れるためには、系に対して大局的なゲージ角が定義できる必要があるが、これが励起状態に対して可能になると対回転スペクトルが現れることが分かった。

【6】 3次元空間上の有限振幅法の開発（鷲山、中務）

原子核の励起モードの解析に対相関を含む密度汎関数に基づく準粒子乱雑位相近似法(QRPA)がよく用いられている。ただし、自己無撞着な密度汎関数法に基づく QRPA 計算は大規模な数値計算を必要とする。その要因として、残留相互作用の煩雑な計算、及び、大次元の QRPA 行列の対角化があげられる。これらの要因を回避して効率良く QRPA 計算を実行するために 2007 年に有限振幅法が提案された。有限振幅法では、大規模数値計算となる残留相互作用の計算と QRPA 行列の対角化をあらわに行なうことなく、外場に対する原子核の線形応答モードを記述する。これまで QRPA 計算は 2 次元の軸対称原子核に限られてきたが、本研究では、3次元空間上での有限振幅法 QRPA 計算の数値計算コードの開発を行なった。数値計算コードはほぼ完成し、妥当な計算時間及びメモリ容量での数値計算の実行が可能であることを示した。また、テスト計算としていくつかの軸対称変形原子核のアイソスカラー四重極応答に応用し、先行研究と同様の結果を得た。今後は、非軸対称原子核の励起モード、大振幅集団運動に対する質量パラメータ計算に応用する。

【7】 原子核の二重ベータ崩壊の原子核行列要素（寺崎）

寺崎は五年前に赴任して以来ニュートリノレス二重ベータ崩壊の理論的研究を実施している。その中心的内容は、準粒子乱雑位相近似を用いたその崩壊の原子核行列要素の計算である。その崩壊が観測された場合にニュートリノの質量スケールを決定するために必要な原子核行列要素の信頼できる数値を出すことが目標である。

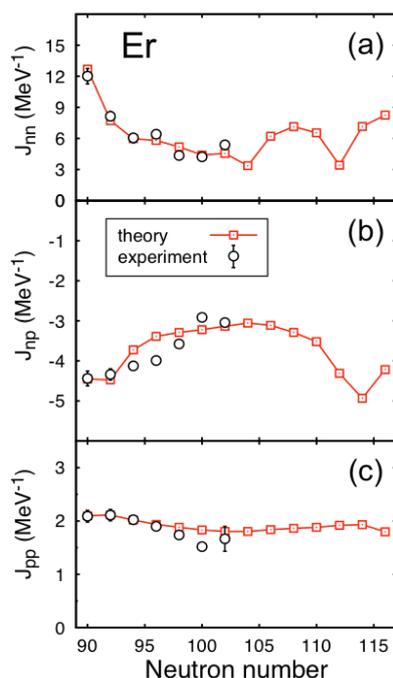
2015 年度は、 ^{150}Nd から ^{150}Sm へのニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素を陽子・中性子準粒子乱雑位相近似 (pnQRPA) を用いて本来の二重ベータ崩壊経路に沿って求め、2014 年度に得ていた、完全性近似のもとで可能な二核子移行経路を用いた原子核行列要素との整合性を研究した。これら二つの原子核行列要素は一致しなければならないが、QRPA アプローチでは、二重ベータ崩壊経路と二核子移行経路では、影響の大きい相互作用が異なるため、任意の相互作用に対して一致を保証することができない。寺崎は、異なる経路による原子核行列要素の一致要請が、不確定性の比較的大きい陽子・中性子対相互作用の強さを決める条件として用いることができるということを見出した。この原理によって求めたアイソスカラー陽子・中性子対相互作用の強さは、ほぼ同種核子間対相互作用の強さの平均値であった。これを用いた二個ニュートリノ二重ベータ崩壊の原子核行列要素は、この崩壊に対する寿命の実験値から求められる半実験値より約 50%大きい、この半実験値を再現するように相互作用の強さを調節する計算を除くと、因子 2 以下のずれは、いい方である。寺崎の方法では、pnQRPA の解は近似がよい範囲にあり、従来の強すぎるアイソスカラー陽子・中性子対相互作用（従来の重複計算方法で二個ニュートリノ二重ベータ崩壊原子核行列要素のフィッティングをすることでこうなる）による pnQRPA の劣化問題が解決される。

寺崎は 2011 年度以来 QRPA を用いた二重ベータ崩壊の研究を行ってきたが、異なる原子核に基づく QRPA 状態の重複を求める際、QRPA 基底状態の波動関数をあらわに用いること、pnQRPA と同種粒子 QRPA の積基底状態波動関数を用いること、そして 2015 年度の、異なる崩壊経路を相互作用に対する拘束条件として用いることの三つが分野にとって大きな意味のある進歩であった。これによって QRPA の適用方法の主要な改良は完結した。

【8】 有限振幅法による南部=Goldstone モードを取り扱う定式化と対回転モードの系統的評価 (日野原、Nazarewicz(ミシガン州立大))

大局的な連続対称性が自発的に破れると対称性を回復させる南部=Goldstone (NG) モードが発生する。有限核では並進対称性やゲージ対称性の破れに伴って重心運動、対回転運動が NG モードとして発生し、そのモードの慣性質量である Thouless-Valatin の慣性モーメントは準粒子乱雑位相近似 (QRPA) によって計算できる。原子核密度汎関数の QRPA を線形応答理論によって解く有限振幅法を座標一運動

量表示で定式化することにより、NG モードの Thouless-Valatin の慣性モーメントおよび NG モードの非自明な座標演算子を応答関数から効率よく計算する方法を確立した。この定式化は重心運動と対回転運動で成立することを数値計算によって確認した。対相関はゲージ対称性の破れをもたらす原子核での代表的な集団的相関であるが、原子核密度汎関数での対密度汎関数の理解はあまり進んでいない。これは対相関と関連のある実験観測量が少ないことが一因である。一般的には対ギャップを奇核と偶核の束縛エネルギー差と対応させて対密度汎関数の結合定数を決めるが、対ギャップは厳密には実験観測量ではないため、これだけから対密度汎関数の詳細を議論することは難しい。先の定式化を用いて、対回転の Thouless-Valatin の慣性モーメントを系統的に評価し、以下の結論を得た（図参照）。1) 対回転の慣性モーメントは対相関の新しい指標となることを提案した。慣性モーメントは偶々核の束縛エネルギーからのみ導出できる測定量であるため密度汎関数の時間反転に対して符号を変える time-odd 項の影響を受けない。2) 対回転の慣性モーメントは偶々核の二重束縛エネルギー差の逆に対応しており、 δ_{2n} 、 δ_{2p} 、 δV_{pn} として知られている二重閉殻付近での一粒子状態の性質を表す量は、超伝導状態では対相関の集団性と関連のある対回転の慣性モーメントとして総合的に理解できることを示した。3) 中性子過剰不安定原子核の対回転の慣性モーメントは対密度汎関数の密度依存性に依存することを指摘した。中性子過剰不安定核の質量測定によって将来的に対相関の詳細が明らかになる可能性がある。4) 中性子、陽子両方の粒子数保存が破れている場合の NG モードは中性子と陽子の混ざったモードになっていることを初めて系統的に示した。



エルビウム同位体基底状態での二次元対回転の慣性モーメントの対角成分 J_{nn} (a), J_{pp} (c) と非対角成分 J_{np} (b).

【9】 非軸対称励起モードを扱う有限振幅法の計算コード構築と希土核双極子巨大共鳴の系統的計算 (日野原、Kortelainen (ユバスキュラ大)、大石(ユバスキュラ大)、Nazarewicz(ミシガン州立大))

原子核密度汎関数理論での準粒子乱雑位相近似(QRPA)は巨大共鳴を始めとする集団励起状態を記述する理論であるが、従来の行列対角化の方法は計算スケールが大きくなるため、二準粒子模型空間のサイズに制限を加える必要がある。QRPAの効率的解法である有限振幅法ではこの模型空間の制限なく計算が可能である。これまでに軸対称調和振動子基底によるHartree-Fock-BogoliubovコードHFBTHOに基づいて有限振幅法を実装してきたが、今回の拡張によって軸対称変形原子核の非軸対称励起モードを計算することが可能となった。一例として、重い軸対称変形原子核の ^{240}Pu の四重極、八重極巨大共鳴が計算できることを示し、また、 ^{154}Sm の低エネルギー集団モードの励起エネルギーおよび遷移強度 $B(E3)$ を以前に開発した複素積分の方法を用いて示した。このコードの開発によって、軸対称変形した原子核のあらゆる多重極モードの効率よい系統的計算が可能となった。

構築したコードを用いて希土類核(Gd-W)の巨大双極子共鳴の系統的計算を行った。巨大双極子共鳴の平均エネルギーとエネルギー幅の多くは計算によって再現できることを示したが、Erより重い原子核ではエネルギー幅にずれがあった。このずれを評価するために密度汎関数の結合定数を変化させ、その依存性を分析した。和則を増大させるThomas-Reiche-Kuhn増大因子を増やすと共鳴エネルギーのピークが高エネルギー側に動くが、遷移の分布にはあまり影響しないことがわかった。実験とのずれの解消のためにはさらなる系統的な密度汎関数の最適化、あるいはQRPAを超えた理論を用いるが今後必要になると考えられる。

【10】 生成座標法による二重ベータ崩壊核行列要素における集団相関の役割の分析 (日野原、Menéndez(東大)、Engel(ノースカロライナ大)、Martínez-Pinedo(ダルムシュタット工科大)、Rodríguez(マドリッド自治大))

変形や対相関といった集団的自由度は原子核基底状態の記述には不可欠であるが、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素に対して集団相関はどの程度関連があるのかを、シェル模型厳密計算が可能なpf殻領域(Ca, Ti, Cr)での二重ベータ崩壊のGamow-Teller核行列要素をシェル模型計算と生成座標法計算によって分析した。KB3G相互作用を用いたシェル模型計算、およびKB3Gから導出した分離型集団ハミルトニアンをシェル模型計算、および同じ分離型集団ハミルトニアンを四重極変形とアイソスカラー型中性子-陽子対振幅を生成座標に用いた生成座標法を比較した。

シェル模型計算同士の比較では分離型集団ハミルトニアンはKB3Gの核行列要素の結果をよく再現し、核行列要素を記述する上でもハミルトニアンの集団相関近似の重要性を示した。さらに、アイソスカラー型対相関を取り入れた生成座標法の結果はシェル模型計算をよく再現した。生成座標法は平均場理論に基づいているため模型空間をシェル模型よりも容易に拡張することができる。そのため、特に集団性が高く厳密なシェル模型計算が困難となる変形中重核領域では今後分離型集団ハミルトニアンを用いた生成座標法計算による核行列要素の評価が強力な手法となりうることを示した。

【11】 Gogny-TDHFB 法による $^{20}\text{O}-^{20}\text{O}$ 正面衝突の計算 (橋本)

原子核の振る舞いを研究するうえで、時間依存平均場の方法は定性的にも定量的にも極めて有用な枠組みとなっている。原子核の基底状態近傍の状態においては対相関が重要な働きをすることが知られているので、中性子過剰核の性質を理解する目的で、TDHFの枠組みを拡張して対相関を扱えるようにした時間依存ハートレーフォックボゴリェボフ (TDHFB) 法の実用的な数値計算が行われるようになってきた。橋本は、調和振動子基底と空間格子としての Lagrange 格子点を組み合わせた基底を利用し、Gogny 力を用いた TDHFB 方程式を解く、という数値計算の方法を整備してきた。今年度は、 $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$ および $^{20}\text{O}+^{34}\text{Mg}$ の正面衝突の計算を行った。この計算で特に着目した点は、1960年代から話題になっている、超流動原子核反応における核子移行機構とジョセフソン効果との対応である。HFB 方程式を解いて得られる超流動原子核では、粒子数演算子の共役量であるゲージ角に関連した不変性があるが、反応時の超流動原子核においては、物理的な量が (相対) ゲージ角に依存すると考えられる。実際の数値計算は、 $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$ において、クーロン障壁頂上付近の軌道を2本 (2個の初期エネルギー) 設定し、また、相対ゲージ角 χ を0度、45度、90度、135度のそれぞれについて、相対距離2.1 fm 離れた点から計算を開始した。この一連の計算により、① 超流動原子核間のポテンシャルエネルギーに相対ゲージ角依存性があり、その“高さ”では0.5 MeV程度、ピーク位置では0.2 fm程度のずれになる、② 対相関エネルギーは相対ゲージ角が90度のときに最小となる、さらに、③ 移行中性子数は、相対ゲージ角の2倍 ($\Phi=2\chi$) の正弦 ($\sin \Phi$) に比例する、ことがわかってきた。③は、ジョセフソン効果と類似である。今後は、粒子数射影法を用いながら、対相関のあるときの核子移行の機構を明らかにするための TDHFB 計算を継続する。

4. 教育

1. 佐藤駿丞、博士（理学）

Time-dependent density functional theory for extremely nonlinear interactions of light with dielectrics

2. 桑原有輝、修士（理学）

時間依存密度汎関数理論による非線形分極の時空間分析

3. 倪 放、修士（理学）

Richardson 模型における集団座標の量子化と 0+集団励起状態の解明

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞

1. 第 10 回日本物理学会若手奨励賞（第 17 回核理論新人論文賞）、

関澤一之、「時間依存密度汎関数法による重イオン多核子移行反応の研究」、2016 年 3 月

2. 筑波大学学長表彰、

佐藤駿丞、“Time-dependent density functional theory for extremely nonlinear interactions of light with dielectrics”、2016 年 3 月 25 日

外部資金

1. 日本学術振興会科学研究費・基盤研究(B)、中務孝、代表、2013-2015 年、5,800,000 円 (H27 年度直接経費)、「原子核の低エネルギー集団励起と核融合・核分裂機構の解明」

2. 科研費・新学術領域研究(研究領域提案型)、中務孝、分担、2012-2016 年、1,000,000 円 (H27 年度直接経費)、「冷却原子を用いた中性子過剰な低密度核物質の状態方程式」

3. JST ImPACT「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」、中務孝、課題責任者、2014-2018 年、6,000,000 円 (H27 年度)、「核構造計算による核反応モデルの高精度化」

4. 科研費 平成 27 年度基盤研究 C、寺崎順、研究代表者、平成 26 年度採択、交付額(直接経費) 1,300,000 円、「QRPA を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素計算」

5. 科研費 平成 27 年度新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」

公募研究、寺崎順、研究代表者、平成 27 年度採択、交付額（直接経費）900,000 円、「原子核行列要素の方法による不一致問題の解決」

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. T. Akahori, Y. Funaki, K. Yabana,
“Imaginary-time formalism for triple-alpha reaction rate”, Phys. Rev. C92, 022801 (2015).
2. K. Sekizawa, K. Yabana,
“Time-dependent Hartree-Fock calculations for multinucleon transfer and quasifission processes in the $^{64}\text{Ni}+^{238}\text{U}$ reaction”, Phys. Rev. C 93, 054616 (2016).
3. Sonika, B.J. Roy, A. Parmar, U.K. Pal, H. Kumawat, V. Jha, S.K. Pandit, V.V. Parkar, K. Ramachandran, K. Mahata, A. Pal, S. Santra, A.K. Mohanty, and K. Sekizawa,
“Multinucleon transfer study in $^{206}\text{Pb}(^{18}\text{O}, x)$ at energies above the Coulomb barrier”, Phys. Rev. C 92, 024603 (2015).
4. S. Yoon, F. Dalfovo, T. Nakatsukasa, and G. Watanabe,
“Multiple period states of the superfluid Fermi gas in an optical lattice”, New J. Phys. 18, 023011 (2016).
5. K. Wen, K. Washiyama, F. Ni, T. Nakatsukasa,
“Time-dependent Density Functional Studies of Nuclear Quantum Dynamics in Large Amplitudes”, Acta Phys. Polo. B. Proc. Suppl. 8, 637 (2015).
6. S. E. Agbemava, A. V. Afanasjev, T. Nakatsukasa, and P. Ring,
“Covariant density functional theory: Reexamining the structure of superheavy nuclei”, Phys. Rev. C 92, 054310 (2015).
7. S. Ebata and T. Nakatsukasa,
“Repulsive aspects of pairing correlation in nuclear fusion reaction”, JPS Conf. Proc. 6, 020056 (2015).
8. W. Horiuchi, T. Inakura, T. Nakatsukasa, and Y. Suzuki,
“Systematic analysis of total reaction cross sections of unstable nuclei with Glauber theory”, JPS Conf. Proc. 6, 030079 (2015).
9. K. Sato, J. Dobaczewski, T. Nakatsukasa, and W. Satula,

- “Mean-field calculation based on proton-neutron mixed energy density functionals”, JPS Conf. Proc. 6, 020051 (2015).
10. K. Matsuyanagi, M. Matsuo, T. Nakatsukasa, K. Yoshida, N. Hinohara, K. Sato,
“Microscopic derivation of the quadrupole collective Hamiltonian for shape coexistence/mixing dynamics”, J. Phys. G 43,024006 (2016).
11. J. Terasaki
“Two decay paths for calculating the nuclear matrix element of neutrinoless double- β decay using quasiparticle random-phase approximation”, Phys. Rev. C 93, 024317 (2016)
12. J. Terasaki
“Many-body correlations of QRPA in nuclear matrix elements of double- β decay” AIP Conf. Proc. 1686, 020025 (2015).
13. N. Hinohara, M. Kortelainen, W. Nazarewicz, E. Olsen,
“Complex-energy approach to sum rules within nuclear density functional theory”, Phys. Rev. C 91, 044323 (2015)
14. N. Hinohara,
“Collective inertia of the Nambu-Goldstone mode from linear response theory”, Phys. Rev. C 92, 034321 (2015)
15. M. Kortelainen, N. Hinohara, W. Nazarewicz,
“Multipole modes in deformed nuclei within the finite amplitude method”, Phys. Rev. C 92, 051302(R) (2015)
16. J. Menéndez, N. Hinohara, J. Engel, G. Martínez-Pinedo, T. R. Rodríguez,
“Testing the importance of collective correlations in neutrinoless $\beta\beta$ decay”, Phys. Rev. C 93, 014305 (2016)
17. T. Oishi, M. Kortelainen, N. Hinohara,
“Finite amplitude method applied to the giant dipole resonance in heavy rare-earth nuclei”, Phys. Rev. C 93, 034329 (2016)
18. N. Hinohara and J. Engel,
“Effect of Fluctuations of Quadrupole Deformation and Neutron-Proton Correlations on Double-Beta Decay Nuclear Matrix Element”, JPS Conf. Proc. 6, 020034 (2015)
19. Y. Hashimoto,
“Hartree-Fock and time-dependent Hartree-Fock calculations with the Gogny

interaction using a Lagrange mesh”, INFORMATION Vol. 18(2015), 2219 - 2232.

B) 査読無し論文

1. 倪 放、“対相関模型における 0^+ 集団励起状態の解明”、原子核研究 2016 夏の学校特集号、Vol. 60、Suppl. 1、pp. 69-71 (2016)

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. K. Yabana,
“Time-dependent Hartree-Fock calculations for multi-nucleon transfer and quasi-fission processes”, The 12th Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions, Catania, Italia, June 21-26, 2015,
2. T. Nakatsukasa,
“Recent activities in the time-dependent density-fuinctional theory”, 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (JCNP2015), Ibaraki, Japan, Nov. 7-12, 2015.
3. T. Nakatsukasa,
“Isospin invariant energy density functional and its applications”, 2015 SKLTP-BLTP Joint Workshop on Physics of Strong Interaction, Guillin, China, Oct. 29 - Nov. 3, 2015.
4. T. Nakatsukasa,
“TDDFT studies of nuclear quantum dynamics in small and large amplitudes”, XXII Nuclear Physics Workshop “Marie & Pierre Curie”, Kazimierz-Dolny, Poland, Sep. 22-27, 2015.
5. T. Nakatsukasa,
“Problems associated with the symmetry breaking”, Progress in and beyond Theoretical Nuclear Physics Laboratory, Wako, Japan, Mar. 28, 2016.
6. J. Terasaki,
“Proton-neutron pairing correlations in double- β decay”, 2nd International Workshop & 12th RIBF Discussion on Neutron-proton Correlations, Hong Kong, P. R. China, Jul. 6-9, 2015.
7. N. Hinohara,

“Isospin Invariant Density Functional Theory”, 2015 Gordon Research Conference on Nuclear Chemistry “Confluence of Structure and Reactions”, Colby-Sawyer College, New London, NH, USA, May 31-Jun. 5, 2015.

8. N. Hinohara,

“Neutron-proton pairing fluctuations and double-beta decay”, 2nd International Workshop & 12th RIBF Discussion on Neutron-Proton Correlations, Univ. of Hong Kong, Hong Kong, Jul. 6-9, 2015.

9. Kai Wen,

“The inertial mass of nuclear collective motion derived by the adiabatic self-consistent collective coordinate(ASCC) method”, SKLTP-BLTP Joint Workshop on Physics of Strong Interaction in Guilin, China. Oct. 29-Nov. 3rd, 2015.

B) 一般講演

1. J. Terasaki,

“Effects of nuclear many-body correlations on neutrinoless double- β decay in quasiparticle random-phase approximation”, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015), Nara, Japan, Nov. 4-9, 2015.

2. J. Terasaki,

“Many-body correlations of QRPA in nuclear matrix elements of double- β decay” 10th MEDEX'15 Meeting (Matrix Elements for the Double- β -decay Experiments), Prague, Czech, Jun. 9-12, 2015.

3. N. Hinohara,

“QRPA sum rules within the finite-amplitude method”, Nuclear Computational Low-Energy Initiative Collaboration Meeting (NUCLEI2015), Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA, Jun. 10-13, 2015.

4. N. Hinohara, J. Engel,

“Generator coordinate method with proton-neutron pairing coordinates and evaluation of double-beta decay nuclear matrix elements”, Nuclear Structure and Dynamics III, Portorož, Slovenia, Jun. 14-19, 2015.

5. N. Hinohara,

“Generator Coordinate Method with Proton-Neutron Pairing Amplitudes”, The future of multi-reference Density Functional Theory, Univ. of Warsaw, Poland, Jun. 25-26, 2015.

6. N. Hinohara,
“Collective modes and sum rules within nuclear density functional theory”,
YITP Long-term workshop “Computational Advances in Nuclear and Hadron
Physics” (CANHP2015), YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, Sep. 21-Oct. 30, 2015
7. N. Hinohara,
“Recent development of finite-amplitude method for nuclear collective
excitation”, Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science
(QUCS2015)’, Nara, Japan, Nov. 4-8, 2015
8. K. Washiyama,
“Microscopic Description of Fusion Hindrance in Heavy Systems”, 5th
International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide
Elements (TAN15), Urabandai, Japan, May 25-29, 2015

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 中務 孝、
“原子核構造における自発的対称性の破れ”、日本物理学会第 72 回年次大会シン
ポジウム、東北学院大学、仙台、2016 年 3 月 19-22 日
2. 鷺山広平、
“低エネルギー重イオン反応の最前線と微視的反応模型”、KEK 理論センター研究
会「原子核・ハドロン物理の課題と将来」、KEK、2015 年 11 月 24-26 日
3. 関澤一之、
“時間依存密度汎関数法による重イオン多核子移行反応の研究”、日本物理学会
第 71 回年次大会 若手奨励賞受賞記念講演、東北学院大学泉キャンパス、2016 年 3
月 20 日
4. 関澤一之、
“TDHF の現状と新しい反応機構”、日本物理学会 2015 年秋季大会 実験・理論核
物理領域合同シンポジウム“重イオン深部非弾性散乱の基礎と応用”、大阪市立大学
杉本キャンパス、2015 年 9 月 25 日

B) その他の発表

1. Kai Wen, 中務 孝、
“ ^8Be の崩壊経路と集団質量”、日本物理学会第 72 回年次大会、東北学院大学、仙
台、2016 年 3 月 19-22 日

2. 中務 孝、
“核構造計算による核反応モデルの高精度化”、ImPACT 藤田プログラム全体会議、JST 別館、東京、2016 年 3 月 24 日
3. 寺崎 順、
“QRPA を用いた原子核行列要素計算の理論的一貫性”、日本物理学会 2015 年度秋季大会、大阪市、2015 年 9 月 25 日
4. 寺崎 順、
「QRPA を用いた ^{48}Ca のニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素計算」
日本物理学会第 71 回年次大会、仙台市、2016 年 3 月 22 日
5. 日野原伸生、
“密度汎関数理論における巨大共鳴と和則”、アイソスカラー型単極遷移で探る原子核の励起状態とクラスター構造、大阪大学核物理研究センター、2015 年 7 月 16-17 日
6. N. Hinohara,
“Binding-energy differences and pairing Nambu-Goldstone modes”, Nuclear Theory Seminar, National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA, Jan. 26, 2016
7. N. Hinohara,
“Pairing Nambu-Goldstone modes and binding energy differences within nuclear density functional theory”, Nuclear Physics Seminar, Department of Physics, Univ. of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland, Mar. 15, 2016
8. 橋本幸男、
“Gogny-TDHFB による $^{20}\text{O} + ^{20}\text{O}$ の計算における相対位相の効果”、
日本物理学会第 71 回年次大会（平成 28 年 3 月 19~22、東北学院大学）
9. 鷺山広平、
“重い反応系における核融合阻害現象の微視的解析 II”、日本物理学会秋季大会、
大阪市立大学、2015 年 9 月 25-28 日
10. 鷺山広平、
“Microscopic analysis of fusion hindrance in heavy nuclear systems”、
RCNP セミナー、大阪大学核物理研究センター、2015 年 10 月 5 日
11. 鷺山広平、
“3 次元空間上の有限振幅法 QRPA 計算”、
日本物理学会年次大会、2016 年 3 月 19-22 日
12. 倪 放、中務 孝、

“ 0^+ 対励起状態を記述する集団座標の量子化”、日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月。

13. 倪 放、中務 孝、
“リチャードソン模型における 0^+ 集団励起状態の解明”、日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学、2015 年 9 月
14. 倪 放、
“対相関模型における 0^+ 集団励起状態の解明”、2015 年度原子核三者若手夏の学校、ホテルたつき、2015 年 8 月
15. 倪 放、
“対相関模型における 0^+ 集団励起状態の解明”、RCNP 研究会—アイソスカラー型単極遷移で探る原子核の励起状態とクラスター構造、大阪大学核物理研究センター、2015 年 7 月
16. 柏葉 優、中務 孝、
“中性子星 inner crust 核物質における密度汎関数計算”、「低密度領域の EOS」研究会、東京大学、2016 年 2 月 27 日
17. 柏葉 優、中務 孝、
“中性子星 inner crust 核物質における密度汎関数計算”、日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学、2016 年 3 月 19-22 日

(4) 著書、解説記事等

1. 中務 孝、“物質を構成する原子核”、自動車技術会関東支部報「高翔」、2016 年 1 月号 (No. 65), pp. 32-35.
2. 中務 孝、“放射化学の事典” (一部を執筆)、朝倉書店、2015 年 9 月。

7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

【国際連携】

1. ポーランド・ワルシャワ大学の原子核理論グループと共同で、オープンソースコード HFODD をアイソスピン不変なエネルギー密度汎関数へ適用する拡張に取り組んでいる (中務)。
2. 韓国・APCTP およびイタリア・トレント大学の冷却原子系理論グループと、1 次元周期ポテンシャル中のフェルミ粒子系の超流動状態に関する共同研究を行っている (中務)。
3. 米国・ミシシッピ州立大学と、エネルギー密度汎関数の不定性に関する共同研究を行っている (中務)。

4. 米国ノースカロライナ大学の Engel 教授と二重ベータ崩壊の核行列要素に関する共同研究（日野原）
5. 米国ミシガン州立大学 Nazarewicz 教授およびフィンランド・ユバスキュラ大学の Kortelainen 研究員、インド・カシミア大学 Sheikh 教授と原子核密度汎関数の諸問題に関する共同研究、オープンソースコード HFBTHO への有限振幅法の実装とアイソスピン不変な汎関数への拡張（日野原）
6. 低エネルギー重イオン反応に関する国際共同研究
時間依存平均場理論に基づく低エネルギー重イオン反応の研究に関し、ワルシャワ工科大学の理論グループ（P. Magierski 教授、G. Wlazłowski 博士）、インド BARC の実験グループ（B. J. Roy 教授、他）、オーストリア国立大学の理論・実験グループ（C. Simenel 博士、他）、イタリアレニャーロ原子核物理研究所の実験グループ（L. Corradi 教授、他）、東北大学の理論研究者（G. Scamps 博士）と、国際共同研究を推進している（関澤）

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 第 14 回国際サマースクール CNSSS15 (RIKEN, Aug. 26 - Sep. 1, 2015)（中務）。
2. Long-term workshop on Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (Kyoto, Japan, Sep. 21-Oct. 30, 2015)の国際諮問委員を務めた（中務）。

9. 管理・運営

矢花一浩

センターの共同研究担当主幹として、当センターの全国共同利用業務である学際共同利用プログラムの運営を統括した。また、数理物質系物理学域長・数理物質科学研究科物理学専攻長、数理物質系広報委員長などを務めた。

中務 孝

計算科学研究センター 原子核物理研究部門 部門主任

計算科学研究センター 運営委員会委員

計算科学研究センター 人事委員会委員

計算科学研究センター 運営協議会委員

計算科学研究センター 共同研究委員会委員

計算科学研究センター 学際計算科学連携室員

数理物質系物理学域 運営委員会委員

数理物質系物理学域 原子核理論グループ長
数理物質系物理学域 図書委員長
理化学研究所・中務原子核理論研究室 准主任研究員（兼務）
核理論委員会委員
日本物理学会 理論核物理領域・領域副代表
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・運営会議議員
雑誌「原子核研究」編集委員
文部科学省 HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」運営委員
日本原子力研究開発機構 黎明研究評価委員会委員
日本原子力研究開発機構 タンデム専門部会委員

寺崎 順

文部科学省 HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」中の計算機ユーザーのプログラミング支援活動において連絡係を務めた。

10. 社会貢献・国際貢献

中務 孝

理化学研究所一般公開(2015. 4. 18)において講演「量子力学と原子核」
物理チャレンジ 2015・フィジックスライブ(2015.08.21)において
講演「元素・原子核と量子の世界」
カナダ・TRIUMF 国際プログラム諮問委員会(SAP-EEC)委員
Editor for Journal of Physical Society of Japan
Editor for International Journal of Modern Physics E

11. その他

海外長期滞在

- 1) 日野原 伸生, National Superconducting Cyclotron Laboratory,
Michigan State Univ., East Lansing, MI, USA, 2015 年 4 月 1 日～2016 年
3 月 31 日(次年度に継続)

長期ビジター

- 1) Anatoli Afanasjev 氏 (ミシシッピ州立大学・米国)、
2015. 6. 22-2015. 8. 16、学振・外国人招へい研究員 (受入研究者: 中務)