

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）
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（2017.1 転出）、鷺山広平、野村昂亮（PD 学振）、Guillaume Scamps（2016.10 着任）
学生	大学院生 5 名（うち特別研究学生 1 名）、学類生 1 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。本部門のメンバーは、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 】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、断熱自己無撞着集団座標法 (Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate Method: ASCC 法) を我々は提唱しており、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る。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最適な反応経路を導出する研究を実施した。虚時間発展法と有限振幅法を組み合わせた反復法を用いて、今年度は、アルファ粒子と酸素（融合核：ネオン）と、酸素・酸素（融合核：硫黄）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。図 1 に前者の融合反応に対して求められた密度分布の変化を示す。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を完全微視的に決定し、低エネルギー・サブバリア領域における融合断面積を計算することに成功した。

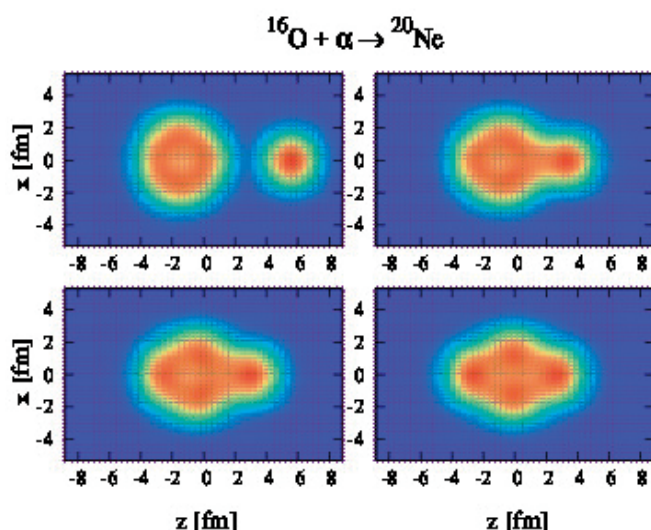


図1: $^{16}\text{O} + \alpha \rightarrow ^{20}\text{Ne}$ の核融合経路上の 4 点における密度分布 (x - z 平面)

【 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 (大阪市大)、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

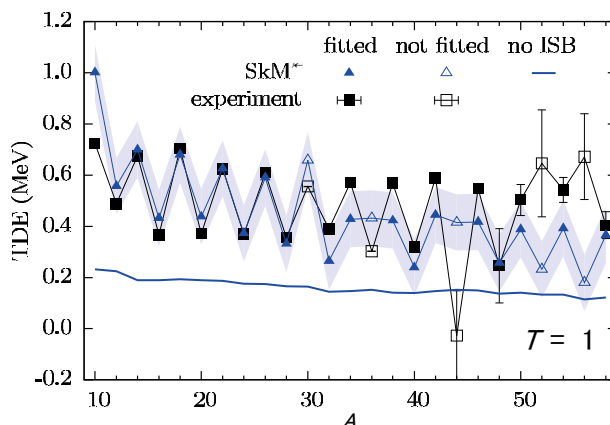


図2: Triple displacement energy (TDE)と呼ばれるアイソスピン対称性の破れの指標。明示的に破る項を入れない場合が実線、入れた結果が三角で示されている。

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、アイソスピン対称性の破れに関する昨年の解析をさらに詳細に実施し (図 2)、破れを記述するために新たに導入したエネルギー汎関数が、核子・核子散乱の散乱長における対称性の破れの大きさと無矛盾であることを明らかにした。

また、いくつかの実験で測定された原子核質量のデータについて、理論計算の値と大きなズレが見つかり、再測定の必要性を提唱した。

【 3 】対振動状態における集団座標(中務、倪(D1))

原子核の励起状態の中で、スピン・パリティが 0^+ の状態には対振動状態と解釈される状態が存在する。これは、ゲージ対称性を破る秩序パラメータであるエネルギー・ギャップの大きさが揺らぐ(振動する)集団的状态であると解釈されてきた。しかし、その性質にはまだまだ未解決な点が多い。

我々は、対相関がもたらす集団的ダイナミクスを記述するため、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)に対して、ASCC法を用いて集団座標を微視的・非経験的に決定した。これにより、これまで仮定されていたギャップ・パラメータを集団座標として扱うことには問題が多く、それとは全く異なる集団座標が導出されることを示した。これは、過去の多くの解析の問題点を指摘するものであり、重要な成果であると言える。

【 4 】中性子星内殻における1次元周期構造の密度汎関数計算(中務、柏葉(M2))

中性子星の内殻(インナー・クラスト)と呼ばれる表面に近い領域では、中性子の海の中に原子核が周期的に配置された構造を取ると予想されている。中心に近づいていくと、やがて一様な核物質になると考えられるが、その直前には、パスタ相と呼ばれる奇妙な形の原子核が現れると考えられている。その中でも、スラブ相(ラザーニャ相)と呼ばれる板状の原子核が現れる領域があると予想されており、今回、このスラブ相に対して、厳密な境界条件を考慮した完全自己無撞着な密度汎関数計算を実行することに成功した。周期的なポテンシャルに対するブロッホ波動関数は固体のバンド計算で良く知られているが、これと同じ計算を中性子星物質スラブ相について行った。固体のバンド計算では、原子核(イオン)によって作られた周期的ポテンシャル中の電子の波動関数を求めるわけだが、原子核では周期的ポテンシャル自体、核子(陽子・中性子)の自己無撞着ポテンシャルとして与えられ、核子運動の自由度だけから自発的に現れた周期性である。これまで、このような計算を自己無撞着に行った例はなく、世界初の成果である。

【 5 】対相関の精密化(日野原)

平均場近似では対相関はゲージ対称性の自発的破れをもたらし、対回転モードと呼ばれる対称性を回復させるゼロエネルギーの南部=Goldstone(NG)モードが、超伝導原子核の準粒子乱雑位相近似(QRPA)解として現れる。昨年度に我々は対回転の慣性モーメントが原子核の対

相関の性質を反映する指標として優れていることを指摘した。従来の対相関の指標は対ギャップであり、これを奇核と偶核の束縛エネルギー差(OES)の実験値に対応させ、対相関の性質を議論してきた。しかし、対ギャップが実験観測量ではないことや、対ギャップ、OES それぞれの定義が一意ではないこと、OES に含まれる時間反転に対して符号を変える項の理解が進んでいないことにより、対相関の詳細な性質のみを OES から抜き出すのは難しく、それゆえに対密度汎関数としては最も簡単な形と密度依存性しか考慮されておらず、対密度汎関数の精密な議論は進んでいなかった。対回転の慣性モーメントを指標に用いることで、これらの問題を回避し、理論と観測値の直接的な比較が可能となり、対密度汎関数の理解も深めることが可能となる。まずは、Skyrme 型の有効相互作用には存在するが、通常対相互作用では考慮されていない対密度の空間微分項(運動量依存項)依存性を調べた。錫と鉛の同位体で対密度の空間微分項の結合定数を変えながら対回転の慣性モーメントを系統的に計算し、実験値を系統的に再現するためには、この対密度の空間微分項が重要であることを示した。将来、原子核密度汎関数の結合定数を、実験データを用いて最適化する際には、対回転の慣性モーメントが有用であると言える。

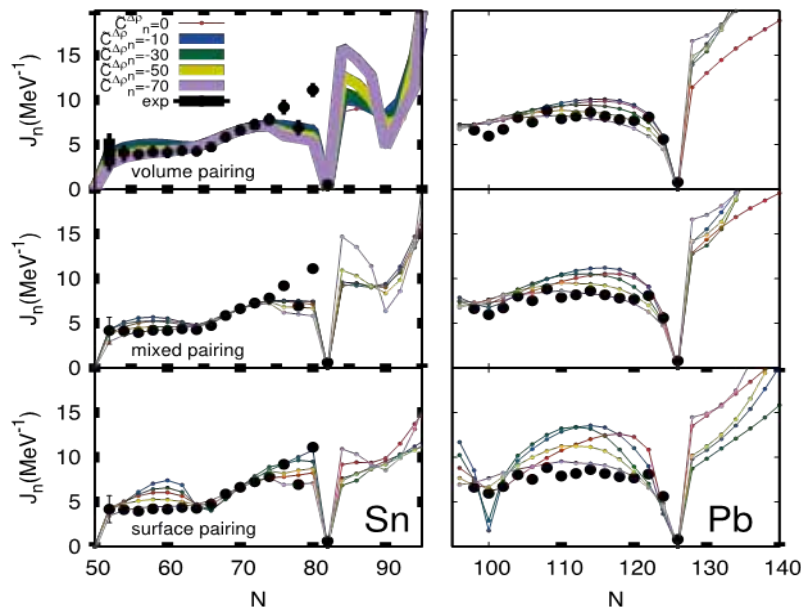


図3: 錫と鉛の同位体での対回転の慣性モーメントの対密度の空間微分項依存性

【 6 】一般化された原子核密度汎関数での Thouless の定理の証明 (日野原)

エネルギー重率和則に関する Thouless の定理ではハミルトニアンと遷移演算子の二回交換関係によって、本来すべての励起状態の足し上げが必要となる和則を基底状態の期待値と

結びつけることができるため、QRPA の計算コードのチェックや、巨大共鳴の情報の抽出に大変有用である。原子核密度汎関数理論でも Thouless の定理は有効であることは広く知られていたが、従来の定理の証明ではハミルトニアンを用いるため、ハミルトニアンが存在しない原子核密度汎関数理論の場合には厳密には定理の適用の範囲外であった。ハミルトニアンとは対応がない一般化された原子核密度汎関数の場合において、Thouless の定理をハミルトニアン演算子を使うことなく証明し、定理の証明を行った。汎関数の局所ゲージ不変性が保たれている場合は従来の Thouless の定理が適用可能であるが、これが破れている場合は対称性の破れに起因する項が発生することを示した。また有限振幅法の複素積分の方法によって和則を計算し、局所ゲージ対称性が破れている場合においても拡張された定理が有効であることを数値的に示した。

【 7 】 超流動原子核の衝突における摩擦係数の評価（橋本）

原子核内に存在する核子（陽子・中性子）の間には、対相関と呼ばれる、2 つの核子を対に組むような相関が存在することが知られている。対相関を考慮して微視的に原子核の反応を記述するため、時間依存密度汎関数法に対密度を導入した time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov (TDHFB) 法が用いられる。これまでに、ラグランジュ格子と調和振動子基底を組み合わせたハイブリッド基底を用いた TDHFB コードを開発し、その有効性を実証した。今回、その計算コードを超流動球形原子核 ^{20}O 同士の正面衝突 $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$ に応用し、微視的な計算である TDHFB 法から巨視的な摩擦項に用いられる摩擦係数を抽出し、その初期衝突エネルギー依存性を明らかにした。先行研究として TDHF に基づいた計算があるが、対相関を含んだうえでの摩擦係数の導出は本研究の結果が初めてとなる。一連の計算によって以下の結果を得た：摩擦係数は、クーロン障壁近傍 1 MeV くらいのエネルギーでの衝突の際には他のエネルギー領域に比べて大きく、同時に、移行エネルギー量も大きくなる。一方、この近傍領域を越えて衝突のエネルギーを 10 MeV にわたって増加させると、摩擦係数は急速に小さくなり衝突のエネルギーにあまり依存しないようになる。摩擦係数についての、この衝突エネルギー依存性は、定性的には以下のように理解できる：クーロン障壁近傍においては衝突速度が低下するので核間のエネルギー移動が（比較的）長い時間にわたり行われる

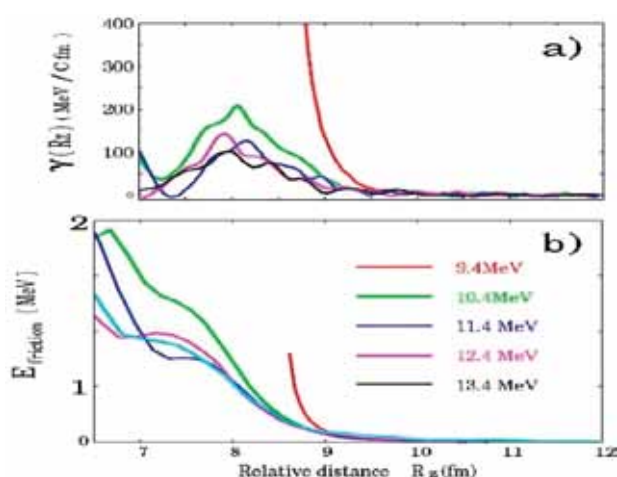


図4: a):酸素20原子核間の相対距離と摩擦係数、b):散逸したエネルギーと相対距離の関係をそれぞれ示す。

ので、強い摩擦となって現れる。一方、衝突エネルギーの増加に伴い、エネルギー移動に関わる時間が減少するので、摩擦は弱くなる。実際には、どの衝突エネルギー領域でも衝突直後から対相関エネルギーが急速に減少するので、その効果を明らかにするために、さらに精密な計算が必要である。

【 8 】 3 次元空間上の有限振幅法の開発（鷲山、中務）

質量数 100 前後の原子核では、低励起エネルギー領域で複数の変形状態が共存したり、陽子数・中性子数の変化に対し基底状態や低励起状態が急激な構造変化を示したりすることが知られている。このような原子核を大振幅集団運動の観点から理解するために我々は自己無撞着な密度汎関数法による四重極集団模型の構築を目指している。その集団ハミルトニアンに現れる集団質量を密度汎関数法に基づく準粒子乱雑位相近似(QPRA)法で評価するには非軸対称変形核に対する QRPA 計算が必要である。これが大規模数値計算となるため、これまでの QRPA 計算は軸対称原子核への応用に限られてきた。近年、大規模数値計算の要因である残留相互作用の計算及び大次元の QRPA 行列要素の計算と対角化を回避して QRPA 計算を実行できる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 行列の対角化を露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。

本研究では、昨年度に引き続き 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。まず、有限振幅法より得られた強度関数と和則の分析から数値計算コードの修正を行ない、和則を満たすようにコードの改良を行なった。次に、一粒子波動関数の保持する対称性の分析からコードの計算量の削減を行ない、およそ 30% 程度数値計算量を減らすことが出来た。また、非軸対称原子核 ^{110}Ru ($\beta=0.31$, $\gamma=20^\circ$) の単極応答、及び、アイソスカラー四重極応答に応用し、強度関数と和則の計算を行ない、強度関数が和則を満たすことを示し、四重極演算子のそれぞれの z 成分に対する強度関数の分離を得た。今後は大振幅集団運動に対する質量パラメータ計算を行ない、集団ハミルトニアンの構築を目指す。

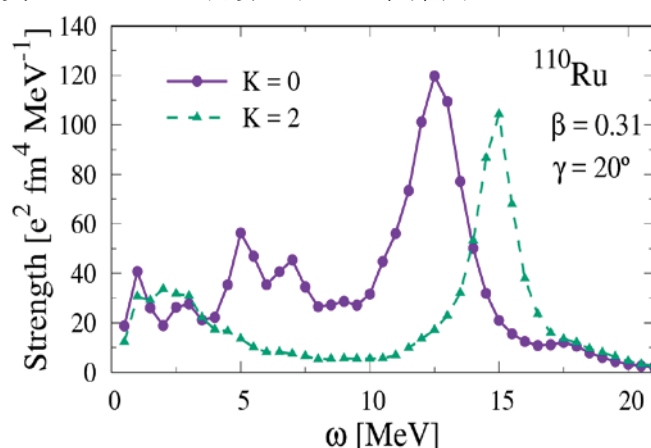


図5: 非軸対称核 ^{110}Ru の四重極振動に対する強度関数

【 9 】重陽子—原子核全反応断面積の公式化（鷲山、養茂（阪大）、緒方（阪大））

重陽子—原子核弾性散乱は様々な分野で重要な基礎的反応過程であり、断面積評価のための汎用公式がいくつかある。それらは巨視的な反応モデルを基に比較的狭いエネルギー領域に適用範囲が限られている。本研究では、広範囲のエネルギーにおける断面積の微視的な評価及びその少数パラメータによる公式化を行なった。さらに、放射線施設や医療機関などで広く用いられる粒子輸送コード PHITS にこの公式を提供する目的で研究を行なった。全反応断面積の計算には重陽子の分解反応を考慮した連続状態離散化結合チャンネル法を採用し、重陽子—原子核間ポテンシャルは微視的な畳み込み模型を用い、原子核の密度分布は微視的な密度汎関数法で評価した。そして、この方法で得られた 15 の原子核に対する全反応断面積を重陽子の入射エネルギー($10\text{MeV} < E < 1000\text{MeV}$)、原子核の陽子数、核子数の関数で公式化した。この関数は既存の実験データを再現し、以前に提案された汎用公式よりも高精度で広範囲に適用可能な反応断面積公式を得た。この公式は粒子輸送コード PHITS にも既に組み込まれており、広く使われ始めている。

【 10 】奇核の分光学的性質に関する研究（野村、Vretenar（ザグレブ大学）、Niksic（ザグレブ大学））

エネルギー密度汎関数理論と particle-core coupling の枠組みに基づいて、陽子・中性子いずれかが奇数の核種（奇核）の分光学的性質を計算するための方法を新たに開発した。この方法では、偶偶核コアのポテンシャルエネルギー面、unpaired particle の single-particle energy と occupation probability を相対論的密度汎関数に基づいた平均場モデルで計算し、それらを微視的インプットとして particle-boson-core coupling のハミルトニアンを決定した。軸対称変形した奇核種 Eu および Sm 同位体にこの方法を適用し、低エネルギー励起スペクトルおよび電磁遷移強度の実験値を再現することができた。希土類領域の偶偶核では、中性

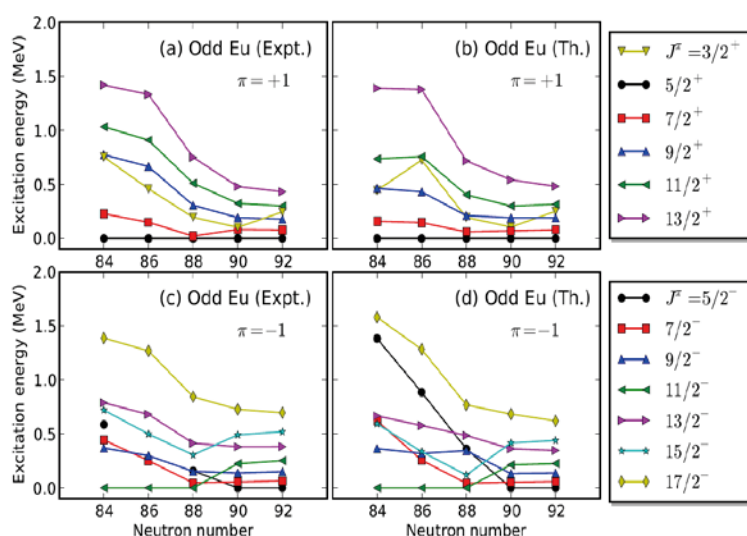


図6: 奇核 Eu 同位体の正負パリティ低エネルギー励起スペクトルの遷移

子数 90 近傍において球形から軸対称変形への形状相転移が良く知られているが、本研究において、unpaired fermion の形状相転移に与える影響を解析した。変形、励起エネルギー、電磁遷移などの物理量を計算し、それらの値が中性子数の増減によって急激に変化することを示すことで、偶偶核において見られるのと同様の形状相転移が奇核系でも発現することを明らかにした。

【 11 】 質量数 100 近傍の中性子過剰核における形状相転移と変形共存（野村、Rodriguez-Guzman（クウェート大学）、Robledo（マドリッド自治大学））

Gogny 型密度汎関数に基づいて相互作用するボソン模型ハミルトニアンを導く方法を用いて、近年実験的理論的に大きな注目を集めている、質量数 100 近傍の中性子過剰 Ru, Mo, Zr, Sr 同位体における形状進化の記述を行った。この方法では、Gogny-D1M HFB 計算でまず 4 重極変形空間でのポテンシャルエネルギー面を計算し、それをボソン模型ハミルトニアンの内部固有状態での期待値に写像することで、これらの原子核の集団励起状態を記述するためのボソンハミルトニアンのパラメータを決定した。主要な結果は、Ru および Mo 原子核において gamma 不安定な構造が多く見られること、Zr および Sr においてプロレートオブレート変形共存を示唆したことである。励起エネルギーや電磁遷移強度などの分光学的性質の実験値との良い一致が得られ、実験に先駆けた理論的予言も行った。

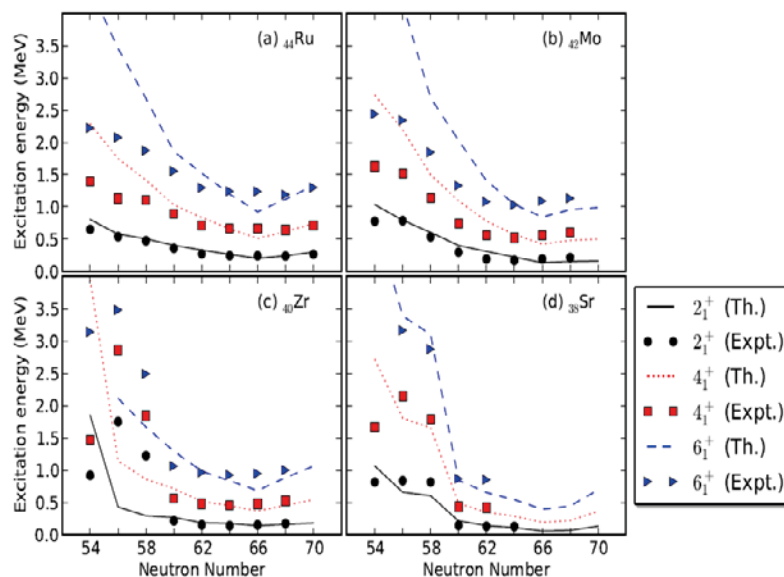


図7: 偶偶核 Ru, Mo, Zr, Sr 同位体の低励起状態の遷移

【 12 】 Pair transfer probabilities obtained by projection method (Scamps、橋本)

We developed a projection method to determine the transfer probabilities in reactions at energies lower than the barrier. This method works also for time-dependent Hartree-Fock Bogoliubov (TDHFB) method with two superfluid fragments. In that case, both fragments break the particle number symmetry, then we have to project on the good number of particles in both fragments. We tested this method on a simple toy model. This model improves the comprehension of the nuclear Josephson effect and the fluctuation of the fusion barrier in collisions between two superfluid fragments. One article is in preparation on that subject.

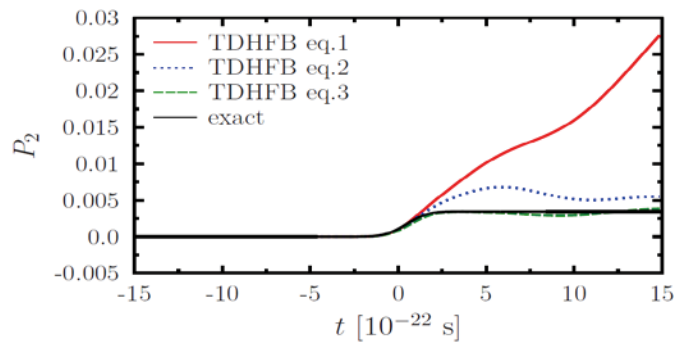


図8: Pair transfer probability as a function of time with several prescriptions of the TDHFB equations compared to the exact solution

【 13 】 Effect of pair transfer on fusion reactions using coupled channel methods (Scamps、萩野 (東北大))

We improved the phenomenological description of the transfer and fusion reaction with the coupled channel method. In a precedent study, it was shown that it was not possible to simultaneously describe the fusion cross section and the transfer probabilities. By taking into account different collective states after the neutron pair transfer in the coupling scheme, we improved the simultaneous description of the $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$ and $^{40}\text{Ca}+^{64}\text{Ni}$ experimental data.

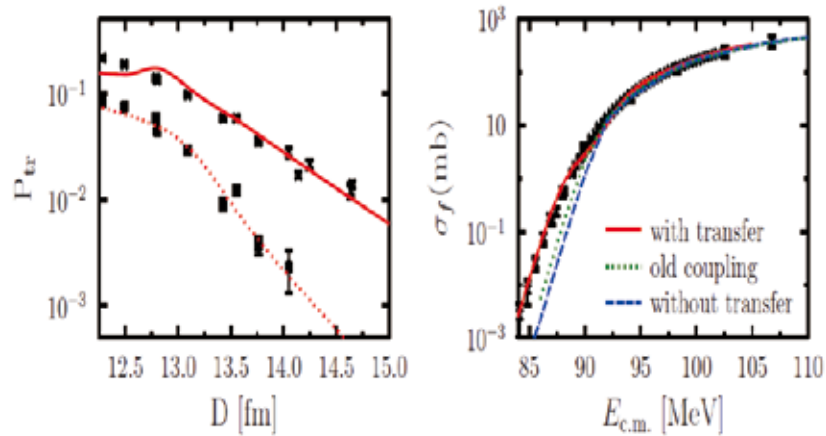


図9: (Left) Transfer probabilities for the reaction $^{40}\text{Ca}+^{96}\text{Zr}$, the experimental data for one-neutron (crosses) and two-neutron (square) are compared to coupled-channels calculations (solid line for 1n and dotted line for 2n). (Right) : fusion cross section from the experimental data (dashed blue line) compared to the coupled-channels calculation of ref. [G. Scamps and K. Hagino, Phys. Rev. C 92, 054614 (2015)] (dotted green line) and the present calculation (solid red line)

【 14 】 Description of the excitation energy using the time-dependent Hartree-Fock + BCS theory (Scamps, Lacroix (IPNO, CNRS/IN2P3), Rodriguez (GANIL) and Farget (GANIL))

In collaboration with an experimental group, C. Rodriguez and F. Farget at GANIL, we developed a method to determine the excitation energy as a function of the center of mass energy in a given transfer channel. We used the time-dependent Hartree-Fock+BCS method to determine the transfer probabilities and the average excitation energy. The method is applied to the reaction involving a ^{238}U beam on a ^{12}C target, which has recently been measured at GANIL. It is shown that the excitation energy calculated with the microscopic theory compares well with the experimental observation, provided that the competition with fusion is properly taken into account.

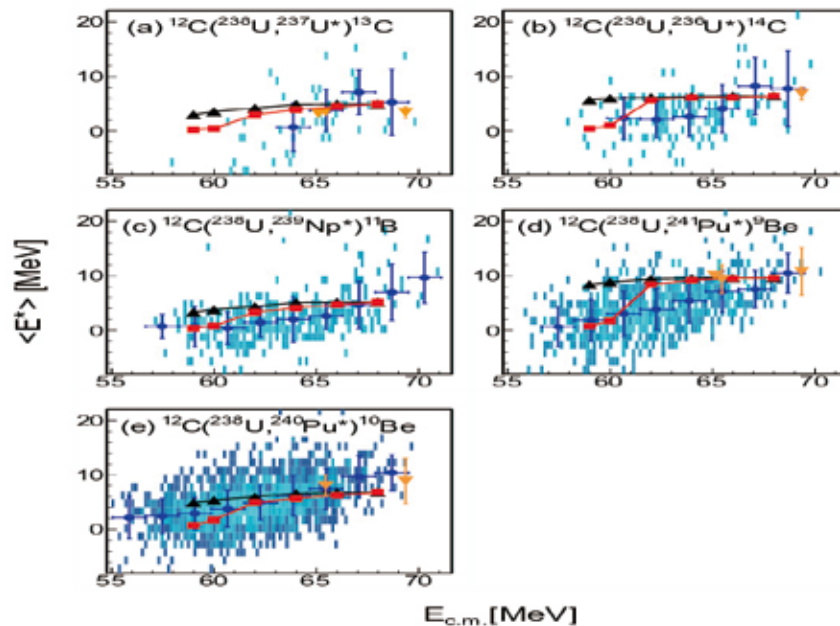


図10: Average excitation energy as a function of the center of mass energy for the main channels observed experimentally: experimental data (blue dots), TDHF + BCS results (black triangles), TDHF + BCS results where the excitation energy has been shifted by 3 MeV (red squares), and the HIPSE results (orange down triangles). In the latter case, error bars correspond to the widths of the calculated distributions. The superimposed blue (gray) areas correspond to the experimental event-by-event distributions of the excitation energy.

4. 教育

1. 柏葉優、修士（理学）、「中性子星内殻におけるスラブ相に対する完全自己無撞着計算」

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

【1】 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[期間延長]、1,763,592 円 (H28 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 (H28 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 (H28 年度)、「核構造計算による核反応モデルの高精度化」
4. 日本学術振興会科学研究費・若手研究(B)、日野原 伸生、代表、2016-2019 年、2016 年度直接経費 900, 000 円、「中性子-陽子対相関・対凝縮の解明」

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. K. Matsuyanagi, M. Matsuo, T. Nakatsukasa, K. Yoshida, N. Hinohara, and K. Sato,
“Microscopic derivation of the Bohr– Mottelson collective Hamiltonian and its application to quadrupole shape dynamics”,
Phys. Scr. 91 (2016) 063014 [Invited paper].
2. T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuzaki, and Y. R. Shimizu
“Quantal rotation and its coupling to intrinsic motion in nuclei”,
Phys. Scr. 91 (2016) 073008 [Invited paper].
3. T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuo, and K. Yabana,
“Time-dependent density-functional description of nuclear dynamics”,
Rev. Mod. Phys. 88, (2016) 045004 [Invited paper].
4. K. Wen and T. Nakatsukasa,
“Self-consistent collective coordinate for reaction path and inertial mass”,
Phys. Rev. C. 94 (2016) 054618.
5. G. Watanabe, S. Yoon, F. Dalfovo, and T. Nakatsukasa,
“Multiple period states of the superfluid fermi gas in an optical lattice”,
J. Phys. Conf. Ser. 752 (2016) 012002.
6. Y. Kashiwaba and T. Nakatsukasa,
“Density functional calculations for the neutron star matter at subnormal density”,
JPS Conf. Proc. 14, (2017) 020801.
7. K. Wen, F. Ni, and T. Nakatsukasa,
“Nuclear reaction path and inertial mass in the self-consistent collective

- coordinate method”,
PoS(INPC2016) 211 (2017).
8. S. Ebata, and T. Nakatsukasa
“Octupole deformation in the nuclear chart based on the 3D Skyrme
Hartree-Fock plus BCS model”, Phys. Scr. in press.
 9. K. Wen and T. Nakatsukasa,
“Adiabatic self-consistent collective path in nuclear fusion reactions”,
Phys. Rev. C, in press.
 10. N. Hinohara, W. Nazarewicz,
“Pairing Nambu-Goldstone Modes within Nuclear Density Functional
Theory”,
Phys. Rev. Lett. 116, 152502 (2016).
 11. Y. Hashimoto and G. Scamps,
Gauge angle dependence in time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov
calculations of $^{20}\text{O}+^{20}\text{O}$
head-on collisions with the Gogny interaction,
Phys. Rev. C94, 014610 (2016).
 12. K. Minomo, K. Washiyama, K. Ogata,
“Deuteron-nucleus total reaction cross sections up to 1 GeV”,
J. Nucl. Sci. Technol. 54, 127 (2017).
 13. K. Nomura, T. Niksic, and D. Vretenar,
“Beyond-mean-field boson-fermion model for odd-mass nuclei”,
Phys. Rev. C 93, 054305 (2016).
 14. K. Nomura, R. Rodriguez-Guzman, and L. M. Robledo,
“Structural evolution in $A \sim 100$ nuclei within the mapped
interacting boson model based on the Gogny energy density functional”,
Phys. Rev. C 94, 044314 (2016).
 15. T. Grahm, S. Stolze, D. T. Joss, R. D. Page, B. Saygi, D.
O'Donnell, M. Akmal, K. Andgren, L. Bianco, D. M. Cullen, A. Dewald,
P. T. Greenlees, K. Heyde, H. Iwasaki, U. Jakobsson, P. Jones,
D. S. Judson, R. Julin, S. Juutinen, S. Ketelhut, M. Leino, N. Lumley,
P. J. R. Mason, O. Moller, K. Nomura, M. Nyman, A. Petts, P. Peura,
N. Pietralla, Th. Pissulla, P. Rahkila, P. J. Sapple, J. Saren, C. Scholey,
J. Simpson, J. Sorri, P. D. Stevenson, J. Uusitalo, H. Watkins,

- and J. L. Wood,
 "Excited states and reduced transition probabilities in ^{168}Os ",
 Phys. Rev. C 94, 044327 (2016).
16. K. Nomura, T. Niksic, and D. Vretenar,
 "Signatures of shape phase transitions in odd-mass nuclei",
 Phys. Rev. C 94, 064310 (2016).
17. T. Daniel, S. Kisyov, P. H. Regan, N. Marginean, Zs. Podolyak,
 R. Marginean, K. Nomura, M. Rudigier, R. Mihai, V. Werner, R. J. Carroll,
 L. A. Gurgi, A. Oprea, T. Berry, A. Serban, C. Nita, C. Sotty, R. Suvaila,
 A. Turturica, C. Costache, L. Stan, A. Olacel, M. Boromiza, and S. Toma,
 "γ-ray Spectroscopy of Low-lying Excited States and Shape Competition in
 ^{194}Os ",
 Phys. Rev. C 95, 024328 (2017).
18. G. Scamps, V.V. Sargsyan, G.G. Adamian, N.V. Antonenko, D. Lacroix,
 "Extraction of pure transfer probabilities from experimental transfer and
 capture data",
 Phys. Rev. C **94**, pages 064606 (2016).
19. G. Scamps, D. Bourgin, K. Hagino, F. Haas and S. Courtin,
 "Coupled-channels description of the $^{40}\text{Ca}+^{58,64}\text{Ni}$ transfer and fusion
 reactions",
 Il Nuovo Cimento C **39**, 06, 414 (2017).
20. G. Scamps, C. Rodríguez-Tajes, D. Lacroix, F. Farget,
 "Time-dependent mean field determination of the excitation energy in
 transfer reactions: application to the reaction ^{238}U on ^{12}C at 6.14 MeV/A",
 Phys. Rev. C **95**, 024613 (2017).

B) 査読無し論文

1. T. Nakatsukasa,
 "Time-dependent density-functional calculation of nuclear response functions",
 Proceedings of the International Conference on Nuclear Theory in the
 Supercomputing Era - 2014 (NTSE-2014) (Pacific National University, 2016) pp.
 15-22.

2. 柏葉 優、中務 孝,

“低密度領域における中性子星核物質の密度汎関数計算” ,

原子核研究, Vol.61 Supplement 1, 2016 年夏の学校特集号, pp. 35-36.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. T. Nakatsukasa,

“Time-dependent density-functional theory and linear response theory”,
Lecture in SERC School on Modern Microscopic Approaches in Nuclear
Physics,
Srinagar, India, May 17-June 6, 2016.

2. T. Nakatsukasa,

“Microscopic determination of reaction path, potential, and inertial mass”,
ECT* workshop on Towards consistent approaches for nuclear structure
and reactions,
Trento, Italy, June 6 - 10, 2016.

3. T. Nakatsukasa,

“Nuclear reaction path and inertial mass in the self-consistent collective
coordinate method”,
International Nuclear Physics Conference (INPC2016),
Adelaide, Australia, Sep. 11 - 16, 2016.

4. T. Nakatsukasa,

“Nuclear reaction as large-amplitude collective motion”,
Heavy-Ion Accelerator Symposium on Fundamental and Applied Sciences
(HIAS2016),
Canberra, Australia, Sep. 18 - 20, 2016.

5. K. Nomura,

"Shape coexistence in the microscopically guided interacting boson model",
8th Workshop on Quantum Phase Transitions in Nuclei and Many-Body
Systems,
Prague, Czech Republic, 6-9 June 2016.

6. K. Nomura,

"Nuclear shapes and excitations in the microscopically-guided algebraic

theory",

Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory,

Gif-sur-Yvette, France, 7-11 November 2016.

7. K. Wen,

“The Inertial Mass and Collective Path in Nuclear Fusion/Fission Reactions”,

International Conference Nuclear Theory in the Supercomputing Era – 2016 (NTSE-2016),

Pacific National University, Khabarovsk, Russia, September 19–23, 2016.

8. G. Scamps,

Gauge angle dependency in fusion and transfer reactions, restoration of broken symmetries in dynamical calculation,

IPNO, Orsay, France, 16 March 2017.

9. G. Scamps,

Microscopic description of the transfer and fusion reactions including pairing correlations,

FUSION17 conference,

Hobart, Australia, 20-24 February 2017.

10. G. Scamps,

Simultaneous description of multi-nucleon transfer and fusion reactions with the coupled channel method,

LENRT workshop,

Canberra, Australia, 15-17 February 2017.

11. G. Scamps,

Josephson effect in nuclear reactions, effect of the restoration of the gauge angle symmetry in mean-field dynamics,

CCS-RIKEN joint workshop,

Tsukuba, Japan, 12-16 December 2016.

12. G. Scamps,

Microscopic description of the transfer reaction including pairing

correlations,

HIAS Symposium,

Canberra, Australia, 18-20 September 2016.

13. G. Scamps,

Description of multi-nucleon transfer and fusion reactions with the coupled
channel method,

INPC conference,

Adelaide, Australia, 11-16 September 2016.

B) 一般講演

1. T. Nakatsukasa,

“Microscopic determination of reaction path and inertial mass”,

International workshop on Recent Progresses in Nuclear Structure
Physics 2016 (NSP2016),

Kyoto, Japan, Dec. 5-23, 2016.

2. N. Hinohara,

“FAM Applications Towards EDF Optimization”,

NUCLEI SciDAC 2016 Project Meeting,

Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA, Jun. 6-9, 2016.

3. N. Hinohara,

“Nuclear collective excitation modes within finite-amplitude method”,
(poster presentation)

14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV (NIC-XIV),
Toki Messe, Niigata, Japan, Jun. 19-24, 2016.

4. N. Hinohara and W. Nazarewicz,

“Pairing rotations in ground states of open-shell even-even deformed
nuclei”,

Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2016), Saint Mary’s University,
Halifax, Canada, Jul. 11-15, 2016.

5. N. Hinohara and W. Nazarewicz,

“Binding energy differences of even-even nuclei as pairing indicators”,
Nuclear Structure 2016 (NS2016),

Knoxville, TN, USA, Jul. 24-29, 2016.

6. N. Hinohara,
“Neutron-proton superfluid DFT”,
DOE topical collaboration meeting “Nuclear Theory for Double-Beta Decay
and Fundamental Symmetries”,
Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University,
East Lansing, MI, USA, Aug. 1-2, 2016.
7. N. Hinohara and W. Nazarewicz,
“Pairing Nambu-Goldstone modes and binding-energy differences of
even-even nuclei” (poster presentation),
International Nuclear Physics Conference (INPC2016),
Adelaide, Australia, Sep. 11-16, 2016.
8. N. Hinohara,
“New pairing observable: binding energy differences of even-even nuclei”,
First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of
nuclear structure and dynamics,
Tsukuba, Japan, Dec. 12-16, 2016.
9. N. Hinohara,
“Recent theoretical developments of finite-amplitude method for QRPA”,
Recent Progresses in Nuclear Structure Physics (NSP2016),
Kyoto, Japan, Dec. 5-23, 2016.
10. Y. Hashimoto,
“Gogny-TDHFB calculation of $^{20}\text{O} + ^{20}\text{O}$ head-on collision”,
First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of
nuclear structure and dynamics,
Wako & Tsukuba, Japan, Dec.12-16, 2016.
11. K. Washiyama, T.Nakatsukasa,
“Multipole modes of deformed superfluid nuclei with the finite amplitude
method in three-dimensional coordinate space”,
SSNET Workshop 2016,
Gif-sur-Yvette, France, Nov.7-11, 2016.
12. K. Washiyama, T.Nakatsukasa,
“Finite amplitude method for QRPA in three-dimensional coordinate”,
First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of

nuclear structure and dynamics,

Wako & Tsukuba, Japan, Dec.12-16, 2016.

13. K. Washiyama,

"Fusion hindrance in heavy systems with time-dependent Hartree-Fock",

International Conference on heavy-ion collisions at near-barrier energies
(FUSION17),

Hobart, Australia, Feb. 20-24, 2017.

14. K. Washiyama,

"Present status of three-dimensional finite-amplitude-method QRPA",

2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,
Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.

15. F. Ni, T. Nakatsukasa,

"Self-consistent Collective Coordinate in Richardson model",

First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop,
Tsukuba, Japan, Dec. 12-16, 2016.

16. F. Ni,

"Pairing dynamics in Richardson model",

NIC-XIV School 2016,
Niigata, Japan, June 13-17, 2016

17. F. Ni,

"Collective coordinates in Richardson model",

2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,
Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.

18. Y. Kashiwaba, T. Nakatsukasa,

"Density functional calculations for the neutron star matter at subnormal
density",

2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,
Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.

19. T. Saito,

"Numerical calculation of giant quadrupole resonance",

2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,

Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.

20. K. Yaoita,

“Coriolis effect for vibrational bands in transitional nuclei”,

2nd workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model,

Sado, Japan, Aug.21-23, 2016.

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 中務 孝、

“原子核の形と対称性の破れ”、

日本物理学会科学セミナー、

東京大学駒場キャンパス、東京、2016 年 8 月 20-21 日

B) その他の発表

1. 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、

J S T 別館、東京、2016 年 10 月 13-14 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、

J S T 別館、東京、2017 年 3 月 24-25 日.

3. 日野原 伸生、

“偶々核の束縛エネルギー差と対回転モード”、

日本物理学会 2016 年秋季大会、

宮崎大学、2016 年 9 月 21-21 日.

4. 日野原 伸生、

“二重ベータ崩壊の原子核行列要素と中性子陽子対の非線形ゆらぎ”、

千葉大学原子核理論セミナー、

千葉大学西千葉キャンパス、2016 年 11 月 24 日.

5. 日野原 伸生、

- “対相関と二重束縛エネルギー差”、
研究会「クラスター・平均場の両側面からみる原子核構造の多様性とそのダイナミクス」、
大阪市立大学杉本キャンパス、2017 年 1 月 19-20 日.
6. 日野原 伸生, Markus Kortelainen, Witold Nazarewicz,
“原子核エネルギー密度汎関数の最適化に向けた巨大共鳴の効率的評価”、
日本物理学会第 72 回年次大会、
大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日.
7. 橋本幸男、
“Gogny-TDHFB 法による $^{20}\text{O} + ^{20}\text{O}$ の計算における摩擦係数について”、
日本物理学会第 72 回年次大会、
大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日.
8. 鷲山広平、中務孝、
“3 次元有限振幅法 QRPA の非軸対称原子核への応用”、
日本物理学会秋季大会、
宮崎大学、2016 年 9 月 21-24 日.
9. 鷲山広平、中務孝、
“3 次元 QRPA に対する有限振幅法の開発と応用”、
日本物理学会第 72 回年次大会、
大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日.
10. 倪放、中務孝、
“対相関ダイナミクスを記述する集団座標”、
クラスター・平均場の両側面からみる原子核構造の多様性とそのダイナミクス、
大阪市立大学、2017 年 1 月.
11. 倪放、中務孝、
“ 0^+ 対励起状態を記述する集団座標と四重極相関”、
日本物理学会 2016 年秋季大会、
宮崎大学、2016 年 9 月.
12. 柏葉 優、中務 孝、
“中性子星内殻におけるスラブ相に対する完全自己無撞着計算”、

日本物理学会春季第 72 回年次大会,
大阪大学, 2017 年 3 月 17-21 日.

13. 八百板 恭介、中務 孝、

“5 次元四重極集団ハミルトニアンを用いた回転バンド間 E2 遷移の研究”、
日本物理学会第 72 回年次大会、
大阪大学、2017 年 3 月 17-20 日.

(4) 著書、解説記事等

1. N.Takigawa, K.Washiyama,

“Fundamentals of Nuclear Physics”, Springer Japan (2017)

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・ワルシャワ工科大学の原子核理論グループと共同で、実空間 TDHFB 計算 (中務)
2. 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)。
3. 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 研究員と原子核密度汎関数の諸問題に関する共同研究 (日野原)
4. 米国 SciDAC project “Nuclear Computational Low-Energy Initiative (NUCLEI)”, 外国人共同研究者として参加 (日野原)
5. クロアチア・ザグレブ大学の理論グループと、奇核の構造に関する共同研究 (野村)
6. スペインマドリード自治大学およびクウェート大学と、形状相転移と変形共存に関する共同研究 (野村)
7. 英国サリー大学、ドイツケルン大学をはじめとした、欧州の複数の研究機関の実験グループと、中重核分光に関する共同研究 (野村)

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 国際会議 Nuclear Structure 2016 (NS2016) Conference (Knoxville, TN, USA, July 24-29, 2016) の国際諮問委員を務めた (中務)。

2. 国際ワークショップ Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics (Wako and Tsukuba, December 12-16, 2016) の組織委員を務めた (矢花、中務、橋本、日野原 (委員長))。

9. 管理・運営

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長
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 評価委員
数理物質系物理学域 理論グループ副議長

10. 社会貢献・国際貢献

中務 孝

高校生対象模擬授業、2016. 8. 1、筑波大学計算科学研究センター
JAEA タンデム専門委員会委員
JAEA 黎明研究評価委員会委員
Editor for Journal of Physical Society of Japan
Editor for International Journal of Modern Physics E
核理論委員会委員
日本物理学会 理論核物理領域・領域代表
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
計算基礎科学連携拠点運営委員 (ポスト京重点課題)

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, 2016 年 4 月 1 日～8 月 30 日

2. 野村昂亮

University of Zagreb, Croatia, 2016 年 4 月 1 日 ～ 2017 年 3 月 31 日