

研究室構成員

八尋 正信 教授

清水 良文 准教授

松本 琢磨 助教

《 大学院 博士課程 》

蓑茂 工将 佐々木 崇宏 田上 真伍

《 大学院 修士課程 》

嶋田 充宏 高橋 純一 長野 邦裕 渡邊 慎

石井 優大 江頭 慧 佐々部 悟 豊川 将一

《 学部 卒業研究生 》

管野 淳平 難波 俊太 米村 浩司 森本 光(前期)

担当授業

物理学入門(八尋正信)、自然科学概論(八尋正信)、量子力学I・同演習(八尋正信・松本琢磨)、特殊相対論と電気力学(八尋正信)、原子核反応論(八尋正信)、物理数学I(清水良文)、数値計算法(清水良文)、電磁気学(清水良文)、物理学特別研究I(八尋正信・清水良文・松本琢磨)、物理学特別研究II(八尋正信・清水良文・松本琢磨)

研究・教育目標と成果

有限 θ におけるQCD相構造の研究(八尋正信, 河野宏明 [佐賀大学], 境祐二 [理研], 佐々木崇宏 (D2), 高橋純一 (M2))

QCD真空はトポロジカルに非自明であり、 θ 真空と呼ばれている。有限温度においてこの構造が変化すると、重イオン衝突実験や宇宙進化のシナリオに有意な影響を与えることが知られている。 θ 真空構造の変化はQCD作用に θ 項を付加することで解析可能であるが、 θ 項が存在する一般的QCDにおいて格子QCD計算は符号問題のため実行不可能である。このため、トポロジーが変化し θ 項が有限となったQCDの性質は、ほとんど解明されていない。

我々はまず、EPNJL模型を用いて θ パラメータの関数としてのQCD相構造を求め

た結果、 θ 項の効果により QCD 相転移が強くなる傾向があると分かった。特に、トポロジー項が大きいときは QCD 相転移が一次相転移になる可能性が示唆された。この結果は、現実的な 2+1 フレーバー系でも確認することができた。さらに、この領域において格子 QCD 計算を可能にする方法を新たに提案した。有効模型を用いてその実行可能性を具体的に分析することにより、十分に実行可能な方法であると分かった。

本研究は佐々木氏を中心に推進され、その成果は Physical Review 誌に掲載された。

格子 QCD による虚数化学ポテンシャル領域の重クォークポテンシャルの研究 (八尋正信, 中村純 [九大客員教授・広島大学], 斎藤卓也 [高知大学], 永田桂太郎 [広島大学], 河野宏明 [佐賀大学], 佐々木崇宏 (D2), 高橋純一 (M2))

格子 QCD は符号問題により有限の化学ポテンシャル (μ_q) 領域での計算が困難である。この符号問題を回避するための一つの方法として、虚数化学ポテンシャル ($\mu_I \equiv i\mu_q$) 領域からの解析接続がある。他に提案されている方法とは違い、この方法では $\mu_q/T < 1$ (T は温度) において信頼性の高い結果が得られる。このような観点から、我々は μ_I 領域における格子 QCD シミュレーションを進めている。昨年度から、クォークの閉じ込めを理解するために重要な重クォークポテンシャルに注目し、その μ_I 依存性について調べている。今年度は、ゲージ固定をした後、重クォークポテンシャルのカラーチャネルを分けた状態を引き出した。結果は、 μ_I が大きくなるにつれて、singlet channel と anti-triplet channel はより引力が、octet channel と sextet channel はより斥力が強くなる傾向を示した。また、物理的な状態である singlet channel に関しては、カラー荷に対する Debye 遮蔽質量の μ_I 依存性を求めた。Debye 遮蔽質量は物理量であるため、どのような種類のゲージ固定でも同じ T, μ_I であれば、同じ値が出ることが期待される。この性質により、Debye 遮蔽質量の μ_I から μ_q への解析接続に信頼性を与える。今回、我々はクーロンゲージとランダウゲージを用いた。2つのゲージを用いた結果は誤差の範囲以内で良い一致を見せた。 μ_I 依存性としては、 μ_I が大きくなるにつれて質量が小さくなる傾向であった。これは Hard Thermal Loop 近似を用いた摂動計算と定性的に一致しているものの、その μ_I 依存性は摂動計算のものより大きかった。

今後は、Debye 遮蔽質量や重クォークポテンシャルの μ_I 依存性から解析接続によりそれぞれの μ_q 依存性を求める。

本研究は高橋氏を中心に推進され、修士論文として纏められた。

高密度天体の構造に関わる QCD 相構造の研究 (八尋正信, 河野宏明 [佐賀大学], 河野通郎 [九州歯科大学], 安武伸俊 [千葉工業大学], 佐々木崇宏 (D2), 長野邦裕 (M2))

格子 QCD による第一原理計算は、符号問題のため実数クォーク数化学ポテンシャルでは行えない。また加速器を用いた実験的アプローチも、原子核の飽和性により高

クォーク数化学ポテンシャル領域の実現には困難が伴う。そのため高密度系である中性子星の観測結果が、高クォーク数化学ポテンシャル領域の研究に重要な情報を与えると期待されている。

我々はクォーク-ハドロンの相転移を、簡単な2相模型を用いて表現した。クォークの模型としては2フレーバー Nambu-Jona-Lasinio(NJL) 模型を用いた。中性子星物質を考慮するためにはアイソスピン非対称な場合を考慮する必要があるが、昨年度に解析が行われ荷電平衡な系の状態方程式が計算可能である。中性子の模型としては自由フェルミ気体模型を用いるが、中性子間の斥力による効果を有効的に取り込むために体積排除効果を考慮した。このとき、排除体積のパラメータは低密度領域におけるカイラル摂動論から決定した。このことにより、原子核の飽和性など通常核密度周辺の性質は実験結果と整合するような模型になっている。さらに、クォーク-ハドロン間のクロスオーバー転移を、簡略的にはあるが熱力学関係式を満たすように定式化した。以上の模型を用いて状態方程式を求め、一般相対論的な力学平衡の式である Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程式を解くことで中性子星の構造を求めた。

体積排除効果の導入により、観測された 1.9 太陽質量の中性子星を再現することが出来た。また、クォークとハドロンの共存するハイブリッド星の可能性を詳細に分析し、クォーク物質が存在する場合であっても観測結果を再現することが可能であると分かった。

本研究は長野氏を中心に推進され、修士論文として纏められた。

有効模型を用いたメソン質量の計算 (八尋正信, 河野宏明 [佐賀大学], 佐々木崇宏 (D2), 高橋純一 (M2), 石井優大 (M1))

粒子の質量は、相関関数の遠方での振る舞いを支配する物理量である。有限温度ではローレンツ対称性が破れており時間と空間が対等でないため、粒子の質量もそれぞれ pole mass (M_{pole})、screening mass (M_{scr}) と区別される。格子 QCD ではクォーク二粒子相関の空間依存性を解析することで、メソンの M_{scr} と M_{pole} の比が見積もられている。そこで、本研究では有効模型でメソンの M_{scr} と M_{pole} を計算し、格子 QCD の計算結果と比較することを目標とした。

本年度は、PNJL 模型を用いて π 、 σ メソンの M_{pole} の温度依存性を計算した。その結果、温度の上昇に従って π メソンの M_{pole} は増加し、カイラル相転移の転移温度を超えると、 σ メソンの M_{pole} に近づくことが確認できた。これは高温でのカイラル対称性の回復を表しており、先行研究を再現するものであった。

来年度は M_{scr} の温度依存性を計算して、格子 QCD の計算結果と定性的な比較を行う。またゼロ密度領域で格子計算と一致することを確認したのち、有限密度領域への拡張を行い、 M_{scr} の密度依存性の解明を目指す。

本研究は石井氏を中心に推進された。

荷電交換反応の解析による中性子スキン厚の決定 (八尋正信、蓑茂工将 (D3))

核物質の状態方程式の決定は、核物理と中性子星の物理にまたがる極めて重要な課題である。中性子過剰核や中性子星などの非対称核物質の性質は、主として状態方程式の対称エネルギー項によって決まるが、その高密度領域における振る舞いはよくわかっていない。対称エネルギー項を決定するため、さまざまなアプローチにより中性子過剰核における中性子スキン厚の解析がなされている。

中性子スキン厚の解析に有力な方法のひとつとして、アイソバリックアナログ状態 (IAS) を励起する荷電交換反応 (p,n)IAS が注目されている。 (p,n) IAS は、アイソスピン対称性の下に陽子弾性散乱と等価な反応であり、光学ポテンシャルのアイソベクトル成分に強く依存すると考えられる。本研究では、この (p,n) IAS を畳み込み模型を用いた微視的反応理論によって解析し、中性子スキン厚を精密に決定する。

今年度は、畳み込み模型による (p,n) IAS の計算コードを開発した。今後、さまざまな標的核・入射エネルギーに対して (p,n) IAS の特徴を解析し、中性子スキン厚を精度よく決定する。本研究は蓑茂氏を中心に推進されている。

カイラル有効場の理論に基づく新しい2核子間有効相互作用の構築 (八尋正信、松本琢磨、河野通郎 [九州歯科大学教授]、蓑茂工将 (D3)、豊川将一 (M1))

多重散乱理論によると、核反応は核子間の有効相互作用による多重散乱によって表現される。有効相互作用とは核内における2核子散乱の遷移行列であり、核力に基づいた g 行列理論計算などによって、これまでにいくつもの有効相互作用が提案されている。そのような有効相互作用は、現象論的に決定された核力に基づくものであった。近年、格子 QCD や有効場の理論などの立場から核力の導出を行う試みが盛んであり、このような理論的基礎付けによる核力を用いて構築される有効相互作用の性質がどのようなものであるかは大変興味深い。

本研究では、カイラル有効場の理論からの核力に基づく新しい有効相互作用を構築する。この利点として、3核子力の効果を不定性なく取り込めることが挙げられる。3核子力は現在注目されている大きな話題のひとつで、核物質の形成においても重要な役割を果たすと考えられている。

豊川氏、河野氏を中心として、カイラル有効場の理論から構築された g 行列相互作用と CD-Bonn などの現象論的核力から構築された g 行列相互作用を比較し、その性質を調べた。今後、新しい g 行列を実際の反応計算に適用し、全反応断面積などの解析を行う。

微視的反応模型による核子-Li アイソトープ反応解析 (八尋正信、松本琢磨、渡辺幸信 [九州大学総合理工学府教授]、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター准教授]、郭海瑞 [九州大学総合理工学府 (D1)]、渡邊慎 (M2))

核融合炉の設計において核子-Li アイソトープ (${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$) 反応は重要であり、その系統的な反応データが必要とされている。しかし、中性子である n は電荷を持たないため加速することや検出することが非常に困難であり、実験からこの反応の断面積を系統的に決定することは、現段階では不可能である。特に、高エネルギー反応における断面積を決定するには精密な理論予測が必要となる。そこで我々は、 n - ${}^6\text{Li}$ 、 n - ${}^7\text{Li}$ 、 p - ${}^6\text{Li}$ 、 p - ${}^7\text{Li}$ 散乱の精密理論解析を進めている。

本研究において ${}^6\text{Li}$ と ${}^7\text{Li}$ はそれぞれ d と α 、 t と α の 2 体クラスターモデルで記述する。そして、反応過程でそれらのクラスターに分解する効果を連続状態離散化チャンネル結合法により精密に取り入れ、また核子-Li 間の相互作用として、有効相互作用の 1 つである JLM 相互作用を用いた微視的モデルにより計算を行った。それぞれの反応において弾性散乱の微分断面積は系統的に実験値と良い一致を見ることができた。この知見をまとめて Physical Review C 誌に投稿し、掲載された。また同様の研究を北海道大学とも共同で研究を進めており、その成果も Physical Review C 誌に掲載された。

現在、この計算は総合理工学府の郭氏を中心として推進されている。

${}^6\text{Li}$ 入射反応における分解効果 (八尋正信、松本琢磨、緒方一介 [大阪大学核物理研究センター准教授]、蓑茂工将 (D3)、渡邊慎 (M2))

本研究の対象である ${}^6\text{Li}$ は、中性子 (n)、陽子 (p)、 ${}^4\text{He}$ 原子核の 3 つの粒子がそれぞれ緩く束縛した原子核である。このような弱束縛な原子核が入射する反応では、反応の途中で入射核が分解する過程が重要となり、その効果を精密に取り扱うことが必須となる。本研究では、連続状態離散化チャンネル結合法を用い、 ${}^6\text{Li}$ が 3 つの粒子 (n 、 p 、 ${}^4\text{He}$) に分解する効果を陽に取り入れた計算を行った。

解析の対象として、 ${}^6\text{Li}$ - ${}^{209}\text{Bi}$ 弾性散乱を選択した。先行研究は「 ${}^6\text{Li} + {}^{209}\text{Bi}$ 」系を「 $(d + {}^4\text{He}) + {}^{209}\text{Bi}$ 」の 3 体系として扱っており、調整パラメータなしに実験を再現しなかった (d は重陽子を表す)。これは、 ${}^6\text{Li}$ 内部の d が n と p に分解する過程が正確に処理されていないためと考えられる。そこで本研究では「 ${}^6\text{Li} + {}^{209}\text{Bi}$ 」系を「 $(n + p + {}^4\text{He}) + {}^{209}\text{Bi}$ 」の 4 体系として扱い、 d が n と p に分解する過程も明確に取り入れ、計算を行った。その結果、我々は先行研究で再現できなかった実験を定量的に説明し、さらに、 ${}^6\text{Li}$ 内部における d の分解の仕方が、通常の d 入射反応における d の分解の仕方とは明確に異なることを発見した。最後に、 ${}^6\text{Li}$ 入射反応における d 分解の仕方の違いを、実効的かつ簡潔に取り入れることができる新しい 3 体モデルを提案した。今後は、 ${}^6\text{Li}$ 内部の d 分解の反応メカニズムを明らかにすることを目指す。

本研究は渡邊氏を中心に推進され、同氏の修士論文として纏められた。その成果は Physical Review C 誌に掲載された。

反応断面積の解析で探る中性子過剰核の変形及びハロー構造 (八尋正信、清水良文、松本琢磨、木村真明 [北海道大学准教授]、武智麻耶 [理研仁科センター、ドイツ重イオン研究所]、福田光順 [大阪大学准教授]、西村太樹 [東京理科大学助教]、鈴木健 [埼玉大学教授]、蓑茂工将 (D3)、田上真伍 (D1)、嶋田充宏 (M2)、渡邊慎 (M2))

不安定核研究において最も注目を集めているものの1つとして、核図表において陽子数が 10~12 (Ne, Na, Mg)、中性子数が 20~22 程度の領域 “island of inversion” が挙げられる。この領域の原子核は「異常な変形」や「ハロー構造」といった特有の性質を示しており、従来行われていた現象論的なアプローチが適用できない。そこで我々は反対称化分子動力学法により計算された核密度を用いた二重畳み込みモデルによる計算を試みた。これは原子核の構造に一切の仮定を置かない純微視的理論である。このモデルを island of inversion の代表核である Ne 同位体の反応に適用し、反応断面積に対する変形効果の重要性を定量的に示し、さらにその構造を決定した。解析の成果は Physical Review C 誌に掲載された。

次に、我々は上記の微視的アプローチを Mg 同位体反応に適用した。その結果、Mg 同位体反応においても反応断面積に対する変形効果の重要性が見出され、その反応機構を部分的に明らかにした。我々の解析結果は、ドリップライン近傍核である ^{37}Mg がハロー構造を持つことの強い可能性を示しており、その反応機構及び構造についての詳細な議論を現在行っている。ハロー構造の記述には大きなモデル空間を必要とするため、今後は大きな空間を用意した大規模計算を行い、Mg 同位体の変形及びその構造を決定する。

本研究は渡邊氏、蓑茂氏を中心に推進された。

微視的反応理論による炭素同位体入射反応の系統的解析 (八尋正信、清水良文、松本琢磨、古立直也 [北海道大学]、蓑茂工将 (D3)、田上真伍 (D1)、佐々部悟 (M1))

不安定核に見られる特徴として原子核の密度が異常に広がった halo 構造がある。Hartree-Fock-Bogoliubov 法による解析によって、halo の発達が対相関力によって抑制されるということが示唆されている。近年、この理論的示唆が全反応断面積の偶奇性という形で実験的に見えているのではないかという指摘がなされた。しかし、反応断面積の偶奇性は数%の違いを指しているのでは様々な影響を考慮する必要がある。そこで、我々は微視的反応理論を用いて考えられる影響の中でも特に重要と思われる核媒質効果と入射核の分解効果を検証した。この解析によって、halo 核における媒質効果が通常の原子核のそれと異なる振る舞いをするのが分かった。また、先の指摘をし

た理論計算においては無視されていた分解の効果が無視できないことも分かった。今後、他の系についても解析を行い反応断面積の偶奇性と原子核の構造の間の関係を調べていく予定である。この研究は佐々部氏を中心に進められている。

二重畳み込み模型を用いた⁴He-核弾性散乱の解析 (八尋正信、松本琢磨、蓑茂工将 (D3)、渡邊慎 (M2)、江頭慧 (M1)、佐々部悟 (M1))

二重畳み込み模型は、核子-核子間有効核力 (g 行列相互作用) を入射核と標的核の核密度で畳み込み、核-核間のポテンシャルを求める方法である。 g 行列相互作用は核物質中での相互作用であり、密度依存性を持つ。本研究では、この密度依存性の性質を調べ、⁴He 弾性散乱に対して新しい密度依存性の選び方を提案した。新たに提案された核-核間ポテンシャルは、⁴He 散乱において、従来 of 仮定より、よい実験との一致を与えた。今後は、この⁴He-核間ポテンシャルを弾性散乱以外の反応解析へ応用する。この研究は、江頭氏を中心に推進されている。

微視的光学ポテンシャルを用いた陽子弾性散乱の系統的解析 (八尋正信、松本琢磨、蓑茂工将 (D3)、豊川将一 (M1))

2 核子間有効相互作用に基づいて構築された光学ポテンシャルを微視的光学ポテンシャルと呼ぶ。微視的光学ポテンシャルを構築する手法として、2 核子間有効相互作用を標的核密度で畳み込み積分することによって核子-核間の光学ポテンシャルを表現する畳み込み模型がある。不安定核散乱に対して信頼性の高い光学ポテンシャルを現象論的に構築することは困難なため、不安定核反応の解析には畳み込み模型による微視的光学ポテンシャルが必須となる。

本研究では、Melbourne グループの g 行列有効相互作用を用いた畳み込み模型で、陽子弾性散乱に対する微視的光学ポテンシャルの性質を系統的に調べた。微分断面積や偏極分解能の解析を通じ、安定核と不安定核の密度の広がりの違いがポテンシャルの深さや半径に及ぼす影響を定量的に評価した。この成果は論文にまとめられ、現在 Physical Review C 誌に投稿中である。この研究は蓑茂氏と豊川氏を中心に進められた。

原子核基底状態のプロレート変形優勢の起源 (清水良文、高原哲士 [杏林大学]、田嶋直樹 [福井大学])

原子核の基底状態は変形している場合はほとんど軸対称であるが、オブレート型 (ミカン型) に比べてプロレート型 (レモン型) が圧倒的に多いことが知られている。数年前からその理由を理解するための研究を行っている。これまでの研究で開発してきた信頼性の高い基底状態の変形を決める方法である「連続状態の効果を考慮した Strutinsky 法」により、ドリップライン近傍の不安定原子核まで含めた多くの原子核に対する信

頼性における分析が可能になった。今年度はこれまでよく用いられてきた色々なパラメータセットの Woods-Saxon 型平均ポテンシャルを用いて、平均ポテンシャルの深さや広がりやスピン軌道力の強さなどを変更して、プロレート変形が現れる率の系統的な計算を行いその起源を分析して結果をまとめた。

特に興味深い結果としては、原子核の 2 粒子分離エネルギーが小さくなると球形の原子核が増えることが明瞭に示された。このことはハローやスキンが現れる弱束縛の不安定核の極限では相対的に変形する原子核が少なくなることを示唆しており、これからの不安定核の研究でその傾向が見えればおもしろい。また、我々は「Strutinsky 法」を用いているので、原子核の束縛エネルギーの巨視的部分と微視的殻効果を分けて分析することが可能であり、現在、巨視的部分がプロレート変形率に与える影響も調べている。この研究は杏林大の高原氏を中心に行われている。

角運動量射影法による非軸対称変形核の回転状態の研究 (清水良文、田上真伍 (D1))

原子核において最も良く知られた変形は軸対称楕円体変形である。しかし、近年の理論計算や実験結果から、その軸対称性を破った非軸対称な楕円体変形の存在が示唆されている。このような非軸対称変形をした原子核に固有の運動として、古典的な歳差運動を想起させるウォブリング回転や、3つの異なる種類の角運動量が右手系と左手系という配位をとることから生じるカイラル二重項がある。

本研究ではこれらの運動を角運動量射影法を用いて解析している。これまでに、エネルギースペクトルと電磁遷移確率を微視的に計算すること自身は可能であったが、微視的計算結果を分析して角運動量射影した状態が真に巨視的モデルのウォブリング運動やカイラル二重項状態に対応するものかどうかを調べるのが難しかった。そこで、内部状態の角運動量の向きを直接的に角運動量射影計算から引き出す方法を新たに開発した。今後は、この方法を用いて角運動量射影した状態の物理的な解釈を行っていく。本研究は田上氏を中心に行われている。

原子核におけるエキゾチック変形の研究 (清水良文、田上真伍 (D1)、J. Dudek [ストラスブール大学])

原子核でこれまでに調べられていないエキゾチックな変形が、近年の平均場理論による計算から予想されている。その一つである四面体変形は、特定の陽子数または中性子数の原子核の安定な変形として示唆されているが、現実の原子核で四面体変形した状態は未だ見つかっていない。そのため、四面体変形の存在を探る第一段階として、我々は四面体変形した状態に量子数射影を行い、実験と比較可能なエネルギースペクトルや電磁遷移確率を計算している。

これまでに、1 粒子エネルギーが同じ準位は全て詰まった四面体変形した閉殻のエネ

ルギースペクトルを計算してきたが、本年度は新たに閉殻に1粒子がついた奇核と2粒子がついた閉殻でない偶々核のエネルギースペクトルを計算した。これらの結果では閉殻の場合には見られなかった、十分に大きな変形度でも残るエネルギープリッキングが見られた。現在はこのスプリッキングを説明するために、四面体変形した回転体に粒子がついた粒子回転結合モデルによる解釈を試みており、1粒子が特定の準位に入っている場合には量子数射影法の結果をうまく説明できることがわかった。今後は他の準位に入った場合やもっと一般的な2粒子の場合に対してもうまく解釈できる方法を探る。この研究は田上氏を中心に行われている。

Gogny-HFB 計算による変形した不安定核の研究 (清水良文、田上真伍 (D1)、嶋田充宏 (M2))

全ての原子核が球形をしているとは限らず、むしろ変形した原子核の方が多く存在する。しかし、不安定核は、短時間で崩壊してしまうため実験が難しく、どのような形をしているのかわからないため、変形の効果を正しく取り扱える理論計算を行う必要がある。そこで、本研究では信頼性の高いと考えられている有限レンジの有効相互作用である Gogny 力を用いて、変形した不安定核を取り扱える Hartree-Fock-Bogoliubov(HFB) 計算プログラムを開発した。特に、ドリップ線近傍原子核の弱束縛な低密度領域を正しく記述するためには、ガウス基底を用いた HFB 法を用いることが有益であり、通常の調和振動子基底を用いたプログラムとともにガウス基底を用いたプログラムも完成させた。一般に、変形すると有限レンジの有効相互作用を用いた計算は計算時間が膨大になるが、昨年度開発したブロイデンの方法を用いて大幅な高速化が可能であることを確かめた。

最近では、BEC(ボーズ・アインシュタイン凝縮)-BCS クロスオーバーに関連する現象としてダイニュートロン相関が注目されている。開発した HFB 計算プログラムを用いて、変形核のダイニュートロン相関を調査した。核内の方向によって2体の相関密度に違いがあり、変形がダイニュートロン相関に大きな影響を与えることがわかった。この研究は嶋田氏を中心に進められ、同氏の修士論文としてまとめられた。

発表論文

《 原著論文 》

Practical solution to the sign problem at finite theta-vacuum angle:

T. Sasaki, H. Kouno, and M. Yahiro,

Physical Review D **87**, (2013) pp. 056003-1–7.

Two-color QCD at imaginary chemical potential and its impact on real chemical potential:

K. Kashiwa, T. Sasaki, H. Kouno, and M. Yahiro,
Physical Review D **87**, (2013) pp. 016015-1–9.

The quarkyonic phase and the Z_{N_c} symmetry:

Y. Sakai, H. Kouno, T. Sasaki, and M. Yahiro,
Physics Letter B **718** (2012) 130–135.

Quark-gluon thermodynamics with the Z_N symmetry:

H. Kouno, Y. Sakai, T. Makiyama, K. Tokunaga, T. Sasaki, and M. Yahiro,
Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics **39** (2012) 085010 (21pp).

Deformation of Ne isotopes in the region of island of inversion:

T. Sumi, K. Minomo, S. Tagami, M. Kimura, T. Matsumoto, K. Ogata, Y. R. Shimizu,
and M. Yahiro,
Physical Review C **85**, (2012) pp. 064613-1–17.

The continuum discretized coupled-channels method and its applications:

M. Yahiro, K. Ogata, T. Matsumoto, and K. Minomo,
Progress of Theoretical and Experimental Physics **2012**, (2012) pp. 01A206-1–44.

Determination of the ${}^8\text{B}(p,\gamma){}^9\text{C}$ reaction rate from ${}^9\text{C}$ breakup:

T. Fukui, K. Ogata, K. Minomo, and M. Yahiro,
Physical Review C **86**, (2012) pp. 022801-1–5.

Effects of four-body breakup on ${}^6\text{Li}$ elastic scattering near the Coulomb barrier:

S. Watanabe, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Yahiro,
Physical Review C **86**, (2012) pp. 031601-1–5.

Analysis of ${}^7\text{Li}(n,n'){}^7\text{Li}^*$ reactions using the continuum-discretized coupled-channels method:

D. Ichinkhorloo, Y. Hirabayashi, K. Katō, M. Aikawa, T. Matsumoto, and S. Chiba,

Physical Review C **86**, (2012) pp. 064604-1–7.

Systematic analysis of nucleon scattering from ${}^{6,7}\text{Li}$ with the continuum discretized coupled channels method:

Hairui Guo, Yukinobu Watanabe, Takuma Matsumoto, Kazuyuki Ogata, and Masanobu Yahiro,

Physical Review C **87**, (2012) pp. 024610-1–10.

Nuclear prolate-shape dominance with the Woods-Saxon potential:

S. Takahara, N. Tajima, and Y. R. Shimizu,

Physical Review C **86** (2012), 0643231-1-13.

Mixing effects on K -forbidden transition rates from the 6^+ isomers in the $N=104$ isotones:

Fang-Qi Chen, Yang Sun, P. M. Walker, G. D. Dracoulis, Y. R. Shimizu and J. A. Sheikh,
Journal of Physics G **40** (2013), 015101-1-12.

《Proceedings》

有限 θ における QCD 相構造の研究:

佐々木崇宏, 高橋純一, 境祐二, 河野宏明, 八尋正信,

原子核研究 Vol. 57 Supplement 1 (2013) pp. 103–106

虚数化学ポテンシャル領域におけるデバイ遮蔽効果の研究:

高橋純一, 佐々木崇宏, 永田桂太郎, 斎藤卓也, 河野宏明, 八尋正信, 中村純

原子核研究 Vol. 57 Supplement 1 (2013) pp. 41–44

Model approach to the sign problem on lattice QCD with theta vacuum:

T. Sasaki, J. Takahashi, Y. Sakai, H. Kouno, M. Yahiro,

Proceedings of Science (Lattice 2012) 076 (2012)

A simple model with Z_N symmetry:

M. Yahiro, H. Kouno, Y. Sakai, T. Sasaki, T. Makiyama,

Proceedings of Science (Lattice 2012) 099 (2012)

ゼロおよび純虚数化学ポテンシャルにおける、3フレーバー QCD のクォーク質量依存性:

佐々木崇宏, 境祐二, 河野宏明, 八尋正信,
原子核研究 Vol.56 Supplement 2 (2012) pp. 113–116

Recent Development of CDCC:

M. Yahiro, T. Matsumoto, K. Minomo, T. Sumi, and S. Watanabe,
Progress of Theoretical Physics Supplement **196**, (2012) pp. 87–101.

Deformation Effect on Total Reaction Cross Sections for Neutron-Rich Ne-Isotopes:

K. Minomo, S. Watanabe, T. Sumi, M. Kimura, K. Ogata, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro,

Progress of Theoretical Physics Supplement **196**, (2012) pp. 358–364.

Microscopic approach to the scattering of unstable nuclei at intermediate incident energies:

M. Yahiro,
CERN-proceedings-2012-002 (2012) pp. 45–52.

Eikonal reaction theory for neutron removal reactions:

K. Minomo, T. Matsumoto, K. Ogata, and M. Yahiro,
CERN-proceedings-2012-002 (2012) pp. 61–66.

CDCC analysis for breakup of three body projectiles:

T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, M. Yahiro, and K. Katō,
CERN-proceedings-2012-002 (2012) pp. 205–210.

Comparison of breakup processes of ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Li}$ with four-body CDCC:

S. Watanabe, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Yahiro,
CERN-proceedings-2012-002 (2012) pp. 217–222.

微視的理論による中性子過剰 Ne 同位体の系統的反応解析:

蓑茂工将,
原子核研究, Volume 57, Supplement 1 (2012) pp. 75-78.

g 行列相互作用を用いた軽い標的核による陽子弾性散乱の記述
豊川将一, 蓑茂工将, 河野通郎, 八尋正信,
原子核研究, Volume 57, Supplement 1 (2012) pp. 133-136.

4 体 CDCC を用いた ${}^6\text{Li}$ 入射核反応の解析:
渡邊慎, 松本琢磨, 蓑茂工将, 緒方一介, 八尋正信,
原子核研究, Volume 57, Supplement 1 (2012) pp. 137-140.

Eikonal Reaction Theory for One- and Two-Neutron Removal Reactions:
K. Minomo, T. Matsumoto, K. Ogata, and M. Yahiro,
Few-body systems (2012) DOI: 10.1007/s00601-012-0517-9

Four-body CDCC analysis for breakup reactions of three-body projectiles:
T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, M. Yahiro, and K. Katō,
Few-body systems (2012) DOI: 10.1007/s00601-012-0579-8

量子数射影法を用いた四面体変形核の研究:
田上真伍, 清水良文, J. Dudek,
原子核研究, Volume 57, Supplement 1 (2012) pp. 65–68.

Efficient Methods for Quantum Number Projection and Its Application to Tetrahedral
Nuclear States: S. Tagami, Y. R. Shimizu, and J. Dudek,
Proceedings of YKIS2011, Supplement volume of Prog. Theor. Phys. 196 (2012) pp.
334–339.

Exotic Geometrical Symmetries in nuclei: From Group Theory to Experiments:
J. Dudek, D. Curien, A. Gózdź, Y. R. Shimizu, and S. Tagami,
Proceedings of Zakopane Conference on Nuclear Physics, Poland, Acta Physica Polonica
44 (2013), 305–318.

《その他の論文》

Pairing Fluctuations and Gauge Symmetry Restoration in Rotating Superfluid Nuclei:
Y. R. Shimizu, Chap. 41, pp. 567–578, in a book ‘*Fifty Years of Nuclear BCS —
Pairing in Finite Systems*’, ed. by R. A. Broglia and V. Zelevinsky, 2013, World

Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

講演

《 海外での講演 》

Model approach to the sign problem on lattice QCD with theta vacuum:

T. Sasaki, J. Takahashi, Y. Sakai, H. Kouno, M. Yahiro,

Lattice 2012, June 26, Cairns, Australia.

A simple model with the Z_N symmetry:

M. Yahiro, H. Kouno, Y. Sakai, T. Sasaki, T. Makiyama,

Lattice 2012, June 29, Cairns, Australia.

Meson mass and the sign problem at finite theta:

T. Sasaki, H. Kouno, M. Yahiro,

Extreme QCD 2012, August 23, Washington D.C., USA.

Microscopic approach to the scattering of unstable nuclei at intermediate incident energies:

M. Yahiro,

13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, June 11, 2012, Varenna, Italy

Eikonal reaction theory for neutron removal reactions:

K. Minomo, T. Matsumoto, K. Ogata, and M. Yahiro,

13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, June 11, 2012, Varenna, Italy

CDCC analysis for breakup of three body projectiles:

T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, M. Yahiro, and K. Katō,

13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, June 11, 2012, Varenna, Italy

Comparison of breakup processes of ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Li}$ with four-body CDCC:

S. Watanabe, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Yahiro,

13th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, June 11, 2012, Varenna, Italy

以下, ポスター発表.

Theta vacuum and entanglement interaction in the three-flavor Polyakov-loop extended Nambu-Jona-Lasinio model:

T. Sasaki, J. Takahashi, Y. Sakai, H. Kouno, M. Yahiro,
Quark Matter 2012, August 16, Washington D.C., USA.

《国内での講演》

有限 θ における QCD 相構造の研究:

佐々木崇宏, 高橋純一, 境祐二, 河野宏明, 八尋正信,
三者若手夏の学校, 2012年8月5日, エバーグリーン富士 (山梨県)

虚数化学ポテンシャル領域におけるデバイ遮蔽効果の研究:

高橋純一, 佐々木崇宏, 永田桂太郎, 斎藤卓也, 河野宏明, 八尋正信, 中村純
三者若手夏の学校, 2012年8月3日, エバーグリーン富士 (山梨県)

有限 θ における中間子質量と符号問題:

佐々木崇宏, 河野宏明, 八尋正信,
日本物理学会秋季大会, 2012年9月12日, 京都産業大学

虚数化学ポテンシャル領域におけるカラーデバイ遮蔽効果の研究:

高橋純一, 佐々木崇宏, 永田桂太郎, 斎藤卓也, 河野宏明, 八尋正信, 中村純
日本物理学会秋季大会, 2012年9月13日, 京都産業大学

QCD 有効模型と高密度天体:

長野邦裕, 佐々木崇宏, 河野宏明, 八尋正信,
第118回日本物理学会九州支部例会, 2012年12月8日, 琉球大学

シータ真空を考慮した QCD 相構造の研究:

佐々木崇宏, 河野宏明, 八尋正信,
第118回日本物理学会九州支部例会, 2012年12月8日, 琉球大学

格子 QCD を用いたクォーク間相互作用の有限温度・有限密度領域における研究:
高橋純一, 佐々木崇宏, 永田桂太郎, 斎藤卓也, 河野宏明, 八尋正信, 中村純
第 118 回日本物理学会九州支部例会, 2012 年 12 月 8 日, 琉球大学

有効模型によるクォーク-反クォーク間ポテンシャルの導出:
石井優大, 佐々木崇宏, 河野宏明, 八尋正信
第 118 回日本物理学会九州支部例会, 2012 年 12 月 8 日, 琉球大学

有限 θ での符号問題に関する PNJL 模型を用いた解析:
佐々木崇宏, 河野宏明, 八尋正信,
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学

格子 QCD によるカラーデバイ遮蔽質量の虚数化学ポテンシャル依存性の研究:
高橋純一, 佐々木崇宏, 永田桂太郎, 斎藤卓也, 河野宏明, 八尋正信, 中村純
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学

微視的理論による中性子過剰 Ne 同位体の系統的反応解析:
蓑茂工将, 木村真明, 緒方一介, 清水良文, 八尋正信
2012 年度原子核三者若手夏の学校, 2012 年 8 月 5 日, ホテル エバーグリーン富士 (山梨
県)

g 行列相互作用を用いた軽い標的核による陽子弾性散乱の記述:
豊川将一, 蓑茂工将, 河野通郎, 八尋正信
2012 年度原子核三者若手夏の学校, 2012 年 8 月 6 日, ホテル エバーグリーン富士 (山梨
県)

4 体 CDCC を用いた ${}^6\text{Li}$ 入射核反応の解析:
渡邊慎, 松本琢磨, 蓑茂工将, 緒方一介, 八尋正信
2012 年度原子核三者若手夏の学校, 2012 年 8 月 6 日, ホテル エバーグリーン富士 (山梨
県)

Eikonal reaction theory for one- and two-neutron removal reactions:
Kosho Minomo, Takuma Matsumoto, Kazuyuki Ogata, and Masanobu Yahiro
The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20),

August 23, 2012, Fukuoka, Japan

Four-body CDCC analysis for breakup reactions of three-body projectiles:

T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, M. Yahiro, K. Katō

The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20),

August 23, 2012, Fukuoka, Japan

Calculation of one- and two-neutron removal cross section for neutron rich nuclei:

松本琢磨, 蓑茂工将, 緒方一介, 八尋正信

日本物理学会秋季大会, 2012年9月11日, 京都産業大学

${}^6\text{Li}$ 弾性散乱における4体分解の効果:

渡邊慎, 松本琢磨, 蓑茂工将, 緒方一介, 八尋正信

日本物理学会秋季大会, 2012年9月11日, 京都産業大学

Application of the eikonal reaction theory to two-neutron removal:

蓑茂工将, 松本琢磨, 緒方一介, 八尋正信

日本物理学会秋季大会, 2012年9月12日, 京都産業大学

反応断面積の解析によるMg同位体の変形度の決定:

渡邊慎, 蓑茂工将, 木村真明, 武智麻耶, 福田光順, 西村太樹, 鈴木健, 松本琢磨, 清水良文, 八尋正信

日本物理学会秋季大会, 2012年9月12日, 京都産業大学

CDCCとCSMによる中性子剥離反応解析について:

松本琢磨

理研ミニワークショップ「原子核クラスター構造、反応研究における戦略ミーティング」, 2012年11月9日, 理化学研究所

中性子過剰炭素同位体における全反応断面積の偶奇性:

佐々部悟, 古立直也, 田上真伍, 蓑茂工将, 松本琢磨, 清水良文, 八尋正信

第118回日本物理学会九州支部例会, 2012年12月8日, 琉球大学

全反応断面積の解析による ${}^{31}\text{Ne}$ の変形ハロー構造の解明:

蓑茂工将, 木村真明, 緒方一介, 清水良文, 八尋正信

第 118 回日本物理学会九州支部例会, 2012 年 12 月 8 日, 琉球大学

全反応断面積の解析で探る変形ハロー核の新たな候補:

渡邊慎, 田上真伍, 蓑茂工将, 木村真明, 武智麻耶, 福田光順, 西村太樹, 鈴木健, 松本琢磨, 清水良文, 八尋正信

第 118 回日本物理学会九州支部例会, 2012 年 12 月 8 日, 琉球大学

陽子弾性散乱における微視的光学ポテンシャルの標的核依存性:

豊川将一, 蓑茂工将, 八尋正信

第 118 回日本物理学会九州支部例会, 2012 年 12 月 8 日, 琉球大学

二重畳み込み模型を用いた ^4He 弾性散乱の解析:

江頭慧, 蓑茂工将, 渡邊慎, 佐々部悟, 松本琢磨, 八尋正信

第 118 回日本物理学会九州支部例会, 2012 年 12 月 8 日, 琉球大学

微視的構造・反応理論を用いた全反応断面積の解析による不安定核構造の決定:

蓑茂工将, 豊川将一, 渡邊慎, 松本琢磨, 木村真明, 緒方一介, 清水良文, 八尋正信

微視的有効相互作用の理論と核構造・核反応, 2013 年 2 月 12 日, 京都大学基礎物理学研究所

Analyses of breakup, one- and two-neutron removal reactions for three-body projectile:

T. Matsumoto

Coexistence of weak and strong binding in unstable nuclei and its dynamics, March 7, 2013, Kyoto, Japan

Determination of the deformed and halo structure of neutron-rich Ne and Mg isotopes by a fully microscopic framework:

K. Minomo, M. Toyokawa, S. Watanabe, M. Kimura, T. Matsumoto, K. Ogata, Y. R. Shimizu, and M. Yahiro

Coexistence of weak and strong binding in unstable nuclei and its dynamics, March 7, 2013, Kyoto, Japan

Breakup effects on ^6Li elastic scattering:

S. Watanabe, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Yahiro

Coexistence of weak and strong binding in unstable nuclei and its dynamics, March

11, 2013, Kyoto, Japan

不安定核における 1 および 2 中性子剥離断面積の計算:

松本琢磨, 蓑茂工将, 緒方一介, 八尋正信

日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学

微視的反応模型による炭素同位体入射反応の系統的解析:

佐々部悟, 古立直也, 田上真伍, 蓑茂工将, 松本琢磨, 清水良文, 八尋正信

日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学

微視的反応理論による陽子弾性散乱の系統的解析:

豊川将一, 蓑茂工将, 八尋正信

日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学

反応断面積の解析で探る Mg 同位体の変形及びハロー構造:

渡邊慎, 蓑茂工将, 嶋田充宏, 田上真伍, 木村真明, 武智麻耶, 福田光順, 西村太樹, 鈴木健, 松本琢磨, 清水良文, 八尋正信

日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学

量子数射影法を用いた四面体変形核の研究:

田上真伍, 清水良文, J. Dudek,

2012 年度原子核三者若手夏の学校, 2012 年 8 月 3 日, エバーグリーン富士 (山梨県).

非軸対称変形核におけるエキゾチックな回転運動の研究:

田上真伍, 藤岡雄大, 清水良文,

日本物理学会秋季大会, 2012 年 9 月 12 日, 京都産業大学.

ガウス基底を用いた Gogny-HFB 計算による軸対称変形した不安定核の研究:

嶋田充宏, 田上真伍, 清水良文,

第 118 回日本物理学会九州支部例会, 2012 年 12 月 8 日, 琉球大学千原キャンパス.

量子数射影法を用いた四面体変形核の研究:

田上真伍, 清水良文, J. Dudek

第 118 回日本物理学会九州支部例会, 2012 年 12 月 8 日, 琉球大学千原キャンパス.

原子核の偏長変形優勢における Strutinsky 法の巨視的部分の寄与:
高原哲士, 田嶋直樹, 清水良文,
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学東広島キャンパス.

変形した不安定核での 2 中性子相関:
嶋田充宏, 田上真伍, 清水良文,
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学東広島キャンパス.

量子数射影による四面体変形核の分析—四面体群のスペクトルとの比較:
田上真伍, 清水良文, J. Dudek,
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学東広島キャンパス.

Exotic shape and rotation at high-spin states:
S. Tagami, Y. Fujioka, Y. R. Shimizu, and J. Dudek,
RCNP International Workshop on “Physics Opportunities using Compton Suppressed
Ge Clover Array (Clover12)”, 7 – 8 Dec., 2012, RCNP, Osaka, Japan.

Application of quantum number projection method to tetrahedral shape and high-spin
states in nuclei:
S. Tagami, Y. Fujioka, Y. R. Shimizu, and J. Dudek,
Riken International Workshop on “Computational approaches to nuclear many-body
problems and related quantum systems”, 12 – 16 Feb., 2013, Riken, Wako, Japan.

以下, ポスター発表.

Potential between a quark and an anti-quark in the imaginary chemical potential region:
J. Takahashi, T. Sasaki, Y. Sakai, K. Nagata, T. Saito, H. Kouno, M. Yahiro, A.
Nakamura,
Few Body 20, August 21, Fukuoka, Japan.

Comparison of breakup processes of ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Li}$ with four-body CDCC:
S. Watanabe, T. Matsumoto, K. Minomo, K. Ogata, and M. Yahiro
The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20),
August 20, 2012, Fukuoka, Japan.

Study of rotational motions associated with exotic nuclear shapes by angular momentum projection method:

S. Tagami, Y. R. Shimizu, and J. Dudek,

Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (COMEX4), October 24, 2012, Shonan Village Center, Japan.

外部資金

《 文部省科学研究費補助金以外の外部資金 》

文科省科学研究費補助金、特別研究員奨励費

微視的理論による不安定核の構造と反応の系統的解明

研究代表者: 蓑茂工将

文部省科学研究費補助金、特別研究員奨励費

第一原理計算に基づいた有効模型による QCD 相図・QCD 状態方程式の定量的決定

研究代表者: 佐々木崇宏

文科省科学研究費補助金、基盤研究 (C)

高スピン・エキゾチック変形原子核の研究

研究代表者: 清水良文

日本学術振興会特別研究員等及び共同研究の採択 (学外からの受け入れを含む)

蓑茂工将、日本学術振興会特別研究員 (DC2)

佐々木崇宏、日本学術振興会特別研究員 (DC1)

学部 4 年生卒業研究

【前期】 菅野淳平、難波俊太、森本光、米村浩司 (担当: 清水)

「素粒子・原子核物理入門」の輪講

【後期】 菅野淳平、難波俊太、米村浩司 (担当: 八尋、清水、松本)

場の量子論、核反応論、核構造論の輪講・研究

修士論文

嶋田充宏: (指導教員、清水良文): Gogny-HFB 計算による変形した不安定核のダイニュートロン相関

高橋純一: (指導教員、八尋 正信): 2 フレーバー格子 QCD によるクォーク間ポテンシャルの化学ポテンシャル依存性の決定

長野邦裕: (指導教員、八尋 正信): QCD 相転移と高密度天体

渡邊慎:(指導教員、八尋正信、松本琢磨): ${}^6\text{Li}$ 入射反応における分解効果

博士論文

蓑茂工将:(指導教員、八尋正信): Determination of deformed and halo structure of unstable nuclei by fully microscopic theory (純微視的理論による不安定核の変形・ハロー構造の決定)[2013年3月授与]

その他の活動と成果

清水良文:日本物理学会九州支部委員 (2011年9月～2013年3月)

蓑茂工将:北海道大学原子核理論研究室セミナー

蓑茂工将:大阪大学原子核理論研究室セミナー