

計画研究 D01 「中性子星と核物質の理論研究」 H26 年度の活動報告

中性子星は高密度側では多成分高密度物質、低密度側では非対称核子物質、そして観測されるコンパクト天体現象と多くの側面をもつ研究対象である。本計画研究(D01)では原子核理論・天体理論・凝縮系理論の研究者が協力して、上記の3つの側面から中性子星の物理に迫り、密度変化に伴って起こる相構造・量子相転移の普遍性と多様性を明らかにすることを目指している。

H26年度はH25年度からの公募研究の研究者・連携研究者とともに研究を進めた。H26年度のD01の体制を図1に示す。



図1. H26年度 D01 班(理論班)の体制

以下ではH26年度に得られた研究成果のうち代表的なものについて紹介する。

1. 高密度中性子星物質

高密度中性子星物質で重要な役割を果たすハドロンと核子系・核物質の間に働く相互作用を明らかにするため、ハイペロンやKbarを含む原子核の構造・生成反応の研究を進めている。特に2倍の太陽質量をもつ重い中性子星を支えるためには、ハイペロン間の相互作用やハドロン間の3体力が決定的な役割を果たす。今年度はJ-PARC実験における $4\text{He}(K^-, \pi^-)$ 生成スペクトルと $4\Sigma\text{He}$ のP波共鳴・ ΣN 力の関連、結合チャネル複素スケーリングとフェッシュバッハ射影を組み合わせた $K\text{-pp}$ の分析、中性子過剰 Λ ハイパー核に特徴的な基底状態バリティ反転等の研究が進展した。また、高エネルギー重イオン衝突における $\Lambda\Lambda$ 相関から $\Lambda\Lambda$ 相互作用に制限がつけられることを示した。

成果の一例として、高エネルギーの重イオン衝突で生成される $\Lambda\Lambda$ 対の2粒子運動量相関から $\Lambda\Lambda$ 相互作用に制限を与えた研究[K. Morita, T. Furumoto, A. Ohnishi, Phys. Rev. C 91(2015), 024916]を示す。2粒子運動量相関は粒子源関数と相対波動関数(の自乗)の積分で与えられるため、相対波動関数を通じて相互作用の影響を含んでいる。図2に近年観測された $\Lambda\Lambda$ 相関データからの $\Lambda\Lambda$ 相互作用への制限(クリーム色の領域)を示す。統計が高くないため制限は強くないが、散乱長が負の領域、すなわち束縛状態は存在しないが引力的であることが確認され、ダブルハイパー核からの情報と無矛盾であることが分かった。同じデータに基づいて散乱長が正の領域を示唆する分析結果(オレンジ色の領域)もあるが、この違いは Λ に崩壊する $\Sigma 0$ 粒子の割合についての仮定によるものであることが後の研究で示されており、我々の結果が正しいものと考えられている。こうした手法は十分に生成量がある限り、どのような粒子間の相互作用にも適用可能であり、 $\Omega\text{-p}$ 、 $\Xi\text{-p}$ などの相互作用にも制限がつけられる。

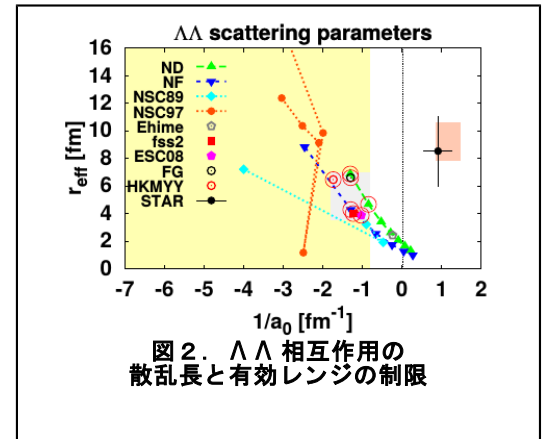


図2. $\Lambda\Lambda$ 相互作用の散乱長と有効レンジの制限

2. 低密度中性子星物質

低密度領域では対称エネルギーの大きさと密度依存性を探る研究が国際的に進んでいる。今年度はカイラル有効場理論に基づく3体力由来のスピンの軌道(LS)力による原子核のLS力問題の解決、中性子過剰核におけるダイ

ニュートロン相関の普遍性の証明等の成果が得られた。また重イオン衝突において対称エネルギーやクラスター相関が π^-/π^+ 比に与える効果が明らかになりつつある。

成果の一つである3体力が鉛アイソトープ・シフトに与える影響[H. Nakada, T. Inakura, Phys. Rev. C91 (2015), 021302(R)]について示す。208Pb以上の鉛アイソトープ半径が理論計算より大きいことは長年の課題であった。この研究では3体力から期待されるスピン・軌道力の密度依存性を取り入れて計算した結果が²⁰⁸Pbにおけるキंक(折れ曲がり)を正確に示すことを明らかにした。核子間の3体力(3N力)は少数系ではよく調べられているが、重い原子核ではあらわな3体力効果は小さく、また媒質効果による密度依存性と区別がつけにくいいため、明確にその影響が明らかにされた例は少ない。長年の問題を解いたことと合わせて、3体力についての重要な成果といえる。

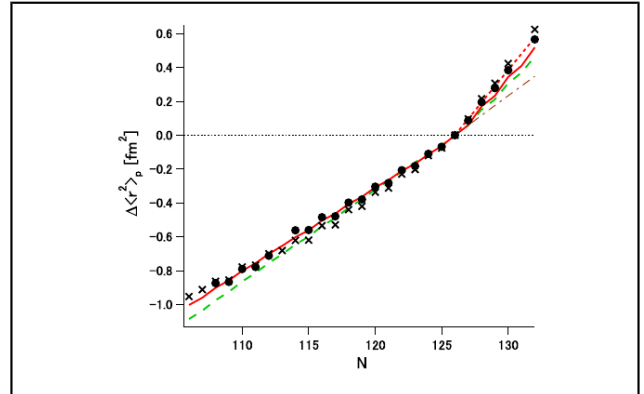


図3. 鉛アイソトープシフトへの3体力効果

3. 天体核物理

天体物理では、状態方程式・非一様相、およびこれらと観測の関係についての研究が進んでいる。今年度は、時間に依存ハートリー・フォック理論に基づく低密度中性子星物質非一様構造の研究、クォーク物質での非一様カイラル相の磁性・自発磁化・安定性と強い磁場下の状態方程式(異・李)、非一様状態相を含むクラスター変分法による新しい有限温度状態方程式の構築、核物質状態方程式の情報をまとめたオンラインデータベース開発、等の成果を得た。

ここでは重要な成果のひとつであるパスタ原子核の研究[B. Schuettrumpf, M. A. Klatt, K. Iida, G. E. Schroeder-Turk, J. A.

Maruhn, K. Mecke, P.-G. Reinhard, Phys. Rev. C 95(2015)025801]について紹介する。奇妙な形の原子核が低密度中性子星物質で現れ得ることはこれまでも指摘されてきたが、ここではソフトマターで見られる複雑な形(ジャイロイド)をもつパスタ原子核が中性子星物質中で静的に、また冷却過程において動的に現れうることが平均場理論計算の結果として示された。エネルギー的には他のパスタ配位よりも少し高いが、有限温度では自由エネルギーに寄与する可能性が十分に期待できる。低密度中性子星物質への新たな知見といえる。

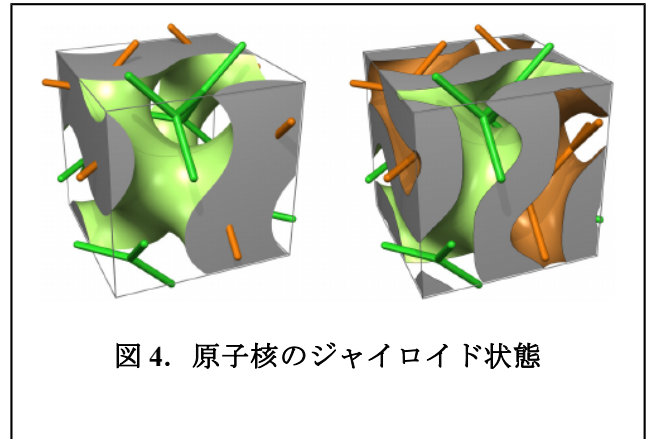


図4. 原子核のジャイロイド状態

これらの成果の他にも連携研究者により、原子核散乱から有効相互作用の密度依存性・3体力効果を明らかにした研究(山本、河野)、超新星物質中で軽い原子核がニュートリノ反応率に及ぼす影響(住吉)、K中間子凝縮とハイペロン混合の関係(武藤)、極低温フェルミ原子ガスの相図解明(大橋、公募研究と重複)などの成果も得られている。

公募研究D01

研究成果報告書に述べられている公募研究の成果を示す。

菺野：中性子星内部で起こる核融合反応に関して、連星中性子星からのX線スーパー・バーストで重要となる $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 系の核融合反応の研究を行った。クーロン障壁以下のエネルギーにおけるこの系の核融合反応断面積に

は複数の共鳴ピークが観測されている。また、最近になり、非共鳴エネルギーにおける核融合反応断面積が $12\text{C}+13\text{C}$ 系及び $13\text{C}+13\text{C}$ 系の断面積に比べて著しく小さくなっていることが見出された。これらの実験的な事実を説明するために、核融合反応で生成される複合核の準位密度の観点から核融合反応断面積のエネルギー依存性を議論した。具体的には、虚部の強さが複合核の準位密度に比例する光学ポテンシャルを用いて結合チャンネル計算を行い、核融合反応断面積を求めた。このアプローチにより、 $12\text{C}+12\text{C}$ 系でできる複合核は $12\text{C}+13\text{C}$ 系及び $13\text{C}+13\text{C}$ 系でできる複合核より比較的低温状態になること、及び $12\text{C}+12\text{C}$ 系でできる複合核の 24Mg は中性子及び陽子ともに偶数である偶偶核のため準位密度がそもそも小さいこと、の2つの要因から $12\text{C}+12\text{C}$ 系の核融合反応断面積が小さくなることを明らかにした。この課題に加え、 $12\text{C}+12\text{C}$ 系及び $28\text{Si}+28\text{Si}$ 系に対する核融合反応断面積の振動現象を解析した。その際、よく核融合反応断面積に対してよく知られている Wong 公式の拡張を提唱した。これは、Wong 公式で用いられるクーロン障壁に関するパラメータを「かすり角運動量」において評価しエネルギー依存性を持たせるように拡張したものである。この拡張した Wong 公式が量子力学的な求められた核融合反応断面積の数値解をよい精度で再現することを明らかにした。この成果を原著論文にまとめ、Physical Review C 誌に発表した。

根村：本研究課題は、なるべく物理点に近いクォーク質量領域において大きな空間体積を持った格子 QCD 計算を行い、ラムダ核子相互作用並びにシグマ核子相互作用の性質を、中心力、テンソル力、スピン軌道力について調べ、そこで得られたポテンシャルを用いて、軽いハイパー核の精密計算を実行し、ストレンジネスを含んだ一般化核力の性質を、これまで以上に定量的に明らかにしていくことを目指すものである。

平成 26 年度は、まず格子 QCD 計算部分の基本的な数値計算手法の開発を 25 年度に引き続き行った。具体的には、25 年度に開発した、ラムダ核子、シグマ核子系をはじめとする複数の南部-Bethe-Salpeter 波動関数を、一度の計算で同時に効率よく計算できる(例えば、クォーク演算子の内部自由度とフェルミ統計性に起因する演算の繰り返しの回数を、unified contraction 法よりも数分の一程度に短縮することができる)アルゴリズムを、複数の GPGPU を利用できるように、CUDA を用いて実装することに成功した。すなわち、筑波大学計算科学研究センターの大型計算機である HA-PACS 上で MPI+OpenMP によるハイブリッド並列動作環境に加えてマルチ GPU による計算が可能となった。

また、 π 中間子の質量が約 470MeV になるような重いクォーク質量での格子 QCD 計算によって、偶パリティの中心力およびテンソル力だけでなく、奇パリティ状態のスピン軌道力ポテンシャルが得られている。この格子 QCD による、新たにスピン軌道力を含む核力ポテンシャルを用いた、4 核子系の精密計算を確率論的変分法を用いて行うことに成功した。現在の結果はまだ予備的なものであるが、従来の偶パリティ状態の中心力並びにテンソル力のみを用いた場合と比較して、核力ポテンシャルに新たに加えられた部分は弱い斥力的寄与を与えている。

安武：本年度は前年度に申請者が提唱した「非球対称星の平衡形状を求める新しい手法」について精査した。この平衡解の研究についての歴史は長く、古くはヤコビ、デデキンド、ディレクレ、リーマン、チャンドラセカールといった名だたる研究者らが取り組んできた理論天文学や応用数学における大問題でもある。先行研究においても厳密解として知られている平衡解もすでにいくつか存在する。ゆえに申請者らの手法によって求めた平衡解がこれらの厳密解と無矛盾かを調べる必要があり、今年度はこれを調べた。

今までで最も良く知られている平衡解は蜂須法によって求められた解であるが、この解と申請者らの解が完全に一致することを申請者は系統的に確かめた。

ただし、これらの解は圧力が密度の関数としてのみ既述されるような、現象論的な状態方程式を仮定したものであった。この手法を現実的な状態方程式にまで拡張した手法としては、瓜生=江里口法とエスピノザラらによる手法の2つだけが存在している。この2つの手法では放射による効果も考慮しており、我々の手法と現状では比べられない。そこで放射過程を取り除いた藤澤法を共同研究者が開発し、この手法による解と申請者の解を比較した。結果として、完全に解は一致し申請者らの手法が完全に正しいことが立証された。

太橋：本年度は、前年度構築した、正常相におけるフェルミ原子気体のスピン帯磁率に対する「拡張された T 行列理論」を、超流動転移温度以下の領域に拡張、BCS-BEC クロスオーバー全領域の超流動相におけるこの物理量の振る舞いを明らかにした。BCS-BEC クロスオーバー領域の正常相では、クーパー対分子の形成に伴ってスピン帯磁率が抑制されるが、超流動転移温度以下では、逆に超流動揺らぎに伴うクーパー対の解離により、スピン帯磁率の抑制が緩和されることを示した。また、その温度変化の詳細な解析により、そうした効果が見られる温度領域の特定を行った。

本年度は更に、比熱に対する強結合補正も研究した。ユニタリ極限近傍では、強い超流動揺らぎにより、超流動転移温度近傍の比熱が非常にエンハンスされることを、ガウス揺らぎの理論に基づいて数値的に明らかにした。また、超流動転移温度以上での比熱の温度変化の解析から、理想分子ボーズ気体とみなせる領域を特定することに成功、これまで知られていた擬ギャップ温度に加え、分子ボーズ気体の領域と、フェルミ原子と分子ボソンが共存する領域を分ける新しい「特徴的温度」が存在することを見出した。

また、これまでの 3 次元系に対する理論を 2 次元フェルミ原子気体に適用できるように拡張、近年観測が報告された BKT 転移を研究した。強結合 T 行列理論の枠組みで、重心運動量ゼロのクーパー対分子数の温度依存性を BKT 転移温度以上で計算、BKT 転移の実験的根拠とされたこの物理量の増大が、BKT 転移を仮定しなくても強い超流動揺らぎだけで説明できることを明らかにした。この結果に基づき、実験は必ずしも BKT 転移を観測したとは断定できないことを指摘した。

木内：連星中性子星合体は地上型重力波干渉計の最も有望な重力波源の一つであり、2018 年頃に本格化する重力波観測では年間約 10 回の合体イベントが観測されると見積もられている。

連星中性子星合体からの重力波が観測された場合、一般相対論の検証といった基礎物理学の根幹にかかわる問題やショートガンマ線バーストの中心動力源解明といった宇宙物理学最大の未解決問題の解決に留まらず、中性子星物質の真の状態方程式、宇宙における鉄より重い R 過程重元素の起源といった原子核物理分野における重要な問いに答えを与える可能性がある。

このような背景の下、本申請課題では連星中性子星合体と磁場をキーワードに研究を行った。主な結果は以下の通りである。

(1) 超大質量中性子星のモデル化：近年における連星中性子星合体の理解が急速に進んだことより、合体後には高温・高速回転中性子星が過渡的に存在することが分かってきた。この星からは観測可能な振幅をもった重力波が放出される。また、星の振動モードは中性子星物質の状態方程式に強く依存する為、重力波は状態方程式を探る探査針と成り得る。しかし、高温・高速回転中性子星の系統的なモデル化はあまり進んでいないのが現状であった。そこで、本研究課題ではカリフォルニア工科大学の研究グループと協力することで高温・高速回転中性子星の系統的なモデル化を行った。

(2) 連星中性子星合体時の磁場増幅：磁場は中性子星の普遍的な特徴の一つであるが、連星合体の過程における磁場の役割は未解明であった。そこで、高解像度数値相対論-磁気流体シミュレーションを実行することで、合体時の星の接触面で生じるケルビン-ヘルムホルツ不安定性が磁場を有意に増幅することを明確にした。この研究によりマグネター磁場を超える磁場強度が実現される可能性が高くなり、原子核状態方程式の磁場による変更など新たな研究課題の創生が期待される。