

計画研究 D01 「中性子星と核物質の理論研究」 H25 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。

H25 年度から始まった D01 班に関連する公募研究としては、下記の 5 件が採択された。H25 年度は公募研究の研究者と協力するとともに、新たに連携研究者として山本安夫氏(理研)、高塚龍之氏(岩手大)、河野通郎氏(九州歯科大)、宮川貴彦氏(愛知教育大)、武藤巧氏(千葉工大)、住吉光介氏(沼津高専)、佐川弘幸氏(会津大)に連携研究者に加わっていただいた。



- 萩野 浩一 (東北大) 質量降着を伴う中性子星における中性子過剰核の核融合反応
- 根村 英克 (筑波大) 格子 QCD によるハイペロン相互作用の研究とハイパー核への展開
- 木内 建太 (京大) 中性子星の星震と核密度状態方程式に関する数値的研究
- 安武 伸俊 (千葉工大) 強磁場中性子星の多次元進化計算と観測比較による内部磁場の制限
- 大橋 洋士 (慶應大) BCS-BEC クロスオーバー領域におけるフェルミ超流体の熱力学と超流動物性

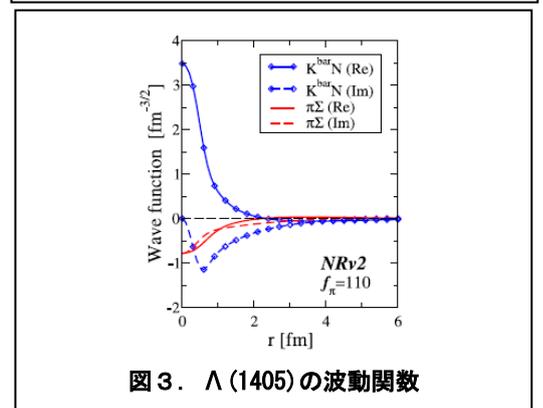
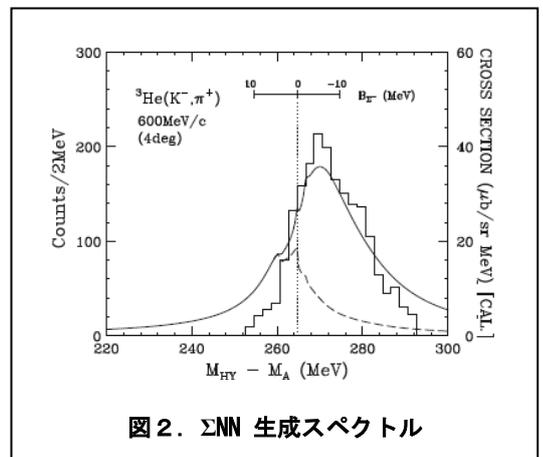
H25 年度の D01 の体制を図 1 に示す。

以下では H25 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 K^{bar} 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、ハドロン間の 3 体力が決定的な役割を果たすため、我々はまずストレンジネスを含む基本的な 3 体系である $K^{\text{bar}}NN$ 3 体系および ΛNN - ΣNN 3 体系の構造および生成スペクトルを解析・予言している。H25 年度はグリーン関数法による ΣNN 、 $K^{\text{bar}}NN$ 生成スペクトル、複素スケール法に基づく $K^{\text{bar}}N$ 、 $K^{\text{bar}}NN$ 3 体系構造等、相互作用と 3 体系研究を進めた。また、 $A=40$ 領域の Λ ハイパー核における超変形状態、陽な 3 体力を取り入れた相対論的平均場理論等についての研究も進んでいる。

成果の一例として、図 2 に 3 バリオン系 ΣNN 状態の生成スペクトルを示す。 ΣNN 状態は ΛNN 状態との結合により ΛNN 3 体力にかかわり、また中間状態でのパウリ排他率から高密度での ΛN 、 ΛNN チャネルの斥力に影響を及ぼすため、その分析は中性子星物質状態方程式の物理にとって重要である。実験データとの比較から 3 バリオン系 ΣNN が極としての強度を持つことが示唆される [T. Harada,



Y. Hirabayashi, *Few-Body Syst* (2013) 54:1205]. 今後、分析を進めることにより Λ NN3 体力の理解を進めることが可能となる。

同様に K^{bar} NN 3 体系も、高密度における K^{bar} の振る舞いを決める上で重要であり、特に K^{bar} N- π Y チャンネル結合はハイペロンを含む物質中での媒質効果を評価するうえで欠かせない。図3に連続状態に埋め込まれた離散状態を扱える複素スケーリング法による $\Lambda(1405)$ 共鳴状態の波動関数を示す[A. Dote, T. Inoue, T. Myo, *Nucl. Phys. A* 912 (2013) 66]。今後 J-PARC にて得られる K^{bar} NN 状態の実験データとの比較により、2 体力、3 体力についての知見を得ていく予定である。

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、半微視的相互作用に基づく核図表全体での魔法数の現れ方、巨大共鳴を含む E1 偏極率と対称エネルギーパラメータ L の相関、重イオン衝突での $3\text{H}/3\text{He}$ 比に対する α 生成の影響、等において新たな知見を得た。また、2 中性子しきい値近辺に中性子対が広がった状態が普遍的に現れることを見出した。

成果の一つである魔法数の陽子数・中性子数依存性を図4に示す。我々は半微視的核子間有効相互作用を用いて核図表全体で理論を判別する一つの試金石である魔法数の現れ方を調べ、有効相互作用の一つ(M3Y-P6)が、現存するデータとほぼ矛盾しない魔法数を示すことが分かった。さらに、重い不安定核や超重核での魔法数に対する予言を行っている。[H. Nakada, K. Sugiura, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2014(2014) 033D02]。

中性子過剰核における中性子対の性質解明は、対相関を通じて中性子星の冷却に重要であるとともに、ドリップした中性子が原子核を取り囲むインナークラストの物理を議論するうえで欠かせない情報である。中性子過剰核では、2 中性子移行振幅が核外に大きく浸出す特異な対集団モードが存在しえることを我々は理論的に予言している。今年度の研究では、この特異集団モードがダイニュートロン相関を示すことを示した。結果として図5に示すように中性子過剰核では非常に弱束縛な中性子過剰核での対回転モードが現れ、2 中性子移行強度が大きくなる[H. Shimoyama, M. Matsuo, *Phys. Rev. C* 88 (2013), 054308]。

また、この集団モードは、中性子分離エネルギー近傍に出現する巨大対振動モードとして安定核でも出現すること、したがって、閾値近傍で普遍的に出現する可能性があることを示した。

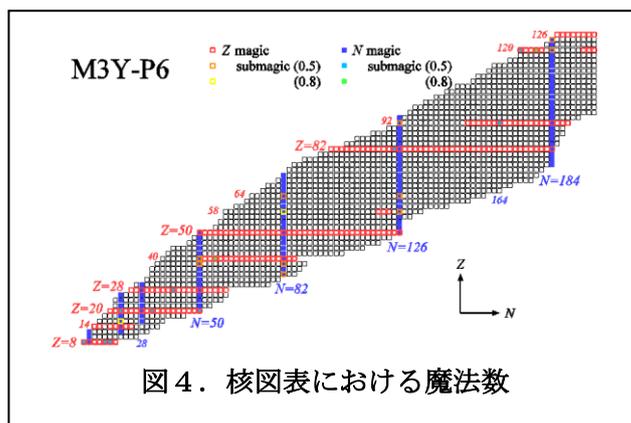


図4. 核図表における魔法数

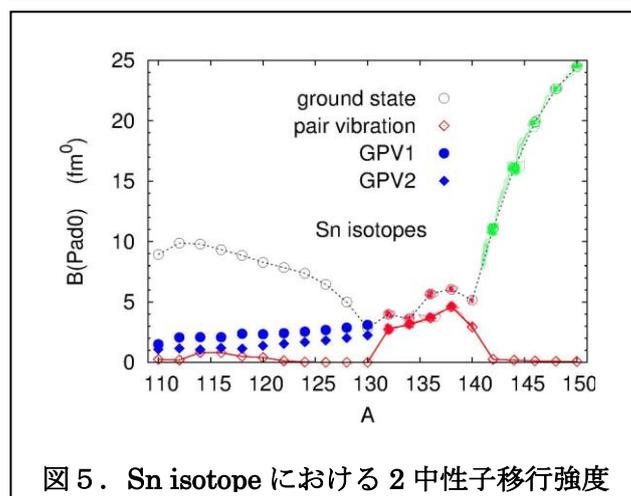


図5. Sn isotope における 2 中性子移行強度

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、低質量中性子星の質量・半径が核物質の状態方程式パラメータを組み合わせた1変数により記述できることの指摘、カイラルQMCモデルに基づく非一様領域を含む状態方程式構築、現実的な状態方程式を用いたクラスト振動の分析による原子核飽和密度パラメータの制限、高密度領域で現れる非一様カイラル凝縮が引き起こす速い冷却機構の発見等の成果が得られた。

今年度の代表的な成果の一つに、Quark Meson Coupling 模型による中性子星物質状態方程式構築がある。Quark Meson Coupling 模型は、バリオン内部のクォークが中間子と結合するとともに、内部のグルーオンの効果によってバリオンごとに異なる質量の密度依存性が現れることを取り入れられる模型である。図6に示すように、QMCモデルの計算結果は中性子星コアにおいてハイペロンが現れるが、2倍の太陽質量をもつ中性子星を支えられるという結果が得られている[T. Miyatsu, S. Yamamuro, K. Nakazato, ApJ 777 (2013), 4]。重い中性子星パズルの一つの解決方法を与えた結果といえる。

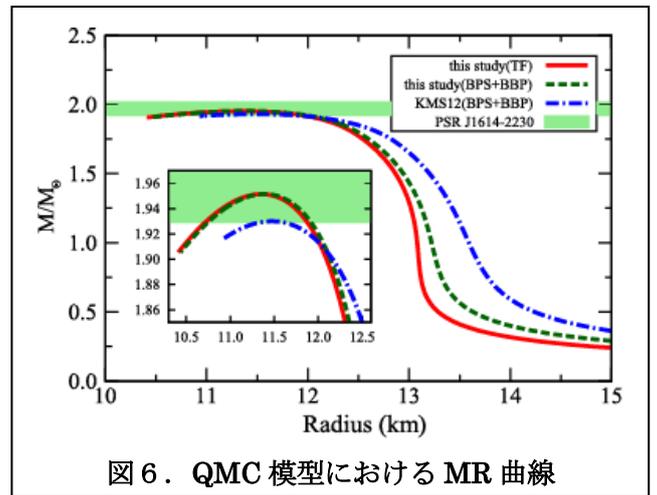


図6. QMC 模型における MR 曲線

3つのカテゴリーには必ずしも分類できないが、連携研究者によるカイラル有効場理論からの2体・3体核力、多ポメロン交換からの3体力、ハドロン・クォーク・クロスオーバー等に基づく状態方程式(河野、山本、高塚)もH25年度の重要な成果である。

公募研究D01

以下では中間評価報告書に記した公募研究の成果を示す。

萩野: 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12C+12C系の核融合反応の研究を行った。特にクーロン障壁より高いエネルギー領域における核融合反応断面積の振動現象を解析し、同種粒子系に対する全波動関数の(反)対称化の効果及び最外殻核子の弾性的移行過程の効果により12C+12C, 12C+13C, 13C+13C系に見られる核融合反応断面積の振動を統一的に理解できることを明らかにした。さらに、クーロン障壁より低いエネルギーにおける12C+12C系の核融合反応の研究も進めており、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が理解できそうであるという予備的な結論を得つつある。

根村: 本研究では、ハイペロンポテンシャルを導出するために、Nambu-Bethe-Salpeter(NBS)波動関数の格子QCD計算を行う必要がある。そのため、大型計算機の使用が不可欠である。物理点になるべく近い格子QCD計算では、フレーバSU(3)対称性の破れを直接扱う必要があるため、計算するべきチャンネルが膨大になり、その各チャンネルの計算を系統的に効率よく行うことが求められる。NBS波動関数を求める際の数値計算の主要部分(Wick contractionを計算する部分)のアルゴリズムの抜本的な整備をまずすすめた。核子だけでなく、ラムダやシグマ、グザイなど、ハイペロンを含む複数(例えば52チャンネル)のNBS波動関数を、一度の計算で同時にかつ効率よく計算することのできるアルゴリズムを開発した。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に成功した。大型計算機(BlueGene/Q)上で、分散メモリ用の並列処理(MPI)と共有メモリ用の並列処理(OpenMP)を同時に利用したハイブリッド並列実行が可能であり、MPI並列数とスレッド並列数の様々な組み合わせにおいて、安定して効率よく計算を行うことが可能である。

安武: 本年度の研究成果は、主に以下の3つである。1) 強磁場中性子星の構造や磁場分布をもとにその時間的推移(進化計算)を追えることに成功した。2) 中性子星内部の状態方程式に関して、質量が重い中性子星の内部でのクォーク=ハドロン相転移を仮定し、非一様構造における表面張力やクォーク有効模型(今回、我々が用いたのはnon-local NJL模型)におけるベクター項の強さに制限をかけることに成功した。3) 現実的な星の状態方程式を使って完全に回転星の進化を計算をする手法は、まだ確立していない。今年度、我々はその問題に対する突破口ともいえる手法を提案した。その手法では、質量座標系に基づき、現実的な状態方程式(パロクリニック)で回転平衡形状を得ることができる。

大橋: 強結合フェルミ原子気体のスピギャップ温度とスピギャップ領域をBCS-BECクロスオーバー全域で理論的、かつ定量的に決定した。更に、スピギャップ温度と擬ギャップ温度との関連も明らかにした。スピインバランスが大きいフェルミ原子気体におけるスピ偏極率の有効磁場依存に関する実験結果をフィッティングパラメータなしで理論的に説明することに成功、この実験に関し当該研究領域で議論となっていた擬ギャップ現象との矛盾を解消した。

木内: 中性子星が元来保持する磁場が連星中性子星合体過程で増幅される可能性は古くより指摘されてきたが、世界最高解像度の磁気流体-数値相対論シミュレーションを行い磁場増幅過程を解明した。連星中性子星合体後に形成される大質量星中性子星はマグネタークラスの磁場を保有することが分かった。