

# 計画研究 D01 「中性子星と核物質の理論研究」 H27 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。

H27 年度から後半の公募研究が開始され、D01 班関連では以下の5件が採択された。

- 木内 建太 (京大) 連星中性子星合体によるマグネター形成と核物質状態方程式
- 大橋 洋士 (慶應大) 非平衡状態のフェルミ原子ガス超流動を用いて中性子星の冷却機構を解明する理論研究
- 新田宗土 (慶應大) 中性子星において回転する超流動体の研究
- 古本猛憲 (横浜国大) 重イオン弾性散乱による高密度領域の核媒質効果の分析
- 祖谷元 (国立天文台) 中性子星観測から迫る原子核飽和パラメータの制限

H25 年度の D01 の体制を図1に示す。

以下では H27 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、ハイペロンや反K中間子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 E10 実験における  $6\text{Li}(\pi^-, K^+)$  生成スペクトルの解析と  $\Sigma, \Lambda$  核間ポテンシャルの分析、 $K$ -pp におけるダブルポールの存在の可能性を指摘、 $\Lambda$  粒子による Be や Ar 同位体における超変形状態の変化、J-PARC E31 実験における  $K$ -d 散乱反応断面積の3体散乱方程式による解析、重イオン衝突でのハドロン相関によるハドロン相互作用の制限、等の研究が進展した。

ここでは反K中間子と核子( $K^{\text{bar}}N$ )の相互作用の理解に決定的な  $\Lambda(1405)$  の性質を実験で検証可能な形で示した研究 [S. Ohnishi, Y. Ikeda, T. Hyodo, W. Weise, Phys. Rev. C 93 (2016), 025207] を紹介する。 $K^{\text{bar}}N$  相互作用と反K中間子核の関係について近年理解されてきたのが、エネルギーに依存するポテンシャルと依存しないポテンシャルを比較すると、前者は浅く束縛する原子核を作るのに対して、後者は反K中間子核が深く束縛することであり、この違いを観測可能量で調べることは重要となる。この研究では2つのポテンシャルについて3体反応計算を行い、現れるスペクトルの形が有意に異なることを示した。A01 班の実験データが待たれる。



図1. H27 年度 D01 班(理論班)の体制

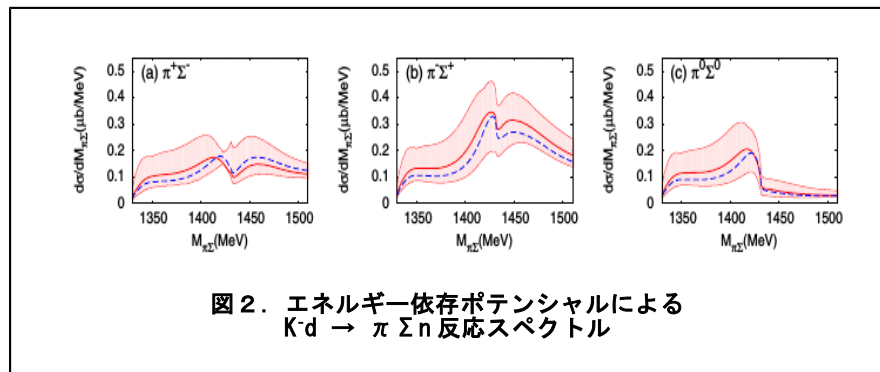


図2. エネルギー依存ポテンシャルによる  $K^{\text{bar}}d \rightarrow \pi \Sigma n$  反応スペクトル

## 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体力由来のスピン軌道(LS)力による球形原子核の荷電半径問題の解決、中性子星内殻における原子核励起状態の密度汎関数理論による分析、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  $\pi^-/\pi^+$ 比に反映される機構を解明した。

ここではB01班で測定が予定されている錫(Sn)原子核衝突における  $\pi^-/\pi^+$ 生成比が高密度における対称エネルギーとどのように関連しているかを新たに開発した輸送模型を用いて調べた研究 [N. Ikeno, A. Ono, Y. Nara, A. Ohnishi, Phys. Rev. C 93 (2016), 044612] について示す。核密度を越えた領域での対称エネルギーの大きさは中性子星の半径を決定する重要な物理量であり、中性子過剰な重イオン衝突からの  $\pi^-/\pi^+$ 比によって明らかになると期待されてきた。ここでは反対称化分子動力学(AMD)とハドロン輸送模型(JAM)を組み合わせた新たな模型によって生成比が対称エネルギー・クラスター生成機構への依存性を調べた。単純には  $\pi^-/\pi^+$ 比は  $(N/Z)^2$  に比例すると考えられてきたが、これは高密度・高運動量の核子に限って見た場合の関係式となることを明らかにし、またクラスター生成を動的に取り入れた場合、対称エネルギーへの依存性が小さくなることを示した。高密度での対称エネルギーを決定するには、 $\pi^-/\pi^+$ 比のみでなく、他の物理量と組み合わせることが必要であることを示している。

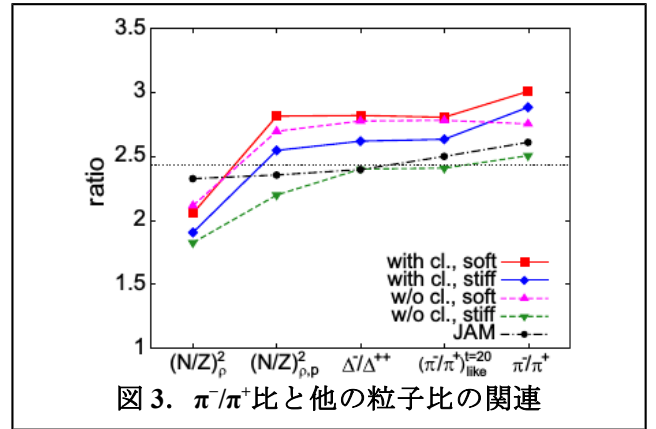


図3.  $\pi^-/\pi^+$ 比と他の粒子比の関連

## 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、中性子星内部で現れうる超重元素の一粒エネルギー計算(飯田)、クォーク物質での非一様カイラル相の磁性と揺らぎに対する安定性(巽・李)、強い磁場下の状態方程式と第3分岐の可能性(巽・祖谷)、非一様状態相を含むクラスター変分法による有限温度核物質状態方程式作成(中里)、等の成果を得た。

ここでは非一様カイラル凝縮と揺らぎを取り入れた高密度領域でのQCD相転移についての研究成果 [S. Karasawa, T.-G. Lee, T. Tatsumi, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016 (2016), 043D01] を示す。高密度領域で1次のQCD相転移が存在する場合、一般に状態方程式は柔らかくなるため、中性子星の状態方程式を決定する上でその存否と相転移密度を決定することが重要である。この研究では非一様カイラル凝縮と揺らぎの効果をともし取り入れ、熱・量子揺らぎ効果によって非一様相が広がることを示した。この研究は高密度において1次相転移が存在することを支持しているが、その転移密度は定量的には与えられていない。今後の課題といえる。

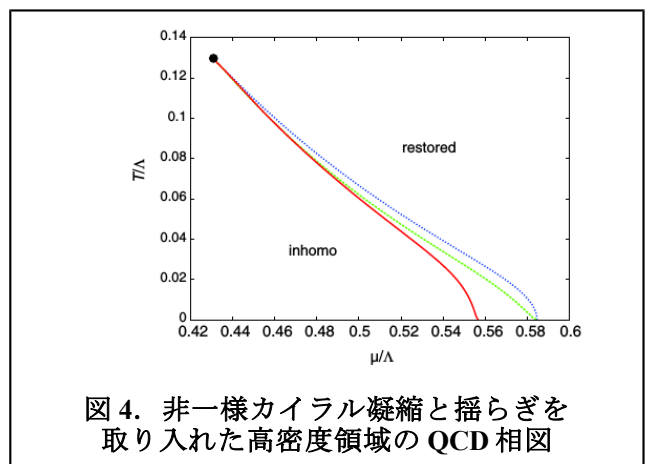


図4. 非一様カイラル凝縮と揺らぎを取り入れた高密度領域のQCD相図

これ以外の研究でも、連携研究者による星震学からの状態方程式制限、冷却原子からの中性子物質状態方程式K凝縮研究等が進んでいる。

## 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引用する。

本内: 今年度2月11日にアメリカの Advanced LIGO から人類初の重力波直接観測に成功したという報告があった。アインシュタイン最後の宿題と題された重力波の直接検出とブラックホールの2重連星の存在証明がもたらした科学的意義は計り知れない。宇宙を見る新しい目として重力波天文学が開闢したが、連星ブラックホール以外にも中性子星からなる連星合体も地上型重力波干渉計の有望なターゲットである。Advanced LIGO に加え、イタリアフランスの Advanced VIRGO、日本の KAGRA も本格観測を控えていることから、近い将来連星中性子星合体からの重力波が観測される可能性は高い。

連星ブラックホールの合体と異なり、連星中性子星合体からの重力波は核密度状態方程式、ショートガンマ線バーストの中心動力源、速い中性子捕獲反応による重元素合成に関する重要な知見が得られると期待されている。連星中性子星合体は激しい動的現象であるため、解析的な手法を用いた理論研究は不可能である。数値相対論と呼ばれる数値シミュレーションが唯一の方法であり、本研究ではこれを採用する。特に中性子星磁場に着目し、連星合体における磁気流体効果をスーパーコンピュータで調べた。本課題に関する論文を主著者として1遍科学雑誌に掲載した。また、関連する研究課題について主著者として1遍、共著者として1遍発表済みである。さらに国際会議における招待講演を2件、一般講演を4件行い、また国内学会における講演を2件行った。

太橋: フェルミ原子ガスの BCS-BEC クロスオーバー領域における熱力学ポテンシャルを Nozieres と Schmitt-Rink によるガウス揺らぎの理論の枠内で数値的に評価するアルゴリズムを開発した。それに基づき、超流動転移温度以上のノーマル相における比熱の温度依存性を、弱結合 BCS 領域から強結合 BEC 領域まで明らかにした。また、リチウム6フェルミ原子気体のユニタリ極限で観測された比熱の実験結果と比較し、フィッティングパラメータなしで定量的に良く一致することを示した。更に、比熱の温度変化を詳細に分析することで、(1)フェルミ原子ガスの領域、(2)超流動揺らぎが支配する領域、(3)強く結合した分子ボソンの領域、をフェルミ原子気体の温度-相互作用相図上で特定することに成功、超流動相と併せ、系の相図を完成させた。

上述の理論を超流動転移温度以下の超流動状態に拡張、絶対零度近傍のユニタリ領域における内部エネルギー(状態方程式)の振る舞いを明らかにした。計算された内部エネルギーは、熱揺らぎがほとんどない絶対零度近傍であるにもかかわらず、BCS-Leggett の平均場理論から計算された値に比べ低く、量子揺らぎが重要であることを示している。また、近年、この領域のリチウム6フェルミ原子ガス超流動で観測された内部エネルギーを定量的レベルで説明することにも成功した。

こうして得られた内部エネルギーを、中性子星研究で知られている状態方程式の理論結果と比較、飽和密度領域近傍まで良い一致を示すことを明らかにした。中性子星での状態方程式では AV18 など、中性子散乱実験で得られた phase shift を再現する複雑な有効ポテンシャルが用いられているが、今回の結果は、少なくとも低密度領域においては(フェルミ原子気体の場合に支配的な) s 波散乱成分が中性子星の状態方程式に支配的な寄与をしていることを示唆している。

新田: 磁場下のトリプレットの中性子超流動を Ginzburg-Landau 理論を用いて解析した。基底状態を決定し、整数渦の解を構成しその性質を調べた。渦の内部で自発磁化があることを見出した。

高密度 QCD のクォーク物質において、カラーフレーバー固定相においては非アーベリアン渦が存在するが、それによるアハラノフ・ボーム効果を発見した。渦のコアには、マヨラナ・フェルミオンと南部ゴールドストーンモードが局在することが知られていたが、それらの間の相互作用を決定した。

古本：本研究の目的は、地上で実験観測可能な原子核散乱反応から飽和密度を超えた高密度領域の情報を引き出すことである。そのため、本研究に用いる微視的核反応モデルの改良を行い、理論的に分析を進めた。

本研究の分析方法は世界的に初めての試みとなるため、モデルの信頼性を確立する必要がある。そのため本研究におけるモデルを用いた系統的な分析を行った。その結果、飽和密度を越えた高密度領域の情報を引き出すことが可能であると示した。その中で、複数の核子間に働く多体力の内、三核子間に働く三体力効果が最も重要な役割を担っていることを明らかにした。さらに、質量依存性やエネルギー依存性など、反応系によって高密度媒質効果の詳細な見え方が異なることも示すことができた。これらの成果は、現在、論文としてまとめている最中である。

また、この反応系による高密度媒質効果の影響の違いから、最適な反応系が存在することが明らかとなり、今後の研究方針に役立つ成果を挙げることができた。

本年度は、ポーランドのクラクフで行われた国際会議（5th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM15)）に招待され、本研究について講演を行った。また、ポーランドのピアスキで行われた国際会議（Mazurian Lakes Conference on Physics）で口頭発表ならびにポスター発表を行った。

祖谷：中性子星の表面近くのクラストと呼ばれる領域は、標準的な質量の中性子星では星半径のせいぜい1割程度しかない。しかし、クラストの最深部での密度はおよそ原子核飽和密度となることが理論的に予想されているため、この薄いクラストでの現象を観測することで、地球上での原子核実験から得られる情報とは質の異なる制限が得られると期待される。そこで、我々は巨大フレア現象の減衰過程で発見された準周期的振動に着目している。巨大フレア現象は軟 $\gamma$ 線リピーターで観測されているが、その中心天体は強磁場中性子星と考えられる。そのため、発見された準周期的振動も中心天体の振動に強く依存すると思われる。特に、低い振動数を説明する方法は限られており、そのうちの最もシンプルなものとしてクラストにおけるズレ振動がある。

これまで、我々は観測された準周期的振動数をクラスト振動と同定することで原子核飽和パラメータへの制限を試みてきた。これに対して、同じ天体から新たな準周期的振動数が最近発見された。そこで、これまでに観測された準周期的振動を含む、観測された全ての振動数の理論的説明に取り組んだ。この結果、クラスト振動を用いたこれまでの枠組みで観測された準周期的振動を説明することができることがわかった。これにより、軟 $\gamma$ 線リピーターで観測される準周期的振動の起源としてクラスト振動が有力であることが示せた。