

計画研究 D01 「中性子星と核物質の理論研究」 H24 年度の活動報告

中性子星は低密度から高密度にわたる広いダイナミックレンジを持ち、核子（陽子、中性子）・ハイペロン・K-中間子・クォークのように多彩な構成粒子を含む多体問題の宝庫である。これまでの研究では星内部の情報や相互作用情報の不足のため、多くの問題が未解決のまま残っている。ところがこれらの問題のいくつかを今後数年間で解決できる可能性がでてきた。実験（ストレンジネス核、中性子過剰核、冷却原子）、観測（X線、Shapiro delay）、理論（量子多体論、格子 QCD、星震理論）等の進展により、中性子星核物質の状態方程式（EOS）を定められる可能性があり、かつ、ここでは日本が大きな役割を果たしうる。

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知恵を出し合い、高密度側では多成分最高密度低温物質、低密度側での非対称核子物質、そしてこれらを含む観測とのインターフェースとして中性子星核物質 EOS とコンパクト天体現象の3つの方向から中性子星の物理に迫り、密度変化により起こる相構造・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。H24年度は図1に示す体制で研究を進めた。

以下では H24 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 $K^{\bar{b}}$ 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 $K^{\bar{b}}NN$ 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。また現象論的な研究として、3体結合を取り入れた相対論的平均場理論(RMF)による中性子星物質状態方程式の構築を行っている。図2に示すように、ハイパー核の性質を再現する相互作用を用いても2倍の太陽質量を持つ中性子星を支えることが可能であることが分かる [K. Tsubakihara, A. Ohnishi, Nucl. Phys. A914 (2013), 438]。

一方でハドロンは原子核の構造を調べる探針ともなる。図3に示すように、sd核領域の Λ ハイパー核 ($^{25}\Lambda\text{Mg}$) の励起スペクトルを解析することで、三軸非対称に変形した核子系との相互作用により特徴的な励起スペクトルが現われることを予言した [M. Isaka, M. Kimura, A. Dote, A. Ohnishi, Phys. Rev. C 87 (2013), 021304(R)]。

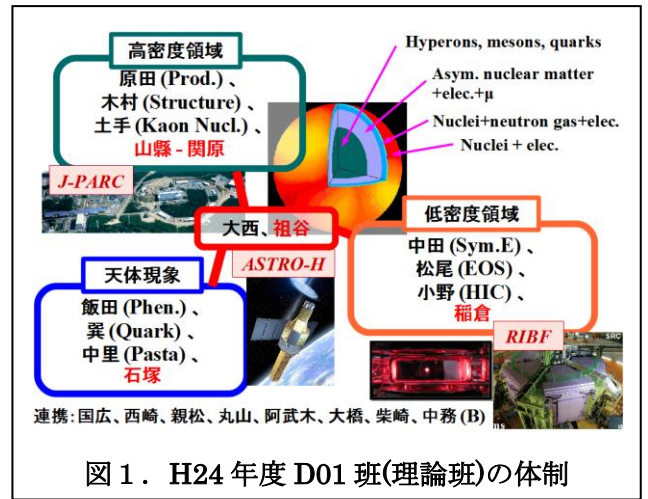


図1. H24年度D01班(理論班)の体制

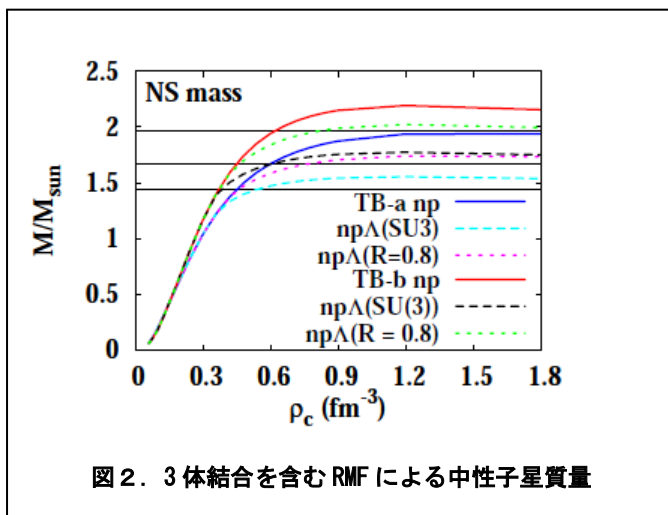


図2. 3体結合を含むRMFによる中性子星質量

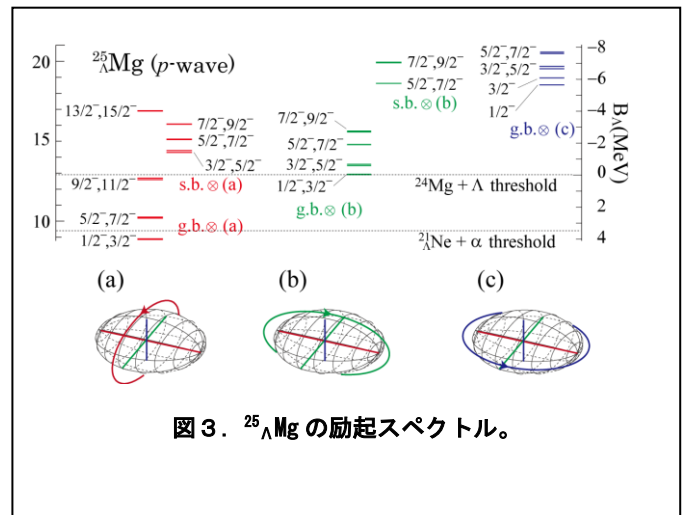


図3. $^{25}\Lambda\text{Mg}$ の励起スペクトル。

2. 低密度中性子星物質

低密度領域で著しく中性子過剰な中性子星核物質を実験的に探る上では、理論的には対称エネルギーと対相関が大きな役割を果たし、実験的には不安定核ビームによる中性子過剰核の実験データが鍵を握る。我々は新たに開発した半微視的核子間有効相互作用を用いて対称エネルギーに敏感な低エネルギー双極子励起を分析した。図4に示すように、安定核から中性子過剰核に移るに連れて、通常の巨大共鳴(陽子と中性子が逆位相で振動)から青いエリアで示したコアとスキン間の振動に移り変わっていく様子が見られる [H. Nakada, T. Inakura, H. Sawai, Phys. Rev. C 87 (2013), 034302]。

また、中性子過剰 Zr 同位体の巨大中性子ハローにおける対相関の役割、原子核衝突における破断片分布の対称エネルギー依存性についても研究が進んでいる。研究成果の1例として、図5に、Xe+Sn 反応におけるフラグメントの陽子数分布を示す。ヒストグラムはクラスター相関を取り入れた反対称化分子動力学(AMD)の計算結果であり、実験データを見事に説明できていることが分かる[A. Ono, J. Phys. Conf. Ser. 420 (2013) 012103]。

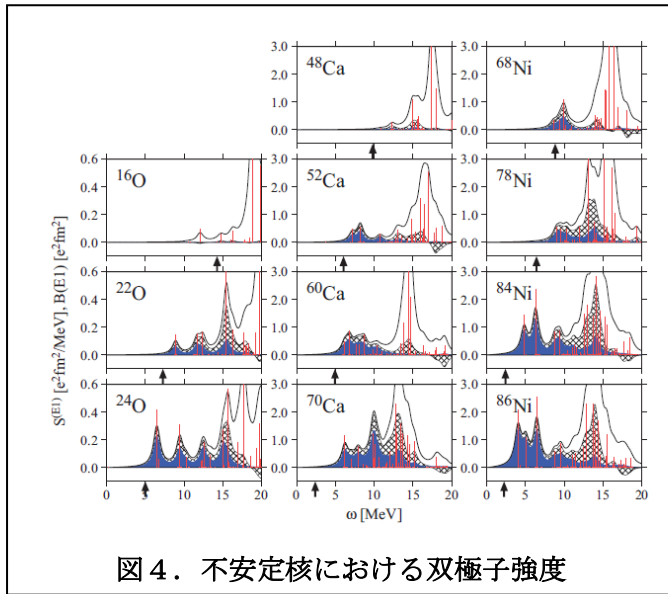


図4. 不安定核における双極子強度

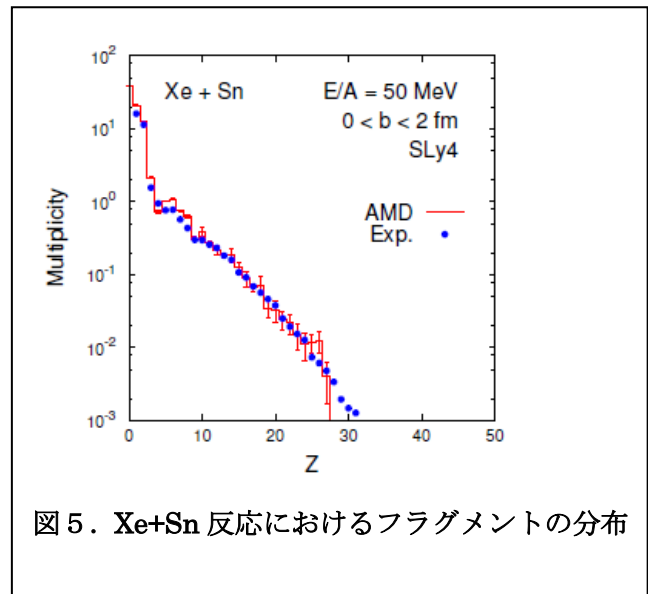


図5. Xe+Sn 反応におけるフラグメントの分布

3. 天体核物理

天体物理からの状態方程式の制限は本計画研究の柱の一つである。再帰的に γ 線や X 線を放出し強磁場中性子星と考えられている軟 γ 線リピーターでは、これまでに3例見つかった巨大フレア現象において特徴的な準周期的振動が観測されている。我々はこれらを中性子星の捻れ振動として一般相対論と原子核物理学から得られる状態方程式を組み合わせることで、対称エネルギーの密度依存性を特徴づけるパラメータ(L)に制限を与えることに成功した。図6では、中性子星の巨大フレアで観測された準周期振動を再現する対称エネルギーパラメータ(L)の範囲を示している。Case 1 は観測された全ての振動数をクラストのねじれ振動で再現する L の領域を示す。中性子星の振動が対称エネルギーと結びついており、かつ近年の原子核物理学で議論されているパラメータ領域と近い値が得られることは大きな成果である。いまや L パラメータは数 10%の値の違いを議論できる段階となっており、case 2 では 26Hz 以外の振動数を再現する L の領域が核物理からの要請と無矛盾であることを示す。ただしこの場合には 26Hz の準周期振動をクラストのねじれ振動以外のモードで説明することが必要となる。

また高密度でのクォーク物質の発現は、強い磁場の起源の有力候補である。我々は非一様凝縮を伴うカイラル相転移について研究を進め、相転移への磁場の効果や非一様凝縮によって現れる新たな冷却機構を議論した。図7に示されるようにパスタを含むクォーク物質が現れているとし、コアにおいてカラー超伝導状態が実現しているとの過程のもと、重い中性子星でゆっくり冷える可能性があることを見出した[T. Noda, M. Hashimoto, N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, M. Fujimoto, ApJ 765 (2013), 1]。

他にも、ずり弾性率に影響する原子核の結晶構造・パスタ構造の数値的計算、時間依存ハートリーフォック理論によるパスタ核生成、カイラル模型に基づく中性子星状態方程式構築、非一様なカイラル凝縮相に関わるニュートリノ過程・クォーク質量効果・多次元非一様構造、状態方程式データベース構築についての研究も進んだ。

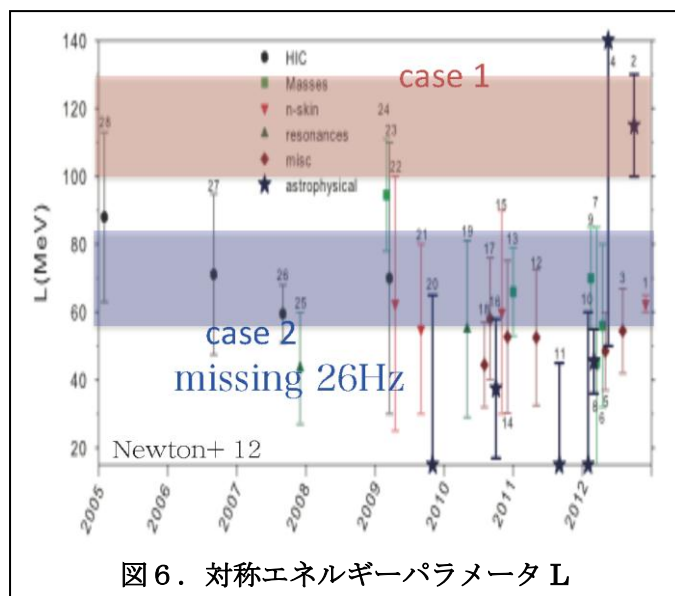


図6. 対称エネルギーパラメータ L

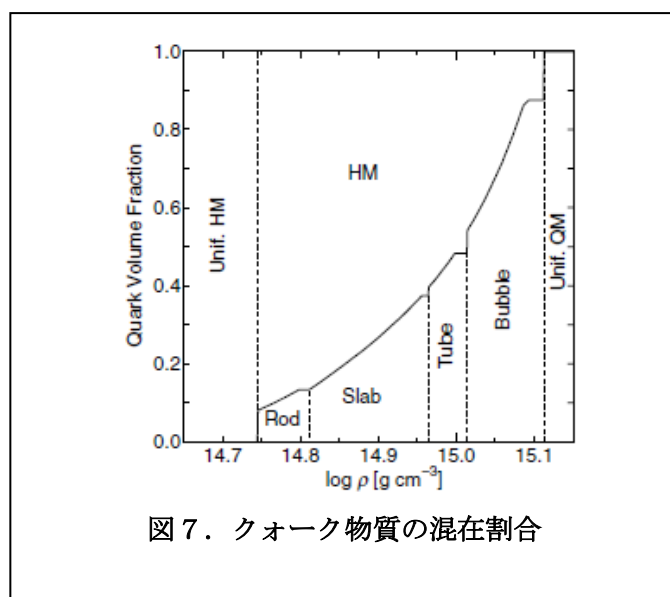


図7. クォーク物質の混在割合