

理論核物理学研究

研究代表者 鷹野 正利
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

現実的核力から出発して一様核物質の状態方程式(EOS)を決定するための多体変分法の研究を行う。またその核物質 EOS を拡張して超新星爆発等の数値シミュレーションへの適用を目指す。

2. 主な研究成果

2.1 陽なエネルギー汎関数を用いた変分法による絶対零度一様核物質 EOS の研究

現実的核力から出発して一様核物質の EOS を計算する方法として、これまで陽なエネルギー汎関数 (EEF) を用いた変分法を提唱し、その改良を行って来た。特に昨年度は、2 体核力ポテンシャルとしてスピン・アイソスピン依存の中心力及びテンソル力から成る Argonne v6' (av6')ポテンシャルを、そして 3 体核力として斥力項と 2π 交換項から成る Urbana IX (UIX)ポテンシャルを採用して、中性子物質 (PNM) に対する EEF を作成し、それを用いた変分エネルギー計算結果が、同じ核物質 Hamiltonian から出発した Monte Carlo 計算結果と良く一致することを確認した。また、Akmal らの先行研究で指摘されているような、PNM の π 中間子凝縮 (PC) 相の可能性を探るために、spin-longitudinal (SL) response の平均エネルギーの計算も行った。ただしこの際、response の energy-weighted sum (EWS) の計算が必要であり、それは response の演算子と Hamiltonian との二重交換子の期待値として求められるが、昨年度までの計算では、ここで用いる Hamiltonian において 3 体核力の寄与を無視していた。これは Akmal らの先行研究に倣ったが、この近似の妥当性は自明ではない。

そこで本年度は、SL EWS への 3 体力 2π 交換項の寄与を取り入れる計算を行った。具体的には波動関数を Jastrow 型に仮定した場合の上記二重交換子の期待値のクラスター展開において、3 体クラスター直接項の特に核子間相関について最低次の寄与を求め、それを正しく取り入れてさらに 3 体分布関数に対する Kirkwood の仮定が成立するように表式を作成し、その値を評価した。すると対応する SL response の平均エネルギーはわずかに上昇し、PC 相への相転移の傾向は若干弱まった。また Akmal らのような 1 次相転移は見られない、という結果は変わらなかった。

次に同じ Hamiltonian から出発した対称核物質 (SNM) のエネルギー計算を行った。対応する EEF を作成し、それに基づくエネルギー計算により、妥当な結果が得られた。また SNM の場合、 2π 交換項のエネルギーが常に負に寄与し、しかも密度と共にその大きさが増加する傾向は、Akmal らの先行研究結果と矛盾しない。ただし Akmal らの予言した 1 次相転移の傾向は、SNM の場合でも見られなかった。さらに Isovector (IV) の SL response の平均エネルギーを求めると、PNM の場合と同様に、波数が $k \sim 2\text{-}3 \text{ fm}^{-1}$ でスペクトルのソフト化が見られたが、そのエネルギーは正のままであり、PC 相への相転移は見られなかった。また Akmal らの予言した 1 次相転移の傾向も見られなかった。

2.2 EEF 変分法による有限温度一様核物質の EOS の研究

EEF 変分法を有限温度核物質へと拡張する研究も、継続研究課題として推進した。特に 2 体核力としては中心力成分のみから成る Argonne v4' (av4') ポテンシャルを、そして 3 体核力としては UIX ポテンシャルの斥力成分を用い、PNM 及び SNM に対して自由エネルギーの計算を行った。得られた自由エネルギーは妥当な振る舞いを示した。

そこで本研究を拡張して、得られた EOS に基づいて原始中性子星 (PNS) 構造計算を行った。特に UIX3 体核力ポテンシャルの斥力の強度は現象論的に決定されているため、その値を変化させた 2 種類の核物質 EOS を作成し、それらを用いて PNS の構造計算を行うことで、3 体核力斥力項の不定性が PNS 構造に与える影響を調べた。そのためにまず、av4'ポテンシャルの isospin-singlet チャンネルの強度を調整し、絶対零度 SNM の飽和密度の経験値をできるだけ良く再現するような修正を行った。そして、UIX ポテンシャルの強度として、オリジナルのポテンシャルの値に加え、より強度を弱めた場合の核物質 EOS の計算も行った。任意の陽子混在度での非対称核物質の自由エネルギーは、SNM と PNM に対する自由エネルギーを用いて内挿により決定した。さらに低密度状態で核子クラスターが形成される領域においては、昨年度作成した Togashi EOS を代用した。こうして作成した核物質 EOS を用いて、PNS 内部物質を等エントロピーでレプトン混在比も一定な物質と仮定し、TOV 方程式を解いて PNS の構造を得た。

結果は図 1 のようになり、3 体力の斥力の強さがより大きい核物質 EOS の場合に、より PNS の半径も大きくなった。この傾向は絶対零度核物質 EOS を用いた冷たい中性子星(CNS)構造計算結果にも見られ、妥当な結果である。ただしどちらの EOS を用いた場合でも、求められた CNS の半径は、昨年夏に観測された中性子星連星合体による重力波放出 (GW170817) から推定された CNS の半径に対する制限と矛盾しないことが判明した。

2.3 EEF 変分法による ${}^3\text{He}$ 原子系の研究

${}^3\text{He}$ 原子が原子間力で相互作用する系として、3 次元液体 ${}^3\text{He}$ や 2 次元 ${}^3\text{He}$ 系のエネルギーを本変分法により求めた。その際、 ${}^3\text{He}$ 系ではスピン三重項状態の原子間相関が重要な役割を果たすことを考慮し、スピン偏極が生じないように制限を加えた変分計算も同時に行い、エネルギー計算結果へのスピン三重項相関の影響を調べた。この際 EEF として現在核物質に対して用いている表式をそのまま適用すると、3 次元 ${}^3\text{He}$ に対して実験値より高い値が得られるので、まずは上記問題に焦点を絞るため、3 次元 ${}^3\text{He}$ のエネルギー値に近い結果を得るような、本研究初期に提案した EEF を用いる。

その結果、3 次元 ${}^3\text{He}$ に対しても実験値より若干高いが妥当なエネルギーが得られ、それを 2 次元 ${}^3\text{He}$ 系に適用すると、スピン偏極を許す場合には束縛状態が生じ、またスピン偏極を許さない場合には系が気体となる、という結果が得られた。従来の 2 次元 ${}^3\text{He}$ 系の研究において、理論計算では気体となることが予想されていたが、近年の実験ではグラファイト表面に吸着した 2 次元 ${}^3\text{He}$ 系が液化すること

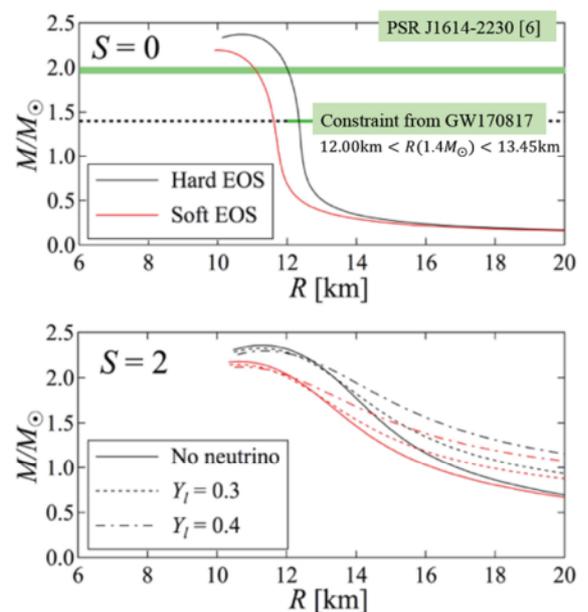


図 1 : CNS と PNS の質量と半径の関係

が示唆されている。本研究結果は、この従来の理論計算結果と実験の両者の特徴を、定性的に説明する。

3. 共同研究者

作道 直幸（お茶の水大学・ソフトマター教育研究センター・特任助教）

富樫 甫（理化学研究所・仁科加速器研究センター・基礎科学特別研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, and M. Takano, “New Table of Supernova Equation of State Using a Variational Method and Its Application to Astrophysical Compact Objects”, JPS Conf. Proc. 20 (2018) 011021.

S. Furusawa, H. Togashi, H. Nagakura, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, and M. Takano, "A new equation of state for core-collapse supernovae based on realistic nuclear forces and including a full nuclear ensemble", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 44 (2017) 094001.

H. Togashi, E. Hiyama, and M. Takano, “Equation of state of hyperonic nuclear matter at zero and finite temperatures with the variational method”, JPS Conf. Proc. 18 (2017) 011028.

H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto, and M. Takano, “Variational approach to neutron star matter with hyperons”, JPS Conf. Proc. 17 (2017) 102002.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

H. Togashi et al., “Properties of a variational equation of state in core-collapse supernovae”, PACIFIC 2018, February 14, 2018, Hokkaido, Japan.

H. Togashi et al., “Variational approach to hot and dense matter in compact stars”, International Workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017 (HNP2017), December 21, 2017, Wako, Japan.

富樫甫「現実的核力に基づく超新星物質状態方程式の構築」日本物理学会第73回年次大会（東京理科大学）2018年3月23日

富樫甫「現実的核力に基づく核物質状態方程式の研究と今後の展望」、RIBF 理論若手放談会：エキゾチック核物理の広がり（理化学研究所 神戸事業所）2017年8月1日

4.4 受賞・表彰

富樫甫 第12回（2018年）日本物理学会若手奨励賞

4.5 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

EEF 変分法の研究は、核物質及び ${}^3\text{He}$ 系に対して、着実に進展してきた。核物質に対しては、2体核力のスピン・軌道力成分を精密に取り入れることで、現実的2体核力全体を取り扱う理論へと発展させ、3体核力の不定性の核物質 EOS への影響をより明確にする。さらに ${}^3\text{He}$ 系に対しても

矛盾のない統一的な理論の構築を目指す。