

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。また多体変分計算に基づく核物質 EOS を拡張し、超新星爆発 (SN) 等の高エネルギー天体現象の数値シミュレーションへの適用を目指す。

2. 主要な研究成果

2.1 現実的核力に基づく、SN シミュレーションに適用可能な核物質 EOS の作成

現実的核力から出発して、SN 等の天体現象に対する数値流体シミュレーションに適用可能な核物質 EOS テーブルを作成する研究を、昨年から継続して遂行した。

昨年度までで、現実的な核力として 2 体核力 Argonne v18 (AV18) と 3 体核力 Urbana IX (UIX) から出発し、クラスター変分法を用いて有限温度一様非対称核物質の自由エネルギーを求め、さらにそれらを用いて非一様核物質の自由エネルギーを Thomas-Fermi (TF) 計算で求める研究を遂行してきた。そして作成予定の EOS テーブル各点の密度、温度、陽子混在度に対して、自由エネルギーの preliminary な結果を得ていた。ただし、主に数値計算精度の問題で、得られる熱力学量に不自然な不連続性が生じていることが問題であった。

そこで今年度はこれらの数値計算精度を向上させ、不自然な不連続性を回避する EOS テーブルデータの作成を推進した。実際、このような不連続性を生じる箇所およびその改善は、自動処理が非常に困難であり、目視による修正が必要となる。数値計算精度の不十分な箇所は、単純に自由エネルギーの数値微分から求めるだけでなく、化学ポテンシャルなどの各種熱力学量との関連で最適な解を探すことで、その熱力学状態についての連続性を改善した。この数値整備作業は最終段階にあり、2016 年度には論文発表と同時に EOS テーブルを公開する予定である。

なお本研究は、理化学研究所富樫甫氏、九州大学中里健一郎氏、東京理科大学鈴木英之研究室との共同研究である。

2.2 エネルギー汎関数を用いた変分法の改良

現実的核力から出発して一様核物質のエネルギーを計算するための、陽なエネルギー汎関数 (Explicit Energy Functional: EEf) を用いた変分法の改良を行った。

昨年度までの研究では中性子物質に対し、2 体核力としては中心力とテンソル力に加えスピン・軌道力を含む Argonne v8' (AV8') ポテンシャルを用い、また 3 体核力としては UIX ポテンシャルの斥力項を取り扱うように EEf を拡張した。ただし 2 体核力のスピン・軌道力演算子が含む空間微分演算子は、その厳密な取り扱いが困難であるため、昨年度までは中性子物質中の一中性子運動に起因する波動関数への演算のみを考慮し、2 体の軌道角運動量演算子を独立な 2 中性子の相対軌

道角運動量に置き換える近似を採用していた。しかし厳密には、スピン・軌道力演算子の含む空間微分演算子は、多数の中性子間の相関に演算することで、余計なエネルギーを生じる。

そこで本年度は上記の効果の主要部分を摂動論的に評価し、現状での **EEF** の妥当性を確認した。その結果、現在取り扱っている中性子物質モデルに対し、従来無視していた粒子間相関から生じるスピン・軌道力効果の摂動論的評価値は、全エネルギーに対して無視できるほど小さいことが判明した。

加えて、3対核力 **UIX** ポテンシャルに含まれる 2π 交換項を取り扱うように **EEF** を改良する研究も遂行した。従来の方法を踏襲した拡張により 2π 交換型3対核力ポテンシャルエネルギー期待値を表すエネルギー汎関数を作成し、さらにその大きさを摂動論的に評価したところ、正のエネルギー寄与をすることが確認された。これは他の多体計算結果からの示唆と矛盾しない。

2.3 クラスタ変分法によるハイペロン物質の研究

中性子星内部で実現すると考えられるハイペロン混合を考慮するように、2.1 で報告した核物質に対するクラスタ変分法の研究を拡張し、 Λ ハイペロン物質の状態方程式を調べる研究を行った。核子間に働く核力は2.1と同様に **AV18** ポテンシャルと **UIX** ポテンシャルを用い、 Λ ハイペロンと核子、および Λ ハイペロン間の相互作用は、 Λ ハイパー核の構造をよく説明するように作られた中心力ポテンシャルを用いた。ただし **odd-state** の $\Lambda\Lambda$ 相互作用は実験的情報が乏しいため、むしろその不定性を考慮して、**odd-state** の $\Lambda\Lambda$ 相互作用モデルを複数作成し、その中性子星内部のハイペロン混合への影響を調べた。また Σ の混在も考慮した。

その結果、**odd-state** の $\Lambda\Lambda$ 相互作用は Λ ハイペロンそのものの混在臨界密度には影響せず、むしろ Σ の混在臨界密度に強く影響することが確認された。すなわち、**odd-state** の $\Lambda\Lambda$ 相互作用が斥力的になるにつれて、 Σ の混在臨界密度が顕著に減少する。このように Λ ハイペロンに関わる相互作用の不定性が、他のハイペロンの混在度に大きく影響することは興味深い。

ただし本研究においても、ハイペロン混合によってハイペロン物質は柔らかくなるため、2体バリオン間力と3体核力だけでは、太陽質量の2倍の重い中性子星の存在を説明することが困難であることが確認された。そこで現象論的にハイペロン間の3体斥力を仮定したところ、太陽質量の2倍の中性子星と矛盾しない結果が得られた。

なお本研究は理化学研究所富樫甫氏、肥山詠美子氏、山本安夫氏との共同研究である。

3. 研究業績

3.1 学術論文

H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto and M. Takano, “Equation of state for neutron stars with hyperons by the variational method”, Phys. Rev. C93 (2016) 035808 (11 pages).

鷹野正利「エネルギー汎関数を用いた変分法による核物質状態方程式の研究」基研研究会「原子核・クォークと中性子星ー これまでとこれからー」報告集 p.69-71.

3.2 総説・著書

原子核研究 60 号 2 巻 (2016 年 3 月)「三体核力と中性子星」p20-21.

3.3 講演

富樫甫、肥山詠美子、鷹野正利「クラスター変分法による有限温度ハイペロン物質状態方程式の研究」日本物理学会第 71 回年次大会（東北学院大学）2016 年 3 月（口頭発表）

H. Togashi, E. Hiyama and M. Takano, “Equation of state of hyperonic nuclear matter at zero and finite temperatures with the variational method”, 12th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (Leap2016), March 7, 2016, Kanazawa, Japan. (Oral presentation)

H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki and M. Takano, “Microscopic equation of state for supernova matter with realistic nuclear forces”, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015), November 5, 2015, Nara, Japan. (Oral presentation)

富樫甫、肥山詠美子、山本安夫、鷹野正利「クラスター変分法によるハイペロン混合を考慮した中性子星物質状態方程式の研究」日本物理学会秋の分科会（大阪市立大学）2015 年 9 月（口頭発表）

鷹野正利「スピン・軌道力を考慮した中性子物質に対するエネルギー汎関数を用いた変分法 II」日本物理学会秋の分科会 2015 年 9 月（口頭発表）

H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto and M. Takano, “Equation of state for hyperonic nuclear matter with the variational method”, 新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物理」第 4 回研究会（湘南国際村センター）2015 年 9 月（ポスター発表）

H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto and M. Takano, “Variational approach to neutron star matter with hyperons”, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), September 8, 2015, Sendai, Japan. (Oral presentation)

H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki and M. Takano, “Microscopic nuclear equation of state for core-collapse supernovae with realistic nuclear forces”, Numazu Workshop 2015, September 4, 2015, Mishima, Japan. (Oral presentation, Invited)

M. Takano, T. Suzuki and N. Sakumichi, “Variational calculations with explicit energy functional for fermion systems at zero temperature”, Recent Progress in Many-Body Theories 18, Aug. 16-21, 2015, Buffalo, NY, USA (Poster presentation).

H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto and M. Takano, “Variational approach to hyperonic nuclear matter”, International workshop on strangeness nuclear physics, August 11, 2015, RIKEN, Japan. (Oral presentation, Invited)

H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki and M. Takano, “Equation of state for nuclear matter in core-collapse supernovae with realistic nuclear forces”, International Symposium on “Physics and Astronomy of Neutron Stars and Supernovae”, June 22, 2015, NAOJ, Japan. (Oral presentation)

鷹野正利「エネルギー汎関数を用いた変分法による核物質状態方程式の研究」基研研究会「原子核・クォークと中性子星- これまでとこれから- 」2015 年 6 月（口頭発表）

H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto and M. Takano, “Variational study of the equation of state for hyperonic neutron stars”, Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics 2015 (NDM15), June 3, 2015, Jyväskylä, Finland. (Oral presentation)

4. 研究活動の課題と展望

SN シミュレーション用核物質 EOS 作成の研究では、最終的な SN-EOS テーブルを完成させ、公開する。また EEF 変分法については、中心力を考慮した有限温度核物質に対する研究の整備、および非中心力を考慮した理論の対称核物質への拡張を行う。