

理論核物理学研究

研究代表者 鷹野 正利
(理工学研究所 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 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、そこから得られた各種熱力学量を用いて、一般相対論的星の一次元重力崩壊の数値シミュレーションを行った。この際非一様核物質 EOS は Shen EOS を代用した。また並行して非一様核物質の自由エネルギーの Thomas-Fermi (TF) 計算も推進してきた。

今年度は TF 計算で作成した非一様核物質 EOS も含め、一様相と非一様相を自己無矛盾とした核物質 EOS を、一般相対論的星の一次元断熱重力崩壊の数値シミュレーションに適用した。Woosly-Weaver の太陽質量の 1.5 倍の星のコアを初期状態とし、その時間発展を追ったところ、Shen EOS を用いた場合に比べて中心のコアはより高密度状態まで圧縮し、その結果爆発現象に有利であることが判明した。ただしこの結果は一様核物質の場合のみを本変分法に基づく EOS に置き換えた結果と大きく異ならない。また高温低密度状態で出現する核種を Shen EOS のそれと比較すると、両者に大きな違いは見られなかった。これは本計算が断熱シミュレーションであり、陽子混在度が初期状態で与えられる値 (およそ 0.4~0.5) から変化しないことが主な原因である。本研究で作成された非一様物質 EOS での核種は、比較的大きな陽子混在度では Shen EOS での核種と大きく異ならないが、陽子混在度が小さい中性子過剰領域では、Shen EOS で予言される核種よりも中性子過剰で大きな核種が現れるようになる。よって今後ニュートリノ輸送を取り入れた SN シミュレーションを実行した場合には、出現する核種の違いが期待される。

なお、本研究は東京理科大学鈴木研究室及び沼津高専住吉氏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、取り扱う 2 体核力成分として中心力とテンソル力に加え、中性子物質に

対スピン・軌道力を含むように EEF を拡張した (AV8'ポテンシャル)。今年度はこれに加えて 3 体核力 UIX ポテンシャルの斥力項を取り入れるように EEF の拡張を行った。この EEF を用いて得られた中性子物質の一核子当たりのエネルギーのテスト計算結果は、図 1 に示すとおり、Monte Carlo (AFDMC) 計算結果に近い値となった。ただし AFDMC 計算結果は本研究結果より若干高いエネルギー値を示している。これは本研究計算において、UIX ポテンシャルの 2π 交換項が取り扱われていないことが原因の一つと考えられる。

上記研究に加え、AEE の有限温度核物質への拡張の研究も推進した。特に昨年度までは 2 体中心力および 3 体斥力で相互作用している中性子物質に対して、その自由エネルギーを計算した。

そこで今年度は同様のハミルトニアンを持つ対称核物質に対して、自由エネルギーを求めた。テスト計算の結果は妥当な値を示したが、中性子物質の場合と同様に、高温低密度の領域では収束解が得られない困難が生じた。そこで本研究では絶対零度核物質に対する Mayer 条件の拡張を、有限温度核物質自由エネルギー計算へと適用し、収束解を得る改善を行った。ただしこの改良において導入される healing distance の値の選択方法に不定性があるため、今後の改良が必要である。

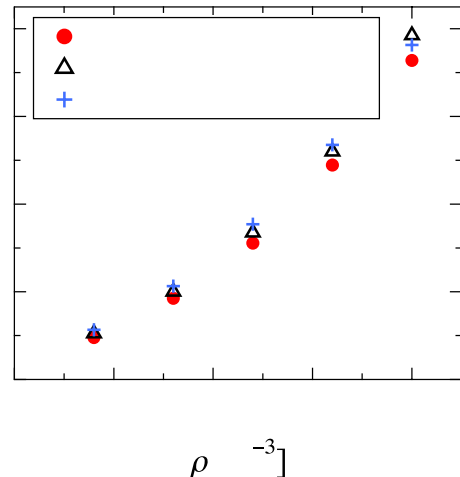


図 1 : AEE で求めた中性子物質の一粒子当たりのエネルギー E/N 。 ρ は中性子数密度。 2 体核力ポテンシャルとして AV8' を、 3 体核力ポテンシャルとして UIX 斥力項を用いている。 AFDMC と FHNC の結果も示されている。

2.3 クラスタ変分法によるハイペロン物質の研究

2.1 で報告したクラスタ変分法の研究を拡張し、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、ハイペロン物質の状態方程式を調べる研究を行った。ただし核子ハイペロン間相互作用、及びハイペロン間相互作用には大きな不定性があるため、ハイパー核構造から情報が得られるチャネルに対してはそのポテンシャルを用い、ハイパー核構造からも決定出来ない相互作用に関してはその不定性が中性子星構造に与える影響を調べる研究を推進中である。

なお本研究は理化学研究所の富樫氏、肥山氏、山本氏との共同研究である。

3. 研究業績

3.1 学術論文

H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, “Nuclear equation of state for core-collapse supernovae with realistic nuclear forces” PoS (NIC XIII) 169 (2015).

S. Nishimura and M. Takano, “Shell effects in hot nuclei and their influence on nuclear composition in supernova matter”, AIP Conf. Proc. 1594 (2014) 239-244.

M. Takano, K. Kato and M. Yamada, “Explicit energy functional for infinite nuclear matter with the tensor force”, J. Phys. Conf. Ser. 529 (2014) 012025.

H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, “Equation of state for nuclear matter in core-collapse supernovae by the variational method”, J. Phys. Conf. Ser. 569 (2014) 012058.

3.2 総説・著書

「原子力・量子・核融合辞典」(丸善出版) 第 I 分冊分担執筆

3.3 講演

H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, “Equation of state for nuclear matter in core-collapse supernovae by the variational method”, 3rd International Workshop on State of the Art in Nuclear Cluster Physics (SOTANCP3), May 28, 2014, Yokohama, Japan (Oral presentation).

H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, “Variational study of the supernova equation of state with realistic nuclear forces”, 4th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, October 9, 2014, Hawaii, USA (Oral presentation).

M. Takano and K. Kato, “An Explicit Energy Functional for Neutron Matter Taking into Account the Spin-Orbit Forces”, 4th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, October 9, 2014, Hawaii, USA (Oral presentation).

H. Togashi, E. Hiyama, M. Takano and Y. Yamamoto, “Cluster variational method for nuclear matter with hyperons”, Strangeness Nuclear Physics 2014 (SNP2014), December 13, 2014, Changsha, China (Oral presentation).

H. Togashi, E. Hiyama, M. Takano and Y. Yamamoto, “Equation of state for hyperonic nuclear matter with the cluster variational method”, HPCI and iTHES workshop on “Study of Neutron stars and Core-Collapse Supernovae”, December 16, 2014, Wako, Japan (Oral presentation).

H. Togashi et al., “Variational study of nuclear equation of state for core-collapse supernovae and hyperonic neutron stars”, International Workshop on NEUTRINO PHYSICS and ASTROPHYSICS, March 16, 2015, Istanbul, Turkey (Oral presentation).

富樫甫、肥山詠美子、鷹野正利「変分法によるハイペロン物質状態方程式の研究」「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」研究会(静岡県熱川) 2014 年 9 月 25 日(口頭発表)

加藤浩平、鷹野正利「有限温度一様核物質に対するエネルギー汎関数を用いた変分法」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質』第 3 回研究会(静岡県熱川) 2014 年 9 月 23 日(ポスター発表)

富樫甫、肥山詠美子、鷹野正利、山本安夫「変分法によるハイペロン混合を考慮した核物質状態方程式」新学術領域研究会「中性子星核物質」(京都大学基礎物理学研究所) 2015 年 3 月 12 日(口頭発表)

富樫甫、肥山詠美子、鷹野正利、山本安夫「一様ハイペロン物質に対するクラスター変分法の研究」日本物理学会第 70 回年次大会(早稲田大学) 2015 年 3 月 24 日(口頭発表)

H. Togashi, Y. Takehara, S. Yamamuro, K. Nakazato, H. Suzuki, K. Sumiyoshi and M. Takano, “NUCLEAR EQUATION OF STATE FOR CORE-COLLAPSE SUPERNOVAE WITH REALISTIC NUCLEAR FORCES”, 13th Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XIII), July 7-11, 2014, Debrecen, Hungary (Poster 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、非一様相も含めた最終的な 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、これまでの段階までの計算の精度向上および対称核物質への EEF の拡張を行う。クラスター変分法によるハイペロン物質 EOS の研究では、ハイペロンとして Λ と Σ を考慮した場合の結果を整理し、さらにハイペロンの種類を増やした場合へと計算を拡張する。