

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。

これまでの研究で、クラスター変分法に基づき、一様核物質に対する有限温度非対称核物質の自由エネルギーを、様々な密度、温度、陽子混在度の関数として求めた。今年度はそれらを用いて核物質の各種熱力学量を求め、その核物質 EOS を実際に 1 次元球対称の一般相対論的重力崩壊型 SN シミュレーションに適用した。ただしシミュレーションでは非一様核物質 EOS も必要となるため、今回は非一様相の EOS として Shen の EOS を用いた。シミュレーションでは、弱い相互作用を無視した流体計算と、ニュートリノ輸送を考慮したより現実的な計算の 2 種類を行った。どちらの計算も、初期状態は Woosly-Weaver の太陽質量の 1.5 倍の星のコアを採用した。

ニュートリノ輸送を考慮しない場合、この初期状態での電子混在度分布は、その後の時間発展で変化せず、その値はおおよそ 0.4~0.5 である。またこの場合、ニュートリノ放射がないため、断熱的に時間発展する。従ってコアの重力崩壊によって解放された重力エネルギーが、バウンス後の衝撃波の伝搬のエネルギーに効率良く変換され、1 次元計算であるにもかかわらず、衝撃波は鉄コアの表面に到達し、SN 爆発現象がみられた。また Shen EOS を用いた場合と比較したところ、星中心に形成される原始中性子星がよりコンパクトになった。これは本研究による核物質 EOS が Shen EOS より柔らかいためである。よりコンパクトな原始中性子星の形成はより大きい重力エネルギーを解放するため、結果的に星の爆発エネルギーは、本研究による核物質 EOS を用いた方が、Shen EOS を用いた場合より大きくなった。

次にニュートリノ輸送を考慮した場合、重力崩壊を起こしたコアは時間発展と共に中性子過剰となり、電子混在度は大幅に減少する。そしてニ

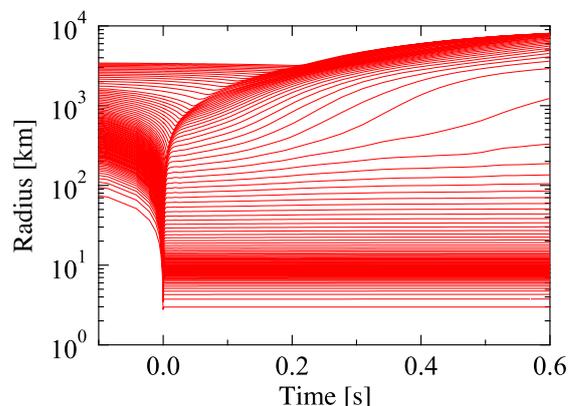


図 1 : 本研究における核物質 EOS を用いた、ニュートリノ輸送を考慮しない場合の、1 次元球対称 SN 爆発シミュレーション

ユートリノ放射によるエネルギー損失により、バウンス後の外向き衝撃波は鉄コアの表面に到達せずに停滞してしまう。この現象はこれまで現象論的核物質 EOS を用いて行われてきた従来の 1 次元超新星シミュレーション結果と矛盾せず、妥当な結果が得られた。さらに、本研究での核物質 EOS を用いた場合の、バウンス時のコアのレプトン混在度は、Shen EOS を用いた場合とほぼ変わらないが、電子混在度は本研究での核物質 EOS を用いた方が Shen EOS の場合の値より小さくなった。これは本研究での核物質 EOS の対称エネルギーが、Shen EOS の値より小さいことが原因と考えられる。

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、非中心力成分としてテンソル力を考慮した場合、EEF にはいわゆる nodal diagram (open-diagram) の寄与が重要であることが判明し、中心力とテンソル力まで考慮した場合の中性子物質および対称核物質の一核子当たりのエネルギーが、Monte Carlo 計算などの結果と近くなることを示した。

そこで本年度は中性子物質に対して、2 体核力のスピン・軌道力成分を考慮するように、EEF の拡張を行った。この改良においても、スピン・軌道力相間から生じるクラスター項の中で、特に最低次の nodal diagram の考慮を重視した。すると中心力、テンソル力、スピン・軌道力までを含む v_8 ポテンシャルを用いた場合の一核子当たりのエネルギーが、やはり Monte Carlo 計算結果に近くなることが確認された。

さらに Schmidt-Pandharipande の方法に従って、絶対零度における EEF 変分法による核物質のエネルギー計算を、有限温度核物質の自由エネルギー計算へと拡張する方法を確立した。この方法を 2 体の中心力および状態依存性の無い 3 体斥力で相互作用する中性子物質の自由エネルギー計算へと適用し、妥当な結果を得た。

2.3 超新星物質中の原子核に対する殻効果の研究

重力崩壊型 SN において、コアの中心部から離れた高温低密度領域では、有限温度の複数の核種が熱統計平衡状態にあると考えられており、先行研究で、原子核の殻効果を考慮した核種分布の計算が行われている。ただしそれらの先行研究では、殻効果の温度依存性があからさまには考慮されていない。そこで本研究では有限温度原子核質量公式を作成し、その殻効果の温度依存性が SN 物質における核種分布に与える影響について調べた。その結果、温度 $T \sim 0.5$ MeV 程度において有意に見られた殻効果が、 $T \sim 3$ MeV 程度で消滅し、この効果が核種分布に大きな影響を与えることを見いだした。

3. 研究業績

3.1 学術論文

H. Togashi, M. Takano, K. Sumiyoshi and K. Nakazato, "Application of the nuclear equation of state obtained by the variational method to core-collapse supernovae" Prog. Theor. Exp. Phys. (2014) 023D05.

H. Togashi and M. Takano, "Variational study for the equation of state of asymmetric nuclear matter at finite temperatures", Nucl. Phys. A 902 (2013) pp. 53-73.

H. Togashi, S. Yamamuro, K. Nakazato, M. Takano, H. Suzuki and K. Sumiyoshi, "New Nuclear Equation of State for

Core-Collapse Supernovae with the Variational Method”, EPJ Web of Conf. 66 (2014) 07026. (Int. Nucl. Phys. Conf. 2013 (INPC2013), Firenze, Italy, June, 2013).

鷹野正利「現実的核力を用いた変分法と核物質状態方程式」基研研究会「ハドロン物質の諸相と状態方程式 - 中性子星の観測に照らして -」報告集 原子核研究 Vol. 57 (2013) Suppl. 4. (2013年6月)

3.3 講演

富樫甫^A, 竹原裕太^B, 山室早智子^B, 中里健一郎^B, 鈴木英之^B, 住吉光介^C, 鷹野正利^A, 「ニュートリノ輸送を考慮した重力崩壊型超新星爆発シミュレーション」早稲田大学^A, 東京理科大学^B, 沼津高専^C, 日本物理学会第69回年次大会(東海大学湘南キャンパス)2014年3月27日(木)-30日(日)(2014.3.29発表)

鷹野正利^{A,B}, 加藤浩平^B, 山田勝美^A「一様核物質に対するエネルギー汎関数を用いた変分法の改良 III」早大理工研^A, 早大先進理工^B, 日本物理学会第69回年次大会(東海大学湘南キャンパス)2014年3月27日(木)-30日(日)(2014.3.29発表)

竹原裕太^A, 山室早智子^A, 中里健一郎^A, 鈴木英之^A, 富樫甫^B, 鷹野正利^B, 「超新星状態方程式テーブルの作成に向けた効率的な非一様相計算」東京理科大学^A, 早稲田大学^B, 天文学会2014年春季年会 国際基督教大学(東京都三鷹市)2014年3月19日(水)~22日(土)

鷹野正利「一様核物質に対する変分法の展望」新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」のまとめと今後を語る研究会 旅館すがわら(宮城県大崎市鳴子温泉新屋敷5)2013年12月20日-2013年12月21日(2013.12.21発表)

Suguru Nishimura and Masatoshi Takano, “The shell effects in hot nuclei and their influence on the nuclear compositions in supernova matter”, The 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Nov. 18-21, 2013, Tsukuba, Japan (Poster presentation).

M. Takano, M. Yamada and K. Kato, “Explicit Energy Functional for Infinite Nuclear Matter with the Tensor Force”, Recent Progress on Many-Body Theories 17, Sept. 9-13, 2013, Rostock, Germany (Poster presentation).

H. Togashi, M. Takano, K. Sumiyoshi and K. Nakazato, Hadron Nuclear Physics 2013, Zhangjiajie, China, July 2013 (Oral Presentation).

H. Togashi^A, S. Yamamuro^B, K. Nakazato^B, M. Takano^A, H. Suzuki^B and K. Sumiyoshi^C, Waseda University^A, Tokyo University of Science^B, Numazu College of Technology^C, “New Nuclear Equation of State for Core-Collapse Supernovae with the Variational Method”, the 25th International Nuclear Physics Conference (INPC2013), June. 2-7, 2013, Firenze, Italy (Poster presentation).

3.5 学会及び社会的活動

「サマースクール「クオークから超新星爆発まで」- 基礎物理の理想への挑戦 -」2013年8月20-24日、宇宙分野分担(京大基礎物理学研究所)

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、非一様核物質に対するTF計算の結果を用いて最終的なEOSテーブルを完成させる。またEEF変分法については、対称核物質に対するスピン・軌道力を考慮した表式への拡張を行い、現実的2体核力Argonne v18と3体核力Urbana IXを用いた場合の中性子物質および対称核物質に対するエネルギー汎関数の完成を目指す。