

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、超新星爆発 (SN) 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 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流体数値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継続して遂行してきたが、今年度テーブルを完成させた。

この EOS テーブルでは、一様核物質相の熱力学量は、現実的な核力として 2 体核力 Argonne v18 (AV18) と 3 体核力 Urbana IX (UIX) を用いた場合、クラスター変分法によって求められた有限温度一様非対称核物質の自由エネルギーから導かれている。非一様核物質の自由エネルギーは、この一様相の自由エネルギーを用いた Thomas-Fermi (TF) 計算で求められ、それから他の熱力学量も得られる。さらに古典的粒子として α 粒子の混合も考慮されている。

一様核物質に対して現象論的な相対論的平均場理論を利用した代表的な SN-EOS の一つである Shen EOS と比較すると、我々の EOS では陽子混在度が小さい場合に、非一様相から一様相へ相転移する臨界密度がわずかに高くなることがわかった。さらに液相・気相相転移の臨界温度は、陽子混在度の減少と共に、より緩やかに減少する。さらに陽子混在度が小さい非一様相で出現する原子核の質量数及び陽子数は、Shen EOS の場合よりも大きい。これらは全て、一様核物質の場合の対称エネルギーの密度勾配に関するパラメータ L の値が、我々の EOS においてより小さい値であることに起因すると考えられる。

今年度はこれら成果を論文発表し、また EOS テーブルを Web で公開した。

2.2 クラスター変分法による有限温度ハイペロン物質の研究

昨年度に引き続き、2.1 で報告した核物質に対するクラスター変分法の研究を拡張し、核物質中に Λ ハイペロンが混合した Λ ハイペロン物質の EOS を調べる研究を行った。昨年度は絶対零度 Λ ハイペロン物質の性質を、不定性の大きい odd-state の Λ Λ 相互作用の影響に注目しつつ調べたが、今年度は Schmidt-Pandharipande の方法に従って、この理論を有限温度物質へと拡張した。ここで昨年度用意した複数の odd-state の Λ Λ 相互作用の中から、Type-4 と名付けたもっとも斥力効果の強いモデルを採用した。さらに SN シミュレーションへの適用を想定して、陽子混在度は任意の値を考えるが、中性子と Λ ハイペロンとの化学平衡が成り立っている物質を考える。

その結果、例えば陽子混在度が 0 の物質において、 Λ ハイペロンの混合率は Shen EOS の場合よりも小さくなる。これは我々の EOS の対称エネルギーが Shen EOS の値より小さいためである。よって 1 バリオン当たりの自由エネルギーも、陽子混在度が 0 の物質において、 Λ ハイペロン混合

によるその減少率は Shen EOS の場合より小さい。しかしいずれにせよ Λ ハイペロン混合によるハイペロン物質 EOS の軟化の問題は深刻であり、実在する太陽質量の約 2 倍の質量を持つ中性子星の存在を説明するためには、 Λ ハイペロンを含む 3 体バリオン間斥力のような相互作用が必要と考えられる。

2.3 エネルギー汎関数を用いた変分法による 2 次元ヘリウム 3 系の研究

強い粒子間相関を持つ Fermi 粒子系に対して有効な、陽なエネルギー汎関数 (Explicit Energy Functional: EEF) を用いた変分法を、2 次元ヘリウム 3 系に適用した。

2 次元ヘリウム 3 系に対する Monte Carlo 計算によれば、この系が気体となる。しかし近年グラフィット表面に吸着されたヘリウム 3 原子の実験的研究によれば、これが液相へと相転移することが示唆されている。Monte Carlo 計算はヘリウム 3 原子のグラフィット表面への吸着の効果を取り入れるように拡張されているが、その方法によって結果が異なっており、複数の理論計算結果と実験結果が一致しない状況にある。

そこで我々は EEF 変分法を 2 次元 Fermi 系へと修正し、2 次元ヘリウム 3 系のエネルギー計算を行った。すると Monte Carlo 計算結果よりは低い値となるが、系は気体となる結果が得られた。ただし吸着の効果をヘリウム 3 原子の effective mass として取り入れると、正のエネルギーの停留値 (準安定状態) が生じることがわかった。なお、EEF にまだ十分に取り入れられていないエネルギー寄与 (3 体クラスター Nodal diagram の 2 粒子交換項運動エネルギー) があるため、さらなる EEF の改良が必要である。

2.4 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

上で述べた EEF 変分法を適用して、現実的核力から出発した一様核物質の EOS を求める研究を進めている。特に今年度は中性子物質において、3 体核力ポテンシャルに含まれていると思われる藤田・宮沢型の 2π 交換 3 体力を取り入れる研究を推進した。この 3 体力ではテンソル力の効果が強く、それに起因する π 中間子凝縮相への相転移の可能性が示唆されている。

2 体核力として Argonne v6' (av6') ポテンシャルを、3 体核力として UIX ポテンシャルを用いた場合の中性子物質に対する EEF 変分法での計算を行ったところ、得られた一核子当たりのエネルギーは、同じ核物質 Hamiltonian から出発した Monte Carlo 計算結果と近い値となった。また中性子物質の密度が上昇するとともに、構造関数の spin-longitudinal 成分 $S_{LT2}(k)$ において、 π 中間子凝縮の兆候と思われるピークの成長が見られた。ただし Fermi-Hypernetted-Chain (FHNC) 変分計算方法を用いた先行研究結果では、この $S_{LT2}(k)$ のピークの成長は密度と共に不連続に生じ、対応するエネルギーもその傾きに不連続性を持ち、 π 中間子凝縮相への一次相転移を示唆する。一方で我々の計算結果ではそのような一次相転移の兆候はみられない。EEF 変分法では仮定した EEF に対して十分に最小化されたエネルギーが求められるのに対し、FHNC 法では変分関数をパラメータ化し、そのパラメータについて最小化が行われているので、変分の自由度が制限されたことにより 1 次相転移と見えている可能性も考えられる。

なお、 $S_{LT2}(k)$ のピークの成長だけでなく spin-longitudinal response の energy-weighted sum (EWS) から計算された π 中間子のスペクトルも、 π 中間子凝縮の兆候を示している。しかしこの計算では簡単のため、EWS への藤田・宮沢型の 3 体力 2π 交換項の寄与は無視している。よってこの寄与を (部分的にでも) 取り入れることが必要であると考えられる。

3. 共同研究者

鈴木 英之（東京理科大学・理工学部・教授）

肥山 詠美子（理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員）、

中里 健一郎（九州大学・基幹教育院・助教）

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, “Nuclear equation of state for core-collapse supernova simulations with realistic nuclear forces”, Nucl. Phys. A 961 (2017) 78.

H. Togashi, E. Hiyama, and M. Takano, “Variational study of the supernova equation of state with hyperons”, JPS Conf. Proc. 14, 020812 (2017).

M. Takano, T. Suzuki and N. Sakumichi, “Variational calculations with explicit energy functional for fermion systems at zero temperature”, J. Phys.: Conf. Ser. 702 (2016) 012016.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

富樫甫「変分法による核物質状態方程式 –Supernova EOS テーブル完成までの道のり–」、研究会「原子核のサイズと状態方程式の物理」（九州大学）2017年3月30日

H. Togashi, E. Hiyama and M. Takano, “Hyperon stars at zero and finite temperatures with the variational method”, SNP2017, Mar. 14, 2017, Neyagawa, Japan.

M. Takano, “Variational method with explicit energy functionals for nuclear matter”, NPCSM2016: YIPQS Long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop on “Nuclear Physics, Compact Stars, and Compact Star Mergers 2016”, Oct. 21 2016, Kyoto, Japan.

H. Togashi, E. Hiyama and M. Takano, “Variational study for the equation of state of hot nuclear matter with hyperons”, J-PARC Workshop 2016: From Exotic hadrons to QGP, June 9, 2016, Incheon, Korea.

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

5. 研究活動の課題と展望

クラスター変分法によるハイペロン物質 EOS の研究では、今年度の研究成果をさらに発展させ、SN シミュレーション用 EOS として完成させたい。また EEF 変分法については、2 体の中心力、テンソル力、スピン・軌道力を取り入れた EEF を、中性子物質だけでなく対称核物質に対して構築し、絶対零度の現実的な核力に基づくエネルギー計算を実現する。さらに有限温度核物質への EEF 変分法の拡張も進める。