

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25400275

研究課題名(和文) 現実的核力から出発した変分法による超新星爆発計算用の核物質状態方程式の改良

研究課題名(英文) Improvement of the nuclear equation of state for supernova simulations with the variational method starting from realistic nuclear forces

研究代表者

鷹野 正利 (TAKANO, Masatoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00257198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：現実的な核力ポテンシャルから出発したクラスター変分法により有限温度一様核物質の状態方程式を作成し、Thomas-Fermi計算によりそれを非一様核物質相へと適用することで、超新星爆発の数値シミュレーションに適用可能な核物質状態方程式テーブルを完成し、公開した。さらに絶対零度核物質に対する陽なエネルギー汎関数を用いた変分法を、AV6' (そしてAV8') 2体力とUIX3体力を取り扱うように改良した。また中心力を考慮した有限温度核物質の状態方程式を求め、3体斥力の強さの不定性の原始中性子星構造への影響を調べた。そしてGW170817から得られた中性子星半径に対する制限と矛盾しない結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We constructed an equation of state of hot uniform nuclear matter by the cluster variational method starting from realistic nuclear forces, and performed the Thomas-Fermi calculations for non-uniform nuclear matter to obtain a table of the nuclear equation of state applicable to supernova numerical simulations.

We also improved the variational method with explicit energy functionals for nuclear matter at zero temperature so as to treat the AV6' (and AV8') two-body potentials and the UIX three-body potential.

We further constructed nuclear equations of state at finite temperatures with central forces, and study the impact of the uncertainties in the three-body repulsive force on the structure of proto-neutron stars. Our results are consistent with observational constraints on the neutron star radius obtained from GW170817.

研究分野：理論核物理学

キーワード：核物質状態方程式 超新星爆発 中性子星 変分法

1. 研究開始当初の背景

冷たい中性子星(NS)の構造の研究に加え、重力崩壊型超新星爆発(SN)や連星 NS 合体などの高エネルギー天体現象の理解には、高密度核物質の状態方程式(EOS)の情報が欠かせない。しかしこれらの天体現象の数値シミュレーションに適用可能な核物質 EOS では、その密度、温度、陽子混在度の非常に幅広い値に対して熱力学量を提供する必要があるので、その作成は非常に困難である。実際、SN シミュレーションに適用可能な核物質 EOS は、現象論的モデルに基づくものばかりであり、現実的核力から出発した量子多体計算に基づく核物質 EOS の適用が望まれていた。

そこで本研究の研究代表者らは、現実的核力から出発したクラスター変分法に基づく核物質 EOS の作成を開始した。ただし非一様核物質の EOS は Thomas-Fermi 計算によって作成する。そして核物質の相図を作成することに成功し、さらに一様相の核物質 EOS を球対称 SN シミュレーションに適用することにも成功した。そこでこの EOS を完成し、テーブルとして公開することが急務であった。

加えて研究代表者らは、上記クラスター変分法とは別に、より精密な量子多体変分計算法として「陽なエネルギー汎関数を用いた変分法」を提案し、その改良を進めてきた。しかしその計算は限られた核力ポテンシャルにしか適用できない状況であり、有限温度核物質への拡張も着手したばかりであった。

2. 研究の目的

上記の研究で構築したクラスター変分法に基づく SN シミュレーション用の核物質 EOS を完成させ、公開する。

さらに上記 EOS で採用した量子多体計算法を精密化し、陽なエネルギー汎関数を用いた変分法にて SN 計算に適用可能な核物質 EOS を作成する。特に 3 体核力の斥力の強さには不定性があるため、その不定性の天体現象への影響を調べる。

3. 研究の方法

1) クラスター変分法に基づく SN 計算用核物質 EOS の作成

まず絶対零度一様核物質に対して、2 体核力ポテンシャルは AV18 を、3 体核力は UIX を用いて、Jastrow 型波動関数から出発した 2 体クラスター近似により、核物質の一核子当たりのエネルギーを求める。具体的には Jastrow 波動関数に含まれる 2 核子間相関関数について、核物質の一核子当たりのエネルギーを最小化する。その際に高次クラスター項を無視している点を補うために、核子数保存則に対応する Mayer 条件を課し、また粒子間相関関数に対する healing distance を導入し、その値は、2 体核力 AV18 だけを考慮した場合に、高次クラスター項までを部分的にだが無限に考慮した Fermi Hypernetted Chain (FHNC) 計算で得られたエネルギー値を良く

再現するように決定した。さらに低密度の非対称核物質において重陽子クラスターの形成が生じないような調整も行った。

次に 3 体核力に対しては、UIX ポテンシャルの斥力項と 2π 交換項のそれぞれに対して Fermi 気体の場合のエネルギー期待値を求め、それらに粒子間相関から生じると考えられる補正係数をかけ、さらに飽和点経験値を再現するような補正関数を加えて、一核子当たりの全エネルギーとする。

有限温度一様核物質に対しては、Schmidt-Pandharipande の方法を用いて、一核子当たりの自由エネルギーを求めた。具体的には Landau の Fermi 液体論に従って、陽子と中性子それぞれに対応する準粒子による単一粒子状態の平均占有確率を用いて、一核子当たりのエントロピーを記述する。また一核子当たりの内部エネルギーは、絶対零度核物質に対する 2 体クラスター近似のエネルギー表式において、単一粒子準位の占有確率を上記の有限温度平均占有確率に置き換えることで得る。この際、粒子間相関関数は絶対零度の場合の関数をそのまま用いる。また 3 体力エネルギーに関しては、絶対零度の場合のエネルギー寄与をそのまま用いる。そして、平均占有確率を支配する陽子と中性子それぞれの有効質量について、一核子当たりの自由エネルギーを最小化する。

以上の方法で求めた有限温度一様非対称核物質の自由エネルギーを用いて、代表的な SN 計算用核物質 EOS の一つである Shen EOS での計算方法を踏襲して、Thomas-Fermi 近似により、有限温度非一様核物質の EOS を作成した。具体的には、まず Wigner-Seitz 近似を用いて、格子内部の球対称核子分布をパラメータで表現し、表面が存在することによるエネルギーの補正も考慮して単位格子内の自由エネルギー密度を最小化する。この際、格子内部の局所的な核子数密度が様々に変化するため、それらに対応して細かく区切った密度及び陽子混在度に対する一様核物質状態の自由エネルギーを、事前に計算しておく必要がある。また有限温度状態および中性子過剰状態においては、陽子および中性子の drip が起こる可能性があるため、drip の有無のそれぞれの場合につき単位格子の平均自由エネルギー密度を最小化し、最終的に最も低い自由エネルギーを与える解を採用する。

さらに α 粒子の混在も考慮する。ここで α 粒子は簡単のため有限の体積を持つ自由な古典的粒子として扱う。一様核物質に対しては一様な α 粒子ガスの混在を考慮し、また非一様核物質に対する Thomas-Fermi 計算においても、原子核の外側に α 粒子のガスが球対称に分布すると仮定して全自由エネルギーを求め、結局 粒子混合の有無まで考慮して最適な自由エネルギー解を求める。

2) 陽なエネルギー汎関数を用いた変分法による核物質 EOS の計算

陽なエネルギー汎関数を用いた変分法では、一核子当たりのエネルギーを2体分布関数の汎関数として陽に表現するエネルギー表式を作成する。そして2体分布関数に対する Euler-Lagrange 方程式を導いてそれを数値的に解くことで、十分に最小化されたエネルギー値を得る。2体分布関数を用いると、2体核力ポテンシャルエネルギー期待値は厳密に表現される。よって粒子間相関から生じる運動エネルギーだけ、良い精度で表現すれば良い。実際には波動関数を Jastrow 型に仮定した際に運動エネルギーをクラスター展開し、その主要なクラスター項が過不足なく含まれるようにエネルギー汎関数を構築する。さらに分布関数の Fourier 変換で表される構造関数に対する必要条件を自動的に保証するようなエネルギー汎関数を選ぶ。2体分布関数としては、2体中心力に対応する動径分布関数に加え、テンソル力に対応するテンソル型分布関数、そしてスピン軌道力に対応するスピン軌道型分布関数を用いる。ただしこれらの関数は2核子のスピン・アイソスピンに依存させる。

3体核力 UIX を取り扱うために、対応する3体分布関数を導入するが、この3体分布関数も2体分布関数で表す必要がある。そこで我々は、3体分布関数を2体分布関数の積として表現する Kirkwood の仮定を採用する。ただしこの仮定は Fermi 気体の場合ですら厳密では無いため、本研究では Fermi 気体の場合に正しい3体分布関数が得られるように、補正項を導入する。また UIX ポテンシャルの 2π 交換項の効果を取り扱う際には、その状態依存性を適切に考慮するために、Jastrow 波動関数を仮定した場合のエネルギー期待値の3体クラスター項における主要な寄与を取り入れるように、エネルギー表式を作成する。

有限温度核物質に対しては、Schmidt-Pandharipande の方法を踏襲する。すなわち、一核子当たりのエントロピーは Landau の Fermi 液体論に基づき準粒子による単一粒子準位の平均占有確率で表し、一核子当たりの内部エネルギーは、絶対零度核物質の一核子当たりのエネルギーの表式において、単一粒子準位の占有確率を有限温度での平均占有確率に置き換える。ただし前述のクラスター変分法の計算と異なり、2体分布関数は有限温度状態において改めて最適化する。結局一核子当たりの自由エネルギーを、2体分布関数と、単一粒子準位の平均占有確率を支配する核子の有効質量について最小化する。

4. 研究成果

1) クラスター変分法による SN 計算用核物質 EOS の作成

上記研究方法により作成を目指していた核物質 EOS を完成させ、公開した。以下、この EOS を Togashi EOS と呼ぶ。

Togashi EOS を Shen EOS と比較すると、まず温度 T と陽子混在度 Y_p を固定した場合、非

一様相から一様相へ変化する転移密度は、Togashi EOS の方が高い。これは、Shen EOS に比べて Togashi EOS の方が一様核物質の飽和密度が大きいことと矛盾しない。またこの転移密度の傾向は、 Y_p が小さくなるにつれてより顕著になる。これは Togashi EOS における対称エネルギーの密度依存係数 L の値が、Shen EOS での L の値に比べて小さく、従って Togashi EOS における低密度での対称エネルギーが、Shen EOS のそれより大きいことが原因と考えられる。また $Y_p = 0.5$ での臨界温度は二つの EOS で大きく異ならないが、 Y_p を減少させた場合の臨界温度の減少は、Shen EOS の場合より穏やかである。この傾向も Togashi EOS において L の値が小さいことに起因する。さらに図1に示す通り、中性子過剰な非一様相にて出現する核種は、質量数と原子番号の両方が、Shen EOS に比べて大きい傾向にある。これは前述の飽和密度の違いに加えて L の値の違いのために、Togashi EOS の方が中性子 drip の量が少なくなり、それが核表面での密度勾配をより大きくし、対応する大きな表面エネルギーに釣り合うクーロンエネルギーを生じるために、より多くの陽子が集まるためである。

以上のような特徴を持つ Togashi EOS を、これまで原始中性子星(PNS)構造計算や球対称重力崩壊型 SN シミュレーション等に適用した。ただしこれらの現象には主に高密度領域の EOS の特徴が反映されるため、非一様相を Shen EOS で代用した場合の結果と大きく異なる傾向は見られなかった。

また有限温度非一様核物質状態を一核種で表現するのではなく、多核種を考慮する EOS の研究もなされており、Togashi EOS をそれに応用する研究も行われた。その際特に有限温度状態において原子核内の核子の単一粒子準位の平均占有確率を考慮すると、殻効果が弱まる傾向があり、それは SN 物質中の核種分布の決定に大きく影響することを本研究で示した。そしてその結果は上記の多核種 EOS にも応用された。

2) 陽なエネルギー汎関数を用いた変分法による核物質 EOS の計算

まず絶対零度核物質に対して、取り扱う核力成分の拡張を目指す研究では、本研究に

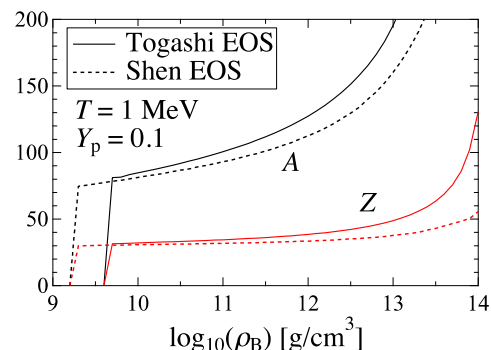


図1: 原子核の質量数 A と原子番号 Z の比較

手した段階で、中性子物質及び対称核物質の場合に2体中心力及びテンソル力を考慮したエネルギー汎関数を構築した段階にあった。

ここで問題となったのは、粒子数保存則または一様分布の条件である Mayer 条件の破れである。対称核物質の場合、飽和密度より低い密度では一様分布状態は不安定であり、本変分計算結果もその傾向を反映して、飽和点付近及びそれより低密度の対称核物質に対して、Mayer 条件が自発的に破れ、その分エネルギー値が低くなる傾向にある。その傾向自体は自然な振る舞いであるが、この計算結果を他の理論計算結果と比較するためには、Mayer 条件を考慮した計算結果が必要である。

そこで2体分布関数に対する healing distance を導入し、その値は、Mayer 条件の破れの程度に応じたエネルギーを本来のエネルギーに加えた全エネルギーを最小化することで決定した。本研究期間前には、2体分布関数を表現する際に導入された補助関数に対して、この healing distance 条件を課していたが、本研究期間開始後、2体分布関数に直接 healing distance を導入する方法を構築し、安定した解を得るようになった。

勿論この計算結果は Mayer 条件の破れのエネルギー値への変換係数に依存する。本研究では、FHNC 計算で用いられている変換係数を採用した。得られたエネルギーは、計算上の飽和点近傍で、量子モンテカルロ計算 (AFDMC) より若干低い値となったが、他の複数の量子多体計算法で得られるエネルギー計算値のばらつきの程度のずれであった。

なお、3体核力 UIX ポテンシャルの斥力項を扱うように理論を拡張すると、Mayer 条件の破れが少なくなることが確認された。これは核子間の斥力によって一様分布の破れ(核子が互いに接近してクラスターを形成しようとする傾向)が抑制されることによる。

さらに中性子物質に対して、2体核力におけるスピン軌道力を考慮する拡張を行なった。この場合、スピン軌道力演算子が微分演算子を含み、それに対応するスピン軌道力型相関関数を含む微分演算子は、他の粒子間相関に演算してエネルギーを生じる。よってその効果をエネルギー汎関数に適切に取り入れることはかなり困難な作業である。本研究ではそれらの相関を含む3体クラスター項の主要部分を始めに摂動論的に評価し、そこで特に大きなエネルギー寄与を示す項をエネルギー汎関数に取り入れて変分計算を行った。すると図2のように、2体力 AV8'のみを考慮した場合と UIX3 体力斥力項までを考慮した場合の両者において、AFDMC 計算結果 (UIX ポテンシャルは全て取り入れる) とかなり良い一致を得た。

次に3体力の取り扱いの拡張を行った。UIX ポテンシャルの2 交換項は、スピン・アイソスピン依存の中心力及びテンソル力の組み合わせで表させるため、そのエネルギー期待値を求める際には、対応する3体分布

関数を適切に選ぶ必要がある。本研究では前述の方針でエネルギー汎関数を作成し、2体力は AV6'を用いて、中性子物質と対称核物質のそれぞれに対して変分計算を行った。中性子物質に対しては比較対象となる AFDMC 計算結果があり、それと比べて良い一致を得た。一方で対称核物質の場合には対応する AFDMC 計算例が見当たらないが、不自然な解の振る舞いは見られない。

2体核力として AV18 を、そして3体核力として UIX を用いた Akmal らの FHNC 計算において、中性子物質と対称核物質の両者で高密度状態における 中間子凝縮相への一次相転移が予言されており、その相転移の大きな要因が2 交換項に含まれるテンソル力であるとされる。しかし同様な2 交換型3体力を考慮した AFDMC 計算では、そのような相転移は報告されていない。したがって本変分法で同様な計算を行うことは、Akmal らのシナリオに基づく 中間子凝縮相への相転移の有無に重要な示唆を与える。

我々の計算結果では、中性子物質と対称核物質のどちらにおいても、 中間子凝縮相への一次相転移は見られなかった。関連して2

交換項のエネルギー寄与は、Akmal らの計算結果と類似の密度依存性を持つが、一次相転移を示すエネルギーの不連続性は見られなかった。さらにアイソベクトルスピン縦応答のエネルギー平均値の密度依存性を調べても、波数が $2 \sim 3 \text{fm}^{-1}$ においてソフト化の傾向は見られたが、明確な相転移には至らない。

本研究で一次相転移の傾向が見られないのは、変分関数に関する十分な最小化を行っている本変分法と比較し、FHNC 計算では限られた個数のパラメータについてエネルギー期待値を最小化することが、その原因である可能性が考えられる。

最後に、2体中心力 AV4'と3体力 UIX 斥力項を考慮した場合、有限温度の中性子物質と対称核物質に対して自由エネルギーを求めた。ここで PNS 構造計算への適用を目指し、対称核物質の計算された飽和点がある程度経験値を再現するように、AV4'におけるアイソスピン一重項状態の核力の強度を調整し

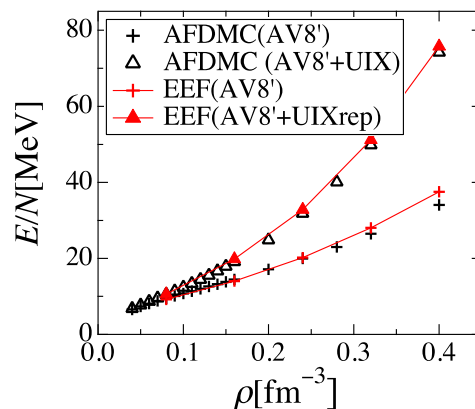


図2: AV8'+UIX 斥力項での中性子物質の
一中性子当たりのエネルギー

た。さらに3体核力の不定性の PNS 構造への影響を調べるために、その強度を UIX ポテンシャルの本来の値に固定した場合に加え、ある程度弱めた場合も含めた2種類の3体力に対して、自由エネルギーの計算を行った。さらに低密度領域で自由エネルギーの収束解が得られない場合、Mayer 条件を大きく破ることがそのような数値的不安定性の原因であると考へ、動径分布関数に対して healing distance を導入することで、その困難を回避した。また非対称核物質の自由エネルギーは、中性子物質と対称核物質の自由エネルギーから、陽子混在度に関する内挿により求めた。この際、自由エネルギーの中で Fermi 気体近似で求められる部分を除く残りのエネルギー部分を陽子混在度の2次関数で内挿すると精度が良いことが先行研究により知られており、本研究でもその手法を採用した。

以上の方法で用意した核物質の自由エネルギーに対し、電子、陽電子、電子ニュートリノ、反電子ニュートリノから成る自由レプトン気体の自由エネルギー寄与を加え、荷電中性で安定な有限温度一様 PNS 物質の EOS を作成した。実際には等エントロピーでレプトン混在度が一定であるような PNS の構造を計算する。その際低密度非一様核物質の EOS が必要であるが、その密度領域では Togashi EOS を代用した。

得られた絶対零度の NS の構造は、図 3 に示す通り、3体斥力が強い場合に半径がより大きくなったが、連星 NS 合体 GW170817 から得られた半径に対する制限と矛盾しない結果となった。さらに有限温度 PNS に対する計算結果も、一般にレプトン混在度が大きいほど、またエントロピーが大きいほど星の半径は大きくなるが、3体力の不定性の影響は、主に絶対零度 NS 物質の不定性の影響をそのまま反映することがわかった。

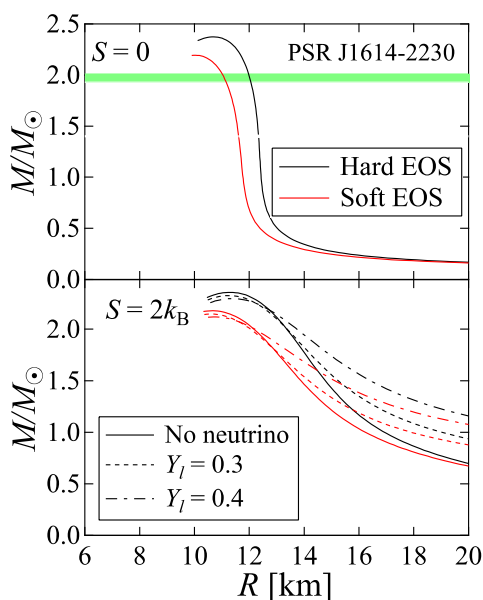


図 3 : 原始中性子星の質量と半径の関係

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 10 件)

1) 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. (査読有)

2) 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. (査読有)

3) 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. (査読有)

4) 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. (査読有)

5) 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 (2014). (査読有)

6) 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. (査読有)

7) 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. (査読有)

8) 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. (査読有)

9) 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. (査読有)

10) 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. (査読有)

〔学会発表〕(計 31 件)

1) 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 2018 年 3 月 (招待講演)

2) K. Shoji, H. Togashi, and M. Takano, "The nuclear equation of state obtained by the variational method with explicit energy functionals and its application to proto-neutron stars", International Conference on "Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations", Mar. 2018.

3) R. Yokota, and M. Takano, "Variational method with explicit energy functionals for nuclear matter including the Fujima-Miyazawa three-nucleon force", International Conference on "Physics of Core-Collapse Supernovae and Compact Star Formations", Mar. 2018.

4) H. Togashi, M. Takano, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, and K. Sumiyoshi, "Properties of a variational equation of state in core-collapse supernovae", PACIFIC 2018, Feb. 2018. (招待講演)

5) H. Togashi, M. Takano, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, K. Sumiyoshi, and E. Hiyama, "Variational approach to hot and dense matter in compact stars", International Workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017, Dec. 2017. (招待講演)

6) 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」2017 年 3 月 (招待講演)

7) 鷹野正利、堀川峻洋「スピン・軌道力を考慮した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」日本物理学会 2017 年 3 月

8) M. Takano, "Variational method with explicit energy functionals for nuclear matter", NPCSM2016, Oct. 2016. (招待講演)

9) H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, and M. Takano, "Microscopic equation of state for core-collapse supernovae with realistic nuclear forces" Numazu Workshop 2015, Sep. 2015. (招待講演)

10) H. Togashi, M. Takano, K. Nakazato, Y.

Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, K. Sumiyoshi, E. Hiyama, and Y. Yamamoto, "Variational study of nuclear equation of state for core-collapse supernovae and hypersonic neutron stars, International Workshop on "NEUTRINO PHYSICS and ASTROPHYSICS", Mar. 2015. (招待講演)

11) 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 2013 年 12 月 (招待講演)

〔受賞〕(計 1 件)

富樫甫 第 12 回日本物理学会理論核物理領域若手奨励賞 (第 19 回核理論新人論文賞)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.np.phys.waseda.ac.jp/EOS/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鷹野 正利 (TAKANO MASATOSHI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00257198

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

住吉 光介 (SUMIYOSHI KOHSUKE)

沼津工業高校専門学校・教養科・教授

研究者番号：30280720

鈴木 英之 (SUZUKI HIDEYUKI)

東京理科大学・理学部・教授

研究者番号：90211987

山田 章一 (YAMADA SHOICHI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80251403

(4) 研究協力者

中里 健一郎 (NAKAZATO KENICHIRO)

九州大学・基幹教育院・助教

研究者番号：80609347

富樫 甫 (TOGASHI HAJIME)

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

研究者番号：70733939