

高エネルギー加速器研究機構大型シミュレーション研究成果報告書（平成 24 年度）

(Brief report of the program)

2013 年 12 月 24 日

研究責任者名 Name	鷹野正利		所属機関 Affiliation	早稲田大学
受理番号 Proposal No.	12/13-07	研究課題名 Program title	クラスター変分法による核物質状態方程式計算	

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

2体核力ポテンシャル Argonne v18 と 3体核力ポテンシャル Urbana UIX から成る現実的な核物質ハミルトニアンから出発し、一様な有限温度一様非対称核物質の一核子当たりの自由エネルギー F を、クラスター変分法を用いて、数密度 n 、陽子混在度 Y_p 、温度 T の関数として計算した。 (n, Y_p, T) の範囲はそれぞれ $0 < n \leq 0.18 \text{ fm}^{-3}$ (1980 points), $0 \leq Y_p \leq 0.5$ (213 points), $0 \leq T \leq 33 \text{ MeV}$ (67 points) である。

これらの F のデータは、重力崩壊型超新星爆発の流体数値シミュレーションに適用可能な核物質状態方程式を作成するために必要である。すなわち、我々はこの F のデータを用いて、非一様核物質の自由エネルギー密度を Thomas-Fermi (TF) 近似で計算する。Wigner-Seitz 格子の中心にある原子核の表面では、陽子と中性子の密度が急激に減少するため、様々な温度 T での、上記 (n, Y_p) の領域において対応する F の値が必要となる。本計算では、そのような F のデータセットを完備した。

(英文)

Starting from the realistic nuclear Hamiltonian composed of the Argonne v18 two-body nuclear potential and the Urbana UIX three-body nuclear potential, we have calculated the free energy per nucleon F of uniform hot asymmetric nuclear matter by the cluster variational method as a function of the number density n , proton fraction Y_p , and temperature T . The regions of (n, Y_p, T) are $0 < n \leq 0.18 \text{ fm}^{-3}$ (1980 points), $0 \leq Y_p \leq 0.5$ (213 points), $0 \leq T \leq 33 \text{ MeV}$ (67 points), respectively.

These data on F are necessary to construct an equation of state of nuclear matter that is applicable to hydrodynamic numerical simulations on core-collapse supernovae, and we will calculate the free energy density of non-uniform nuclear matter in the Thomas-Fermi (TF) approximation using these data on F . Since the densities of protons and neutrons decrease drastically at the surface of the nucleus located in the center of the Wigner-Seitz cell, the corresponding values of F in the region of (n, Y_p) shown above are necessary for the TF calculation at various values of T . In this project, we have completed the data set of F .

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読付きの学術論文数	プロシーディング論 文数	その他 (投稿中を含 む)
	1	0	1	1

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表	
1. 富樫甫、山室早智子、中里健一郎、鷹野正利、鈴木英之、住吉光介「クラスター変分法による超新星爆発計算用核物質状態方程式」日本物理学会（2013年3月26日）	
査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。	
1	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
2	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
3	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。	
1.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
2.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
3.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
その他（学位論文、紀要、投稿中の論文を含む）（URL を記載）	
1. 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 Conferences (INPC2013) accepted	
特記（本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など）	
1. 2.	

高エネルギー加速器研究機構
平成 24-25 年度大型シミュレーション研究実施報告書

研究課題名 クラスタ変分法による核物質状態方程式計算

研究代表者 早稲田大学理工学術院 鷹野正利
共同研究者 早稲田大学理工学術院 富樫甫
東京理科大学理学部 山室早智子
東京理科大学理学部 中里健一郎
東京理科大学理学部 鈴木英之

重力崩壊型超新星(SN)爆発シミュレーションに適用可能な、現実的核力に基づく核物質状態方程式(EOS)を作成するために、一様核物質の一核子当たりの自由エネルギーを、クラスタ変分法を用いて計算した。

今日までに作成された、SNシミュレーションに適用可能な核物質EOSは、その数が限られており、更にそのEOSにおいて一様核物質相の熱力学量は、現象論的原子核模型に基づいて計算されている。すなわち、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が、SNシミュレーションに適用された例はまだない。

そこで我々は、2核子散乱実験を良く再現する現実的な2体核力 Argonne v18 (AV18)ポテンシャルと3体核力 Urbana IX(UIX)から成る核物質ハミルトニアンから出発し、クラスタ変分法を用いて有限温度非対称核物質の自由エネルギーを計算し、それに基づきSN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進めている。

我々の計画では、一様核物質相をクラスタ変分法で作成し、非一様相は Thomas-Fermi(TF)近似で取り扱う。すなわち非一様核物質相は、Wigner-Seitz(WS)近似を用いて、WS格子の中心に存在する一つの原子核と、その周りにしみ出た陽子・中性子ガスに加え、核外では有限体積を持つ古典的なガスとしての α 粒子を考え、TF近似によりWS格子の平均自由エネルギー密度を最小にするような核子・ α 粒子空間分布を求める。(代表的なSN-EOSの一つである ShenEOS の処方を踏襲する。)この際、WS格子中の原子核の中心付近は通常の原子核の内部密度となっているが、核の表面で陽子・中性子の密度は急激に減少する。このような密度分布を持つWS格子の自由エネルギーを求める際には、原子核飽和密度近傍から極低密度まで、様々な陽子混在度に対する自由エネルギーの情報が必要であり、それらのデータをクラスタ変分法で求めな

なければならない。実際先行研究において、典型的な平均密度、平均陽子混在度、温度での WS 格子の自由エネルギー密度を求める TF 計算を行い、その精度を十分に保証するためには、TF 計算に用いる一様核物質自由エネルギーのデータを、数密度 n が $0 < n \leq 0.18 \text{ fm}^{-3}$ の範囲で 1980 ポイント、陽子混在度 Y_p が $0 \leq Y_p \leq 0.5$ の範囲で 213 ポイントのグリッドで、求める必要があることが分かった。また SN-EOS を構築するためには、非一様相の現れる温度 T について $0 \leq T \leq 33 \text{ MeV}$ (67 ポイント) に対して、自由エネルギーのデータを完備する必要がある。

そこで本研究課題においては、上記の (n, Y_p, T) に対してクラスター変分法を用いた自由エネルギー計算を行い、それら必要なグリッドポイントにおける自由エネルギー値を完備することに成功した。

現在、これらの自由エネルギーを用いて、TF 計算を推進中であるが、2013 年 3 月の段階での preliminary な核物質相図を図 1 に示す。今後は TF 計算により非一様相の EOS を完備し、クラスター変分法による、現実的核力から出発した、SN シミュレーションに適用可能な核物質 EOS の完成を目指す。

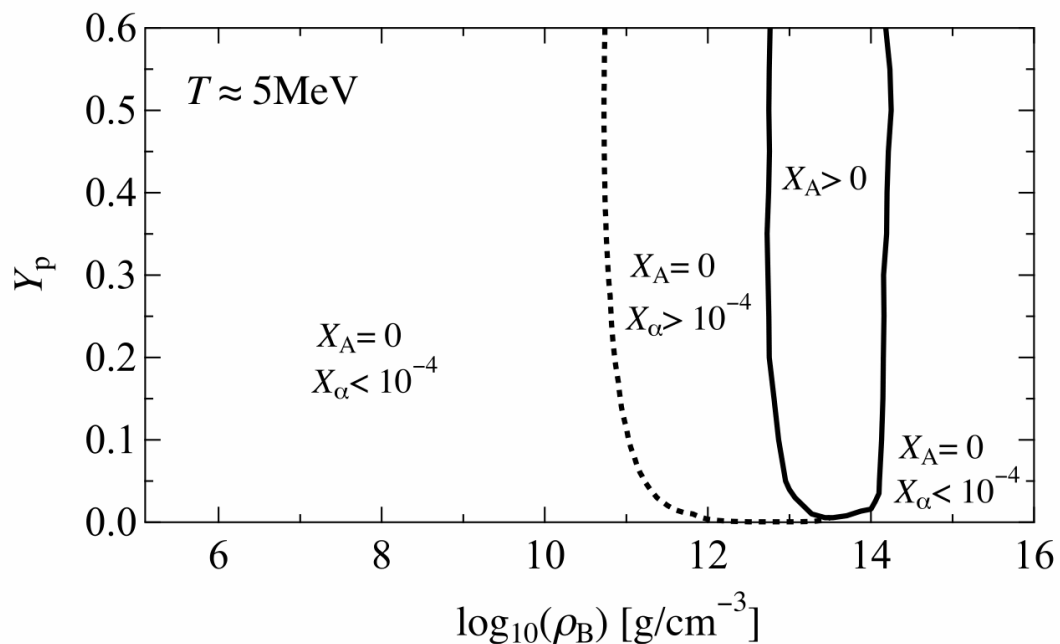


図 1 : 現実的核力 AV18+UIX から出発したクラスター変分法に基づく核物質の相図 ($T \sim 5 \text{ MeV}$)。