

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540325

研究課題名(和文)有限温度の原子核物質の一次相転移における混合相

研究課題名(英文)Mixed phase in the first-order phase transition of nuclear matter at finite temperature

研究代表者

丸山 敏毅 (Maruyama, Toshiki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：50354882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：低密度原子核物質の構造と性質に関して、超新星コアを想定した条件で計算を進め、液相気相相転移による混合相の出現に関する理解を深めた。Urca過程による中性子星の冷却過程を、ハドロン-クォークの混合相を基に計算し、カシオペアAの冷却曲線をほぼ説明できることを示した。高密度におけるハドロン-クォーク混合相の研究で、クォーク相を記述するモデルを、これまで使っていたものよりも洗練されたモデルに切り換え、太陽質量の約2倍の重い中性子星の記述を可能にした。

研究成果の概要(英文)：We have explored the properties and structures of nuclear matter relevant to the core of supernovae. Particularly, the appearance of mixed phase of liquid and gas was studied in detail. The cooling process of neutron stars by the Urca process was studied by considering hadron-quark mixed phase. We succeeded in explaining the cooling of Cas A neutron star. We have revised our model of hadron-quark mixed phase at high density and succeeded in explaining the mass and radius of neutron star as heavy as twice the solar mass.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：中性子星 超新星コア 原子核物質 相転移 パスタ構造 有限温度

## 1. 研究開始当初の背景

我々は核物質の相転移に関して、いわゆる“ pasta ”構造をもった混合相(pasta混合相)の性質を包括的に研究してきた。

まず低密度における液相と気相(原子核相と電子相)、原子核相と中性子相、次いで、高密度における K 中間子凝縮相と通常原子核相、そしてクォーク相とハドロン相といった混合相である。これらの pasta 混合相の出現により系の状態方程式が有意に影響を受ける事、荷電遮蔽効果により状態方程式が Maxwell 構成法によるものに近づく事、混合相では局所的な荷電中性条件がなくなるため、一様物質を仮定した場合の構成要素とは異なる組成が生じる事などが明らかになった。

また、pasta 混合相の状態方程式を用いて中性子星の構造や質量を解析し、混合相の重要性を議論してきた。

核物質における pasta 混合相の性質は、理解を深めつつあったが、それまでは温度ゼロの系を主に扱ってきた。それは中性子星を構成する物質としては良い近似となるが、超新星爆発初期の核物質、出来て間もない原始中性子星、中性子星連星合体などに対しては有限温度での計算が不可欠である。いまだに決着が付いていない超新星爆発のシミュレーションや、中性子星の冷却過程の研究では、混合相の構造が考慮されておらず、有限温度での pasta 混合相の状態方程式が必要である。また、超新星爆発や天体の冷却を左右するニュートリノの透過に対して物質の非一様構造は大きな影響を持っているはずであり、有限温度核物質での pasta 混合相の研究が望まれている。

これまでに有限温度での pasta 構造を計算した例はあるが、我々のゼロ温度での計算のようにポテンシャルと密度分布を自己無撞着に求めた研究はない。

## 2. 研究の目的

有限温度での核物質の性質を広い密度領域で系統的に研究する。

まず低密度では、相対論的平均場模型を有限温度に拡張し、pasta 混合相の状態方程式と核物質の相図を調べる。

高密度では、相対論的平均場模型を用いた K 中間子凝縮物質や、ハドロン-クォークの相転移の研究を行う。また、天体の冷却過程や、構造を計算し、観測値を再現するモデルを探る。

## 3. 研究の方法

低密度原子核物質の非一様構造の計算には、有限温度での Thomas-Fermi 近似による核子とその相互作用を媒介する中間子の相対論的平均場とで原子核物質を記述する。相互作用パラメータは、対称原子核物質の飽和性、

飽和密度での硬さ、典型的な原子核の結合エネルギーと密度分布などを再現するように決める。物質の非一様な構造を計算するためには、全空間を同等なセルに分け、周期的境界条件を課すか、反射的境界条件を課したうえで幾何学的対称性を仮定する Wigner-Seitz 近似を用いることで、単一セル内でのみ密度分布を計算するという簡単化を行う。密度分布の計算には、局所化学ポテンシャル  $\mu(r)$  を導入し、 $\mu$  が  $r$  に依らず一様になるように核子密度分布を調節する。有限温度の物質の非一様構造の計算ではまず Wigner-Seitz 近似を用いる。

## 4. 研究成果

超新星コアや原始中性子星に実現している有限温度での原子核物質の混合相の構造と性質を相対論的平均場および局所密度近似の枠組みで調べた。まず、低密度領域での液相-気相の混合相について、表面やクーロン力といった有限サイズ効果を排除し化学ポテンシャルと圧力に関する単純な平衡条件のもとで調べた。低密度(気相)の原子核物質の圧縮による相転移に関する考察を、圧力-陽子含有率平面上での軌跡と共存曲線との関係として理解を深めた。また、相転移の congruence (成分比合同性)を、共存曲線の広がり具合としてとらえ、(陽子含有率が 0.5 である対称原子核物質は congruence が高く中性子過剰原子核物質は congruence が低い事、温度の上昇とともに congruence が高くなること、中性子過剰原子核物質で congruence が低いのは陽子中性子間の強い引力によることなどを明らかにした。

次に有限温度での低密度原子核物質の非一様構造「pasta 構造」を計算し、系の圧力と密度への依存性を求めた。これによって有限サイズ効果をすべて考慮したうえで液相-気相の混合相の状態方程式を求めることが可能となった。

次に、実際の超新星コアや原始中性子星に対応する、有限温度でニュートリノがトラップされた状況での非一様構造を計算するようプログラムを改良した。レプトン(ニュートリノと電子)含有率が一定としてベータ平衡条件を課した場合、電子含有率すなわち陽子含有率が高くなり、ニュートリノトラップの影響が pasta 構造を安定化するように働くことが分かった。それに対して原始中性子星内部のハドロン-クォークの混合相についても有限温度・ニュートリノトラップの計算を行い、ニュートリノの存在が局所電荷密度を低くするよう働き、pasta 構造の出現を抑制することが分かった。そのことを温度やレプトン含有率といった条件を変えながら確かめた。

次に、中性子星の冷却機構の研究に取り組んだ。これまでの中性子星冷却に関する考え方は、小質量星に比べて大質量星ほど早く冷

えるとされてきた。それは、小質量星が核子  
 だけから構成されているのに対し、大質量  
 星では中心密度が高いためにクォーク物質が  
 できており、核子の URCA より物質を早く冷  
 やすクォーク冷却機構が働くためである。実  
 際、中性子星質量と温度の観測値はこの傾向  
 をよく表している。しかしカシオペア座 A  
 では、観測されている温度が高く通常の冷却機  
 構では説明がつかない。そこで我々は天体内  
 でのハドロン-クォークの混合相とを考慮し  
 た。さらに、混合相中のクォークがある密度  
 以上で超流動相、以下で通常クォーク相とな  
 ると仮定した。超流動は、核子物質とクォ  
 ーク物質の両方で URCA による冷却を抑制する。  
 また、カシオペア座 A の中性子星では内部の  
 密度が高く、ハドロン-クォークの混合相の  
 うち低密度クォーク相の領域が比較的狭く  
 超流動の領域が広いこと、クォーク超流動の  
 寄与がかなり大きいことが数値計算の結果  
 から得られた。その結果を元に天体の冷却過  
 程を計算すると、観測値をかなりよく再現す  
 ることができた。

次に、中性子星の構造(サイズと質量)に取  
 り組んだ。高密度核物質においてハドロンか  
 らクォークへの相転移を考え、ハドロン相と  
 クォーク相をそれぞれ Brueckner-Hartree  
 -Fock(BHF)モデルと nonlocal NJL モデルと  
 で記述した。また、ハドロン-クォークの混  
 合相も pasta 構造まで含めて計算した。その  
 結果我々による 2008 年の同様の計算(BHF モ  
 デルによるハドロンと bag モデルによるクォ  
 ーク)では再現できなかった重い中性子星の  
 記述が可能になった。

また、フルに 3 次元の構造計算を低密度核  
 物質に適用し、中性子星表面殻の力学的強度  
 を計算する手法を開発した。まず 3 次元での  
 低密度原子核物質の基底状態を求め、体積を  
 保存しながらそれを変形させた時のエネル  
 ギー増加率を計算することで、剪断係数を求  
 めた。その結果、われわれの新しいフル計算  
 による剪断係数は、これまでの単純化された  
 計算によるものより数パーセント低い、とい  
 う予備的な結果を得た。またこの原因は、低  
 密度原子核物質を構成する格子状に並んだ  
 原子核の有限サイズの効果と、電子による荷  
 電遮蔽の効果であると考察した。今後、この  
 計算を有限温度に拡張する予定である。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)すべて査読有

Multi-antikaonic nuclei and  
 in-medium kaon properties in dense  
 matter, T. Muto, T. Maruyama and T.  
 Tatsumi, J. Phys. Conf. Ser. 312,  
 022018 (2011)

Liquid-gas mixed phase in nuclear  
 matter at finite temperature

T. Maruyama and T. Tatsumi,  
 J. Phys. Conf. Ser. 312, 042015 (2011)

Pasta Structures of Quark-Hadron  
 Phase Transition in Proto-Neutron  
 Stars, N. Yasutake, T. Maruyama and  
T. Tatsumi, J. Phys. Conf. Ser. 312,  
 042027 (2011)

Effect of  $\Lambda(1405)$  on the structure of  
 multi-antikaonic nuclei  
 T. Muto, T. Maruyama, T. Tatsumi,  
 AIP Conf. Proc. 1374, 197 (2011)

Non-congruence of liquid-gas phase  
 transition of asymmetric nuclear  
 matter, T. Maruyama and T. Tatsumi,  
 AIP Conf. Proc. 1441, 387 (2012)

Three dimensional structure of  
 low-density nuclear matter,  
 M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana,  
T. Tatsumi, Phys. Lett. B 713, 284  
 (2012)

Molecular dynamics for dense matter,  
T. Maruyama, G. Watanabe, S. Chiba,  
 Prog. Theor. Exp. Phys. 2012(1),  
 01A201 (2012). (創刊特集号, 招待レビ  
 ュー)

Amorphous state in the mixed phase  
 of hadron-quark phase transition in  
 protoneutron stars,  
 N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi,  
 Phys. Rev. D. 86, 101302R, (2012).

Cooling of compact stars with color  
 superconducting phase in quark  
 hadron mixed phase. T. Noda, M.  
 Hashimoto, Y. Matsuo, N. Yasutake, T.  
 Maruyama, T. Tatsumi, M. Fujimoto,  
 Astrophys.J. 765, 1 (2013)

Pasta structures in neutrino  
 degenerate nuclear matter,  
T. Maruyama, N. Yasutake, T. Tatsumi,  
 Proc. of Sci. (NIC XII), 125 (2012)

Non-uniform structure in low-density  
 nuclear matter and neutron star crust,  
 M. Okamoto, T. Maruyama, K. Yabana,  
T. Tatsumi, Proc. of Sci. (NIC XII),  
 218.(2012)

Shear oscillations in the hadron-quark  
 mixed phase, H. Sotani, T. Maruyama,  
T. Tatsumi, Nucl. Phys. A 906, 37-49  
 (2013)

Nuclear "pasta" structures in low-density nuclear matter and properties of the neutron-star crust, M.Okamoto, T.Maruyama, K.Yabana, T.Tatsumi, Phys. Rev. C 88, 025801-1-10 (2013)

[学会発表](計 16件)

Inhomogeneous nuclear matter and equation of state, T.Maruyama, N.Yasutake, M.Okamoto, T.Tatsumi, "VIII Tours symposium on nuclear physics and astrophysics", 1-8 Sept. 201, Lenzkirch (Germany) (招待)

Structure and properties of nuclear matter in compact stars, T.Maruyama, M.Okamoto, N.Yasutake, T.Tatsumi, "VII Italy-Japan symposium on nuclear physics", 19-23 Nov. 2012, Milan (Italy) (招待)

Structure and properties of low-density nuclear matter with inclusion of neutrino, T.Maruyama, N. Yasutake, T. Tatsumi, 12th Int. Symp. "Nuclei in the Cosmos", 5-10 Aug. 2012, Cairns (Australia)

Non-uniform structure in low-density nuclear matter and neutron star crust, M.Okamoto, T.Maruyama, K.Yabana, T.Tatsumi, 12th Int. Symp. "Nuclei in the Cosmos", 5-10 Aug. 2012, Cairns (Australia)

Structure of Inhomogeneous Nuclear Matter in Compact Stars, T. Maruyama, N. Yasutake, M. Okamoto, and T. Tatsumi, "Workshop on Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics in 2013", 11-13 Feb 2013, Tokai, (Japan)

Inhomogeneous low-density nuclear matter and equation of state, 丸山敏毅, 安武伸俊, 巽敏隆, 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-", 30 Aug-1 Sep 2012, 京都

ニュートリノを含む非一様原子核物質 丸山敏毅, 安武伸俊, 巽敏隆, 日本物理学会 2012年, Sep, 2012, 京都

"ニュートリノを含むクォーク=ハドロン混合相における非一様構造", 安武伸俊, 丸山敏毅, 巽敏隆, 日本物理学会

2012年, Sep, 2012, 京都

ニュートリノを含む低密度原子核物質の状態方程式 丸山敏毅, 安武伸俊, 巽敏隆, 日本物理学会 2012年, Mar, 2013, 東広島

原子核中でのK中間子とハイペロンの共存可能性 武藤巧, 丸山敏毅, 安武伸俊, 巽敏隆, 日本物理学会 2012年, Mar, 2013, 東広島

ハドロン-クォーク混合相におけるシア一振動, 祖谷元, 丸山敏毅, 巽敏隆, 日本物理学会 2012年, Mar, 2013, 東広島

Hadron-Quark Mixed Phase with Geometrical Structure and Equation of State, T.Maruyama, EMMI Rapid reaction task force meeting on Quark Matter in Compact Stars, Oct. 7-9, 2013, Frankfurt, Germany (招待)

Inhomogeneous matter in compact stars, T.Maruyama, N.Yasutake, M.Okamoto, T.Tatsumi, HPCI & iTHES Workshop on Neutron Matter with Strangeness, Nov 11-15, 2013, Wako, Japan (招待)

Mean field approach to the structure and properties of neutron star matter T.Maruyama, Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Dec 8-13, 2013, Dallas, USA

Inhomogeneous structures of neutron star crust and mechanical properties, T.Maruyama, M.Okamoto, N.Yasutake, T.Tatsumi, International Conference on the Structure and Signals of Neutron Stars, from Birth to Death, Mar. 24-28, 2014, Florence, Italy

Inhomogeneous Matter in Compact Stars, T.Maruyama, Seminar at Cyclotron Laboratory, Texas A&M Univ., Dec 6, 2013, College Station, USA (招待)

General description of quantum molecular dynamics, T.Maruyama, RIKEN workshop on Nuclear Symmetry-Energy and Nucleus-Nucleus Collision Simulations, July 2-4, 2013, Wako, Japan (招待)

[図書](計 3件)

Nuclear pasta in supernovae and neutron stars, G. Watanabe and T. Maruyama, "Neutron Star Crust" ed.

C. A. Bertulani and J.Piekarewicz,  
Nova Science Publishers, pp 23-44  
(2012)

Mixed phases during the phase  
transitions, T. Tatsumi, N. Yasutake,  
T. Maruyama, “ Neutron Stars ” ed. H.  
Uechi, Nova Science Publishers, pp  
199-231 (2012).

Thermodynamical Description of  
Hadron-Quark Phase Transition and  
its Implications on Compact-Star  
Phenomena, N.Yasutake, T.Noda,  
H.Sotani, T.Maruyama, T. Tatsumi,  
Recent Advances in Quarks Research,  
Nova Science Publishers, pp.63-112  
(2013)

〔その他〕

ホームページ等

<http://silver.j-parc.jp/hadron/member/maruyama>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

丸山 敏毅 (MARUYAMA, Toshiki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原  
子力科学研究部門・先端基礎研究センター・  
研究主幹

研究者番号：50354882

### (2) 研究分担者

巽 敏隆 (TATSUMI, Toshitaka)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：40155099