

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540313

研究課題名 (和文) 原子核物質における混合相と非一様構造

研究課題名 (英文) Mixed phase in nuclear matter and its non-uniform structures

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・先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：50354882

研究成果の概要 (和文)：超新星や中性子星を構成する原子核物質に関して、1 次相転移 (低密度での液相気相相転移、高密度での K 中間子凝縮、高密度でのハドロン-クォーク相転移) における混合相の構造を調べ、パスタと呼ばれる幾何学的構造が現れること、それによって物質の状態方程式や構成粒子の比率が影響を受けることなどが分かった。また、得られた物質の状態方程式を用いて計算した中性子星のサイズと質量について、観測事実と矛盾しない結果が得られた。

研究成果の概要 (英文)：We have investigated structure and properties of nuclear matter in supernovae and neutron stars. During first-order phase transitions such as liquid-gas, kaon condensation, and hadron-quark transition, matter exhibit exotic structures called “pasta”, which influences the equation of state (EOS) and particle fraction of matter. We have successfully reproduced radii and masses of neutron stars using the obtained EOS.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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：高密度物質、一次相転移、中性子星、非一様構造、平均場理論

1. 研究開始当初の背景

中性子星や超新星爆発での天体を構成する原子核物質では、各種の相転移が予想されている。これらの多くは一次相転移を示すが、2 個以上の化学的に独立な成分が存在する系の一次相転移に対しては、従来の Maxwell 構成法が適用できず、より基本的な Gibbs 条

件を課す必要がある。その結果 Maxwell 構成法を適用した場合よりもずっと広範囲の密度にわたって混合相が存在する可能性が Glendenning によって指摘された。

それ以来、低密度での液相気相相転移から、高密度クォーク物質でのカラー超伝導相にいたる数多くの一次相転移に対して多くの

研究が行われ、また得られた状態方程式は中性子星などのコンパクトな天体の現象に適用されてきた。

一方、混合相には“パスタ構造”と呼ばれる多様な非一様幾何学的構造が予想され、理論的にも興味を持たれている。例えば低密度の原子核物質では、密度が高くなるに従い球形の原子核の三次元格子構造、棒状の原子核の二次元格子、板状の原子核の一次元格子、棒状の穴の二次元格子、球形の穴の三次元格子と変化し、標準原子核密度に近づいてようやく一様な原子核物質になるというものである。この「棒」や「板」の形状をスパゲッティやラザーニャに擬えて“パスタ構造”と呼んでいる。また、高密度物質でも中間子凝縮の混合相、ハドロン-クォーク相転移での混合相でも同様の構造が予想されている。

パスタ構造の出現は、力学的にはクーロン斥力と物質の表面張力のつりあいで理解されているが、以前の研究では陽子や電子など荷電粒子間のクーロン力が構造の詳細に反映されなかったり、電子の一様な密度分布が仮定されているなど、クーロン遮蔽を無視した計算しか行われなかった。

それに対し我々のグループでは、相対論的平均場(メソン場)とクーロン相互作用、バリオンや電子の密度分布とを無撞着に計算する手法を開発し、ゼロ温度における低密度物質のパスタ構造、高密度物質での K 中間子凝縮およびハドロン-クォーク相転移におけるパスタ構造の計算を行った。

そして表面張力の存在やクーロン遮蔽効果によって、パスタ構造のサイズや現れる密度領域が影響を受けることを示した。特に、遮蔽効果により系の状態方程式が、クーロン力や表面張力を考慮しないバルクな Gibbs 条件による状態方程式よりも、むしろ Maxwell 構成法によるものに近くなることを指摘した。

2. 研究の目的

(1) まずハドロン-クォーク相転移での混合相の研究として、ハドロン相にハイペロンの自由度を含み微視的な相互作用による状態方程式をもちいた現実的な計算を行う。その結果得られる状態方程式を用いて、中性子星やクォーク星のようなコンパクトな天体の理解を進める。また、低密度の液相気相相転移または中性子析出相転移、 K 中間子凝縮、ハドロン-クォーク相転移をすべて考慮した状態方程式を用いて、中性子星の構造計算(半径、質量等)を行う。

(2) 次に、計算に温度パラメータを導入し、有限温度の超新星物質や、誕生直後の高温中性子星物質でのパスタ構造を研究する。

(3) 更に、 K 中間子凝縮の計算手法を有限系に適用し、 K 中間子原子核の構造の研究を行う。分子動力学計算により予言されていた高密度状態が実現するかどうかを確かめる。これまで計算が行われた軽い系だけでなく、広い質量数領域に亘る K 中間子原子核の構造を系統的に調べ、未知の現象が起こる可能性について検討する。

3. 研究の方法

我々は化学ポテンシャルとクーロンポテンシャルを同時にゲージ不変形で取り入れたことにより、混合相でのクーロン遮蔽効果、平均場、粒子密度分布をすべて無撞着に計算する。これは熱力学的基礎の上に立った特徴的なものであり、現象への応用に関しても重要なものである。とくに混合相におけるクーロン遮蔽効果の重要性は、個々の相転移にはよらない一般的特徴として我々が強調してきたユニークな点であり、個々の相転移の現象への応用を考える際にも重要であるといえる。

4. 研究成果

(1) ハドロン-クォーク相転移での混合相の研究に関しては、ハイペロンの自由度を含んだ Brueckner-Hartree-Fock 理論によるハドロン物質のエネルギー密度と、MIT bag 模型によるクォーク物質のエネルギー密度の結果を用いて、密度増加と共にハドロンからクォーク物質へと物質が変化する様子を計算した。

その結果、ハドロンからクォークへと相転移する過程で、ハドロンとクォークの混合相がパスタ構造を取ることが分かった。

更に、荷電遮蔽効果により混合相の状態方程式が、単純な Maxwell 構成法によるものに近くなることを明らかにした。この状態方程式を用いて Toleman-Oppenheimer-Volkov 方程式を解き天体の構造と質量を求めたところ、観測されている中性子星質量と矛盾しない結果を得ることが出来た。

また、混合相のハドロン物質の中ではハイペロンが全く現れないという新たな知見が得られた。その原因として、混合相では局所的荷電中性の条件がないため、ハドロン相では陽子の含有率が高くなり、ハイペロンの混合を引き起こす中性子密度の増加が抑制されるためであることが分かった。

(2) ゼロ温度での相対論的平均場模型による計算では、バリオンの運動エネルギーとスカラー密度を求めるのに矩形の運動量分布関数を用いていたが、有限温度ではこれを Fermi-Dirac 分布関数にすることで計算コードの拡張を行った。

まず一様原子核物質に関して密度に対する

圧力を調べたところ、有限温度では Van Der Waals 的な状態方程式となり、気相-液相の相転移が起こり、単純な議論では共存相が現れる密度領域があることが分かった。

この有限温度の原子核物質に対して、ゼロ温度の時と同様の非一様構造の可能性を調べた。その結果、構造を無視した計算で得られる共存相の領域の内側に、 pasta 構造の現れる領域が存在することが分かった。また、ゼロ温度の場合の pasta 構造は“気相”に核子が含まれず電子のみとなったが、有限温度では低密度の気相が現れること、それにより気相と液相の間に働く表面張力が弱まり、ゼロ温度の場合より pasta 構造のサイズが小さくなる事などが分かった。

次に有限温度での取扱をハドロン-クォークの混合相にも適用し、原始中性子星の高密度物質の性質を調べた。その結果、ゼロ温度の時と同様に、ハドロン-クォークの混合相が pasta 構造を持つこと、混合相内でハイペロンの混合が抑制されることなどが分かった。またゼロ温度に比べて状態方程式が Maxwell 構成法によるものに、更に近くなることが分かった。

(3) K 中間子原子核の構造に関しては、K 中間子と陽子の引力によって非常に高密度が実現する可能性が指摘されていたが、我々の相対論的平均場モデルによる計算では通常の 1.5 から 2 倍程度の密度にしかないという結果を得た。

また、実験ではまだ不可能であるが理論的には興味深い多重 K 中間子原子核をつくり、高密度物質中での K 中間子凝縮との関連性を調べた。原子核中での K 中間子の個数を増やしていくと、初めは結合エネルギーも増加するが、ある程度の K 中間子が入ると結合が浅くなり密度の増加も止まる様子が見られた。これは K 中間子のダイナミクスを支配するカイラル対称性に起因する K-K の高次の相互作用が斥力的に働くためであることが分かった。

5. 主な発表論文等

(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 16 件)

1. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Hadron-quark mixed phase in hyperon stars”, Phys. Rev. D, 査読有, 76 巻, 2007, 123015.1-12
2. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Quark deconfinement transition in hyperonic matter”, Phys. Lett. B, 査読有, 659 巻, 2008, 192 – 196
3. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Properties of hyperon-quark mixed phase in compact stars”, Journ. Phys. G, 査読有, 35 巻, 2008, 104076.1-4
4. T. Maruyama, S. Chiba and T. Tatsumi, “Non-uniform structure of matter and the equation of state”, Int. Journ. Mod. Phys. E, 査読有, 17 巻, 2008, 1774-1789
5. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Structure of multi-antikaonic nuclei in the relativistic mean-field model”, Mod. Phys. Lett. A, 査読有, 23 巻, 2008, 2536-2539
6. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Hyperon-quark mixed phase in compact stars”, Proceedings of INPC 2007 (Nucl. Phys. A), 査読無, 805 Vol II, 2008, 588-590
7. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Multi-antikaonic nuclei in the relativistic mean-field theory”, Proceedings of Int. Symp. on Exotic States of Nuclear Matter 2007, 査読無, 2008, 290-297
8. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Multi-antikaonic nuclei in the relativistic mean-field theory”, Phys. Rev. C, 査読有, 79 巻, 2009, 35207.1-16
9. T. Maruyama, T. Tatsumi and S. Chiba, “Equation of state of nuclear matter in the first order phase transition”, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1120 巻, 2009, 129-134
10. N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, K. Kiuchi and K. Kotake, “General relativistic compact stars with exotic matter”, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1120 巻, 2009, 146-150
11. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Structure of Multi-Antikaonic Nuclei”, AIP Conference Proceedings, 査読無, 1120 巻, 2009, 270-274
12. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Multi-antikaonic nuclei in relativistic mean-field theory”, Phys. Rev. C, 査読有, 79 巻, 2009, 035207.1-16
13. G. Watanabe, H. Sonoda, T. Maruyama, K. Sato, K. Yasuoka and T. Ebisuzaki, “Formation of nuclear “pasta” in supernovae”, Phys. Rev. Lett. 査読有, 2009, 121101.1-4
14. N. Yasutake, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Hot hadron-quark mixed phase including hyperons”, Phys. Rev. D, 査読有, 80 巻, 2009, 123009.1-8
15. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Effects of the $\Lambda(1405)$ on the structure of multi-antikaonic nuclei”, Nucl. Phys. A, 査読有, 835 巻, 2010, 370-373
16. T. Maruyama, T. Tatsumi and S. Chiba,

“Liquid-gas phase transition in asymmetric nuclear matter at finite temperature.”, Nucl. Phys. A, 査読有, 834 巻, 2010, 561-563

[学会発表] (計 36 件)

1. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Bulk properties of kaonic nuclei in the mean-field calculation”, Int. Nucl. Phys. Conf., 2007 年 6 月 5~8 日, Tokyo (Japan)
2. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Hyperon-Quark Mixed Phase in Compact Stars”, Int. Nucl. Phys. Conf., 2007 年 6 月 5~8 日, Tokyo (Japan)
3. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Hyperon-Quark Mixed Phase in Dense Matter”, Int. Conf. on Exotic State of Matter, 2007 年 6 月 11~15 日, Catania (Italy)
4. T. Maruyama, S. Chiba and T. Tatsumi, “Non-uniform Structure of Matter and Equation of State”, Nuclear Dynamics in Heavy-ion Reactions and Neutron Stars, 2007 年 7 月 10~14 日, Beijing (China)
5. 丸山敏毅, 千葉敏, H.-J. Schulze, 巽敏隆, “天体中でのハイペロンクォーク混合相”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 21~24 日, 札幌
6. 武藤巧, 丸山敏毅, 巽敏隆, “原子核内における K 中間子の多重束縛状態”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 21~24 日, 札幌
7. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Structure of Multi-Antikaonic Nuclei in the Relativistic Mean-Field Model”, Chiral Symmetry in Hadron and Nuclear Physics, 2007 年 11 月 13~16 日, Osaka (Japan)
8. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Hyperon-quark mixed phase in compact stars”, 20th Int. Conf. on Ultra Relativistic Nucleus Nucleus Collisions, 2008 年 2 月 4~10 日, Jaipur (India)
9. 丸山敏毅, 千葉敏, H.-J. Schulze, 巽敏隆, “相対論的平均場による有限温度物質の取り扱い”, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 22~26 日, 東大阪
10. 丸山敏毅, 丸山智幸, 千葉敏, 巽敏隆, “相対論的平均場による有限温度物質の構造と性質”, High-density nuclear matter and compact star phenomena, 2008 年 5 月 30 日~31 日, 京都
11. 丸山敏毅, H.-J. Schulze, 千葉敏, 巽敏隆, “Hyperon-quark mixed phase”, High-density nuclear matter and compact star phenomena, 2008 年 5 月 30 日~31 日, 京都
12. 丸山敏毅, 丸山智幸, 千葉敏, 巽敏隆, “相対論的平均場による有限温度物質の構造と性質”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 9 月 20 日~23 日, 山形
13. 丸山敏毅, 武藤巧, 巽敏隆, “Multi antikaonic states in nuclei”, KEK 研究会『J-PARC の物理: ハドロン・原子核研究の新しい局面』, 8 月 7 日~9 日, つくば
14. T. Maruyama, S. Chiba, H.-J. Schulze and T. Tatsumi, “Hyperon suppression in hadron-quark mixed phase”, International Conference on Strangeness in Quark Matter, 2008 年 10 月 6 日~10 日, Beijing (China)
15. T. Maruyama, S. Chiba and T. Tatsumi, “Structured mixed phase and the equation of state”, Nuclear Physics Meeting on “Clustering in Dilute Nuclear Matter”, 2008 年 10 月 18 日, Kizugawa (Japan)
16. T. Maruyama, S. Chiba and T. Tatsumi, “Equation of state of nuclear matter”, Japan-Italy Symposium on Heavy Ion Physics, 2008 年 11 月 11 日~15 日, Tokai (Japan)
17. T. Muto, T. Maruyama, and T. Tatsumi, “Structure of multi-antikaonic nuclei”, Japan-Italy Symposium on Heavy Ion Physics, 2008 年 11 月 11 日~15 日, Tokai (Japan)
18. N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, K. Kiuchi, K. Kotake, “General relativistic compact stars with exotic matter; Effects of rotation and strong magnetic field”, Japan-Italy Symposium on Heavy Ion Physics, 2008 年 11 月 11 日~15 日, Tokai (Japan)
19. T. Maruyama, T. Muto and T. Tatsumi, “相対論的平均場模型によるマルチ K 中間子原子核の研究”, KEK セミナー, 2008 年 12 月 1 日, つくば
20. T. Maruyama, S. Chiba and T. Tatsumi, “Equation of state of nuclear matter at the first order phase transition”, 理研ミニワークショップ「重イオン衝突と状態方程式」, 2008 年 12 月 16 日~17 日, Wako (Japan)
21. N. Yasutake, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Finite size effects on quark-hadron phase transition and structures of compact stars”, 国立天文台研究会「理論天文学の将来」, 2008 年 12 月 15 日~17 日, 三鷹
22. T. Maruyama, S. Chiba and T. Tatsumi, “Properties of non-uniform nuclear matter at finite temperature”, The winter school and the workshop for the crust of compact stars and beyond, 2009 年 2 月 5 日から 13 日, Coimbra (Portugal)
23. 丸山敏毅, 千葉敏, 巽敏隆, “原子核物質の一次相転移における混合相と状態方程式”

- 沼津ワークショップ「クォーク力学・原子核構造に基づく爆発的天体現象と元素合成」, 2009年3月16日~18日, 沼津
24. 安武伸俊、丸山敏毅、巽敏隆、木内健太、固武慶, “パスタ構造を考慮したクォークハドロン混合相を含む状態方程式および強磁場中性子星構造に与える影響”, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月27日~30日, 東京
 25. 武藤巧、丸山敏毅、巽敏隆, “K中間子多重束縛原子核におけるK-K相互作用の効果”, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月27日~30日, 東京
 26. N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, K. Kiuchi, and K. Kotake, “The pasta structure of quark-hadron phase transition and effects on magnetised compact objects”, Compact stars in the QCD phase diagram II, May 20-24, 2009, Beijing (China)
 27. 丸山敏毅, “分子動力学による高密度物質”, 『バリオン間相互作用に基づく核物質の構造』研究会, Jun 25-27, 2009, 盛岡市
 28. T. Maruyama, T. Tatsumi and S. Chiba, “Liquid-gas phase transition in asymmetric nuclear matter at finite temperature”, International Conference on Nucleus Nucleus Collisions, Aug 17-21, 2009, Beijing (China)
 29. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Effects of $\Lambda(1405)$ on the Structure of Multi-Antikaonic Nuclei”, The 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Sept 14-18, 2009, Tokai (Japan)
 30. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Effects of $\Lambda(1405)$ on the Structure of Multi-Antikaonic Nuclei”, Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, Oct 13-17, 2009, Hawaii (United States)
 31. T. Maruyama, T. Tatsumi and S. Chiba, “Coulomb and Surface Effects on “Pasta” Phases in Nuclear Matter”, Annual Moscow Workshop on the Non-Ideal Plasma Physics, Nov 30-Dec 1, 2009, Moscow (Russia)
 32. T. Maruyama, T. Tatsumi and S. Chiba, “Equation of State of Nuclear Matter at First-Order Phase Transitions”, Educational School “Physics of High Energy Density Matter”, Dec 2-3, 2009, Moscow (Russia)
 33. T. Maruyama, T. Tatsumi, S. Chiba, “Structured Mixed Phase in Nuclear Matter”, New Frontiers in QCD 2010 – astrophysics part, Jan 18-Feb 5, 2010, Kyoto (Japan),
 34. T. Muto, T. Maruyama and T. Tatsumi, “Multi-Antikaonic Nuclei and Kaon Condensation in Dense Matter”, Origin of Matter and Evolution of the Galaxies, Mar 8-10, 2010, Osaka (Japan)
 35. N. Yasutake, T. Maruyama, and T. Tatsumi, “Finite size effects on hot hadron-quark mixed phase including hyperons”, Origin of Matter and Evolution of the Galaxies, Mar 8-10, 2010, Osaka (Japan)
 36. N. Yasutake, T. Maruyama, and T. Tatsumi, “ハイペロンを含むクォーク・ハドロン混合相と星の構造”, 日本物理学会65回年会, Mar 19-23, 2010, 岡山
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・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
千葉 敏 (CHIBA SATOSHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹
研究者番号: 60354883
 - (3) 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