

平成 22 年 5 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2009
課題番号：19540252
研究課題名（和文）原子核・ハドロン・クォークの 3 階層状態方程式とコンパクト天体现象
研究課題名（英文）Nuclear-Hadron-Quark Matter Equation of State
and Compact Astrophysical Phenomena
研究代表者
大西 明 (OHNISHI AKIRA)
京都大学・基礎物理学研究所・教授
研究者番号：70250412

研究成果の概要（和文）：

本研究ではクォーク・ハドロン・原子核の 3 階層にまたがる高密度物質の状態方程式を求め、中性子星・超新星爆発等のコンパクト天体现象への適用を行うことを目指している。本科研費交付期間には、強結合格子 QCD での有限結合高次項の評価、強結合格子 QCD に基づきストレンジネス自由度を含む相対論的平均場理論の構築を行い、またストレンジネス自由度が速いブラックホール形成を引き起こすことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We aim at obtaining the nuclear-hadron-quark matter equation of state (EOS) based on QCD and at understanding of compact astrophysical phenomena. In this research, we have developed the strong-coupling lattice QCD including finite coupling effects of NLO and NNLO corrections, and the chiral SU(3) symmetric relativistic mean field model for normal and hypernuclei. We also find hyperons cause early collapse of black holes in dynamical collapse of massive stars.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：核物理

1. 研究開始当初の背景

クォークからコンパクト天体へ

高エネルギー重イオン衝突やコンパクト天体现象では、クォーク・ハドロン・原子核の 3 階層にわたる自由度が関与する。こうした微視的な物理入力を整理・統合し、これに基づいて超新星爆発、中性子星、ブラックホール生成等を理解することは、素粒子・原子

核・宇宙物理の研究者にとっての大きな目標の一つである。

高密度 QCD

高温・低バリオン密度のクォーク物質については、第一原理計算である格子 QCD のモンテカルロ (MC) シミュレーションと RHIC 実験により、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の性質について定量的な研究が進み

つつある。しかし、化学ポテンシャルが有限の場合、格子 QCD の MC シミュレーションで用いる重率が複素数となり、大きな体積で精度のよい結果を得る方法は見つかっていない。このため、中性子星やブラックホールの形成過程に必要となる低温・高バリオン密度物質の研究では、何らかの近似計算、あるいは模型計算が必要である。

高密度ハドロン物質

高バリオン密度のハドロン物質では、ハイペロン等のストレンジネスを含む粒子の混在が期待されている。近年の実験成果により、核内のハイペロン・ポテンシャルについての理解が進んでいる。例えば Σ ハイペロンは、以前は核内で Λ ハイペロンと同様の引力を感じると考えられていたが、KEK での実験により斥力であることが分かってきた。一方、高密度物質では自発的に破れたカイラル対称性が部分的に回復すると考えられており、最新のハイパー核情報を含むカイラル対称性を保った枠組みによる高密度物質状態方程式の研究が望まれる。

超新星爆発状態方程式

中性子星コアでは密度が標準核物質密度の数倍に達すると考えられており、前述の高密度クォーク・ハドロン物質の研究における重要な対象である。また、最近の住吉(分担者)らの研究により、ブラックホール生成時には高温・高密度物質が生成され、状態方程式への依存性がニュートリノ・スペクトルに現れることが分かってきた。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では以下の 3 つの方向からクォーク・ハドロン・原子核を含む状態方程式について検討し、コンパクト天体現象の理解を試みる。

(1) 強結合格子 QCD による QCD 相図の理解

低温・高密度物質を QCD に直接基づいて議論する最も有望な方法の一つが強結合格子 QCD である。これまでは主として強結合極限における議論が行われてきたが、現実の世界を記述する上では有限結合効果を取り入れることが必須である。本研究では系統的な強結合展開の手法を開発し、強結合極限 ($O(1/g^0)$)、展開の 1 次 (NLO, $O(1/g^2)$)、展開の 2 次 (NNLO, $O(1/g^4)$) 効果を取り入れた強結合格子 QCD 有効ポテンシャルを求め、QCD 相図における有限結合効果について研究を進める。

(2) SU(3)カイラル対称相対論的平均場理論 (Chiral SU(3) RMF) による高密度ハドロン

物質状態方程式の理解

高密度物質の理解において、核子間の相互作用に加えて、カイラル対称性とストレンジネス自由度(特にハイペロン混在効果)は 2 つの重要な要素である。本研究では、強結合格子 QCD から導かれるカイラル凝縮についての対数型のポテンシャルを取り入れ、ストレンジネス自由度を取り入れた Chiral SU(3) RMF を開発し、核物質・有限核・ハイパー核・高密度物質に適用する。

(3) ハイペロンを含む超新星物質状態方程式の構築とコンパクト天体現象への適用

これまでに超新星爆発計算において広く用いられている状態方程式テーブルでは、ハイペロンが含まれておらず、高密度領域の記述は不満足である。本研究では、近年の実験から示唆されるポテンシャルを尊重して平均場理論(RMF)に取り入れ、また原子核の熱的分布・パスタ構造を取り入れた超新星物質状態方程式を構築する。これに基づいてブラックホール形成過程などのコンパクト天体現象について研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 強結合格子 QCD

格子 QCD において、有限結合効果はプラケッット(グルーオンを表現するリンク変数のループ)の組み合わせとして現れる。NLO, NNLO の有効作用では、それぞれプラケッットが 1 つ、2 つ現れる配位を考え、これにクォークが伴う項の評価を行う。このとき、クォークの 2 体作用に加えて、3 体、4 体の相互作用項が現れるため、これらを平均場近似の範囲内で取り扱う新たな手法の開発を行う。

(2) Chiral SU(3) RMF

強結合極限格子 QCD において現れるカイラル凝縮の対数型自己エネルギーを取り入れた Chiral RMF を、ストレンジネス自由度を含むよう拡張する。この際、 $U(1)_A$ アノマリーを表現する KMT (Kobayashi-Maskawa-'t Hooft) 相互作用も考慮する必要がある。模型に現れるパラメータは、近年の実験から示唆される核内でのハイペロン・ポテンシャルを再現するように定める。

(3) 状態方程式とコンパクト天体現象

ハイペロンを含む相対論的平均場理論に基づいて、様々な温度・電子/バリオン比における物質の圧力・エントロピー・内部エネルギー等を密度の関数として求め、数値テーブルとして公開する。また、この状態方程式を重力崩壊型の天体現象に適用する。状態方程式テーブルは、広く用いられている Shenらのテーブルと同様の形式とすることによ

り、これまでに開発したニュートリノ輸送を含む流体模型プログラムをそのまま利用可能である。

4. 研究成果

(1) 強結合格子QCD

強結合格子QCDは、グルーオン自由度を先に積分してクォークの有効作用を求め、平均場近似などを利用することによって有効ポテンシャル(自由エネルギー密度)をほぼ解析的に求める手法である。これまでは、主として強結合極限($g = \infty$)、かつバリオン効果を見捨てるという制限のもとに議論が展開されていたが、本研究ではバリオン効果、有限結合効果を評価することにより、より現実に近いQCD相図や有効ポテンシャルを得ることができた。

まず、強結合極限におけるバリオン効果を取り入れた有効ポテンシャルについて議論した論文を出版した。また、有限温度における中間子質量について研究を進め、Brown-Rho スケーリングと呼ばれる中間子質量変化が強結合極限で起こっていることを示した。

次に、有限結合効果を取り入れた強結合格子QCDの定式化を行い、QCD相図への効果について議論した。この研究を通じて次のような知見を得た。

- 有限結合効果はクォーク質量の変化、クォークに対するベクトルポテンシャル、波動関数繰り込み係数の変化として現れる。
- 臨界温度(T_c)は波動関数繰り込み係数の変化に伴って、有限結合効果により大きく変化する。一方、クォーク質量の減少(引力)とベクトルポテンシャル(斥力)効果が相殺により、結合定数を変化させても相転移化学ポテンシャル(μ_c)はほとんど変化しない。この違いのため、図1に示すように、強結合極限の場合と比べて相図が温度方向に縮むこととなり、現実世界での相図の形に近づくことが分かった。
- 結合定数を小さくしていった場合、低温・高密度領域でカイラル対称性は自発的に破れている高密度物質が現れることを見つけた。これは近年 McLerran, Pisarski らによって提案されている Quarkyonic 物質に対応すると考えられる。

現在、閉じ込めの秩序変数である Polyakov loop 効果を取り入れた強結合格子QCDについて研究を進めており、ゼロ密度($\mu = 0$)でのMC計算結果に近い相転移温度を示す

など、QCD相図の解析的手法による理解がさらに進みつつある。

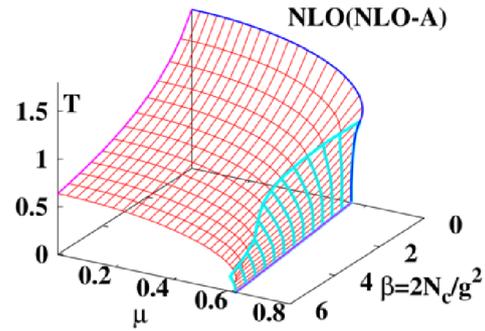


図1: QCD相図の結合定数依存性。
[雑誌論文](6)より転載。

(2) カイラル対称性をもつ相対論的平均場理論 (Chiral RMF)

相対論的平均場理論(RMF)は、原子核・核物質を記述するモデルとして成功してきた。しかしながら、QCDが持つカイラル対称性を導入するには不安定性などの多くの問題があり、これまで成功した例はほぼなかった。強結合格子QCDに基づく対数型カイラルポテンシャルを取り入れたChiral RMFは、QCDから実際の原子核を記述する橋渡しの役割を果たす。我々はまず、フレーバー SU(2) Chiral RMFを提案し、通常核・通常核物質を定量的にこれをSU(3)へ拡張することにより、不安定性の問題を持たず、また核物質・有限核を定量的によく記述できることを示した。

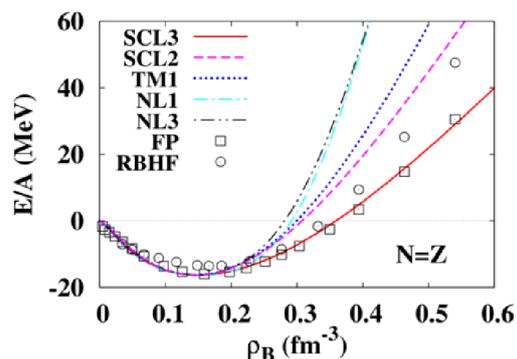


図2: Chiral RMF (SCL2, SCL3) による状態方程式と他のモデルの比較。
[雑誌論文](1)より転載。

次に、このChiral RMFの枠組みをフレーバーSU(3)に拡張し、ハイパー核を含む原子核や核物質の状態方程式を定量的にもよく記述できる枠組みが得られた。図2にはいくつかの模

型による状態方程式を示す。Chiral SU(3) RMF(SCL3)は、核力から出発した第一原理的な計算結果である Friedman-Pandhaipande の状態方程式の結果と無矛盾であることが分かる。また、 Σ 原子のエネルギーシフトが中性子星中の組成と関連することも指摘した。

(3) ハイペロンを取り入れた超新星物質 状態方程式とブラックホール形成

ハイペロンは中性子星コアでは標準核物質密度の 2-3 倍程度の密度で現れると考えられており、超新星での役割にも興味を持たれる。

本研究ではまず、ハイペロンを取り入れた超新星物質状態方程式を構築・公開した。相対論的平均場理論にハイペロンを導入し、近年の実験から望ましいと考えられるポテンシャルの深さからハイペロンと中間子の結合を与えた。

この状態方程式テーブルをコンパクト天体現象に適用し、ハイペロン効果について以下のような知見を得た。

- 中性子星コアでは数 10 %のハイペロンが混在するが、超新星爆発の初期段階(バウンス時点)ではハイペロンは 0.1 %程度しか現れない。
- 重い星(～40 太陽質量)からの動的なブラックホール形成過程では、ハイペロンが多く現れ、ブラックホール形成を促進する。結果として、図 3 に示すように、ニュートリノ放出持続時間は、ハイペロンを取り入れた場合には約半分の時間となる。

当初の計画では、状態方程式に原子核の熱的分布や pasta 効果を取り入れる予定であったが、この点についてはまだ達成できていない。今後取り組んでいく予定である。

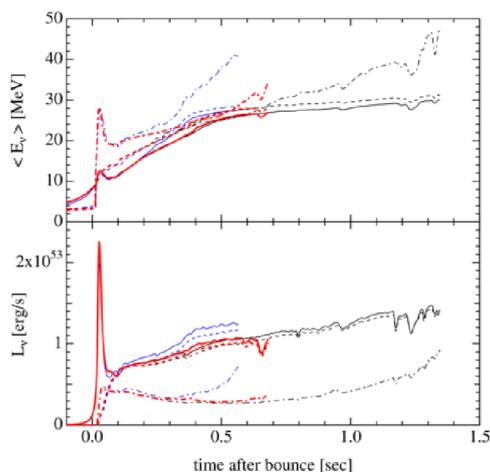


図 3: ブラックホール形成時のニュートリノスペクトル。ハイペロンを含む場合(赤線)にはニュートリノ持続時間が約半分となる。

[雑誌論文](14)より転載。

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 54 件)

(1) Lambda hypernuclei and neutron star matter in a chiral SU(3) relativistic mean field model with a logarithmic potential, K. Tsubakihara, H. Maekawa, H. Matsumiya, A. Ohnishi, Phys. Rev. C (2010), to appear (査読有).

(2) Effective Potential in the Strong coupling Lattice QCD with Next-to-Next-to-Leading Order Effects, T. Z. Nakano, K. Miura, A. Ohnishi, Prog. Theor. Phys. (2010), to appear (査読有).

(3) Neutrino oscillation and expected event rate of supernova neutrinos in adiabatic explosion model, S. Kawagoe, T. Yoshida, T. Kajino, H. Suzuki, K. Sumiyoshi, S. Yamada, Phys. Rev. D (2010), in press (査読有).

(4) Formulation of Supersymmetry on a Lattice as a Representation of a Deformed Superalgebra, A. D'Adda, N. Kawamoto, J. Saito, Phys. Rev. D 81(2010), 065001(28 pages) (査読有).

(5) Nuclear Matter and Finite Nuclei in Effective Chiral Model, P. K. Sahu, K. Tsubakihar, A. Ohnishi, Phys. Rev. C 81 (2010), 014002(8 pages) (査読有).

(6) Exploring Hadron Physics in Black Hole Formations: a New Promising Target of Neutrino Astronomy, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki, S. Yamada, Phys. Rev. D 81(2010), 083009(6 pages) (査読有).

(7) Phase diagram evolution at finite coupling in strong coupling lattice QCD, K. Miura, T. Z. Nakano, A. Ohnishi, N. Kawamoto, Phys. Rev. D 80 (2009), 074034 (18 pages) (査読有).

(8) Possibility of an s-wave pion condensate in neutron stars reexamined, A. Ohnishi, D. Jido, T. Sekihara, K. Tsubakihara Phys. Rev. C 80 (2009), 038202(4 pages) (査読有).

(9) Quarkyonic matter in lattice QCD at strong coupling, K. Miura, T. Z. Nakano and A. Ohnishi, Prog. Theor. Phys. 122 (2009), 1045-1054 (査読有).

(10) Matrix formulation of superspace on 1D lattice with two supercharges, S. Arianos, A. D'Adda, A. Feo, N. Kawamoto, J. Saito, Int. J. Mod. Phys. A24 (2009), 4737-4768 (査読有).

(11) Neutrino deuteron reaction in the

heating mechanism of core-collapse supernovae, S.X. Nakamura, K. Sumiyoshi, T. Sato, Phys. Rev. C 80(2009), 035802(6 pages) (査読有).

(12) Non-uniform Matter in Neutron Star Crusts Studied by the Variational Method with Thomas-Fermi Calculations, H. Kanzawa, M. Takano, K. Oyamatsu, K. Sumiyoshi, Prog. Theor. Phys. 122(2009) 673-691 (査読有).

(13) Towards a Theory of Entropy Production in the Little and Big Bang T. Kunihiro, B. Müller, A. Ohnishi, A. Schäfer, Prog. Theor. Phys. 121 (2009), pp 555-575 (査読有).

(14) Emergence of Hyperons in Failed Supernovae: Trigger of the Black Hole Formation, K. Sumiyoshi, C. Ishizuka, A. Ohnishi, S. Yamada, H. Suzuki, Astrophys. J. Lett. 690 (2009), L43-L46 (査読有).

(15) Tables of Hyperonic Matter Equation of State for Core-Collapse Supernovae, C. Ishizuka, A. Ohnishi, K. Tsubakihara, K. Sumiyoshi, S. Yamada, J. Phys. G 35 (2008), 085201(19 pages) (査読有).

(16) Oscillation and Future Detection of Failed Supernova Neutrinos from Black Hole Forming Collapse, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, H. Suzuki, S. Yamada, Phys. Rev. D 78 (2008), 083014(14 pages) (査読有).

(17) Astrophysical Implications of Equation of State for Hadron-Quark Mixed Phase: Compact Stars and Stellar Collapses, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, S. Yamada, Phys. Rev. D 77 (2008), 103006(12 pages) (査読有).

(18) Exact Extended Supersymmetry on a Lattice: Twisted N=4 Super Yang-Mills in Three Dimensions, A. D'Adda, I. Kanamori, N. Kawamoto, K. Nagata, Nucl. Phys. B 798 (2008), 168-183 (査読有).

(19) A chiral symmetric relativistic mean field model with a logarithmic sigma potential, K. Tsubakihara and A. Ohnishi, Prog. Theor. Phys. 117 (2007), 903-921 (査読有).

(20) Search for the H-Dibaryon Resonances in $12C(K^-, K^+ \Lambda \Lambda X)$, C. J. Yoon, H. Akikawa, K. Aoki, Y. Fukao, H. Funahashi, M. Hayata, K. Imai, K. Miwa, H. Okada, N. Saito, H. D. Sato, K. Shoji, H. Takahashi, K. Taketani, J. Asai, M. Kurosawa, M. Ieiri, T. Hayakawa, T. Kishimoto, A. Sato, Y. Shimizu, K. Yamamoto, T. Yoshida, T. Hibi, K. Nakazawa, J. K. Ahn, B. H. Choi, S. J. Kim, S. H. Kim, P. D. Park, I. G. Park, J. S. Song, C. S. Yoon, K. Tanida, A. Ohnishi (KEK-E522 Collab.),

Phys. Rev. C 75 (2007), 022201 (5 pages) (査読有).

(21) Phase diagram at finite temperature and quark density in the strong coupling limit of lattice QCD for color SU(3), N. Kawamoto, K. Miura, A. Ohnishi, T. Ohnuma, Phys. Rev. D 75 (2007), 014502 (18 pages) (査読有).

(22) Dynamics and neutrino signal of black hole formation in non-rotating failed supernovae. 1. EOS dependence, K. Sumiyoshi, S. Yamada, H. Suzuki, Astrophys. J. 667 (2007), 382-394 (査読有).

(23) Numerical Study on Stellar Core Collapse and Neutrino Emission: Probe into the Spherically Symmetric Black Hole Progenitors with 3 - 30Msun Iron Cores, K. Nakazato, K. Sumiyoshi, S. Yamada, Astrophys. J. 666 (2007), 1140-1151 (査読有).

[学会発表] (計 30 件)

(1) 住吉 光介, 超新星における高温高密度物質とニュートリノ, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/22, 岡山大学

(2) 椿原 康介, カイラル対称性を考慮した相対論的平均場モデルによるハイペロンを含む高密度核物質の研究, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/21, 岡山大学

(3) 中野 嵩士, NNLO 効果を含む格子 QCD の強結合展開における有効ポテンシャルと相図, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/21, 岡山大学

(4) 大西 明, 強結合格子 QCD に基づく QCD 相図の研究, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/21, 岡山大学

(5) 住吉 光介, 3次元ニュートリノ輻射輸送計算へ向けて, 基盤 S 研究会「超新星の爆発機構とガンマ線バースト源エンジンの統一的解明」, 2010/01/06, 国立天文台

(6) K. Tsubakihara, Hadronic Star Matter in an RMF Model with a SCL Chiral Potential, Haw09, 2009/10/17, Hawaii, USA

(7) A. Ohnishi, EOS table with hyperons and emergence of hyperons in core-collapse processes, Haw09, 2009/10/17, Hawaii, USA

(8) T. Z. Nakano, Next-to-Next-to-Leading Order Evaluation of Effective Potential in the Strong Coupling Lattice QCD, 3rd Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (HAW09), 2009/10/15, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA.

(9) K. Sumiyoshi, Emergence of hyperons in failed supernovae with short neutrino bursts, 10th International Conference on

Hypernuclear and Strange Particle Physics (Hyp-X), 2009/09/18, Tokai, Japan.

(10) A. Ohnishi, EOS of hyperonic matter for core-collapse supernovae, Hyp-X, 2009/09/15, Tokai, Japan.

(11) A. Ohnishi, Phase diagram and critical point evolution in NLO and NNLO strong coupling lattice QCD, XXVII International Symposium on Lattice Field Theory, 2009/07/26, Beijing, China.

(12) 大西 明, クォークから元素の合成まで - 地上の実験で探る物質と質量の起源 -, 西宮湯川記念セミナー, 2008/12/06, 西宮夙川公民館、西宮市

(13) A. Ohnishi, Jet-Shower Broadening and Ridge Structure, Tamura Symposium on Heavy-Ion Physics, 2008/11/20, Texas, USA.

(14) A. Ohnishi, Quarkyonic Phase in Lattice QCD at Strong Coupling, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, 2008/07/16, Williamsburg, USA.

(15) K. Sumiyoshi, Equation of state of dense matter for core-collapse supernovae, compact objects and neutrino bursts, 10th Int. Symp. on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG07), 2007/12/05, Sapporo, Japan.

(16) A. Ohnishi, Relativistic EOS of Supernova Matter with Hyperons, OMEG07, 2007/12/05, Sapporo, Japan

(17) A. Ohnishi, Brown-Rho Scaling in the Strong Coupling Lattice QCD, Workshop on Chiral Symmetry in Hadron and Nuclear Physics (Chiral07), 2007/11/14, Osaka, Japan

(18) N. Kawamoto, SU(3) chiral phase of finite temperature and density in the strong coupling lattice QCD, QCD in extreme conditions, 2007年8月8日, Roma, Italy

[図書] (計1件)

(1) AIP Conference Proceedings Volume 1016 Proceedings of the 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies: From the Dawn of Universe to the Formation of Solar System, Sapporo (Japan), 4-7 December 2007, 502 ページ

Editors: T. Suda, T. Nozawa, A. Ohnishi, K. Kato, M. Y. Fujimoto, T. Kajino, S. Kubono.

[その他]

代表者ホームページ

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~ohnishi/>

ハイペロンを含む超新星物質状態方程式

<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~chikako/EOS/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大西 明 (OHNISHI AKIRA)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：70250412

(2) 研究分担者

河本 昇 (KAWAMOTO NOBORU)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：50169778

住吉 光介 (SUMIYOSHI KOHSUKE)

沼津工業高等専門学校・教養科・准教授

研究者番号：30280720

(3) 連携研究者

()

研究者番号：