

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5 月 22 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540272

研究課題名（和文） QCD 相転移と爆発的宇宙物理現象

研究課題名（英文） QCD phase transition and explosive phenomena in the universe

研究代表者

橋本 正章（HASHIMOTO MASA-AKI）

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：20228422

研究成果の概要（和文）： 高密度星の熱的進化と冷却曲線において、相転移によりクォーク星（ストレンジ星）が形成された場合、特殊なニュートリノ放出過程が超新星爆発にどんな影響を及ぼすかを調べた。また超新星残骸 Cas A の中心天体の冷却曲線のここ 10 年間の観測結果をクォーク・ハドロン混合層における超流動相転移に伴うニュートリノ放出により説明することに成功した。

研究成果の概要（英文）： In the study of cooling curves of compact stars, we have considered the cases of the formation of quark stars and/or strange stars. Then we investigate the effects of particular emission processes of neutrinos on the supernova explosions. Furthermore, we applied our formulations to a compact star in the supernova remnant Cas A in these 10 years. As a consequence, we can explain the cooling curve by including the neutrino emission accompanied to the phase transition to super fluid state.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

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：QCD 相転移、コンパクト星、冷却曲線、超新星残骸 CasA

1. 研究開始当初の背景

当初は QCD 相転移が一次相転移かどうか不明であった。そのため、この相転移による宇宙物理への影響は極めて広範囲の爆発的現象に及ぶものと考えられていた。研究方法もかなり定性的なものから精密な分析を必要とするものまでであった。

2. 研究の目的

格子 QCD の計算によりクロスオーバーと判

明した。従って、宇宙初期での相転移による非一様ビッグバン元素合成に関しては変更を余儀なくされた。超新星爆発に関しては劇的効果が期待できにくく爆発への影響は少ないとわかるので状態方程式の変更も少なくともすむと思われる。一方、超新星残骸をもとにした冷却曲線には QCD 相転移によるクォーク物質の状態方程式とニュートリノ放射率が大きな影響を与えることが予想される。特に最近の Cas A の詳細な観測よりここ 10

年間の中心天体の冷却の観測はクォーク物質の性質を規定する有力な観測となることが期待される。

3. 研究の方法

QCD 相転移は一次相転移であるよりクロスオーバーである可能性が高くなったため、これまでの一次相転移を仮定したシナリオは考え直さなければならなくなった。クロスオーバーは格子 QCD の計算機シミュレーションからもわかってきたことであるのでかなり確かといえる。その結果、超新星爆発に相転移が寄与することはあまり望めないといえる。また宇宙初期で QCD 相転移が一次相転移と仮定した場合、バリオンの非一様性が作られるかもしれないと考え、非一様モデルでの元素合成をおこなってきたが、これも再検討する必要がある。新しいモデルの構築が必要になってきたといえる。しかし、超新星爆発後のコンパクト星の冷却過程を説明するのに使ったモデル、つまりコンパクト星内部のクォークコアがカラー超伝導状態にあることを仮定するモデルは存続することも判明した。これらの新事実を考量したモデルの再構築を今後は必要としていくと思われる。

4. 研究成果

1) QCD相転移を含む状態方程式を超新星爆発に適用し、流体力学とニュートリノ輸送のシミュレーションを行った。この課題は爆発のダイナミクスとの関連を重力崩壊で中性子星ができた後QCD相転移を起し、クォークコアができた場合を調べることで、QCDモデルパラメータを制限するべく準備を進めたが、QCD相転移がクロスオーバーと判明したためシナリオの変更が必要となり相転移なしでニュートリノ輸送を近似的に含めることには成功した。

2) 高密度星の熱的進化と冷却曲線においては、相転移によりクォーク星(ストレンジ星)が形成された場合、特殊なニュートリノ放出過程が超新星爆発にどんな影響を及ぼすかを調べた。さらにハイブリッド星の冷却曲線の計算へとつなぎ、カラー超伝導の効果も取り入れ、特にクォークとハドロンとの混合相について詳しく調べた結果、超新星残骸CasAの中心部に見つかった高密度天体の冷却曲線を再現するパラメータを発見することができた。特に、CasAの中心天体の冷却曲線が最近10年間詳細に観測されており、その説明には適度の冷却が必要であり、標準冷却モデルでは説明できない。我々のモデルは混合層に核子の超流動相転移をパラメータ化し、CasAの観測値を説明することができるパラメータを制限した。今後の課題としては、最近のコンパクト

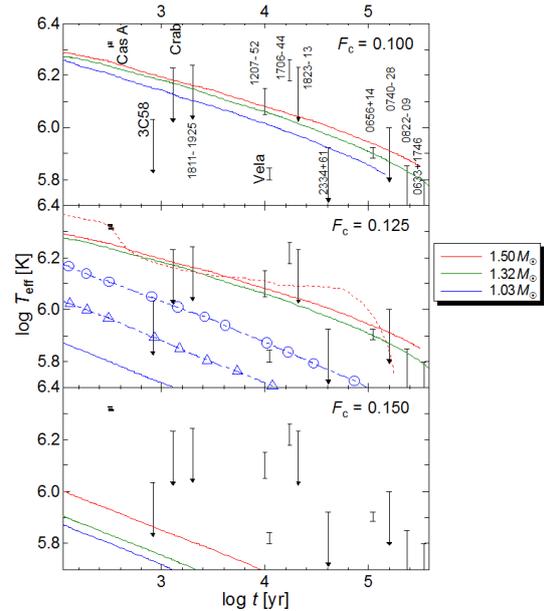


図1 クォーク星の冷却曲線

ト星の質量の観測も含めて再現できるような硬い状態方程式の構築と混合層の共存が可能かどうか精査する必要がある。

3) 非一様初期宇宙初期モデルの構築と重元素合成について非一様モデルを用いて、4000個の元素からなる核反応ネットワークにより宇宙初期元素合成と重元素合成を行い、WMAPと新たな観測との整合性を見出すことは一応できたが、仮定したQCD相転移モデルのパラメータを制限するまでには至っていない。これはQCD相転移がクロスオーバーであるため非一様のシナリオが成り立たなくなったためである。しかし、非一様元素合成が観測と一応無矛盾なことがシミュレーションにより判明した。

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18件)

- ① "Effects of a New Triple- α Reaction on the s-Process in Massive Stars" Y. Kikuchi, M. Ono, Y. Matsuo, M. Hashimoto, S. Fujimoto:Progress of Theoretical Physics, 査読有, 2012, No. 6, Vol. 127, 171-178
- ② "Explosive Nucleosynthesis in the Neutrino-driven Aspherical Supernova Explosion of a Non-Rotating 15 Ms Star with Solar Metallicity" Shin-ichiro Fujimoto, Kei Kotake, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, and Naofumi Ohnishi:The Astrophysical Journal, 査読有, 2011,

- Vol. 738, 61 (15pp)
- ③ “On detecting the quantum correlations in the early universe” Y. Shikano, Y. Hayashi, and M. Hashimoto *Journal of Physics*, 査読有, 2011, Vol. 302, 012063
- ④ ” Effects of a New Triple- α Reaction on X-Ray Bursts of a Helium-Accreting Neutron Star” Y. Matsuo, H. Tsujimoto, T. Noda, M. Saruwatari, M. Ono, M. Hashimoto, M. Fujimoto : *Progress of Theoretical Physics*, 査読有, 2011, No. 6, Vol. 126, 1177--1186
- ⑤ ” Effects of a New Triple- α Reaction Rate on the Helium Ignition of Accreting White Dwarfs” M. Saruwatari, M. Hashimoto *Progress of Theoretical Physics*, 査読有, 2010, No. 5, Vol. 124, 925--929
- ⑥ ” Constraints on the heavy elements production in inhomogeneous Big-Bang nucleosynthesis from light element observations” R. Nakamura, M. Hashimoto, S. Fujimoto, N. Nobuya and K. Sato, The 10th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, AIP conference proceedings, 査読無、 Vol. 1269, pp. 378-380, 2010
- ⑦ ” Cooling of Compact Stars with Quark-Hadron Mixed Phase in the Colour Superconductive State” , T. Noda, M. Hashimoto, N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, M. Fujimoto, The 10th International Symposium on Origin of Matter And Evolution of Galaxies: OMEG-2010, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1269, (2010) pp. 384-386
- ⑧ ” Heavy-element Nucleosynthesis in Magnetohydrodynamical Jets from Collapsars” M. Ono, M. Hashimoto, S. Fujimoto, K. Kotake and S. Yamada, The 10th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG10), AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1269 (2010) pp. 415-417
- ⑨ “Aspherical abundance distribution of ejecta from neutrino-driven core collapse supernova” S. Fujimoto, K. Kotake, M. Hashimoto, M. Ono and N. Ohnishi, The 10th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG10), AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1269 (2010) pp. 472-474
- ⑩ ” Explosive nucleosynthesis in a neutrino-driven core collapse supernova” S. Fujimoto, K. Kotake, M. Hashimoto, M. Ono and N. Ohnishi, *Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII*, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1238 (2010) pp. 169-174
- ⑪ “R-process Nucleosynthesis during the Magnetohydrodynamics Explosion of a Massive Star” M. Saruwatari, M. Hashimoto, K. Kotake, S. Yamada, The 10th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies: OMEG-2010, AIP Conference Proceedings, 査読無, Volume 1269, pp. 409-411, 2010
- ⑫ ” Impacts of a Newly Calculated 3α Reaction Rate on the Helium Accreting White Dwarfs “M. Saruwatari and M. Hashimoto, The 10th international symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies: OMEG-2010, AIP Conference Proceedings, 査読無、 Volume 1269, pp. 412-414, 2010
- ⑬ ” Big Bang Nucleosynthesis” R. Nakamura, M. Hashimoto, K. Sato, and K. Arai, *Physics Reports of Kumamoto University*, 査読無、 Vol. 13, No. 2, pp. 201-216, 2010
- ⑭ ” Synthesis of Heavy Elements in a Helium Star of $32 M_{\odot}$ inside a Jet of Supernova Explosion” M. Ono, M. Hashimoto, Y. Kikuchi, S. Fujimoto, and K. Arai, *Physics Reports of Kumamoto University*, 査読無、 Vol. 13, No. 2 (2010) pp. 227-234
- ⑮ ” Effects of neutrino transport on the r-process nucleosynthesis for the explosion of a $3.3 M_{\odot}$ helium star” M. Saruwatari, M. Hashimoto, K. Arai, *Physics Reports of Kumamoto University*, 査読無、 Vol. 13, No. 2 (2010) pp. 235-246
- ⑯ “Effects of a New Triple- α Reaction Rate on the Helium Ignition of Accreting White Dwarfs” M. Saruwatari, M. Hashimoto, K. Arai, *Physics Reports of Kumamoto University*, 査読無、 Vol. 13, No. 2 (2010) pp. 255-260
- ⑰ ” Observational constraints on Brans-Dicke Theory with a Variable Cosmological Term” E. P. B. A. Thushari, R. Nakamura, M. Hashimoto, K. Arai, *Physics Reports of Kumamoto University*, 査読無、 Vol. 13, No. 2 (2010)
- ⑱ ” Abundance Distribution in Supernova Remnant Cas A” Y. Matsuo, M. Hashimoto and K. Arai, *Physics Reports of Kumamoto University* 査読無、 Vol. 13, (2010), 247

〔学会発表〕(計4件)

①崩壊する暗黒エネルギーモデルに対する観測からの制限

中村理央、池田幹夫、E. P. B. A. Thushari、橋本正章 (九州大)・日本天文学会 2012 年春季年会、龍谷大学深草キャンパス、2012 年 3 月 19 日-22 日

② 非一様ビッグバン元素合成に対する軽元素観測からの制限

中村理央、橋本正章(九州大学)、佐藤勝彦(明星大学)日本天文学会 2011 年秋季年会、鹿児島大学郡元キャンパス、2011 年 9 月 19 日-22 日

③ 高密度星内部におけるカラー超伝導が冷却過程に及ぼす影響

野田常雄、橋本正章、安武伸俊、丸山敏毅、巽敏隆、藤本正行 日本天文学会秋季年会、鹿児島大学 2011 年 9 月 19~22 日

④ Cooling of Quark-Hadron Hybrid Stars

野田常雄、橋本正章
Kyoto Meeting、京都大学 2011 年 6 月 4 日~5 日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://astrog.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本正章 (HASHIMOTO MASA-AKI)

九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 20228422

(2)研究分担者 ()

研究者番号:

(3)連携研究者 ()

研究者番号: