

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05083

研究課題名(和文) X線バーストシミュレーションによる中性子星内部構造の解明

研究課題名(英文) Elucidation of neutron star structure due to X-ray burst simulations

研究代表者

橋本 正章 (Masa-aki, Hashimoto)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：20228422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：低質量X線連星系Maxi J0556-332における静穏期の光度曲線の解明に重要な物理的素過程をていあんすることに成功した。これまで静穏期で光度曲線の説明に未知のエネルギー源が必要とした論文がたびたび出版されてきたが、エネルギー源の物理的意味がないままに適当なエネルギーを計算に注入して観測データを説明してきた。筆者らはこの物理的エネルギー源がhotCNOサイクルに起因するものであること示すことに成功した。従来のモデル計算では中性子表面での核合成とそれに伴うエネルギーの解法を完全に無視した議論を続けていた。我々の新しいモデルでは観測と無理なく整合性のとれた説明が可能であった。

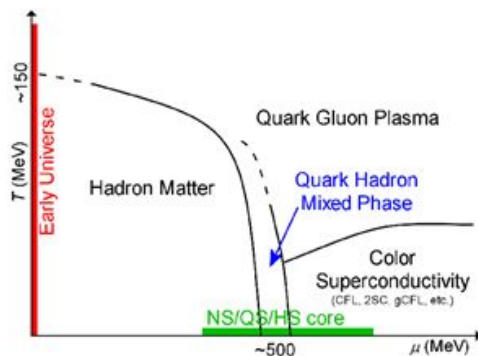
研究成果の概要(英文)：MAXI J0556-332 is the hottest transient accreting neutron star at the beginning of its quiescence. A theoretical model with crustal heating indicates that additional shallow heat source of  $Q_{\text{shallow}} > 6\text{MeV}$  per accreted nucleon is required in the shallow outer crust with respect to the deeper star crust by considering the observed decline in accretion rate at the end of outburst. However, the physical source of this shallow heating is still unclear. In the present investigation, we performed stellar evolutionary calculations, adopting the effects of outburst behavior of the accretion rate. As a consequence, we find that the quiescent light curve of MAXI J0556-332 can be well explained by the nuclear energy generation due to the hot CNO cycle.

研究分野：nuclear astrophysics

キーワード：compact stars

### 1. 研究開始当初の背景

低質量 X 線連星系 Maxi J0556-332 における静穏期の光度曲線の解明に重要な物理的素過程を提案することに成功した。これまで静穏期で光度曲線の説明に未知のエネルギー源が必要とした論文がたびたび出版されてきたが、エネルギー源の物理的意味がないままに適当なエネルギーを計算に注入して観測データを説明してきた。しかしこの方法は単に観測データを再現する人為的方法であり物理的根拠がないままであった。下図は最近の QCD 相図であり、丁度中性子星の内部が QCD 相転移といかに密接に関係しているかを示していると思われる。



### 2. 研究の目的

中性子星の構造決定:

筆者らは、観測データを説明するために導入された物理的エネルギー源を物理的に説明することを目的とした。筆者らの目的としては、未知のエネルギー源を核融合にともなうエネルギー生成であることを証明することを目的とした。特に、観測的狀況を考慮して、hot CNO サイクルに起因するものであることを推測している。従来モデル計算では中性子星表面での核合成とそれに伴うエネルギーの解放を完全に無視した議論が続いていた。我々の新しいモデルでは観測と無理なく整合性のとれた説明が可能である。最終的に、星の進化計算と核融合をカップルさせることにより低質量 X 線連星系 Maxi J0556-332 の静穏期の光度を再現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

星の進化と元素合成を中心に X 線バースト、中性子星の冷却、パイオンによる cooling 効果の導入などを行い総合的な中性子星の進化のシミュレーションを行い、観測との比較により中性子星のモデルに制限をつけることで目的達成を図る。そのために、中性子星の進化シミュレーションコードを逐次改良していった。特に原子核反応過程を正確に追跡できるようにコードの開発をつづけた。その際、伴星からの降着の有無を取り入れながら計算できるようにしていった。また、核融合に関しては順方向と逆方向の反応を取り入れながら核反応 network を構築してい

た(rp 過程核反応 network の開発)。これにより、定常状態の核融合(hot - CNO サイクル)と Tc にいたるまでの核反応過程を計算できるようにネットワークを改良していった。

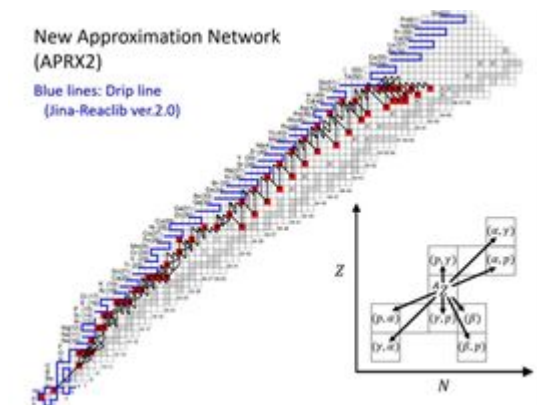
### 4. 研究成果

中性子星内部構造と降着期の光度関係を明らかにした。その内容を以下に要約する。

(1) 降着中性子星の観測からの核物理への制限と X 線バーストシミュレーション

降着中性子星には暗い quiescent 期と明るい outburst 期がある。Quiescent 期では中性子星への質量降着率はあまりにも小さく、重力エネルギーの解放ではほとんど輝くことができない。しかし質量降着率が高い outburst 期に起こった crust eating の熱をゆっくりと放出して輝いていると考えられる。このとき、中性子星のコアからニュートリノも同時に放射されるため、観測された X 線光度と理論を比べることでニュートリノ放射に対する制限を行うことができる。これを行った結果、pion 凝縮によるニュートリノ放射過程でも観測を再現しうることを示した。これは先行研究とは異なる結果であった。さらに解析したところ、先行研究で使用された pion 凝縮によるニュートリノ放射率が、我々が採用したものと比べて小さかったため、先行研究と異なる結果が得られたことが分かった。ただし、今回の我々の結果は光度の高い天体を説明できていないため、今後核子の超流動の効果を取り入れた計算が必要である。また降着中性子星ではしばしば I 型 X 線バーストと呼ばれる突発的な X 線増光現象が起こる。これは中性子星表面での降着物質の不安定核燃焼が原因と考えられている。特に、燃焼する降着物質が水素を豊富に含む場合は水素・ヘリウム混合バーストと呼ばれる。水素・ヘリウム混合バーストでは速い陽子捕獲過程と崩壊を繰り返す rp-process が重要となる。One-zone モデルでのバーストシミュレーションにより、rp-process によって質量数が最大  $A = 107$  程度まで元素が生成されることが分かっている。近年では、バースト中に起こる対流の効果を取り入れた中性子星のコア・クラストの構造を解かない multi-zone モデルを用いてより詳細なシミュレーションも行われている。しかし中性子星の内部構造を考慮せずに得られた結果が正しいかどうか自明なことではない。従って、中性子星の内部構造も考慮した X 線バーストシミュレーションが必要となる。今年度はそのために必要な核反応近似ネットワークを構築した。これは質量数が  $A = 112$  までの核種を考慮しており、one-zone モデルでは水素が多い環境であれば、近似しない核反応ネットワークの結果を再現できることが分かった。また水素が少ない環境であっても、点火圧力が低い場合は問題がないことが分かった。今後はこれを中性子星内部も含めた multi-zone モデルでの

X線バーストシミュレーションを行い、結果の妥当性を検証する必要がある。最終的に得られた核反応ネットワークの各図表を以下に示す。



(2) Quiescent Light Curve of Accreting Neutron Star MAXI J0556-332

降着中性子星の中には明るい outburst 期から quiescent 期へ移行する際の中性子星の表面温度が観測されている。その中でも MAXI J0556-332 は最も表面温度が高い天体である。この天体の温度進化を説明するために、先行研究では shallow heating と呼ばれる熱源を人工的に入れる必要があった。この熱源は  $Q > 6$  MeV/nucleon ほど入れる必要があるが、その起源は全く分かっていない。先行研究のシミュレーションでは中性子星のクラストのみを考慮したものであったため、本研究では中性子星中心から表面までを考慮したシミュレーションを行い、MAXI J0556-332 の温度の観測の再現を試みた。その結果、熱源としてクラストヒーティングに加えて、compressional heating や HCNO サイクルによる加熱を考慮すると、shallow heating を考慮せずとも観測を説明できることが分かった。また先行研究によると、MAXI J0556-332 だけでなく、KS 1731-260 や MXB 1656-29 など shallow heating が必要とされているが、今後はこれらの天体についても再現できるか調査する必要がある。

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 5 件)

Quiescent Light Curve of Accreting Neutron Star MAXI J0556-332

Helei Liu<sup>1</sup>, Yasuhide Matsuo, Masa-aki Hashimoto, Tsuneo Noda, and Masayuki Y. Fujimoto

Journal of the Physical Society of Japan, 査読有、86, 123901(1-4) (2017)

<https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.123901>

Constraints from supernovae and

gamma-ray bursts on the variable dark energy density model: R. Ichimasa, E. P. B. A. Thushari, M. Hashimoto, Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016), 査読有、2017, 14, article id. 020107 (3 pp.)

<https://journals.jps.jp/doi/book/10.7566/NIC2016>

Production of Li and B in inhomogeneous Big-Bang nucleosynthesis: R. Naka-mura, and M. Hashimoto, Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016), 20 査読有、17, 14, article id. 020108 (3 pp.)

<https://journals.jps.jp/doi/book/10.7566/NIC2016>

Nucleosynthesis in asymmetric, core-collapse supernovae of massive stars: S. Fu-jimoto, M. Ono, M. Hashimoto, and K. Kotake, Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016), 2017, 査読有、14, article id. 020621 (3 pp.)

<https://journals.jps.jp/doi/book/10.7566/NIC2016>

Big-Bang nucleosynthesis: Constraints on nuclear reaction rates, neutrino degeneracy, inhomogeneous and Brans-Dicke models

Riou Nakamura, Masa-Aki Hashimoto, Ryotaro Ichimasa, Kenzo Arai

International Journal of Modern Physics E, Published: 7 査読有、August 2017, Vol. 26, No. 8 (2017), 1741003 (25 pages)

<https://doi.org/10.1142/S0218301317410038>,

Print ISSN: 0218-3013, Online ISSN:1793-6608

[学会発表](計 1 件)

クオークの 2SC カラー超伝導と核子の超流動を考慮した高密度星の冷却計算: 野田常雄, 安武伸俊, 橋本正章, 松尾康秀, 丸山敏毅, 巽敏隆, 藤本正行, 日本天文学会 2017 年春季年会, 九州大学, 2017 年 3 月 15 日-18 日

[図書](計 件)

[産業財産権]

出願状況(計 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 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/メインページ

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

橋本 正章 (Hashimoto Masaaki)

九州大学・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：

### (4)研究協力者

( )