

論文内容要旨 (和文)

2014 年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学 専攻 物理学 分野

氏 名 勝間瑛里



論 文 題 目

A study on the relation for the high magnetic field isolated neutron star population with X-ray observation

(X線観測による強磁場孤立中性子星種族内の関係性の研究)

本論文では、X線観測による強磁場孤立中性子星種族内の関係性の研究について述べる。

中性子星は、太陽質量($M_{\odot} \sim 2 \times 10^{30}$ kg)の約9倍程度の大質量星が重力崩壊型超新星爆発を起こした後に誕生する、高速回転(周期が数ミリ秒-数秒)、高密度(約 10^{14} g/cm³)、強磁場(約 10^{12} G)を持つ半径 10km 程度で質量 $1.4M_{\odot}$ 程度の中性子を主成分とする核力で支えられた非常にコンパクトな天体である。

現在、 10^{13} G 以上の強磁場を持つ中性子星は、放射エネルギー源に応じて 3 つの主要な種族が認められている。1 つ目は回転駆動型パルサー(RPP)である。RPP は回転エネルギーが磁場を介して放射エネルギーに変換されて輝くと考えられている。電波からガンマ線領域で放射があり、主に電波パルサー(PSR)やガンマ線パルサーとして観測される。定常 X 線光度は経験的に回転光度の約 1/1000 であり、安定している。2 つ目の種族はマグネターである。マグネターは磁場をエネルギー源とする種族で、赤外線からガンマ線領域で放射が確認されている。今の所定常的な電波放射は観測されていない。安定的な X 線光度を持つ RPP とは違い頻繁に X 線光度が変動するバースト現象を起こす他、定常 X 線光度もまた RPP の経験則よりも高いという特性を持つ。3 つ目は XINS(X-ray Isolated Neutron Star)である。XINS は、主に軟 X 線帯域で発見される。表面の熱放射のみで輝いているとみられ、マグネターと同様に X 線光度は RPP の経験則よりも高い。このように強磁場孤立中性子星種族内の特性の違いは特に X 線領域で顕著になることが観測的に示されている。しかし、何が特性の違いを生んでいるのかは、これまでのところ完全には理解されていない。

この問題を解決する候補の 1 つに、超新星爆発の多様性が挙げられる。しかし Keane & Kramer 2008 により、観測から予測される各種族の誕生率が超新星爆発の発生率より多くなることから、各種族は個別に誕生するよりもむしろ、進化の過程で遷移している可能性が高い事が示唆された。その後の研究により、最近の認識では XINS はマグネターから進化した天体であると考えられている。しかし、磁場孤立中性子星種族内の違いを生むパラメーターはまだ完全には解き明かされていない。各種族が観測的に認められてきた当初は、中性子星種族内の特性の違いを生む重要なパラメーターは、双極子磁場の強度であると考えられた。なぜなら、ほとんどのマグネターは回転周期 P とその時間微分 \dot{P} から推測できる双極磁場 $B_d \sim 1.1 \times 10^{12} (P/1s)^{1/2} (\dot{P}/10^{-15})^{1/2}$ G が量子臨界磁場 (4.4×10^{13} G) を超え、また XINS も約 10^{13} G

という RPP よりも強い双極磁場を持つためである。しかし、 $B_d \sim 6.1 \times 10^{12}$ G という小さい双極磁場を持つ“弱磁場マグネター”の発見により、双極磁場の強さだけが原因ではないことが示された。理論的には中性子星誕生時のトロイダル磁場とポロイダル磁場の強度とその進化が重要な役割を果たすことが示唆されている(Pons&Perna 2011)。

以上のように強磁場孤立中性子星種族内に認識できている3つの違いを生じさせている原因は何か、相互に遷移するものか、真に別種族と見るべきかは定説に至っていない。本論文ではこの問題に情報が豊富な X 線を用いて挑戦する。

磁場形成とその進化シナリオに迫るために注目すべき天体群として、RPP の中でも強い双極磁場を持つ強磁場回転駆動型パルサー(10^{13-14} G)(High-B RPP)がある。2017年当時59天体ほど知られていた High-B RPP の中には、急激な X 線増光を起こした天体が2つ、X 線高度が RPP の経験則よりも高いものが3つ存在した。これらの特性は、マグネターや XINS が持つ特性の一部に類似している。しかし、電波で確認されている56個中27個の high-B PSR は X 線で未観測または有効な上限値がなく、系統的な観測・解析が必要な状態にあった。よって我々はこれらの天体のうち5天体を新たに Swift 衛星で観測し、16天体はアーカイブデータをを用いてデータ解析を行った。

21天体の Swift 衛星のデータを解析した結果、新たに21個の high-B PSR の X 線光度の 3σ 上限値を得た。そして、これらの天体は少なくとも観測中は X 線光度が RPP の経験則よりも高いというマグネター様や XINS 様の特性はないことが示された。

先行研究の観測結果と合わせると、High-B PSR の中で高い X 線効率を持つ中性子星の存在確率は 11%–29% であることがわかった。また、マグネター様の特性は PSR の $B_d \geq 10^{13.5}$ G の場合にのみ現れることが示唆された。この知見は RPP とマグネターの種族の関係において、ポロイダル磁場とトロイダル磁場の影響を観測的に制限する意味で重要な示唆を与える。最後に、強磁場孤立中性子星種族内の関係性が顕著に現れる軟 X 線領域に着目し、2温度黒体放射モデルでフィットした場合の2温度の比と2温度と各光度の関係性について検証をおこなった。Yoneyama et al. 2019 によれば、XINS とマグネターを2温度黒体放射モデルでフィットした場合の2温度の比は 2-3 になることが示唆されている。先行研究の結果を用いて調べた結果、論文で示された比に RPP も従うことがわかった。2温度と各光度の関係性については、XINS、high-B RPP、および RPP はマグネターとは異なり極冠加熱などの局所的なホットスポットを持つ傾向があることが示唆された。

論文内容要旨 (英文)

2014 年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学 専攻 物理学 分野

氏 名 _____ 勝間瑛里



論文題目

A study on the relation for the high magnetic field isolated neutron star population with X-ray observation.

We present a study on the relation for the high magnetic field isolated neutron star population with X-ray observation.

Neutron stars (NSs) are extremely compact, fast-spinning remnants of core-collapse supernova explosions, which occurs when the life of a massive star with masses about more than $9M_{\odot}$ ends. Typical NSs have the dipole magnetic field B_d of 10^{12} G, the rotation period P ranging milliseconds and sec, the mass $M \sim 1.4M_{\odot}$, the radius $R \sim 10$ km, and the density $\rho \sim 10^{14}$ g/cm³, respectively. And, the NS is supported by nuclear power mainly composed of neutrons. These states cannot be reproduced in the laboratories on the Earth so that NSs are one of the most important objects in order to verify the physics in the extreme state.

Today, we recognise that the high magnetic field isolated NSs whose dipole magnetic field is $B_d > 10^{13}$ G are divided into the three major populations. Each population has its own characteristics. Their characteristics are most evident in the X-ray bands. The first population is the rotation-powered pulsars (RPPs). RPPs are the standard NSs population and are usually discovered in the radio bands or/and the gamma-ray bands. They are thought to be shined with its rotation energy. The X-ray luminosity L_x is about 1/1000 of the rotation luminosity L_{rot} empirically. The second population is the high magnetic pulsars, called magnetars for short. Magnetars are characterised by the frequent bursting activity and by the high X-ray luminosity that is larger than the rotation luminosity. It is thought to be shine with the magnetic energy rather than the rotation energy. The third population is the X-ray isolated neutron stars, abbreviated XINSs or XDINSs. XINSs shine with the thermal energy which is likely to be fueled by the magnetic field. XINSs are observationally characterized by the thermal emission in the soft X-ray bands and by the high X-ray luminosity larger than the rotation luminosity. What makes this distinctive manifestation of the neutron stars, namely RPPs, magnetars and XINSs, are not understood so far.

The variety of the supernova explosion is one of the candidates to solve this mystery. However, according to Keane & Kramer (2008), the Galactic core-collapse supernova rate (CCSN) is smaller than the total birth rate of each population derived by the observation. Thus, they suggest that some of PSRs, XINSs and possibly also magnetars may be different evolutionary stages of the same objects. Recently, XINSs are thought to be evolved from magnetars. Since magnetars and XINSs shine with the magnetic energy due to the strong dipole magnetic field larger than that of RPPs, the dipole magnetic field strength may determine the distinctive manifestation of them. However, the discovery of "weak field magnetar" whose dipole field $B_d \sim 6.1 \times 10^{12}$ G is the comparable magnetic field strength as compare with RPPs (Esposito et al. 2010; Rea et al. 2010, 2013) indicates that the strong dipole field is not always essential. Theoretically, the toroidal field is proposed to play an essential role in the magnetar activity.

The great importance objects for understanding the magnetic field formation and its evolution scenario are the strong magnetic field rotation powered pulsars (High-B RPPs), which have a strong dipole magnetic field about 10^{13-14} G in RPPs. Since some of High-B RPPs exhibit the magnetar-like and the XINS-like features, they may be the key to understand the relation for the high magnetic field isolated NS population. However, the survey for such objects with the relatively small spin-down luminosity is not complete. Toward a more complete survey, in this paper, we carry out a systematic survey for the X-ray counterparts using the archival data and the subsidiary observations with the X-ray Telescope (XRT; Burrows et al. 2005) onboard *the Neil Gehrels Swift Observatory* (Gehrels et al. 2004). We aim to get a hint linking these three populations and hopefully to understand what physical parameters make the different characteristics seen in the population.

We analyse 21 out of the 27 high-B PSRs that are in the ATNF pulsar catalogue but have not been reported or have no effective upper-limits in the X-ray bands, where 6 objects are newly observed by us, and 15 objects are taken from the archival data. As a result, we have new 3σ upper-limits for all the 21 objects. Since the upper-limits are tight, we conclude that we do not find any magnetar-like high-B PSRs such as PSR J1819-1458.

The probability of the high X-ray efficiency in the high-B PSRs is obtained to be 11%-29%. Also, combining the previous observations, we discuss which parameter causes magnetar-like properties. It may be suggested that the magnetar-like properties appear only when $B_d \gtrsim 10^{13}$ G for the radio pulsar population. This is true even if the radio-quiet high-B RPPs are included.

We revisit the relation for the high and low temperature ratio that is obtained by the double blackbody model fitting for the three populations as shown by Yoneyama et al. (2019). As a result, we found that ordinary RPPs also follow the relation. We also perform the verification about the relationship for the temperature of the double blackbody components and its luminosities. The temperature and the luminosity relations suggest that XINSs, high-B RPPs and RPPs have local hot spots such as polar cap heating, unlike magnetars.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和2年1月31日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 柴田 晋平 印
 副査 滝沢 元和 印
 副査 岩田 尚能 印
 副査 印
 副査 印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	専攻・分野名 地球共生圏科学専攻・物理学分野 氏名 勝間 瑛里		
論文題目	A study on the relation for the high-magnetic field isolated neutron star population with X-ray observation (X線観測による強磁場孤立中性子星種族内の関係性の研究)		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和2年1月23日～ 令和2年1月31日
論文公聴会	令和2年1月31日	場所	理学部3号館31教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和2年1月31日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

中性子星は、その発見に対して、また、中性子星の公転運動を利用した重力波の検証に対して二つのノーベル賞をもたらした天文学において非常に重要な天体種族である。中性子星は主に中性子より構成され、重力と核力が釣り合っている半径10キロメートルほどのコンパクトな天体である。観測技術が進むに従い、中性子星は単一種族として一様な性質を示すのではなく、多様な性質を持つものから構成されていることが明らかになった。この多様性の出現理由やメカニズムが天体物理学における重要なテーマになっている。

この論文では、人工衛星として打ち上げられたX線望遠鏡を用いて中性子星を観測し、そのデータを解析することによって、この中性子星種族の中に見られる多様性の様々な関係を解明することを目指した。

第1章では、中性子星種族内に見られる多様性、数々のサブクラスの性質をレビューしている。第二章では、問題解決に用いたX線望遠鏡(Swift)の機能や解析の基礎となる技術についてまとめている。第3章では研究で用いられた天体サンプリングについて述べ、第4章では、データ解析の結果を提示している。第5章で、結果から中性子星種族内に見られる特徴がどのような物理的機構によって発現するかを考察している。第6章で結論を述べている。

この研究で明らかになったことは、中性子星の持つ双極子磁場強度が重要なパラメータになっていることである。回転駆動型パルサー(電波パルサー、γ線パルサー)に類別されるサブクラスの典型的な双極子磁場強度は 10^{12} ガウスであり、一方、マグネターのそれは 10^{15} ガウス程度である。この中間の値の $10^{13.5}$ ガウスを境に、回転駆動型パルサーに認識される天体であっても磁場による変動性や加熱の兆候が現れ、マグネターへの遷移を起こすことを示した。強磁場電波パルサーにおいて強磁場の効果が発現する確率が29%程度であることを示した。これらの一部の結果は、すでに学会等で5回の口頭発表およびMonthly Notices of the Royal Astronomical Society誌 (Volume 486, Issue 4, p. 5323-5334)で公開され高い評価を得ている。

以上の内容は博士の学位に値する内容であり審査基準を満たしているため合格と判定する。

本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

上記学位論文の内容は口頭発表(60分)し、その後の質疑応答(30分)を実施し最終試験として審査した。研究計画の構成、観測データの解析手法の習得、X線望遠鏡観測実施の際の学外の研究者の交渉等の実務、結果の解析、現在のこの分野の知見の中の位置付けなどすべてについて博士の学位に値する内容であり、審査基準を満たす。さらに、今後の研究の進むべき道を示唆した。これらの結果を総合的に判定し、課程博士として資質はみたまされ、最終試験を合格と判定した。