

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03706

研究課題名(和文)中性子星周辺領域の物理過程を加味した連星進化の研究～中性子星ULXへの応用

研究課題名(英文) Study on binary evolutions with physical process around neutron star:  
Application to neutron star ULX

研究代表者

鷹野 重之 (KARINO, Shigeyuki)

九州産業大学・理工学部・准教授

研究者番号：20615364

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、磁場や降着円盤形成、質量放出など、中性子星周囲の物理過程を考慮した新しい連星進化計算法を開発し、中性子星を含む連星系の進化過程を解明することを目的として研究を行った。特に中性子星をX線源とするUltra-Luminous X-ray source (NS ULX)の進化過程の解明を目指してきた。研究を通じ、NS ULXとなり得る連星系の特徴やその進化過程、またX線連星中の中性子星の円盤形成過程、磁場・スピン共進化などを明らかにした。特にX線連星の大部分を占めるBe型大質量X線連星系の多くが、進化の過程でULXとなり得ることを示し、NS ULXの普遍性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超高輝度X線天体(ULX)は発見以来、通常降着する中間質量ブラックホール(BH)か、超臨界降着する星質量BHかが問題となっていた。もしこれらの天体が中間質量BHを含むのであれば、銀河中心に位置する超巨大BHの形成シナリオに重大なインパクトを与え、ひいては銀河の進化過程や我々の体を形作る物質の起源を明らかにするうえでも重要である。

それに対し、本研究ではULXの中で中性子星を放射源とするものが少なくないことを示した。ULXに占めるBHの割合がわかれば、未解明な点の多い大質量形成・進化や超新星爆発のメカニズムに至るまで、多くの示唆が得られる。本研究はその先鞭をつけるものである。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have developed a new binary evolution simulation method that takes into account physical processes around neutron stars, such as magnetic fields, accretion disk formation and mass loss, in order to study the evolutionary processes of binary systems including neutron stars. In particular, we have aimed to understand the evolutionary processes of neutron star-powered Ultra-Luminous X-ray sources (NS ULXs). Through this research, we have elucidated the characteristics and evolutionary processes of potential NS ULX binary systems, as well as the disk formation process, magnetic field and spin co-evolution of neutron stars in X-ray binary systems. We show that many Be-type high-mass X-ray binaries, which constitute the majority of X-ray binaries, can become ULXs during their evolution, and we clarify the universality of NS ULXs.

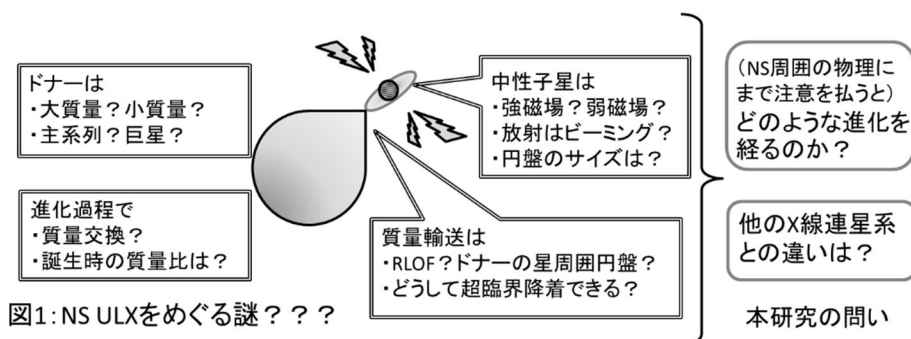
研究分野：天文学

キーワード：連星進化 中性子星 X線連星 超高輝度X線天体

## 1. 研究開始当初の背景

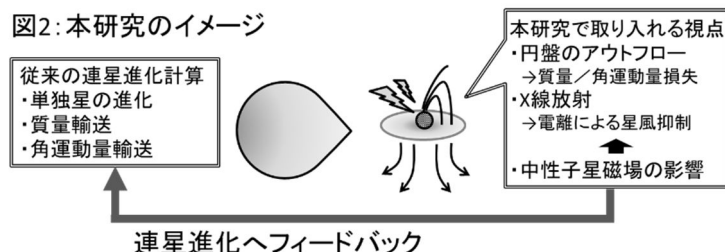
中性子星 (NS) を X 線源とする連星系は、X 線観測の黎明期から主要な観測対象である。一方、超高輝度 X 線天体 (ULX) は発見以来、中間質量ブラックホール (BH) か、超臨界降着する星質量 BH かが問題となっていた。しかし近年、従来の予想に反し、ULX の一部は NS 起源であることが明らかとなった (Bachetti et al. 2014)。研究開始当初は計 3 例 (2022 年では 10 例程度) ほどの天体が NS ULX であることがわかっており (Furst et al. 2017; Israel et al. 2017)、ULX の中の少なからぬ割合は NS 起源であることが指摘されている (Fragos et al. 2015)。しかし、「なぜ中性子星への超臨界降着が起こり得るのか?」「通常の X 線連星との決定的な違いは何か?」など、根本的な謎が未解明のままである (図 1 参照)。

NS ULX 誕生の謎に迫るためには、NS を含む連星系の進化を理解する必要がある。従来の連星進化研究では、主に単独星の進化と連星間での質量・角運動量輸送を計算するものが大半であった。しかし、例えば NS 近傍からの強力な X 線放射はドナーを電離し、星風降着率を左右する (Karino 2014)。また、ULX のように大規模な質量輸送が起こる場合には、NS 周囲の円盤からの質量放出も重要となる (King et al. 2017)。X 線放射や質量放出は、NS 磁場とも深く関係する。そこで、磁場や質量放出、X 線放射などの NS 近傍過程が大域的な連星進化にどのような影響を及ぼすのかを理解することが重要である。ULX で顕著となる NS 近傍での物理過程が連星系進化に影響することで、従来知られてきた X 線連星系と差異が生じるかもしれない。これらの可能性を検証し、NS ULX を特徴づける物理は何なのかを明らかにする必要がある。



## 2. 研究の目的

本研究では特に ULX のように NS 周囲の物理過程が重要な役割を果たすような連星系の進化を考えることで、NS ULX の形成・進化過程や、通常の X 線連星との差を生み出す物理を理解することを目的としてきた。そのため、本研究では超臨界降着するような NS の近傍での物理過程を考慮し、それらの物理過程が連星進化に及ぼすフィードバックを検討した (図 2 参照)。結果として得られる連星系のスナップショットが ULX となり得るのかを調べることを目指してきた。このように、NS ULX となるような連星系を始め、NS を含む連星系の進化プロセスを統合的に理解することが本研究の目的であった。



### 3. 研究の方法

本研究では、NS周辺領域での物理現象に着目した連星進化計算により、X線連星系の進化を探ってきた。NS ULX連星の進化研究は若干の先行研究がある (Fragos et al. 2015, Wiktorowicz et al. 2017) が、従来考えられていなかったNS周囲の状況が大局的な連星進化にどのような影響を与えるかを調べることは、連星研究を進めるための不可欠な一歩である。特にNS ULXの場合には、NSの磁気半径と輻射優勢半径のバランスでULX内のNSがパルサーとなるかが決まるため (King 2017)、NS ULXの進化計算ではNS磁場進化モデル (Bransgrove et al. 2017など) も同時に解くことが必要である。

本研究では連星進化コードとして、オープンソースである BSE コード (Hurley et al. 2002) を改良して用いた。連星進化に、付加的な物理過程を一つひとつ組み合わせ、NS が ULX パルサーとなる条件 (King et al. 2017) を満たすような連星系の進化過程を調べた。連星進化計算を行うに際し、(a)最新の星風モデル、(b)NS 磁場進化モデル、(c)円盤モデル、(d)円盤からの質量放出モデル、(e)X 線放射による星風阻害、などのモデルを同時に解くよう順次プラスしていき、その結果として生じる質量と角運動量の損失や輸送を連星進化にフィードバックするコードを発展させた。得られる連星系の進化段階ごとに、NS への質量降着率がエディントン限界を超えるかどうかを判断することで、どのような連星系が進化過程で ULX となり得るかを調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) “On the possibility of disk-fed formation in supergiant high-mass X-ray binaries”

A. Taani, S. Karino, L. Song, and 3 more, RAA, 19, id.12 (10 pages) (2019)

星風により質量降着するような連星系の観測に着目し、降着している中性子星周囲に降着円盤が形成されている可能性を議論した。

#### (2) “Stellar wind accretion and accretion disk formation: Applications to neutron star high-mass X-ray binaries”

S. Karino, K. Nakamura & A. Taani, PASJ, 71, id 58 (12 pages) (2019)

星風により質量降着するコンパクト天体に輸送される角運動量を正確に評価した。とくに、コリオリ力の効果や星風加速の効果を加味した計算を行い、コンパクト天体周囲に降着円盤が形成される条件を明らかにした。

#### (3) “Spin evolution of neutron stars in wind-fed high-mass X-ray binaries”

S. Karino, PASJ, 72, id 95 (12 pages) (2020)

中性子星の磁場進化とスピン進化を同時に解くような連星進化計算コードを構築した。中性子星の角運動量変化については、古典的なプロペラスピンダウンやパルサー風放出のみならず、最新のシェル降着理論など、多くの物理過程を採用した。コードを用いて、誕生直後からの中性子星のスピン進化を追い、観測される若い中性子星の観測量を説明し得る進化シナリオを示した (図 3 参照)。

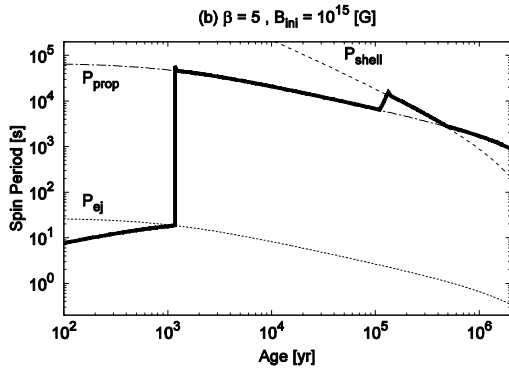


図 3: 中性子星のスピンの進化モデルを組み込んだ連星進化コードによる計算例．誕生直後から連星系年齢程度までのスピンの進化の様子を示す．

(4) “High-Mass X-Ray Binaries with Be Donors as Ultraluminous X-Ray Sources” S. Karino, MNRAS, vol. 507, pp.1002-1011 (2021)

Be 型のドナーを持つような大質量 X 線連星における質量降着過程をモデル化し，連星系の X 線輝度がエディントン光度を超えて ULX となるような条件を明らかにした．また，その連星パラメタと，観測され得る X 線輝度との関係も明らかにした．

(5) “Characteristics and evolution of Be-type X-ray Binaries as potential Ultraluminous X-ray Sources” S. Karino, MNRAS, accepted (2022)

前項で明らかにした条件を元に，Be 型ドナーを持つ X 線連星が，進化過程で ULX として観測され得るかを調べた．連星進化コードに上記 ULX 条件を組み込み，進化段階ごとに条件の成立要件を調べていくことで，X 線連星系が進化過程のうちのどれほどの期間，ULX となり得るのかを調べた．また，観測と比較することで，観測されている Be 型大質量 X 線連星の相当数が，その進化過程で ULX となり得ることを示した（図 4 参照）．このことは，宇宙には NS を放射源とする ULX が非常に多くあるであろうことを強く示唆する．さらに同様の計算を進めることで，宇宙における中間質量 BH の数にも制限を加えることができるようになることが期待される．

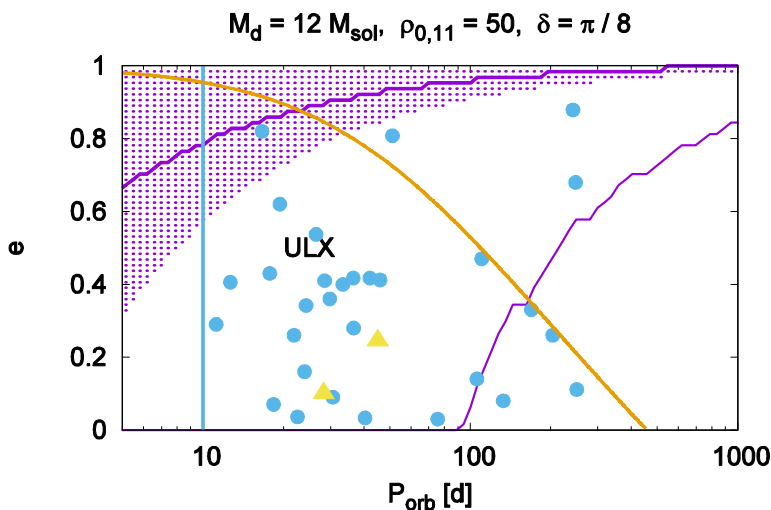


図 4: 連星進化過程で Be 型ドナーを持つ大質量 X 線連星が ULX として観測され得る条件 4 本の曲線に取り囲まれたパラメタ領域が，進化の過程で ULX となり得る領域を示しており，観測される天体(水色の丸)の多くがこの領域に含まれている．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shigeyuki Karino	4. 巻 accepted
2. 論文標題 Characteristics and evolution of Be-type X-ray Binaries as potential Ultraluminous X-ray Sources	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stac1334	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shigeyuki Karino	4. 巻 507
2. 論文標題 High-Mass X-Ray Binaries with Be Donors as Ultraluminous X-Ray Sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1002-1011
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/mnras/stab2076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shigeyuki Karino	4. 巻 72
2. 論文標題 Spin evolution of neutron stars in wind-fed high-mass X-ray binaries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id. 95 (12p)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psaa087	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Karino, Shigeyuki; Nakamura, Kenji; Taani, Ali	4. 巻 71
2. 論文標題 Stellar wind accretion and accretion disk formation: Applications to neutron star high-mass X-ray binaries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id. 58 (12p)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psz034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Taani Ali, Karino Shigeyuki, Song Liming, Al-Wardat Mashhoor, Khasawneh Awni, K. Mardini Mohammad	4. 巻 19
2. 論文標題 On the possibility of disk-fed formation in supergiant high-mass X-ray binaries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Research in Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 012 ~ 012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1674-4527/19/1/12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 鴈野重之
2. 発表標題 Be型ドナーを持つ大質量X線連星系の進化段階としてのULX
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鴈野重之
2. 発表標題 X線連星進化と中性子星ULX
3. 学会等名 中性子星の観測と理論 ~ 研究活性化ワークショップ 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鴈野重之
2. 発表標題 ULX としてのBe 型大質量X 線連星系
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shigeyuki Karino
2. 発表標題 On the spin of the neutron stars in wind-fed high mass X-ray binaries
3. 学会等名 30th Texas Symposium on relativistic astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鴈野重之
2. 発表標題 X線連星系中の中性子星の磁場 = スピン共進化
3. 学会等名 第32回理論懇シンポジウム『天文学・宇宙物理学の変遷と新時代の幕開』
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigeyuki Karino
2. 発表標題 Co-evolution of massive stars and neutron stars in wind-fed HMXBs
3. 学会等名 The Evolution of Massive Stars and Formation of Compact Stars: from the Cradle to the Grave (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鴈野重之
2. 発表標題 X線連星系における中性子星の磁場 = スピン共進化
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鷹野重之, 中村賢仁
2. 発表標題 星風降着するX線連星系における角運動量輸送
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shigeyuki Karino
2. 発表標題 Evolution of wind-fed High Mass X-ray Binaries
3. 学会等名 12th Integral workshop and AHEAD conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鷹野重之
2. 発表標題 星風降着X線連星系の進化計算
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------