

# 恒星進化モデルを用いた中性子星 ULX の連星パラメタ推定法

## 鷹野重之 (九州産業大学)

### 1. イントロダクション

Ultra-Luminous X-ray source (ULX)は星程度の天体のエディントン光度を上回る X 線輝度を示す、銀河核から外れた X 線点源である。典型的には  $10^{40}$ erg/s 程度の X 線輝度を示す。ULX の正体については、その発見以来長きにわたり、質量降着する中間質量ブラックホールか、エディントン光度を超える星質量ブラックホールかで議論が続いてきた。もし ULX の正体が 1000 太陽質量を超える中間質量ブラックホールであれば、これは銀河中心ブラックホール形成におけるボトムアップシナリオのミッシングリンクを埋めるものとして非常に重要な役割を果たすこととなる。一方、星質量ブラックホール起源であれば、エディントン限界をはるかに上回る X 線光度がどのように放射されるのかという謎が残る。

しかし、最近になって、NuSTAR 衛星の観測により、M82 にある ULX から周期的な X 線光度変動が検出された(Bachetti et al. 2014)。このことは、少なくとも一部の ULX の X 線放射天体はブラックホールではなく、中性子星であることを意味している。従来、中性子星または星質量ブラックホールを X 線源とする X 線連星系は、ドナーの質量により低質量 X 線連星 (LMXB) と大質量 X 線連星 (HMXB) に大別されてきた。一般に、LMXB は Roche Lobe Over Flow(RLOF)によりドナーからの質量供給を受け、降着円盤を形成してエディントン光度近くで光るとされてきた。一方、HMXB は大質量ドナーからの星風の一部を捕獲し、磁場に沿った降着流の作る降着コラムからの X 線によりエディントン光度以下で光る。しかし、M82 で見つかった中性子星 ULX ではドナー質量が 5 太陽質量以上とされており、従来の X 線連星系の枠組みからは外れるようである。中性子星起源の ULX が相次いで見つかる中、X 線連星の分類も再考すべき時期を迎えつつあるのかもしれない。しかし、ULX のような銀河系外の X 線連星の正体を知ることは簡単ではない。実際、ドナーを光学的に同定できないことから、HMXB か LMXB かの判別すらも困難である。そこで、本研究では、光学観測に頼らずに、X 線観測データのみからドナーや連星パラメタに制限を付ける手法を模索する。

### 2. 連星モデル

ここでは、RLOF の起こる条件として次の三つを要請する：

- (1) ドナー半径がロッシュローブ半径を超える
- (2) ドナーは巨星段階まで進化していない
- (3) 宇宙年齢以内にロッシュローブ半径を超える

X 線源からの強い照射を受ける場合、厳密にはドナー半径がロッシュローブ半径に達しなくても RLOF が起こる可能性もあるが、このような強い照射は軌道周期が 1 日以下のコンパクトな連星でしか効かないと考えられるので、ここでは条件(1)を採用する。

また、ドナーが巨星段階まで進化すると、強い対流層が形成されるために、RLOF のタイムスケールが動的タイムスケールとなり、非常に短時間で大量の質量輸送が起き、共通外層が形成されてしまう可能性がある。ドナーが低質量である場合には、巨星まで進化したから必ずしも RLOF による X 線放射が

止まるとまでは言えないが、中質量以上のドナーに対しては、条件(2)はさほど悪い条件ではない。

上記の条件を満たすような連星系のパラメタ領域を探るため、ここでは星進化コードを用いてドナーの質量=半径の関係を計算し、ロッシュローブ半径と比較する。星進化コードは Hurley et al. (2000)を参考に、筆者らが作成した近似的星進化コードを用いる(Karino 2016; Karino & Miller 2016)。

## 2.1. M82 X-2

ULX M82 X-2 は NuSTAR 望遠鏡による X 線観測により初めて周期的パルスが検出された ULX である(Bachetti et al. 2014)。このことから、この天体の X 線放射源は降着を受ける磁場を持つ回転中性子星と考えられている。観測されたパルス周期は 1.73s で、軌道変調から求められる軌道周期は 2.53d であり、ほぼ円軌道となっている。X 線輝度は激しく変動するが、その最大光度は  $4 \times 10^{40} \text{erg/s}$  に達し、中性子星のエディントン限界をはるかに上回っている。軌道から推測されるドナー質量は 5.2 太陽質量以上とされており、このことから本天体は大質量 X 線連星であると考えられる。

この天体のドナー天体について検討するため、星進化コードを用いてドナーの半径を計算し、ロッシュローブ半径との比較を試みる。ロッシュローブ半径は Eggleton (1983)の近似公式により

$$R_{RL} = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})} a$$

で与えられる。  $q = M / M_{NS}$  はドナーと中性子星の質量比で、  $a$  は連星系の軌道長半径である。軌道周期 2.53 日で、1.4 太陽質量の中性子星とドナーが連星を組んでいる場合のロッシュローブ半径を示した図が図 1 である。この図中の網掛け領域の下限がロッシュローブ半径、上限が軌道長半径を表す。星がこの網掛け領域に入る場合にのみ、RLOF が可能となる。一方、図中では星進化コードから求めた星の誕生時 (ZAMS)、主系列段階終了時 (TMS) および巨星分枝到達時 (BGB) の星半径を実線で示している。これらの実線と網掛け領域を比較することで、この系のドナーが恒星進化のどの段階にいるのかがわかる。

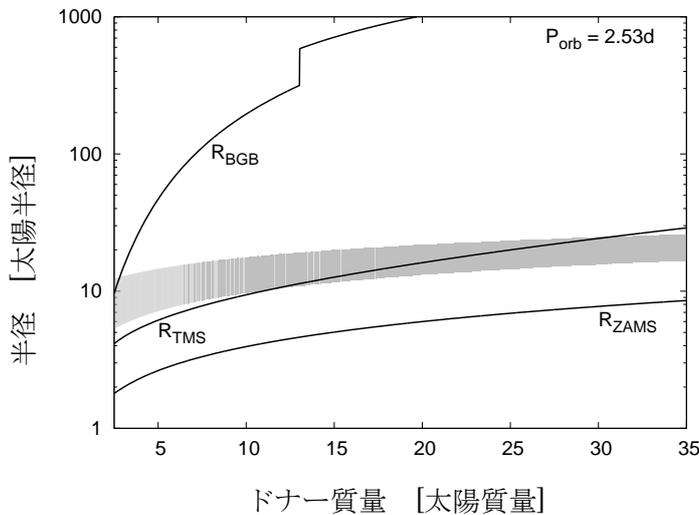


図 1: ドナー半径およびロッシュローブ半径。横軸はドナー質量。図中の網掛け部分はロッシュローブ半径と軌道半径に挟まれた領域で、この領域に星があるときに RLOF が可能となる。3 本の実線は上からそれぞれ巨星段階到達時、主系列終了時、および誕生時の星の半径をあらわす。

図より、RLOF が可能な領域は次の二つの場合に分けられる；(a) ドナーが 5 太陽質量以上 12 太陽質量以下であるヘルツシュプリングギャップ段階である場合、(b) ドナーが 12 太陽質量以上で 25 太陽質量以下の主系列星または主系列を終えてすぐの段階にある場合、である。(a)の場合の下限質量は連星系の軌道から導かれたものである。(b)の場合の上限は、本ドナーが誕生時に伴星であり、かつ誕生時の主星が超新星爆発で中性子星を残す質量範囲にあることからの推測である。RLOF 条件を満たす時間は、6 太陽質量程度でピークとなり、進化時間としては数十万年となる。これはドナーの熱的時間とほぼ同程度となる。ドナーが 12 太陽質量より重い場合でも、RLOF 継続時間は数万年以上であり、観測可能性が極端に低くなるわけではない。しかし、このような重いドナーからの RLOF が起こる際には、ダーウィン不安定による軌道の不安定化など、他の問題が生じる可能性がある。

## 2.2. NGC5907 ULX-1

NGC5907 ULX-1 は NuSTAR と Newton のアーカイブデータから発見された中性子星起源の ULX である (Israel et al. 2016)。X 線輝度は中性子星のエディントン限界の 500 倍にも達する明るい系で、検出されたスピン周期は Newton の 2003 年のデータでは 1.43s だが、2014 年以降のデータと NuStar の観測では 1.13s となっており、強いスピナップをしているらしい。軌道周期は 5.3 日と推定される。

この天体にも同じ手法を当てはめると、RLOF 条件を満たすパラメタ領域は図 2 左の網掛け部分となる。この領域の最小質量は 2.4 太陽質量で、考え得る質量範囲 (20 太陽質量以下) すべてで、RLOF 条件を満たす星はヘルツシュプリングギャップ星となる。この領域にある星は、中程度以上の質量を持ち、かつ主系列段階から離れてある程度時間の経っている星であるため、進化の速度が非常に速い。図 2 右に、星進化コードから求めた RLOF 条件を満たす時間を質量の関数として示す。この図より、RLOF が続く時間は 3 太陽質量前後でするどいピークを示すが、最長でも 1Myr 未満である。この時間は、星外層の熱的時間よりもはるかに短い。5 太陽質量以上のドナーに対しては、RLOF が続く時間は数万年以下となり、観測可能性は非常に低いといえるだろう。

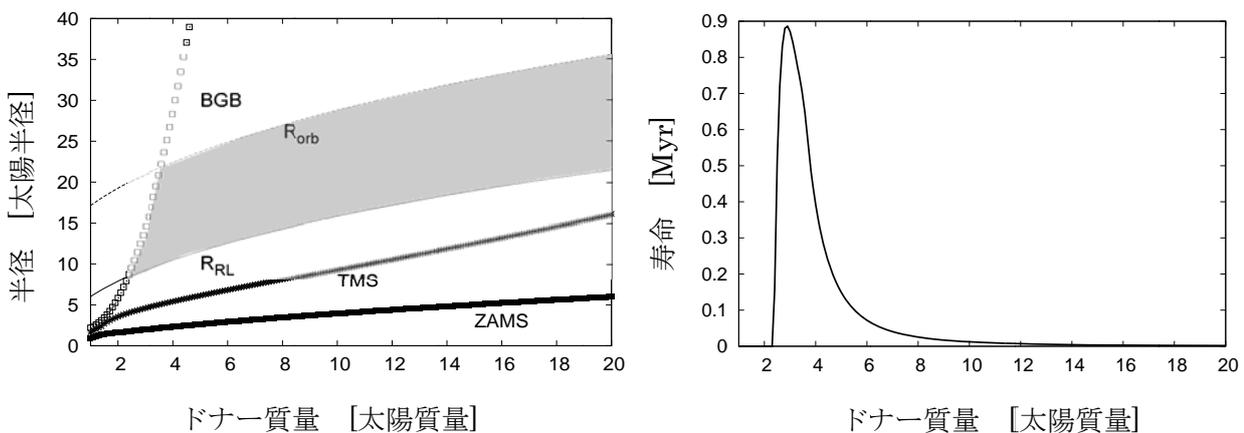


図 2 左 : NGC5907 ULX-1 のドナー半径およびロッシュローブ半径.

表示方法は図 1 と同様.

図 2 右 : ドナーが図 2 左の RLOF 可能領域に滞在する時間.

### 2.3. NGC7793 P13

NGC7793 P13 は NuSTAR と Newton のアーカイブデータから発見された中性子星起源の ULX である (Furst et al. 2016). X 線輝度は中性子星のエディントン限界の数十倍であり, 検出されたスピン周期は 0.42s, 軌道周期は 64d と推定されている.

この連星系で推定されている 64 日という軌道周期は RLOF する系としては非常に長い. よって, ロッシュローブ半径も非常に大きくなるため, 巨星段階に進化する以前にロッシュローブを満たすことのできるドナーは 6 太陽質量以上のものに限られる. しかし, このような大きな質量の星は進化のタイムスケールも短く, ヘルツシュプリングギャップ段階でロッシュローブを満たす場合には, RLOF 条件を満たす寿命は最長でも 20000yr ほどである. よって, NGC7793 P13 は, 非常に早く進化する天体の, X 線で最も輝く一瞬をとらえたものなのかもしれない. 一方で, 64d の周期は super-orbital 周期変動を観測しているとの説もあり, この天体の正体を明らかにするためには, 追加の観測が必要となるだろう.

### 3. まとめ

本研究では, 中性子星を放射源とする ULX 連星系に対し, ドナー質量の推定を行った. ここではロッシュローブ半径と, 星進化コードから求めた星半径の比較から, RLOF が起こる条件を満たすような星質量とその進化段階に制限を付けた. ULX は系外の天体であるために, ドナーの光学観測は非常に難しい. それに対し, X 線測光観測のみで連星系パラメタに制限がつけられる本手法は非常に有用であると考えている. 今後, ここで得られたような連星系の質量や年齢等を population synthesis の結果と比べることにより, 中性子星起源の ULX の割合を見積もることが可能となる. 従来は中質量ブラックホールか星質量ブラックホールかが ULX の大きな議題であったが, 今後はどれだけの ULX が中性子星起源であるかも興味深い話題となるだろう.

#### 参考文献

- [1] Bachetti et al. (2014) *Nature*, 214, 202
- [2] Eggleton (1983) *ApJ*, 268, 368
- [3] Furst et al. (2016) *ApJ*, 831, 14
- [4] Hurley et al. (2000) *MNRAS*, 315, 543
- [5] Israel et al. (2016) arXiv160907375I
- [6] Karino (2016) *PASJ*, in press (arXiv:1608.05276)
- [7] Karino & Miller (2016) *MNRAS*, 462, 3476