

MAXIと「すざく」データを用いたブラックホール連星の解析と理論との比較

谷治 健太郎 (首都大学東京大学院 宇宙理論研究科)

Abstract

ブラックホール連星系において質量降着率が高いときに現れるソフト状態は、半径に依存して温度が変わることから生じる、多温度黒体放射によって基本的には記述できる。これはスペクトルの軟 X 線領域とよく一致し、降着円盤のエネルギー源が重力エネルギーであることが確かめられる。一方、スペクトルの硬 X 線領域に注目すると、多温度黒体放射では説明がつかないベキ型の成分が存在することがわかる。この成分についての明確な説明は未だにつけられていないが、黒体放射以外の放射プロセス、重力エネルギーの解放以外のエネルギー源が関わっている可能性が考えられる。今回、その候補として降着円盤内での核融合反応を考え、その第一歩として実際に核融合が起こっているかどうかを調べた。結果、通常の主系列星で起きているような核融合反応は起こりそうもないことがわかった。また、上記の動機に関係なく、Slim disk を仮定して降着円盤で核融合が起こるかどうか推定した。

1 Introduction

ブラックホールと、その周りを回る伴星からなる、ブラックホール連星系では、伴星からのガスが降着し、円盤を形成する。質量降着によって重力エネルギーが解放され、半径に依存した温度分布を作る。その結果として、異なる特徴的な温度を持つ黒体放射の重ね合わせである、多温度黒体放射が生まれ、これは観測されたスペクトルの軟 X 線成分によく合う (~ 数 keV、標準降着円盤：SSD)。

また単位時間に降着する質量 (質量降着率) の違いによってスペクトルの形が変わることから、ハード状態とソフト状態という少なくとも二つの状態が存在することが知られている。質量降着率の低いときは、ハード状態と呼ばれ、~10keV 以上において、ベキ型の成分 (光子指数 ~ 1.5) を持つ。約 100keV 付近で指数関数的なカットオフが見られることから、円盤からの種光子を高温の電子 (~100keV) が、逆コンプトン散乱していると考えられている (標準降着円盤 SSD+移流優勢円盤 ADAF モデル)。一方、質量降着率が高い場合はソフト状態と呼ばれ、そのスペクトルの硬 X 線領域 (~10keV 以上) には多温度黒体放射では説明が付けられない、ベキ型の成分 (光子指数 ~ 2.5、1MeV 付近まで折れ曲がりがない) が存

在する。この成分の起源は、未だに解明されておらず、黒体放射以外の別の物理プロセス、あるいは重力エネルギー解放以外のエネルギー源が存在する可能性が考えられる。

ソフト状態では、電波強度が著しく弱いことから、単純なジェットモデルでは説明がつかない。今回、このソフト状態の硬 X 線成分のエネルギー源として、円盤内での核融合が考え、その第一歩として、そもそも核融合が起こりうるかを調べることにした。

2 Methods

円盤内で核融合が起こっているとすれば、それは高温、高密度である中心領域 ($R \gtrsim 3R_s$, R_s : シュバルツシルト半径) だと考えられる。よってまずは、密度 ρ 、温度 T を半径 R の関数として表し、中心領域での値を導いた。その上で、星の進化のモデルにおいて、どのくらいの密度と温度ならば核融合が始まるかわかっているので、導いた値と比較し、検証を行った。

用いる式は、圧力を P 、円盤表面に垂直な方向の座標を z 、密度を ρ 、中心のブラックホールの質量を M 、中心からの半径を R 、重力定数を G として、静水圧平衡の式より、

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g_z \sim \rho \frac{GM}{R^3} z \quad (1)$$

また、ボルツマン定数を k_B 、温度を T 、平均分子量を μ 、陽子質量を m_p 、輻射密度定数を a 、($\sigma = ac/4$ 、 σ ; ステファンボルツマン定数, c ; 光速) として、状態方程式は以下のようにガス圧と輻射圧の和の形でかける。

$$P = \frac{\rho k_B T}{\mu m_p} + \frac{1}{3} a T^4 \quad (2)$$

さらに、ビリアル定理より、解放された重力のエネルギーの半分が黒体放射によって失われるとすると、 $R \sim R + dR$ における領域において、以下の関係式が成り立つ (\dot{M} は質量降着率)。

$$d \left(-\frac{GM\dot{M}}{2R} \right) = \frac{GM\dot{M}}{2R^2} dR \sim 2 \times 2\pi R dR \sigma T^4 \quad (3)$$

図 1 より、質量降着率が等しいとき、表面密度について $\Sigma_{ADAF} \sim 10^{-4} \Sigma_{SSD}$ が成り立つ。また、ADAF は幾何学的に厚い円盤であることから、 $c_s^2/v_K^2 \sim h^2/R^2 \sim 1$ だと仮定できる。さらに $\dot{M} = 4\pi\rho|v_r|Rh$ (v_r は降着速度) であることから、ADAF と SSD の関係式が得られる。

$$\dot{M}_{ADAF} = \dot{M}_{SSD}$$

$$\rightarrow \Sigma_{ADAF}|v_{r,ADAF}| = \Sigma_{SSD}|v_{r,SSD}|$$

$$|v_{r,ADAF}| = |v_{r,SSD}| \times 10^4$$

ここで、流体の基礎方程式の角運動量保存 (ただし、 $\nu \equiv \alpha c_s h$) より、

$$v_r \frac{d(\Omega R^2)}{dR} = \frac{1}{\rho R h} \frac{d}{dR} \left(\nu \rho R^3 h \frac{d\Omega}{dR} \right)$$

この式の微分を割り算としてしまい、 v_r についてまとめると、

$$v_r = \alpha c_s h / R$$

さらに、(1) 式から導ける $c_s \sim h/R \times v_K$ を利用すると、

$$\left(\frac{h_{SSD}}{R} \right)^2 \sim 10^{-4} \quad (4)$$

と見積もれる。(ただし、 $\alpha = 0.1$ とした)

(1)、(2)、(3)、(4) 式と中心領域を考えることから、輻射優勢を仮定し、密度と温度を求めた。

3 Results

密度と温度は以下のように求まる。

$$\rho \sim 5.5 \times 10^{-3} \left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{Edd}} \right) \left(\frac{M}{10M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{R}{3R_s} \right)^{-2} \quad [g/cm^2]$$

$$T \sim 1.3 \times 10^7 \left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{Edd}} \right)^{1/4} \left(\frac{M}{10M_\odot} \right)^{-1/4} \left(\frac{R}{3R_s} \right)^{-3/4} \quad [K]$$

ここで、 M_{Edd} はエディントン質量降着率、 M_\odot は太陽質量。この密度と温度を用いて ($\dot{M} \lesssim \dot{M}_{Edd}$, $M = 10M_\odot$ として) 図 2 上にプロットし、核反応が起こるかどうかが確かめてみる。核反応は SSD では起こりそうもないことがわかった。

一方、Slim disk では、通常の主系列星において水素が核融合を始める密度 ($10[g/cm^3]$) になる温度と質量降着率を見積もると ($h/R \sim 1$ として)、

$$T \sim 8.8 \times 10^8 \left(\frac{M}{10M_\odot} \right)^{-1/4} \left(\frac{R}{3R_s} \right)^{-3/4} \quad [K]$$

$$\dot{M} \sim 1.8 \times 10^7 \dot{M}_{Edd} \quad [g/s]$$

温度は十分だが、質量降着率が通常の連星系で考えられる量を遥かに上回ることがわかる。

4 Discussion & Conclusion

多温度黒体放射では説明がつかない、硬 X 線成分のエネルギーの起源として核融合の可能性を考え、検証してみた。中心領域が最大の温度と密度を持つことが予想されるので、そこに注目し、値を推定した。すると、SSD では密度も温度も核融合を起こすには足りないことがわかった。また、より高密度、高温が許される Slim disk で考えてみても、水素の核融合が始まる密度 ($\rho \sim 10[g/cm^3]$) で、期待される温度は核融合には十分だが、そのときの質量降着率が $\dot{M} \sim 10^7 \dot{M}_{Edd} [g/s]$ という通常の降着では不可能な値を必要とすることがわかった。この質量降着率を実現する状況として、中性子星とブラックホールの合体や高速回転している非常に重たい ($\sim 25M_\odot$ 以上) 星の崩壊 (collapsar model) などが考えられる。ただし、そのとき起こる元素合成は通常の主系列星で起

こっているものとは異なり、中性子過剰な状況で起こる r プロセスが考えられる。

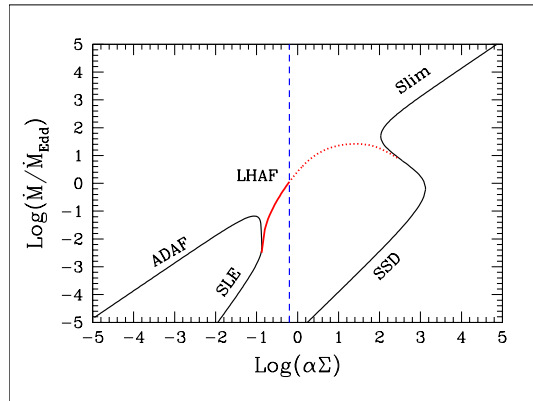


図 1: Narayan & Yuan 2014. いろいろな降着円盤のモデルに対する熱平衡曲線。 $M = 10M_{\odot}$, $\alpha = 0.1$, $R/R_s = 5$, \dot{M} が同じ値のとき、 $\Sigma_{ADAF} \sim 10^{-4}\Sigma_{SSD}$ であることがわかる。($\Sigma = 2h\rho$ 表面密度)

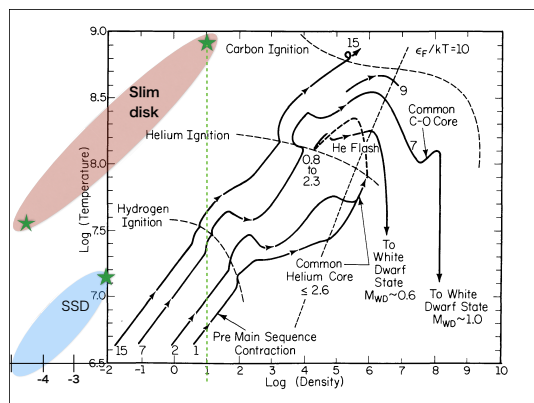


図 2: Iben, Icko, Jr. 1991. 矢印が星の進化を表し、点線でハッチがかかっている領域が下から順に、主系列に入る前の収縮段階、水素の燃焼段階、ヘリウムの燃焼段階、炭素の燃焼段階をそれぞれ表す。星印は計算した値をプロットしたもの。いずれの星印も、主系列星の核融合の流れからは外れていることがわかる。

Reference

Narayan & Yuan 2014 (arXiv:1401.0586v1)

Iben, Icko, Jr. 1991, "SINGLE AND BINARY STAR EVOLUTION"

Shoji Kato, Jun Fukue and Shin Mineshige 2008, "Black-Hole Accretion Disks Towards a New Paradigm"

http://www.asj.or.jp/geppou/archive_open/2014_107_01/107_7.pdf

<http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2014/05/69-05researches3.pdf>

<http://reposit.lib.kumamoto->

[u.ac.jp/bitstream/2298/12152/3/35-0022.pdf](http://reposit.lib.kumamoto-u.ac.jp/bitstream/2298/12152/3/35-0022.pdf)

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。