

ブラックホールを囲む降着円盤

柴崎 徳明*

1. はじめに

白鳥座の X 線源 CygX-1 は 5.6 日周期の連星系を構成している。軌道要素の解析から、その質量は少なくとも $5M_{\odot}$ より大きいと見積られている。この値は中性子星が安定に存在するための質量の上限値 ($\sim 2M_{\odot}$) よりかなり大きい。CygX-1 の X 線強度は大変に “variable” であり、タイムスケールが 1 msec 程度の時間変動も観測されている。(変動のタイムスケール) \times (光速) で見積られる X 線放射領域の拡がりの上限は 3×10^7 cm となる。これは、CygX-1 が半径の非常に小さな天体であることを意味する。これらの事実が主な根拠となり、CygX-1 はブラックホールであろうと考えられている。

CygX-1 の X 線放射を説明するモデルとして、ブラックホールを囲む降着円盤 (Accretion Disk) が有力視されている。降着円盤モデルとは次のようなものである。

連星系の各々の星は、Roche lobe と呼ばれる自己重力圏を持っている (図 1)。星は進化につれて膨張するが、近接連星系では膨張した星の外層が自分自身の重力圏から溢れ出る場合がある。溢れ出た物質の一部は、図 1 の L_1 点を通ってもう一方の星 (ここではブラックホールを考える) の重力圏に流れ込む。流入物質は、一般にブラックホールに対して角運動量を持っている。このためある程度落ち込むと遠心力と重力とが釣り合うようになり、流入物質はブラックホールのまわりを回転するようになる。このようにして流入物質は、ブラックホールの近くに円盤状のプラズマ雲を形成する。

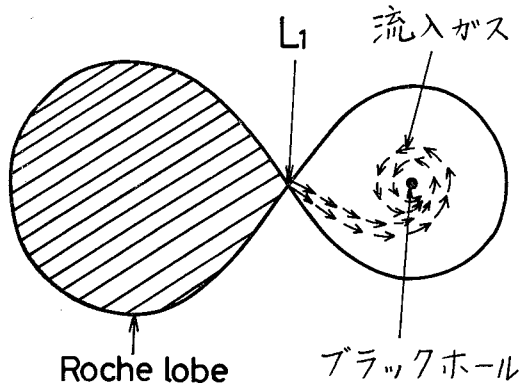


図 1 ブラックホールへのガスの降着の模式図。 L_1 点からの流入ガスは、ブラックホールのまわりに回転円盤をつくる。

円盤内の物質は、ブラックホールに近い内側ほど速く回転していると考えられる。いまガスの粘性を考えると、内側の物質は、回転の遅い外側の物質に引ずられ、回転速度が遅くなる。逆に外側の物質は、回転が速くなる。この結果、角運動量が外側に向かって輸送される。角運動量を失った物質は、徐々にブラックホールに向かって落下する。この落下の際、重力エネルギーが解放され、摩擦によって高温に熱せられた円盤内のガスから X 線が放射される。

2. 降着円盤の標準モデル

CygX-1 の観測事実を説明するため、上のような描像のもとにいろいろな降着円盤モデルが提出されてきた。それらのモデルはすべて、いわゆる Standard Accretion Disk Model (以下 SADM と略す) に基づいて円盤の構造を計算している。SADM は円盤の構造を決める上で、次のような仮定をしている。

(A) 円盤内のガスは、ケプラー運動の角速度 Ω_K で回転している。

$$\Omega_K = \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \quad (1)$$

ここで M はブラックホールの質量、 r はブラックホールからの距離そして G は重力定数である。

(B) 摩擦によって散逸されたエネルギーは、すべて円盤から X 線として放射される。

仮定 (A) は運動方程式中で、圧力勾配や慣性の項を省略したことに相当する。また仮定 (B) はエネルギーの式中で、内部エネルギーの変化の項と圧力によってなされる仕事の項とを無視したことに対応する。このような近似を行なうと、円盤の構造を記述する基本方程式は、代数方程式になる。そしてその解は解析的に求められる (以下この解を SADM 解と呼ぶ)。もし円盤の厚みが十分に薄ければ、SADM の枠組の中で、仮定 (A) (B) は正当化されることが容易に証明される。

3. 不透明な降着円盤

最近、筆者は、SADM では無視されていた項を考慮に入れて、円盤の構造を計算した。定常状態を仮定すると、円盤の構造を決める上で必要なパラメーターは、ブラックホールの質量 M 、物質の流入量 \dot{M} そして流入物質によって単位時間当たりブラックホールに持ち込まれる角運動量 \dot{J} である。これらの値を定め、更に円盤の外端 R_b での角速度 Ω 、面密度 Σ そして円盤の厚み $2H$ の値 (Ω_b, Σ_b, H_b ; 添え字 b は境界値を表わす) を指定

* 東大宇宙研 N. Shibazaki: Accretion Disk Surrounding a Black Hole

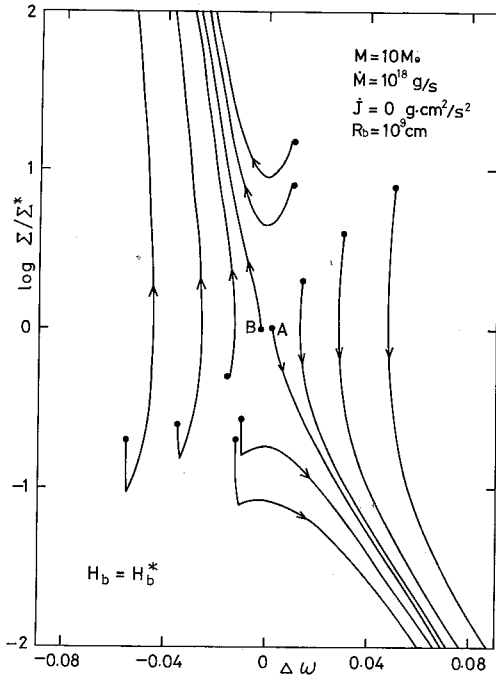


図 2 ガス圧の利いた不透明な円盤に対する数値解。黒丸は角速度と面密度に対する計算の出発値。矢印は外端からブラックホールへ方向を示す。

すれば、基本方程式を数値的に解くことができる。

不透明（発生した X 線が円盤表面に達するまでに多数回の吸収、再放出をくり返すことを意味する）でガス圧の利いた円盤について、いろいろな境界値に対応する数値解が、図 2 に描かれている。横軸は、 $\Delta\omega = (\Omega - \Omega_K) / \Omega_K$ で定義される量で、角速度がケプラー運動からどれくらいずれているかの目安を与える。縦軸は、SADM 解（*印で示される）で規格化された面密度である。黒丸は、角速度と面密度の円盤の外端での値を表わす。円盤の厚みに対する境界値 H_b としては、SADM 解の外端における値が採用されている ($H_b = H_b^*$)。SADM 解は、図中の 1 点、($\Delta\omega = 0, \log(\Sigma/\Sigma^*) = 0$)、で表わされる。外端からブラックホールに向かって進むにつれ、解は矢印の方向に変化する。

数値解は、角速度と面密度との境界値 (Ω_b, Σ_b) に依存した 2 つのグループに分類される。計算された数値解で、SADM 解に収れんするものはない。解 A, B のように SADM 解のごく近傍から計算を始めた場合でさえ、内側に進むにつれ、解は、SADM 解から次第にずれてゆく。図 2 中のいずれの解も、ブラックホールから遠く離れたところで、面密度の急速な増加あるいは減少を起している。そのため、ブラックホールまでつながった解を見出すことができなかった。なお、厚みに対する

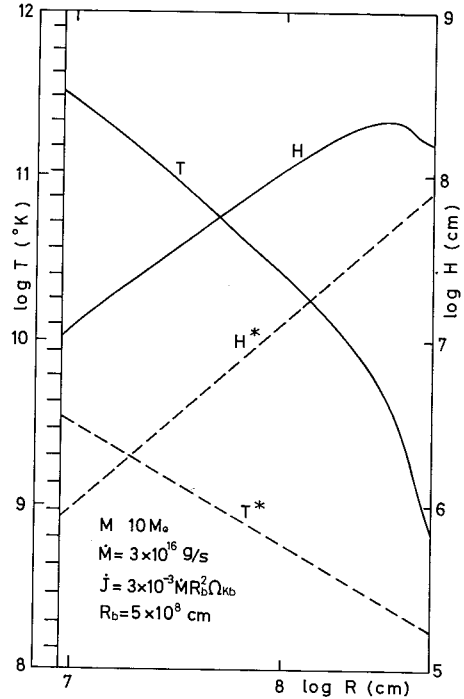


図 3 透明な円盤の温度と厚み。点線は SADM 解を表わす。左端にある陰影をつけた縦線は、円盤の内端を示す。

境界値をいろいろ変えてみたが、得られた結果は、図 2 とほぼ同じ解の振舞を与えている。

図 2 に見られる解の振舞の原因は、物質流入に対する定常状態の仮定にある。基本方程式から、物質流入量に対し、

$$\dot{M} = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \frac{1}{\Omega_K} Q \left(-\frac{d \ln \Omega}{d \ln r} \right) \quad (2)$$

の関係式が得られる。ここで Q は、円盤の厚みにわたって積分された圧力である。いま、 Q が少し減少したとしよう（数値計算の結果によれば、温度の変化は、面密度の変化に比べ、ゆっくりしている。それゆえ Q の増減は面密度 Σ の増減を意味する）。SADM ではケプラー運動という仮定のため、 $-d \ln \Omega / d \ln r$ は 1.5 に固定されている。しかし (2) 式によれば、 \dot{M} が一定なので、 Q の減少は、 $-d \ln \Omega / d \ln r$ を大きくする。計算が内側に進むにつれ角速度が急速に増加し、従って遠心力が大きくなる。遠心力の増加を相殺するためには、より大きな圧力勾配 ($d \ln Q / d \ln r$) が要求される。その結果、更に内側に進むと、圧力 Q は益々減少する。このようにして、解は、SADM 解からどんどんずれていく。

不透明な円盤で輻射圧の利いた場合についても、同様な数値計算を行なった。結果の本質的な特徴は、図 2 に示されているものと同じである。

4. 透明な降着円盤

透明な円盤とは、発生した X 線が、吸収されることなく直接円盤の外に出ていく場合である。不透明な場合と同様、計算されたすべての解は、外端から内側に向かって進むにつれ、SADM 解から次第にずれていくという性質を示す。しかし透明な場合は、外端で適切な境界値を採用すれば、ブラックホールまでつながった円盤全体の構造を決めることができる。図3には、このような透明な円盤の温度 T と厚み H が示されている。得られた数値解は、点線で表わされている SADM 解と相当に異なっている。円盤の温度は非常に高く、従って幾何学的厚みの大きい構造となっていることが注目される。

雑報 1

小惑星の新しい名称 (1000)~(1002)番の小惑星名は小惑星発見史上に登場する3人を記念して Piazzia, Gauss, Olbersia と命名されていた。登録番号が増え 2000 番に達したので、IAU 第20委員会(小惑星・彗星・衛星の位置と運動)では次のメンバーによる特別命名委員会を 1976 年夏に発足させた。

V. K. Abalakin, P. Herget (委員長), L. Kohoutek, B. G. Marsden, J. Schubart, C. J. van Houten, P. Wild

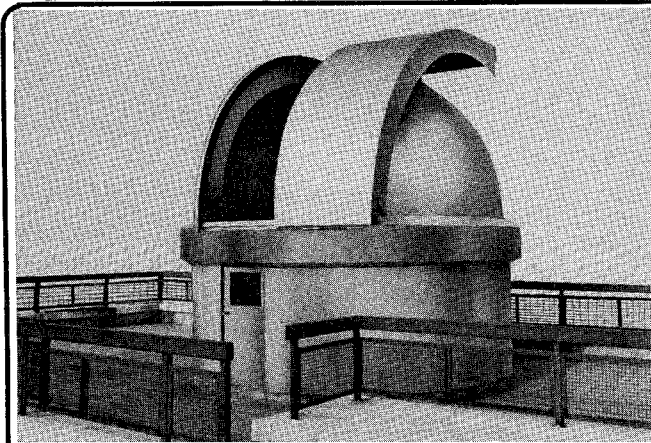
5. おわりに

この研究から、降着円盤全体の構造を与える定常解は、境界値が限られたきわめて狭い範囲にある場合にのみ存在することが明らかになった。境界値がその範囲外にあるときは、円盤はどのような状態になるのであろうか。2つの可能性が考えられる。

- (i) 円盤は境界値を自己調節し、定常状態を達成する。その結果、境界値は狭い範囲内のある特定な値に落ち着く。
- (ii) 定常状態という仮定を、もはや適用できない。円盤の構造は、時間とともに変化する。

いずれの可能性が実現されるかを知るには、時間を含んだ方程式を適切な初期条件で解かねばならない。

数回の会合で検討した後、次のように 2000 番前後の名称が確定した。(1996) Adams, (1977) Leverrier, (1998) Titius, (1999) Hirayama, (2000) Herschel, (2001) Einstein, (2002) Euler, (2003) Harding, (2004) Lexell, (2005) Hencke 5月に東京で開催された IAU 第81回シンポジウムは東大名誉教授萩原雄祐先生の81才の誕生日と天体力学に関する労著作をたたえるものであったが、この席上アメリカインディアナ大学の Edmondson が(1971) 1955 RD₁を Hagihara と命名したいと申し出ていることが披露され喝采を博した。(富田弘一郎)



- 営業品目
- ★天体望遠鏡ならびに双眼鏡
 - ★天体写真撮影用品及び部品
 - ★望遠鏡各種アクセサリ
 - ★観測室ドームの設計・施工

★総合カタログご希望の方は切手 300 円同封お申込みください

ASTRO 光学工業株式会社
 ASTRO 170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321