

アクリーション・ディスク・ストーリーズ

II. 理論

松元亮治*

1. はじめに

前回述べたように、アクリーション・ディスクは粘性を通して重力エネルギーを解放し、光り輝いている天体である。X線星やキューサーのモデルとしてのアクリーション・ディスクの研究は1960年代末に始まり、シャクラ・スニャーエフ(1973)に代表される標準降着円盤モデルとしてまとめられた。今回は標準モデルとそれ以後の理論的發展について概観することにしよう。

2. 定常降着円盤の構造

2.1 標準降着円盤モデル

ディスクは定常、軸対称で幾何学的に薄い光学的には厚いと仮定する。鉛直方向の構造は平均化し、動径座標(r)のみに依存する1次元問題として扱う。ディスクの厚さ H は鉛直方向の静力学的平衡の条件から決まる。動径方向については、中心天体の及ぼす重力と回転による遠心力のつりあいを仮定する。すなわち、ディスクはケプラー回転していると考える。

角運動量を持ったガスの降着は、粘性を通じて角運動量を外側に輸送することによって可能になる。粘性による応力を $t_{r\phi}$ (応力テンソルの $r-\phi$ 成分)、単位質量あたりの角運動量を j 、中心天体に持ち込まれる角運動量を j_0 、ガスの降着率を \dot{M} とすると、

$$\dot{M}(j-j_0) = H \cdot 2\pi r^2 t_{r\phi} \quad (1)$$

$t_{r\phi}$ を求めるためには具体的な粘性メカニズムを知る必要がある。標準モデルでは無次元パラメータ α を用いて、 $t_{r\phi} = \alpha P$ とおく。 P は圧力である。このような粘性の扱いをするモデルは「 α モデル」とよばれるが、その根拠については次節で述べる。

式(1)にあらわれる定数 j_0 はディスクの境界における条件から決まる。ここでは中心天体がブラックホールの場合を考えよう。ブラックホールのまわりの粒子の軌道を調べてみると、一般相対論の効果によってある臨界半径よりも内側では軌道が力学的に不安定になり、粒子はブラックホールへ落下してしまう。このため、この半径よりも内側には遠心力で支えられたディスクは存在できず、ディスクに内縁ができる(図1参照)。シュバルツシルトブラックホールの場合、内縁までの半径はシュ

I | II | III

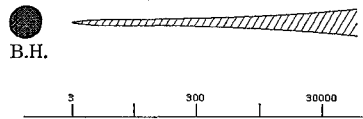


図1 ブラックホールのまわりの標準降着円盤(断面図)。横軸の単位はシュバルツシルト半径。

バルツシルト半径の3倍に等しい。標準モデルでは、内縁を通して粘性は働かないという境界条件をおく。

次に、ディスク内で発生した熱エネルギーは鉛直方向にのみ運ばれ、ディスク表面から輻射エネルギーの形で失われると仮定する。粘性摩擦によって生じる単位面積あたりの熱エネルギーを Q^+ 、表面から輻射されるエネルギーを Q^- とすると熱的なつりあいは $Q^+ = Q^-$ であらわされる。ディスクの回転角速度を Ω とすると、

$$Q^+ = -(H/2) \cdot t_{r\phi} r (d\Omega/dr) \quad (2)$$

Q^- は近似的に(鉛直構造に依存する係数を除いて)、

$$Q^- = acT^4/\tau \quad (3)$$

a はステファン定数、 c は光速、 T は赤道面の温度である。 τ はディスクの光学的厚さをあらわし、電子散乱と自由・自由遷移による不透明度を考慮する。

以上の基礎方程式と状態方程式からディスクの構造が決定される。ディスクは中心天体に近い方から順に、(I)輻射圧優勢、電子散乱、(II)ガス圧優勢、電子散乱、(III)ガス圧優勢、自由・自由遷移の3領域に分かれる。ただし、中心天体の半径がシュバルツシルト半径にくらべて大きい場合(白色矮星など)には領域(I)はあらわれない。ブラックホールのまわりの標準ディスクの概形を図1に示す。ディスクからの熱輻射の温度は10太陽質量のブラックホールのまわりのディスクで約 10^7 Kであり、軟X線で最も明るく光ることになる。キューサーなどで考えられている 10^3 太陽質量の超巨大質量ブラックホールの場合には $10^5 \sim 10^6$ Kで紫外線輻射が主となる。

2.2 粘性を生みだすもの

ディスクが乱流的であれば乱流粘性が働く。粘性係数を η_i 、乱流速度を v_i 、乱流の特徴的なサイズを l_i 、密度を ρ とすると $\eta_i \sim \rho v_i l_i$ である。乱流の速さは亜音速、サイズはディスクの厚さよりも小さいであろう。音速を

* 京大理 Ryoji Matsumoto: Accretion Disk Stories II. Theoretical Aspects

v_s とし, $H \sim v_s/\Omega$ に注意すると粘性応力は次のように見積ることができる.

$$t_{r\phi} = \eta_r r (d\Omega/dr) \sim (v_t/v_s)(l/H)P \quad (4)$$

P の係数を一定であるとしてこれを α と書けば, α モデルの形になる. このとき $\alpha < 1$ である. ディスクの微分回転によって乱流が生成されるかどうかは明らかでない. 乱流を作る他のメカニズムとしては対流や自己重力不安定などが考えられている.

ディスク内に磁場がある場合には磁気応力が働く. 動径方向とトロイダル方向の磁場成分をそれぞれ B_r, B_ϕ , 磁気圧を P_m とすると,

$$\begin{aligned} t_{r\phi} &= B_r B_\phi / 4\pi \\ &= (B_r B_\phi / 4\pi P_m) (P_m / P) P \end{aligned} \quad (5)$$

この場合も P の係数を一定とすれば α モデルの粘性則になる. ディスク内の磁場のふるまいはよくわかっていないが, 次のようなプロセスが働くといわれている. ディスクの回転による巻きこみで B_ϕ は増幅される. 一方このような磁力線の変形は磁力線再結合による磁場の散逸をひきおこし, 磁場の成長は押さえられる. また, 磁気圧が内圧より大きくなる場合には磁気浮力が働いて磁束はディスクの外に出てしまう. さらに, ディスクが乱流的であれば乱流ダイナモ作用が期待される.

このように, 粘性をより正確に扱うためには乱流や磁場とプラズマの相互作用に関する微視的物理学を明らかにする必要があり, 今後の研究に待たれる部分が多い.

2.3 ディスクは安定か?

定常モデルを求めたときに問題になるのは, それが安定か否かということである. 標準モデルについては熱的安定性や永年安定性が調べられている.

熱的安定性は熱の発生率 Q^+ と冷却率 Q^- の温度依存性を調べればわかる. 輻射圧優勢なディスクでは, Q^+ の方が温度に対して敏感であり, もし少し温度が上がると加熱が冷却に勝ってさらに温度が上がるため, 熱的に不安定である. ガス密度が低く光学的に薄い場合にも, ディスクは熱的に不安定になることが知られている.

輻射圧優勢なディスクは永年のにも不安定である. これは, ディスクがリング状に分裂してしまう不安定性である. ただし, 成長の速さは熱的不安定性の方が速い.

輻射圧優勢な領域は, 輻射エネルギーの大部分が放出されている領域である. このような領域が不安定であることは, 標準モデルにとっては都合が悪い. ひとつの考え方として, ブラックホール近傍でディスクが幾何学的に厚くなっているとするモデルが提唱されている (温度が上がればディスクは膨らむ). 他方, 何らかの方法でディスクが安定化されているという説もある. 安定性の条件は, 仮定した粘性則に依存しており, たとえば $t_{r\phi}$ は全圧ではなく, ガス圧のみに比例すると仮定すると輻

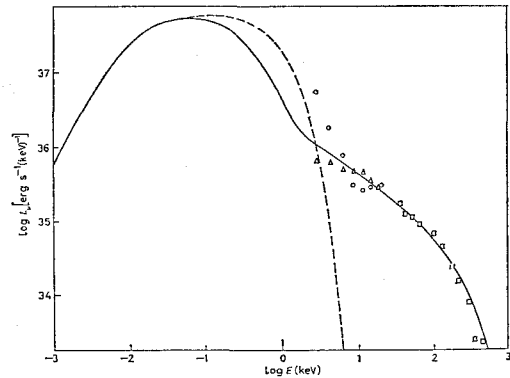


図2 アクリーション・ディスクからの輻射スペクトル. シャピロ他 (1976) による. 点線は標準降着円盤モデル, 実線はシャピロらによる高温の内部領域を考えるモデル (電子温度とイオン温度が異なるため, 2 温度ディスクモデルと呼ばれる). 記号は Cyg X-1 の観測値.

射圧優勢でもディスクは安定になる. また, 2.5 で述べるように, 内縁近傍では動径方向の質量・エネルギーの輸送を考慮する必要があり, この影響でディスクが安定化されている可能性もある.

2.4 硬X線はどこから出ているか?

Cyg X-1 や活動銀河中心核からは強い硬X線 (~ 100 keV) が放出されている. ところが図2の点線のように, 標準モデルでこの硬X線を説明することはできない. そこで, 高温で光学的に薄い領域を考え, この領域でのコンプトン散乱によって硬X線を作るモデルが考えられている. 次のふたつが代表的である. 第1は, 前節の安定性の議論から, ブラックホール近傍でディスクが幾何学的に厚く, 高温 (電子温度 $\sim 10^9$ K) になっていると考える (図3a). 図2の実線はこのモデルで計算した輻射スペクトルである. 第2は, ディスクが高温のコロナにサンドイッチのようにはさまれている (図3b) というモデルである. 太陽コロナとの類推から, ディスク表面では磁場が本質的な働きをしており, ループ状のコロナ構造をしているという説もある.

2.5 内縁近傍の構造

標準モデルでは, ブラックホールのまわりのディスクの内縁では粘性は働かないという境界条件をおいた. ところが, この条件はあまり適切ではない. というのは, ディスクの内縁で密度または動径速度が無限大に発散してしまうからである.

内縁近傍の構造は幾何学的に厚いディスクモデルの研究から明らかになってきているので, まずそちらから紹介することにしよう. 幾何学的に厚いディスクでは構造が2次元的になるため, 一般的な扱いは難しい. 図4に示したのは角運動量を一定としたときの等ポテンシャル面の形と予想されるディスクの形状である. ディスクは

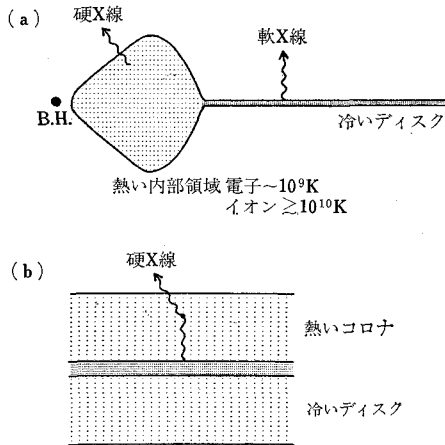


図3 硬 X 線輻射領域に関するふたつのモデル。(a) 2 温度ディスクモデル, (b) サンドイッチ・コロナモデル。

圧力勾配力と重力, 遠心力がつりあって, 静力学的平衡状態にある。注目してほしいのはロッシュ・ローブの L_1 ラグランジュ点の働きをするカスプができることである。カスプ近傍では力学的平衡がこわれ, ガスは圧力勾配力に押されてブラックホールへ落下する。

幾何学的に薄いディスクのモデルに話をもちます。この場合にも, 内縁近傍では力学的平衡がこわれ, ディスクから落下流へうつりかわる構造になっているはずである。このような領域を調べるためには, 標準モデルでは無視されていた, 慣性力や圧力勾配力, 動径方向のエネルギー輸送を含めた微分方程式を解く必要がある。ムショトルリエとパチンスキー (1982) は, この方程式を数値的に解き, ディスクから超音速落下流へなめらかにつながる解を得た。パーカーの太陽風理論でよく知られているように, このような遷音速解は臨界点 (微分方程式の特異点) を通る必要がある。内縁での境界条件が, 臨

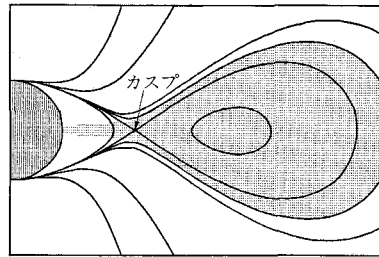


図4 幾何学的に厚い降着円盤のモデル。アブラモヴィツ他 (1978) にもとづく。実線は等ポテンシャル面である。ガスはカスプを通してブラックホールへ落下する。

界点を通るという条件におきかえられたわけである。我々のグループ (1982) もムショトルリエ等と同様の計算を行い, 同様の結果を得ているが, 臨界点の性質についてはより進んだ知見を得ている。図5に得られた解の例を示す。

3. 動的現象と進化

キューサーやX線星にはいろいろな変光現象が観測されている。いくつかのキューサーやセイファート銀河では, 約100日の周期の周期的変光がみられる。また, 矮星型新星のバースト時には数十秒周期の周期的変光が観測される。これらの周期的変光の原因としてまず考えられるのはディスクの振動であろう。ひとくちに振動といっても, 動径方向, 鉛直方向, スパイラル状の振動などが考えられる。ここでは動径振動について簡単に説明しよう。ある半径 r のところにあるリング状の領域を $r + \delta r$ ($\delta r > 0$) に変移させてみる。角運動量保存によって, このリングの回転速度は $r + \delta r$ におけるケプラー回転の速さよりも遅くなり, 重力が遠心力にうちかって, リングは内側へひきもどされるであろう。このようにして, リングは半径 r のまわりを振動することになる。振

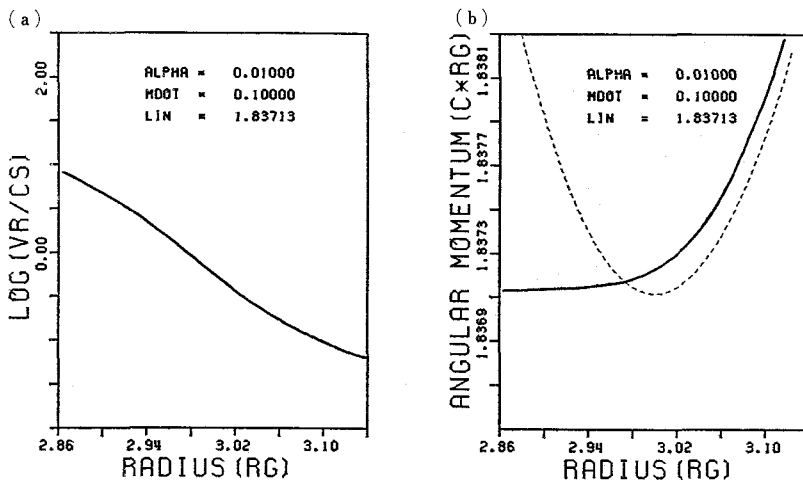


図5 ムショトルリエ他 (1982) と同様の計算から得られた, ブラックホールのまわりの幾何学的に薄い降着円盤内縁近傍の構造。(a) 動径速度。CS は音速である。(b) 角運動量。点線はケプラー回転の角運動量をあらわす。準ケプラー的なディスクから超音速落下流へと構造が変化する。

動周期はディスクの回転周期 (10^8 太陽質量のブラックホール近傍で約1日)程度である。ただし、内縁近傍では一般相対論の効果によって、振動周期はこれよりも長くなる。

ディスクの回転周期に比べて長いタイムスケールの現象として、Cyg X-1などにみられる軟X線放射の「高い」状態と、「低い」状態の遷移が知られている。一丸(1977)は、外部ディスクが幾何学的に薄い状態(図3a)と、幾何学的に厚く、光学的に薄い状態の間をうつりかわるとして、この現象を説明した。幾何学的に薄い状態が「高い」状態に対応する。

矮星型新星の再帰的バーストは、伴星外層または、アクリション・ディスクの不安定性が原因であると考えられている。後者の具体的なメカニズムとして、蓬茨(1979)、カニゾ他(1982)らは、ディスクの表面密度がある臨界値をこえた時におこる熱的不安定性を検討している。系は、(1) ガスの蓄積、(2) 不安定性による降着率の増加(バースト)、(3) ガス密度の低下に伴う静穏状態への移行というサイクルをえがき、再帰的活動を示すことが期待される。

上記のような、ディスクの間歇的活動モデルは、活動銀河中心核においても有望である。中心核へのガスの供給源としては、超巨大質量ブラックホールによる星の潮

汐破壊、星と星との衝突破壊などが議論されたが、定期的なガスを供給してクェーサーの活動を維持することは難しいようである。中心核の活動は間歇的におこると考えれば、ガス供給に関する困難は解消される。バイレイ(1982)は、中心核ガス円盤での重力不安定性による爆発的星生成に伴ってディスクが乱流的になり、ブラックホールへの降着率が增大してクェーサーとしての活動期があらわれるというモデルを提案している。

4. おわりに

以上、中心天体がブラックホールである場合に重点をおいて、降着円盤の理論をながめてきた。中心天体が磁場を持つ中性子星であれば、ディスクは磁気圧でせきとめられ、ガスは磁力線に沿って中性子星の磁極へ落下すると考えられている。このような天体は、X線パルサーのモデルとして多くの研究が行なわれている。

3節で述べたようなディスクの動的現象や進化の研究はまだ始まったばかりである。矮星型新星の理論と観測の比較からは、ディスクの物理状態(粘性など)に関する情報が得られることが期待される。また、このような非定常的現象の研究には、星の場合と同様に、計算機シミュレーションが有力な手段となるであろう。

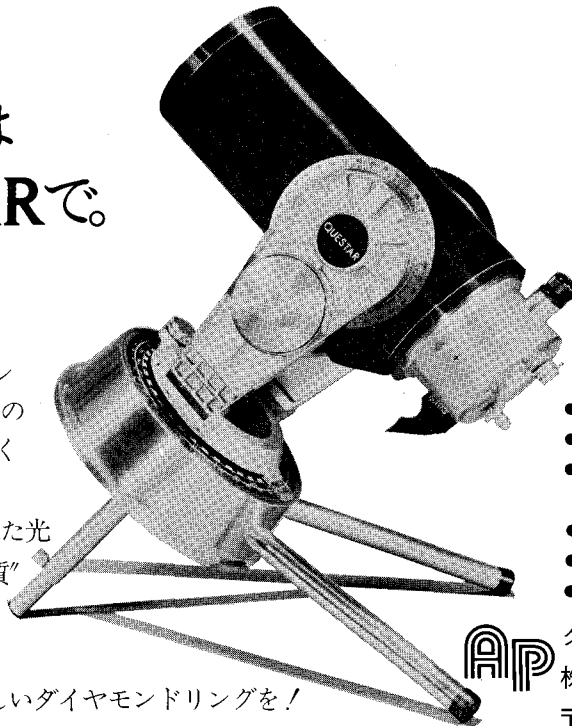
日蝕観測は QUESTARで。

マクストフ・カセグレンの最高峰「クエスト」の真価を体験していただくチャンスです。

「クエスト」のすぐれた光学性能は、すべて「画質」として、はっきり目に見えます。

「クエスト」で、美しいダイヤモンドリングを!

*クエスト オリジナルカタログご希望の方は、切手800円同封の上、お申込みください。



「クエスト セブン」

- 光学系…カタディオプトリック
- 有効口径……………178mm
- 焦点距離 実視用…2,540mm
カメラ用…2,800mm
- ファインダー…7×、14×内蔵
- カメラ視野……………1° 15'
- 分解能……………0.6"



クエスト社 日本総代理店
株式会社 エーピー

〒150 東京都渋谷区渋谷2-3-4
青光ビル4階 ☎(03)407-0047