

アドベクション優勢ディスク：

もう一つの標準ディスクモデル

嶺 重 慎, 加 藤 正 二

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 〒606-01 京都市左京区北白川追分町〉

E-mail: minesige@kusastro.kyoto-u.ac.jp

アクリーションディスクのモデルとして、今、光学的に薄いアドベクション優勢ディスクが注目されている。これは放射冷却の効率の悪い円盤で、ガスの重力エネルギーは外部に放射されることなく、そのまま中心天体へと運ばれる(これをアドベクションあるいは移流という)。ガス流は高温になり、高エネルギー放射が可能になる。また乱流による熱の拡散を無視する限りディスクは熱不安定で、激しい時間変動が期待される。この一風変わったディスクモデルについて紹介してみたい。

1. はじめに

1995年10月末、京都大学宇宙物理学教室および大阪教育大学のグループが中心となって、アクリーションディスクの国際会議を京都コンピュータ学院で開催した。出席者は、国内外から約60名。会議の規模としては比較的小さいものの、今注目されているアドベクション優勢ディスクの関連研究者はほとんど出席しており、かなり内容の濃い、先進的な議論が展開された¹⁾。

さてこのように、何日にもわたる会議の中心テーマとなりうるアドベクション優勢ディスクとはいったい何物であろうか。いったいどのような意義があるのであろうか。

活動銀河核や低質量X線連星系は、強いX線ガンマ線放射源であることが知られている。こういった高エネルギー放射は、どこから、どのようにして生まれるのか。これはX線天文学創始以来の問いである。

われわれはこう考える。光学的に薄いアドベクション優勢ディスクこそが、こういった高エネルギー放射の母体ではなかろうかと。

多くの方がこのような用語を初めて耳にされることであろう。しかしながらアドベクション優勢ディスクの解は、実は1970年代から知られていた

のである²⁾。最近になってようやくその重要性が認識され始めたということである。本稿の主旨は、この聞き慣れない名称の円盤こそが、X線、ガンマ線でわれわれが見ている円盤の実体であることを、多くの方にアピールすることにある。

2. アクリーションディスクの標準モデル

アクリーションディスクのいわゆる標準モデルは、1973年に提唱された³⁾。(アクリーションディスク全般については、福江氏によるすぐれた解説本⁴⁾があるので、ぜひ一読されたい。)

この標準モデルでは、ディスクは点ポテンシャルの中にあり、軸対称で定常的、光学的に厚く黒体輻射を出すといったことが仮定されている。ガスのアクリーションに伴い解放された重力エネルギーは、粘性の働きにより熱エネルギーに転化されるが、そのエネルギーは効率よく輻射の形でディスクから出ていく。すなわち、粘性加熱と輻射冷却とのバランスでディスクの熱構造が決定する。ディスクは(ビリアル温度に比して)十分に冷えることができ、ディスクは幾何学的に薄くなる。アクリーションの時間スケールは、粘性の働きによってガスの角運動量を引き抜く時間スケールで決まるが、粘性が小さいため、その時間スケ

ールは自由落下時間より格段に長くなる。

この標準ディスクモデルは、天体物理学的円盤のダイナミクスや構造を理解する上で多大な貢献をしてきた。しかしながら、活動銀河核やX線連星系からの高エネルギー放射は説明できない。モデルはずっと低いディスク温度を予言するからである。また激しい時間変動も説明できない。標準ディスクは極めて安定だからである。

どうやら、このよく知られた標準ディスクとは別に、もう一つ、「標準」ディスクがこの世に存在するようなのである。

3. アドベクション優勢ディスクモデル

高エネルギー光子を出すディスクは、まず光学的に薄くなくてはいけない。そこで、標準ディスクモデルの仮定を一部変更し、放射機構として、黒体放射ではなく光学的に薄いプラズマからの制動放射ないしは逆コンプトンとするディスクモデルが、シャピロら⁵⁾によって提唱された。標準ディスクと同様、ディスクの構造は粘性加熱と放射冷却とのバランスによって決定される。

このような解も確かに存在する。しかしながらこのディスクは熱的に極めて不安定であることが後ほど示され、定常的な高エネルギー放射を説明するのには難があったのである。

これにかわるモデルとして近年(再)注目されているのが、光学的に薄いアドベクション優勢ディスクである(例えば文献^{6),7)}。

さて歴史的にいうと、まず光学的に厚いアドベクション優勢ディスクの解が、活動銀河核等の円盤モデルとして議論されていた。円盤の熱平衡曲

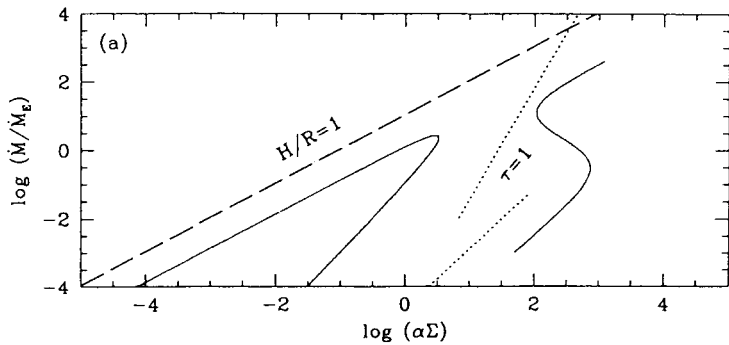


図1 アクリーションディスクの熱平衡曲線(I)。縦軸は質量降着率(単位はエディントン光度を与える降着率)の対数、横軸は面密度 Σ と粘性パラメータ α の積の対数。右に光学的に厚いブランチ、左に光学的に薄いブランチがのびる。文献⁶⁾より転載。

線を描いて見ると(図1)右のブランチが光学的に厚いブランチである。それが高温部にのびて、一旦左に折れたあと再び右に転回するブランチがそれである。しかしこれは、活動銀河核等からの高エネルギー放射を説明できるほど高温にならないのでここでは触れないことにする。ここで問題にしたいのは、図1の左側、光学的に薄い領域にある、上部から斜め左下にのびるブランチである。

この光学的に薄いアドベクション優勢ディスクは、放射を出す効率が極端に悪いディスクである。放射の出る時間スケールが、自由落下の時間スケールより長くなってしまふので、重力エネルギーの解放により発生した熱は放射エネルギーへと転化する間もなく、ガス流にのってそのまま中心天体へと運ばれる(これをアドベクションという)。放射の効率があまりよくないため、ディスクはアクリーションに伴いどんどん高温になり、幾何学的にふくらむ。こうして、粘性の値(温度に比例)も大きくなり、角運動量抜き取りの効率が向上し、アクリーションはきわめて短時間で進行することになる。その結果、降着物質が角運動量をもっていたとしても、何と自由落下に近い速度でのアクリーションさえ可能になるのである。

興味深いことに、光学的に薄いアドベクション

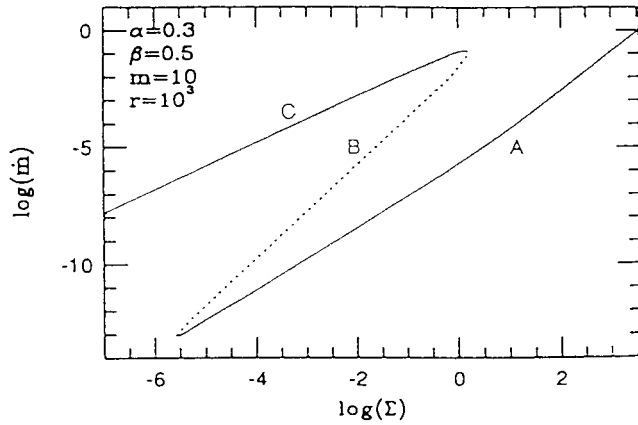


図2 アクリーションディスクの熱平衡曲線(II)。縦軸は質量降着率(単位はエディントン光度を与える降着率),横軸は面密度。A, B, Cはそれぞれ,標準ディスク,シャピロらによるディスク,光学的に薄いアドベクション優勢ディスクに対応する。文献⁷⁾より転載。

ディスクの型	(光学的に厚い) 標準ディスク	光学的に薄い アドベクション優勢ディスク
エネルギーバランス	粘性加熱=放射冷却 ≫アドベクション	粘性加熱=アドベクション ≫放射冷却
ディスクの温度 (ブラックホール近傍)	~ 10 ⁵ K (活動銀河核) ~ 10 ⁷ K (X線連星)	イオン温度~ 10 ¹² K 電子温度~ 10 ⁹ K
ディスク光度	∝ ガス降着率	∝ (ガス降着率) ²
アクリーション時間	≫ 自由落下時間	≳ 自由落下時間
ディスクの厚み	≪ ディスク半径	≲ ディスク半径
アクリーション流	ディスク状	ほぼ球対称
X線スペクトル	ソフト成分 + ハードテイル	べき型ハード
スペクトル状態	ソフトステート	ハードステート
X線ゆらぎ	小さい	激しい

表1 標準円盤と光学的に薄いアドベクション優勢円盤。

ディスクはかなり広いパラメータ（ガス輸送率あるいはディスクの明るさ）の範囲にわたって存在することがわかってきた。図2にもう一度、ディスクの熱平衡曲線を描いておく。観測的に興味深い、エディントン光度からその数桁下の領域にわたって、三つの異なるブランチがあることがわかる。このうち真ん中のブランチ（B）は熱不安定なので除くと、光学的に薄いアドベクション優勢ディスク（C）は、標準ディスク（A）とならんで、かなり普遍的にこの世界に存在するのである。

しかしながら上に述べたように、標準ディスクとアドベクションディスクは、その性質やふるまいにおいて好対照をなす。その特徴を表1にまとめておいた。

ここで興味深い問いかけは、このふたつのディスクの関係であろう。すなわち、ふたつの成分が共存しているのか、ひとつのディスクが時間的に両状態間を遷移しているのかである。

どうやら、少なくともブラックホールディスクに関して云えば、ディスクはこのふたつのブランチ間を遷移し、ハード/ソフト遷移をひきおこしているらしいのである⁹⁾。

といっても、ソフト状態でもハードテイルを生み出すコロナ成分が必要であるし、ハード状態で

も低温（数百万度）プラズマの存在がX線観測等から示唆されている。両者共存の可能性も残されている。詳しいスペクトルフィッティングは今後の課題である。

4. アドベクションディスクの安定性

さて先ほど、光学的に薄いディスク（B）は熱的に不安定で観測を説明しないと述べた。ではアドベクション優勢ディスクは、熱的に安定なのだろうか。

ナイーブな解析では、アドベクションディスクは安定になる（例えば文献⁹⁾）。しかしながらこの議論で前提とされているいくつかの仮定、たとえば熱安定性の解析ではディスクの面密度を一定にして温度を変化させてよいとか、局所的にエネルギーバランスが成り立っているとか、アドベクションディスクでは必ずしも成り立たない。さらに、動径方向への熱の拡散も無視できない。そこで、これらの効果を取り入れて、きちんと解析をする必要がある。

加藤ら⁹⁾による線形解析によると、ディスクは大局的には熱安定なものの、乱流による熱拡散を無視する限り、波長の短い摂動に対しては熱不安定であることがわかった。

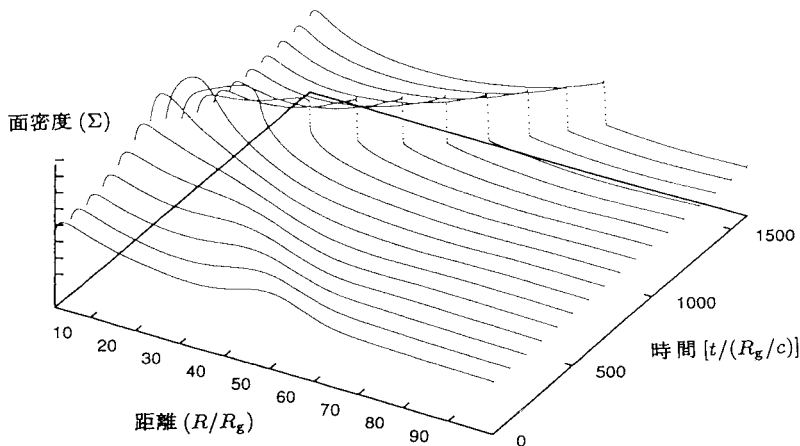


図3 光学的に薄いアドベクション優勢ディスクにおける擾乱の成長。ディスクの面密度(Σ)を、ディスク中心からの距離(R)と時間(t)の関数としてあらわす。距離及び時間の単位は、それぞれ、シュバルツシルド半径、およびシュバルツシルド半径/光速である。文献¹⁰⁾より転載。

では、熱不安定の結果ディスクはどうなるのだろうか。熱不安定の非線形発展を調べるには、シミュレーションにたよらざるをえない。そこで、光学的に薄いアドベクション優勢ディスクの一次元進化シミュレーションをおこなった。

その結果を図3に示しておく(文献¹⁰⁾。ディスク外縁に与えられた摂動(というより擾乱)は、拡散することなく、といって大きく成長することもなく、ほぼもとの形を保ったままガスアクリーション流に乗って、自由落下時間程度の時間スケールで中心へと落ちていく。

さらに興味深いことに中心に達した擾乱は、そこで反射されているように見える。ガス流は当然内向きなので、反射して外向きに伝わっているのは音波である。この音波はどんどん成長し、やがて衝撃波となる。こうして、時間に対しほぼ対称な光度曲線が生み出される。これはまさに、はくちょう座X1のいわゆるX線ショットの光度曲線そのものであった¹⁰⁾。

この意味するところは重大である。第一に、局所的に熱不安定とはいうもののその成長の時間スケールは(アクリーション時間スケールに比して)小さく、ディスクに大きな変化は及ぼさないことがわかる。つまり、シャピロらによるモデルとは違って、定常的な高エネルギー放射が期待される。

第二に、何等かの形でディスクの構造に擾乱が与えられると、その擾乱はへたることなくそのまま中心へと伝わっていくという事実である。すなわち、時間変動を生みやすいディスクということになる。これはまさにわれわれが、ブラックホール天体からのX線変動の説明のために提唱した、セルオートマトンによるSOC(自己組織化臨界現象)モデルで想定した状況である¹¹⁾。アドベクション優勢モデルは、定常成分と変動成分を共有する、活動銀河核やハードステートのブラックホール候補天体からのX線放射を説明するのに非常に都合がよいディスクということになる。

以上まとめると、アドベクションディスクはブ

ラックホール天体のディスクモデルとして、高エネルギー輻射のみならず観測のX線変動を説明する点においても、他のディスクモデルより優位にたつことがわかった。

もちろん、擾乱を起こす種の物理的成因にまで話を進めない、完全にブラックホール天体からのゆらぎを理解したことにならない。現在さらに詳しい解析を続けているところである。

参 考 文 献

- 1) Kato S. et al. 1996, *Physics of Accretion Disks: Advection, Radiation, and Magnetic Fields*, (New York: Gordon & Breach)
- 2) Ichimaru S. 1977, *ApJ*, 214, 840
- 3) Shakura N. I., & Sunyaev R. A. 1973, *A & A*, 24, 337
- 4) 福江純 1988, 降着円盤の世界講談社ブルーバックス, B 717
- 5) Shapiro S. L., Lightman A. P., & Eardley D. M. 1976, *ApJ*, 204, 187
- 6) Abramowicz et al. 1995, *ApJL*, 438, L37
- 7) Narayan R., Yi I. 1995, *ApJ*, 452, 710
- 8) Mineshige S. 1996, *PASJ*, 48, 93
- 9) Kato S., Abramowicz M. A., & Chen X. 1996, *PASJ*, 48, 67
- 10) Manmoto T. et al. 1996, *ApJL*, 464, 135
- 11) 嶺重 慎, 竹内 充, 根来 均 1995, ブラックホール天体からのX線ゆらぎ天文月報 88 巻 No. 9

Advection-Dominated Disks: Another Standard Disk Model

Shin MIMESHIGE, Shoji KATO

Department of Astronomy, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto 606-01

Abstract: The optically thin, advection-dominated disk model has drawn much attention recently. In advection-dominated disks, potential energy of accreting gas is inefficiently converted to radiation, thereby being advected into a central object. The disk then becomes hot, emitting high-energy radiation. In addition the disk is thermally unstable, as long as heat diffusion is neglected, so that rapid variability is expected. We, here, wish to introduce such an odd disk model.