

## 降着円盤—熱的・有限循環・不安定性 I

嶺 重 慎\*

## 1. はじめに

降着円盤, というよりもアクリーション・ディスクといったほうがなじみが深いだろうか, いずれにせよ降着円盤についての理解はここ十年で, 理論・観測ともに格段の進歩をとげた.

降着円盤とは重力エネルギーを効率よく熱エネルギーに変換するエンジンである. 古くは原始太陽系星雲のモデルとして, 後に激変星(白色矮星を持つ系)やX線連星(中性子星かブラックホールを持つ系)などの近接連星系において主に議論されてきたが, 最近ではAGN(活動銀河核, または活動的銀河核)の中心における降着円盤の有無が議論的となっている.

これら白色矮星や中性子星, ブラックホール, あるいは原始星など中心星の重力に引かれて落ちていくガスは, 角運動量を持っている限り, 中心星にまっすぐ落下しないで星のまわりを円運動することになる. こうしてリング状の天体が形成されるが, このリング(円盤)は乱流状態にあるとするのが Shakura & Sunyaev (1973) による標準降着円盤モデルの基本的仮定である. 乱流や円盤の微分回転に伴って増幅された磁場が粘性を作り出す. ガスはこの粘性の働きによって少しずつ角運動量を外向きに輸送して中心星へと落ちていくのである. 粘性はまたガスの重力エネルギーを熱エネルギーの形に変換

する役割も果たす. こうして落下するガスの重力エネルギーの解放により明るく光った円盤が形成される(図1参照).

本記事では, 特に水素の電離/再結合がもたせて起こる円盤の熱的不安定性について, 著者のミュンヘン, テキサス, そしてケンブリッジにおける研究を中心として紹介させていただくことにする.

この不安定性はまず激変星のサブグループの一つ, 矮新星のアウトバーストを説明するモデルとして, Osaki (1974) によってその存在が予言され, Hoshi (1979) によって物理的機構が明らかにされた. ここで注意すべきは, この不安定性は水素の基本的性質によるものであって矮新星固有の物理に依存するものではない, という点である. 即ちX線連星であろうとAGNであろうと, 円盤の温度が水素が再結合するような温度(一万度程度)になれば必ず現れる不安定性なのである.

では実際の系において, 熱的不安定性はどのような現象として見えてくるのだろうか, またどんな観測がこの不安定性によって説明されるのだろうか. 矮新星のケースから順に考えていきたい.

## 2. 矮新星のアウトバースト

## —円盤不安定モデルの発展—

## 2.1 前回の記事(天文月報1987年10月)より

まず簡単に円盤不安定性モデルについて復習しておこう. 降着円盤は, 水素が電離・再結合をおこす1万度前後の温度領域で熱的にも粘性的にも不安定になる. これは次のような事情による.

このような比較的低い温度領域において, 降着円盤は粘性により加熱され表面からの放射によって冷えていく. 今, 中性水素からなる低温円盤の温度が少しずつ上

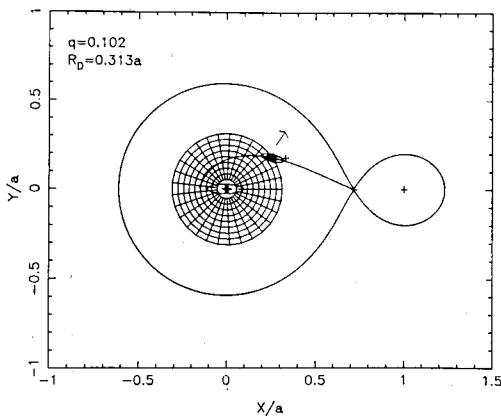


図1 激変星の構造 (Wood *et al.* 1989). 右の伴星からガスが放出されて, 左の白色矮星のまわりに降着円盤が形成される. ガスの流れが円盤とぶつかる点をブライト・スポットとよぶ.

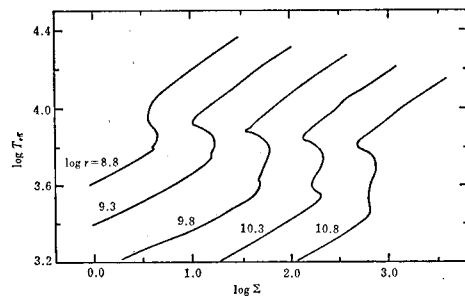


図2 矮新星の降着円盤の熱平衡曲線. 縦軸は有効温度, 横軸は表面密度.

\* 茨城大理 Shin Mineshige: Accretion-Disk Thermal Limit-Cycle Instability

昇して水素の電離が始まったとしよう。さて加熱率は温度の上昇に比例して増加していく。一方の放射冷却率は、吸収係数が温度の十乗近いべきで急増するため、温度が上昇しても殆ど変化がない（光学的に厚い円盤では放射冷却率は吸収係数に反比例する）。温度が上がれば上がるほど吸収係数は増加し、円盤は不透明になり、輻射は逃げにくくなり、ますます温度が上がることになる。

矮新星の円盤の構造を積分すると、われわれは図 2 のような S 字型の熱平衡曲線を得る。熱平衡曲線とは加熱率と冷却率がちょうど等しくなる状態を有効温度（また

は粘性の大きさ）と表面密度の関数として表現したものである。中間の状態は熱的にも粘性拡散に対しても不安定な状態でここには長く留まれない。円盤は高温（水素は電離状態）と低温（水素は中性）との二つの状態間を振動するのである（図 3）。

以上は円盤のローカルな性質であるが、数値計算をしてみるとこのローカルな不安定性がガス拡散に付随してグローバルに広がっていくようすがうかがえる（図 4）。こうして矮新星の観測で得られるような光度曲線が理論的に再現される（図 5）。

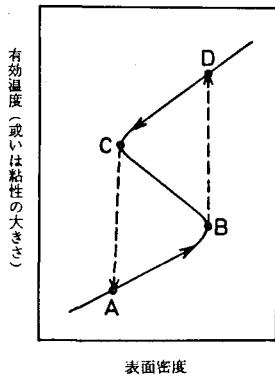


図 3 熱的不安定性によるリミット・サイクル。

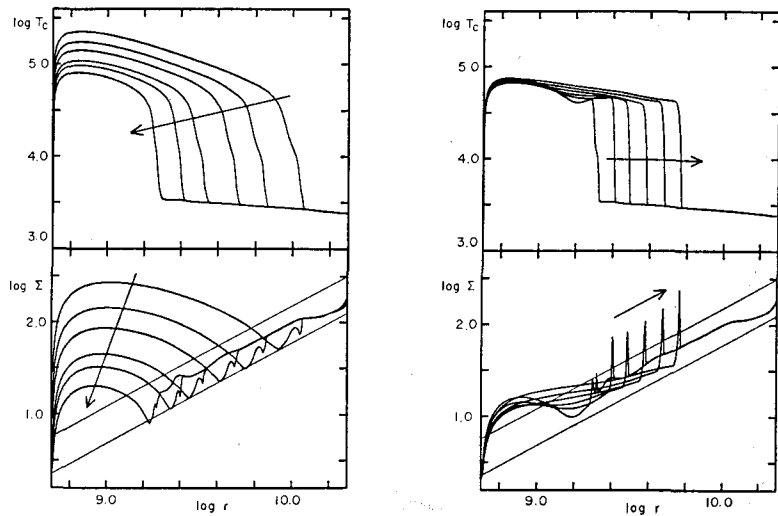


図 4 熱的不安定波の伝播 (Mineshige 1987)。グラフは上に温度分布、下に表面密度分布の時間進化を示している。横軸は円盤の半径。また右のパネルは増光時、左のパネルは減光時にそれぞれ対応。

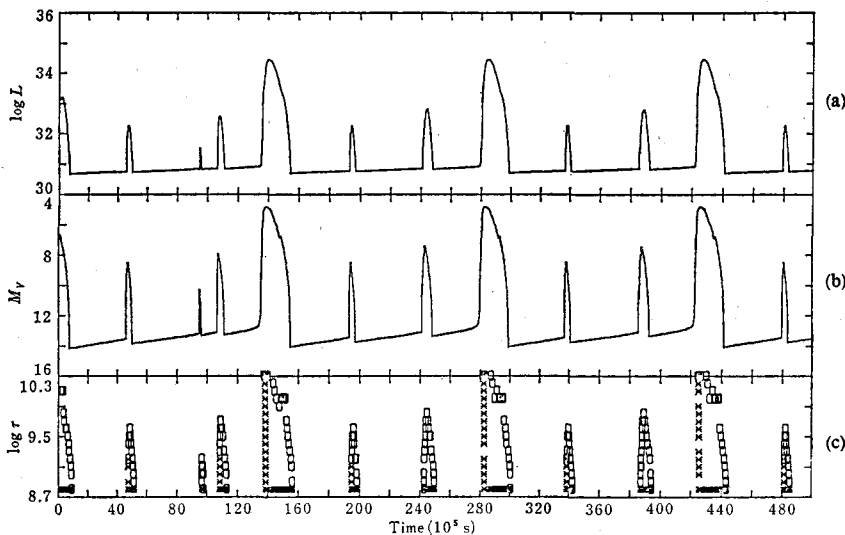


図 5 円盤不安定性モデルで計算された矮新星の光度曲線 (Mineshige 1986)。上から順に、絶対光度、絶対等級、そして不安定性波の位置を表す。

## 2.2 質量輸送不安定派の反撃

円盤不安定性モデルは、矮新星の光度曲線、スペクトル変化、円盤の半径の変化、2色図上の進化など基本的な観測を再現することにみごとに成功、もはや疑いのない理論として確立するかのように見えた。ところがこれにかみついていたのが対抗馬の質量輸送不安定性モデルである。このモデルでは、円盤ではなく伴星の側に何らかの不安定性（物理機構は未発見）を仮定し、円盤に降ってくるガスの量自体が時間とともに変化するというモデルであり、両者の間でここ十数年にわたり激しい議論が戦わされてきた。

ケンブリッジのプリングル (J. E. Pringle) らのグループは円盤不安定性モデルの最大の困難を指摘した。図3によると、円盤は高温状態（温度1万度以上）と低温状態（4-5千度以下）の間の状態には長く（2-3時間以上）留まれない。ところが、アウトバーストの立ち上がりの観測を詳しく解析すると、どうも円盤は6000度付近の中間温度の状態に1日ほど滞在しているらしいのである。従って、円盤不安定性モデルはどこか怪しい、というのが彼らの主張である (Pringle *et al.* 1986)。

## 2.3 新しい現象の発見

果たして彼らの言い分は正しいのか。

当時筆者はミュンヘンにあるマックス・プランク研究所に滞在していた。ミュンヘンの冬は長くそして暗い。ようやく春のきざしが見えてきたそんなある日、筆者は計算結果を調べていてあることに気がついた。熱的不安定性の火がつくと温度はたちどころに上昇するはずなのに、円盤の外縁の温度だけがすなおに上昇しないのである。計算メッシュを細かくしてもう一度計算してみた。もはや疑いない。外縁の温度は多少上昇したあと6000度あたりで一時的に停止している（図6参照）。そしてその停止時間は一日弱であった。これはみごとに観測を説明する (Mineshige 1988)。

では、その物理は何であろうか。

昔こういう実験をしたことを思い起こす……ピーカーに氷をいれてバーナーで熱し氷（水）の温度変化を測定する。時間がたつにつれしだいに温度が上昇する。しかし温度は必ずしも単調に増加するのではない。即ち氷が水になる時と水が水蒸気になる時との二回、温度上昇のスピードが鈍る。これは加えられた熱が温度上昇ではなく氷を解かして水にするため、あるいは水を水蒸気に変える熱として使われるためである……

これと同じことが円盤中の水素にも起こる。中性水素が完全に電離するまで円盤の温度上昇は停滞する。基本的にこれで問題は解決した。

さて、理論はひとりよがりではいけない。筆者はこの発見のあと質量輸送派の総本山であるケンブリッジ、オ

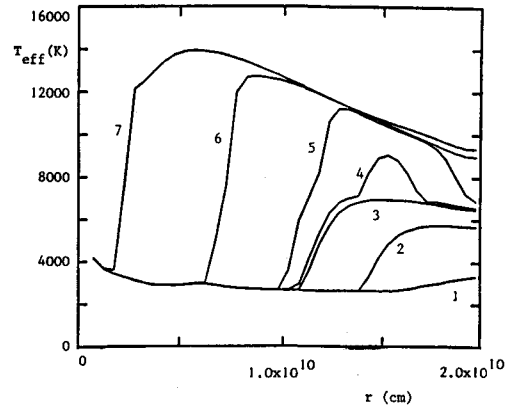


図6 アウトバーストの立ち上がり時における円盤の有効温度分布の時間変化。縦軸は有効温度、横軸は半径。外側の部分が6000度あたりで一時的に停滞することに注意。

ックスフォード両大学を訪れて議論してもらったが、有力な反論は聞かれなかった。議論はその後どうなったかということ、質量輸送派のおもだった人たちはなぜかその後分野を変えてしまい、筆者は皮肉なことに、かつて円盤不安定性モデル攻撃の砦であったケンブリッジに職を得て円盤不安定の研究を続けることができたのである。

## 2.4 円盤からの輝線

静穏時における矮新星のスペクトルの大きな特徴は水素のバルマー線などが強い輝線として見えることである。おもしろいことに、これらの輝線はアウトバーストの開始に伴って系が明るくなるにつれて吸収線へと変化する（図7参照）。これは円盤不安定性モデルの立場からどう理解したらいいだろうか。

円盤からの輝線の発生機構としては、従来二つの説が有力であった。

- (1) 円盤が光学的に薄いとす説。
- (2) 中心星からの輻射を受けて、円盤大気（温度）が光学的に厚い円盤自体の温度より高くなったとする説。

しかし、実際に円盤モデルを計算してみると円盤はなかなか光学的に薄くならないし、また二つ目の説は、アウトバーストの減光時において既に輝線が現れているという観測を説明できない。その時白色矮星からの輻射は、幾何学的に厚い内側の部分にさえぎられて外側の部分にまで届かないからである。光学的に厚い円盤内において外部要因によらない輝線発生機構が必要である。

ケンブリッジで共同研究者のウッド (J. H. Wood) と共に振動数依存性をもった吸収係数を用いた円盤の熱平衡曲線の計算をしていた時のことである。最初から円盤の輝線について興味をもっていたのではなく、ただ円盤の有効温度と色温度との関係を知る目的で始めたのである。ところが研究は、当初思ってもみなかった方向へ展

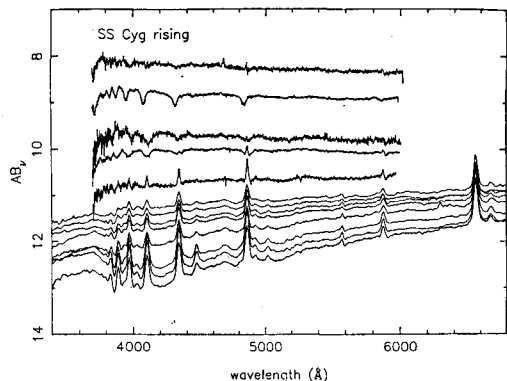


図 7 はくちょう座 SS 星の増光時におけるスペクトル変化 (Horne et al. 1989). 静穏時にめだつた輝線が円盤が明るくなるにつれ吸収線に変化する。

開する。

おもしろい結果が得られた。円盤中のガス量が多いほど円盤温度が高くなり水素は電離する。これは当然の結果なのだが、逆にガス量が少なくても円盤中の水素はやはり電離することを計算は示している。これはどうしたことか。

この物理を理解する鍵は円盤の光学的厚みの変化にある。円盤はガス量が少なくなると光学的に薄くなり、放射の効率が大きく下がる。つまりエネルギー損失率が激減するのだが、一方の粘性によるエネルギー発生率は徐々にしか減少しない。両者つりあうために円盤の温度は上昇し水素は（部分）電離するのである。

しかし円盤が光学的に薄くなるのは、残念ながら円盤への質量流入率が極端に小さい場合である。とても現実的では無い。が、何かおもしろい現象がここに隠されているのではないかと……

こう考えてみた。冷たい円盤（この中で水素は中性となっている）の構造を、面に垂直方向にみていくとどうだろう。当然ガス密度は上に行くほど小さくなり、やがて光学的に薄い部分（大気）が現れる。その一部分を取り出す。もしここでのエネルギー収支が、粘性による加熱と放射による冷却とで決まっていれば、温度は中心部よりも高くなり、水素は部分電離する。温度の逆転が実現する。しかし大気のエネルギー収支はこの二つだけで決まっているのではない。円盤中心部（光学的に厚い部分）からの放射の一部は大気で吸収される。放射吸収による加熱と粘性による加熱と、どちらが効くだろうか。吸収される熱量は中心部の温度の 4 乗、再放射される熱量は大気温度の 4 乗に比例する。だから、一旦大気の温度が中心部より高くなれば、多分粘性による加熱と放射による冷却がつり合うのだろう。水素は大気で部分電離し、温度逆転が発生する。しかしこれは結論を先取りした議論である……

円盤の垂直方向の放射輸送の式を解いて、温度分布を計算してみた。確かに円盤が低温状態にあるとき（静穏時）は大気に温度逆転が存在する（図 8）。連続光が冷たい円盤表面で、線が暖かい大気で作られるため、めでたく輝線発生となる。円盤が高温状態にあるとき（爆発時）には円盤自体が熱くなるため温度の逆転はおさえられ吸収線が発生する。こうして観測をみごとに説明するモデルがたてられた (Mineshige & Wood 1990)。

### 3. 円盤の粘性による進化

—食図法 (Eclipse mapping)—

#### 3.1 Eclipse Mapping とは？

天体観測は夢に始まり、幻滅か現実の厚い壁にはばまれて終わることが多い。現在の技術ではどうがんばって

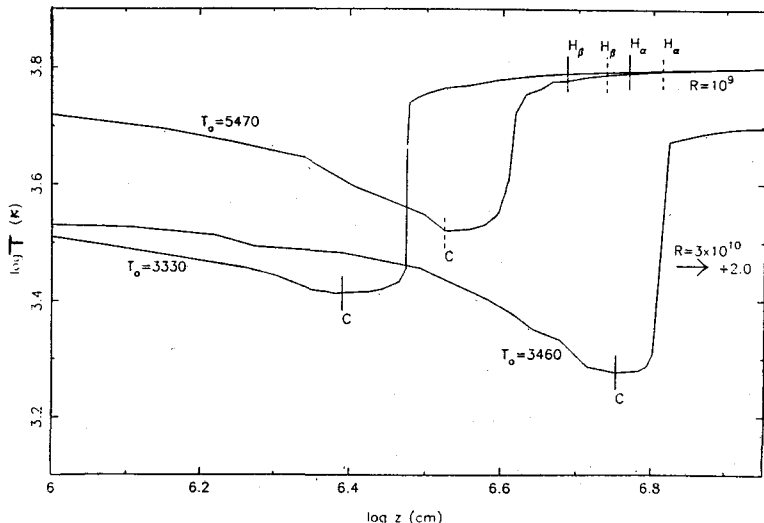


図 8 低温円盤の円盤面に垂直方向の温度分布。横軸は中心面からの高さ（右にいくほど高くなる）。大気で温度の逆転が発生し輝線がつくられる。

も降着円盤は点にしか見えない。それでも人は想像力をたくましくしてその形から物理状況まで、まるで近くで見てきたかのように議論するのである。限られたデータからどこまで多彩な情報が得られるか、いやどこまで想像をたくましくできるか、そこで勝負が決まる。

さて、降着円盤を点としてではなく一定の広がりを持ったものとして見ることはできないだろうか、と本気になって考えた男がいる。現在スペースステレスコープ研究所に所属するホーン (K. Horne) はケンブリッジに滞在中の1984年、連星の食を利用して円盤の動型方向の明るさ分布を求めるといった画期的な方法を確立した (Horne 1984)。

読者の中には月食で月が欠けていくようすをじっと観察したり、写真にとったりされた方がおられるだろう。月は端から順に欠けていき、やがてすべて地球の影におおわれたかと思うと、今度は反対側の端から順に明るくなっていく。実際の月はだいたいどこも同じ明るさであるが、もし月の中心だけが異様に明るかったとしよう。すると、食が始まっても地球の影が月の中心に及ぶまで全体としてあまり暗くならないだろう。逆に月の縁だけが明るかったとすれば、食の開始と同時に月は急激に暗

くなる。こうして、たとえ月が地球からずっと遠くにある点としか見えなくても、月のどの部分が明るいかわかざらばに知ることができる。これが食図法の基本原理である。

作業はまず観測の光度曲線を各成分ごとに分解することから始まる (図9)。矮新星の光度曲線は主に三成分からなっていることがわかる。このうち円盤成分のみを取りだし、できるかぎり輝度分布が軸対称になるという条件のもとに円盤の明るさを位置の関数として求めるのである。

では、こうして得られた情報から何がわかるだろうか。

### 3.2 減光時における進化

ホーンはこの手法をもちいて、アウトバースト時における矮新星カメレオン座Z星の円盤の温度分布を求めた (Horne & Cook 1985)。その結果を図10に縦線で示す。得られた温度分布は、少なくとも円盤の内側では定常円盤の温度分布 (半径の  $-3/4$  乗に比例: 図10の破線) に驚くほど (とある人は言った) よく一致しているが、外にいけば定常モデルの温度より低くなる。このため一部で、アウトバースト時の円盤はほぼ定常状態にあ

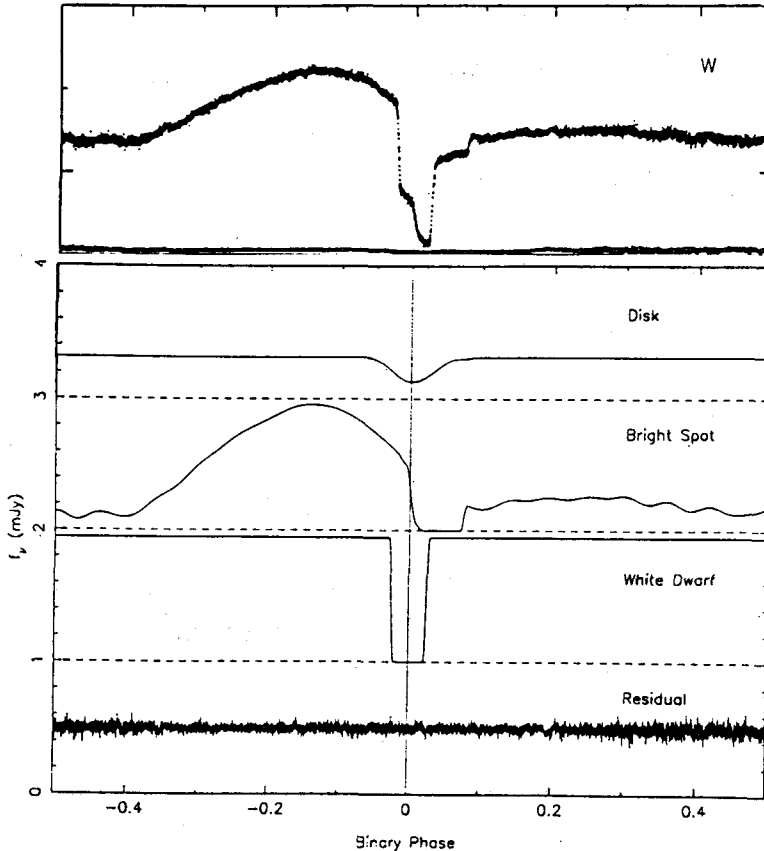


図9 りゅうこつ座OY星の食 (Wood *et al.* 1989)。一番上に観測の光度曲線、その下に各成分ごとの光度曲線 (上から順に降着円盤、ブライツ・スポット、白色矮星、残余)。

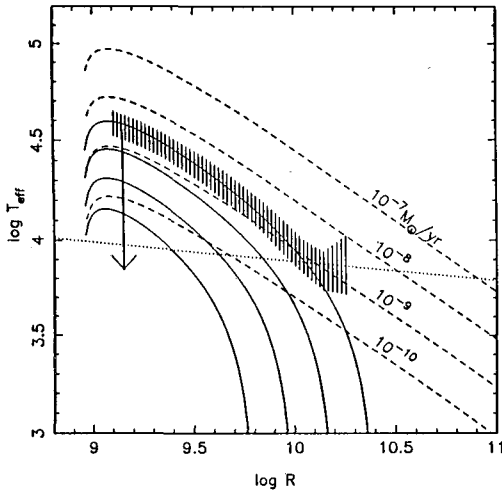


図 10 減光時における円盤の輝度分布 (縦線) と自己相似解によるフィッティング (実線). 破線は定常解の温度分布, 点線は熱的不安定性のおこる温度 (図 3 上 C 点の温度) をそれぞれ表す.

るといふ誤った認識がうまれたが、もしそうだとすると円盤が時間とともに減光している事実をどう説明するのだろうか。

とはいえ、時間変化しつつも温度分布は定常モデルのそれに近いという結果はどう理解すればいいか。

円盤の時間進化を記述する方程式は非線形で、それを解くには一般に計算機による数値積分にたよるしかないのだが、特殊な場合については解析解が見つかっている。その一例が次の節で述べる等温円盤の場合、そして今一つが円盤が自己相似的に進化する場合である。

図 4 で明かなように、矮新星の円盤は減光時において自己相似的に進化する。しかし具体的に解はどういう形をしているのだろうか。既に円盤の全角運動量が保存するタイプの自己相似解は知られていたが、この解では温度が下がるとともに円盤の半径は角運動量を保存するために広がってしまう。一方減光時の円盤の中で高温状態にある部分に注目すると、その半径は逆に収縮していくのである。両者は一見相反する。

どうも答はこういうことらしい。減光時において内側の高温部分は、外側の低温部分へ角運動量を輸送することにより収縮しているのだが、短い時間間隔をとればほぼ全角運動量一定の自己相似解に従って進化しているのである。そのようすを図 10 に実線で示そう。得られた温度分布は観測の値に実によく一致している。円盤は熱的不安定性により暖められたあと、熱、ガス共に自己相似的に拡散して冷えていくのである (Mineshige 1991)。

以上述べたように、観測で得られるような温度分布や

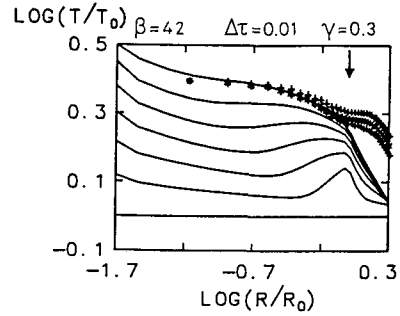


図 11 静穏時における円盤の輝度分布 (\*) と解析解によるフィッティング (実線). 観測値が円盤の外縁近くで盛り上がっているのはブライト・スポットの影響.

減光時間 (数日) を説明するには、何か急激に角運動量を内側の熱い部分から外部へ抜き取る機構が必要になる。言うまでもなく熱的不安定性の発生はその役目を果たしてくれるが、円盤内部にそのような機構を認めない質量輸送不安定性モデルは苦しい対応を迫られることになる。

### 3.3 静穏時における進化

では静穏時の温度分布はどうだろうか。

ウッドは食図法を用いて二つの代表的な矮新星、りゅうこつ座 OY 星とカメレオン座 Z 星の静穏時における温度分布を求めた (Wood *et al.* 1986, 1989)。 (注: こうして求めた温度は円盤の明るさより求めたもので、円盤の光学的厚みが小さいため、必ずしも円盤表面の実際の温度分布に等しくはない。) 得られた温度分布は驚くほどフラットであった (図 11 の記号 \* で囲まれた部分)。なぜだろうか。

まず明らかなように、このような温度分布は定常モデルではどうがんばっても説明できない。つまり、静穏時に円盤は定常状態であると予言する質量輸送不安定性モデルは苦しい立場に追い込まれることになる。一方、円盤不安定性モデルによると、静穏時の円盤の温度は半径によらずどこでも一定の値、つまり水素が電離を始める温度の少し下の値 (図 3 の A 点と B 点との間の温度) を示すはずである。まさに図 11 で示された通りである。こうしてここでも円盤不安定性モデルの優位が確かめられたのである。

ほぼ等温な円盤の時間進化は解析的に解くことができる (Mineshige & Wood 1989)。円盤不安定性モデルに基づくフィッティングの例を図 11 に実線で示しておく。これと観測の光度曲線から、粘性係数の絶対値やその半径依存性を求めることができる。求めた値は 0.02 前後、そして半径の 0.6 から 0.8 乗に比例して外側ほど大きくなるのがわかった。