

# ブラックホールとカオスとエディントン限界

嶺 重 慎

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: shm@kusastro.kyoto-u.ac.jp



ブラックホールは、その中へのガス降着流により明るく光り、X線等で観測される。そのガス降着流の構造やスペクトル特性は、1970年代に確立した標準円盤モデルでほぼ記述されるが、その標準円盤モデルにはほころびもある。硬X線からガンマ線に至る高エネルギー放射、激しい時間変動、そして放射とガスの相互作用などは、標準円盤モデルでは説明できないのである。これら、標準円盤モデルを超える円盤モデルの構築についてその現状を、筆者の研究も交えて概観する。

## 1. はじめに

原稿としては極めて異例ですが、まず最初に、筆者がこれまでお世話になった方々に御礼申し上げます。尾崎洋二先生、Friedrich & Emmi Meyer 両氏（マックス・プランク天体物理学研究所）、J. Craig Wheeler 教授（テキサス大学オースティン校）、Martin Rees, Andy Fabian 両教授（ケンブリッジ大学）、加藤正二先生、柴田一成氏、福江純氏、西森 拓氏（現 広島大）、かつておよび現在の学生・研究員の皆さん。これらの方々のご指導あるいはご協力なしには、私がこれまでの研究を推進することは、事実上、不可能でありました。

さてこれらお世話になった方々のリストの中に、もう一人、故 小田 稔先生の名前を挙げさせていただきます。こう書くと、怪訝に思われるかたもおられるでしょう。事実、私は、小田先生のような観測家ではありませんし、同じ研究室に在籍したこともありません。にもかかわらず、あえて小田先生の名前を挙げさせていただくのか。それは、小田先生は、私の研究の転換面、その要所要所において、重要な示唆をいただいたからです。表題に挙げたブラックホールとカオスとエディントン限界、これらは、ここしばらく私がか

まざまにかかわっている三つのキーワードであります。すべて小田先生からいただいたようなものです。その経緯は、この原稿の中でおいおい話していきましょう。

## 2. 標準円盤モデルの成功とそのほころび

### 2.1 標準円盤とは

私の、今回受賞の対象となった仕事は、一言でいうと「標準円盤モデルを超えるモデルの構築への貢献」であります<sup>1)</sup>。ブラックホール降着流の理論研究は、事実上、1970年代初頭に確立した標準降着円盤モデルに始まりました。そこでまず、標準円盤モデルの概要を解説しておきましょう。

標準円盤モデルで表される円盤とは、簡単にいうと、効率良く重力エネルギーを放射エネルギーに変換する「もの」（装置あるいは道具）です。ブラックホールは底なしのポテンシャルの井戸をもっているのです。そこに落ち込むガスは、莫大な重力エネルギーを解放します。その解放されたエネルギーを、最低数%の効率で放射エネルギーに代えてしまうのが標準円盤です。（ブラックホールが最大限回転している場合には、最大で40%もの効率を上げることができます。）この高い効

率を理解する鍵は「粘性」にあります。要するに摩擦です。一般に、ものともとの間に摩擦が働くと、摩擦力が発生し、運動量が輸送され、摩擦熱が発生します。同様に、回転円盤中で摩擦が働くと、トルクが発生し、角運動量が外向きに輸送され、ガスは内向きに降着して、同時に摩擦熱で高温になります。高温になったガスはX線などで、明るく光るということです。

このプロセスを式に表すと、じっさい、解放された重力エネルギーが効率良く放射エネルギーに転化することや、円盤の表面温度は、半径の $-3/4$ 乗に比例して、中ほど高くなることなどが示されます。重要なことに、この式は摩擦の項を中に含みません。摩擦は一種の触媒であり、摩擦の値によらず、効率良く重力エネルギーが放射エネルギーに転化されるのが標準円盤の大きな特徴です。こうしてあいまいな要素なく標準円盤の特性が定まり、それはまた観測で検証されてきました。(別の言い方をすると、理論的にはあまり面白くないということになります。)

## 2.2 標準円盤モデルは低光度で破綻する

こうして、非常な成功を収めた標準円盤モデルですが、すでに発表された当初から、すべての降着現象を記述することはできないことがわかっていました。ここでは、標準円盤モデルがほころびを示した例をいくつか挙げます。

まず標準円盤モデルは、高エネルギー放射(硬X線以上)を説明できません。すなわち、ブラックホール連星(主系列星や準巨星と恒星質量ブラックホールの近接連星系)が示す、硬X線で強く放射する状態(ロー・ハード状態)を説明できないのです。(なお、黒体放射成分が卓越する状態をハイ・ソフト状態といい、これは、標準円盤モデルでみごとに説明されます。)

この問題は、その後、ADAF(移流優勢降着流)あるいはRIAF(放射非効率降着流)という考え方に発展していきます。(これらの流れは、必ずしも回転運動が優勢ではないので「降着円盤」では

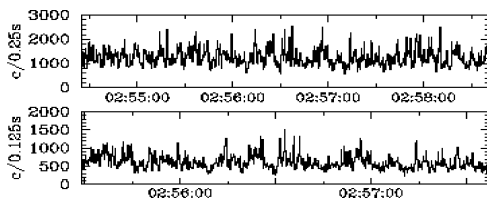


図1 はくちょう座 X-1 の示す、激しい X 線光度変化(ぎんが衛星データ、根来氏の厚意による)。

なく「降着流」と呼ばれますが、現在、二つの表現に厳密な区別はありません。)これらのモデルの特徴を一言でいうと、解放された重力エネルギーの一部しか放射エネルギーにいかず、大部分は、運動エネルギーや内部エネルギーとして、降着ガスの中に含まれたまま、ブラックホールに吸い込まれてしまうという流れです。放射冷却があまり効かないため、ガス流は高温になり、熱制動放射やコンプトン散乱で高エネルギー放射をします。

さらに、もう一点重要なことは、標準円盤モデルは激しい光度変化を説明できないということです。ブラックホール天体は、ブラックホール連星に限らず、活動銀河核中の大質量ブラックホールも、激しい光度変化を示すことが知られています(図1)。これを、一般に「時間変動」といいますが、ある(一般向け)講演会で「時間変動」を「時間が変動する」とんでもない誤解をした人がいたので、ここでは「放射ゆらぎ」ということにします。要するに、標準円盤はあまりにも安定な円盤であるため、観測が示すような激しい放射ゆらぎを産み出すことができないのです。

これらが、標準円盤モデルの直面した決定的な謎でありました。

さて、この原稿では、後者の放射ゆらぎに話を限ります。果たして、放射ゆらぎの起源は何か、RIAFモデルとどのように関連するのか、なぜ、標準円盤は激しいゆらぎを示さないのか、これらが謎として数十年、横たわっていました。

### 2.3 標準円盤モデルは高光度で破綻する

一方で、標準円盤モデルは、エディントン光度近くの高光度でも破綻することが、これも標準円盤が提唱された当時から指摘されていました。エディントン光度ほどの大光度となると、放射圧が強まるので、円盤が幾何学的に膨らみます。また、放射圧に押されてガスが系から飛び出します。さらに、光子捕捉現象というものも起こります（詳細は後ほど）。これらの効果が標準円盤モデルに入っていないのです。この問題は、換言すれば、標準円盤モデルは放射とガスの相互作用をきちんと考慮していないということになります。

これらの指摘を受け、標準円盤よりややファットな円盤、スリム円盤モデルが提唱されました。（変なネーミングですが、標準円盤に代表される薄い円盤＝thin disk と、幾何学的に厚い＝thick disk の中間で、slim disk といいます。スリムは本当に thin と thick の中間なのかと気になる人があられるでしょうが、あの人は“slim”，あの人は“thin”，あの人は“thick”，これらの表現を見比べてみると、何となく納得できます。これは、たとえではなく、事実のようです。）

しかしながら、スリム円盤モデルでは放射圧によるガス放出の効果が入っていません。また多次元効果の取り扱いが不十分なことは、筆者に限らず多くの人が気づいていました。二次元、三次元効果を考慮した場合、果たしてスリム円盤モデルは正しいのか？これが謎として十数年にわたって、残されていたのです。

## 3. 放射ゆらぎのモデル

まずは、放射ゆらぎのモデル作りの話をしましょう。

### 3.1 放射ゆらぎはカオスか？

図1に示しましたように、放射ゆらぎにはいくつかの特徴があります。すぐにわかることは周期的ではないと言うことです。といっても、完全にランダム（ホワイトノイズ）でもありません。光

度曲線をよく見ると、それは、フレアというか、大きささまざまなショットからなっていることがわかります。しかも、そのフレアの間隔は不均一で、また、大きさもさまざまです。じつは細かい統計をとってみると、フレアの強度も、その間隔も、べき分布をしていることをわれわれは見いだしました。これは、太陽フレアにみる特徴と基本的に同じです。このような光度変化を解析するのに、周期解析などに威力を示すパワースペクトルによる解析には限界があります。何か、新しい見方・考え方、解析の仕方が必要とされていました。

小田先生のおことば (1) (1985年ごろの宇宙圏シンポジウムで)

「みんな、新しい考えかたに注目してみよう。例えば、カオスとか…」

確かに、カオスという考え方は魅力でした。実際、小田先生の発言から前後して、カオスの手法を用いた解析が数多くなされました。そして、カオス次元は4-5次元(?)といった結論を出したグループもありました。しかし、それでいったい、何がわかったのこののだ？あまり自明ではありませんでした。ということもあり、その後、あまり進展がありませんでした。もう少し違ったアプローチが必要でした。

この問題は、私の中でずっと眠っていました。それが目をさましたのは、1990年ごろ、茨城大学に在職していたときのことです。同僚の西森 拓氏（専門は非線形科学）の学生が、論文紹介をするというので付き合ったのが、そのきっかけです。そのときの論文が、パークらによる自己組織化臨界 (Self-organized criticality) という論文でした<sup>2)</sup>。これは、一言でいうと、フラクタル (空間的自己相似) と  $1/f$  ゆらぎ (時間的自己相似)、そしてべき分布を結びつけた画期的な論文で、一つのモデル (砂山モデル) でそれらをすべて再現するというものです。そして、これらはいずれも「カ

表 1 カオスとカオスの縁 ある力学系で、パラメーター（秩序パラメーター）を変えていくと、その振舞いが、単純周期振動からカオスまで変化する。

変動	単一周周期振動	多重周期振動	カオスの縁	カオス
特徴	sin, cos 的	sin, cos 組合せ	べき型	指数関数的

オスの縁」(edge of chaos) に特徴的な現象であることを、西森氏から学びました(表 1)。これはいける！二人でモデル作りが始まりました。

### 3.2 砂山モデルとあり地獄モデル

まず、砂山モデルについて簡単に説明しておきましょう<sup>3)</sup>。

平らな机の上に、砂粒を一つずつ、ランダムな位置に落としていきます。やがて、砂粒が、前に落ちた砂粒の上ののって、砂山を作ります。さらに、砂粒を落とします。さて、何が起こるか。砂山の勾配がある閾値を超えると、上の砂粒は不安定になり、すべり落ちていきます。なだれが発生するのです。そのなだれは、さらに下方の砂粒をも巻き込んで、大規模ななだれに発展することもありますし、小さな規模でとまってしまうこともあります。こうして、大小さまざまな規模のなだれが、非周期的に発生します。なだれの規模はべき分布、なだれの空間パターンはフラクタル、生み出された時系列は  $1/f$  ゆらぎとなるというのが砂山モデルの本質です。興味深いことに、砂山は、いつも、どこも勾配が閾値の少し下にあるという準定常状態にあります。たまに、どこかで、閾値を超えると、大規模ななだれに発展する可能性をいつも秘めているといえます。

このモデルを、ブラックホール降着円盤に応用したのが(当時、あり地獄モデルと称していた)われわれのモデルでした。こんな簡単なモデルですが、みごとに  $1/f$  ゆらぎやフレア(なだれ)のべき分布など、観測の諸特徴を再現することができました。

ところで、いろいろな場所でセミナーをして聞いたところ、欧米はもちろん、お隣の韓国でも、あり地獄の存在を知らない人がほとんどであった

ため、現在では日本人向けの講演にしかこの用語を用いていません。脱線ついでにもう一言エピソードを。あり地獄を、英語では ant-lion といいます。このモデルを最初にパブリに投稿したとき、著名な X 線観測家と思われる日本人レフェリーは、「ありとライオンのイソップ物語はよく知らないが、どのような話ですか」というレフェリーコメントを寄せられました。いいえ、イソップ物語ではありませんとお答えし、論文には「あり地獄とは、うすばかげろうの幼生が作るわなのことである」という説明書きを(辞書をひいて)載せました。こんな英単語、もう一生お目にかかることはないだろうなと思いつつながら。

### 3.3 連結「鹿脅し」モデル

さて、このあり地獄モデル、別の見方をすると、「鹿脅し(ししおどし)」を二次元的に配列したものとともいえます(図 2)。鹿脅しの特徴は、インプット(水の流入)は時間的に一定にもかかわらず、アウトプット(たまった水の放出)は間欠的になるケースの好例といえます。(このような系の振舞いを、リミットサイクルということもあります。)さて、一つの鹿脅しなら、こうして周期的なエネルギー解放にしかなりません。一次元配列でも同様です。(ドミノ倒しが、まさにこの一次元配列に相当します。天文学でいうと、矮新星や X 線新星の示す準周期的な増光現象、アウトバーストのモデルです。)二次元(以上)に拡張して初めて、あり地獄モデル(あるいは砂山モデル)と同じ状況が実現します。これを複数組み合わせ、さらに、ちょろちょろ漏れ出す効果を付け加えることにより、より正確に観測を再現することができます。

鹿脅しといえばお寺にあるものですが、例えば

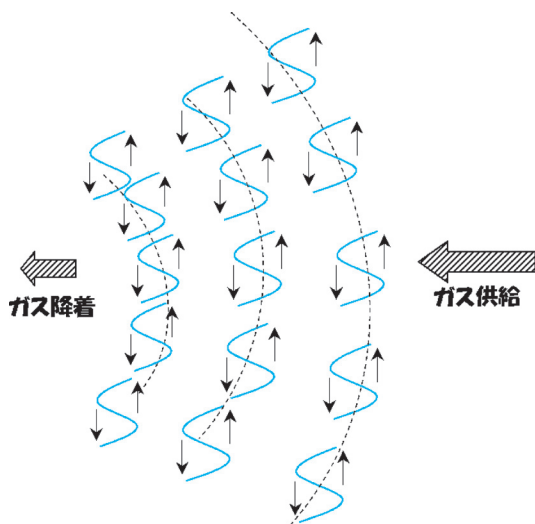


図2 連結鹿脅しモデル：リミットサイクル振動子を二、三次元的に並べると  $1/f$  ゆらぎが生成.

京都の詩仙堂にあるものが有名です。これは最適の京都案内だ、ということで、セミナーでは（あり地獄ではなく）こちらのたとえをよく使っています。そういえば、先日、とあるポーランドの研究者が、「ブラックホール変動の起源をビデオにとった、ぜひ見てくれ」とムービーファイルを送ってくれました。どんなすごいムービーかと思って再現してみると、何と、鹿脅しの一サイクルをビデオカメラに収めたものでした。

なお、その後になって、磁気流体シミュレーションにもそのエッセンスが現れていることが判明しました<sup>4)</sup>。どうやら、こうした変動は磁気プラズマに普遍的に見られるもののようです。ということで、磁場の振舞と砂山モデルを結びつけるのが、現在の研究課題です。

さて、ずっと時間がたった1994年ごろ、思いもかけず、小田先生の前でこのモデルの話をしていただく機会がありました。

小田先生のおことば(2) (1994年ごろ, 高等研究所で)

「私も鹿脅しを組み合わせたモデルをたくさん考えたんだが、うまくいかなかった…」

ちょっとうれしくなりました。

#### 4. 超臨界降着流モデル

次に、最近、筆者がいちばん力を入れている超臨界降着流に、話題を移します。

##### 4.1 エディントン限界とは

「超臨界降着流」とは、臨界量、すなわち、エディントン光度を与えるガス降着率を超えるガス流をいいます。この研究も、元をたどれば、やはり宇宙圏シンポジウムで聞いた小田先生のおことばが一つのきっかけとなっています。

小田先生のおことば(3) (1990年ごろの宇宙圏シンポジウムで)

「皆さん、もっとガスと輻射の相互作用に注意を払いましょう！」

じつは正直なところ、どういう文脈で小田先生がこの話をされたのか、よく覚えていません。ガスと放射の相互作用といっても多岐にわたるからです。おそらく、中性子星のX線バーストに関連して、エディントン光度近くで光るバースト源の観測では、ガスと放射の相互作用をよく考えないと観測データの解釈を誤るといったご指摘でなかったかと思います。しかし、このことは、ずっ

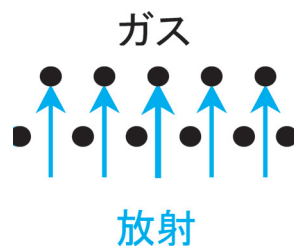


図3 物質と放射の相互作用の模式図。小田先生はシンポジウムで、確か、このような図を黒板に描かれた。



と私の中でひっかかっており、今ごろになって、この小田先生の宿題を少しずつ考えているといった次第です。

さて、簡単にエディントン（限界）光度の復習をしておきましょう。球対称降着流の光度はエディントン光度を超えられないことはよく知られています。降着する物質の量が増えるにつれ、ガスが出す放射が及ぼす力（放射圧）が高まり、やがて重力（引力）を凌駕するとガスはそれ以上落ちることができなくなるという限界で、そのときの放射光度がエディントン光度となります。

ところがエディントン限界は、ガスが球対称に降着する場合、という強い条件があります。この条件をはずすと、すなわち、円盤降着のように、ガス流は円盤面に沿って、放射は円盤面に垂直方向へと、すみわけすることが起これば（すなわち、ガスの流れと放射の流れが交通整理されると）、超臨界降着および超エディントン光度が可能になります（図4）。しかし、これは定性的な予想、あるいは期待に過ぎません。本当に超臨界降着は実現可能なのか、というのが永年の課題です。もし可能なら、ブラックホールは宇宙初期においてどんどん大きくなれるというので、ブラックホールの宇宙論的進化にもかかわる基本問題でもあります。そしてその証明には、数値シミュレーションが不可欠となります。なお、シミュレーション研究の最前線については、共同研究者の大須賀氏による優れた解説<sup>5)</sup>がありますのでここでは省略し、観測との比較研究について解説します。

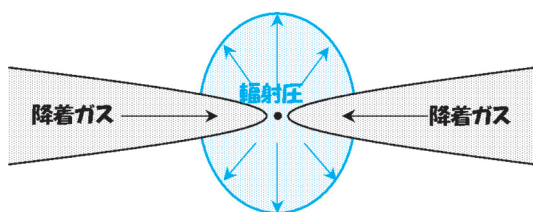


図4 超臨界降着流の概念図。円盤降着では、ガスの降着方向と放射が抜けていく方向が互いに異なるため、超臨界降着が可能となる。

超臨界降着流は一般に光学的に厚いので、その放射特性は、一見、標準円盤のそれに類似します。しかし、温度分布に違いが見られます。すなわち、超臨界降着流では、一部の光子が、多量のガスにはばまれて外に出ていけないままブラックホールに飲み込まれる（いわゆる光子捕捉）現象が起こるので、放射する割合が、ブラックホールに近づくにつれ減少します。より具体的には、降着流の表面温度分布が、標準円盤モデルではブラックホールからの距離の  $-3/4$  乗に、超臨界降着流では  $-1/2$  乗に比例します<sup>6)</sup>。さらに、超臨界降着では、強い放射圧により、降着ガスの一部がとばされる効果も効きます。これも、全く同じ温度分布を生み出します。スペクトルは、各半径からの黒体放射の重ね合わせで現されるので、この表面温度の勾配の変化はスペクトルに現れます。その変化を観測データに見いだすことができれば、それが観測的検証になります。

1994年のことですが、当時阪大におられた北本氏らと、表面温度勾配（正確にはそのべき指数）をパラメータにしたスペクトルフィッティングモデルを考えたとがあります<sup>7)</sup>。これは、もともと、ハイ・ソフト状態の円盤が標準円盤モデルで説明できるのか、証明するのが目的であり、じっさい、温度分布は標準円盤の予言（ $-3/4$  乗）にみごとに一致しました。それと全く同じ手法を用いれば、熱的成分が卓越したスペクトル状態において、標準円盤と超臨界降着流とが区別できるというのが着想でありました。

データとしては、星形成活動を活発に行っている近傍銀河の中心核から離れたところに多数見つかった点源のブラックホール、超高光度 X 線源 (ULX) を用いました。これは、その X 線光度が、明るいもので  $10^{40} \text{ erg s}^{-1}$  以上と、太陽質量のエディントン光度を大きく超えることから、中間質量ブラックホール（質量は太陽質量の数百倍以上）への亜臨界降着か、恒星質量ブラックホール（質量はせいぜい太陽質量の 20 倍程度まで）への

超臨界降着かと論争が継続しているものです。その中でも、熱的スペクトル成分が卓越するデータを、温度勾配をフィッティングパラメーターとしたモデルでフィットしてみましたところ、温度勾配は  $-0.5$  乗、光度はエディントン光度の数倍であるとの結果を得ました。これは、少なくとも一部の超高光度 X 線源は、中間質量ブラックホールではない、超臨界降着がそこで起こっていることを意味します<sup>8)</sup>。

今は、それを受けて、さらにいろいろなスペクトル状態の ULX や、系内の明るいブラックホール連星のデータ解析を行っています。どうやら、上記の単純なケースだけでなく、もっと複雑なことが起こっているらしい兆候を得ています。今後、まだまだすることはたくさんあります。

## 5. まとめに代えて：天の声

さて、これまで、私の仕事を中心に、標準円盤モデルを超えるモデルの構築の現状についてお話してきました。もっともこれは、私なりの、バイアスのかかったお話として受け取っていただくのがよろしいかと思えます。他の人は他の見方をされているでしょう。いずれにせよ、私の研究の核となる一番大事なところで、小田先生の卓見が息づいていることがおわかりいただけたと思います。そういう意味で、直接指導を受けたことはありませんでしたが、私はとても幸運だったと思います。

さて、原稿を終えるにあたり、やはり、小田先生のおことばを引用したいと思えます。これは、1985 年の宇宙圏シンポジウムの最後に小田先生

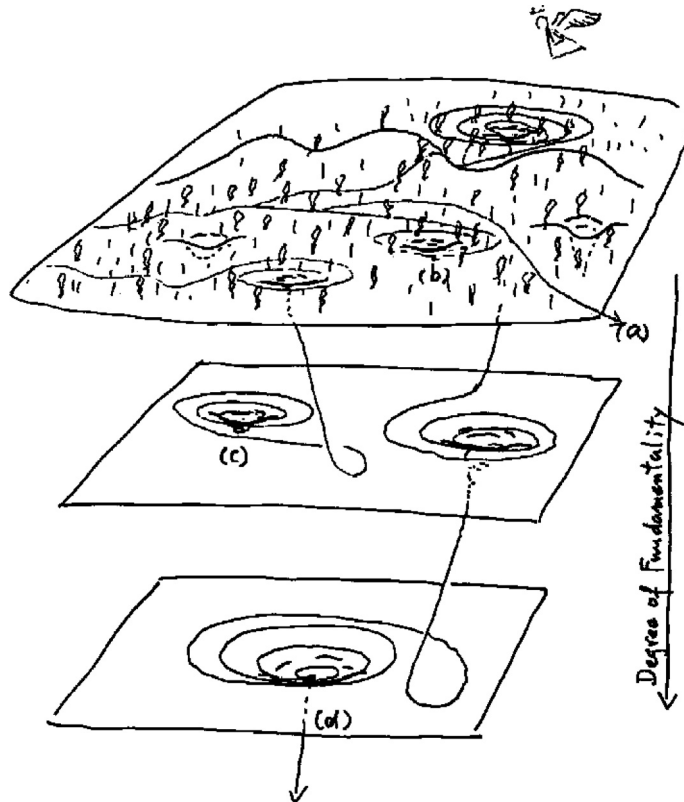


図5 小田先生直筆による「天の声」。

がなされた講演です<sup>9)</sup>。これらのことばを、拙稿を読んでくれた（特に若い）方々に送ります。

小田先生のおことば (4) (1985 年の宇宙圏シンポジウム集録から、図 5 も参照のこと。)

「天の声を聞かせろと言うことである。… 実は私は今回のシンポジウムにほとんど全く出席できなかったが、もともとの計画では皆さんのお話を私が永年密かに描いている図の中に位置づけてみようかと考えていた。

私は物理をするのは一步先も見えないような密林の中で深い穴を探しているようなものと思っている。結局穴が見つからずに穴の傍を素通りしてしまうこともある (a)。窪地が見つかってそこに穴があると思いきやいつまでもその回りを際限なく回っていて抜けられなくなることもある (b)。うまく穴が見つかる物理学の次元の深いレベルに入っていくが、そこでまた trivialism のわなに落ちてしまうことも (c)、さらに物理学の基礎に深く入っていくこともあるだろう (d)。さて、皆さん自分の今の仕事をこの画にはめて見てください。」(1985.3.20)

### 参考文献

- 1) 降着円盤モデル全般については Kato, Fukue, Mineshige, 2008, “Black Hole Accretion Disks—Towards a New Paradigm” (京大学術出版会) を参照のこと。これは理論の立場から詳細にモデルを解説した現在唯一の文献。やや平易な日本語解説は、小山勝二・嶺重慎 (編著) 「ブラックホールと高エネルギー現象」(日本評論社, 2008 年)。一般向けには、嶺重 慎 「ブラックホールを見る！」(岩波科学ライブラリー, 2008 年)
- 2) Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1988, Phys. Rev. A 38, 364
- 3) 原著論文は, Mineshige S., Ouchi N. B., Nishimori H., 1994a, PASJ 46, 97 およびその改訂版。Mineshige S., Takeuchi M., Nishimori H., 1994c, ApJ 435, L125。一般向け解説は、嶺重 慎 「ブラックホール天文学入門」(裳華房, 2005 年)。
- 4) Kawaguchi T., Mineshige S., Machida M., Matsumoto R., Shibata K., 2000, PASJ 52, L1
- 5) 大須賀 健, 2009, 天文月報 102, 318
- 6) 例えば, Watarai K., Fukue J., Takeuchi M., Mineshige S., 2000, PASJ 52, 133
- 7) Mineshige, S., Hirano A., Kitamoto S., Yamada T. T., Fukue J., 1994b, ApJ 426, 308
- 8) 例えば, Vierdayanti K., Mineshige S., Ebisawa K., Kawaguchi T., 2006, PASJ 58, 915
- 9) 宇宙圏シンポジウム集録 (宇宙科学研究所, 1985 年), p. 101 より抜粋

### Black Holes, Chaos, and Eddington Limit

Shin MINESHIGE

Graduate School of Sciences, Kyoto University,  
Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-  
8502, Japan

Abstract : Black holes can shine by accreting gas and, hence, we can observe them by X-rays etc. The structural and spectral properties of gas accretion flow are well described by the standard disk model which was established in the 1970's, but its limitations have become clear. For example, high-energy emission (from hard X-rays to gamma rays), short-term variability, and the interaction between radiation and matter cannot be described by the standard disk model. We overview the current status of construction of disk models beyond the standard disk model with special attention to our own work.