

降着円盤の進化と放射輸送

松田 卓也*・高原文郎**

大量のX線を放出する白鳥座X1天体。ここにはブラックホールが存在すると考えられている。白鳥座X1のすぐとなりには明るく輝く青色巨星があり、ここから流れ出したガスは回転しながらブラックホールへ落ち込み降着円盤と呼ばれるガス円盤を作っていると考えられている。このような円盤はスケールは違うものの活動的銀河中心核にも存在が予想されており、X線星や銀河中心核を理解する上で極めて重要なものになっている。最近、大規模な数値シミュレーションによって降着円盤の形成やそこの放射輸送過程が詳しく調べられている。

I. 降着円盤の流体力学的進化

1. イントロダクション

降着円盤またはアクリション円盤とは、星やブラックホールの重力にひかれたガスが円盤状になって回っているものである。X線星、クエーサー、原始星などに存在する。降着円盤の中を回転しているガスは、なんらかの機構で角運動量を失いだんだんと中心に向かって落下していく。そのときに解放されるエネルギーがX線星やクエーサーのエネルギー源を説明すると考えられている。

2. シミュレーション

ブラックホールはそれが単体で宇宙空間に存在していたとしたら、発見するのが難しい。それ自体では光もなにもださないからである。しかしもしブラックホールが普通の星との連星系、それもお互いの距離が近い、近接連星系をなしているとすれば発見できる可能性が高い。というのはブラックホールがもう一方の星のガスを重力で引きつけ、飲み込む。そのときにガスの重力エネルギーが解放されて、ガスが高温になりX線などを放出するからである。そんな連星系の有名な例が白鳥座のシグナスX1である。

シグナスX1では、もう一方の星は明るく輝く青色巨星である。巨星の表面のガスは、ブラックホールの重力に引きつけられて、ラグランジュ点とよばれる、2つの星の重力の勢力圏の境界を通り、ブラックホールの方に流れ出す。しかし連星系の回転のため、ガスはブラックホールに直接に落下することはできず、そのまわりをぐるぐる回る。こんなガスの円盤が降着円盤である。

降着円盤のなかにあるガスは、ブラックホールの回りをまわっているのだから、角運動量を持っている。この角運

動量がなんらかの機構で失われると、ガスはだんだんとブラックホールに引き寄せられる。そのとき重力エネルギーが解放されて、ガスは高温になりX線などの電磁波を放出する。これが人工衛星を用いて観測されるのである。つまりブラックホール自身が輝くのではなく、まわりのガスが輝くのである。

ところでガスがなぜ角運動量を失うのかというのは難しい問題であり、さまざまな説がある。私たちは、そこで富士通のスーパーコンピューター VP 400Eを用いて、いま述べたようなガスの流れのコンピューター・シミュレーションを行った。スーパーコンピューターを用いても、これはたいへんな計算で、完全に現実的なモデルを作ることは難しい。私たちは流れが薄い円盤のなかに閉じ込められていると仮定し、2次元計算を行った。X線などの電磁波の放出は、もちろん重要であるが、それを直接扱うのは難しいので、ここでは簡単なモデルを採用した(ガスの比熱比を1.2とする)。

始めには降着円盤は存在しないと仮定し、時刻0からガスが巨星から流れ出して、降着円盤ができるまでの過程を計算した。その結果は富士通のCGMSシステムを用いてビデオのアニメーションにした。ビデオにすると、流れの動的な様子が非常によく分かる。表紙の写真はそのスナップショットである。色は密度の大きさを表し、白いほど密度の高い部分である。降着円盤の上に2本腕の渦状の模様が観察される。これは衝撃波である。実際の降着円盤にこのような渦状衝撃波が存在するかどうかは、知られていない。もし存在が確認されたとしたら、それは望遠鏡ではなく、コンピューターで発見されたということになるであろう。

このビデオは、その他多くの宇宙物理学の数値シミュレーションとともに、いずれNHKで放映される予定である。

(松田卓也)

* 京大工 Takuya Matsuda, ** 都立大理 Fumio Takahara: The Hydrodynamical Evolution and Radiative Transfer in Accretion Disks

II. 降着円盤の放射流体力学

X線星や活動銀河のモデルとして、中性子星やブラックホールの周りの降着円盤については既に多くの研究がなされている。しかし最もエネルギー解放の大きい中心星近くの降着円盤の状態が光学的に厚いものであるか、薄いものであるかといった問題さえ決着がつかないのを始め、多くの問題が残されている。特に光度がエディントン光度の数%をこえると放射とプラズマとの力学的な結合が顕著になり、いわゆる放射流体力学の問題を解く必要がでてくる。放射流体力学のコンピューター・シミュレーションは降着円盤だけではなく宇宙物理の多くの問題ででてくるが、問題の困難さもあってまだ多くの実績があるわけではない。それだけに計算機の発展とともにこれからの発展が期待される分野であるといえよう。

以下では「光学的に薄い」降着円盤を例にとって説明する。この円盤では電子温度が約 10^9 K、イオン温度が約 10^{11} K の 2 温度プラズマになっており、光子の散乱に対する光学的厚さは 1 程度の状態をとっていると考えられる。「光学的に薄い」ということは吸収に対する光学的厚さが薄いということであって、散乱に対しては放射輸送を解く必要がある。散乱に対する光学的厚さが 1 よりもずっと大きければ拡散近似を使えばよいし、逆に 1 よりもずっと小さければ放射がプラズマに及ぼす影響は無視できる。この厚さが 1 程度であることが放射輸送の正確な取扱いを要求することになる。さらに問題を難しくするのは電子温度がかなり高いことである。このとき、コンプトン散乱による光子のエネルギー変化や散乱断面積のエネルギー依存性を考慮しなければならない。また光子光子衝突による電子陽電子対発生がおこるので、この効果も取り入れなければならない。

このように問題が複雑なのでまだ放射とプラズマとの間の運動量輸送を取り入れて放射流体力学の問題を解くまでには至っていない。とりあえず、プラズマの運動は考えず、一様密度の孤立したプラズマ中の放射輸送を解くという試みがなされはじめているという段階である。幾何学的形状を平面あるいは球対称の 1 次元としても光子分布は等方ではないので、方向分布を考えねばならない。さらにエネルギースペクトルがあるので 3 次元問題になる。光子のエネルギースペクトルが求められると電子陽電子対発生率が計算され、消滅率とあわせて対密度の時間発展を追うことになる。電子温度の変化はイオンからのクーロン加熱と放射との相互作用によって決まる。電子温度や対密度はまた放射輸送を支配するので、これらを self-consistent に解くことが問題となる。

コンプトン散乱では散乱角とエネルギー変化の間に関

係があるので空間的な輸送とエネルギースペクトルの変化とは独立ではない。これを近似なしに差分法で解くことも不可能ではないだろうが、最も単純にはモンテカルロ法でコンプトン散乱を取り扱えばよい。そこでコンプトン散乱はモンテカルロ法を使い、他の過程は explicit な差分法で解くというやりかたで解いてみた。その結果を図 1 から図 3 に示す。これは初期のイオン温度が $0.03 \times m_e c^2$ 、トムソン散乱にたいする光学的厚さが 2 の平面層に対するもので、空間を 30、方向を 10、エネルギーを対数で 30 のメッシュに切り、代表光子を 5 万個とって計算したものである。z は対密度と陽子密度の比、 T_* は $m_e c^2/k$ で規格化した電子温度である。図 1 の中の数字は空間メッシュ番号である。時間とともにイオンから電子に、さらに電子から光子へとエネルギーが輸送されるとともに、電子陽電子対発生が生じていることがわかる。この計算ではイオンを引続き加熱していないので、やがて温度は下降し、対密度も減少していく。図 2 は散乱に対する光学的厚さが最大になったときの空間構造を示す。中心部ほど低温だが、対密度は大きいことがわかる。図 3 は表面から放射される光子のスペクトルを示す。コンプトン散乱によってウィーンピークができていくことがわかる。GS は以前に Guilbert たちが別の方法で求めたスペクトルである。

この計算例は VP200 で 5 時間程度のものであるが、モンテカルロ法はベクトル化の効率をあげるのが容易ではなく、この場合 50% 程度にとどまっている。この計算法の問題点としては電子温度が下がってくると、電子の熱的なタイムスケールが放射輸送のタイムスケールに比べ短くなり、タイムステップを短くとらなければならないことである。すると必要な空間メッシュの数が増加し、実際的には計算不能になってくる。これ以上の計算を行なうためには、なんらかの形で implicit なスキ

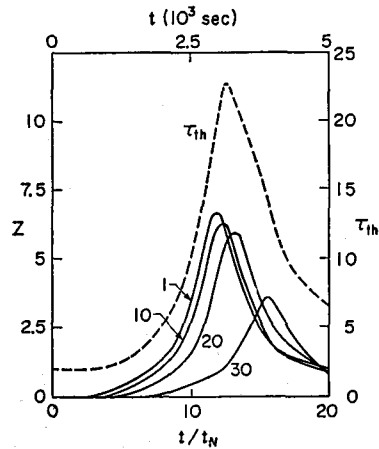


図 1

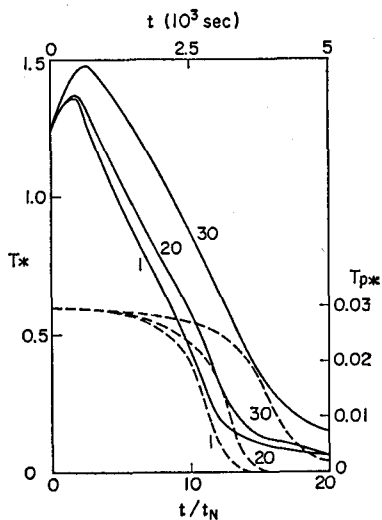


図 2

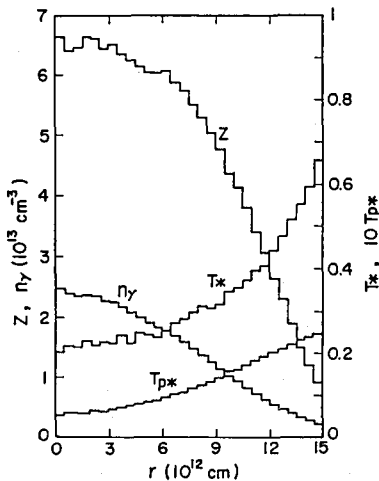


図 3

ームを導入する必要がある。あるいは光子分布の非等方向性を正確に追うことを犠牲にして flux limited diffusion の近似を採用することも考えられよう。

この計算では力学はまだ取り入れられてはいないが、電子陽電子対の効果を取り入れた定常降着円盤の解を求めると、エディントン光度の数%以上に対応する降着率に対しては解が存在しなくなることが知られている。このことは対密度が陽子数密度の 10% 程度以上になると、放射あるいは電子陽電子対の力学的影響が顕著になることを示唆している。上の計算例では対密度は陽子数密度の数倍にもなっているのだから、あきらかに力学的影響を考慮しなければならない領域にある。電波銀河や SS433 にみられるジェットの形成機構とも関連して、今後の研究

の進展が注目されよう。そのためにも放射流体力学の計算コードの開発が急務になっている段階である。

(高原文郎)

☆ ☆

学会だより

日本天文学会評議員の候補者名簿

1990年(平成2年)通常総会に推薦される評議員(任期:1990年~1994年)の候補者には次の方々が選ばれました。

磯部 秀三	内田 豊	岡村 定矩
奥田 治之	海部 宣男	小平 桂一
高原文郎	土佐 誠	野田 学
野本 憲一	長谷川 一郎	福井 康雄
堀 源一郎	舞原 俊憲	吉田 道利

なお、有権者は789名で、投票者数は254名(内無効2名)、有効投票総数は2520票(内白票358票)でした。

1990年2月14日

第8期 選挙管理委員会

ASTRO Observatory Domes

天文台の建設は青少年の
未来の心をはぐくみます



★文部省宇宙科学研究所天文台の6mドーム★

◆主な天体観測ドーム納入先◆

文部省宇宙科学研究所/東京大学教養学部/宮崎大学教育学部/東京学芸大学/埼玉大学/福島大学/川崎市青少年科学館/杉並区立科学教育センター/駿台学園一心荘(北軽井沢)/防衛大学/東海大学宇宙情報センター(熊本)/栃木県こども総合科学館/日原文台(島根県)等の他全国に200余基の実績、

アストロ光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321