

ブラックホール円盤コロナ e^+e^- ペア一付き

嶺 重 慎

〈京都大学理学部 〒606-01 京都市左京区北白川追川町〉

楠 瀬 正 昭

〈NASA/MSFC, コペルニクス天文学センター, ワルシャワ, ポーランド〉 (注: 1992. 4月1日より所属が変わります)

ブラックホールの観測的研究が、日本のX線天文衛星「ぎんが」を中心に進められている。一般に連星系ブラックホールには、二つのスペクトル状態があるとか、X線の短時間変動がみられるといった観測的特徴があるのだが、その原因についてはまだよくわかっていない。本稿では特にブラックホールのまわりに形成された高温ガス円盤における電子・陽電子対発生に注目し、それがガス円盤の安定性や時間変動、そして放射スペクトルにどのような役割を演じているのか、筆者らの最新の研究をもとに論じる。

1. 連星系ブラックホール

1.1 ブラックホールってほんまにあるんかいな?

ブラックホールという言葉は世間にもすっかりおなじみになってしまったが、その実態はというと専門家にも必ずしも明らかではない。そこで本稿ではブラックホール周辺の物理について考えてみることにしよう。

どうもブラックホールらしい... と疑われている天体が現在いくつか見つかっている (表1参照)。といってもブラックホール自身は光を出さないで、周辺のガスや、連星系ブラックホールの場合には相棒となる普通の星の観測からその存在を押し量ることになる。

というわけで、今までに見つかったブラックホール候補はいずれも連星系をなしている (われわれの銀河の中心核や活動銀河核の中心にも超巨大ブラックホールがいすわっているという説もあるがここではふれない)。なかでも、はくちょう座X

-1 はあまりにも有名である。

連星系とは、双子の星がお互い相手のまわりをぐるぐるまわっているような系をいう。このうちブラックホールを含んでいる可能性があるものは、一般にX線連星とよばれている連星系である。これは太陽のような普通(?)の星である「伴星」と、中性子星やブラックホールといった高密度星である「主星」とからなる連星系で、高密度星近傍の高温ガスからの放射が主としてX線領域にあるため、そのように呼ばれている。

では、X線連星中に果たしてめざす(?)ブラ

表1 主なブラックホール候補

連星系	コメント
はくちょう座 X-1 (Cyg X-1)	ハイ・ロー遷移 X線変動 (ローステート)
LMC X-3	ハイステート
GX339-4	ハイ・ロー遷移 X線変動 (ローステート)
A0620-00	X線新星, ハイステート
GS2000+25	X線新星, ハイステート
GS2023+338 (V404 Cyg)	X線新星, ローステート X線変動
GS1124-68 (Nova Musca)	X線新星, ハイ・ロー遷移 X線変動 (ローステート)

Shin Mineshige, Masaaki Kusunose: Black-Hole Disk Coronae with e^+e^- Pairs

ックホールがあるのか、それとも単に(?)中性子星にすぎないのかを区別する、何か決定的な方法はあるのだろうか。

一番確実な方法と思われるのが、連星の軌道運動を光学観測して主星の質量を求めるやり方である¹⁾。中性子星の最大質量はたかだか3倍の太陽質量であることが理論的に予言されているので、主星の質量が太陽質量の3倍以上あればそれは中性子星ではなく、ブラックホールだと結論できる。はくちょう座 X-1 も主星の質量が太陽質量の10倍程度とみつもられたため、ブラックホール候補の最右翼と目されるようになったのだが、新しい例では A 0620-00 という X 線新星もブラックホール候補として注目を浴びている²⁾。

しかしながら、主星の質量が正確に求まる例はむしろ少ない。そこでブラックホールに特有で中性子星には決してみられない現象を探そうということになる。

まさにこのテーマのもとに1992年1月、アメリカのスキーリゾート地コロラド州アスペンにおいて国際会議が催された。しかし筆者の印象では、結局決定的な答えは見いだせなかったという感がある。今までブラックホール特有と思われた現象(例えば硬 X 線放射)が連星系中性子星で見つかった例や、逆に中性子星にしかないと思われていたふるまい(例えば準周期振動: QPO)がブラックホールにもあったという報告が相次いだからである。しかし本稿ではあまり細かいことにこだわらず、一般的なふるまいについて述べる。

1.2 宇宙の渦: 降着円盤

ブラックホールの話にはいる前に近接連星系における降着円盤について説明する必要がある(興味ある方は福江氏によるすぐれた一般啓蒙書³⁾があるので参照されたい)。

X 線連星系中の高密度星の周りには降着円盤が存在していて、主なエネルギー源になっていると考えられている。伴星表面から流れ出て中性子星やブラックホールの重力圏に入ったガスは、

連星系回転の角運動量をもっているため主星にまっすぐ落下しないで、一旦、星のまわりをぐるぐる円運動を始める。こうして主星のまわりにリング状のガス塊ができあがる。このリング中のガスは、粘性の働きによって少しずつ角運動量を失いながら、ゆっくり主星へと落ちていく。このとき、ガスが初め持っていた重力エネルギーは、粘性の働きによって効率よく熱エネルギーに変換され、円盤は明るく輝くようになる。このような円盤を降着円盤とよぶ。

1.3 ハイステートとローステート

連星系ブラックホールの特徴とされるものの中にハイとロー、二つのスペクトル状態がある。(最近の X 線観測、特に「ぎんが」の輝かしい成果については Tanaka⁴⁾に詳しいので、専門的に詳しくお知りになりたい方はご覧下さい。)

図1にスペクトル変化の概略を示した。

系がハイステートにあるとき、X 線のスペクトルはほぼ一千万度 (1 keV) の黒体放射で表される。軟 X 線強度が強いのでソフトステートとも呼ばれる。もっともスペクトルを注意深くみると、硬 X 線領域までのびた成分もみられるが量としては少ない。なお中性子星を含む系では、1 keV の放射の他に中性子星表面、或いはその近傍からの 2 keV のプラズマからの放射が足し算される。逆にいうと、2 keV の放射が見られない系はブラックホールを含んでいる可能性が大きいといえる。

一方ローステートの X 線スペクトルは、エネルギー

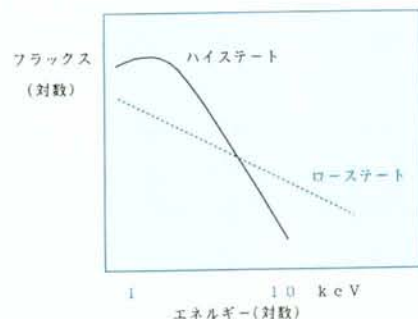


図1 連星系ブラックホールの典型的スペクトル: ハイステートとローステート。

ギーのべき関数 (E^{-a})で表される。ここで a は正の定数である。このとき硬 X 線領域からより多くのエネルギーが出ているのでハードステートとも呼ばれる。さらにローステートでは、数十ミリ秒から数秒にわたる細かい X 線強度の時間変動がみられることも特記すべき事項である (宮本, 北本両氏による解説記事⁹⁾を参照のこと)。こうしてブラックホール候補星は二つの相異なるスペクトル状態をもっており、例えばはくちょう座 X-1 の場合、数カ月から数年の時間スケールでスペクトル状態変化が観測されている。

以下に、このスペクトル変化について一私説を述べてみたい。はたしてスペクトル変化の謎を解く鍵は、どこにあるのだろうか。

2. 円盤コロナの登場

2.1 硬 X 線の起源

スペクトル変化の謎を解くには、まず輻射がどこから出ているのかを見極めなくてはならない。軟 X 線は、数百万度から一千万度にまで温められた降着円盤本体の表面から出ていると考えられており、そのことはまず間違いないだろう。

問題は硬 X 線の発生機構及び作られる場所である。場所としては二つの可能性が考えられている。光学的に薄い二温度円盤 (或いはトーラス)¹⁰⁾と、光学的に厚い円盤表面に形成された円盤コロナ⁷⁾とである (図 2 = 表紙参照のこと)。二温度円盤とは、陽子温度が電子温度より高い状態にあるプラズマからなる円盤をいう。これは高温低密度プラズマにおいては、電子と陽子のクーロン相互作用が、輻射による電子の冷却についていけなくなるためにおこる。

ところでわれわれは、円盤コロナの立場をとって研究を進めている。というのは最近の研究によりローステートにも硬 X 線を出すプラズマの近くに低温 (といっても数百万度) のガス塊が存在するらしいことがわかってきたためである。(二温度円盤モデルでは円盤全体が数億度以上にもなる

ため観測に合わない。) また硬 X 線強度が変化しても、軟 X 線を放射する円盤の半径が変化しないという観測¹¹⁾も、コロナの立場を支持する。

といっても二温度円盤モデルの立場を完全に捨てるわけではない。ここで特に強調しておきたいことは、そしてこれが本稿の主題なのだが、円盤コロナ中のプラズマもやはり二温度状態にあるとするのがむしろ自然だということである。さらにもう一つ重要なことは、二温度コロナでは輻射によって生成される光子のエネルギーが電子の静止エネルギー (511 keV) にも達するため、電子・陽電子対 (e^+e^- ペアー) の発生が無視できなくなることである。

二温度状態のプラズマ、そして電子・陽電子対の発生、これらの物理が今までの円盤コロナの理解をどう書き換えるのだろうか。

2.2 降着円盤におけるペアー発生

天体プラズマにおけるペアー生成の研究の歴史は比較的新しい。1988 年に、Kusunose & Takahara¹²⁾は降着円盤におけるペアー生成の影響を調べていて一つの重要な発見をした。円盤へのガス降着率が臨界量が存在し、降着率がこの値を越えるとペアー生成率が常にペアー消滅率を上回り、ペアー平衡状態 (ペアーの生成と消滅とがつり合う状態) が存在しなくなるのである。ついでわれわれは、円盤のすべての熱・ペアー平衡を求め、光学的に薄い円盤はペアー生成を考慮しない限り熱不安定であることを示した⁹⁾。

図 3 に得られた熱・ペアー曲線を描いておく。PR とラベルがうってある線がペアー発生を考慮した解、NPR の線はペアー発生を無視した解に相当する。ペアーを考慮した解のうち真ん中に水平にのびる解のみが熱的に準安定、残りの光学的に薄い解はすべて熱不安定であることが示される。こうして円盤におけるペアー生成は、円盤の構造のみならず安定性に重要な寄与をしていることが明らかになった。

それでは二温度円盤コロナにおけるペアー生成

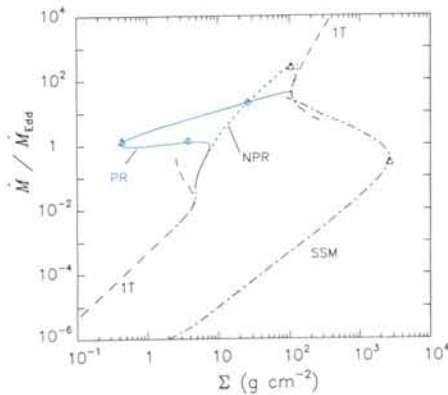


図3 高温降着円盤の熱・ペアー平衡曲線。横軸は円盤の面密度（円盤密度を円盤面に垂直方向に足し合わせたもの）、縦軸はガス降着率。PRとラベルがうってある線がペアー発生を考慮した解、NPRの線はペアー発生を無視した解に相当する。

の影響はどうあらわれるのだろうか。

円盤本体と違って、コロナには円盤本体からの多量の軟X線光子の供給がある。しかし軟X線注入によるプラズマ冷却を考慮してもやはり、降着率に臨界値があること、及びペアーが無いコロナは熱不安定であることがわかったのである¹⁰⁾。

2.3 ペアーコロナにおけるリミットサイクル

ペアー生成をも考慮した円盤コロナの熱・ペアー平衡解およびその安定性について明らかになったことは次のようにまとめられる。

(1)円盤本体の温度が数百万度以下で、(2)コロナ中のガス量（或いはコロナ中のガス流量）がある臨界値より小さいとき、図4に示すようなペアーリミットサイクルが出現し、熱的に準安定な二温度コロナの平衡解が現れる。コロナはペアーに満ちた状態と殆どペアーの無い状態を数十ミリ秒から数秒の時間スケールで繰り返す。このとき円盤本体からの軟X線光子は、コロナのプラズマとコンプトン散乱してエネルギーをもらい、硬X線として放射される。スペクトルはべき関数型となり、ローステートのスペクトルを再現する。

逆に(1)(2)の条件のうち一つでも満たされな

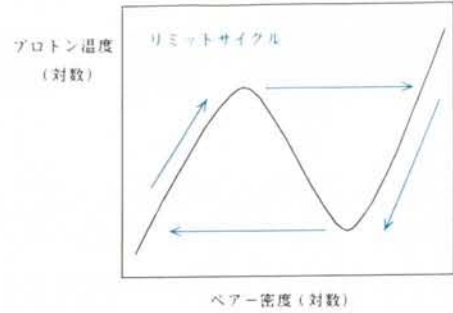


図4 ブラックホール円盤コロナにおけるペアーリミットサイクル。コロナ中のプラズマはペアーに満ちた状態と殆どペアーの無い状態との間を振動する。

いと、コロナは熱不安定を起こして冷え、最終的に一温度状態へと移行する。そこでは輻射は主として軟X線領域から出され、スペクトルは黒体輻射型、つまりハイステートに特有なスペクトルとなる。

以上まとめると、円盤へのガス降着率とコロナ中のプラズマ量との微妙なバランスで、輻射スペクトルはハイステートになったり、ローステートに遷移したりする。

なお連星系が中性子星を含む場合には、中性子星表面からの軟X線光子によるコロナの冷却が非常に効果的なので、よほどガス降着率が低い限り二温度コロナは発達しない、つまりローステートは実現しにくくなる。この点が連星系ブラックホールとの大きな違いである。

3. X線新星とスペクトル変化

では、何がひきがねとなってハイとロー、二つの状態間の遷移がひきおこされるのだろうか。

残念ながらまだはっきりした答は出ていない。まっさきに考えられるのは、例えば円盤外側部の熱不安定によってひきおこされた円盤中のガス流量の変化¹¹⁾であるが、どうも話はそう単純ではないことが最近「ぎんが」によってわかった。

「ぎんが」は存命中に3つのブラックホール候補のX線新星を発見した。X線新星とは、数年か

ら数十年おきに X 線及び可視光の爆発的増光を示す天体で、X 線トランジェントともよばれる ((文献 12) に最近の観測結果が出ている)。これらの X 線新星は、ブラックホール候補の A 0620-00 に似た光度曲線やスペクトル変化を示すため、やはりブラックホール候補と目されている。

このうち、GS 2000+25 と GS 1124-68 (または Nova Musca) の二つは、A 0620-00 と同じく、明るいときはほぼいつもハイスレートにある。そして時折硬 X 線成分が発達しているのがみられる。これはわれわれのモデルに都合がよい。というのは、円盤が最も明るいとき、即ち円盤が高温のときには、軟 X 線によるコロナプラズマの冷却のためコロナは一温度状態となり、硬 X 線はあまり出てこれないからである。硬 X 線は、円盤がいくらか暗くなり始めたところで強くなる。

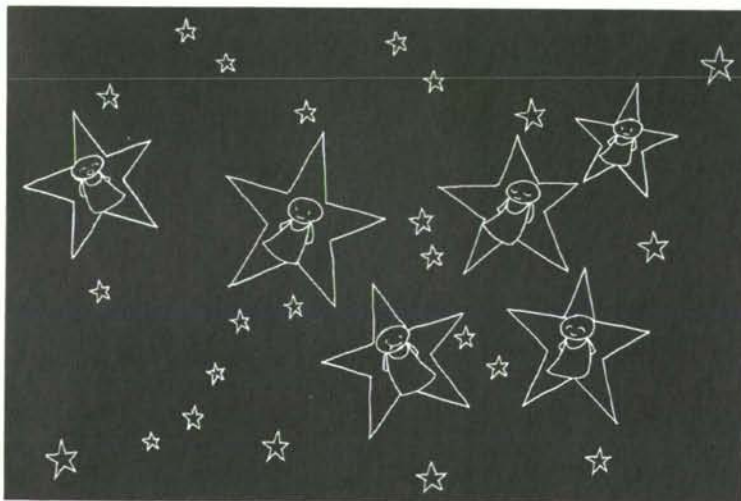
しかし GS 2023+338 (V 404 Cyg) という天体は、どうも常時ロースレートにあるらしい。明るいとき (すなわち円盤へのガス降着率が大きいとき) も、暗いとき (ガス降着率小のとき) も、いつもロースレートにあるのである。困った、こまった、実に困った。この天体の円盤面がたまたまわれわれの視線方向を向いていて、円盤本体から

の軟 X 線が円盤縁のガスに吸収されてわれわれには届かないというのでない限り、この観測結果はわれわれのモデルでは説明しづらい。

というわけで、まだまだブラックホールにまつわる謎はつきないのである。

参 考 文 献

- 1) Shapiro, S. L. & Teukolsky, S. A. 1983. Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars, John Wiley & Sons, Sec. 13.5.
- 2) McClintock, J. E. & Remillard, R. A. 1986. ApJ, 308, 110.
- 3) 福江 純 1988. 「降着円盤への招待」ブルーバックス, p-717, 講談社.
- 4) Tanaka, Y. 1989. In Proc. 23rd ESLAB Symp on Two Topics in X-ray Astronomy, ESA-SP 296, p3.
- 5) 宮本重徳, 北本俊二 1990. 天文月報 83, 164.
- 6) Shapiro, S. L., Lightman, A. P. & Eardley, D. M. 1976. ApJ, 204, 187.
- 7) Liang, E. P. & Price, R. H. 1977. ApJ. 218, 247.
- 8) Kusunose, M. & Takahara, F. 1988. PASJ. 40, 435.
- 9) Kusunose, M. & Mineshige, S. 1992. ApJ. 393, in press.
- 10) Kusunose, M. & Mineshige, S. 1991. ApJ. 381, 490.
- 11) 嶺重慎 1991. 天文月報 84, 288.
- 12) 常深博, 北本俊二, 井上 一 1990. 天文月報 83, 161.



プレアデス星団

(イラストは神奈川県 杵鞭様)