

ブラックホール天体からのX線ゆらぎ

嶺 重 慎 (京大理¹), 竹 内 充 (京大理¹), 根 来 均 (宇宙研²)

〈¹: 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〉

〈²: 宇宙科学研究所 〒229 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

はくちょう座 X1 や活動銀河核からの X 線は、激しく時間変動していることが知られている。われわれは「自己組織臨界現象」という考え方を手がかりに、ブラックホール降着円盤のセルオートマトンモデルをたて、未だ定性的にだが、X 線観測を再現することに成功した。このモデルにより得られる、ブラックホール降着円盤の全く新しい描像について議論する。

1. はじめに

連星系ブラックホールや活動銀河核などブラックホール天体からの X 線は、激しい時間変動を示しており、その起源は X 線天文学始まって以来の大きな謎の一つである。図 1 に、代表的なブラックホール候補天体であるはくちょう座 X1 星の、ぎんがによる X 線強度曲線を示しておこう。一見不規則な変動が特徴である。

X 線は、ブラックホールに吸い込まれつつあるガスから放出されると考えるのが自然である。したがって X 線の時間変動は、中心天体に落ち込みつつあるガスの物理状況を如実に反映しているはずであり、コンパクト星近傍の物理状況を探る有力な手がかりである。

おもしろいことに、ブラックホール天体からの X 線ゆらぎは、一般に $1/f$ ゆらぎとして知られるゆらぎの一種であるらしい。というのは時間変動のパワースペクトルをとると、周波数 f に対し、高周波数側が $1/f$ 的になるのである (図 2)。

$1/f$ ゆらぎというと、最近家電製品にまで名前がつけられて、すっかり有名になってしまった観がある。モーツァルトの音楽や、高速道路を走る車の列も、 $1/f$ ゆらぎに従うという²⁾。もっともその実体はというと、あまりよくわかっていない。が、そのようなゆらぎを現象論的に再現すること

はできるのである。

ここに、自己組織臨界現象 (SOC) という考え方があ。これはもともと砂山くずしのダイナミクスを記述するモデルとして発表されたのだが、

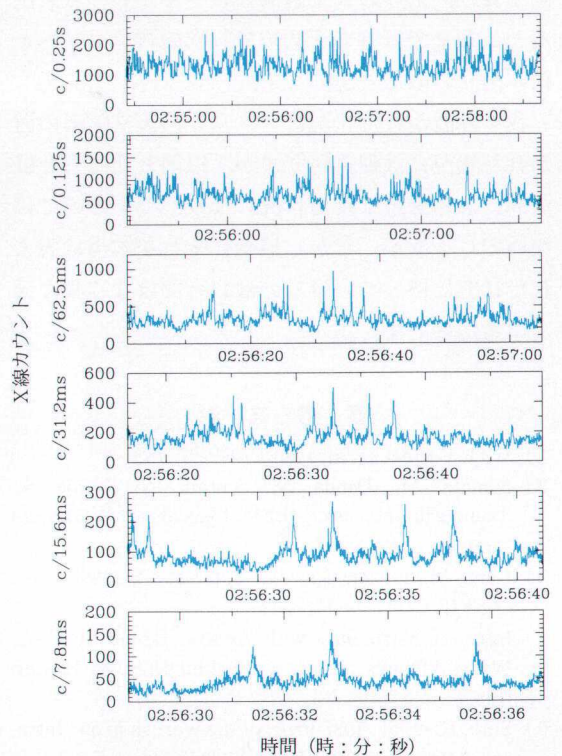


図 1 はくちょう座 X1 星からの X 線の強度変化 (根来¹⁾より)。

近年、地震のダイナミクスの理解に関しても有効であることがわかっている³⁾。われわれは同じ考え方を降着円盤に応用し、X線ゆらぎの研究を進めてきた^{4),5)}。本稿では、この一見風変わりなモデルについて解説してみたい。

2. 降着円盤の自己組織化とX線観測

まずブラックホール降着円盤のセルオートマトンモデルについて説明しよう。手順は以下の通り。比較的簡単な計算なので、興味をもたれた方は試みられてはいかがであろう（詳細は文献5）。

- ① ブラックホールのまわりの空間（ガス円盤）を二次元計算メッシュでおおう（図3）。一番外側のリング上のランダムに選んだセルに、一回に m だけガスを注入する。
- ② ガスの量がある臨界量を越えたところで何らかの形の不安定（物理は特定しない）がおこると仮定し、不安定セルからその一段内側にある三つのセルに均等に m だけずつ、合計 $3m$ のガスを落とす（図3）。この結果内側のセルが不安定になれば、同じルールにしたがい、ガスをさらに内側へのリングへと落とす。こ

うしてガスは雪崩となって、一気にブラックホールへと落ちていく。

- ③ その際ガスは、ポテンシャルエネルギーを効率よくX線放射のエネルギーに転化して解放すると仮定することにより、X線の時間変動を計算することができる。
- ④ 以上の手続きを少なくとも数十万回繰り返す。これは、京都のお寺とかによくある、いわゆる「ししおどし」を二次元平面にたくさん並べたモデルである。このような状況のもとで、系はしだいに自己組織化臨界（SOC）状態へと移行する。複数個のししおどしを並べる、というのがみそである。単独のししおどしでは、周的变化しか出てこない。

さて一連のセルオートマトンシミュレーションによりわかったことは、

- (1) 円盤が自己組織化されると観測で得られたようなパワースペクトルが再現される。
- (2) X線ショットの大きさに典型的な値はなく、大きなものから小さなものまで、スムーズに分布する。
- (3) X線ショットはランダムに起こるのではなく、大きなショットほど次のショットは時間をおいて起きる傾向がある。

図4にモデルで得られた典型的な光度曲線とそのパワースペクトルを示す。はくちょう座X1のX線観測結果と比較的よく合っている。

なお少々細かいことを言うと、観測のパワースペクトルにはショットの形の情報も含まれている

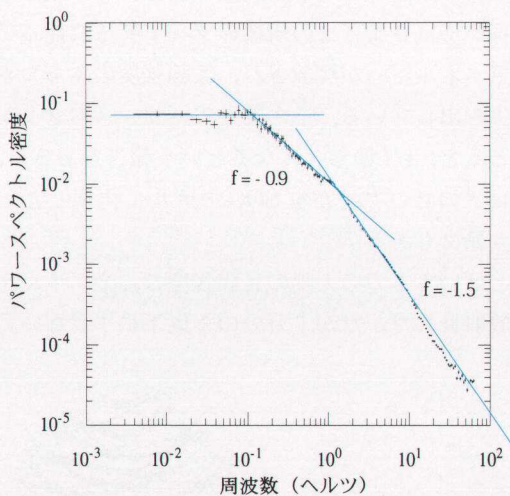


図2 はくちょう座X1星からのX線のパワースペクトル（根来¹⁾より）。

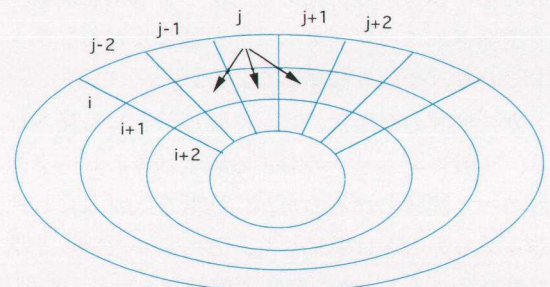


図3 降着円盤のセルオートマトンモデル。

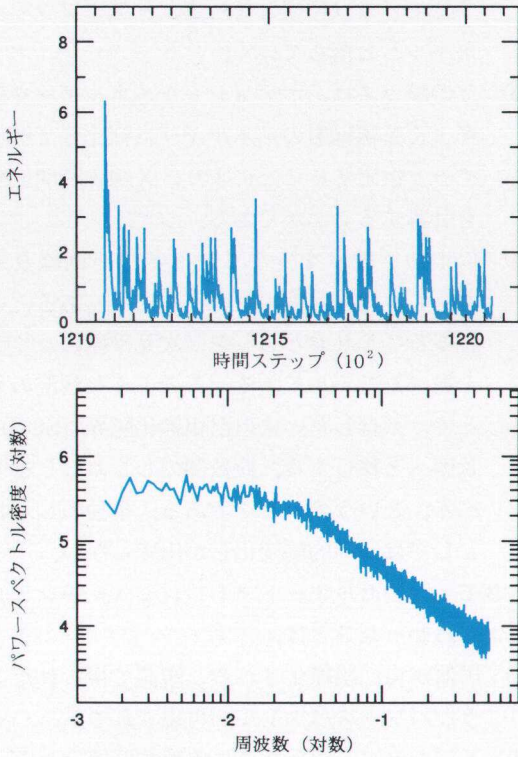


図4 モデルによるX線光度曲線(上)とパワースペクトル(下).

ので、ショットを作る物理を特定しない限り、観測をすべてモデルで再現するのは不可能である。またこのモデルでは、各リングで、臨界条件とは無関係にいつも少しずつガス降着をさせている。実際、このようなガス拡散がないとパワースペクトルは $1/f^2$ 的になり、観測に合わない。逆にガス拡散の度合いをさらに強めると、小さな雪崩が数多く誘発されてパワースペクトルはどんどんフラットになり、やはり観測に合わない。

ガス拡散の影響は、ピーク強度分布にも見られる。一般にショットのおこる頻度はそのピーク強度のべき関数になるのだが、拡散を入れるにしたがってそのべきは急になり、どちらかという指数関数的になる(この意味で円盤はもはや「臨界」状態にはない)。この傾向は確かに、ぎんがによる

はくちょう座 X1 のデータにみられる⁶⁾。

さて雪崩は一旦おきると、失われたガスが補充されるまで次の雪崩は発生しない。すなわち、雪崩の規模が大きくなればなるほど、一回に解放されるガスの量が多くなり、したがってそれだけのガスを補充する時間(ショットの待ち時間)も長くなるはずである。この傾向も、観測的に確認することができた⁶⁾。

もちろん、これらはモデルの完全な証明にはならないが、状況証拠が続々と集まってきているとはいえる。では本モデルにより、ブラックホール降着円盤の描像が、どのようにぬりかえられるのだろうか。

3. ブラックホール円盤の新しい描像

議論を先に進めるには、ガス降着のふらつきを引き起こす不安定性の種を特定しないと行けない。結論を述べると、不安定性の種は太陽フレアのような磁気爆発が最も有力である。降着円盤の磁場は、微分回転や磁気シア不安定により増幅され、ある程度強まったところで、リコネクションや磁気浮上不安定により散逸すると考えられる。

ここで太陽フレアとの関連に注目したい。太陽コロナではさまざまな規模のフレア発生に伴って磁気エネルギーが解放され、X線強度のふらつきを生み出している。その変動のパワースペクトルをとると、 $1/f$ ゆらぎになるという報告もあるし、フレアのピーク分布をSOCモデルで再現したという論文もある⁷⁾。

とはいうものの太陽のX線強度は、全エネルギー放射量のたかだか1万分の1以下にすぎない。

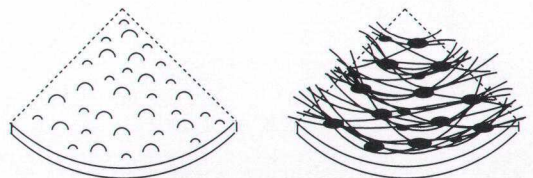


図5 標準円盤(左)とコロナ円盤(右)。

平均強度の数十パーセントにも達する連星系のX線ゆらぎを説明するには、標準円盤から光学的に厚い本体をとり出して、大気（コロナ）だけが残ったような極端な状況を考える必要がある。実際このような解（low- β 円盤）は可能であることが柴田ら⁸⁾によって示されている。

すなわち、降着円盤には大きく二つの型がある。標準（high- β ）円盤はガス圧で支えられ、磁場は光球からコロナへ、ループとなってとび出している。コロナ型（low- β ）円盤は磁気圧で支えられ、ガスは磁場に閉じこめられ塊状となっている（図5）。

ところでブラックホール候補星からのX線スペクトルには、ハードな状態とソフトな状態とあり、X線ゆらぎはハードな状態のとき顕著になることが知られている。標準（high β ）円盤はソフトな状態に、コロナ（low β ）円盤はハードな状態に対応することがわかる。なんとブラックホール円盤は、図5であげた二つの状態の間を行き来していることになる⁹⁾。

活動銀河核は一般にハードなスペクトルを持ち、また大きなゆらぎを示すので、円盤の中心部は定常的にコロナ（low β ）状態にあるらしい。

コロナ（low β ）円盤は「変な」円盤である。ここでは降着円盤のいくつかの「常識」がくつがえる。円盤は光学的に薄く輻射の効率が悪いため、ガスはほとんど冷えることなく、そのまま自由落下に近い速度でブラックホールに落ちていく。こうして円盤は高温になり、幾何学的に厚くなる。降着ガスのもつ重力エネルギーは一旦磁場に蓄えられ、その一部はリコネクションにより散発的に解放され、残りはブラックホールに持ち込まれる。これらの点に関しては、別の機会に論じたい。

参 考 文 献

- 1) 根来 均 1992, 修士論文 大阪大学
- 2) 武者利光 1980, 『ゆらぎの世界』講談社ブルーバックス
- 3) 中西 秀 1994, 日本物理学会誌 Vol. 49, No. 4, p. 267
- 4) Mineshige S., Ouchi N. B., Nishimori H., 1994a, PASJ 46, 97
- 5) Mineshige S., Takeuchi M., Nishimori H., 1994b, ApJ 435, L125
- 6) Negoro H., Kitamoto S., Takeuchi M., Mineshige S., 1995, ApJ, submitted
- 7) Lu E. T., Hamilton R. J., 1991, ApJ 380, L89
- 8) Shibata K., Tajima T., Matsumoto R., 1990, ApJ 350, 295
- 9) Mineshige S., Kusunose K., Matsumoto R., 1995, ApJ 445, L43

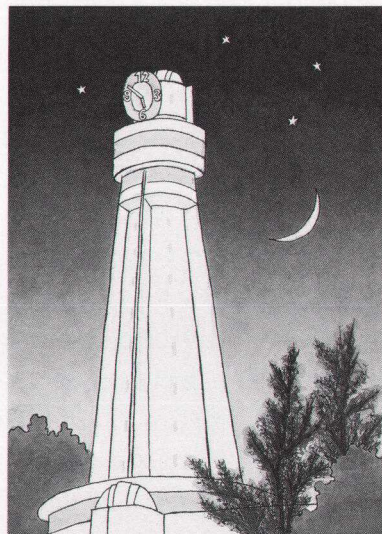
X-ray fluctuations from black-hole objects

S. MINESHIGE (1), M. TAKEUCHI (1), H. NEGORO (2)

1: Department of Astronomy, Kyoto University

2: Institute of Space and Astronautical Science

Abstract: X-rays from Cygnus X-1 and active galactic nuclei are known to exhibit aperiodic variations. The X-ray observational features can qualitatively be reproduced by a cellular-automaton model constructed on the basis of the self-organized criticality. We, here, discuss a new picture of black-hole disks envisaged by our model.



標準時の夜明け
小北純子 (和歌山県)