



活動銀河核の X 線時間変動とブラックホール質量

林 田 清

〈大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 〒560-0043 豊中市待兼山1-1〉

e-mail: hayasida@ess.sci.osaka-u.ac.jp

活動銀河核からの X 線放射は様々な時間スケールのランダムな強度変動を示す。我々は X 線時間変動の定量化を行い、個々の活動銀河核について時間変動を特徴づける相対的時間スケールを導入した。時間スケールが中心ブラックホールのサイズに比例するという仮定のもとで、その質量を推定することができる。記事では、この質量推定法の紹介と実際にセイファート銀河等に適用した例を示す。加えて、可視光の輝線幅をもとにした質量推定法と比較し、我々の手法の精度を評価する。

1. はじめに

数年前にベストセラーになった、象の時間ネズミの時間という本¹⁾をご存知だろうか。この本の中で、様々な生理学的スケーリング則に関する紹介がなされている。そのうち最初に出てくるのが心拍数や寿命といった動物の基本的時間スケールが体重の 1/4 乗に比例するという法則である。天文学でも様々なスケーリング則が知られている。この記事で扱うのはブラックホールの質量とその心拍とでもいうべき時間変動の間のスケーリング則である。ブラックホールの時間変動のスケールが質量に比例するという仮定のもとに議論を行う点で、動物の場合とは異なるが、マクロな視点から対象の本質に迫ろうという視点には共通するものがある。

理論的、想像上の存在と思われていたブラックホールが実際にこの宇宙に存在することを示したのは X 線天文学最大の成果のひとつだろう。多くの解説書に記述があるように、白鳥座 X-1 をはじめとするブラックホール連星系がブラックホールであると信じられている根拠は、その質量推定値が中性子星質量の理論的上限値 3 倍の太陽質量を越えているということにある。ブラックホールの質量推定は、相方の恒星の軌道運動をドップラー観測で調べることによって行われる。連星軌道の傾斜

角に不確実性が残る場合、質量の下限値ということになるが、3 倍の太陽質量以上という基準を満たすブラックホール連星系は、現在のところ 10 個程度知られている。これらの天体に関しては X 線領域での性質も詳しく調べられており、1) ランダムな激しい時間変動、2) 黒体輻射形のエネルギースペクトルとべき関数形のエネルギースペクトルの間を X 線強度の高低に伴って遷移するハイロー遷移などは、ブラックホール連星系特有の性質だと考えられている。

一方、クエーサーやセイファート銀河といった活動銀河核の中心には、百万倍から十億倍太陽質量の超巨大ブラックホールが存在し、質量降着によって光っている。これは今や揺ぎ無き事実のように考えられているが、ブラックホール存在の根拠は連星系ブラックホール候補程明確ではない。狭い領域から巨大な光度をまかなおうとするとブラックホールへの質量降着が最も無理のない解であること、そして、実際にいくつかの銀河の中心にちょうど百万倍から十億倍太陽質量の巨大質量の存在が示唆されていることが、超巨大ブラックホール説を支えている。もっとも、星やガスの運動から中心に巨大質量の存在が示唆されているのは近傍の通常銀河に限られ、活動銀河での例は少ない。結局、観測される膨大な放射エネルギー（クエー

サーの場合 10^{46} erg/s を超える) がいかに狭い領域から出ているのかがポイントになる。それでは、放射領域のサイズはどうやって推定することができるのか? その手がかりの一つを与えてくれるのが、放射強度の時間変動である。この記事の主題は、活動銀河核の X 線強度の時間変動からブラックホールのサイズ、質量を推定することにある。

活動銀河中のブラックホールの存在証明に関して、全く別の観点から重要な観測結果がある。あすか衛星の観測で MCG-6-30-15 をはじめとするセイファート銀河の X 線スペクトルに発見された幅の広い鉄輝線がそれで、ブラックホール特有の強い重力場の証明と考えられている。興味ある方は解説を参照されたい。

2. 活動銀河核の X 線時間変動

活動銀河核が明るい X 線源であること、X 線強度が時間的に変動するという事は 1970 年台にはわかっていた。一般に望遠鏡で分解できないような天体のサイズを推定するのに、変動の時間スケールを t 、光速を c として、サイズ r の上限を ct で与える方法が広く使われている。この方法は、放射領域の一部で起こった変動が全体に行き渡る速度が光速を超えることはないという原理に基づいている。この原理に基づいて、活動銀河核の X 線時間変動とブラックホール質量を結びつけたのが、1986 年の Barr & Mushotkzy²⁾, Wandel & Mushotkzy³⁾ の二つの論文である。変動の時間スケールとして彼らが採用したのは、ファーステストダブリングタイムで、これは光度曲線を追っていった強度が 2 倍になる時間の最短値として定義される。彼らは、このファーステストダブリングタイムに光速をかけてサイズの上限を求め、それが 5 倍のシュバルツシルド半径に等しいとにおいてブラックホール質量に換算した。

彼らの結果でまず重要なのは、ファーステストダブリングタイムあるいは求めたブラックホール質量の上限値が、観測されている X 線光度と正の相関

にあることである。これは、明るい活動銀河核ほど重いブラックホールをもっているという基本的、かつ、重要な結果を示唆している。一方、こうして求めた質量の上限値からエディントン光度 (の上限値) を求めると、それは観測されている X 線光度の二桁以上上になる。活動銀河核がエディントン光度に対して、どのくらいの割合で光っているかという値、エディントン比は非常に重要である。しかし、ここで求められたのはエディントン比の下限値であること、そもそも ct で与えられるサイズの上限が、実際のサイズにどの程度近いかは定かではないことには注意すべきだろう。これに加えて、ファーステストダブリングタイムに関しても技術的な問題点 (光度曲線のビンや、長さによって値が変わる) が指摘されている。とはいえ、彼らの論文の先駆的な意義はゆらぐことはないだろう。

80 年代には、活動銀河核の X 線時間変動についてもひとつ重要な研究が始まった。変動のパターンをパワースペクトルを通して解析する研究である。ブラックホール連星系や中性子星連星系といった銀河系内 X 線源に対しては、時間変動の研究はそれ以前から盛んに行われていた。その手法が活動銀河核にも応用されたわけである。ただし、連星系天体の変動時間スケールがミリ秒から秒程度であるのに対して、活動銀河核のそれはずっと長いタイムスケールであるため長時間の観測が必要になる。80 年代のヨーロッパの X 線天文衛星 EXOSAT は、長楕円軌道をもち地球の影に対象が隠されることに阻まれることなく、対象を継続的に観測することができるという点で優れていた。EXOSAT によって観測された活動銀河核のうち、最初にパワースペクトルが調べられたのはセイファート銀河 NGC4051 と NGC5506 の二つで、Nature の同じ号に掲載されている^{4), 5)}。パワースペクトルは、低周波数側でフラット (ホワイトノイズ的)、高周波数側でべき -1 から -2 のべき関数的に落ちる (ピンクノイズあるいはレッドノイズ的) 形に CygX-1 をはじめとするブラックホール連星系のパワースペク



トルに類似している。ブラックホール連星系（ただしローステートに限定して）とセイファート銀河などの活動銀河核の X 線スペクトルの類似性に関しては、これ以前に指摘されていた。ここにあって、時間変動に関する類似性も示唆されたわけである。ただ、パワースペクトルの折れ曲がり、つまりフラットからべき関数に落ちる周波数は、CygX-1 の場合 $5 \times 10^2 \text{ Hz}$ であるのに対し、NGC5506 の場合 $1 \times 10^7 \text{ Hz}$ 程度になっている。Pounds & Mchardy⁶⁾ は、これが系のサイズの違いを表しているとする、NGC5506 の質量は 5×10^6 太陽質量と推定できると述べている。

3. 規格化パワースペクトル、 $fP(f)$ プロット、変動の時間スケール

パワースペクトルといってもなじみがない読者も多いと思うので、ここで簡単に説明しておきたい。時間的に変動する量（ここでは X 線強度）に関して、その時間に関するフーリエ変換を自乗したものをパワー、周波数の関数としてとらえたスペクトルをパワースペクトルと呼ぶ。周期的に変動する天体、例えばパルサーのパワースペクトルでは、周期に対応する周波数に鋭いピークがたち、パワーがこの周波数に集中していることがわかる。それに対して、ブラックホール連星系や活動銀河核で、いたるところの周波数にパワーがあるということは、様々な周波数、時間スケールの変動が混在していることを表している。活動銀河核の X 線時間変動に関しては、これまでに（準）周期的変動が報告された例⁷⁾がないわけではないが、変動の周期に比較して観測時間の短さもあって十分な確度で検証されたとは言い難い。

変動に特徴的な周期がないとすると、いかにして変動の時間スケールを定義すればいいのか？ 我々の研究のポイントの一つはここにある。まず、ファーステストダブリングタイムは簡便で直感的であるものの、先に挙げたような問題点が指摘されている。また、X 線光子計数の統計誤差によって生

じる見かけ上の変動の影響を取り除くのも難しい。パワースペクトルの折れ曲がりというのは確かに一つの解となるが、観測時間との兼ね合いで、折れ曲がりが見えるほど広い周波数範囲でパワースペクトルをかけるケースが少ない。また、ブラックホール連星系、少なくとも CygX-1 の場合、折れ曲がりの周波数自体が 1 桁程度ふらつくことが知られている⁸⁾。活動銀河核の場合どうなのかは今のところわからないが、サイズの基準としては常に一定であることが望ましく、好ましくない点といえる。

我々は規格化パワースペクトルを用いて変動時間スケールを定義した。規格化とは、求めたパワースペクトルを平均強度の自乗で割り算することである。これは、平均強度で割り算した光度曲線（以下では規格化光度曲線と呼ぶことにする）のパワースペクトルをとることと等価である。これによって、各周波数において、平均強度に対して何%の振幅の変動かといった相対振幅を得ることができる。規格化パワースペクトルは、銀河系内連星系の X 線時間変動を調べるために、宮本他 1991⁹⁾ で導入された。続く 1992 年の論文¹⁰⁾では、ブラックホール連星系（ローステートでのという限定が入るが）の規格化パワースペクトルが、観測時期やソースによらずに高周波数側で一致することが明らかにされた。我々が、規格化パワースペクトルを使ったこと、それを使って活動銀河核の X 線時間変動のスケールを定義した動機の一つは、この論文にある。

ブラックホール連星系ではブラックホール質量は 10 倍の太陽質量程度（数倍の誤差はあるが）である。ブラックホールのサイズが何桁も大きくなったら、その時間変動の様子はどうなるのだろうか？ 最も素朴な仮定は、規格化光度曲線の時間軸が系のスケールに比例して伸び縮みするというものだろう。光度曲線の時間軸が伸び縮みしたときに、規格化パワースペクトルがどうなるかは、パワースペクトルの定義に従って簡単に証明することができる。f を周波数として、パワースペクトル $P(f)$ は $1/f$

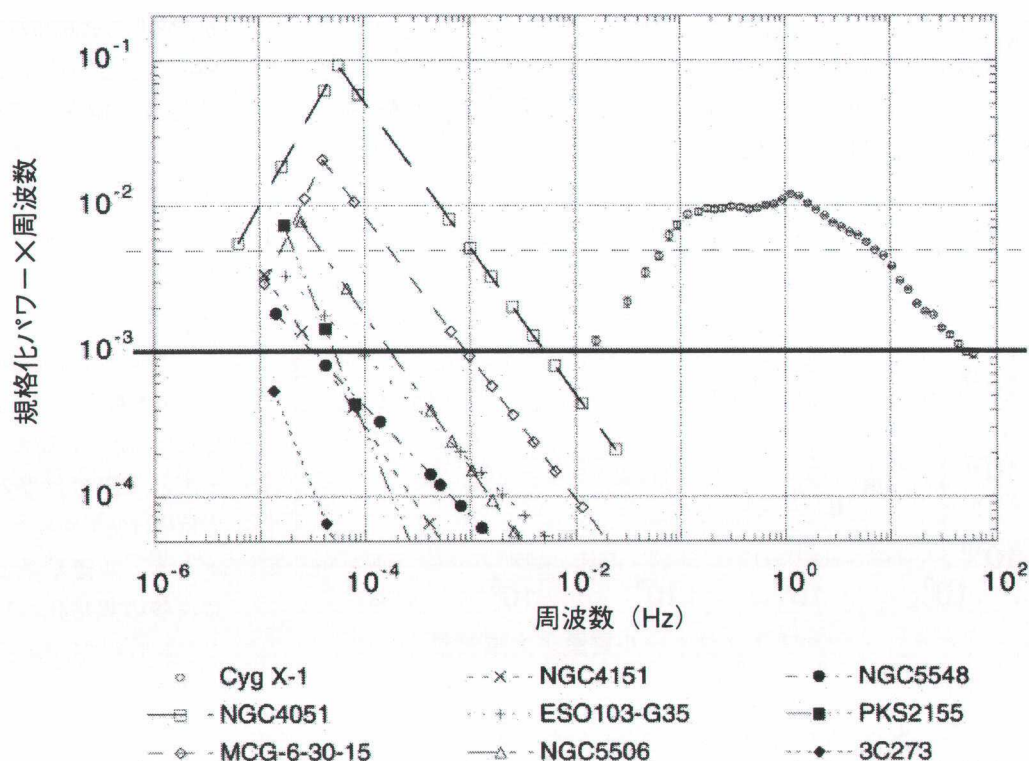


図1 規格化パワースペクトル×周波数. 右にあるのがCygX-1. 左に並んでいるのが活動銀河核のデータ⁹⁾.

の線に平行にシフトするというのが答えである¹¹⁾. この事実は他の文献や教科書でもみかけたことがないが, パワースペクトルは天文に限らず様々な変動現象の解析に使われていることから, 他の分野にも応用できるものと考え. 光度曲線の時間軸が系のサイズに比例して伸び縮みすれば規格化パワースペクトルは $1/f$ の線に沿ってシフトする. この原理を明確にできた時点で, 質量推定の方法は決まったも同然だった. まず, $1/f$ に沿うことを期待して規格化パワースペクトルの表示方法を工夫してやる. つまりパワースペクトルに周波数 f をかける. 活動銀河核の業界では, 多波長エネルギースペクトルを記述するのに $\nu F(\nu)$ プロットという表示をよく使う. それを模して $fP(f)$ プロットと呼んでいきたい. この $fP(f)$ プロットでは, 時間スケールの伸び縮みに応じて, パワースペクトルが水平方向

にシフトすることになる.

我々が最初に使用したのは, ぎんが衛星が長時間観測を行った8個の活動銀河核のX線光度曲線である¹¹⁾. 規格化パワースペクトルを求め, それをべき関数あるいは折れ曲がりつきべき関数でフィットした. ベストフィットモデルを $fP(f)$ プロットの上に表示したのが図1である. 図1には, 同時にCygX-1の規格化パワースペクトル(こちらはデータそのもの)も表示してある. おおよそ期待通り, パワースペクトルが横並びになっている. もちろん完全に相似系とはなっていないが, 以下では上の仮定のもとに話をすすめる. 変動の時間スケールは, $fP(f)$ プロットの上にバーを設け, 各々のパワースペクトルの高周波数側がそのバーを横切る周波数の逆数をもって定義した. バーの設定の仕方は全く任意で, 求めた時間スケールも相対的な意味

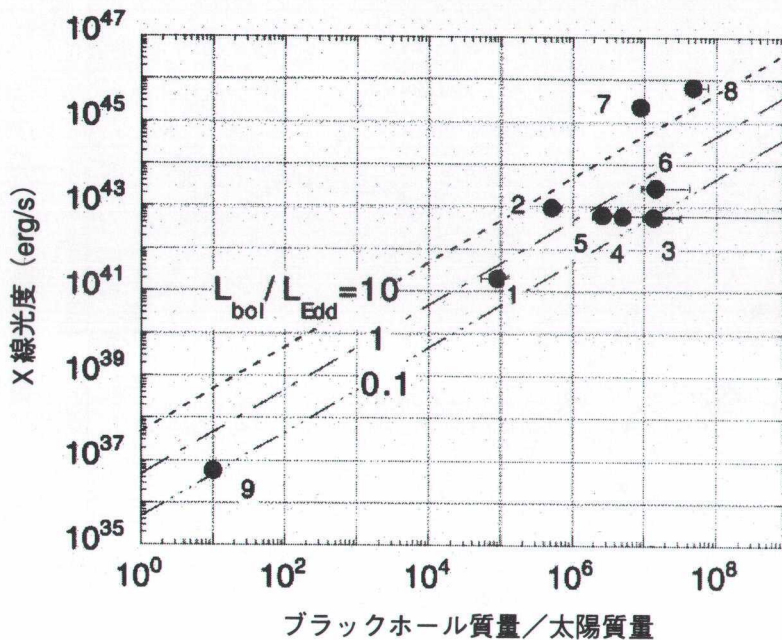


図2 X線時間変動より推定したブラックホール質量とX線光度。1から6までがセイファート銀河。9がCygX-1。セイファート銀河はおおよそエディントン光度の1～1/10で光っている。

しかない。我々は周波数×パワー＝ 10^{-3} のレベルにバーを設けた。高周波数側を採用したのは、CygX-1などのブラックホール連星系でパワースペクトルの低周波数側、折れ曲がり点がふらつくことを考慮してのことである。

4. 変動の時間スケールからブラックホール質量へ

こうして規格化パワースペクトルから定義した時間スケールを使い、さらに、時間スケールは系のスケール、ブラックホールの質量に比例するという仮定を設けると、サンプルの活動銀河核の保持するブラックホールがCygX-1の何倍の質量をもつか算出できる。一番はじめに持ち出した動物の時間に関する1/4乗則の例を持ち出すまでもなく、時間スケールが系のサイズ、質量に比例するというのは必ずしも自明のことではない。あくまで仮説である。CygX-1のブラックホール質量の値に関しては、

たくさんの測定値があるが、それらの範囲から切り取りのいいところで10太陽質量という値を採用した。これを基準に活動銀河核ブラックホールの質量が求められるというのが、我々の手法のもうひとつのポイントである。

ここでひとつ打ち明けると、以上はあくまでも説明のために考えた筋書きであって、実際の仕事の進め方はほぼ逆であった。ブラックホール連星系と活動銀河核の規格化パワースペクトルを同じ絵の上に書いてみたら、およそ1/fのラインに沿っていることに気が付いたのが最初、

そのあと時間軸の伸び縮みがパワースペクトルにどう反映するのか、改めて考えてみたというのが順番である。いずれにせよ、連星系X線星の時間変動に関して集中的に解析を行っていた90年台前半の阪大X線天文グループでこそ可能であった研究だと思う。

先に図1で使用した、ぎんが衛星が観測した活動銀河核のうち比較的長時間の観測が行われた8個の天体（6個のセイファート銀河と、1個のキューサー、1個のBLLac天体）のX線データに対して、時間変動から求めた質量を横軸、X線光度を縦軸にプロットしたのが図2である。ブラックホールの質量としては 10^5 から 10^8 太陽質量の間に分布している。図2には、エディントン光度に対応する線をひいているが、6個のセイファート銀河ではおおよそエディントン光度の0.1–1倍の間で光っていることがわかる。活動銀河核がエディントン光度の何割で光っているかというのは、基本的かつ重

要な課題である。輻射機構や、エネルギー収支の面ではもちろん、活動銀河核あるいは巨大ブラックホールの進化にとっても最重要パラメータのひとつである。それらに関する議論は論文¹¹⁾の方を参照されたい。

5. ブラックホールの質量推定、 他の手法との比較

X線時間変動からブラックホール質量を求める我々の手法の仮定は以下のようにまとめることができる⁹⁾。(1) ブラックホールのX線放射の強度変動変動は、活動銀河核から(ローステートの)連星系ブラックホールまで相似である。(2) 時間変動の尺度はブラックホールのサイズに比例する。(3) CygX-1のブラックホール質量は10太陽質量である。現段階では上の二つの仮定は、あくまで仮説にすぎない。のみならず、仮にそれが検証されても経験則となるのが精一杯で、物理的根拠に乏しいというのが短所である。もちろん、ブラックホール連星系、活動銀河核のX線時間変動の原因については、多くのモデルが提唱されている。が、決定的な説明はいまだ得られていない。また、(2)の仮定も自明ではない。動物の心拍に対する1/4乗則の例を持ち出すまでもなく、ブラックホールの変動の時間尺度が質量あるいは長さのスケールにリニアに比例するという確証はない。結局、我々の方法には何らかの較正が必要である。

活動銀河核中心のブラックホール質量を推定するもっとも確実な方法は、ケプラー運動をトレースし、軌道半径 r と速度 v から、中心天体の質量を $M = rv^2/G$ として求めることである。そのもっとも理想的な例が、水メーザー輝線の観測を通して低光度の活動銀河核 NGC4258 の中心核、0.13 pc 以内の質量を 3.6×10^7 太陽質量と求めた仕事である¹²⁾。同じ手法は、他の天体にも適応されつつあるが、メーザーが観測にかかるためにはエッジオンの系でないか難しいようで、手当たり次第に活動銀河核の質量を決定していくというわけにはいかないよう

である。もっと古典的に可視光で銀河中心部のガスや星の運動を調べて質量を推定する方法は、我々の銀河系中心部はじめ近傍の銀河に適応され、ほとんどの通常銀河の中心部に超巨大ブラックホールが存在することを明らかにしている。ただし、こちらでも M87 を超えるような遠方の銀河に適応された例は少なく、結果、活動銀河核の中心質量を与えた例は大変少ない。

一方、一般の活動銀河核では可視光のスペクトルにブロードラインと呼ばれる数千 km/s の速度幅をもった輝線が観測される。この輝線は、中心核からの連続光がそのまわりで速度 v で運動しているガス雲を光電離することで生じていると考えられている。ガス雲、ブロードラインクラウド、を分解して検出された例はないが、中心核からの距離 r がわかれば、それが重力的に束縛されているという仮定のもとに、中心質量 M を求めることができる。距離 r は、輝線スペクトルから推定される雲の電離状態、あるいは、リバブレーションマッピングとよばれる方法により決定される。後者の方法は、スペクトルの連続成分に対する輝線の時間的遅れを調べる一種のエコー解析で、前者に比べてより確実だと思われる。

図3で、最近 Wandel¹²⁾によりまとめられたブロードラインクラウドのリバブレーションマッピングによるブラックホール質量と、我々がX線時間変動から求めた質量を比較した。これを見るとわかるように、我々の方法は NGC4051 の例を除いて一桁以内の精度でリバブレーションによる質量に一致している。図3をみればわかるように、NGC4051 のずれが非常に重要であるが、このソースに関してはリバブレーションマッピングによるデータ自体ブレリミナリーとコメントされている¹²⁾ので今後の進展をまちたい。ただ、 $10^7 - 10^8$ 太陽質量程度のブラックホールに対しては数日から数週間の遅延時間も、 10^6 太陽質量あるいはそれ以下のブラックホールに対しては数時間になり可視光の観測としては難しくなってくる懸念がある。一方で、X線観

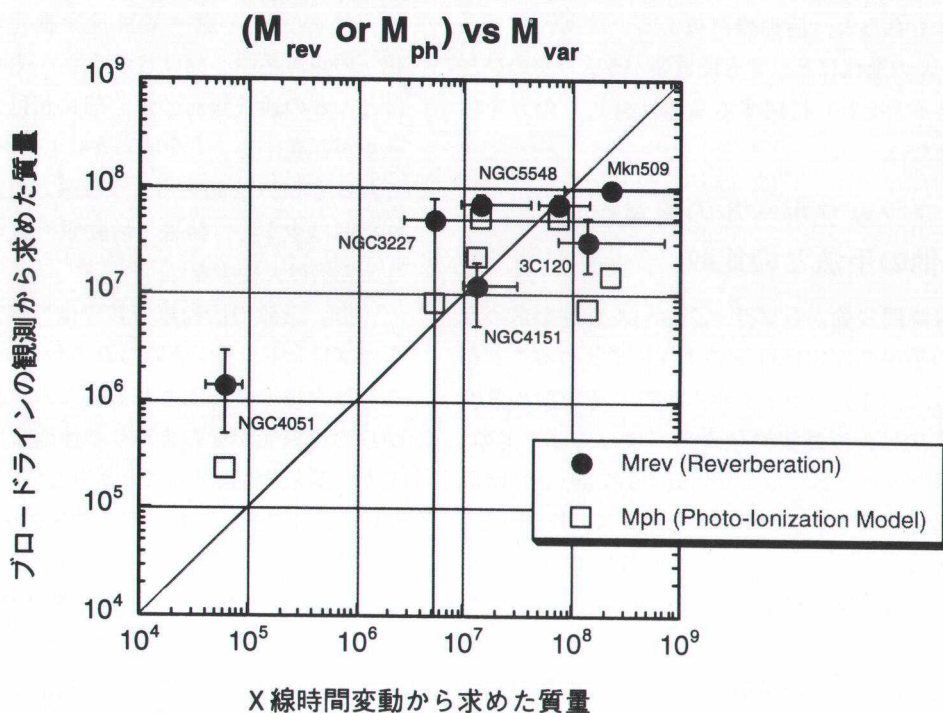


図3 X線時間変動により推定した質量とブロードラインクラウドの観測から推定した質量の比較。質量の単位は太陽質量である。X線時間変動による方法の誤差は、およそ一桁以内であることを示している。

測は分のオーダーの変動がある軽めのブラックホールの方が容易で、逆に数日を超える変動をおこなわなければいけない $10^7 - 10^8$ 太陽質量程度のブラックホールに対しては精度をあげるのが難しい（現実的にX線天文衛星の限られた観測時間を何週間にもわたって確保するのは難しいという意味）。こうしてみると、ブラックホールの質量推定という面において、ブロードラインのリバレーションによる方法と、X線時間変動による方法は相補的な関係にあるのかもしれない。

6. 様々な超巨大ブラックホール

我々が、最初に解析に利用したのは主にセイファート1型銀河であった¹¹⁾。1個のキューサー(3C273)とBL Lac天体(PKS2155)もサンプルに含めていたが、これらの放射はビーミングしていることが明らかで、また、Blazarのパワースペク

トル自体セイファート銀河のそれと系統的に異なることが最近明らかにされつつあるので、とりあえず、除外して考えるべきだろう。一方、ここ数年、セイファート1型銀河の中でもそのブロードラインの輝線幅によって、可視光からX線にいたる領域での性質が異なることが明らかにされつつある。いわゆるナローラインセイファート1、ブロードラインセイファート1という分類で、前者はX線の激しい時間変動でも知られる。我々は、あすか衛星が観測した多数のナローラインセイファート1、ブロードラインセイファート1を解析し、上で述べたのと同じ方法でブラックホール質量を求めた¹⁴⁾。結果として、前者のブラックホール質量は 10^5 から 10^7 太陽質量、後者のそれは $10^7 - 10^8$ 太陽質量の範囲におよそきれいに分離することがわかった(図4)。詳細は論文¹⁴⁾を参考にしてもらうことにして、ナローラインセイファート1、ブロードラインセイファ

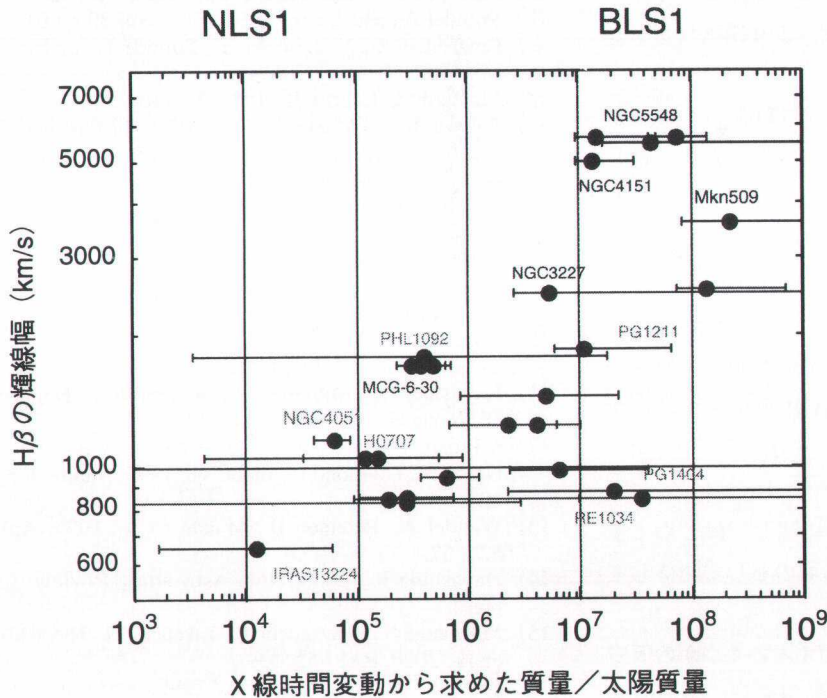


図4：ブロードラインセイファート1とナローラインセイファート1．X線時間変動により求めた質量とブロードライン (H_{β}) の輝線巾．ブラックホール質量の大小が両クラスをつくっていることが示唆されている．

ト1の違いの主たる原因は中心ブラックホールの質量の違いにあるというのが我々の主張である．両者の違いに関するより理論的な考察については文献15)等を参照されたい．

もうひとつ、あすか衛星の重要な発見のひとつに通常銀河、あるいはLINERなどの中心に弱い活動銀河核起源とおぼしきハードなべき関数スペクトル成分をみつけたことがある．いくつかの例では時間変動成分が発見され、活動銀河核起源であることをより強く示唆されている．特に多数回の観測が行われたM81に関しては、伊予本らの論文¹⁶⁾で詳しい解析が行われている．時間変動のスケールが長く観測がとびとびであることから、解析方法には独自の工夫が要求されたが、パワースペクトル(と等価な構造関数)の推定が行われCygX-1との比較で質量の推定が行われている．

我々も栗木らと共同で、複数の弱い活動銀河核

に関して、本記事で紹介したのと同じ方法を適応し、ブラックホール質量あるいはその下限値を求める仕事を行った¹⁷⁾．結果として、これらの銀河における $10^{40} - 10^{42}$ erg/sという活動銀河核としては暗い光度にもかかわらず、変動から推定されるブラックホール質量は $10^7 - 10^8$ 太陽質量あるいはそれ以上と重く、これらがエディントンに比べて著しく暗い光度で光っているということである．ADAFなどの降着モデル、そして、銀河中心核の進化といった側面でも重要な結果であるといえよう．

7. 今後の観測

活動銀河核のX線時間変動の観測は、質量推定という枠にとどまらずいろいろなテーマを含んでいる．一番の問題は対象の時間スケールが、ひとつのソースの中でもまた様々なソースに対しても、何桁にもわたっていることである．観測できるのは時間スケールは限られているので、これを拡大することが当面の課題となる．より短いタイムスケールに対しては、有効面積の大きな検出器が期待できる．この面でもAstro-Eに期待していたが残念な結果に終わったので、当面はXMM-ニュートンに期待したい．特に興味深いのは、パワースペクトルの高周波数側にカットオフがあるのかという課題である．上で述べたようにX線がブラックホールのサイズ、つまりシュバルツシルド半径の数倍のところから出ているとすると、それを光速で割った時間より



短い時間変動は観測されないはずである。そのようなカットオフが観測されれば、より確実にブラックホールの証明になるだろう。

一方、より長い時間スケールの観測、1週間を超える観測はX線天文衛星の運用上なかなか難しい。2000年にはいつからあすか衛星が観測したいいくつかの活動銀河核の1週間～1月の連続データは、貴重な結果を導いてくれるだろう。さらに将来2005年の運用開始を目指し、現在宇宙開発事業団、理化学研究所、大阪大学のグループの共同で準備がすすめられているMAXI ミッション¹⁸⁾がある。MAXI ミッションは国際宇宙ステーションに搭載される高感度の全天探査ミッションとして、多数の活動銀河核の長期変動に関してはじめてまとまったデータを与えてくれるものとして期待している。

本記事ではスケーリングに関するいくつかの仮定をもとにX線時間変動から活動銀河核の中心質量を求める試みを紹介した。ただし、将来の観測によって、あるいは新たな質量推定方法の登場によって、これらの仮定には当然修正が求められるだろう。そもそも、これだけ簡単なスケーリング例が、数桁もサイズの異なる系に対して成り立つ方が不思議である。動物に対する1/4乗則に関しても適当な説明はまだまだ得られていないそうだがブラックホールの方も今後の課題である。いずれにせよ、そこにブラックホール降着系に対する基本的な重要なことがひそんでいることは確信する。同時に重要なのは様々な質量推定法の矛盾をなくしていくことで、活動銀河核の基本的パラメータを押さえていくことであると考える。

参考文献

1) 本川達雄, ゾウの時間ネズミの時間, 1995, 中央公論社.

- 2) Barr P., Mushotzky R.F., 1986, Nature 320, 421.
- 3) Wandel A., Mushotzky R.F., 1986, ApJ 306, L61.
- 4) Lawrence A., Watson M.G., Pounds K.A., Elvis M., 1987, Nature 325, 694.
- 5) McHardy I., Czerny B., 1987, Nature 325, 696.
- 6) Pounds K.A., McHardy I.M., 1988, in Physics of Neutron Stars and Black Holes, ed. Y. Tanaka (Universal Acad. Press), 285.
- 7) Papadakis I.E., Lawrence A., 1993, Nature 361, 233.
- 8) Belloni T., Hasinger G., 1990, A&A 227, L33.
- 9) Miyamoto S., Kimura K., Kitamoto S., Dotani T., Ebisawa K., 1991, ApJ 383, 784.
- 10) Miyamoto S., Kitamoto S., Iga S., Negoro H., Terada, K., 1992, ApJ 391, L21.
- 11) Hayashida K., Miyamoto S., Kitamoto S., Negoro H., Inoue H., 1998, ApJ 500, 642.
- 12) Miyoshi M., Moran J., Hernstein., Greenhill L., Nakai N., Diamond P., Inoue M., 1995, Nature 373, 127.
- 13) Wandel A., Peterson B., Malkan M A., 1999, ApJ 526, 57.
- 14) Hayashida K., 2000, New Astronomy Review, in press.
- 15) Mineshige S., Kawaguchi T., Takeuchi M., Hayashida K., 2000, PASJ 52, 499.
- 16) Iyomoto N., Makishima K., 1999, Astronomische Nachrichten 320, 300
- 17) Awaki H., Sakano M., Terashima Y., Hayashida K., 2000, Astron. Nachr. 320, 308.
- 18) Matsuoka M., et al., 1997, Proc. SPIE, 3114, 414.

X-ray Variability and Black Hole Mass in AGN

Kiyoshi HAYASHIDA

Department of Earth and Space Science, Osaka University, Osaka 560-0043

Abstract: X-ray radiation from active galactic nuclei (AGN) shows random intensity variation with various time scales. We evaluate the X-ray variability with power spectrum and define relative time scale of the variability for each AGN. Under the assumption that this variability is proportional to the size of the central black hole, we can estimate its mass. In this article, we introduce the method and show the results of its application to Seyfert galaxies. Comparison to the mass estimated from broad line width is also made.