

# ブラックホールの証拠を求めて

立教大学理学部教授 北本俊二

## 1. はじめに

ブラックホールとは、いまや子供たちを含めみなさんおなじみの言葉と思う。もともと理論的に存在が予想されたものだが、いろいろな天体観測の結果、ブラックホールは実際に存在すると考えられている。しかし、観測から得られるのは状況証拠だけである。観測を通して天体を研究している者にとって、状況証拠というのは、もうひとつすっきりしない。なんとかして、ブラックホールの確固たる証拠を手に入れたい。ここでは、将来ブラックホールの証拠を掴もうとするひとつの試みを紹介する。

## 2. ブラックホール

ブラックホールであると考えられている天体は大きく分けて2種類ある。最近3番目の種類のブラックホールも注目されている。まずは質量の大きい星がその終末を迎え超新星爆発を起こした後、残骸として残るブラックホールがある。そのブラックホールがもうひとつの星と連星系を構成し、何らかの理由で相手の星からブラックホールへ物質の輸送が起ると、物質は降着円盤という状態を経てブラックホールに落ちる。開放される位置エネルギーの一部は降着円盤内で熱エネルギーに変換され、降着円盤は大変高温になりX線等を放射し、観測できるようになる。

アンドロメダ銀河に代表されるように、我々が住む銀河系の外には、我々の銀河系とは別の銀河がたくさん存在する。それら銀河のほとんどの中心には太陽の数百万倍から数億倍の質量を持つブラックホールがあると考えられている。特に銀河の中心に、点状で非常に高い輝度を持つ活動銀河核と呼ばれるものを持つ銀河がある。銀河核だけで銀河全体の明るさのほとんどを占める場合もある。その銀河核は点状に見えることから、サイズは大きくないことがわかる。小さい領域で大変大きなエネルギーを放射することからその正体はブラックホールであると考えられてきた。今では、いくつかの定量的な観測により、状況証拠もそろってきた。

第3のタイプは中間質量ブラックホールと呼ばれるもので、京都大学のグループによる観測でみつかったものである<sup>①</sup>。それらは、星型のブラックホールにしては重すぎるが、銀河の中心核ではない。それらの性質や成因については、研究が始まったばかりである。

## 3. 観察方法

ブラックホールの近傍の降着円盤は一般に高温であるので、主たるエネルギーをX線として放射している。他の理由で電波を強く放射している場合も多い。X線は大気を透過しないので、人工衛星で観測を行う。X線でも反射光学系を使って撮像観測が可能である。現在活躍している大型X線天文衛星は米国の「チャンドラ」<sup>②</sup>と欧州の「XMMニュートン」<sup>③</sup>の2機である。それ以外にも米国の「RXTE」や日本のグループも加わっている「HETE-2」も活躍している。2005年2月には、日本の5機目のX線天文衛星「Astro-E2」が打ち上げられる予定である<sup>④</sup>。「チャンドラ」は可視光の大型望遠鏡と肩を並べるおよそ0.5秒角の分解能(空間上の2点を分離して見分けられる最小の視角。望遠鏡の解像度を示す数値)を持つ。「XMMニュートン」も10秒角程度の分解能であるが、大変大きな集光面積(微弱なX線を検出する能力)を持つ。X線で観測して得られる情報は像だけではなく、光子のエネルギーも知ることができる。「Astro-E2」はエネルギーを弁別する能力が各段に優れており、大きな期待が寄せられている。

電波では、複数の電波望遠鏡で受信した信号の位相関係を調べる干渉計という技術で、電波源の像を合成できる。ひとつの電波天文台で複数の望遠鏡を配置する場合もあるが、日本とアメリカ、あるいは欧州といった各国の電波望遠鏡を組み合わせたか、日本の人工衛星「はるか」に搭載した電波望遠鏡と地上の電波望遠鏡で取得したデータを調べる事で、1ミリ秒角という分解能を達成している。

可視光の望遠鏡は1990年代で大きく様変わりをした。地表にある望遠鏡で天体を観測する場合、大

気の屈折率が場所により異なり、揺らぐため、天体の像がぼやけてしまう。宇宙から観測する「ハッブル宇宙望遠鏡」は大気の揺らぎによる撮像の限界を打開し、およそ0.1秒角という分解能を達成している<sup>9)</sup>。一方、地上ではハワイにある日本の「すばる」望遠鏡<sup>10)</sup>をはじめとした直径8mから10mの望遠鏡が次々建設され、その大きな集光能力を使って宇宙望遠鏡とは相補的な観測をしている。さらに、地上の望遠鏡でも大気による像の揺らぎを補正する「補償光学」という技術が実用化されている。そこでは、光学系の一部に形状を変化させることができる可変形状鏡を使う。そして可変形状鏡を動かして、大気による揺らぎを時々刻々と補正するのである。補正しながら、お目当ての天体を観測すれば、大気による揺らぎを軽減した像を取得することができる。「すばる」望遠鏡もこの補償光学を使いおよそ0.2秒角の角度分解能を達成している。

#### 4. ブラックホールの撮像

ブラックホールは太陽の10倍程度の質量のものならシュバルツシルド半径(ブラックホールの大きさの基準となる半径)が30km程度で大変小さい。太陽に最も近い恒星でもその距離はざっと1パーセク( $3 \times 10^{13}$ km)である。1パーセクの距離にある30kmの天体を分解するには0.2マイクロ( $\mu$ )秒角の分解能が必要である。一方、銀河核のような大きなブラックホールのうち、我々の銀河の中心にあるものと、M87(おとめ座銀河団の中心にある楕円銀河)の中心にあるものが見かけが大きく、およそ10 $\mu$ 秒角と推定されている。このように、ブラックホールは大変小さいので、まだ、直接撮像することはできない。図1に、ブラックホールを含めて、いろいろな天体の典型的な距離と、大きさを示した。

それでも、少しでもブラックホールの近傍を観測から調べようと努力されている。ハッブル宇宙望遠鏡や電波干渉計ではブラックホールの近傍にある円盤状の構造と思われるものを検出しているし、また、銀河の中心近くの星の運動を詳しく調べ、その運動から中心にある質量を推定する等で、ブラックホールの存在の証拠を掴もうとしている。

#### 5. 撮像以外でブラックホールを見る

小さくて点状にしか見えない天体でも、分光(電

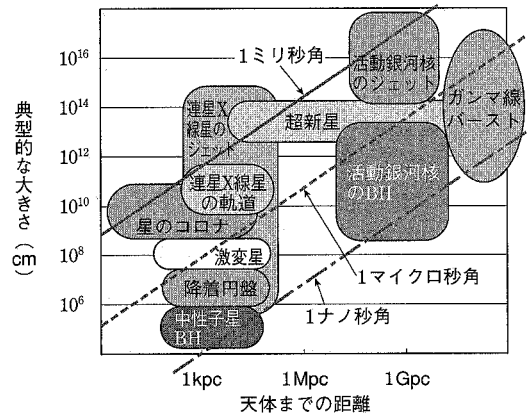


図1 いろいろな天体の典型的な距離と大きさ(見かけの角度が1ミリ秒、1マイクロ秒、1ナノ秒となる線も示した)

磁波を波長ごとに分離すること)することでエネルギースペクトルを得ることができる。そのスペクトルにはいろいろな元素からの輝線や、吸収線が観測されることがある。それら輝線や吸収線のエネルギーは本来決まっているものであるが、放射している天体や原子が動いていた場合、ドップラー効果のために、輝線のエネルギーが変化して観測される。逆に輝線のエネルギーを調べることで、その天体やガスの視線方向の速さを知ることができる。たとえば、降着円盤は大変高速で回転している。その回転のドップラー効果から期待される輝線の形のモデルとある活動銀河核から観測された鉄の輝線の形を比較して、その輝線はシュバルツシルド半径の10倍程度のところから放射されていることが推定された<sup>11)</sup>。また、別の活動銀河核の近傍で観測されるいくつかの水分子のメーザー源(増幅された水分子の輝線)のドップラー効果や位置関係を測定して、大変小さな領域に大変大きな質量が存在することが結論された。通常の星や星の集団とは考えにくく、ブラックホールの存在が示唆されている<sup>12)</sup>。

X線を出している天体は数秒程度の時間スケールでX線の明るさが激しく変動している。X線パルサーと呼ばれる天体は周期的なX線の強弱を示す。また、周期性が見られずいろいろな時間スケールで乱雑に変動しているものもある。図2にX線パルサーの代表である「ケンタウロスX-3」と不規則な時間変動を示す「はくちょう座X-1」の時間に対するX線強度を示した。これらの時間変動は天体の大きさや時には形状まで推定できる情報を持つ<sup>9),10)</sup>。光の速度

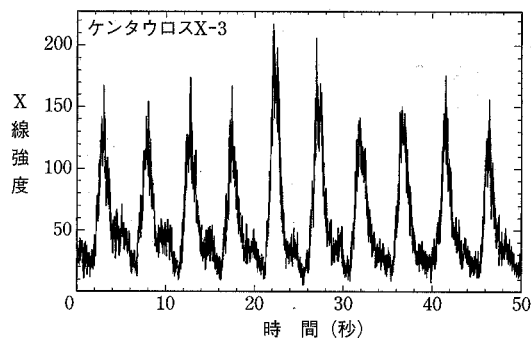


図2 X線パルサー、ケンタウロスX-3は周期的な変動を示すが、ブラックホール候補星、はくちょう座X-1は不規則な変動を示す

は有限であるので、自然な考え方をすれば放射領域を光速で割った時間より速く変動しえない。「はくちょう座X-1」は0.1秒程度の時間スケールで5倍程度の強度変動を普通に示すので、X線放射領域は3万km以下であることはすぐに推定できる。いまだではいろいろな観測から太陽質量の9倍以上のブラックホールであろうと考えられている。

## 6. Xmas計画

このように、いろいろな手段を使ってブラックホールに迫ろうとしているが、どれも間接的な方法である。ブラックホールの確固たる証拠をつかむにはどうすればよいただろうか？やはり、降着円盤の中心にブラックホールが鎮座し、ブラックホールのところは中抜けで、その強力な重力の効果でゆがめられて見える降着円盤の像を直接撮像できればよい。まさにSFの世界である。4章に書いたように、比較的大きい近傍の銀河や我々の銀河中心核にあるブラックホールでも大きさ10 $\mu$ 秒角で、大変小さい。

夢物語だろうか？もし、この値がほんとなら、まったく不可能という値ではない。電波干渉計ですらミリ秒角の分解能を達成し、さらに数10 $\mu$ 秒角を目指して開発計画を進めている。日本の宇宙電波干渉計である「はるか」の後継機として提案されている「VSOP-2」はまさにブラックホールの直接観測も視野に入れて計画されている。

それでは、他の波長領域ではどうだろうか？そもそも望遠鏡の分解能とは何なのだろうか？装置の製作精度や観測条件にかかわる性能劣化は別として、望遠鏡の分解能を原理的に決める要因は光が波の性質を持つことにより生じる回折現象である。有限の大きさの穴を通った光は広がってしまう、あるいは

有限の直径の鏡で反射させた光は広がってしまうのである。その広がり大きさが原理的な分解能(回折限界)を決めてしまう。光の波長に対して反射鏡の直径が大きければ大きいほど、回折による広がり小さくなり、望遠鏡の角度分解能があがるのである。その限界、回折限界は、およそ、光の波長を口径で割った値である。前にのべた宇宙電波干渉計の超長基線は超大型の口径を持つ電波望遠鏡の一部であると考えてよいので、分解能を大変高くすることができるのである。

大きな口径の望遠鏡を使えば、原理的に分解能をあげることができる。もうひとつ、短い波長で観測すれば、やはり、原理的な分解能を良くすることができる。現在、可視光の望遠鏡は大きいもので口径10mである。数10mという望遠鏡建設の提案も聞いている。しかし、可視光では波長はおよそ500nmであるので、たとえ100mの望遠鏡を作って回折限界を達成しても角度分解能は0.02秒角である。また、大気による揺らぎもあるので、地上観測では補正しても実現できるかどうか大変難しいであろう。宇宙に100mの望遠鏡を建設するというのもそう簡単ではない。では、もっと波長の短い領域、X線ではどうだろうか？米国のX線天文衛星「チャンドラ」は口径1.23mである。波長はおよそ0.1~1nmであるので回折限界を達成できていれば、2~20 $\mu$ 秒角の分解能となる。近傍の銀河核に潜むブラックホールを分解できる値である。X線の望遠鏡ならブラックホールの直接撮像が可能かもしれない。しかし、実現されているX線望遠鏡の角度分解能は「チャンドラ」で0.5秒角である。それはなぜなのだろうか？回折限界を達成するには、望遠鏡の鏡面の形状、複数の鏡の相対位置の調整等を波長よりもよ

い精度で行う必要がある。すなわち1m以上の大きさのものを1nm以下の精度ですべてを調整しなければいけない。鏡の形状も1nmの精度で磨き上げる必要がある。これは難しそうだ。

米国ではX線干渉計という方向で超高角度分解能を目指している計画がある。これは、複数の平面鏡を用いて干渉計を構成するという、うまい方法である。平面の鏡なら精度を上げることは比較的優しい。しかし、干渉させるためには数100mとか数kmとかの距離が必要であり、複数の人工衛星を編隊飛行させることで実現しようと考えている<sup>(1)</sup>。実現までまだ時間がかかりそうだ。私たちはX線干渉計というよりは普通の望遠鏡で回折限界にせまる方法はないだろうかかと研究を始めた。

まだ、技術的な問題で、「チャンドラ」等が観測している波長領域というわけにはいかない。13.5nmの波長領域では、多層膜という技術を使い普通の天体望遠鏡のような反射望遠鏡を作ることができる。この波長領域の技術は次世代のIC(集積回路)を製作するために世界中で競って研究が進められている。また、「すばる」望遠鏡をはじめとして、補償光学の技術も進んでいる。現在、回折限界の性能を出すために困難なのは、鏡や望遠鏡の大きなスケールでの形状を作り上げることと、それらを調整しあわせることである。従って必要なのは比較的大きな形状の補正である。それを補償光学の技術を使って実行できないだろうか？私たちは、多層膜の技術と補償光学の技術を使って、13.5nm領域で回折限界を目指したX線望遠鏡を実験室で作ってみることにした。これを、X線でミリ秒角(milli-arc-sec)を目指すプロジェクトということで、X-mas Projectと呼んでいる。今は、主鏡は有効直径80mmで焦点距離が2mの多層膜を蒸着した反射鏡を使っている。そして、副鏡として「すばる」で使っている可変形状鏡と同じ形式で少し精度のよいものを使っている。こ

の変形状鏡は普通は可視光で使用するので、X線は反射しないものであったが、昨年度、多層膜化することに成功した。これらの装置はすべて真空中で動作させる必要があるので長さ4m以上もある真空チャンバーを準備した。図3に概念図を、図4に準備している真空チャンバーの写真を示す。今はまだ、可視光による実験を行い、X線での実験に至っていないが、可視光でのセンサーを使って補償光学系として動作させることに成功している。まだ波面の精度も十分ではないが、さらに補償の方法を試行錯誤することで精度向上を目指す。また、真空試験の準備がほぼそろってきた。今は、X線による世界で初めての補償光学系の実現を目指している。

#### 参考文献

- (1) Matsumoto et al. 2001, *A&J*, 547, L25
- (2) チャンドラのホームページ <http://chandra.harvard.edu/>
- (3) ニュートンホームページ <http://xmm.vilspa.esa.es/>
- (4) Astro-E2ホームページ <http://www.astro.isas.ac.jp/astroe/>
- (5) ハッブル宇宙望遠鏡ホームページ <http://oposite.stsci.edu/>
- (6) 「すばる」ホームページ [http://subarutelescope.org/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/j_index.html)
- (7) Tanaka et al. 1995, *Nature*, 375, 659
- (8) Miyoshi et al. 1995, *Nature*, 373, 127
- (9) Miyamoto et al. 1991, *A&J*, 383, 784
- (10) Kohmura et al. 2001, *A&J*, 562, 943
- (11) MAXIM ホームページ <http://maxim.gsfc.nasa.gov/>

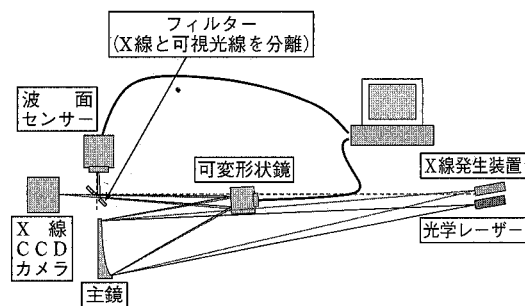


図3 X-mas Projectの望遠鏡の概念図。波面を測定して、可変形状鏡で補正する

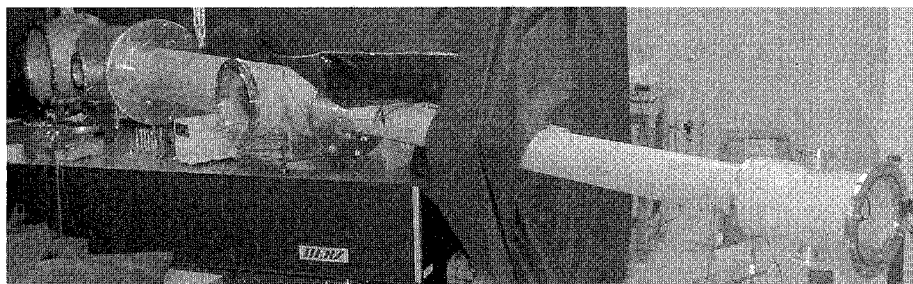


図4 実験室での準備中のX線望遠鏡のための真空チャンバー。長さは4m30cmあり、除振台の上に設置した