

Title	ブラックホール：相対性理論と宇宙物理学
Sub Title	Black hole in relativity and astrophysics
Author	中村, 康二(Nakamura, Koji)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2004
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 No.36 (2004. 9) ,p.41- 56
JaLC DOI	
Abstract	一般相対性理論から予言されるブラックホールと，宇宙の天体の一つとして名を連ねているブラックホールとは少し微妙にニュアンスが違うようである。この微妙な違いを浮き彫りにするため，現在の天文観測でブラックホールとはどういう意味で使われているかを幾つかの観測を概説することで紹介する。
Notes	
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20040930-0041

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

ブラックホール：相対性理論と宇宙物理学

中 村 康 二[†]

Black Hole in Relativity and Astrophysics

Kouji NAKAMURA

一般相対性理論から予言されるブラックホールと、宇宙の天体の一つとして名を連ねているブラックホールとは少し微妙にニュアンスが違うようである。この微妙な違いを浮き彫りにするため、現在の天文観測でブラックホールとはどういう意味で使われているかを幾つかの観測を概説することで紹介する。

1. はじめに

ブラックホールとは、光が抜け出せないほど重力の強い天体のことをいう。この天体は、重力の理論である一般相対性理論から予言される。相対性理論によれば、通常の物質は光より速くは運動できない。このことはこのブラックホールが「そこからは何者も抜け出せない天体」であることを意味し、この状況設定はよくSF小説などで使用される。SF小説などでその名前が有名になっていることから、このブラックホールの奇抜さだけが独り歩きをしている感がある。しかし、このブラックホールという天体は現在でも自然科学の研究対象のひとつであり、いまだに完全には明らかにされていない天体である。この記事で筆者が明確にしたいことはこの一文に尽きる。

さて、ハリウッド映画やSF小説は別にして、ブラックホールという天体の名前がよく現れるのは、次の通りであろう。

[†] 総合研究大学院大学数物科学研究科天文科学専攻（国立天文台理論天文学研究系）〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1 : Department of Astronomical Science, the Graduate University for Advanced Studies, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan. E-mail address: kouchan@th.nao.ac.jp 平成10年4月－平成12年3月慶應義塾大学商学部助手（嘱託）在職。

1. 相対性理論の教科書, 論文, 解説記事等
2. 天体物理学の教科書, 論文, 解説記事等
3. 天体観測等の教科書, 論文, 解説記事等

現在のところの観測精度では, 2. と 3. は同じ物を指していると思われるが, それと 1. はニュアンスが微妙に異なる。このニュアンスの違いが, 先に「完全には明らかにされていない天体」と記した部分である。言葉のニュアンスの違いは, 概念の曖昧さからくるものであり, 将来的にその分野の発展の鍵となる可能性が高い。

この紀要記事は, 2003年に慶應義塾大学にて開催された横浜市民大学講座のうち, 11月29日に行った筆者の講演「ブラックホール探索」に基づくものである。この記事の構成は次の通りである。第2節で理論上のブラックホールについての概説をし, それをふまえた上で, 第3節と第4節にてブラックホールの観測的な根拠の概説をする。これらはおそらく今後覆らないだろう。第5節で現在の観測とそれに対してどのような議論がなされているかを簡単に概説し, 最後に第6節でまとめとする。この記事は, ブラックホールの観測について全てを網羅しているわけではない。しかし, この記事を通して, 上記の微妙なニュアンスの違いを理解していただき, 今後の観測が大いに期待される事を感じ取っていただければ幸いである。

2. 理論上のブラックホール

2.1 数学的な産物のブラックホール

ブラックホールはもともと数学的な理論上の産物である。ブラックホールが理論の中に現れる要因は, 一般相対性理論のいくつかの特徴によるものである。1つ目は, 光の速さが $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ という有限の値を持っているという事実が一般相対性理論に反映されているということ。2つ目は, 一般相対性理論では, 通常物質と同様に光さえも重力に引かれて落ちるという特徴である。この「光が落ちる」という効果は, 重力レンズ効果として既に観測的にも確立しており, 現在はそれを使って銀河に付随する質量を測ることなどにも応用されている。この2つの特徴を反映して, 重力場が強ければ, その強い重力場から逃れるための脱出速度が理論的には光速になり得る。この強い重力場がブラックホールである。

以下は初等的な力学の話であるが, この脱出速度とは, 物体が星の重力場から逃るのに必要な初速度である。物体が重力の束縛を離れるためには, 物体の運動エネルギーが星の重力エネルギーよりも大きければよい。これをニュートン力学の範疇で書けば

$$\frac{1}{2}v^2 > \frac{GM}{r} \quad (1)$$

となる。 v は物体の速度で, G は万有引力定数。 M は星の質量で r は星の中心から物体まで距離である。この不等式が決める v の下限が脱出速度である。この式に次のような解釈を与える。こちらで用意できる物体の運動エネルギーが限られているにもかかわらず, なお星の重力場が

ら物体を抜け出させようと思えば、重力場の弱い、つまり r の大きなところに物体を持って行って、手持ちの運動エネルギーを与えればよい。手持ちの運動エネルギー ($v^2/2$) に対して、 r をどれだけ大きくすれば良いかは、(1)の不等式を

$$r > \frac{2GM}{v^2} \quad (2)$$

とすればよい。この式は、初速度が光速であっても、ある半径より外側でなければ、重力場を振り切って飛び出すことはできないことを意味する。速度が光速 ($v=c$) であるときの不等式 (2) の下限

$$r_g := \frac{2GM}{c^2} \quad (3)$$

は重力半径とよばれ、ブラックホールの半径である。ちなみにこれはニュートン力学を用いた議論であり、議論としては正確ではない。しかし、(3)の結果だけは、一般相対性理論の球対称厳密解を用いた議論によるものと係数も含めて一致している。

2.2 数学的な産物から天体物理学の対象へ（チャンドラセカール質量）

さて、星の質量が太陽の質量 $M_\odot$ 程度であれば、この重力半径は約3 kmとなる。これは太陽が燃えつきると将来的にブラックホールになるということを意味するものではない。したがって、自然界でブラックホールという天体が存在するためには、なんらかの物理過程で太陽質量程度のものが半径3 km程度の領域の中に収まるほど高密度にならなければならない。これが本当に可能であろうか？

星の進化の理論によれば、星の進化の成れの果はその質量によって分類される。星は、基本的に自分の自重によりその内部の圧力を高め、その圧力により核反応を起こし、その熱で自重を支えている。主系列星の場合核反応の燃料は主に水素だが、恒星の質量が大きければ中心部の圧力が高くなり、さらに重い元素が燃料となる。星の最終段階は、どこまで重い元素を燃料にするかに依存しており、それが星の質量で分類されている。この分類には、炭素の核反応が重要な役割を果たしている。 $3M_\odot$ よりも軽い星は炭素の核反応までたどりつかず、その最終段階は電子の縮退圧により支えられる白色矮星となる。 $3M_\odot \leq M \leq 8M_\odot$ の範囲の星は、炭素・酸素の中心核を形成し、そこでの爆発的な核反応により超新星爆発をし、その後何も残らなくなる。星の質量が $8M_\odot$ を越えると、炭素・酸素の安定な核反応を経て、鉄までの原子核の生成をする。鉄の原子核は、結合エネルギーがもっとも大きいため核融合的に安定である。この鉄までの核反応をしつくと、それまで核反応による熱で支えていた自重が支え切れなくなり、星の外層部が重力崩壊を起こし、超新星爆発をする。この爆発で外層部は吹っ飛び、その反動で中心部はさらに高密度になる。その結果、中性子星などの高密度天体を形成する。連星系の場合は、もともとの質量が $8M_\odot$ 以下であったとしても、伴星からの質量降着によって、上記の $8M_\odot$ 以上で起こるのと同様の現象に導かれることがある。これらの現象により、高密度の天体は生成され得る [1]。

次に問題になるのは、「こうしてできた高密度の天体の自重を支えるほどの力が実際にあるか?」である。もしあればそれは天体として存在し、もしなければさらに重力崩壊をする。

この自重を支える力の存在についての考察は、1939年のチャンドラセカールによる白色矮星の質量の上限に関する議論に端を発する。白色矮星を支える力は、電子の縮退圧である。この縮退圧とは、電子がフェルミ粒子であり、2つの電子が同じ状態をとることはできないという性質からくる。チャンドラセカールはこの縮退圧により支えられている星のモデルを考察した。その結果、白色矮星の質量は $M \leq 1.4M_{\odot}$ という範囲になることを示した。この白色矮星の質量の上限はチャンドラセカール質量と呼ばれ、この質量以上の白色矮星は存在しないことを意味している。

一方、中性子星は、白色矮星よりさらに高密度な天体である。中性子星を支える力は、中性子がやはりフェルミ粒子であるということからくる中性子の縮退圧である。したがって、中性子星にもチャンドラセカール限界と同様の質量の上限の存在が、いくつかのモデル計算で明らかになっている。この上限は中性子星内部の中性子の状態に依存する。ただし、中性子星内部での中性子の状態自身が未だに明らかでないため、中性子星のチャンドラセカール質量として決定的なものは未だに解かっていない。これは今後のこの分野の研究に期待されるところである。

中性子星のチャンドラセカール質量に関する議論はいまだ確立していないが、実はこの質量の上限に関する考察で、きめつけのものがあある。それは1974年にローデスとルッフィーニによる中性子星のチャンドラセカール質量に関する議論である[3]。彼らの結論は、「いくつかの仮定が正しければ、中性子星の質量は $3.2M_{\odot}$ 以下である」というものである。その「いくつかの仮定」とは、以下の通りである。

1. 一般相対性理論は正しい。
2. 中性子星内部の物質はミクロな意味で安定。
3. 中性子星内部の物質の音速は光速を越えない。
4. 中性子星表面付近の物質の状態は、既に知られているもの。

これらの仮定について少し説明を加えておく。1は重力の基本方程式を与える。2は物質の音速が常に実数であること。物理的には音速が虚数になることはありえて、それは一種の不安定性を意味する。3の仮定は物質に対する因果律の要請であり、4は中性子星内部の重力場と外側の重力場を表面でつなげる際に使用される。これは彼らの議論をたどればわかることであるが、本質的に上記の $3.2M_{\odot}$ という上限を決めているのは、3の因果律の仮定である。この仮定に反する物質を現在のところ我々は知らない。

通常、中性子星の質量の上限に関する議論は、その内部の中性子の状態をもとにし、中性子星内部の物質の状態方程式、つまり物質密度と圧力の関係がどのように与えられるのかを求めることに多くの労力がさかれる。中性子星内部での正確な中性子の状態が解明できれば、この

状態方程式が明らかになり、チャンドラセカール質量に関する議論が可能になるからである。しかし、ローデスとルッフィーニの議論はこの路線とは別で、物質の状態方程式の代わりに、3の因果律の仮定を要請した。それにより、中性子星のチャンドラセカール質量の上限を与えたのである。チャンドラセカール質量自身が中性子星の質量の上限を意味する。一方、ローデスとルッフィーニが与えたものは、理論の不確定要素を3の因果律の仮定で置き換えることで、中性子星のチャンドラセカール質量がどこまで大きくなり得るかの上限を与えたのである。彼らの質量上限が非常に強力なものであることは、この上限が中性子星内部の状態方程式の詳細には無関係であるという点にある。今後、中性子星内部での中性子の状態もいずれ解明されるであろう。しかし、解明されたとしても、もし上記の3の因果律の仮定が正しい限り、 $3.2M_{\odot}$ を超えることはない。したがって、彼らの結論は、現在の物理学の範疇では $3.2M_{\odot}$ よりも大きな質量を持つ中性子星は存在しないことを意味する。もちろん裏を返せば、もし、 $3.2M_{\odot}$ 以上の質量を持つ中性子星が存在していれば、上記の仮定のうちどれか、特に3の因果律の仮定が間違っているということにもなる。

中性子星は、知られている天体の中で最も高密度な天体である。その質量の上限の存在は、それよりさらに高密度な天体の存在を予言している。質量の大きな星の超新星爆発で最後に残る高密度中心核がこの上限を超えない理由はないし、たとえ超新星爆発で残った中心核が中性子星であったとしても、周りからの質量降着によりこの上限を上回る状況が宇宙物理学的にあり得るからである。その場合、我々はその高密度天体がどのような力で自重を支えるかを知らないことになる。

2.3 宇宙物理学でのブラックホールと相対性理論でのブラックホール

このように、中性子星程度以上の高密度な天体がこの宇宙にあることは、宇宙物理学的には自然である。しかし、この天体がどのような力によりその自重を支えているかを我々は知らない。一般相対性理論をもとに考えると、この「よくわからない天体」は、通常天体としてとどまることはできず、無限に重力崩壊し、その結果ブラックホールが形成される。つまり、現在のところ、この「よくわからない天体」は、「ブラックホール」であるというしかない。この「その他の天体では説明できない天体」が宇宙物理学でいう「ブラックホール」の定義である。ここで注意しておくべきことは、この「ブラックホール」の定義は、本質的には否定文であるという点である。

それに対し、一般相対性理論で予言されているブラックホールとはどのようなものであろう。一般相対性理論は、重力の理論の1つである。この理論では、重力は時空の曲がり方として表される。現在の観測、実験の精度では、この一般相対性理論が最も単純で精密な重力の理論として位置づけられる。通常天体が物質の塊であるのに対し、一般相対性理論が予言するブラックホールは単に時空の曲がりの極端な状況に過ぎない。そしてブラックホールは事象の地平面、つまり、光も抜け出せない一方通行の面の存在によって定義される。この定義をそのまま流用すれば、「ブラックホールであることを確認する」とは、究極的には「事象の地平面の存在を

確認する」ということである。しかし、定義からしてこれは、外からブラックホールを観測しているだけでは原理的に不可能である。

ここまでをまとめておくと、宇宙物理学というブラックホールは、我々の知っている物質では説明できないほど高密度な天体である。それに対し、相対性理論で予言されているブラックホールは、事象の地平面の存在で定義される時空構造のことで、原理的にこの事象の地平面そのものを遠くから“観測する”ことは不可能である。このように、両者は微妙に意味するものが異なる。

しかし、近年の観測技術の進歩は目覚ましいものがあり、宇宙物理学でのブラックホールと相対性理論でのブラックホールの違いを徐々に埋めつつある。そこで以下では、「現在のところの天文観測で、何を根拠にブラックホールと呼んでいるか」ということに着目し、これまでの観測をいくつか概説することにする。観測されているブラックホールとして代表的なものの1つは、はくちょう座X-1に代表される太陽の数倍から数十倍の質量を持ったブラックホールである。これらのブラックホールは、恒星質量ブラックホールと呼ばれており、その形成過程は上記の星の進化の成れの果であると考えられている。また、多くの銀河の中心部には巨大なブラックホールがあると言われている。このブラックホールは、質量が $10^6 M_{\odot}$ – $10^9 M_{\odot}$ もあり、巨大ブラックホールと呼ばれる。この記事では、これらのふたつのブラックホールについて主に解説をする。

3. 恒星質量ブラックホール

3.1 恒星質量ブラックホールの見つけ方

恒星質量ブラックホールは、『質量がだいたい $10 M_{\odot}$ 程度のものであり、多くの場合太陽のような恒星と連星をなしている。この伴星からガスが流れ落ち、重力エネルギーをX線の形で放出し、そのX線が観測されている。典型例として、はくちょう座X-1。』と解説されているのを見かける。これをもう少し詳しく述べることにする。

そもそも、ブラックホールそのものは光を出さないため、その直接的な観測は原理的に困難である。はくちょう座X-1のようなブラックホールは連星系をなしていて、伴星からのガスが降り積もっている。そのガスは、渦を描きながら落ちていき、ブラックホール近傍では円盤状になる。この円盤は降着円盤と呼ばれる。この降着円盤内の物質はほぼケプラー回転運動をするが、円盤内では粘性が働くためにエネルギー損失と角運動量輸送をしながら徐々に中心に向かって落下していく。この粘性による熱で円盤は加熱され、黒体輻射として光り、それを我々は観測しているのである。円盤の温度は半径によって異なり、中心部に行くほど高くなる。最終的に 10^7 K程度まで達することになり、X線を放射する温度となる [2]。

ブラックホールが連星系をなしていても、質量降着がなければこのような現象は起こらず、その発見は困難となる。ある恒星の吸収線からドップラー効果が確認され、それが連星系で、相手の星は見えないけれど質量が大きいということになればブラックホールである可能性は高

い。実際、この方法で系外惑星探査が現在行われている。しかし、これには多くの星をしらみつぶしに観測するという手段を取るしかなく、効率的ではない。また、単独のブラックホールを見つけるのはさらに困難である。単独のブラックホールが目の前を通ったとき、背景の恒星がブラックホールの重力場による重力レンズ効果でその明るさを変化させる。この効果で単独のブラックホールを見つけようという観測もなされている。しかし、今のところこの効果によるブラックホールの発見については、確定的なことは言えていないようである。

質量降着のない連星の一方がブラックホールであることや、単独のブラックホールが存在することが完全に否定されているわけではない。しかし、我々の観測手段の事情から、恒星質量ブラックホールは基本的にX線天体である事が多く、このX線で明るいという事実が非常に小さい領域に質量が集中している証拠となる。これに加え、質量を求めることが観測的に可能で、その質量がだいたい $3 M_{\odot}$ を越えていればブラックホールと呼ばれているようである [4]。

3.2 はくちょう座X-1の場合

以上のことを、はくちょう座X-1を例に具体的にみる事にする。

X線で星空を見ようということがはじまってすぐ、はくちょう座の方にX線で明るい天体が観測された。その正確な位置決定のために電波観測や光学観測が行われた。そこにあったのは、HDE226868という9等星のB0型青色巨星といわれる型の何でもないよくあるタイプの星であった。この星がX線を出しているとは考えにくい。そこで、その恒星の吸収線や輝線を観測し、その時間変化を測定する。この時間変化は、恒星の微妙な運動によるドップラー効果で解釈でき、連星系であることがわかる。

連星の軌道が円である場合、軌道を決めるパラメータは二つの星の質量、連星間の距離、そして我々から見たときの軌道傾斜角である。星のスペクトル型を決めることでその星の質量と大きさがある程度推定でき、その星の微妙な運動によるドップラー効果から視線方向の速度と連星の周期がわかる。軌道傾斜角についての情報には、X線星の伴星による食の情報を使う。星が他の星に隠されることを食というが、はくちょう座X-1は食がない。伴星の大きさはスペクトル型からある程度推定されているので、この食がないという情報が軌道傾斜角に制限を与え、地球からはこの連星の軌道面をだいたい上方向から見ていることになる。スペクトル型からわかる質量の不定性もあり、正確な質量を出すことは困難であるが、おおざっぱにX線を出している星の質量は、 $7 M_{\odot}$ よりは重いと思われる。その質量が $3 M_{\odot}$ を超えているため、このX線星が中性子星ではないことがわかる。これを根拠に、はくちょう座X-1は「ブラックホールである」という。

大きさについての情報を得るための観測としてはX線で明るいという事実以外に、X線の時間変化を観測するというものがある。『X線は電磁波であり、その速度は有限である。ブラックホール近傍で同時刻にX線が出されても、我々から遠い側と近い側では時間差が出る。これよりも短い時間変化はあるかもしれないが、我々が最終的に観測できるのは、個々の現象の重ね合わせであり、仮に短い時間変化があったとしても馴らされる。一方この大きさからくるX

線の時間のずれはいつでも出てくるため、重ね合わせの結果に残る時間変化はこの大きさを反映したものとなるはずである。』という理屈を用いる。これにより、最も短い時間変動を測定すれば、それはその天体のサイズを反映したものになる。はくちょう座X-1について、観測できている最も短い時間変動は数ミリ秒のものである。一方、太陽質量の10倍程度のブラックホールで期待される時間変動は、0.1ミリ秒程度となるはずである。この値よりは少し大きめではあるが、これがはくちょう座X-1が非常に小さな天体であるという1つの証拠とみなされている。

以上がはくちょう座X-1がブラックホールと呼ばれている根拠である。同様の観測により、現在数十個のブラックホールがX線星により観測されている。その中には中性子星で見られるはずの表面からのX線の成分が見られないということを根拠にしているものもある[4]。

上記のことからわかるように、X線の観測の解釈には降着円盤などの理論モデルがはいる。これらの観測はブラックホールそのものの観測というよりは、中心天体がブラックホールであるということを前提にしたまわりのガスの降着の仕方についての観測という側面が強い。特に、X線の観測は現在のところ空間分解能がそれほどあるわけではない。しかし、現在進行中の観測計画の中に、空間分解能を向上させ、ブラックホール近傍の時空構造を直接見ようという計画まである。空間分解能を向上させる一方で、観測するターゲットも考慮する必要がある。観測技術により空間分解能をあげたとしても、恒星質量ブラックホールの近傍は非常に小さいため、直接観測は困難である。その一方、次で概説する銀河中心にある巨大ブラックホールは、その重力半径が桁違いに大きい。これは、空間分解能をあげた観測ターゲットとなりやすい。

4. 巨大ブラックホール

巨大ブラックホールは多くの銀河の中心にあると考えられている。銀河の中には活動銀河核と呼ばれる明るく活動的な中心核を持つものがあり、短い時間変動も観測されている。前述の通り、これらは小さな領域から大きなエネルギーが放射されていることを意味し、その中心にはブラックホールがあると考えられている。その質量は恒星質量ブラックホールよりもはるかに大きく、太陽の $10^6 \sim 10^9$ 倍と考えられている。活動銀河核以外の渦巻銀河や楕円銀河の中心にもあるとされており、観測的な根拠は多様である。

星の進化の理論によれば、ブラックホールは星の最終段階として位置付けられる。しかし、我々の知る恒星で最も重いものは太陽の数百倍程度である。超新星爆発によりできるブラックホールはそれよりも軽いはずであるから、この進化で形成されるブラックホールの質量は3倍から数百倍程度の範囲に収まるはずである。すると、巨大ブラックホールの質量はこの範囲には入らないことになり、星の進化の最終段階として直接作られるわけではないことになる。事実この巨大ブラックホールの形成シナリオは完全にわかっているとはいえない。これは銀河の形成シナリオで決定的なものがいまだにないということと密接に関係している。

この巨大ブラックホールがブラックホールであるとされている観測的根拠は、基本的にはく

ちょう座X-1の場合と同様である。つまり、他の天体に及ぼす重力を測ることによって、ブラックホール候補天体の質量を推定する。しかし、質量からだけでは、星の大集団である可能性を否定できない。そこで、候補天体の体積の上限を推定することで質量密度の下限値を求める。その質量密度を物理的に説明しようとして、ブラックホール以外では説明できないような高密度であれば、ブラックホールであると断定する手法をとる。

話は単純であるが、実際にこれを実行しようとする、候補天体の質量を正確に測り、候補天体を含む宇宙空間の体積を小さく絞り込んで正確な質量密度を得ることが必要である。体積を小さく絞り込むことはある意味ブラックホールの直接観測をすることに近い。その点巨大ブラックホールはこの直接観測のターゲットにふさわしい。質量が桁違いに大きいので、重力半径がそれに比例して大きくなり、恒星質量に比べて角度分解能はあらくてもよい。実際、はくちょう座X-1を直接観測しようと思えば、地球との距離と重力半径から $10^{-5}\mu\text{as}$ の角度分解能が必要である。それに対して、我々の銀河中心のいて座A*(SgrA*)という巨大ブラックホール候補天体は、 $10\mu\text{as}$ の角度分解能があればよい。これは近い将来達成可能な角度分解能の範疇に入る。

現在の電波観測では、銀河の中心部で起きている水蒸気やシリコンの強いメーザー現象を利用する。宇宙空間にただよう分子ガス雲は、数天文単位（1天文単位は $1.5 \times 10^{11}\text{m}$ ）にわたり希薄に拡がっていて、その長い経路を電波が伝播するうちに増幅され、強い電波となる。このメーザー現象による電波を複数の望遠鏡で観測し、干渉させることで、空間分解能を高くすることができる。さらに、もともとの周波数が特定できるため、ガスの運動からくるドップラー効果の測定が容易になり、ガスの速度に対する情報も得られることになる。

以下、この電波による巨大ブラックホールの観測の例を概説する。ひとつは、NGC4258 (M106) というりょうけん座の方向の銀河の中心にあるブラックホールであり、もう1つは、SgrA*である。現時点でこれらの観測が最も空間分解能をもつブラックホール近傍の観測である。

4.1 NGC4258 (M106) の中心にあるブラックホール

この銀河は、りょうけん座にあり、距離は2千2百万光年である。国立天文台のグループにより、この銀河の中心部からの電波が観測された[5]。それが図1である。下の図が横軸に電波の周波数、縦軸に電波の強度を表したグラフであり、横軸は周波数をドップラー効果を使って視線方向の速度に書き直してある。速度は奥行き方向を正としている。その中の小さいグラフは、これらの電波が発信されている点の相対位置を横軸にとり、縦軸に視線方向の速度を表したものである。最上部の図は、中心天体のまわりをガス円盤がケプラー回転している様子を示し、その円盤のどの部分からの電波が観測されているかを模式的に書いたものである。

グラフ中のはめ込み図の中央部分に表されるメーザー源は、ほとんど視線方向に速度成分を持たないことから、円盤の回転速度ベクトルが我々の視線に対してほぼ垂直な部分であると推定される。そのまわりでは回転のためにわずかに視線方向に速度を持つ。右下がりの直線は、

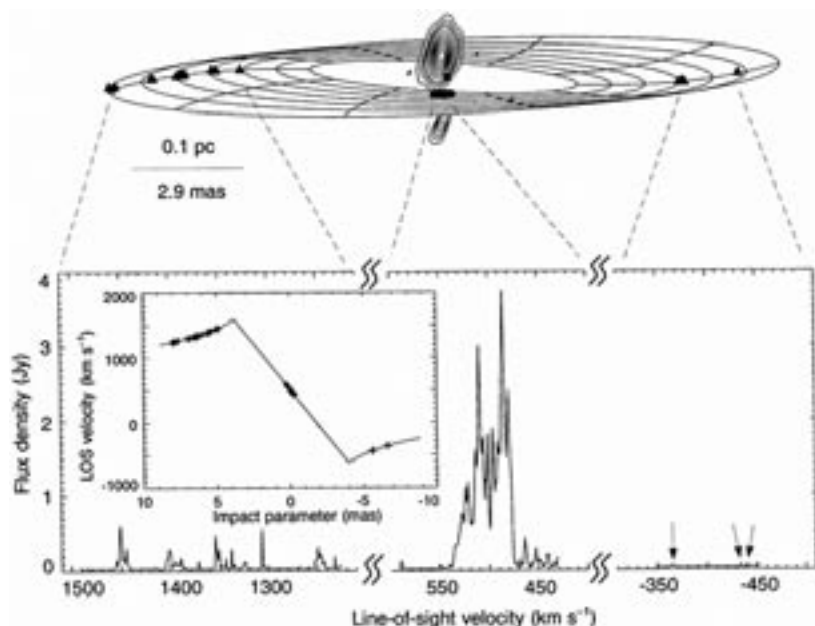


図1 NGC4258からの水のレーザーの観測 (参考文献[5]より)

そのわずかな速度成分を結び、延長したものである。それに対し、左右の曲線は中心天体からの距離の -0.5 乗に比例して回転速度が変化する事を示している。これはガス円盤が中心天体のまわりをケプラー運動している事を示す。この曲線と直線が4ミリ秒角のところで交差することから、中心部分のレーザー現象が円盤の半径約4ミリ秒角の部分で起きていることがわかり、レーザー源の視線方向の速度はおおよそ $\pm 1 \times 10^3 \text{ km/s}$ であることがわかる。また、この曲線が上の方に約 470 km/s ほどずれている。これは銀河の固有速度によるものである。これらのデータをもとに、レーザー源を最上部の図中に記すと、観測されたレーザー源は●と▲印で示した場所にある。右側の▲印で示したレーザー源は地球の方向に近づいており、左側の▲印は向こう側に遠ざかっている。●印のレーザー源は右から左に移動しており、視線方向の速度成分はほとんどない。このように、ガス円盤が中心天体のまわりをケプラー運動している様子が良くわかる。

この速度分布から、中心天体の質量は $4 \times 10^7 M_\odot$ であると推定される。さらに、この観測で見ているレーザー源は中心天体から $r \sim 5 \times 10^4 r_g$ のところにある事がわかる。ブラックホールの観測と言っても、現在の直接観測の精度では、重力半径に比べてかなり外側の領域を見ていることになる。

4.2 我々の銀河の中心にあるブラックホール (SgrA*)

つぎに、SgrA*の観測について概説する。地球から銀河中心までの距離は約8 kpcで、よその銀河までの距離と比べて断然近い距離にある。しかし残念なことに、銀河中心の方向、つまりいて座付近は暗黒星雲がある。暗黒星雲に含まれる星間ダストによって可視光は吸収されて

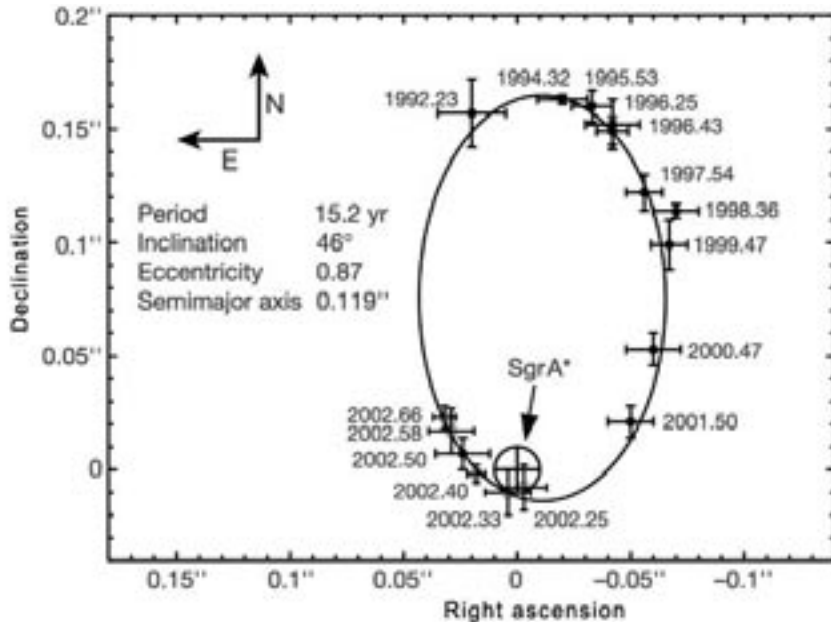


図2 我々の銀河中心にあるSgrA* (参考文献[7]より)

しまい、光学望遠鏡では見通すことができない。一方、赤外線ならば、ダストの吸収を受けずに銀河の中心を見ることができる。

米国のゲッツたちの研究グループは、近赤外線の観測により、銀河中心近傍の90個の恒星の固有運動を観測することに成功した。そのうち3個の恒星の軌道が曲がっていることを発見し、その加速度を検出した[6]。この3つの恒星の加速度ベクトルは、誤差の範囲で1点に交差していた。この点には弱い電波源があり、これがSgrA*である。ドイツのゲンツェルたちのグループは、このSgrA*の極めて近くを回るS2という恒星の軌道を11年間観測した。ゲンツェルたちの観測の結果は図2の通りである[7]。

図2の中の矢印の先にある円がSgrA*の位置を表す。この周りを恒星S2が15.2年の周期の楕円軌道上を運動している。観測は1992年から2002年まで続けられ、その間にこの軌道の3分の2を公転した。ちなみに、図中のSgrA*の位置はS2の楕円軌道の焦点からずれている。これはこの楕円軌道が視線方向に傾いていることを意味し、実際に観測データから割り出されるS2の軌道要素はこの視線方向の傾きも考慮されている。

S2の軌道要素の詳細は表として図3に記しておく。この11年の観測のうちに、S2は、遠日点から近日点を通過し、再び遠日点に向かっている。あと6年以内に一周してもとの位置にもどる様子がこれからわかる。

このS2の軌道要素から計算されるSgrA*の質量は約 $4 \times 10^6 M_\odot$ である。この観測は実際に近日点をS2が通過することを確認しているので、少なくともSgrA*の質量はこの近日点までの距離17光時を半径とする球の中に集中していることになる。この観測もNGC4258の観測と同様に、重力半径からすればかなり遠くを観測していることになるが、それでも約 $r \sim 2 \times 10^3 r_g$

Table 1 Derived orbital parameters for S2

Parameter	Value	Formal error*	Astrometric error†
Black hole mass ($10^6 \times M_{\odot}$)	3.7	1.0	1.1
Period (years)	15.2	0.6	0.8
Time of pericentre passage (years)	2002.30	0.01	0.05
Eccentricity	0.87	0.01	0.03
Angle of line of nodes (degrees)	36	5	8
Inclination (degrees)	± 46	3	3
Angle of node to pericentre (degrees)	250	4	3
Semi-major axis (mpc)	4.62	0.39	0.43
Separation of pericentre (mpc)	0.60	0.07	0.15

*The 1σ errors result from the orbital fit.

†The errors due to the 10-mas astrometric uncertainty. See Fig. 2 legend for a description of the angles and of the errors.

図3 SgrA*のまわりをまわるS2の軌道要素 (参考文献[7]より)

の距離まで迫ったことになる。

4.3 NGC4258とSgrA*はほぼ確実にブラックホール

以上二つの観測をまとめると、NGC4258の中心にあるブラックホールは重力半径の5万倍程度の領域を、我々の銀河中心のSgrA*は2千倍程度の領域を観測している。ブラックホールを観測するということは、まさに時空構造を観測するということであれば、まだまだブラックホールの外側を見ているだけで、直接観測には至っていない。しかし、筆者も含め、多くの研究者がこれら二つの中心天体は確実にブラックホールであると考えている。根拠はその密度にある。密度が大きすぎて、知られている星の集団と考えるのには無理があるからである。

具体的には、NGC4258の中心核の質量密度は1立方パーセック（1パーセックは約3.3光年）あたり $4 \times 10^{12} M_{\odot}$ となる。ちなみに観測されている星の集団として最も高密度のものは球状星団であり、その質量密度は1立方パーセックあたり $4 \times 10^5 M_{\odot}$ 程度にしかない。これで、星の集団としては考えづらいことが良くわかるが、仮に1立方パーセックあたり $4 \times 10^{12} M_{\odot}$ の密度を太陽質量程度の星の集団で作ったとすると、その星同士の平均間隔は100天文単位程度になる。これは我々の太陽系程度の大きさである。これほど密度の高い星の集団は力学的に不安定であることが知られている。この不安定性による星団の寿命は二体緩和の時間スケールと呼ばれるもので見積もることができる。この二体緩和の時間スケールとは、大雑把には重力多体系がある密度をとったときの大角度散乱をする確率できまる時間スケールのことである。ある程度密度が高いと、この大角度散乱もしくは星同士の衝突によってこの星団は崩壊してしまう。実際にその時間スケールを見積もると、NGC4258の中心核の場合、星同士は衝突して約1億年くらいで星団は崩壊してしまうことになる。この時間は、銀河の年齢の約100億年程度と比べれば、ほんの一瞬である [8]。

SgrA*にいたっては、NGC4258の千倍の1立方パーセックあたり $4 \times 10^{15} M_{\odot}$ の質量密度になる。仮にこの密度を太陽程度の質量の星の集団として作ったとすると、星同士の平均間隔は10天文単位程度になる。この星の集団で上と同様に二体緩和の時間スケールを見積もると、300万年程度になり、やはり銀河の年齢に比べればほんの一瞬でこの星の集団は崩壊してしまうことになる。

このように、NGC4258の中心核にせよ、我々の銀河にあるSgrA*にせよ、われわれの知っている星ではありえない。やはり否定文ではあるが、これがこの二つの中心核がブラックホールと言われる根拠である。

5. そのほかの幾つかの観測

ここでは、そのほかの幾つかの観測について少し触れることにする。

5.1 活動銀河核MCG-6-30-15の鉄輝線スペクトル

1995年のNatureに1本の衝撃的な論文が掲載された[9]。それは、MCG-6-30-15という活動銀河核からの鉄輝線を捕らえたものである。これを観測したのは日本のX線衛星「あすか」である。この中心にある活動銀河核は、やはりブラックホールと考えられている。この論文は、ブラックホールのごく近傍からの鉄輝線を捕らえたというものである。

ブラックホールのすぐ近くから出てくるスペクトル線は、強い重力場の影響を受ける。さらに、光源が光速に近い速度でブラックホールの周囲を回転していれば、特殊相対論的なドップラー効果も問題になる。この2つの効果により、もともと光源から出る光が単一のエネルギーであっても、我々に届くときには低いエネルギー側に裾を引くスペクトルとして観測される。

「あすか」が捉えた鉄輝線のスペクトルを図4に示す。この輝線の幅は非常に広く、光速の1/3の速度に相当する。鉄輝線の静止系でのエネルギーは6.4keVで、MCG-6-30-15の宇宙論的な赤方偏移を考慮に入れると6.35keVである。このエネルギー以下では顕著な非対称性が見られる。この輝線構造をブラックホール近傍を回転するガスから放射されたものとする、特殊相対論的な横ドップラー効果と重力赤方偏移を受けた鉄輝線で説明することができる。

実際にはこの輝線のプロファイルは回転していないブラックホールの周りの降着円盤のモデルを使い、降着円盤の視線方向に対する傾斜角、降着円盤内の輝線を出す鉄の分布をパラメーターで表してフィットしている[10]。それにより、ブラックホールの重力半径の数倍程度のところにより多く鉄が分布していなければならないという結論を得ている。さらに、これは中心のブラックホールが回転している方が良くデータと合うことから、回転しているブラックホール特有のものである可能性もある。

この解釈が正しければ、上記のはくちょう座X-1, NGC4258の中心天体, SgrA*の観測が「大きな質量」という形でブラックホールの存在を示したのに対し、この観測はそのブラックホールが実際に作っている強い重力場を直接検出したということになる。しかし、この鉄輝線の観測に対する解釈の妥当性については、議論の真っ最中である。そのため今後の詳細な観測の結

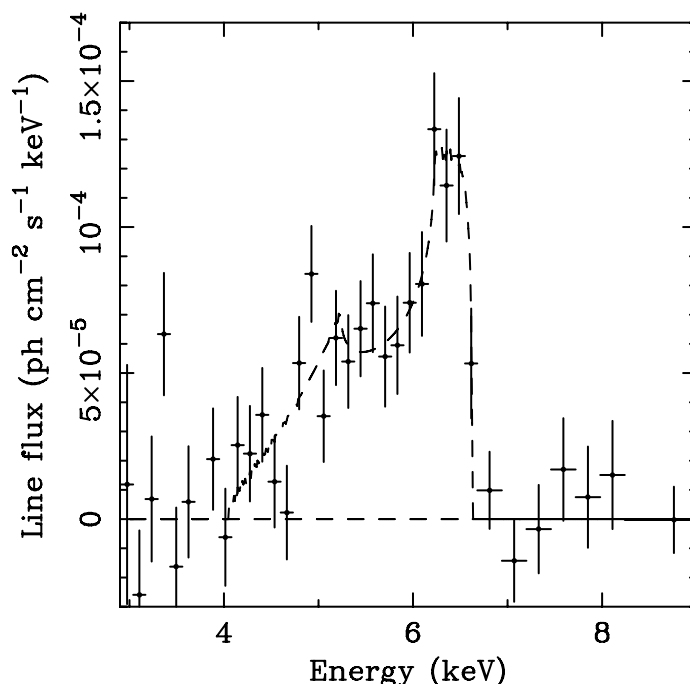


図4 X線天文衛星「あすか」による活動銀河核MCG-6-30-15の銀輝線スペクトル
(参考文献[9]より。)

果に期待がよせられている。

5.2 中質量ブラックホールの発見

最近、おおぐま座の銀河M82の近傍に、太陽の700倍から100倍の質量を持つX線星が、X線天文衛星「あすか」と「チャンドラ」による観測で発見された[11]。この質量の下限を求めるときには、ガスの降着が定常に起こるための必要条件から質量の下限を求める方法が使われている。これはエディントン限界光度を利用する方法である。中心星に降着するガスは、熱せられて輻射を出す。あまり輻射が強いとその輻射圧によりガスは落ちれなくなる。定常にガスが降り積もるためには中心星の重力の方がこの輻射圧よりも強くなければならず、この事実は中心星の質量に下限を与える。

さて、M82の場合も、はくちょう座X-1と同様に、X線で明るいことや、その時間変動、そして質量の下限から、このX線星はブラックホールであるという結論が導かれる。このブラックホールを中心とする領域には、100万年前に起こったと思われる巨大な爆発によって作られた分子の膨張泡構造が発見され[12]、そこに数多くの若い星団が発見された。これはこの領域で「スターバースト」と呼ばれる激しい星生成活動があったことを意味する。この発見にともない、中質量ブラックホールが誕生するというシナリオが考えられ、それを裏付ける観測事実も発見された。

さらに、このシナリオは巨大ブラックホールの誕生のシナリオへと発展していった[13]。銀

河が誕生する際には激しいスターバースト活動があったと考えられる。このスターバースト活動により、銀河では星団が数多く誕生し、星団の中心部は星の超過密領域となる。そこでは、恒星の衝突と合体が起こり、その合体で誕生した超巨大恒星が重力的につぶれて中質量ブラックホールを形成する。同じことが別の星団でも起こり、やがてこれらの星団は中質量ブラックホールを抱えたまま銀河の中心領域に沈み、お互いに合体し銀河のバルジを形成する。一方、中質量ブラックホールはそのまま中心に沈み続け、銀河中心で集団となり、重力波を放出しながら合体し、ついには一つの巨大ブラックホールが銀河中心に誕生する。

この中質量ブラックホールの形成や巨大ブラックホールの形成のシナリオが定説となるためには、今後詳細な観測や多くの検証が必要であろう。しかし、巨大ブラックホール形成のシナリオとしては有力なものであると考える研究者は少なくない。しかも、このシナリオは銀河形成のシナリオにも関連し、非常に興味深い。

6. まとめ

この紀要記事で概説した観測的根拠からわかるように、宇宙物理学というブラックホールは、厳密には我々の知っている物質では説明できないほど高密度な天体であり、否定文で定義されているものである。それに対し、相対性理論で予言されているブラックホールは、事象の地平面の存在で定義される時空構造のことである。この二つは微妙にニュアンスが異なる。この微妙なニュアンスの違いを認識しておくことは重要である。これらは、現在“ブラックホール”という同じ言葉で表されているが、将来的に観測精度が進み、実は異なるものになる可能性がいまだ否定できていないからである。したがって、宇宙物理学というブラックホールはまだ最先端の研究の題材である。

それでは、相対性理論で予言されるブラックホールを直接観測するためにはどうすればよいのか。ブラックホールの事象の地平面を遠くから観測することは、その定義から原理的に不可能である。実際に事象の地平面を観測するための一番確実な方法は、自分でブラックホールに落下し、自分にかかる潮汐力を測ることで、事象の地平面を通過したかどうか判定できる。しかし、そうしたところで、その結果を誰に伝えるのかという問題が残る。事象の地平面の定義から、その内側で何らかの結果を得たとしてもブラックホールの内部から外部に伝えることは不可能である。よって、自然科学として有意義であるのなら、現在の天文観測がそうである様に、やはり外部からの観測による間接的な証拠でその存在を確立していく方法をとる以外にはない。十分な空間分解能を持ってブラックホール近傍の様子が観測され、ブラックホールの作る重力場の重力レンズ効果により背景の星や降着円盤がゆがんで見える“黒い穴”の様子が確認できれば、一般相対性理論の観測的検証ともなり、ブラックホールの存在の確立へとつながると考えられる [14]。これがおそらくブラックホールを直接観測するという意味であろう。

今計画されているプロジェクトからすれば、少なくとも我々の銀河中心にあるブラックホール SgrA* は近い将来この直接観測が可能になると予想される。この直接観測の結果、SgrA* が

やはり相対性理論の予言しているブラックホールと何ら違いを見せなければ、それはそれで今までの理論の正しさを検証することになる。一方、そうでない可能性もいまだ否定できていない以上、我々の予想するものとは、異なるものが観測される可能性もある。その場合は、SgrA*まわりの物理現象を解明するため新しい理論や物理を考える切っ掛けとなり得る。この意味において、直接観測は重要であり、大きな期待がかかっている。

直接観測の重要性は歴史からも学ぶことができる。太陽からのニュートリノの直接観測が太陽ニュートリノ問題を生み、それがニュートリノの質量の存在とその世代間の質量差に起因するニュートリノ振動という現象で解決されたことは記憶に新しい。直接観測されていない例としては、一般相対性理論で予言される重力波がそれにあたる。連星パルサーの周期の変動により重力波の存在は間接的には確立している。しかし、いまだ直接観測はされていない。現在、世界各国が多額の予算と多くの労力を投資して、この重力波の直接観測を目指している。重力波天文学への応用が期待されていることも事実だが、直接観測の結果、予想外のものが発見される可能性もあるからである。

より日常的な言葉を使えば、人の噂や報道などで正しいと言われていることでも、直接確かめることは重要で、それにより意外な真実が現われるかもしれない。特に自然科学ではそれが重要だと筆者は信じている。

参考文献

- [1] 林忠四郎, 早川幸男編: 岩波講座現代物理学の基礎Ⅱ「宇宙物理学」(岩波書店)。
- [2] 佐藤文隆: 現代物理学叢書「宇宙物理学」(岩波書店)。
- [3] Rhoades and Ruffini, *Phys. Rev. Lett.* **32** (1974), 324.
- [4] X線による観測についての平易な解説書として、北本俊二「X線でさぐるブラックホールX線天文学入門」(ポピュラーサイエンス)があげられる。
- [5] Herrnstein et. al, *Nature* **400** (1999), 539.
- [6] Ghez et. al, *Nature* **407** (2000), 349.
- [7] Schödel et. al, *Nature* **419** (2002), 694.
- [8] Genzel, et. al, *Mon. Not. Astron. Soc.* **291** (1997), 219.
- [9] Tanaka et. al, *Nature* **375** (1995), 695.
- [10] Reynolds and Nowak, *Physics Reports* **377** (2003), 389.
- [11] Matsumoto, et. al, *ApJ*, **547** (2001), L25. 松本浩典:「新種ブラックホールの発見「モンスター」の赤ん坊か?」パリティ2001年5月号34ページ。
- [12] Matsushita, et. al, *ApJ*, **545** (2000), L107.
- [13] Ebisuzaki, et. al, *ApJ*, **562** (2002), L19.
- [14] 福江純:「ブラックホールはどう見えるか見えないものを“見る”」パリティ2003年5月号22ページ。