

図鑑等に描かれたブラックホール想像図の科学的正確性の検証

大阪府立北野高等学校 吉山琉太 浦口悠夏 西田汐里

1. 研究の目的

ブラックホールは観測が困難なため、実際の姿・写真は取られたことがなかったが、近年のブラックホールの研究はめざましい発展を遂げ、2019年4月に直接撮像に成功した。(EHT collaboration, “First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole”) しかし撮像されたのはブラックホールのごく近傍であり、降着円盤やジェットを含めた全体を撮像するには至っていない。そのため、一般の人々がブラックホールを理解しやすいよう、これまで多くのブラックホールの想像図が作られてきた。本研究では、ブラックホール理論に基づき、これらの想像図の科学的正しさについて検証する。

2. ブラックホールとは

(1) 物理現象としてのブラックホール

前提として、ブラックホールは穴ではなく天体の一種である。普通の天体に比べ、半径が質量に対して非常に小さく、高密度であることが特徴である。ニュートン力学においてある物体の作る重力場からの脱出速度は $\sqrt{2GM/r}$ (G :万有引力定数 M :物体の質量 r :物体からの距離) であり、この速度が光速を超える r をシュバルツシルト半径と呼ぶ。質量 M の物体をシュバルツシルト半径以下に縮めるとブラックホールになる。ブラックホールは、光でも逃げられないほど強力な重力を持っているため、内部を直接観測できない。またブラックホールの強重力によって光が曲げられるため、ブラックホールがレンズのような働きをする。これを重力レンズ効果という。ブラックホールが持つ情報は「質量」「回転」「電荷」の三つに絞られ、それ以外の情報は失われている。

(2) 降着円盤

ブラックホールに物質が落下するとき、物質は真っ直ぐにブラックホールの中心に向かって落下するのではなく、ブラックホールの周りを回りながら落下していく。このときに形成される円盤を降着円盤と呼ぶ。降着円盤内の粒子の速度は、 $\sqrt{GM/r}$ であり、内側ほど速度が速くなる。円盤において粘性が働くと、速度の差による摩擦で物質は角運動量を失い、少しずつ中心に向かう。この時に発生する電磁波を観測することでブラックホールの周囲の様子を探ることができる。この描像で重要なのは、物質に粘性が働くことだが、円盤が乱流状態にあると粘性は大きくなり、観測を説明できる。

降着円盤の最も基本的なモデルは「標準円盤モデル」である。このモデルでは、降着円盤は黒体放射をする。黒体放射ではウィーンの変位則 $\lambda=b/T$ (λ :最大波長 T :降着円盤表面温度 b :比例定数($\approx 2.890 \times 10^{-3}$))により波長と温度は互いに反比例する。降着円盤の温度は半径 r の $-3/4$ 乗に比例し、半径が 10^5 m で温度 10^6 K、半径 10^8 m で温度 10^4 K 程度になる。したがって、円盤の内側ほど放射する電磁波の波長は短くなる。波長は短いほど可視光では青側に変位していく。「標準円盤モデル」は、円盤の厚みが半径に比べて十分小さいという幾何学的な特徴も持つ。

(3) 最小安定円半径

落下した物体はブラックホールに近づくにしたがって一般相対論の効果が強くなり、シュバルツシルト半径の3倍で安定な円軌道が存在しなくなる。これ以上内側に入ると一気にブラックホールに落ち込む。

(4) 回転するブラックホール

ブラックホールのなかでも回転するブラックホールをカー・ブラックホール、回転しないブラックホールをシュバルツシルト・ブラックホールと呼ぶ。カー・ブラックホールはエルゴ領域を持つ。エルゴ領域とは「慣性系の引きずり」という効果によって生まれた回転する空間のことであり、つぶれたゴムボールのような形をしている。カー・ブラックホールはシュバルツシルト・ブラックホールに比べて最小安定円半径が小さい。

(5) ジェット

ブラックホールからは細く絞られたプラズマが高速で双方向に放出されており、それをジェットと呼ぶ。プラズマは降着円盤を貫く磁力線に沿って存在しており、降着円盤が回転することで磁力線も回転し捻じれる。そのねじれた磁場に降着円盤の粒子の一部が巻き付き螺旋状に吹き出しており、それが光って見えている。それによって磁力線が反発する力が大きくなり、プラズマを加速させる。

以上の前提をもとに、ブラックホール想像図について「ジェット」「降着円盤」「重力レンズ効果」の3点に注目し検証を行った。

3. 検証

(1) 「学研の図鑑 宇宙(2001年)」

ジェット: ジェットは、らせん状の磁場に巻き付いた物質が光って見えているはずだが、「学研の図鑑 宇宙(2001年)」の図ではらせん構造は描かれていない。

降着円盤: 降着円盤の中では乱流が発生しているはずだが、「学研の図鑑 宇宙(2001年)」の図では綺麗な同心円状の層になっている。

重力レンズ効果: 本来、ブラックホールの向こう側の景色はゆがんで見えるはずだが、「学研の図鑑 宇宙(2001年)」の図では全くゆがんでいない。

(2) 「21世紀子ども百科 宇宙館(2001年)」

ジェット: 「学研の図鑑 宇宙(2001年)」の図と同じように、「21世紀子ども百科 宇宙館(2001年)」の図ではらせん構造は描かれていない。しかし、らせんが非常に細ければこのように見える可能性はある。

降着円盤: 「学研の図鑑 宇宙(2001年)」の図と同じように綺麗な層になっているように描かれている。また、降着円盤の厚さはブラックホールの半径に対してかなり薄くなるはずだが、「21世紀子ども百科 宇宙館(2001年)」の図では中心部分が厚くなっているように見える。ただし、中心付近に存在すると考えられる「コロナ」を表現している可能性はある。

(3) 「日本経済新聞(ブラックホール、どんな天体? 3つのポイント)」

重力レンズ効果: 「日本経済新聞(ブラックホール、どんな天体? 3つのポイント)」の図ではシュバルツシルト半径を持つと考えられる黒い球体が浮かんでいるだけで周りが全くゆがんでいない。

ブラックホールと降着円盤の距離: ブラックホールが回転していない場合、降着円盤の最内縁半径はシュバルツシルト半径の3倍なので、最内縁とブラックホールの間に隙間が空いているはずである。回転している場合はエルゴ領域が存在するため、ブラックホールの形は降着円盤の方向に膨らむはずである。よって、球体のブラックホールと降着円盤が接触しているように見える「日本経済新聞(ブラックホール、どんな天体? 3つのポイント)」の図は正確でない。

降着円盤の色: 前述2.(2)のように、降着円盤の温度は半径 r の $-3/4$ 乗に比例し、半径が 10^5 m で温度 10^6 K、半径 10^8 m で温度 10^4 K 程度になることにより、降着円盤のうち可視光で主に光っているのは、比較的温度の低いごく外側だけである。「日本経済新聞(ブラックホール、どんな天体? 3つのポイント)」の図は可視光が出ている部分を赤色、それより内側を白色で描いていると考えられる。しかし、降着円盤全体にわたって波長の差を明らかに示すためには、波長に対応した可視光に落とし込んで描くべきだろう。すなわち、外側を赤色、内側を青色にすると良いかもしれない。

5. 考察・結論

図鑑やインターネットからブラックホール想像図を調査し、3つの資料について科学的正しさを検証した。降着円盤については、その温度構造による波長の違いを意識して描かれたものは少なかった。重力レンズ効果についてはどの資料でも描かれていなかった。図鑑に掲載されていた想像図に関しては、当時(2001年出版)の科学的知見を結集してもっとも確からしい図として描かれたと考えられるが、現代から振り返ってみれば、ジェットやららせん構造が描かれていないなどのやや不正確な点がある。一方、2019年に発行された図鑑(「小学館の図鑑NEO [新版]宇宙」小学館、2019年)のブラックホール想像図を確認すると、ジェットに明確にらせん構造が描かれていた。時代とともに変化する想像図から、ブラックホール研究の進展を読み取ることができる。

6. 参考文献

「重力とは何か」大栗博司、幻冬舎新書

「ブラックホールに近づいたらどうなるか?」二間瀬敏史、さくら舎

「ブラックホールと高エネルギー現象」小山勝二・嶺重慎[編]、日本評論社、シリーズ現代の天文学

「学研の図鑑 宇宙」(2001年)、学研

「21世紀子ども百科 宇宙館」(2001年)、小学館

「ブラックホール、どんな天体? 3つのポイント」日本経済新聞[2019年4月11日付]

「小学館の図鑑NEO [新版]宇宙」(2019年)、小学館

EHT collaboration, “*First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*”, 2019, *Astrophysical Journal Letters*, 875, L1