

はじめに

突然ですが皆さん、ブラックホールを知っていますか。ブラックホールと聞くと、その名前から「黒い穴」「真っ暗で何でも吸い込むもの」といったようなイメージを持つ方も多いかもかもしれません。確かに、ブラックホールからは光すら出られません。ところが、ときにはブラックホールの周りは、太陽よりもはるかに明るく光り、物凄いスピードでガスが噴き出すのです。どうしてこのようなことが起こるのでしょうか。この記事では、「とにかくなんでも吸い込む暗い天体」というイメージを超えたブラックホールの世界を、物理学や天文学を専門としない人にも楽しんでもらえるように*1、紹介していきたいと思います。

第1章では、ブラックホールとはそもそも何なのか説明します。第2章では、これまでに観測されたブラックホールの特徴や関連する話題を紹介します。光すら吸いこむはずのブラックホールの周りがなぜ光るのかを第3章で説明した後、第4章でブラックホールの周りで光がどのように進むのかを解説し、実際に観測された”ブラックホールの写真”についての話題を扱います。最後の第5章ではブラックホールに関する研究テーマのうち、我々宇宙班の班員が特に興味深いと思った話題に触れます。詳細が分からなくても、ブラックホールが魅力的で面白い天体であるということが伝わればよいなと思っています。どうか、最後までお楽しみください。

*1 このように脚注に書かれていることの中には、高度な内容も含まれます

目次

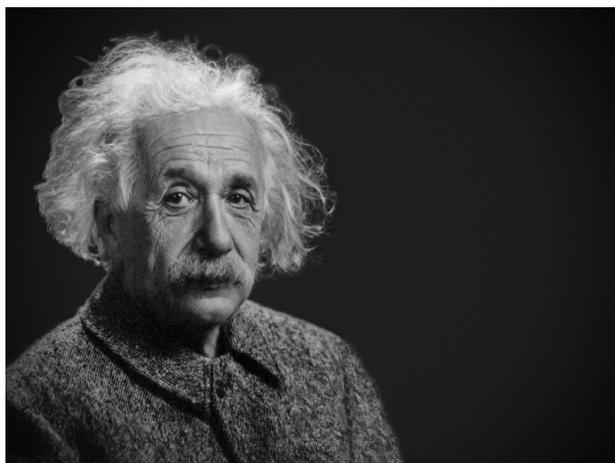
1	ブラックホールとは	3
(1)	事象の地平面とは	3
(2)	強い重力によって引き起こされる現象について	4
(3)	コラム：地球がブラックホールになるには	5
2	ブラックホールの分類	7
(1)	恒星質量ブラックホール	7
(2)	巨大ブラックホール	7
(3)	中間質量ブラックホール	8
(4)	補足: エディントン光度とエディントン限界	9
3	ブラックホールと降着円盤	11
(1)	重力エネルギーの解放	11
(2)	ブラックホールが明るく光る理由	12
4	光の軌跡とブラックホールシャドウ	15
(1)	光の軌跡	15
(2)	EHT による観測	16
5	ブラックホールの謎	19
(1)	ジェット	19
(2)	共進化	20

1 ブラックホールとは

ブラックホールとは光でさえ抜け出せない領域を持つ天体 (宇宙に存在する物体) のことです。20 世紀に入り、相対性理論が登場したことによってブラックホールの存在が理論的に導き出され、その後宇宙物理学の発展によってブラックホールは我々の宇宙にも存在し得ることがわかりました。現在は観測などからも宇宙に数多くブラックホールが存在するだろうと考えられています。

(1) 事象の地平面とは

ブラックホールの持つ、光でさえ抜け出せない領域について詳しく見ていく前に、アインシュタインによって構築された特殊相対性理論と一般相対性理論について簡単に触れておきます。特殊相対性理論に基づく、時間や空間の見え方は人によって変わります。さらに、あらゆるものは光の速さを超えて運動することができないという制限も与えます。一般相対性理論は、重力を説明するために特殊相対性理論をさらに発展させた理論です。一般相対性理論に基づくと重力は時空 (時間と空間) のゆがみであり、物質が存在すると時空がゆがむため重力が生じると考えることができます。



準備が整ったところで本題である光でさえ抜け出せない領域について説明します。一般相対性理論に基づく、地球も時空をゆがめ、重力を発生させますが、ロケットのように高速で運動する物体であれば地球の重力を振り切って脱出することができます。一方、ブラックホールは時空をあまりにも強くゆがめてしまうため、光の速さで運動したとしても抜け出せないような領域を作り出します。特殊相対性理論に基づくと物体は光の速さより速く運動することができないので、その領域からは光を含むあらゆるものが脱出できなくなるということです。するとその領域の内部で何が起きているかを外にいる人が知ることはできません。そのため光でさえ抜け出すことのできない領域を囲む面のことを「事象の地平面」と呼びます。繰り返しになりますが、この事象の地平面を一度超えると、二度と外に出てくることはできません。事象の地平面はブラックホールの質量や自転などから定まります。特にシュバルツシルトブラックホールという自転しない種類のブラックホール

では、シュバルツシルト半径 r_s を半径として持つ球面が事象の地平面となります。

(2) 強い重力によって引き起こされる現象について

前述したようにブラックホールは時空を強くゆがめてしまうため、地球上に住んでいる我々の想像を超えた、面白い現象が起こります。そのような現象の内のいくつかについて説明していきます*2。

(2).1 時間の遅れ

今ブラックホールから離れた場所で止まっている Aさんと、ブラックホールに真っすぐ落ちていく Bさんを考えます。まずは Bさんの視点で考えてみましょう。Bさんはどんどんブラックホールに落ちていくわけですが、Bさんが「体感」する時間の流れと Bさんの腕時計が示す時間の流れは一致します。そのため、Bさんは時間の遅れを感じることなくブラックホールに落ちていき、事象の地平面も何事もなかったかのように通過します。

次に Aさんの視点だと Bさんがどのように見えるかを考えてみましょう。Bさんはどんどんブラックホールに落ちていくのですが、ブラックホールに近づくにつれ時空のゆがみは強くなります。そうすると、Aさんから見て Bさんの腕時計の針の動きはどんどんゆっくりになります。これは Aさんから見て Bさんに流れる時間はゆっくりになっていることを意味します。その結果、Aさんからみて Bさんの運動はどんどんゆっくりになっていき、しまいには Bさんは事象の地平面を越えることなく静止してしまうように見えます。

詳しくは以下のリンク先にあるシミュレーションで確かめてみてください。

[Bさんの視点](#)

[Aさんの視点](#)

(2).2 スパゲッティ効果

シュバルツシルトブラックホールに足から真っすぐ落ちていく人を考えます。シュバルツシルトブラックホールに近づくにつれ、どんどん重力が強くなるのですが、そうすると足にかかる重力のほうが頭にかかる重力より大きくなっていきます。この重力の差によってブラックホールに落ちていく人は体が引き伸ばされる力を感じます。この力のことを潮汐力と呼びます。ブラックホールに近づくにつれ、潮汐力は大きくなっていくため、身体がスパゲッティのように長く引き伸ばされてしまいます。この現象をスパゲッティ効果と呼びます。

*2 今回紹介する「時間の遅れ」と「スパゲッティ効果」はブラックホール以外の天体でも見ることができる現象です。

参考文献

- [1] Schutz, B. F. (1988). *A First Course in General Relativity*. Cambridge University Press. (シュッツ B. F. 江里口良治・二間瀬敏史 (訳) (1988). 相対論入門 下 丸善株式会社)
- [2] 嶺重慎, 『ブラックホール天文学新天文学ライブラリー第 3 巻』, 日本評論社, 2016

2 ブラックホールの分類

現在観測されているブラックホールは、大変大きな質量を持つものです。大きい、ってどのくらいなのでしょう。実はブラックホールの質量の大きさは、太陽の質量の数十倍から 100 億倍まで、様々なのです。

太陽の 10~50 倍程度の質量のものを恒星質量ブラックホールといい、太陽の 10 万倍 ~100 億倍程度の質量のものを巨大ブラックホールといいます。また、それらの間の質量のもの (太陽の 1000 倍程度の質量のもの) を中間質量ブラックホールといいます。しかしなぜ、大きさによって名前が違うのでしょうか。それは、恒星質量ブラックホールと巨大質量ブラックホールでは、性質がいくらか違うからなんです。それぞれのブラックホールについて、見ていきましょう。

(1) 恒星質量ブラックホール

恒星質量ブラックホールとは、太陽の 10~50 倍程度の質量を持つブラックホールのことです。

この恒星質量ブラックホールの誕生の仕方として、最有力な説は、とても大きな質量を持つ恒星 (以下、単に星と言います) がブラックホールに生まれ変わる、というものです。人間に寿命があるように、星にも寿命があり、寿命が来ると大きな質量を持つ星は超新星爆発というものを起こして、(大方) 粉々に砕け散ります。質量の大きい星では、爆発時にその星の中心付近にあるものが一斉にその中心に落ち込み、その中心部分がとても高密度で大質量な星 (中性子星) になることがあります。しかし、元の星の質量がもっとも大きくなると、中心核の星は自身の質量を支えきれなくなり、ブラックホールとなります。このようにして恒星質量ブラックホールはできると考えられています。

また、この恒星質量ブラックホールは、連星^{*3}をなすと長い時間をかけて合体すると考えられています。実はこの時、「重力波」と呼ばれる空間の揺らめきが四方八方に放出されており、それを地球で捉えることが可能です。重力波は 2015 年に LIGO というアメリカの研究機関によって始めて観測され、解析の結果、その重力波はブラックホールの合体によるものだったとわかりました^{*4}。

(2) 巨大ブラックホール

巨大ブラックホールとは、太陽の 10 万倍 ~100 億倍程度というとても大きな質量を持つブラックホールのことです。恒星質量ブラックホールとは違い、巨大ブラックホールの誕生の仕方はわかっていません。実はこの天体は、理論的には実現不可能な天体だと考えられていました。

それはなぜでしょうか。大質量星の何万倍もの質量を持つ巨大ブラックホールを作るには、なんらかの方法でたくさんの質量 (星やガス^{*5}など) を集めなければなりません。しかし、それには宇宙の年齢が足りない、すなわちものが集まるための時間が足りないと考えられていたのです ((4)参照)。しかしそのような理論予想と

*3 連星とは、近くにある 2 つの天体が万有引力 (= 重力) を及ぼしあい、互いに回っているもの (正確には共通重心の周りを回っているもの) のことです。

*4 恒星質量ブラックホールが連星をなすと、重力波と呼ばれる波を出しながら 2 つのブラックホールが段々と近づいていき、最終的に合体することがわかっています。この重力波を始めて観測したのが LIGO で、それは 2015 年の事でした。始めて観測された重力波は、太陽の 36 倍の質量の恒星質量ブラックホールと 29 倍の質量の恒星質量ブラックホールが合体したもので、合体によってできたブラックホールの質量は太陽の 62 倍でした。 $(36 + 29) - 62 = 3$ となり、合体する前のブラックホールの質量の合計と比較すると、合体後のブラックホールの質量では太陽の 3 倍の質量だけ足りません。実は、この質量というエネルギーは波のエネルギーに形を変え、重力波として放出されていたのです。(アインシュタインによると、質量はエネルギーである。)

*5 宇宙に漂う水素やヘリウムのこと

は裏腹に、巨大ブラックホールは観測により、たくさん存在することがわかっています。さらに言えば、ほぼすべての銀河^{*6}の中心には巨大ブラックホールがあると考えられています。さらに、2019年には、EHT(第4章(2)参照)がM87と呼ばれる銀河の中心にある巨大ブラックホールの直接撮像に成功しています。

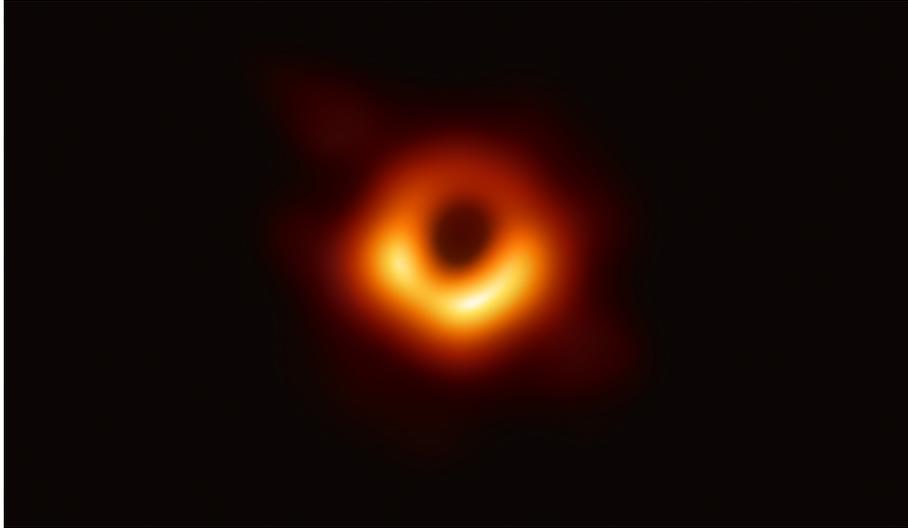


図1: EHT で撮影した M87 中心ブラックホールの画像 (Credit: EHT Collaboration)

ちなみに巨大ブラックホールは、初め「クエーサー」という天体として観測されていました。クエーサーとは、非常に明るい光(電波やX線など)を発しているとても狭い領域のことで、これは銀河中心にあります。このクエーサーは宇宙でもっとも明るい天体と言われており、現在までにたくさん観測されています。先人がこの光の大元は何なのだろうと考え、クエーサーの光度変動(明るさの時間変化)を調べることによってクエーサーの大きさを見積もったところ、それは銀河の直径の3000万分の1ほどのコンパクトなものであることがわかりました。さらに、光度とその変動時間から質量を見積もると、クエーサーは太陽の質量の1億倍ほどの大変大きな質量を持つことがわかりました。そのため、クエーサーの正体は巨大ブラックホールではないか、と考えられるようになったのです。

(3) 中間質量ブラックホール

中間質量ブラックホールとは、恒星質量ブラックホールと巨大ブラックホール間の質量を持つブラックホールとして予言されたものです。こちらもどのように誕生したのか、わかりません。

さらにこの中間質量ブラックホールは最近まで決定的な証拠が見つかっておらず、存在するかどうかすらわからない天体でした。しかし、2020年4月、米・ニューハンプシャー大学のDacheng Linさんたちが、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた観測によって、太陽質量の5万倍程度の質量を持つブラックホールの存在をほぼ確実

^{*6} 恒星、ガスおよびダークマターなどが集まってできた天体。その形は様々で、渦巻銀河や楕円銀河、レンズ状銀河などが存在する。

にしました。

やっと1つめが見つかりそうな中間質量ブラックホール。中間質量ブラックホールについては依然わからない事だらけであり、今後の研究に期待が寄せられます。

(4) 補足: エディントン光度とエディントン限界

現在考えられている巨大ブラックホールの起源のシナリオはいくつかありますが、ここでは、恒星質量ブラックホールにガスが降着して(俗に言えば吸い込まれて)、恒星質量ブラックホールの質量が大きくなっていき、最終的に巨大ブラックホールになった、というシナリオについて考えてみましょう。この時、物理学者の主張は、「種となるブラックホールが巨大ブラックホールになるには時間が足りない」というものなのです。

時間が足りない…。ではその根拠は何でしょうか。実は、ブラックホールの成長について考えるにあたりとても重要な概念である「エディントン限界」というものがあります。これはブラックホールの成長率に制限をかけるものです。それについて知るためにまず、「エディントン光度」というものを説明していきましょう。

ブラックホールに降着する物質(降着物質)がブラックホールに降着し、ブラックホールが成長を続けるためには、降着物質を外に追い出す向きに働く放射圧が、ブラックホールに吸い込まれる向きに働く重力よりも小さくしなければなりません。この放射圧は天体の光度に比例しているため、放射圧と重力がちょうど釣り合う時の光度を求めることができます。この時の光度をエディントン光度といいます。

ブラックホールの成長率は、降着物質から生じる光度がエディントン光度となる時に最大値を取り、基本的にはそれよりも大きな成長率は取れないことがわかっています。これをエディントン限界と言います。

現在では、観測によって宇宙年齢8億年以下のとても若い頃の宇宙(現在の宇宙年齢は138億年と推定されています)にも、太陽質量の10億倍以上の巨大ブラックホールが存在していたことがわかっています。「宇宙で最初に生まれた星がブラックホール(種ブラックホール)となり、それにガスが降着して成長していき、最終的に巨大ブラックホールとなる」と言うシナリオを考えて見ましょう。仮にこの巨大ブラックホールの元となる種ブラックホールの質量が太陽質量の100倍だったとすると、常にエディントン限界の成長率でブラックホールが成長した時、ギリギリ巨大ブラックホールを作ることができます。しかし、常に最大の成長率で成長し続けるという仮定はあまりにも極端で、通常「実現不可能」と考えられてしまいます。というわけで、物理学者たちは「時間が足りない」と言っているのです。

参考文献

- [1] 嶺重慎(2016)、「ブラックホール天文学」、日本評論社
- [2] 山本博章(2016)、「LIGOによる重力波検出と一般相対性理論」、物理教育第64巻第2号 page87-94, https://www.jstage.jst.go.jp/article/pesj/64/2/64_87/_pdf
- [3] 峰崎岳夫、「クエーサー」、<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/story/newsletter/keywords/36/04.html>
- [4] 岩城大地、「球状星団で探る中間質量ブラックホール」、http://www.astro-wakate.org/ss2012/web/proceeding/proceedings/proceeding/galaxy_10a.pdf
- [5] AstroArts(2020)、「中間質量ブラックホールの決定的証拠をHSTで確認」、https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/11187_imbh
- [6] 細川隆史(2019)、「【学問の流れ】超巨大ブラックホールの起源」、<https://www-tap.scphys.kyoto-u.ac>

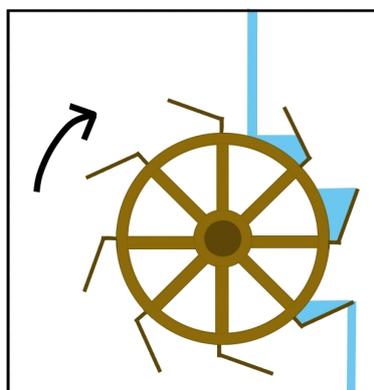
[jp/~hosokawa/download/gakumon_190331.pdf](#)

3 ブラックホールと降着円盤

ブラックホールと聞くとその名前から、黒い穴、真っ暗で何でも吸い込むものといったようなイメージを持ちがちです。確かに、ブラックホールからは光すら出られません(第1章参照)。ところが、条件を整えば、ブラックホールの周りは、太陽の1兆倍もの光度*7で輝くことが知られています。光すら出られないはずのブラックホールが、なぜ明るく光り輝くのでしょうか。もちろん、事象の地平面の内側から光が出てくることはありません。ブラックホールの周りにガス*8があり、そのガスがブラックホールに落ちていくことで、位置エネルギー(重力エネルギー)を解放し、光るのです。どういうことか、詳しく説明していきましょう。

(1) 重力エネルギーの解放

ブラックホールについて話す前に、重力エネルギーを解放するとはどういうことかを、身近な例として、水力発電を用いて説明したいと思います。水力発電所では、ダムなどを利用し、水を高いところから低いところへ流し、その水流の勢いで水車を回し、発電しています(図2)。これを、エネルギーの移り変わりという観点でまとめると、「位置エネルギー(重力エネルギー)→運動エネルギー→電気エネルギー」となります。もともと重力による位置エネルギーとして蓄えられていたエネルギーを解放し、電気エネルギーとして取り出しているのです。



水の位置エネルギーが、
水車の運動エネルギーに変わる。

図2

一方、ブラックホールにガスが落ち込む(降着する)ときは、ブラックホールの周りを回転しながら落ちていくため、状況はやや複雑になります。まず、ガスがブラックホールの周りを回転し、降着円盤(図6)を形成します。このとき、ガスがブラックホールの周りを回る速さが内側(ブラックホールに近い側)と外側(ブラッ

*7 天体が、単位時間あたりに放つ光エネルギーのこと

*8 「電気、水道、ガス」のガスではありません。宇宙空間に漂う水素やヘリウムなどの気体をまとめてガスと呼んでいます。降着円盤を構成するガスは、高温のため、電離してイオンや電子になっています。

クホールから遠い側)で異なるために、摩擦により熱が発生し、さらに、熱せられたガスは光を放ちます。つまり、ブラックホールの場合は「位置エネルギー (重力エネルギー) → 運動エネルギー → 熱エネルギー → 光エネルギー」という流れで、重力エネルギーを解放し、光エネルギーに変えているため、降着円盤は光り輝くことができるのです。

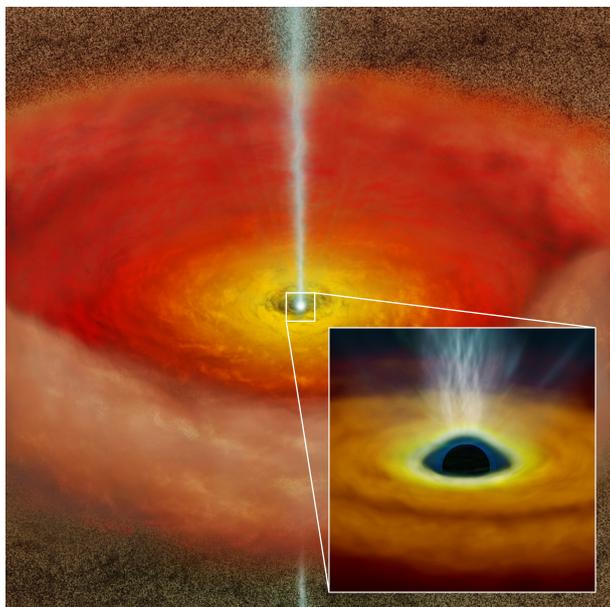


図3: 巨大ブラックホールの周りの降着円盤の想像図。想像図というのは実際に誰かが観測した画像ではなく、あくまでイメージだということです。クレジット: 国立天文台

(2) ブラックホールが明るく光る理由

水力発電とブラックホール、どちらも重力のエネルギーを利用していますが、地球の重力を利用している水力発電に比べて、ブラックホールの方が、エネルギー発生率をはるかに大きい、という違いがあります。実際にエネルギー発生率^{*9}を計算してみると、水力発電では大体0.000000000001%くらいであるのに対し^{*10}、自転していないブラックホール (シュバルツシルト・ブラックホールという) の場合は5.7%、自転しているブラックホール (カー・ブラックホールという) の場合は最大で42% となります。「ブラックホール + 降着円盤」は、文字通り桁違いのエネルギーを取り出すことができるのです。そのため、銀河中心の巨大ブラックホール

^{*9} ここでは、発生するエネルギーを静止エネルギーで割った値のこと。静止エネルギーとは、有名な公式 $E = mc^2$ で計算されるエネルギー E のことで、 c は光の速さ (だいたい秒速 30 万キロメートル)、 m は落下する水や降着するガスの質量。相対性理論によれば、質量のある物質は静止していてもエネルギーを持っていると考えられるのです。発生するエネルギーとは、ここでは、水力発電の場合は落差を 100 m としたときの位置エネルギーの差を、ブラックホールの場合は、ガスが無限遠にあるときと最内縁安定円軌道半径で回転運動しているときのエネルギー差を意味しています。ブラックホールの場合、このエネルギー差は、ガスが無限遠にあるときと、最内縁安定円軌道半径にあるときの、位置エネルギーの差の大体半分になり、もう半分は回転の運動エネルギーに姿を変えます。また、降着の仕方によっては発生するエネルギーの一部だけが放射に使われるということもあります (詳しくは [2] を、ある程度数式を用いて理解したい人は [1] を参照してください)。もちろん、水力発電の場合も発生するエネルギーの全てを電気エネルギーに変えることができるわけではありません。

^{*10} 化石燃料を燃やした場合だと、1 kg あたり 5000 kcal として、0.00000001% くらいです。

に十分な量のガスが降着すれば、極めて明るい天体 (クエーサー^{*11}) となるのです。

*11 第2章参照

参考文献

- [1] 嶺重慎, 『ブラックホール天文学新天文学ライブラリー第 3 巻』, 日本評論社, 2016
- [2] 大須賀健, 『ゼロからわかるブラックホール』, 講談社ブルーバックス, 2011
- [3] 谷口義明, 和田桂一, 『巨大ブラックホールと宇宙』, 丸善出版, 2012
- [4] 須藤靖, 『一般相対論入門』, 日本評論社, 2005

4 光の軌跡とブラックホールシャドウ

2019年4月10日に、Event Horizon Telescope(EHT)がブラックホールの直接観測に成功したことを発表しました。この時に発表された画像が図4です。「どうしてこのドーナツっぽい写真をブラックホールだと言っているのか？」筆者もこの写真を初めて見たときそう思いました。ブラックホールの周りのガスから出た光(電波)を撮っているのですが、このように見える理由を理解するには、ブラックホールの周りで光がどのように進むのかを知っておく必要があります。

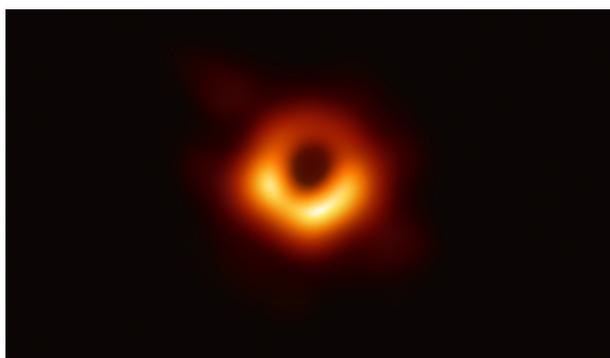


図4: EHT で撮影した M87 中心ブラックホールの画像 (Credit: EHT Collaboration)

(1) 光の軌跡

アインシュタインの一般相対性理論によると、星のように質量をもった物体があるとそのまわりの時空は歪みます(この時空の歪みこそが重力であると解釈します)。時空そのものが歪んでいるため、光はその中をまっすぐ進んでいるつもりでも、その軌道は曲がってしまいます。

質量によって歪んだ時空を運動する光を模擬したシミュレーションを作ってみました。

光の軌跡のシミュレーション

注目したいところは、なんでも吸い込むと言われるブラックホールですが、実は吸い込まれずにブラックホールに周りを回り続ける軌道や、一度ブラックホールに近づいたあと再び大きく離れていく軌道が存在するという事です。(遠い)将来のブラックホール探査で必要になる知識かもしれませんね(!?)。

図4の写真の中心の黒い部分をブラックホールシャドウといいます。EHT計画によりブラックホールシャドウの撮影に成功しましたが、実は、ブラックホールシャドウの大きさと、実際のブラックホールの大きさ(事象の地平面に囲まれた領域を見たときの面積)が異なることはご存知でしょうか?その理由はブラックホールによる時空の歪みによって曲げられる光の軌道について考えると分かります。

そもそも画像で写っているものは光であって、ブラックホール付近の光のうち地球まで届いているものです。外側からまっすぐブラックホールに向かう光は、ブラックホールの重力によって軌道が曲げられます。条

件次第で光はブラックホールに吸い込まれたり、うまく逃れて脱出したりします。スタート地点を決めれば、この光の運命を決める条件とは、ブラックホールに入射する角度ないしは角運動量です。角運動量とは、簡単に言うと運動する物体からブラックホール方向に対して垂直な方向、つまり、回転方向に進もうとする勢いのことです。角運動量は光にとってブラックホールを周回しようとする遠心力の（ようなものの）源となります。光の軌道はブラックホールの重力による吸い込まれる力と角運動量による遠心力のバランスで成り立っています。十分な角運動量を持つ光はブラックホールに接近しつつも吸い込まれずに地球まで届くことができます。このとき最も接近できる距離は決まっており、そこから光が曲線を描いてやってくるので、地球から見たブラックホールシャドウの大きさは、事象の地平面よりも大きく見えるわけです。(図5参照)

3次元的な動きを確認するためにブラックホールシャドウのシミュレーションを作ってみました。

ブラックホールシャドウのシミュレーション

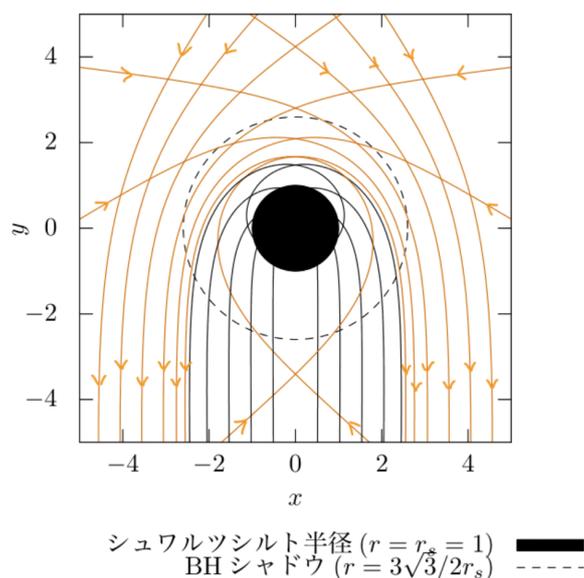


図5: ブラックホール付近の光の軌跡。光線がブラックホールによって曲げられ下側の遠方（地球）に向かいます。黒い実線はブラックホールから飛び出す軌道なので、実際にはこの軌道を通して地球まで届くことはありません。地球から見るとブラックホールは点線の大きさに見えます。

(2) EHT による観測

図4の画像で見えているブラックホールは、第2章で紹介した「巨大ブラックホール」です。これは、地球から約5500万光年（光が5500万年かかって届く距離）も離れたところにある、「M87」と呼ばれる銀河の中心にあります。とても遠いところにあるように思えますが、それでも、巨大ブラックホールのなかでは地球から見たときの見た目の大きさが大きいほうなのです。

前述の通り、ブラックホールシャドウを撮影したという発表があったのはつい最近のことです。今までにも

撮影例があってもいいのでは？と思う方もいるかもしれません。しかしこのリングは遠方から観察するには小さすぎました。今までは全くもって視力が足りず、見ることはできませんでした。では、それを観測した EHT とは、一体どのような望遠鏡なのでしょうか。

EHT(Event Horizon Telescope) は、VLBI(超長基線電波干渉計) の技術を用いて作られた、世界最大の電波干渉計です。ちょっと難しいですね。どんなものなのかざっくり言うと、EHT とは、世界各国にある望遠鏡を組み合わせることで作った、地球の直径に匹敵する大きさの口径をもつ望遠鏡(同じようなもの)です。口径とは、望遠鏡の丸いところの直径のことです。望遠鏡の視力は、その口径が大きければ大きいほど良くなります。EHT の口径は約 10.000km もあり、なんとその視力は 300 万 !! これは、地球から月にあるゴルフボールが見えたり、東京から、大阪にある髪の毛が見えたりするレベルです。遥か遠方のブラックホールを捉えるにはこれほどまでの視力がないといけないのですね…！

参考文献

- [1] 須藤靖, 『般相対論入門 [改訂版]』, 日本評論社, 2019
- [2] 遠藤理平, 『ルンゲ・クッタで行こう!—物理シミュレーションを基礎から学ぶ』, カットシステム, 2018
- [3] 中力眞一, 福間一巳, 『シミュレーションで学ぶ相対論入門』, プレアデス出版, 2015
- [4] 国土地理院, 「VLBI とは」, <https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/vlbi-about.html>
- [5] EHT-Japan, 「史上初、ブラックホールの撮影に成功!」, <https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20190410>

5 ブラックホールの謎

これまで紹介してきたように、観測や理論的な研究から、ブラックホールに関して様々なことがわかってきました。しかし、ブラックホールは未だに謎だらけの天体でもあります。ブラックホールに関する多くの興味深い謎のうちの一部を紹介したいと思います。物理は決して「公式を覚えて使うだけの退屈な科目」ではなく、現在進行形で研究が進む「生きた学問」であるということ、実感していただけたらと思います。

(1) ジェット

まずはジェットについてです。ジェットとは、天体から超高速で二方向に噴き出す、細く絞られたガスの流れのことです(図6)。観測により、ブラックホールからジェット噴き出していることがわかっています。例えば、M87の中心にある巨大ブラックホール^{*12}から、光の速さの99%以上のスピードのジェットが噴出している、という観測結果が得られています[6]。相対性理論によると、物質が光の速さを超えるスピードで進むことはできないので、これはほぼ最高速度とっていいでしょう。何でも吸い込むことで有名なブラックホールから、なぜガスが猛スピードで飛び出すのでしょうか。

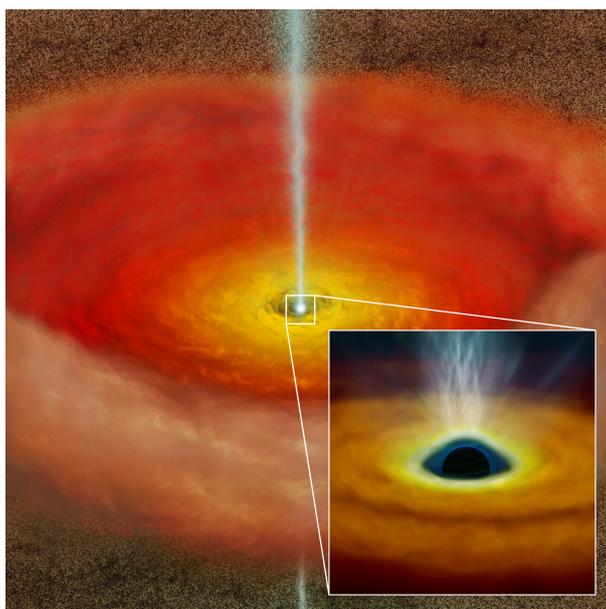


図6: 巨大ブラックホールの周りの降着円盤の想像図。中心のブラックホールの近くから上下に吹き出しているのがジェットのイメージです。クレジット: 国立天文台

第3章のガスの降着のところで説明したように、ガスがブラックホールに落ちていくことで、大きなエネルギーが得られます。降着ガス全体が解放する重力エネルギーを、一部のガスに、運動エネルギーとして与えることができれば、エネルギーをもらったガスは高速で飛び出すことができるはずです。そのようなことが

^{*12} EHTによって撮影されたブラックホールです。詳しくは第4章参照。

起こる仕組みとして、放射や磁場を使ったモデルが提案され、研究されています。しかし、ジェットが「どのようにして光速近くまで加速されるのか」「どうやって細く絞られるのか」といった問題について、まだ解明されていないことも多いようです。

(2) 共進化

第2章で、ほとんどの銀河の中心に巨大ブラックホールがあることがわかってきたと言いましたが、さらに研究を進めると、ブラックホールの質量と銀河のバルジ (図7) の質量に相関がある^{*13}ことがわかりました。この結果は、ブラックホールと銀河は何らかの関係を持って進化してきたことを示唆すると考えられます。これを「巨大ブラックホールと銀河の共進化」といいます。



図7: バルジとは、円盤銀河の中心部にある、ふくらんだ部分のことです。

共進化が示唆されたことは、巨大ブラックホールの質量や大きさは銀河やバルジのそれに比べて桁違いに小さいことを考えると驚きです。例えば、太陽系の所属する天の川銀河の場合、中心の巨大ブラックホールの半径は大体 0.000001 光年、銀河の半径は 5 万光年くらいだと言われています。巨大ブラックホールの半径がミジンコの体長くらいだとすると、銀河の半径は地球一周分くらいだということになります。これだけスケールの違うものがどのように関係していたのか。先ほど紹介した、ブラックホールからのジェットが銀河の進化に影響を与えた可能性も考えられていますが、どれくらいの影響力があったのかなど、詳しいことはまだ明らかになっていません。

^{*13} 大まかに、 $M_{BH}/M_{bulge} \sim 0.001$ という比例関係が見つかりました。ここで、 M_{BH} はブラックホールの質量、 M_{bulge} はバルジの質量、「 \sim 」はだいたい等しいという意味で使っています。

参考文献

- [1] 嶺重慎, 『ブラックホール天文学新天文学ライブラリー第 3 巻』, 日本評論社, 2016
- [2] 大須賀健, 『ゼロからわかるブラックホール』, 講談社ブルーバックス, 2011
- [3] 谷口義明, 和田桂一, 『巨大ブラックホールと宇宙』, 丸善出版, 2012
- [4] 須藤靖, 『一般相対論入門』, 日本評論社, 2005
- [5] 谷口義明, 『宇宙はなぜブラックホールを造ったのか』, 光文社, 2019
- [6] Snios B., Nulsen P. E. J., Kraft R. P., et al, 2017, ApJ, 879, 8

あとがき

ここまで、魅力的なブラックホールの世界を紹介してきましたが、いかがだったでしょうか。ブラックホールという単語は有名ですが、皆さんの中には、今まで、あくまで理論的な、あるいはフィクションの世界での存在だと思っていた方もいるかもしれません。筆者がブラックホールという言葉を知ったのも、小学生のときで、当時流行っていたカードゲームがきっかけだったと記憶しています。しかし、ブラックホールは単なるSFやカードゲームの中のお話ではありません。我々の住む太陽系の所属する、天の川銀河の中心にも、巨大ブラックホールが存在することが分かっています。ブラックホールの活動は、銀河の進化や、そのなかの我々の存在に、深く関係しているかもしれないのです。この記事を読んで、ブラックホールについてさらに知りたいと思った方は、参考文献として紹介した本にあたってみてください