

【学問の流れ】 超巨大ブラックホールの起源

細川 隆史 (天体核)

座長：竹村 泰斗
記録：宇野 真生、大宮 英俊

2019年3月7日

概要 ほとんど全ての銀河中心に存在する超巨大ブラックホールがいつ、どこで、どうやってできたのかは天体物理学の大きな謎として長年にわたって存在している。最近、遠方宇宙の観測が進んでビッグバンから10億年も経たないうちから 10^9 太陽質量を超えるようなブラックホールが既に存在していることが分かってきた。今回はこの話題をめぐる最近の進展、それに重力波を含む将来観測の展望について概説する。

1. 超巨大ブラックホール

ごく最近の重力波観測で宇宙ではブラックホール同士の合体がしばしば起こっていることが明らかになった[1, 2]。このときのブラックホール質量は太陽の数十倍程度である。このようなブラックホールは太陽より十分質量の大きい恒星が進化したなれの果てと考えられる¹。核融合を終えて重力崩壊した星の残骸として、最後にブラックホールが残される。これらは恒星質量ブラックホールと呼ばれる。

一方、これらとは別種族のずっと質量の非常に大きいブラックホールが存在することが知られている。これが**超巨大ブラックホール(Supermassive Black Hole; 以下 SMBH)**である。これらのSMBHは少なくとも現在の宇宙では殆ど全ての銀河中心に存在することが観測から分かっている。質量がどれ以上だったらSMBHと呼ぶ、という明確な定義は無いが、普通は既に知られている $10^5\sim 10^{10}$ 太陽質量のものを指す²。例えば、我々の銀河系も例に漏れず、中心部に太陽の400万倍の質量を持つSMBHが存在する。SMBHの存在は様々な方法で観測的に検知できるが、近傍であれば周囲の星の運動を分解する直接的な方法が取られる。銀河系ではSMBHごく周囲の星の軌道運動が十年以上に渡って詳細に観測されている。

これらSMBHはもちろんその起源が問題になるが、現在のところ確立した描像は存在しない。ひとつ重要かつ興味深い観測事実がある。それは、SMBHの質量がそれを宿す銀河の性質とよく相関していることである。例えば、渦巻き型銀河の星の分布には中心部にふくらんだバルジという構造があるが、このバルジの質量とSMBH質量はおおよそ1000:1の比例関係にある³。ここで、SMBHの大きさとバルジの大きさが全

¹ ただし星を経由しない、いわゆる始原ブラックホール(primordial BH; PBH)であるとの説も存在する。

² 太陽質量の100~ 10^5 倍のブラックホールは「中間質量ブラックホール」と呼ばれて区別されることが多いが、これらが本当に存在するかは議論がある。

³ 楕円銀河にはバルジの区別は無いが、このときは銀河全体の質量を考える。

く異なっていることに注意がいる。SMBHは例えば周囲の星の運動に影響する重力圏のサイズを考えると、例えば 10^8 太陽質量のSMBHに対して 10^{19} cmくらいである。一方で、バルジのサイズはこの1000倍は大きく、一見物理的に影響しそうにないが何故か両者は相関している。こうしたSMBHとその母銀河の関係は、よく「**SMBH-銀河の共進化**」と呼ばれSMBHの起源を考える上でともに説明すべき基本的な性質と捉えられている。SMBHの起源はどうやら銀河の起源、形成と切り離して考えることは許されないようである。

上で述べた観測事実は基本的に我々のごく近傍、すなわち現在の宇宙ではそうなっているということである。例えば、ほとんど全ての銀河中心にあるSMBHがいつ、どこで、どのようにそうなったか、という問題に迫るには昔すなわち遠方の宇宙にいくと事情がどう変わるかを知ることが大きな手掛かりになる。遠方の宇宙でどういいう銀河にどういいうSMBHが存在するか(又はしないか)が分かればよい。以下で述べるように実際そのような研究が最近精力的に行われており大きく進展している。

2. 宇宙最初の超巨大ブラックホール?

近傍の宇宙では銀河中心部の個々の星を空間的に分解し、その運動の様子からSMBHの存在を窺い知ることができた。ところが、遠方宇宙で同じ手法は使うことができない。望遠鏡の分解能の限界を大きく越えるし、感度の上でも個々の星の光を捉えることは難しい。しかし、ここでうまい具合に**キューサー**という天体を使うことができる。キューサーは略称でQuasi Stellar Object(日本語で準恒星状天体)を表す。これは元々謎の大光度点源として観測されていたのが、後に銀河中心部のごく小領域($<100AU^4$)が銀河全体より明るく輝いていると判明した。この放射は今では**SMBHへのガス降着**が起源になっていると知られている。

今、何かの原因でSMBHの重力圏に落ち込んだ軌道角運動量を持つガスを考えよう。中心部に近づくにつれて遠心力が効くのでガスはブラックホールの周囲に円盤状に蓄積される。これを降着円盤と呼び、これが大光度で輝く。これは、円盤ではたらく乱流粘性によって、まず重力エネルギーが熱エネルギーに変えられ、さらに高温になった円盤から放射エネルギーとして出ていき、この放射を我々が見ているのである。このとき、SMBHへたくさんガスが落ちれば落ちるほど明るく輝くが、これには限度があるだろうと考えられている。あまりにも明るくなれば周囲のガスにかかる輻射圧が大きくなりすぎて、重力に打ち勝ってそれ以上降着できなくなるという訳である。このときの限界光度はEddington光度と言われる。丁度この光度で輝く場合がガスを落とし込める限界であり、実際観測でもだいたいこの付近か少し低いペースでSMBHへのガス降着が起きていることが分かっている。

キューサーは非常に明るいので、非常に遠方のSMBHの存在を観測的に知ることができる。当然、遠方になればなるほどキューサーといえ暗くなるので、最遠方の天

⁴ AU=Astronomical Unit (天文単位)で太陽と地球間の平均距離を表す。 1.5×10^{13} cm。

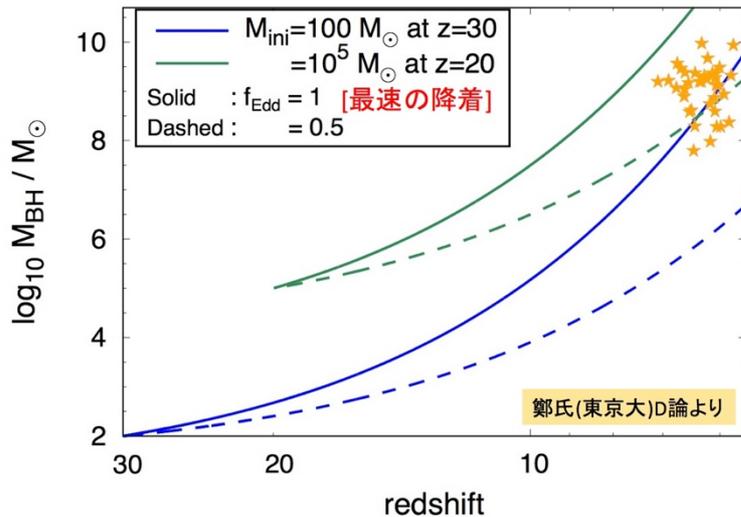


図 1. ガス降着による最遠方 SMBH の形成。横軸 redshift は時間を表し、小さいほうが宇宙年齢が大きい。すなわち、右向きに時間が進む。線はある時期に質量 Mini の種となるブラックホールを用意し、そこにガス降着があるペースで起きた時の質量増を表す。青が種質量 100 太陽質量、緑が 10 万太陽質量である。パネル右上部にある星印はこれまで観測された SMBH を表している。(東北大学、鄭昇明氏提供)

体を見つけることはいつでも難しい。しかし、技術の進歩によって観測の手の届く限界はつねに広がってきた。今ではビッグバンから 10 億年以下しか経っていない時期に存在するキューサーも多く見つかりつつある。中心部にある SMBH の質量は、さすがに星の運動は分解できないが、代わりに近傍宇宙で成り立つ経験則を用いて決定する。その結果、**驚くべきことに宇宙年齢 8 億年以下のごく初期の宇宙に、すでに 10^9 太陽質量を上回るような SMBH が存在することが明らかになってきた [3, 4]**。2010 年代に入って急速に観測が進み、すでにこうした天体が数十例知られるようになってきている。いわば、“宇宙最初の SMBH” に迫ることができる時代が近づいてきたと言えるかもしれない。

3. SMBH の起源と初代天体形成論

最遠方宇宙の観測が SMBH の起源にどのような示唆を与えるか、その一つは時間に対する制約である。つまり、10 億年以下の間に、どうやって 10^9 太陽質量を上回る天体を作るのか、**時間が足りるのか**、という問題である。逆にこの制約を満たせない形成シナリオは排除できる可能性がある一方で、SMBH の起源に関する数少ない観測的制限と捉えることもできる。

キューサーは SMBH へのガス降着で輝いていると考えられるので、ブラックホールはガスを吸い込んだぶん質量を増すはずである。そこで、単純にすでに存在の知られている恒星質量ブラックホールにガスを連続的に降着させて 10^9 太陽質量にまで至らせる過程を考えてみる。とりあえず 100 太陽質量の星をスタート地点としてみよう。ガス降着は、先に述べた Eddington 光度を与える程度のペースに制限されていると通常はみなす。すると、進化は図 1 の青線のようにになる。最大と考えられるペース(実線)で殆どぎりぎり、少しでも効率が落ちると観測された大半の SMBH を説明することができなくなる(破線)。青実線の場合でも、種ブラックホールから Eddington 光度を与えるガス降着が殆どずっと 10 億年近くも継続した、と仮定するのは普通極端とみなされる。余程のことがない限り、このシナリオでは時間が足りないという困難に直面する。

この困難を回避する方法はいくつか考えられるが、その一つとして、単純に最初からもっと大きな種ブラックホールが用意されていれば問題が軽減される、という

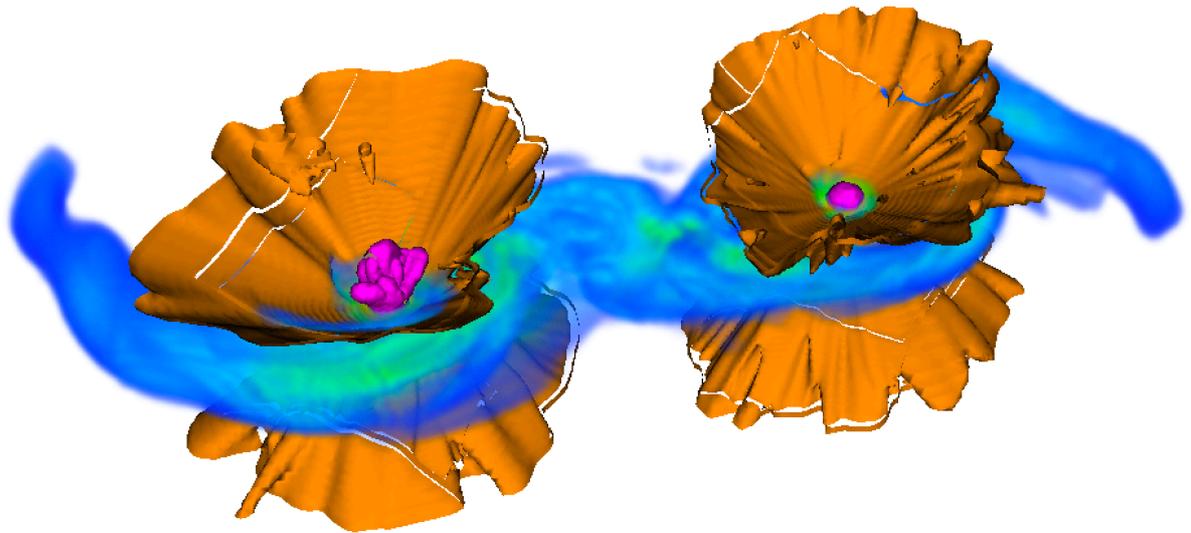


図2: 最新の数値シミュレーションにより得られた形成途上の初代星連星。まだ進化の最中であるが、この時点で連星の質量は約 40 太陽質量と約 20 太陽質量、連星間距離は数百天文単位。緑～青の色が付いている領域はガスが濃い領域に対応し、左右に存在する二つの星それぞれの周囲の円盤状のガスが中心でつながった構造をしている。茶とマゼンタの面はそれぞれ二つの星から放出された低エネルギーと高エネルギーの光がどこまで届いているかを表す。高エネルギーの光がもっと広範囲に広がると、ガスが加熱されることで吹き飛ばされて星へのガスの供給が止まり、それをもって星形成過程が完了する。(Maryland 大学、杉村和幸氏提供)

アイデアがある。つまり、もっと大質量の星が初期宇宙の頃には何かの理由で生まれればよい。実際、この可能性は盛んに研究されている。具体的には、太陽の 10 万倍の質量を持つような、“**超大質量星**” が初期宇宙に限って生まれるのではないか、という説である⁵[5]。この場合は図 1 では緑線に対応する。当然、最初からブラックホール質量が大きければ、その後でそれほど急激なガス降着がなかったとしても、観測された程度の質量を持つ SMBH を時間内に説明可能なことが分かる。

このように、結局この問題は、最初に仮定する種となるブラックホール質量に依存する。宇宙のごく初期に一体どんな星が生まれて、その結果何太陽質量の恒星質量ブラックホールがどれくらい残されるのか、という問題をまず考える必要があるのが分かるだろう。いわゆる初代天体の形成論に SMBH の起源をいかに組み込むかという問題だ、とより大きな見地から言い換えることもできる。誕生する星の基本的な性質を決めるのはその質量である。我々の銀河系を含む近傍の宇宙では、豊富な観測もありどのような質量の星がどういう割合で生まれるのかよく分かっている。およそ太陽程度の星が最も典型的であり、星質量が大きくなるにつれてその数は急激に減少する。銀河系では、知られている星の最大の質量は太陽の 150 倍程度である。問題はこの描像が宇宙最初の星形成を考えた場合に、どのように変わるか、ということである。初期宇宙は近傍宇宙とは違って詳しい観測が無い。しかし、一方で宇宙論的な構造形成の初期条件は今日非常によく定まっているので、理論的な考察によって、こうした初代天体の形成過程に迫ることができる。ここでは詳細には

⁵ なぜ 10 万という数字を考えるかと言うと、これが原理的に存在し得る星の上限質量だからである。これ以上は一般相対論的な不安定が働いて、星自身の構造を維持することができないことが理論的に知られている。

踏み込まないが、現在の標準的な描像では、宇宙最初のいわゆる初代星の典型的な質量は近傍宇宙に比べると非常に大きく、およそ太陽の数十倍から数百倍の質量になるだろうと言われている[6]。その一方で、非常に稀ではあるが銀河系では知られていないような非常に質量の大きな超大質量星の形成可能性が考えられており⁶、これが最遠方で見つかる SMBH の種となるのではないかと議論されているのである。

最新の研究では、先端技術を駆使した数値シミュレーションによって、こうした初代天体の形成過程がスーパーコンピューターを用いて計算されている[7, 8]。図2は一例で、特に質量の大きな星同士の連星系の形成過程を示している。このような大質量星どうしの連星は、最終的には恒星質量ブラックホールどうしの連星へと進化する可能性がある。実際に、重力波観測でこれまで見つかったブラックホール合体は、こうして形成された初代星連星を起源とする可能性が議論されている[9]。

4. SMBH どうしの合体と重力波観測の将来

種ブラックホールからガス降着を経る SMBH 形成は有力な可能性の一つだが、唯一のものではない。これとよく対比される過程として、**SMBH どうしの合体成長**の可能性が議論されている。重力波観測によると、太陽の数十倍のブラックホールどうしの合体が起こっているのは確かなのだから、これがもっと質量の大きなブラックホールにまで続いているのではないかと考えることは自然なことだろう。SMBH は通常銀河の中心に存在しているが、銀河同士の合体は実際に数多く観測されている。このとき、2つの銀河中心にそれぞれ SMBH があり、これらが何らかの過程で十分近づくことができれば⁷SMBH どうしの連星が作られる可能性がある。

2つの SMBH が合体する場合、やはり非常に強い重力波放射が予想されている。ただし、この場合は恒星質量ブラックホールのと比べて重力波の波長がずっと長く、現在稼働している数 km サイズの地上重力波干渉計は感度がない。干渉計の基線長をずっと大きくとる必要があるため、人工衛星を利用した宇宙での重力波干渉計が計画されている。こうした計画のうち最も有名なものは米欧で長らく議論されてきた **LISA (Laser Interferometer Space Antenna)** [10] である。250 万 km 離れた3つの人工衛星を地球と同じ公転軌道に上げる計画である。この話は古くは 80 年代からあったようだが、一時主導していた NASA が撤退するなど窮地に立たされたこともあった。しかし、ここにきて重力波直接検出を受けた追い風の元で NASA が復帰し、にわかに実現味を帯びてきた計画である。既に 2016 年にパスファインダーの打ち上げを成功裏に終えており、2034 年以降の本格運用に向けて期待が高まっている。台頭著しい中国も最近、「天琴計画」と称した殆ど同じ計画を進めると発表した。この先激しい主導権争いが計画を加速させ、一気に研究が進む可能性がある。

図 3(左)は計画されている LISA の振動数ごとの感度曲線と、SMBH どうしの合体時に予想される重力波を比較したものである。宇宙論的な距離にある SMBH、特に質量

⁶ 銀河系では典型的な星質量が太陽程度であるのに対して、ごく稀に太陽の 100 倍以上の質量の星が誕生する。初期宇宙では全体に考えている質量域が大きい、この銀河系の場合と対比して考えると興味深いだろう。

⁷ この問題は“final parsec problem”と呼ばれ、本当に可能かどうか盛んに研究が行われている。

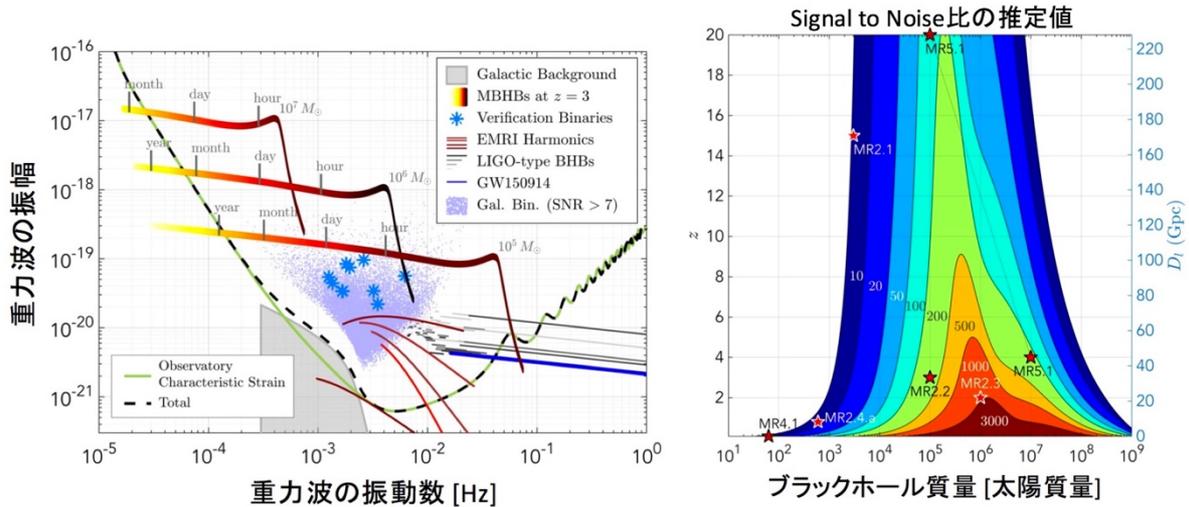


図 3: LISA で予想される SMBH どうしの合体時に放射される重力波検出(Amaro-Seoane P., et al. 2017, arXiv:1702.00786 より)。

が太陽の 10 万～百万倍のものは合体の数ヶ月～1 年程度前から検知されはじめ、合体の最後の瞬間までずっと観測が可能なが分かる。一方、図 3(右)はどの距離で起こる SMBH 合体まで検出可能か、を表した図である。図中のカラーコントアが予想される Signal-to-Noise (S/N) 比を表している。縦軸が距離で、 $z=6, 7$ あたりが最遠方の 10^9 太陽質量の SMBH が観測されている時期に相当する。これを見ると、太陽の 10 万～100 万倍質量の SMBH 合体は、同時期を大幅に越える遥か遠方まで、実に 100 を越える高い S/N 比で観測可能であることが分かる。このように、宇宙干渉計を用いた将来の重力波観測によって、これまで殆ど何も知られていない、初期宇宙での SMBH 合体成長過程に迫ることができる。

5. まとめ

銀河中心に存在する SMBH の起源について、最近の理論・観測両面における進展、さらに重力波観測を踏まえた将来への展望を概観してきた。この問題は天体物理学全ての分野の中でも有数の未解決問題と言っても過言ではない。しかし、問題としては分かりやすく、多くの人々の興味をかきたてる魅力的な謎であり続けている。

特に最近注目が集まっているのは、宇宙ごく初期に存在する 10^9 太陽質量を越えるような SMBH の観測的な発見である。ビッグバンから 10 億年足らずのこの時期に、なぜこのような大質量の天体が存在し得るのか、活発な議論が続いている。理論面ではこの発見は宇宙の初代天体形成論の立場から解釈されるべきものなので、いわゆる初代星形成のより広い枠組みの研究を巻き込んで研究が行われている。SMBH 形成シナリオとしては、多岐に渡るものの、大きく分ければガス降着とブラックホール同士の合体が 2 本柱として議論されている。

ガス降着はその結果、降着円盤が輝きキューサーとして観測されるので、ある程度 SMBH の降着成長史に制限を与えることができている。その一方で、SMBH 合体にはこれまで観測的な制限がほとんどない。ここで期待されているのが重力波、特に宇宙干渉計を用いた将来観測である。急拡大する重力波天文学の力によって、そう遠くない未来にこの分野でも新しい扉が開かれようとしている。

参考文献

- [1] Abbott B.P., et al., 2016, Physical Review Letters, 116, 131103
- [2] Abbott B.P., et al., 2018, arXiv:1811.12907
- [3] Wu X.B., et al., 2015, Nature, 518, 512
- [4] Banados E., et al., 2018, Nature, 553, 473
- [5] Bromm V. & Loeb A., 2003, ApJ, 596, 34
- [6] Hirano S., Hosokawa T., Yoshida N., et al., 2014, ApJ, 781, 60
- [7] Hosokawa T., Hirano S., Kuiper R., et al., 2016, ApJ, 824, 119
- [8] Hirano S., Hosokawa T., Yoshida & Kuiper R., 2017, Science, 357, 1375
- [9] Kinugawa T., Inayoshi K., Hotokezaka K., et al. 2014, MNRAS, 442, 2963
- [10] Amaro-Seoane P., et al., arXiv:1702.00786