

初代ブラックホール形成理論と最新観測

稲吉恒平

〈北京大学 Kavli 天文天体物理研究所 北京市海淀区頤和園路 5〉

e-mail: inayoshi@pku.cn.edu



銀河中心に遍く存在する超巨大ブラックホールはいつどのようにして誕生し、長い宇宙の歴史の中でどのような役割をしてきたのだろうか。近年の遠方宇宙観測の進展により、我々は宇宙で最初の天体が形成され始める“宇宙の夜明け”に起きた天体現象に直接迫る方法を手に入れようとしている。本稿では、巨大ブラックホールの形成や起源を解明すべく天文学者が取り組んできた研究、そして何が明らかになり、またどのような問題が残されているのかを紹介する。さらに次の10年間で、James Webb Space Telescopeを初めとする新しい観測装置がブラックホール天文学にどのようなインパクトをもたらすかを、筆者が考える今後の展望を交えて議論する。

1. はじめに

2022年の7月中旬、James Webb Space Telescope (JWST) の初期観測で得られたデータが公開された。読者の多くの方々が、その圧倒的に美しい画像や精密な放射スペクトラムに驚き、また興奮したに違いない。JWSTによる観測の科学目標は多岐にわたるが(天文月報JWST特集を参照 [1, 2]), 我々の研究グループは初期宇宙の銀河や超巨大ブラックホール(BH)の形成や起源を解明する研究に取り組んでいる。この分野の研究を主目的とする多くの観測が計画されており、JWSTが人類未踏の宇宙で繰り広げられている天体現象に関する情報を我々に届けてくれる日が迫ってきている(本稿の執筆中にも続々と最新のデータが公開されている)。私も理論研究に携わる者の端くれとしてJWSTの観測計画に参加しており、宇宙最初の超巨大BHを発見することを目指している。

私が今回頂いた奨励賞の受賞題目である『巨大ブラックホールの形成・成長過程に関する理論的研究』は、様々な分野の研究者が色々な角度から取り組んでいるテーマである。その中でも敢えて

絞るとすれば、「作る・落とす・ぶつける」という3つの過程が挙げられるだろう。1つ目は、大質量星の形成を経由したBHの初期条件に関する研究である。2つ目は、降着円盤を介したBHの成長速度に関する研究である。そして3つ目は、BH同士の合体による質量成長と重力波放射に関する研究である。本稿では、JWSTによる将来観測とより関連の深い最初の2つのテーマに関する現在の理解を紹介しつつ、私の研究が貢献した部分及び今後の展望について議論する。重力波観測と光・赤外線望遠鏡を用いたマルチメッセンジャーBH天文学も非常に興味深い内容なので、またいつか機会を頂けた時に概観できればと思う。

2. 初期宇宙に最重量級のブラックホールを作る

私が最初に超巨大BHに興味を持ったのは、修士1年の時に軽井沢で行われたサマースクールに参加した時であった。偶然温泉で居合わせた招待講師の先生に、「宇宙物理で一番面白くて難しい問題は何か?」という質問をした際に「超巨大BHかな」と言われたことがきっかけとなった。

その後研究室に戻った私は、当時学生たちのキャプテン的存在であった武藤恭之さんに Shakura & Sunyaev の降着円盤に関する論文 [3] を勧めてもらい、初めて天体物理の論文を読むことにした。また関連論文を読み進める中で、Martin Rees の論文で超巨大BHの起源に関する様々な可能性（いわゆる Rees diagram）が提案されていたことを知った [4]。しかし、そのような現象が具体的にいつどのように起きうるのか言及されておらず、あくまでも問題提起をする意図の議論であった。

通常、BHはガス降着や合体によって質量を単調増加させるため、素朴に考えるとより遠くの宇宙で観測される超巨大BHの質量は減少していく傾向にあると期待される。しかし、予想に反して実際は、宇宙開闢から間もない初期宇宙（赤方偏移 $z > 6$; 現在の宇宙年齢の7%）には太陽の10億倍を超える質量を有する超巨大BHがすでに存在していることが明らかになっている [5, 6]。また、クエーサーの放射スペクトラムの特徴は宇宙の長い歴史の中でほとんど変化していないことが知られている。このことから（少なくとも）観測された超巨大BHやその周囲の環境は、極初期の段階において十分に成熟していたことが推察できる。これらの観測事実は超巨大BHの存在を説明することを困難にしたが、同時にその形成過程を理解するうえで重要なヒントをもたらしたことは間違いないだろう。加えて、超巨大BHは孤立した環境で進化してきたわけではなく、むしろ長い年月をかけて母銀河と共に進化してきたことが、近傍宇宙や遠方宇宙で見られる質量の相関関係から示唆されている [7]。超巨大BHと母銀河の共進化がいつからどのようにして始まり現在に至ったのかという本質的な問いは、いまだに解決されていない天文学の大きな謎の一つとして残されたままである。これらの問題の解決に向けて、初期宇宙の天体形成の理解に即した新しい理論モデルの構築と将来観測に向けた予言や観測手法の提案することが不可欠となっている。

3. 超巨大ブラックホールの種

やはり超巨大BHの起源としてまず考えたいのは、宇宙で一番最初の星（初代星）が崩壊して誕生するBHであろう。修士二年になり研究テーマを決めるよいタイミングで着任された大向一行さんに師事して、宇宙初期の星形成の枠組みの中で種BH形成に関する研究を始めた。BHの形成時間を短縮するためには初期の質量が大きいに越したことはないので、ここでは理論的に可能な最重量級の超大質量星を作ることを考えた。この天体は、クエーサーが初めて発見された時期にそのエネルギー源の候補として考えられた歴史があり、星質量が $\sim 10^{5-6} M_{\odot}$ を超えると一般相対論的不安定により星の構造を支えることができずにBHに崩壊することが知られていた [8]。

それでは、どのようにしてこれほど巨大な星を作るのかを考えてみる。一般に大質量星の核燃焼による寿命は数Myrと短いため、その時間内に超大質量星を作るにはおよそ $1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ のガス降着率で星を太らせる必要がある。ガスが自己重力で潰れていき中心部に誕生した原始星に降着する速さは、ガス雲のジーンズ質量を自由落下時間で割った程度、すなわち

$$\dot{M} \sim \frac{M_J}{t_{\text{ff}}} \simeq \frac{c_s^3}{G} \sim 0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left(\frac{T}{10^4 \text{ K}} \right)^{3/2}, \quad (1)$$

となるため、降着率を大きくするには高温のガス雲を潰す必要がある。ちなみに、銀河系内における通常の星形成では、ダストなどの放射冷却によりガス温度は数10Kと低くなる。そのため、中心星への降着率は $10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ という小さい値になり、典型的な星質量は太陽程度になると考えられる。ガスの温度を上昇させて降着率を大きくするためには、ガスの冷却材を取り除くか、あるいは何らかの外的要因によってガスを加熱してやればよい。例えば、初代星の材料となる始原的ガス（水素、ヘリウムと少しの電子）の中では冷却材

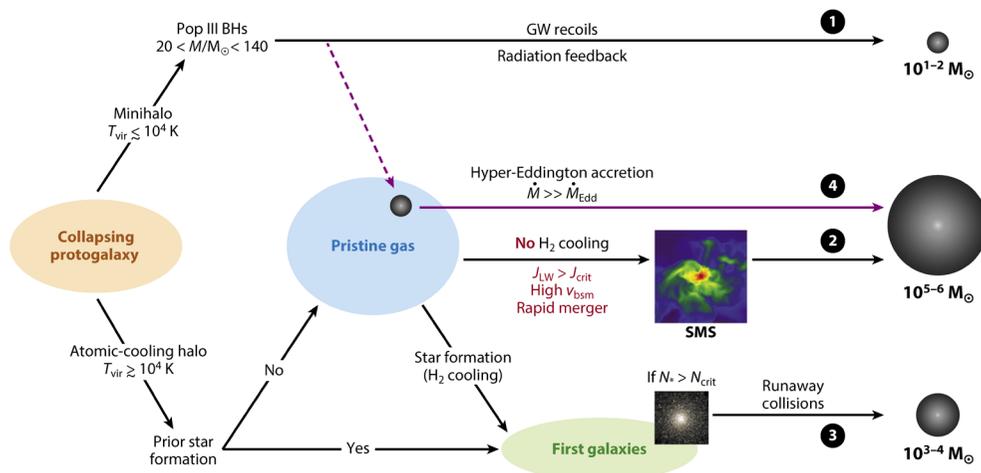


図1 宇宙初期の銀河内における種BH形成に関する理論モデルの概略(現代版Rees diagram) [13]. それぞれ, (1) 初代星の崩壊, (2) 特殊な環境下における超大質量星の形成を経由, (3) 高密度星団における暴走の合体, (4) Hyper-Eddington降着による種BHの形成過程とそれぞれの必要条件を表している.

が乏しいために、水素分子 (H_2) の輝線放射が有効になる数 100 K までしか温度が下がらない。その結果、始原ガス雲は比較的高い温度を保ち、 $10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ くらいの降着率で潰れることができる。中心星からの輻射フィードバックが働くものの、最終的には $100 M_{\odot}$ を超える大質量星が誕生すると理論的に考えられている [9]。さらに、ガスがより高温 ($T \geq 8000 \text{ K}$) になることができれば、水素原子の輝線放射である $\text{Ly}\alpha$ が重要になり始める。特に、このような原子冷却によりガスが冷えると、自己重力で崩壊するガス雲の温度が等温に保たれる結果、降着率は $\geq 0.1 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ にまで達することになり、中心で生まれた原始星はこの勢いそのまま超大質量星に進化することができる。

ところが通常、始原ガスの中では H_2 分子は化学反応により生成されてしまうため、ガスを高温に保つためには外部からの紫外線照射により H_2 分子を光解離する必要が出てくる。私が大学院生だった 2010 年代前半の頃は、これまで初代星を作っていた人々が H_2 を壊すための計算を行い、BH を作りたい人々が気づけば H_2 分子の (光) 化学反応の研究を深掘りするという一見奇妙な時期

であった。それらの研究の結果として、宇宙再電離を起こすために必要な紫外線強度より 1,000 倍以上強い紫外線が始原ガス雲に照射されている場合、 H_2 分子を十分に解離することができて超大質量星形成の必要条件を満たすことがわかった [11]。その後、大向さんと細川隆史さんとの共同研究を通じて、この高い降着率の下で形成される原始星の進化や星の構造の脈動不安定性などを議論し、実際に超大質量星が誕生して BH に潰れるまでの一連の過程を調べ、全体の描像を確立することができた。より詳細な議論に関しては過去の天文月報の記事を参考にさせていただきたい [12]。

以上、2010 年代に宇宙初期の星形成の研究者が精力的に取り組んだ研究成果をまとめて、2020 年に私とコロンビア大学の同僚であった Zoltán Haiman さんと Eli Visbal さんとの共著で ARA&A にレビュー論文を出版した [13]。そこでは、この分野の研究を始めるきっかけにもなった Rees diagram の現代版を載せてあり (図 1)、最初の疑問であった「いつどのように超巨大 BH の種を形成するのか」という問題に対する一つの答えを提示することができた。興味がある読者、特

に研究を始めたばかりの修士の学生には、時間があるときに手に取ってもらえると大変嬉しい。

4. 種BHのガス降着による成長

ここまで種形成の話をしてきたが、続いて種をどのようにして超巨大BHに成長させるかという問題を考える。学生時代の研究室の教授であった中村卓史さんに、「種だけ作っても何にもならへん！その後の成長過程を研究しなさい」と助言を事あるごとに頂いていたものの、それまで星形成の研究しかしてこなかった私にとって研究内容を大きく変えることには一定の抵抗感があった。しかし、ポスドク研究員として異動した米国のコロンビア大学で転機が訪れる。着任後のセミナーの後に Jerry Ostriker さんに話しかけられ、「種BHの成長も考えないとダメだ。一緒に何か研究しよう」と言われてしまう。この2人に全く同じことを言われてしまったら仕方がないやむしかない、と当時の私は思った。

その時の私たちの問題意識は、ガスを供給する銀河とガスを受け取るBHのサイズが違いすぎることを、そしてそれら2つのスケールを繋ぐ理論的モデルを作る必要があるというものであった。当時、多

次元輻射（磁気）流体シミュレーション研究によって、初期に高密度のガス塊がBHの極近傍に存在していれば、BHは超臨界降着で少なくとも短時間は急成長できることが知られていた [14]。また一方で、宇宙論的銀河形成のシミュレーション研究ではBH近傍の現象は分解しないものの、BHが放出する輻射やアウトフローなどの効果を単純化したモデルを用いて銀河スケールの現象に焦点が置かれていた。しかしながら、大きいスケールでは中心BHの重力によってガスを束縛するのは難しく、ある程度のエネルギーや運動量がガスに加わると銀河中心核へのガス降着率は下がってしまうため、BHの成長が効率的に進むのは母銀河がある程度大きく成長した後になると考えられていた [15]。

では、そもそもBHへのガス降着はどこから始まるのか？一番単純な見積もりによると、BH（質量 M ）周りの重力エネルギーとガスが持つ熱エネルギーが釣り合う場所で、いわゆる Bondi 半径 ($R_B = GM/c_s^2$) である。その内側へのガス流入率は、ガスの密度 ρ と温度 T を与えれば、

$$\dot{M}_B \simeq 4\pi\rho \frac{G^2 M^2}{c_s^3} \propto \rho M^2 T^{-3/2}, \quad (2)$$

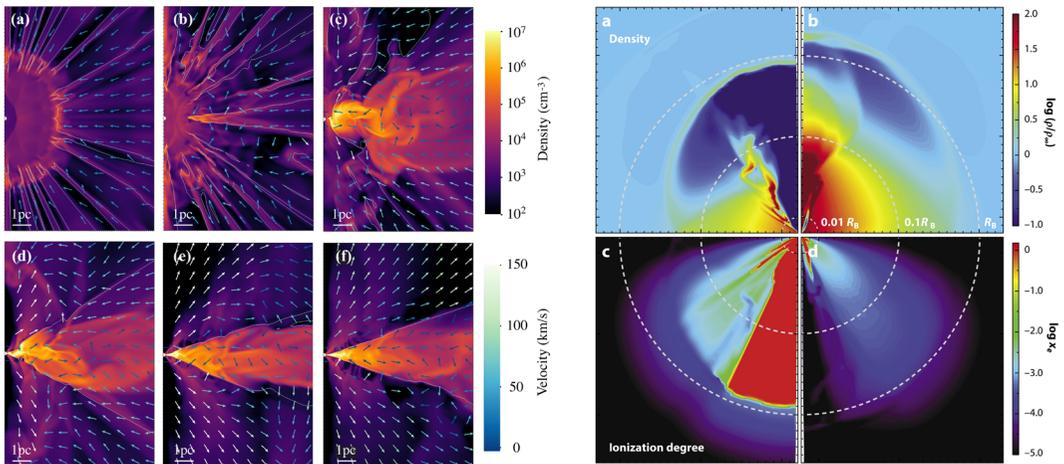


図2 2次元輻射流体計算で得られた急成長中の種BH周囲のガスの密度分布：銀河中心核（左図） [19] とBH重力圏（右図） [13, 18]。右図はそれぞれ降着流の密度（上）と電離度（下）の構造を表している。

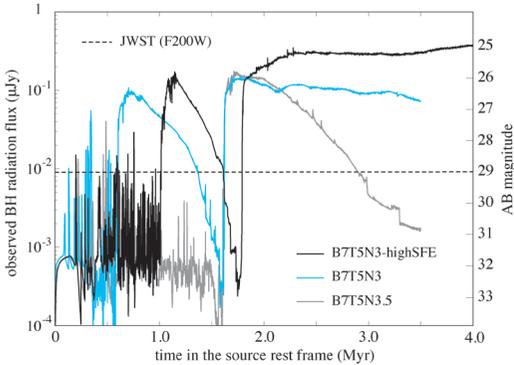


図3 急成長している種BH ($z=15$) からの放射強度 ($\lambda_{\text{obs}}=1.98 \mu\text{m}$) の時間発展 [19]. 3つモデルすべてで, $t \geq 2 \text{ Myr}$ 以降に super-Eddington 降着が実現されて, BH 質量が $10^5 M_{\odot}$ から $10^6 M_{\odot}$ まで増加する. 破線は, JWST/NIRCam の F200W フィルターを用いた 10^4 秒の観測を行った時の感度フラックス ($S/N=10$) を表している.

と表すことができる (Bondi 降着率という). この式は回転や輻射力などの効果を無視した球対称性を仮定した式になっており, BH への降着率の上限を与えている. この式から, Bondi 降着率は $T^{-3/2}$ に比例しているため, BH からの輻射によってガスが加熱を受けてその結果温度が高くなると, 降着率が急激に下がることがわかる. この輻射加熱による BH 成長の抑制は重要で, BH へのガス降着は間欠的にしか進まなくなり, 時間平均した降着率は Eddington 率より何桁も小さい値になることが先行研究で調べられていた*¹[16, 17].

それまでの先行研究では特に, 初代星が崩壊した後に残る BH ($M_{\bullet} \simeq 100 M_{\odot}$) の進化が調べられていたので, 我々もとりあえず同じ設定で BH 質量がより大きい場合の計算を行った. すると, 質量が大きくなるにつれて, 降着率の間欠性が弱くなるとともに, ある値を超えたところで降着率が急激に跳ね上がることを発見した. 計算結果を詳しく調べてみると, この時中心 BH が周囲に

作っていた電離バブルが急激に収縮していき, それに伴い大量の中性ガスが勢よく中心に降着することがわかった. Bondi 半径は BH 質量に比例している一方で, 電離波面の大きさ (ここでは Strömgen 半径で近似)

$$R_{\text{ion}} \simeq \left(\frac{3Q_{\text{ion}}}{4\pi\alpha_{\text{rec}}n^2} \right)^{1/3} \propto M_{\bullet}^{1/3} n^{-2/3}, \quad (3)$$

は, BH 質量の $1/3$ 乗に比例しているため (ここでは電離光子フラックス Q_{ion} は BH 質量に比例しているとした), BH 質量を大きくしていくと必ずどこかで Bondi 半径の方が電離波面よりも大きくなるはずである. この大小関係の入れ替わりが起きると, 電離領域は中心に潰れていき BH はもともとの Bondi 率程度の速さで成長できることがわかった [18, 19] (図2, 3). この結果は, BH 降着の物理を理解するうえでの Bondi 半径を含む中間領域の重要性を示しているとともに, その領域の物理量を詳細に調べることで BH 成長の早さ, 超臨界降着の実現性を定量的に議論することを可能にした. 振り返ってみると, この計算の設定は大質量星形成の問題と似ていることに気づく (もちろん BH と星とは放射過程やスペクトルの形は異なるが). このように星形成分野で行われている研究を BH 降着流の問題に応用することができたのも, 星形成畑で鍛えられた経験が活かされた結果であると言えるだろう. また, この結果を持って古巣で行ったセミナーでは中村さんに「オモロイ!」という言葉をかけてもらい, 自分の自信にも繋がるよいセミナーとなった.

5. 種の形成と成長モデルの統一

ここまでは比較的, 理論研究のうまく行っている側面だけの話しをしてきた. 当然の疑問として, そのような都合のよい条件が宇宙初期に実現

*¹ 多くの場合, BH の成長率の指標として BH 重力と輻射圧との釣り合いで決まる Eddington 降着率が用いられる. ところが輻射加熱のために外部からのガスの供給率がそれを大きく下回るために, この問題では輻射圧は重要にならない.

されるのかという問題を検討する必要がある。例えば、種BH形成の議論で必要であった強い紫外線背景場による H_2 分子の解離過程や、またはsuper-Eddington降着を引き起こすような高密度な領域が原始銀河に存在するのか?などである。

まず最初の問題については、重い種BH形成のシナリオが提唱されたすぐ後から、臨界輻射強度を超える量の紫外線が照射されている原始銀河は宇宙に何個存在するのか?という問題が議論されてきた。原始銀河の候補としては、初代星の形成が進み“初代銀河”としての体を成し始める、 $M_h \sim 10^7 M_\odot$ 程度の質量を持つダークマター・ハローの中にできる天体 ($z \simeq 10$) が最初に議論されてきた [20]。この天体はビリアル温度が $T_{\text{vir}} \simeq 10^4 \text{ K}$ に達するため、水素原子による効率的な放射冷却により多くの星を形成することができる。このようなハローは 2σ の密度揺らぎから形成され、 $z \simeq 10$ の宇宙における数密度は $\sim 1 \text{ Mpc}^{-3}$ と大きくなるのだが、その一方で周囲の物質密度があまり高くない領域に存在する。その結果、周囲に紫外線を放射する銀河の数が少なくなり、 H_2 分子を十分に解離できるような環境に初代銀河は存在しないという事態に陥ってしまう。ここで言う「存在しない」というのは、実際に観測されているクエーサーの数密度 ($\sim 10^{-8} \text{ Mpc}^{-3}$) を説明することができないほど少ないという意味である。2つ目の種BHの成長過程に関しても、これまで多くの研究では上で定義したような初代銀河の中に種BHが誕生したと仮定して、その後のガス降着を調べるものがほとんどであった。しかし、こちらも残念ながら、初代銀河の中心で種BHがガス降着によりわずかに成長すると輻射加熱によりガスを効率的に飛ばしてしまい、種BHはsuper-Eddington降着はおろか、ほとんど質量を増やすことができないという結論が出されていた。

実はこれらの深刻な問題を解決できていないままARA&Aの執筆を始めてしまったため、あまり

すっきりとした結論のないレビューになってしまったきらいがある。しかし、その中でも共著者の間や同じ分野の他の研究者たちとの議論を重ねて、いくつかのモデルの提案を行うことができた(時間があらかず研究テーマを模索中の学生の人はぜひ探してみたい)。ここではそのすべてには触れられないが、自分が一番気に入っている「種形成と成長の統一モデル」を簡単に紹介したいと思う。

そもそも、宇宙初期の超巨大BHは低光度クエーサーを加えたとしても $z > 6$ の宇宙に300天体、つまり数10天体 Gpc^{-3} という珍しさの天体である [21]。そのような珍しい特異な天体の存在を説明するために、典型的な初代銀河をその種BHの形成場所として考えるのは如何なものだろう。案外、先行研究で想定されていた状況設定に囚われすぎてはいないだろうか。一方で、他の先行研究によって、宇宙初期に観測されるクエーサーの母銀河やダークマター・ハローは $M_h \gtrsim 10^{12} M_\odot$ と非常に質量が大きく、 $z \sim 6$ に至るまでにハロー合体を頻繁に経験してきたことが示唆されていた。この背景のもとで、北京大学で最初に受け持った大学院生の李文秀 (Li Wenxiu) さんと準解析的な計算を用いて、クエーサーの先祖となるような大質量ハロー ($\gtrsim 4\sigma$ の密度揺らぎ) における種BHの形成過程を調べることにした [22]。このような大質量ハローは宇宙の物質密度 (密度揺らぎ) が高い領域で形成されるため、周囲の星形成銀河により放射される紫外線強度が通常の状態よりも高くなり、種BHを形成する条件が整いやすくなる。また、ハロー合体により駆動される乱流やそれにとまなうガスの加熱の効果も H_2 分子の形成や冷却を遅らせる効果があり、さらに種BH形成の効率を上げることがわかった。興味深いことに、クエーサー母銀河になるようなハローは典型的な初代銀河に比べておよそ1万倍数の少ない珍しい天体であるにもかかわらず、周辺銀河からの強い紫外線照射と頻繁なハロー合体のおか

げで種BHの形成効率が10%以上と高い値を示すことが分かった。この結果と、豊内大輔さんとの共同研究で進めた輻射流体計算による星フィードバックの計算結果を合わせることで、高赤方偏移

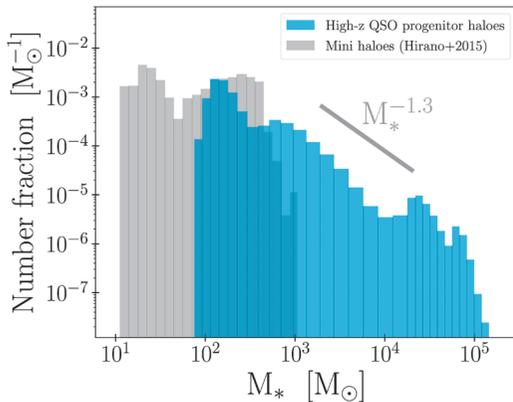


図4 高赤方偏移クエーサーの母銀河内で形成される種BHの質量関数(青の分布図). 比較のため、通常環境で形成される初代星の質量関数も示してある(グレーの分布図) [23].

クエーサーの先祖となるハロー中で形成される種BHの質量関数を予言することが可能になった [23] (図4).

加えて、種BH形成の条件が整っている物質密度が高い領域では、生まれたばかりの種BHが4章で説明した過程を経て super-Eddington 降着によって質量を急激に増やすことができることがわかった [19]. この急成長期は間欠的で数 Myr 程度しか持続できないため、種BHが一気に超巨大BHに進化するという訳にはいかないのだが、BH-銀河の質量比を1/100程度に保つことが期待される. 近傍宇宙でよく知られた相関関係は質量比がおおよそ1/1000程度になっており [24], 我々のシミュレーション結果は種BHがこの意味で銀河に比べて overmassive な状況で進化を開始することを示唆している (図5の赤線). この10倍大きい質量比の値は、実は観測されている $z \sim 6$ 辺りのクエーサーのBH質量とALMAによる銀河

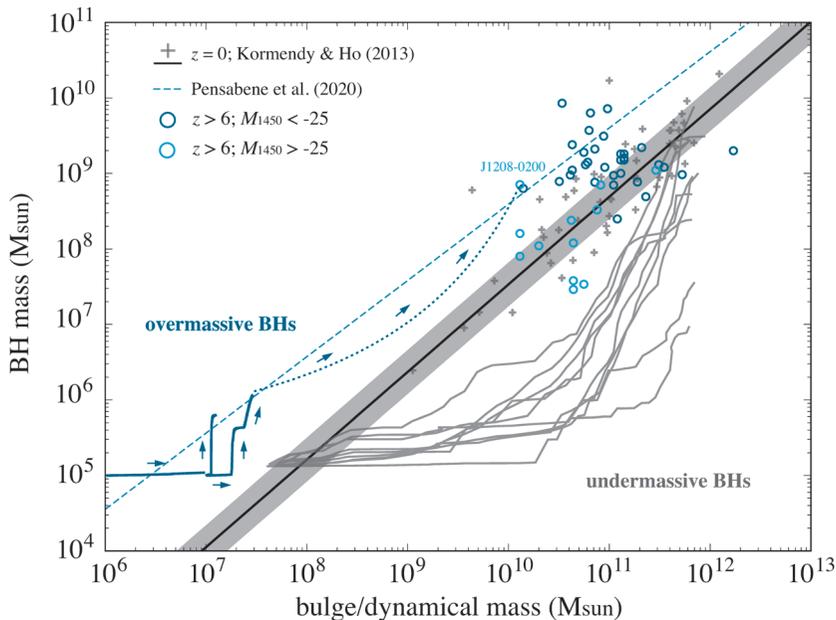


図5 超巨大BHと母銀河の共進化ダイアグラム. 丸印は $z > 6$ のクエーサーのBH質量と銀河の力学的質量の観測値を示している. 黒の実線は近傍宇宙でのBH-銀河の質量関係, 水色の破線は $z \sim 6$ のサンプルに対する相関関係を示している. 青線は中心核を分解した輻射流体計算の結果から予想された進化の様子で, グレー線は宇宙論的な銀河スケールのシミュレーションから予想されている進化の様子を示している [19].

の力学的質量の相関関係と整合性が取れており、少なくとも宇宙最大のクエーサー種族はこのようなBH-銀河質量比を普遍的に示すのではないかと（個人的に）考えている。一方で、現状行われているほとんどすべての宇宙論的な銀河形成シミュレーションの結果は、いわゆる *undermassive* なBH形成の進化シナリオ（図5の緑線；銀河が先に大きくなり、後からBHが追いつく）を支持している [25]。この結論の違いが起きる原因は、シミュレーションで取り扱っている空間スケールが異なるためだと考えられる。銀河スケールを無視する代わりに Bondi 半径周辺を調べた計算ではBHが *overmassive* な進化をたどる一方で、銀河スケールに焦点を当ててBH降着や輻射・アウトフローなどの過程を単純化したモデルで扱う計算ではBHは *undermassive* な進化をたどることになっている。今のところどちらのモデルが正しいのかを決める理論的な議論や観測的な証拠が欠けているのだが、これに関しては近い将来 JWST の観測が大きな進展をもたらしてくれるのではと考えている。最後の章で、そのあたりの展望について述べたいと思う。

6. 今後の JWST 観測に向けて

それでは観測的に、種BHと母銀河の共進化がいかにして始まったのかを検証する方法を簡単に検討していく。最も単純かつ明解な方法としては、今後の観測によりBH-銀河共進化の図の左下か右下の領域に天体を見つけてしまうのがよいだろう。そういう観点で言うと、*super-Eddington* 降着により急成長中の種BHは質量が軽くて明るく輝くことができるので、より高い赤方偏移に存在していても観測が可能になる。もう一方のシナリオでは、 $z \sim 6$ に近い宇宙になった後にBHが Eddington 限界程度の速さで成長してくるので、より低質量の範囲までBHを探索するのは現実的ではないかもしれない。

そこで我々は、種BHの初期の急成長期に注目し

て、輻射流体シミュレーション [19] で得られた物理量の情報を基にした種BHの放射スペクトラム (SED) の計算を行うことにした。図6には、 $z=8$ の原始銀河中で $M_{\bullet} \simeq 10^6 M_{\odot}$ の種が *super-Eddington* 降着率で成長している場合のSEDを示した [26]。まず押さえておくべきことは、JWST の NIRCam と MIRI を用いた 10^4 秒の測光観測によって、この種BHの放射は検出可能ということである。さらに、種BHを取り巻く高密度の *super-Eddington* 降着円盤から非常に強いバルマー輝線（静止系での $H\alpha$ 輝線の等価は幅 1300 \AA ）が放射されるため、特に $H\alpha$ 輝線が入るフィルター（この図の場合は F560W）で明るくなる。このような、短波長でクエーサーのような連続波のSEDを示し、かつ静止系可視光の波長で強い増光を示す赤いSEDは、急成長中の種BHに特有の性質となる。また一般にこのような高赤方偏移の天体は銀河系内の褐色矮星と似たような色を示すため、測光観測のデータのみから他の天体と区別できるかが鍵にな

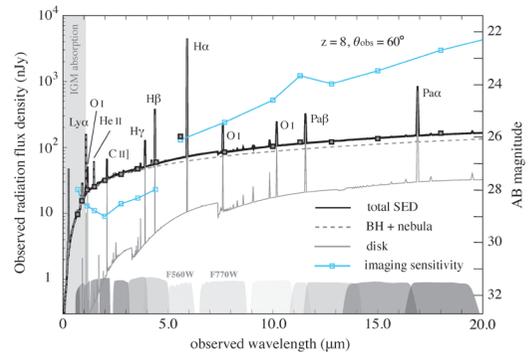


図6 急成長中の種BH ($z=8$) からの放射スペクトラム [26]。各線は、中心核円盤からの放射と nebular 輝線（破線）、 $r=0.1-1 \text{ pc}$ 領域の高密度ガス円盤からの放射（グレー）、そしてそれらの合計（黒）を示している。また、JWST の NIRCam と MIRI の測光観測を 10^4 秒行った際に期待される感度 ($S/N=10$) を水色の線で示している。 $r>0.1 \text{ pc}$ の領域から放射される Balmer 輝線、特に $H\alpha$ 輝線が MIRI バンドでの光度を上げることで、種BHからの放射スペクトルが特有のものになる。

るのだが、我々はNIRCamとMIRIのフィルターを使った観測で十分に褐色矮星や中間赤方偏移の赤い銀河などと区別できることを示した。

仮にこの方法で種BHの候補天体が見つければ、次は分光追観測により輝線診断を行うことになる。図6のSEDが正しいとすると、中心核の降着円盤から放射される輝線として、 $\text{O I } 1304 \text{ \AA}$, $\text{C II } 2326 \text{ \AA}$, $\text{H}\gamma$, $\text{H}\beta$ がNIRSpecを用いた観測で検出される見込みである。その中でも、 O I や C II は光学的に薄い輝線になっているので、この二つの輝線を組み合わせれば円盤の密度と温度を見積もることができるはずである。さらに、 $\text{H}\beta$ の広輝線放射から見積もられるBH質量をもとに、円盤内の降着流も推定することができると期待される。この記事が掲載される頃には何か面白い発見がなされているのか、あるいは空振り三振に終わっているのか、今から楽しみにしたいと思う。

謝辞

この度は2021年度日本天文学会研究奨励賞を頂き、大変光栄に思います。本稿で紹介させていただいた私の研究の多くは、大向一行さん、細川隆史さん、Zoltán Haimanさん、Jerry Ostrikerさん、櫻山和己さんとの共同研究によるものです。今後も研究の師匠として、皆さんの背中を追いかけていきたいと思っています。そして、共同研究や日々の雑談を通して多くのことを学ばせてもらっている、市川幸平さん、尾上匡房さん、衣川智弥さん、杉村和幸さん、千秋元さん、田中圭さん、富田賢吾さん、豊内大輔さん、平野信吾さん、仏坂健太さんらにも深く感謝をしたいと思います。最後に、北京大学Kavli研究所の皆さん、特に一緒に共同研究に取り組んでくれている大学院生の李文秀さん、胡豪杰さん、李政融さんの3名は今度食事に誘うと思います。

参考文献

- [1] 江上英一, 2022, 天文月報, 115, 62
- [2] 小山佑世, 他, 2022, 天文月報, 115, 144
- [3] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337
- [4] Rees, M. J., 1984, ARA&A, 22, 471
- [5] Wu, X.-B., et al., 2015, Nature, 518, 512
- [6] Bañados, E., et al., 2018, Nature, 553, 473
- [7] Izumi, T., et al., 2019, PASJ, 71, 111
- [8] 林忠四郎, 1973, 現代物理学の基礎 宇宙物理学 (岩波書店)
- [9] 平野信吾, 2020, 天文月報, 113, 804
- [10] Omukai, K., 2001, ApJ, 546, 635
- [11] Sugimura, K., et al., 2014, MNRAS, 445, 544
- [12] 稲吉恒平, 2015, 天文月報, 108, 265
- [13] Inayoshi, K., et al., 2020, ARA&A, 58, 27
- [14] Ohsuga, K., et al., 2005, ApJ, 628, 368
- [15] Weinberger, R., et al., 2018, MNRAS, 479, 4056
- [16] Alvarez, M. A., et al., 2009, ApJ, 701, L133
- [17] Park, K., & Ricotti, M., 2012, ApJ, 747, 9
- [18] Inayoshi, K., et al., 2016, MNRAS, 459, 3738
- [19] Inayoshi, K., et al., 2022, ApJ, 927, 237
- [20] Shang, C., et al., 2010, MNRAS, 402, 1249
- [21] Matsuoka, Y., et al., 2018, ApJ, 869, 150
- [22] Li, W., et al., 2021, ApJ, 917, 60
- [23] Toyouchi, D., et al. 2022, arXiv:2206.14459
- [24] Kormendy, J., & Ho, L. C., 2013, ARA&A, 51, 511
- [25] Habouzit, M., et al., 2022, MNRAS, 511, 3751
- [26] Inayoshi, K., et al., 2022, ApJ, 931, L25

The Assembly of the First Massive Black Holes and the Prospects of Upcoming Observations

Kohei INAYOSHI

*Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics,
Peking University, Beijing, China*

Abstract: The JWST has opened a new window into the most distant universe and is expected to unveil the early growth of supermassive BHs in the first galaxies. In this article, I discuss the current understanding of the formation process of their seed BHs and rapid growth mechanisms. I also propose how to excavate the unique radiative signatures of the first massive BHs with upcoming observations and constrain the theoretical framework.