

数値計算で探る宇宙初期の 巨大ブラックホール形成とその進化



鄭 昇 明

〈東北大学大学院理学研究科物理学専攻 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉
e-mail: sunmyon.chon@astr.tohoku.ac.jp

近年様々な観測から巨大ブラックホールの存在が確かなものとなってきた。中でも宇宙初期に存在する巨大ブラックホールは、その形成過程を理解する糸口になると考えられている。本稿では宇宙初期の巨大ブラックホールを形成するモデルの中で有力な候補の一つである、宇宙初期に存在する巨大ガス雲から重たい種ブラックホールを直接形成するモデルについて紹介する。特に宇宙論的初期条件から始まるシミュレーションを用いて、種ブラックホールの形成からその後の質量成長という一連の過程を追った計算の結果を紹介する。

1. はじめに

近年の Event Horizon Telescope (EHT) による観測 [1] をはじめとして、ほぼ全ての銀河の中心に超巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole, 以下 SMBH) と呼ばれる天体が存在するという描像が確かなものとなってきた。我々の銀河系中心における星の運動からも SMBH の存在が確かめられているが、この事実に対して今年のノーベル賞が与えられたことは記憶に新しい [2, 3]。この天体は質量にして太陽の 10^6 - 10^{10} 倍に達し、銀河の数々の性質 (バルジの質量, 速度分散など) と強い相関を示すことから、銀河の形成・進化に深く関わっていると考えられている。このことから SMBH はその形成過程への興味もさることながら、宇宙における星・銀河形成史を理解する上で非常に重要な天体である。しかしながらその形成過程は十分に理解されているとは言えず、天文学上の解くべき謎の一つとなっている。遠方宇宙における SMBH の観測はその起源を理解する上で非常に大きな手掛かりになると考えられている。近年はその進展がめざましく、赤

方偏移が 6 を超える非常に初期の宇宙において 200 を超える SMBH が見つかっている (図 1)。すばる望遠鏡をはじめとした日本のグループもこれらの発見に大きく貢献している [5, 6]。現在観測されている最遠方天体は $z=7.5$ に位置し、その質量は $2 \times 10^9 M_{\odot}$ と推定されている [7]。宇宙が始まって 7.5 億年後に対応するこの時期までに巨大天体を形成するプロセスについては現在活発に研究がされている。本稿では SMBH 形成の現状を概観しつつ、筆者のこれまでの研究をもとにその可能性や問題点を追求したい。

2. SMBH 形成シナリオ

SMBH の形成過程については、SMBH の種形成とその後の質量成長の大きく二つの段階に分けることができる。種形成に関しては、どの時期に、どのような質量を持つ星を形成するかが重要となる。質量の大きい星 (25 - $80 M_{\odot}$ または $240 M_{\odot}$ 以上) は、死後直接ブラックホール (BH) に崩壊すると考えられているからである [8]。種 BH の質量成長に関しては、後に見るように種の質量が大きいほど周囲のガスをより効率的に降着

することができる。特に高赤方偏移のSMBH形成に着目すると、限られた時間内に巨大天体を作らねばならないという制約から初期宇宙において如何にして質量の大きい天体を作るかが重要となってくる。

2.1 BHの質量成長

種BHは形成後、周囲のガスが降着することで質量成長すると考えられる。質量降着は主にBHの重力により引き起こされるが、1) ガスの圧力勾配力と2) 降着する物質より解放される輻射によって妨げられる。重力と上述の力の釣り合いで決まる降着率として、以下の代表的な二つ質量降着率が定義できる。

1) Bondi降着率

$$\dot{M}_{\text{Bondi}} = \frac{4\pi G^2 M_{\text{BH}}^2 \rho}{c_s^3} \quad (1)$$

2) Eddington降着率

$$\dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{4\pi G M_{\text{BH}} m_p}{\epsilon \sigma_{\text{T}} c} \quad (2)$$

ここで M_{BH} はBHの質量、 ρ と c_s はBH周囲のガス密度と音速、 c は光速、 m_p は陽子質量、 σ_{T} はトムソン散乱の断面積、 ϵ は降着した物質のエネルギーのうち輻射として解放される割合である。Bondi降着率については、周囲のガス密度が高いほど周りに多くの物質が存在するため降着率が大きくなる。また、ガスの温度が低いほど圧力も小さくなり、降着率は大きくなる。一方でEddington降着率については、 ϵ を除くとBHの質量のみに依存する量になっている。

周囲のガス密度が十分大きく、Bondi降着率が十分大きい状況を考えよう。この場合はBondi降着率に比べてEddington降着率の方が小さくなり、輻射圧によって物質降着が妨げられている状況に対応する。このため重力と輻射圧の釣り合いで決まるEddington降着率が実現すると考えられる。この時のBHの質量進化は、

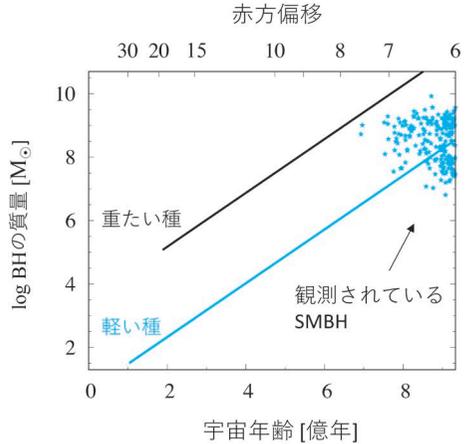


図1 種BHに物質がEddington降着した際の、BHの質量の時間進化を表した図。実線は、種BHの質量が30 (青)と $10^5 M_{\odot}$ (黒線)の仮定した場合の進化。右上の星印は現在観測されているSMBHの質量と赤方偏移を表している [4]。

$$M_{\text{BH}} = M_0 \exp(t/t_{\text{growth}}) \quad (3)$$

$$t_{\text{growth}} \sim 4000 \text{ 万年} \quad (4)$$

となる。ここでは標準降着円盤のモデルから導かれる $\epsilon=0.1$ という値を用いた。また M_0 は種となるBHの質量である。

図1の実線は異なる種質量 (青線: $30 M_{\odot}$, 黒線: $10^5 M_{\odot}$) のもと、Eddington降着での質量進化の様子を示している。右上の星印は観測されたSMBHの質量と赤方偏移を示している。この図よりEddington降着の下では、種の質量が十分に大きくないと観測された最遠方のSMBHの質量を達することができない。一方で10万太陽質量の種を用意することができれば、なんとか観測された質量を説明することが可能となる。

以上の議論ではEddington降着率が実現すると仮定した。しかしながら周囲のガス密度が低い環境下では、Bondi降着率が小さくなってしまい、結果的にEddington降着率を実現することが困難な可能性もある。それでも、Bondi降着率は M_{BH} の2乗に比例することから、種質量が大きいほど

SMBH形成に有利であると考えられる。

2.2 初期宇宙における超大質量星形成

ここでは初期宇宙において重たい種BHを形成する可能性について考える。初期宇宙における天体形成に関しては、これまで主に数値計算をもとにした純粋に理論的な観点から研究が行われてきた（詳細は平野信吾氏の記事参照 [9]）。Big Bangにより作られた始原始的な元素（主にH, He）より構成されるガスから形成する星は一般に初代星と呼ばれる。その質量は太陽系にある通常の星に比べて非常に大きく、典型的に太陽の100倍程度と考えられている [10-13]。しかしこの質量の星より作られる種BHでは、前節の議論からわかるように観測されたSMBHを形成することは困難である。それでは、より重たい星を宇宙初期に作ることは可能であろうか？ その前にまずなぜ初代星が近傍の星に比べて大質量になるかを考えよう。この考察の延長線上により重たい星を作る機構が見えてくる。

星形成はガス雲の質量が十分大きくなり、自身の重力を圧力で支えきれなくなった時に始まる。ガス雲が重力不安定になる臨界的な質量のことをジーンズ質量 M_{Jeans} と呼ぶ。この重力崩壊は中心に光学的に厚い原始星と呼ばれるコアが形成されるまで進む。原始星形成後もガスは中心に向かって落ち続けるため、この落ち込んでくるガスを降着することで、原始星の質量は時間と共に増大する。この時の質量降着率 \dot{M} は以下のように評価できる [14, 15]。

$$\dot{M} \sim \dot{M}_{\text{Jeans}}/t_{\text{ff}} \sim c_s^3/G \propto T^{3/2} \quad (5)$$

ここで t_{ff} は自由落下時間である。この式は、ガス雲の温度が高いほど原始星へのより高い降着率が実現することを意味する。これは高温のガス雲ほど、重力に抗してより大きな質量を支えることができるためである。すなわち大質量星形成に関しては、如何にして高温のガス雲を重力崩壊させるかが鍵となる。

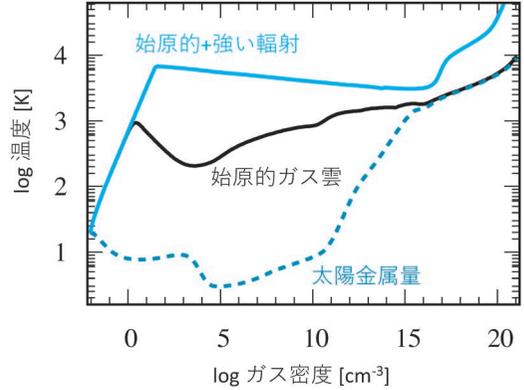


図2 異なる環境でのガス雲の温度進化を表した図。破線は太陽系近傍の化学組成を持つ場合、黒線は始原始的な化学素性を持つ場合に対応する。青の実線は、化学組成は始原始的でなおかつ強い輻射が存在する環境下での温度進化を表している。

ガス雲の温度を決める大きな要因として化学組成と外部輻射が挙げられる。化学組成に関しては、炭素や酸素をはじめとする重元素の量が重要となってくる。重元素の量が大きいほどガスの冷却が効率的になり、温度が低くなる。また外部輻射は、ガスを直接加熱したり化学組成を変化させることでガス雲の温度に影響を及ぼす。図2では、ガス雲が太陽金属量（破線）、始原始的（黒）、始原始的かつ強い輻射にさらされた場合（青線）の温度進化をそれぞれ示している。太陽金属量の時はガスは非常に効率よく冷えることができ、温度は数K程度であることがわかる。一方で始原始的ガス雲では、水素分子の回転準位の遷移によって典型的に数100 Kまで冷却が進む。この始原始的ガス雲がさらに強い輻射にさらされると、冷却材である水素分子が破壊されることで温度が8000 Kまで上昇する。この時、Ly α を始めとする水素原子に関する冷却過程によってガスの温度は決まる [16]。

以上より初代星が近傍の星に比べて大きな質量を持つのは、ガス雲の冷却過程に起因することがわかる。初代星に比べてさらに重たい星を作るためには、周囲の星や銀河からの強い輻射で冷却材

となる水素分子を破壊するなど、ガスをさらに高温の状態に保てばよい。水素原子で冷却するガス雲では、最終的な原始星への降着率が式(6)より

$$\dot{M} \sim 0.1 - 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \quad (6)$$

と見積もられる。このような非常に高い降着率が続けば、100万年にわたる星の寿命の間に10万太陽質量程度の星を形成することが可能となる。

このような質量を持つ星は、超大質量星 (Super Massive Star, 以下SMS) と呼ばれる。この星は寿命を終えたのちBHに崩壊するか、場合によっては水素燃焼中に一般相対論的な不安定が働きBHに崩壊する [17-19]。このことから上述の種BHを形成する機構、または、種BHへの質量降着を経てSMBHを形成するシナリオは「直接崩壊 (Direct Collapse, 以下DC) シナリオ」と呼ばれる。本稿では、初期宇宙で重たい種BHを形成するシナリオに焦点を当てて話を進めていく。

3. 宇宙論的シミュレーションから探る超大質量星形成

それでは宇宙においてSMS形成は実現可能なのだろうか？ また実現するとしたら、いつ、どこで、どのくらいの頻度で形成するのだろうか？ これを知るためには、SMS形成が起こる環境が実現する頻度を調べればよい。特にSMSが星や銀河からの強い輻射を受けた環境において形成されることから、輻射を強く受けた、始原的な組成を持つガス雲の数を数えればよい。なお、筆者が研究を始める以前は、二つの異なる手法を組み合わせることでSMS由来の種BHの形成率が見積もられていた。

一つは高解像度の原始星スケール (~au) を分解した計算である [20-22]。異なる輻射強度のもとで、ガス雲の崩壊から始まり原始星形成に至る過程を計算する。この結果からSMS形成に必要な輻射強度が見積もられる。もう一つは銀河スケール (kpc-Mpc) の計算である [23-25]。銀河

の光度や空間分布を与えることができれば宇宙における輻射強度の分布がわかる。以上の二つを合わせることで、SMS形成に至る環境が実現する頻度を計算できる。

しかし結果として得られた種BHの形成レートには大きなばらつきがあった。1 Mpc³あたり数個の形成を予言するものから1 Gpc³あたり数個という見積もりまであり、用いる計算手法によって結果に9桁ほどの開きがあった [26]。この不定性の大きな要因は、突き詰めれば銀河スケールの計算において解像度が足りないことにあると考えられる。確かに、銀河形成の手法を用いることで輻射強度の空間分布はわかる。しかしながら、計算においてガス雲の重力崩壊過程は空間的に分解されていない。つまり、星形成という空間的に分解されない現象を考える際にはそれぞれの計算においてなんらかの仮定を置く必要がある。このあたりの仮定が計算ごとに違うために、種BHの形成率に計算ごとに大きなばらつきが生じてしまったのである。

そこで我々は銀河スケールの計算から始まってSMSを形成する一連の過程について計算を行うことにした。特に、重力崩壊から原始星形成に至る一連の過程を空間的に分解することを試みる。この計算より、種BHの形成率を先行研究と比べてより詳細に見積もることができる。実際に我々は宇宙論的初期条件から始まってSMS形成に至る例を発見することができた [27]。ここではこの計算から新たにわかったSMS形成に関する結果について紹介する (図3)。

3.1 超大質量星はどこまでできるか？

我々は宇宙論的初期条件より始まる計算を行い、宇宙においてSMS形成が実現するか否かを探る。しかしSMS形成に至るガス雲は稀にしか存在しないため、広い空間領域 (~Mpc) を探索する必要がある。一方で、宇宙初期の星や銀河の形成史を知るためには少なくとも初代星を形成するミニハロー (~10⁵ M_⊙) を分解する必要がある。

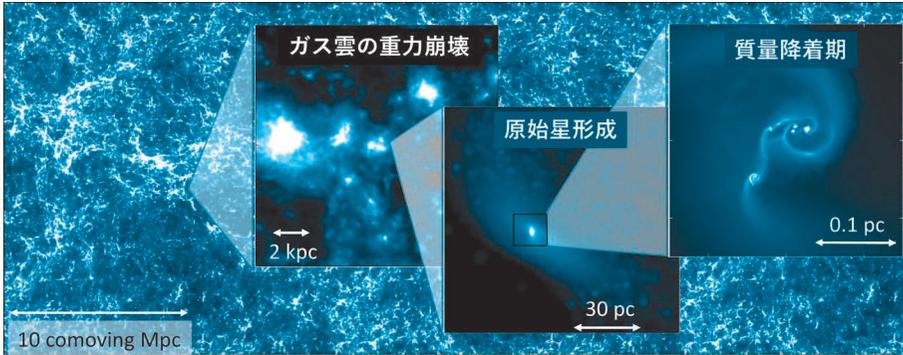


図3 我々は20 Mpcの宇宙論的スケールの中から、超大質量星形成に至るガス雲を特定し流体計算を行うことで超大質量星が実際に形成することを示した。図は各スケールにおける物質やガスの分布を示したものである。

る。このような広い領域でミニハローを分解するには、とても大きな計算機資源を要する。そこで我々はまず計算量の小さいN体計算を用いて、SMS形成が起こる候補となるハローを特定することにした。ここでのN体計算とは、ダークマターに由来する重力的な構造形成のみを追う計算のことである。

SMS形成を追うためには、光源となる星や銀河の形成を追う必要がある。我々はN体計算の結果と銀河の形成過程を対応づける“準解析的な”手法を用いることにした。この手法はハロー内部でのガスの冷却、星形成、星からのフィードバックなどの星形成に関する物理過程を取り入れたモデルとなっている。これによって、どのハローでどのくらい星ができて、どのくらい光っているかがわかる。また、初代星が形成して重元素汚染が進む過程も知ることができる。結果として計算領域での輻射強度と重元素の空間分布がわかるのである。

SMS形成に必要な条件は強い輻射を受けていること、化学組成が始原的であることの二つであった。これを思い出すと、以上の手法によりSMSを形成する候補となるハローを見つけることができる。我々は20 Mpc³の計算領域から62個の候補ハローを見つけた。しかしこれらはあくまで候補である。超大質量星を形成するには、ハ

ロー内部のガス雲が重力崩壊する必要がある。この過程が実現するかはN体計算だけでは追うことができない。

3.2 ガス雲の重力崩壊と超大質量星形成

我々は得られた候補となるハローについて流体計算を行うことで、実際にそのハローでガス雲が崩壊し星形成に至るかを調べることにした。候補ハローの周辺の流体力学的な進化のみを追うことにすれば、少ない計算量ですむ。それでも62個全てについて計算を行うのは大変だったので、そのうちの42個について計算を行った。計算を始めた当初は先行研究で仮定されているように、ほとんどのハローでSMSが形成するだろうと考えていた。しかし、実際に計算をしてみるとこの予想は大きく裏切られる形となった。ほとんどのハローでガス雲は重力崩壊することがなく、SMSは形成しなかったのである。そんな中でもSMS形成に至るケースを2例発見することができた。

多くのハローで星形成に至らなかった理由は簡単である。ハローにあるガスにおいて重力崩壊が始まる前に、近くの巨大銀河と合体してしまうのである。SMS形成に必要な条件の一つに強い輻射場という条件があったことを思い出してほしい。このような強い輻射場を実現するためには、ハローは光源となる銀河の近傍 (~1 kpc) にいる必要がある。そのため、ハローは銀河からの強い

重力により引き寄せられる。あまりに銀河に近づくとき、いわゆる環境効果によってハロー内のガス雲は破壊される。実際に、銀河からの重力で引きちぎられてしまう効果（潮汐破壊）や銀河ガスとの相対速度により生じるラム圧によってガスがハローから剥ぎ取られる効果によってガス雲の崩壊が妨げられたと解釈できる。これらの効果はガス密度の高い領域（ 10 cm^{-3} ）で起こるため、解像度の高い流体計算を行って初めて明らかになった結果である。

そのような中で幸いにもハロー内部のガスが崩壊に至る例を2例見つけることができた。銀河からの強い潮汐力を受けながらも無事にガス雲の重力崩壊が進行し、中心にSMSの種となる原始星が形成したのである。これらのガス雲では、重力崩壊に至らなかった場合と比べて大きな特徴があった。どちらの例においても重力崩壊前にハロー同士の衝突・合体を経験していた。この衝突によってハロー内のガスがハローの中心に集中する。中心の領域ほど銀河からの潮汐力は弱くなるので、衝突によりガス雲の重力崩壊が進行しやすくなったと考えられる。

4. 原始星から超大質量星へ

宇宙論的な初期条件から始まって高温のガス雲が重力崩壊し原始星形成に至る例を二つ発見することができた。しかしSMSが形成することを確かめるには、原始星からSMSに至る“質量降着期”を計算する必要がある。これは原始星が周囲からガスを降着し質量成長する段階のことを指し、星の質量を決定する上で重要な過程である。質量降着率は式(6)で $\sim 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ と評価されているが、この値は全てのガスが一つの原始星に降り積もると仮定している。もし分裂などによって星が複数形成されると、個々の星への降着率は $1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ より大きく下がってしまう可能性もある。

特に重要なのが原始星の周りに形成される星周円盤の分裂である。降着する物質が角運動量を持

つことから、原始星の周りにガス円盤が形成される。円盤内のガスがより外側のガスに角運動量を渡すことで、物質が内側に運ばれ原始星は質量成長する。中心星への質量降着率が高い系では星周円盤は非常に重たくなり、重力的に不安定になり分裂する可能性が高い [22, 28]。円盤分裂以外にも、より大きなスケールでの分裂が起こることも先行研究より示唆されている [29]。この分裂がどのように星の質量分布に影響を及ぼすかを調べるためには、実際にこの質量降着期について数十万年から数百万年におよぶ長時間の進化を追う必要がある。そこで我々はこれまでの原始星形成に至った2例について、原始星周囲の10-100 auを空間的に分解する長時間・高解像度計算を行うことで、形成する星の質量を求めることにした [30]。

図4ではこの2例について、原始星周りに円盤

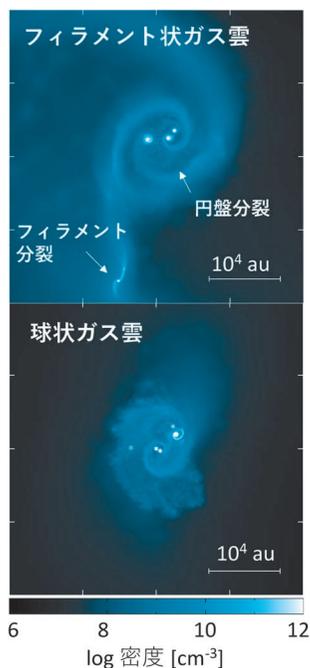


図4 原始星周りの密度分布を示した図。上段はフィラメント状ガス雲、下段は球状ガス雲での分布を表している。いずれの場合も原始星周りに円盤が形成されており、この円盤の分裂によって連星が形成されている。

が形成された様子を示している。この円盤が重力不安定により分裂して複数の星が形成されている。また、二つのガス雲はその形状に違いがあることがわかる。特に上段のパネルを見ると、円盤以外にも縦方向に伸びた密度構造が存在する。そこで、以降は二つのガス雲をフィラメント状ガス雲（上段）と球状ガス雲（下段）と呼ぶことにする。このような形状の違いは近傍の巨大銀河との潮汐相互作用が原因と考えられる。フィラメント状ガス雲は銀河から数百pcとかなり近い距離に位置するため、大きな潮汐力によって形が歪む。この歪みは収縮と共に増大し、ガス雲は細長いフィラメントのような形状になる。後に見るようにこの形状の違いは、星の質量進化に大きく影響する。図5は原始星ができて10万年の時点での原始星の質量分布を表したものである。フィラメント状ガス雲でより顕著に分裂が起きており、球状ガス雲に比べてより多くの星が形成されている。これはフィラメント状ガス雲では円盤分裂のみならず、円盤の外に存在するフィラメントの一部も分裂するためである。事実、図4上段の図で矢印で示したところに、フィラメント分裂が起こっているのが確認できる。この結果、複数の星周円盤がガス雲中に形成されることとなり、より多数の星が形成される。一方で球状ガス雲の方では単一の星周円盤が形成され、分裂の頻度も少なく4個の星が形成されるのみである。このため、フィラメント状ガス雲ではより多くの星で降着するガスを分け合った結果、典型的な星質量が数千 M_{\odot} と、球状ガス雲の星質量（2-3万 M_{\odot} ）に比べて1桁弱小さくなっていることがわかる。フィラメント状に引き伸ばされる原因が近傍銀河による潮汐力によるものであったことを考えると、大きなスケール（ \sim pc）における潮汐力の効果が結果として原始星の質量成長という非常に小さなスケールの現象に影響を及ぼすことがわかった。

以上は原始星の10万年間の進化を追った結果である。計算終了時点でも原始星への降着が続い

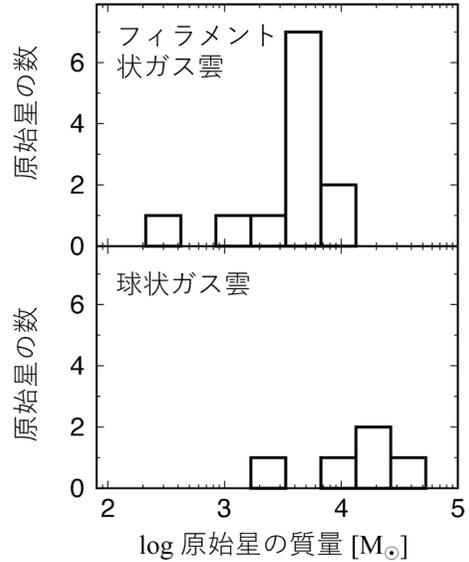


図5 原始星形成後10万年での原始星の質量分布。

ていることから、さらに質量は増大する。実際に大質量星の寿命は100万年程度であるので、質量はもう一桁大きくなるであろう。つまりフィラメント状ガス雲で数万 M_{\odot} 、球状ガス雲で数十万 M_{\odot} の超大質量星が形成されると予想される。近傍銀河からの環境効果で星質量は1桁ほど小さくなる傾向はあるものの、いずれのガス雲でも超大質量星が形成されることが示された。

5. 種BHは成長できるか？

ここまでで宇宙論的な初期条件から始めて重たい種BHが形成する例を見つけることができた。それでは形成された種BHは効率よく質量成長して、観測されているようなSMBHに成長できるのであろうか？ 我々はこれを調べるべく、超大質量星がBHに崩壊したと仮定してその後の質量進化を数値計算によって追うことにした [31]。

宇宙論的スケールでのBHの質量進化を計算する際には注意を必要とする。BHの大きさはSchwarzschild半径程度なので、 $10^5 M_{\odot}$ の種BHでは 10^{-8} pc程度である。宇宙論スケール (kpc-Mpc) の計算でこのような小スケールを分解する

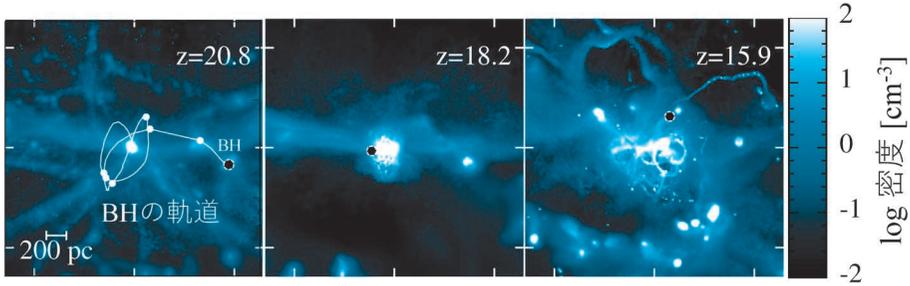


図6 BHの軌道進化とその周辺の密度分布を示した図。白の破線で囲まれているのがBHに対応する。左のパネルにBH形成後の軌跡を白い線で示した。白点は $z=20$ から14まで、 z が1進むごとのBHの位置を示している。

ことは不可能に近い。代わりにこの種の計算ではガスの圧力勾配力との釣り合いで決まる Bondi 半径を分解することを目指す (式(1) 参照)。この半径以下では、降着するガスは基本的にBHの重力によって落ち込んでゆく。実際にはこれ以下の半径で、角運動量や輻射との相互作用によって降着は妨げられうる。そのため、Bondi降着率はBHの質量成長率の実質的な上限とみなせる。

我々はBHが周囲のガスを Bondi降着率で降着するという仮定のもと計算を行った。種BHは形成後近くに存在する巨大銀河に重力で引き寄せられていく。この銀河に豊富に存在するガスを効率よく降着して、BHは成長するであろう。Bondi降着率はガスの温度や密度に依存する (式(1)) ため、このBHが降着するであろう銀河内部のガスの状態を再現する必要がある。このためにも我々は星からの輻射や超新星爆発による周囲のガスの加熱、BHにガスが降着する際に解放される輻射によるフィードバックによる影響等も新たに考慮することにした。図6はBHが形成後、銀河中心に落ち込んでゆく様子を示している。BHは形成直後、確かに銀河中心に近づいてゆく。しかし銀河中心に留まることはなく、銀河の外縁部 (~kpc程度) を漂っていることがわかる。それではこの時のBHの質量成長はどうなっているのだろうか？

図7は種BHの質量進化 (上段) と質量成長率 (下段) を示したものである。またBHからの輻

射フィードバックの重要性を探るために、降着したエネルギーの10%を輻射として放出するモデル (青線) と輻射なしのモデル (黒線) でその影響を比較した。BHからの輻射を考慮したモデルでは、質量がほとんど変化していないことがわかる。質量降着率はEddington降着率に比べて4-5桁ほど小さくなっている。一方でBHからの輻射がないモデルではBHは形成直後にはEddington降着率で成長するが、 $z=17$ を境に降着率が大きく下がっていることがわかる。このことからBHの成長が非効率的なのは、BHからの輻射だけでなくそれ以外にも原因があることが推測できる。

実際に降着率が下がり始める時期である $z=17$ は、BHが銀河中心に到達する時期に対応する。計算結果を詳細に調べると、BH周囲の高密度のガスが銀河中心における活発な星形成活動 (輻射や超新星によるフィードバック) で吹き飛ばされていたことがわかった。そのため、BHが質量成長するためには銀河ガスを新たにBHの重力圏に集める必要がある。しかしBHは銀河ガスと大きな相対速度 (~50 km s⁻¹) を持つため、銀河ガスはBHの重力による束縛から容易に逃れてしまう。結果的に、一度BHに強く束縛されたガスが剥ぎ取られてしまうとBHは銀河ガスとの大きな相対速度を持つため、新たにBHにガスを供給するのは難しいということを示唆している。

以上の問題はDCシナリオ起源の種BHが持つ特徴の一つと考えられる。すなわちDCシナリオ

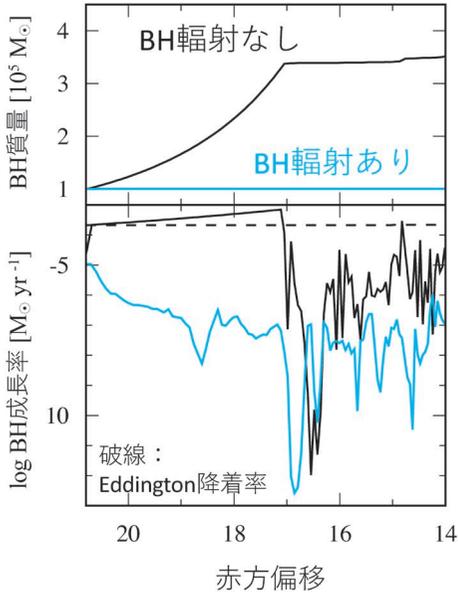


図7 BHの質量（上段）と質量成長率（下段）の時間進化を示した図。青線はBHからの輻射を考慮した場合、黒線は考慮しなかった場合に対応する。下図の破線は $10^5 M_{\odot}$ のBHに対するEddington降着率を示している。

で重たい種BHを形成する際には、ガス雲の化学組成が始原的であることが要求される。結果として重元素汚染を避けるために、星形成銀河から～kpc程度離れた場所で種BHは形成する。このBHは形成後、銀河からの強い重力により次第に加速されてゆく。BHが銀河ガスと相対速度を持たずにガスを効率よく降着するためには、銀河内の星やガスと力学的に相互作用して運動エネルギーを失う必要がある。この過程は力学的摩擦と呼ばれる。我々は力学摩擦によってBHが運動エネルギーを失い銀河中心に落ち込むタイムスケールを見積もった。典型的なガス密度（ $\sim 100 \text{ cm}^{-3}$ ）のもとでは、落ち込むのに10億年程度のかかることがわかった。 $z=7$ での宇宙年齢が8億年であることを考えると、観測されたSMBHをDCシナリオ起源の種BHで説明するのは一般に困難であることが示唆される。

6. 今後の展望

我々は宇宙論的初期条件から始まる数値計算を用いて、種BHの形成からその後の質量進化までの一連の過程を追うことに成功した。しかし結果的にはDCシナリオが予言する重たい種BHは効率的に成長することは難しいという結論が得られてしまった。それではSMBHはどのようにして形成されるのであろうか？

一つの可能性としては、重たい種BHのほとんどは成長しないがごく稀に効率よくSMBHに成長するというものである。実は我々の計算から導かれる種BHの形成レートは Gpc^3 あたり 10^{5-6} 個であり、観測されているSMBHの数（ Gpc^3 に数個）に比べて格段に大きい。銀河のガス密度が高く力学的摩擦が効きやすい環境が稀にでも存在すれば、BHが銀河中心に落ち込んで効率よい質量成長が実現するかもしれない。別の可能性として、ハローの中心により近い領域で種BHを形成する方法も考えられる。例えば初代星起源の質量の小さいBH（ $100 M_{\odot}$ 程度）は、宇宙の構造形成のより早い段階で形成されるため、ハロー中心に近い領域で形成されうる。近年Eddington降着率を超える質量降着を実現する機構も盛んに議論されており [32–34]、銀河中心への落ち込みという観点ではこちらの方が有利な可能性もある。

また銀河中心付近に近いある程度金属汚染が進んだ領域で重たい種BHを形成する方法も考えられる。このような領域ではダスト冷却によりガスの温度が下がってしまうため、重たい種BHを形成することは困難だと考えられてきた。しかし近年筆者のグループをはじめとして、金属汚染が進んだ領域でもDCシナリオと同様に重たい種BHが形成されることが示されている [35, 36]。

将来的に見込まれる様々な観測により我々のSMBH形成史の理解も大きく進むと考えられる。例えばJWSTによる $z=7$ を超えるより遠方のSMBH分布が明らかになるであろう。また、

LISA[37] や DECIGO[38] などの宇宙空間における重力波干渉計は高赤方偏移 ($z > 10$) の重たい BH 合体によるシグナルを検出できる。我々の結果から示唆されるように、力学的摩擦が非効率な環境では種 BH は天の川銀河を含む近傍の銀河の外縁部を依然として漂っている可能性もある。これらの観測も SMBH の形成過程に深い示唆を与えるであろう [39]。観測と数値シミュレーションの結果を比較することで、SMBH の起源のみならず宇宙初期の天体形成や銀河の成り立ちなどより広い文脈での理解につながることを今後期待したい。

謝辞

本稿の内容は主に吉田直紀氏、細川隆史氏、平野信吾氏、大向一行氏との共同研究に基づいています。特に指導教員として非常に興味深いテーマを与えてくださった吉田直紀氏には深く感謝を申し上げます。またコードの使い方を丁寧に指導してくださった鎌田歩樹氏、白崎正人氏、千秋元氏をはじめとした研究室の皆様には、この場を借りて深く感謝を申し上げます。また今回執筆の機会を与えてくださった富田賢吾氏にもお礼申し上げます。本研究は国立天文台シミュレーションプロジェクト (CfCA) の XC50 や京都大学の基礎物理学研究所の XC40 システムを用いて行われました。関係者の皆様にも深くお礼を申し上げます。

参考文献

[1] Event Horizon Telescope Collaboration, 2019, ApJ, 875, L1
 [2] Eckart, A., & Genzel, R., 1997, MNRAS, 284, 576
 [3] Ghez, A. M., et al., 1998, ApJ, 509, 678
 [4] Inayoshi, K., et al., 2019, arXiv e-prints, arXiv:1911.05791
 [5] Matsuoka, Y., et al., 2016, ApJ, 828, 26
 [6] Onoue, M., et al., 2019, ApJ, 880, 77
 [7] Bañados, E., et al., 2018, Nature, 553, 473
 [8] Heger, A., & Woosley, S. E., 2002, ApJ, 567, 532
 [9] 平野慎吾, 2020, 天文月報, 113, 804
 [10] Hirano, S., et al., 2014, ApJ, 781, 60

[11] Susa, H., et al., 2014, ApJ, 792, 32
 [12] Hirano, S., et al., 2015, MNRAS, 448, 568
 [13] Sugimura, K., et al., 2020, ApJ, 892, L14
 [14] Larson, R. B., 1969, MNRAS, 145, 271
 [15] Penston, M. V., 1969, MNRAS, 144, 425
 [16] Omukai, K., 2001, ApJ, 546, 635
 [17] Shibata, M., & Shapiro, S. L., 2002, ApJ, 572, L39
 [18] Umeda, H., et al., 2016, ApJ, 830, L34
 [19] Uchida, H., et al., 2017, Phys. Rev. D, 96, 083016
 [20] Latif, M. A., et al., 2013, MNRAS, 436, 2989
 [21] Inayoshi, K., et al., 2014, MNRAS, 445, L109
 [22] Sakurai, Y., et al., 2016, MNRAS, 459, 1137
 [23] Dijkstra, M., et al., 2008, MNRAS, 391, 1961
 [24] Agarwal, B., et al., 2012, MNRAS, 425, 2854
 [25] Johnson, J. L., et al., 2013, MNRAS, 428, 1857
 [26] Habouzit, M., et al., 2016, MNRAS, 463, 529
 [27] Chon, S., et al., 2016, ApJ, 832, 134
 [28] Matsukoba, R., et al., 2019, MNRAS, 484, 2605
 [29] Becerra, F., et al., 2015, MNRAS, 446, 2380
 [30] Chon, S., et al., 2018, MNRAS, 475, 4104
 [31] Chon, S., et al., 2020, e-prints, arXiv:2008.09120
 [32] Inayoshi, K., et al., 2016, MNRAS, 459, 3738
 [33] Sugimura, K., et al., 2017, MNRAS, 469, 62
 [34] Toyouchi, D., et al., 2019, MNRAS, 483, 2031
 [35] Chon, S., & Omukai, K., 2020, MNRAS, 494, 2851
 [36] Tagawa, H., et al., 2020, ApJ, 892, 36
 [37] Amaro-Seoane, P., et al., 2012, Class. Quantum Gravity, 29, 124016
 [38] Kawamura, S., et al., 2011, Class. Quantum Gravity, 28, 094011
 [39] Guo, M., et al., 2020, ApJ, 901, 39

Exploring Formation of Supermassive Black Holes via Numerical Simulations

Sunmyon CHON

Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

Abstract: More than 200 quasars are found at the epoch of $z > 6$, indicating the supermassive black holes with $10^9 M_{\odot}$ already formed within the first billion year. One promising formation scenario is called the “direct collapse” scenario, in which supermassive stars with $10^5 M_{\odot}$ form in the early universe. Starting from the cosmological initial condition, we have studied the formation of supermassive stars and the mass growth of the remnant massive black holes.