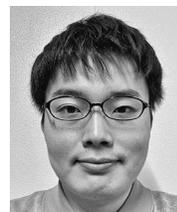


# 宇宙最初の星々の誕生

平野 信吾

〈九州大学大学院理学研究院地球惑星科学専攻 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744〉

e-mail: hirano.shingo.821@m.kyushu-u.ac.jp



私たちのルーツを星々に求めると、宇宙における第一世代の星々・初代星まで遡ることができま  
す。標準宇宙論に基づきコンピュータ上に再現した初期宇宙の時間を進めることで、宇宙最初の  
星々の誕生する様子が数値シミュレーション上に再現されます。本稿では初代星の基本的な形成シ  
ナリオをまとめ、大規模なサーベイ・シミュレーションの結果を用いて星の最も基本的なパラメー  
タである質量について議論していきます。また、宇宙の限られた領域でしか誕生しない、しかし極  
めて質量の大きな初代星の形成シナリオについても紹介します。

## 1. はじめに

137億年前のビッグバン直後の宇宙はあまりに  
高温・高密度であったため、分子も、原子も、原  
子核でさえも一つに結合していませんでした。  
火の玉状態の宇宙は膨張すると共に冷え続け、  
ビッグバンからおよそ3分後、陽子と中性子が初  
めてヘリウムと他の軽い原子核（軽元素）へと融  
合できるようになります。この時の宇宙は核融合  
炉そのものでした。“ビッグバン元素合成”は17  
分間ほど続き、その後は宇宙の密度と温度が核融  
合に必要な値を下回るため、この反応は止まって  
しまいます。この時、炭素や酸素のような地球上  
の生命の材料となる重い原子核（重元素）はまだ  
合成されておらず、宇宙に存在していません。

宇宙年齢で数億年が経過した頃、水素とヘリウ  
ムからなる始原ガスから最初の世代の星々が誕生  
しました。核融合の進む高温・高密度状態は（1）  
恒星の中心核と（2）巨大な恒星がその一生の最  
期に起こす超新星爆発において再び現れ、宇宙で  
初めて重元素が作られます。重元素は恒星から星  
間空間へと放出され、この重元素を含む星間ガス  
から次の世代の星々が誕生します。この第二世代

の星々も一生を通じて重元素を合成し、それは次  
の世代の星々の材料となります。このような恒星  
と星間物質の間に成り立つ循環サイクルを繰り返  
すことで、宇宙の元素組成は現在のものに近づい  
ていきます。私たち生命の身体も星々が合成した  
元素によって作られているため、彼らは遠いご先  
祖といえるでしょう。

私たちのルーツを星々に求めると、宇宙におけ  
る第一世代の星々・初代星まで遡ることができま  
す。生命のみならず地球や太陽の共通の起源とな  
るこの星々は、どのような天体だったのでしょ  
うか。遠く離れた宇宙からの光は地球に届くまで  
に時間がかかるため、遠くの宇宙を観測すること  
で宇宙の昔の姿を調べることができます。最遠方観  
測の記録は数年ごとに更新されており、最新の装  
置によって赤方偏移 $z \sim 9.1$ （現在からおよそ130  
億年前）の宇宙まで観測の手が届くようになり  
ました[1]。残念ながら、初代星が誕生する時代の  
宇宙はさらに遠く（赤方偏移 $z \geq 20$ 、宇宙年齢2  
億年頃）、未だ観測できていません。

星がどのような一生を過ごして周囲の物質に影  
響を与えるかは、星の質量に強く依存していま  
す[2]。そのため宇宙の初期進化を考える際には、

初代星の質量が重要なパラメータとなります。重元素を含まない始原ガスから誕生する初代星は、我々の銀河系に見つかっている星とは異なるプロセスで誕生したと考えられています。近年の観測からは、金属量の極めて小さな第二世代の星と考えられる天体 [3] や、遠方に存在する太陽の10億倍もの重さに達する超巨大ブラックホール [4, 5] など、初代星の質量を探る手掛かりとなる天体が見つかっています。こうした特異な天体の形成メカニズムを明らかにするためにも、その起源となる初代星について理解しなければなりません。初期宇宙をターゲットとした観測準備が進むなか、初期宇宙の天体形成に関する統一的な描像を作り、将来観測による検証可能性についての議論を十分深めておく必要があります。

星や銀河の存在しない“宇宙の暗黒時代”からどのようにして最初の世代の星々は誕生するのでしょうか。私はスーパーコンピュータを用いて初期宇宙を再現するシミュレーションを行うことで、初代星の誕生プロセスを調べています。本稿では初代星の形成過程を調べた理論的研究について紹介します。

## 2. コンピュータ内の初期宇宙

初代星が誕生する時代の宇宙はまだ観測できていませんが、実はさらに昔の宇宙の姿が一コマだけ観測されています。宇宙年齢にして38万年頃、電子が陽子に初めてとりこまれるようになり、光子が電子と相互作用せず直進できるようになります。この時の光が宇宙マイクロ波背景放射として宇宙の全天にわたって観測されています。宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎは当時の宇宙における物質の密度揺らぎに対応するため、この揺らぎのパターンを解析することで宇宙初期の物質分布の情報を引き出すことができます。

この宇宙マイクロ波背景放射の観測によって驚

くべき精度で求められている宇宙論パラメータを用いることで、初期宇宙の状態が再現されます。標準宇宙モデルより、宇宙全体のエネルギーが(1)宇宙を膨張させる暗黒エネルギー(ダークエネルギー)、(2)重力源となって構造形成を主導する暗黒物質(ダークマター)、そして(3)星々の材料となる通常の物質(ガス)にどのように分配されているかが決まります。宇宙マイクロ波背景放射上の微小揺らぎを観測すると構造形成の種となる暗黒物質とガスの物質分布が決まり、またビッグバン元素合成の原子核反応を計算すると初期宇宙の始原ガスの化学組成が得られます。

このように初代星が誕生する前の初期宇宙の状態は再現することが可能です。また初期宇宙の星形成に関連する基礎物理過程は既に知られています。つまり、初代星の形成過程は第一原理的に調べることが可能な問題なのです。解くべき計算量は膨大なものになりますが、現在のスーパーコンピュータを用いれば十分な計算資源を確保することが可能です。

コンピュータ内に再現した初期宇宙の時間発展を数値的に解くことで、初代星が誕生するまで時間を進めることができます。膨張する宇宙において、重力相互作用を計算することで大規模構造形成が、化学反応過程を計算することで星形成分子雲の形成が起こります。数値シミュレーション上で起きるこうした出来事を解析して、初代星の正体に迫ります。

## 3. 宇宙最初の星々

それでは、理論的研究より明らかになった初代星の形成シナリオを紹介します。ここでは宇宙の大規模構造形成から初代星が誕生するまでの流れを簡単にまとめていきます\*1。

宇宙の質量の大半は暗黒物質によって占められており、質量にして通常の物質(ガス)のおよそ

\*1 大規模構造形成から初代星形成までのシミュレーション動画として、以下が参考になります：“ファーストスター 宇宙の一番星の誕生” (<https://www.youtube.com/watch?v=2COTOTAENg&feature=emblogo>).

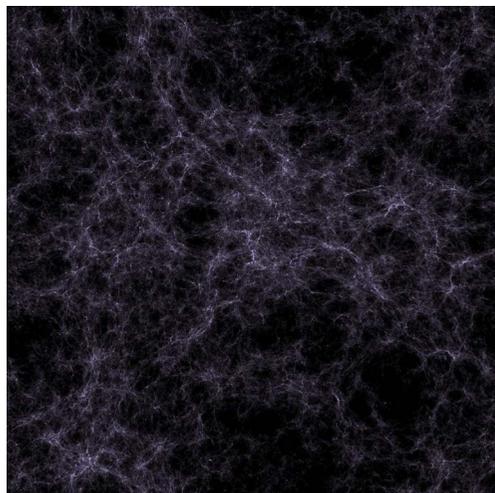


図1 宇宙論的シミュレーションによって再現された宇宙大規模構造の物質分布。観測されている網目状構造の特徴が再現されています。密度が濃い網目状構造の節では、強い重力によってガスが集められて初代星が誕生します。

5倍になります。暗黒物質は光に反応しないため観測できませんが、重力によってガスに影響を及ぼすことからその存在が判明しました。初期宇宙の構造形成は、質量の大部分を占める暗黒物質によって始まります。

ビッグバン後の宇宙には物質のかすかな密度揺らぎが存在します。時間が経つにつれて、物質は密度が周囲よりわずかに高い領域へと重力によって集められていきます。自身の重力によって集まった暗黒物質によって、大規模な網目状構造が作られます(図1)。この構造の節には多くの暗黒物質が引き寄せられており、太陽の100万倍ほどの質量を持つ暗黒物質ミニハローが形成されます。

ミニハローは、最も重力が強くなるその中心領域にガスを集めます。高密度ガスでは水素分子の形成反応が進み、星のゆりかごとなる分子雲が姿を現します。この分子雲は主に水素分子による冷却によってエネルギーを解放しながら、自己重力によって収縮していきます[6]。最終的に、分子雲の中心で初代星の種となる原始星が誕生します[7]。原始星(太陽質量の約0.01倍)の質量は周

囲を取り囲む分子雲ガス(太陽質量の約1,000倍)が降り積もることで増えていきます。この質量降着がいつまで継続できるかによって初代星の質量は決まりますが、原始星への質量降着は、中心原始星からの輻射フィードバックによってコントロールされます[8]。

上記の初代星形成シナリオは、半世紀近くにもわたって続けられてきた数多くの理論研究・シミュレーション実験を通して構築されてきたものです。今では一連の初代星形成過程が、第一原理的な数値シミュレーション上で再現されるようになっていきます。

## 4. 初代星の質量分布

初期宇宙における初代星の役割を考えるにあたり、星の質量(分布)が重要なパラメータとなります。宇宙論的シミュレーションから原始星降着成長までの一連のシミュレーションが2011年に行われ、初代星の質量が初めて計算されました[9]。当時は異なる研究グループの結果を合わせても数例の初代星の質量しか求められておらず、質量分布を求めるためには初代星の統計調査を行う必要がありました。初代星が誕生する始原ガス雲は宇宙論的シミュレーションより第一原理的に計算できるため、始原ガス雲を多数サンプリングするサーベイ・シミュレーションを行うことで、初代星の質量分布を構築することが可能です。

初代星の質量の分布と典型値を求めるため、星形成過程の環境依存性に着目した研究を行いました。この研究については既に本誌で紹介していますので[10]。ここでは結果を簡単にまとめたいと思います。

### 4.1 星質量

スーパーコンピュータを用いた大規模宇宙論的流体シミュレーションを行い、始原ガス雲における初代星形成過程を110例計算しました[11]。大規模構造の形成から始まり原始星への質量降着が

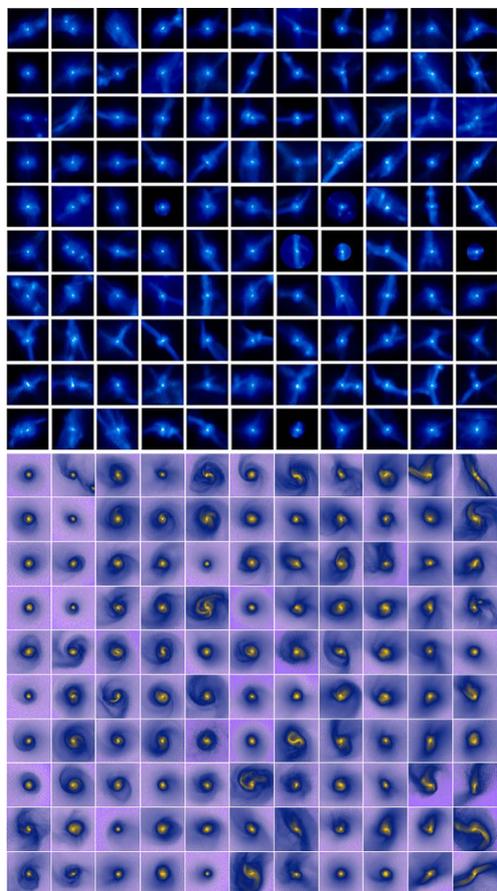


図2 宇宙論的シミュレーションから得られた様々な暗黒物質ハロー（上段；一辺500パーセク）とその密度中心で誕生する星形成ガス雲（下段；一辺1パーセク）の物質分布。

止むまで計算を行い、各ガス雲で誕生する初代星の質量を求めます。

初代星の形成サイトとなる暗黒物質ミニハローは、今回得られたサンプルの間で異なる物質分布を持ちます（図2上段）。これはその密度中心で形成される始原ガス雲の形状・運動に影響し、小さく縮むもの、回転して渦を巻くもの、分裂するもの、といった個性を生み出します（図2下段）。こうしたガス雲の間での力学的性質の違いは、最終的に原始星への質量降着率の大きさを左右することになります。

原始星の質量成長が止まるまでシミュレーシ

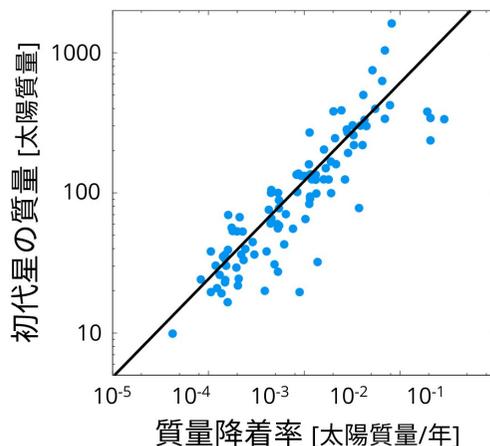


図3 シミュレーションより計算された初代星の質量と星形成ガス雲の重力不安定（ジーンズ）半径における質量降着率の相関図。

ンを行い、初代星の質量を求めました。その結果、初代星質量が太陽質量の10–1,000倍と幅広い値をとることがわかりました。星の質量は原始星に降り積もるガスを足し合わせて決まります。実際に、計算より求められた星質量が始原ガス雲の質量降着率に相関することを確認しました（図3）。ガス雲スケールの降着率は、初代星の形成過程においてはかなり早い段階で決まります。そのため、この相関を使うことで初代星の質量をガス雲の物理量を用いて推定することができるようになりました。

#### 4.2 星質量分布

初代星の星質量分布を求めるためにはこのサンプル数では不十分です。広い宇宙論的領域に出現する始原ガス雲を全て網羅して、無バイアスな統計サンプルを構築する必要があります。しかし、そのような大きなサンプル数に対して星質量を求めるシミュレーションを行うには、膨大な計算コストが必要となり現実的ではありません。

そこで星質量と質量降着率との相関（図3）を利用して、シミュレーションを始原ガス雲形成で止めることで計算コストを抑えることにしました。最終的に1,540例という大規模な始原ガス雲

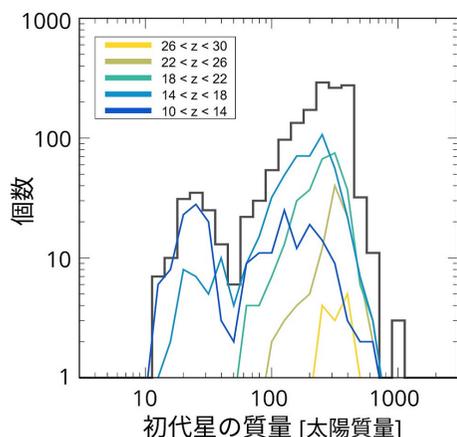


図4 大規模なシミュレーション・サーベイをもとに構築された初代星の質量分布。カラー線は赤方偏移毎の値、黒線は合計値。

サンプルを構築することに成功しました [12]。

こうして得られた星質量分布 (図4) からは多くの情報を読み取ることができます。初代星の質量は以前のサンプルと同じく太陽質量の10–1,000倍にわたって分布しますが、約300太陽質量を中心とした分布のピークを持ちます (縦軸が対数スケールであることに注意してください)。また形成時期 (赤方偏移  $z$ ) ごとの星質量分布を調べると、宇宙年齢が進む (赤方偏移が小さくなる) につれて分布のピークにおける星質量が低下していることがわかります。つまり初代星の性質 (そして初期宇宙進化への影響) が宇宙年齢が進むにつれて変化することになります。また遅れて誕生する初代星 ( $z < 18$ ) は、低質量側に約20太陽質量を中心としたサブピークを持ちます。これは低赤方偏移に形成される始原ガス雲は重力収縮が緩やかになる傾向があり、そのためガス雲における化学反応・放射冷却過程が変化し、より質量降着率の低い始原ガス雲が出現することに対応しています。このように、一口に初代星といっても母体となる始原ガス雲の性質によって形成過程や星質量が大きく異なることが、膨大な数のシミュレーションを行うことで初めて明らかになりました。

初代星の平均質量が時間経過と共に減少するこ

とから、星の一生の最期に起こる現象も変化していきます。初代星形成の初期においては数100太陽質量を持つブラックホールや対不安定型超新星となり、後期には数10太陽質量の親星の極超新星や重力崩壊型超新星となります。これは初代銀河形成や次世代望遠鏡による観測可能性を議論する際に採用する初代星のモデルに対して、重要な示唆を与えます。

今後研究が進展するに従って、初代星の質量分布が更新される可能性は否めません。特に質量降着期においては、星周円盤の分裂による多重星の形成など [13]、星質量分布を動かさうるメカニズムが現在でも議論されています。しかし、今回示した星質量分布は始原ガス雲の降着率分布から求められたものであり、星形成ガス雲の物理的性質にも同様の分布形状と赤方偏移依存性が存在することになります。星形成の早期段階におけるこの性質は今後の研究の影響を受けにくいいため、初代星の性質に何らかの分布・赤方偏移依存性が存在することは確かだと考えられます。

## 小休止：壺中の大宇宙

本稿で紹介している研究成果は、現実の現象を物理学の基礎方程式に基づいてコンピュータ上に再現する、コンピュータ・シミュレーションから得られたものです。天文学者は望遠鏡をのぞきこんで星や銀河を観測しているイメージが一般的かと思いますが、筆者は「コンピュータの中に再現された宇宙」で起きている現象を「観察」しています。天文学では実験が不可能・観測が難しい現象も研究対象となりますが、シミュレーションを使うことでそうした天体現象についても実験が可能となるのです。シミュレーション実験では、時間を進める・条件設定を変えるなどパラメータを操作することが可能となり、観測とは異なる情報を引き出すことができる点を面白く感じます。

最近のラップトップコンピュータであれば、宇宙全体の進化といえる網目状の大規模構造の形成



極端な例として、相対速度が極めて大きくなっている「宇宙の暴風域」では、一体どんな天体が誕生するのでしょうか。

初代星の質量が始原ガス雲の力学的性質に依存すること(図3)を知っていた筆者は、ある研究会で超音速ガス流の存在を知ると「何かしら影響はあるだろう」と数値シミュレーションを始めました。そうして得られた天体は、しかし一般的な初代星とは大きく違うものでした。

### 5.3 大質量初代星

コンピュータ上に再現した宇宙の「暴風域」における天体形成をシミュレーションしたところ、暗黒物質ハローが太陽の2,000万倍もの質量を獲得するまで暗黒物質の重力は高速で脱出するガス流を補足できず、初代星の形成が大きく遅れました[20]。相対ガス流が存在しない場合に形成される暗黒物質ミニハロー(およそ100万太陽質量)に比べて、これは20倍の質量に相当します。この時の暗黒物質ハローは星の材料となるガスを大量に抱え込んでおり、重力収縮が一旦始めると、通常ミニハローよりも高い質量降着率で潰れていきます。大質量暗黒物質ハローの中心で誕生した原始星には周囲の膨大なガスが勢いよく流れ込むため、急激に成長した結果、太陽の3万倍を超える質量を獲得するまで成長が続きました(図5)。この初代星が残す巨大ブラックホールはその後数億年をかけて、太陽の数10億倍の質量を持つSMBHに成長していきます。

このシミュレーションから、相対速度のない「無風」の領域では太陽の100倍程度の質量を持って誕生する初代星が、極めて相対速度の大きな「暴風域」では太陽の3万倍を超える質量になることがわかりました。この天体の形成頻度を見積もったところ、SMBHの観測から求められた個数密度に一致し、その存在を説明することができ

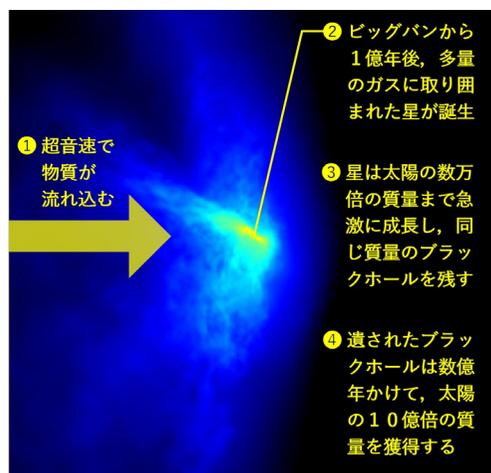


図5 超音速相対ガス流のもとでの大質量初代星形成の概念図。

ます。これまで考えられていたSMBH形成シナリオでは何らかの難しい条件を課す必要がありましたが、今回着目した「宇宙の暴風域」は宇宙に一定の割合で存在することが標準宇宙論より導かれています\*2。星の誕生と宇宙全体を流れる風、大きく異なるスケールの現象が結びつくところに、新たな現象が隠れていました。

### 5.4 初代星の集団形成

その後、暗黒物質に対する相対的なガス速度がより低い環境における初代星形成についても調べてみました。この場合も星形成は遅れるのですが、暗黒物質ハローは5.3節で説明した場合ほど極端に重く成長する前に、重力によってガスを補足することができます。この時の質量の大きな星形成ガス雲は先の場合に比べて重力的に弱く束縛されています。シミュレーションを行ったところ、この星形成ガス雲は一つの星に潰れずに、複数のガス雲に分裂してそれぞれが初代星を形成することがわかりました(図6)。このモデルでは、ほぼ同時に誕生した8つの初代星がガス雲の中心

\*2 あまりに簡単な設定から特異な天体が現れてしまい、「科学の世界で最も興奮する、新発見の先触れとなるフレーズは“見つけた(エウレカ)!”ではなく“変だぞ...”である」(アイザック・アシモフ)と実感しました。

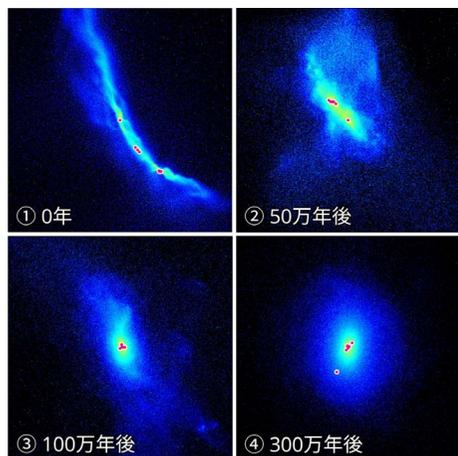


図6 中間速度の相対ガス流のもとで起きた初代星の集団形成. 最初の初代星の形成 (0年) から300万年までのシミュレーション. 図中の8つの点はそれぞれ初代星を表す.

部に集まり, その中から重力的に束縛された連星系が2つ形成されました [21]. これは約100太陽質量の初代星で構成された連星系であり, 重力波 [22] の起源天体の候補として考えられている大質量ブラックホール近接連星 [23] を残す可能性があります. 現在, この形成プロセスによる初代星連星の形成頻度を調べています.

## 6. おわりに

筆者が学生だった頃, 「君たちが研究者として働いている2020年代には次世代の観測装置が稼働していて, 新しい観測で忙しくなるだろう」とよく聞かされたものでした. そのうちいくつかは既に観測を始めており, またこれから動き出して私たちに新たな宇宙の姿を見せてくれるものもあります. ビッグバン直後の灼熱の宇宙から最初の世代の星々が誕生するまでの宇宙黎明期は, 未だ望遠鏡の眼が届かない「宇宙最後のフロンティア」の一つとして挙げられています. 私たち理論

研究者が組み立てたシナリオがどのくらい宇宙の真の姿に迫っていたのか, 観測による答え合わせが行われるのが少し怖くもあり, またわくわくします.

初代星の研究に取り組み始めてから, いつの間にか十年が経ちました. 本稿で紹介したように, 過去半世紀にわたる研究の蓄積によって, 初代星の形成プロセスについてその全体象は共通の理解として固まりつつあります. しかし星形成の細かなプロセスについては今なお議論の最中であり [13, 24]. 重要なパラメータである星質量分布の特定は今も重要な研究課題です. 今回紹介したシミュレーション以外にも, 様々なアプローチによって初代星の正体を突き止めようとする研究が行われています. 理論と観測の成果を共に使い, 初期宇宙の姿を明らかにしようとする取り組みが活発に進められています. もし皆さんの中に初代星や初期宇宙に興味を湧いた方がいらっしゃるなら, 一緒にこの謎に取り組めればと思います. 初代星に関する研究会が, 国内外で定期的に開催されています\*<sup>3,4</sup>. ウェブ集録も掲載されていますので, 最新の研究動向に触れてみたい方は一度覗いてみてください.

## 謝辞

このたび, 「大規模数値シミュレーションによる宇宙初期の星およびブラックホール形成過程の研究」で2019年度日本天文学会研究奨励賞をいただきました. このような栄誉ある賞を受賞させていただいたことを大変光栄に思っております. 今回の受賞に繋がった研究は, 多くの共同研究者の皆様の協力によってできあがったものです. 学生時代の指導教員の梅田秀之氏には初代星という取り組みがいのある研究対象を教えていただき, 吉田直紀氏と細川隆史氏にはそれぞれ宇宙論的シ

\*<sup>3</sup> 初代星・初代銀河研究会 (<http://tpweb2.phys.konan-u.ac.jp/~shodai/>).

\*<sup>4</sup> First Star VI (<http://www.astro.udec.cl/FirstStarsVI/>).

ミュレーションと初代星の降着進化シミュレーションを教わり本稿で紹介した研究を進めることができました。ポストク時代の受入教員である Volker Bromm 氏と町田正博氏からは多くのアイデアを提案していただき、それらを試しながら研究生活を楽しんでいます。またお名前を挙げることができないほど多くの方々との議論を通して、研究のヒントに気付かせていただきました。これら全ての皆様にこの場をお借りして心より感謝申し上げます。

本研究の数値シミュレーションは、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト、京都大学基礎物理学研究所、筑波大学計算科学研究センターの共同利用計算機を利用して行われました。

### 参考文献

- [1] Hashimoto, T., et al., 2018, *Nature*, 557, 392
- [2] Heger, A., & Woosley, S. E., 2002, *ApJ*, 567, 532
- [3] 千秋元, 2017, *天文月報*, 110, 282
- [4] Mortlock, D. L., et al., 2011, *Nature*, 476, 616
- [5] Yang, J., et al., 2020, *ApJL*, 897, L14
- [6] 大向一行, 2006, *天文月報*, 99, 462
- [7] 吉田直紀, 2006, *天文月報*, 99, 452
- [8] 細川隆史, 2013, *天文月報*, 106, 772
- [9] Hosokawa, T., et al., 2011, *Science*, 334, 1250
- [10] 平野信吾, 2015, *天文月報*, 108, 337
- [11] Hirano, S., et al., 2014, *ApJ*, 781, 60
- [12] Hirano, S., et al., 2015, *MNRAS*, 448, 568
- [13] Sugimura, K., et al., 2020, *ApJL*, 892, L14
- [14] Wu, X.-B., et al., 2015, *Nature*, 518, 512
- [15] Inayoshi, K., et al., 2020, *ARA&A*, 58, 1
- [16] 稲吉恒平, 2015, *天文月報*, 108, 265
- [17] Tseliakhovich, D., & Hirata, C., 2010, *PRD*, 82, 3520
- [18] Stacy, A., et al., 2011, *ApJL*, 730, L1
- [19] Greif, T. H., et al., 2011, *ApJ*, 736, 147
- [20] Hirano, S., et al., 2017, *Science*, 357, 1375
- [21] Hirano, S., et al., 2018, *ApJ*, 855, 17
- [22] Abbott, B. P., et al., 2016, *PRL*, 116, 061102
- [23] Kinugawa, T., et al., 2014, *MNRAS*, 442, 2963
- [24] Machida, M. N., & Doi, K., 2013, *MNRAS*, 435, 3283

## Formation of First Generation Stars

Shingo HIRANO

*Department of Earth and Planetary Sciences,  
Faculty of Science, Kyushu University, 744  
Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 819-  
0395, Japan*

Abstract: Our roots can be traced back to the first generation of stars in the universe. In this paper, I summarize the basic formation scenario of the first stars. We discuss the most fundamental parameter of stars, their masses, using the result of a large simulation survey. We also discuss the formation scenario of extremely massive first stars, which are born in a limited region of the universe.