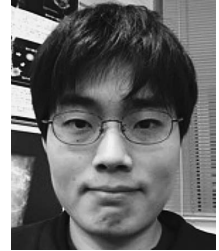


# 初代星の質量分布 — 始原的星形成の多様性

平野 信吾

〈東京大学大学院理学系研究科物理学専攻宇宙理論研究室 〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1〉  
e-mail: shingo.hirano@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp



宇宙で最初に誕生する星，初代星が宇宙初期の化学・銀河進化に及ぼす影響を考える際，その一生を左右する星質量が重要なパラメータとなる．近年，初代星質量が直接計算されるようになったが，形成環境への依存性は十分検討されていなかった．一方でその形成初期条件は始原的密度揺らぎとして一意に定まるため，多様な形成環境は厳密に計算できる．そこで初代星形成過程を110例数値シミュレーションしたところ，星質量は太陽質量の10-1,000倍に幅広く分布した．これは宇宙論的な始原的星形成ガス雲の多様性と形成過程の環境依存性によるもので，包括的な数値実験を行うことで初めて明らかになった．

## 1. 宇宙の一番星・初代星

20世紀初頭まで“始まりも終わりもない永遠不変”だった宇宙観は，観測的証拠が積み重なることで20世紀半ばまでには“ビッグバンによって始まる”宇宙観へとパラダイムシフトしていった．この時，宇宙の化学進化という概念が登場する．誕生間もない宇宙には限られた種類の元素しか存在せず，現在見つかっている100種あまりの元素の多くは星によってその後作られた．星の内部またはその最期の爆発現象において，元素合成が起きるような高温・高密度の状況が実現される．星がその最期に超新星爆発して放出する元素は次世代の星の材料となり，宇宙の化学組成は進化していく．こうした星の世代進化を経ることで私たちの身体を作っている元素も生み出されており，星は私たちの遠い祖先と言うことができる．

宇宙の化学進化の引き金となるのは，ビッグバンから数億年後に誕生する第1世代の星，初代星である．ビッグバン元素合成による軽元素までしか含まない始原ガスから誕生するこの星は，重元素を初めて合成して第2世代星の材料となる．星

の一生や合成される元素の種類は星の質量（太陽質量 $M_{\odot}$ の何倍か）に依存している．宇宙初期の化学進化や銀河形成を考えると，初代星の質量が重要なパラメータとなる．しかし初代星は極めて初期（＝遠方）の宇宙で誕生するため観測は難しく，観測的な手がかりはほとんど得られていない．

## 2. 初代星の形成シナリオ

一方，理論的には星がどのように形成されたかを調べることで星質量を決定しようと試みられている．太陽近傍で起きている現在の星形成に比べ，初代星の形成過程は理論的に扱いやすい．まず物理過程がシンプルであり，始原ガスはダストなどを含まず，また乱流や磁場といった星形成を複雑にする効果は小さいと考えられている．さらに初期条件が宇宙論的に一意に与えられるため，第一原理的に計算することができる．これは宇宙マイクロ波背景放射の観測より，その強度分布に見られる微小揺らぎとして宇宙初期の物質分布が決まるためである．このように初代星の形成過程は問題設定がはっきりしており，数値シミュレー

ションを用いた研究が活発に進められている。

初代星形成の理論的研究に関しては、これまで本誌でも何度か紹介されており、詳細はそちらに譲る<sup>1)~3)</sup>。以下では本研究開始時に明らかになっていた初代星の形成シナリオを簡単にまとめる。

## 2.1 星の種・原始星の誕生

誕生直後の宇宙の密度分布には僅かな濃淡があり(始原的密度揺らぎ)、この密度コントラストが重力的に成長することで現在観測されるような大規模構造となる。宇宙の質量の大部分は正体不明の暗黒物質(ダークマター)で占められており、宇宙初期の構造形成を牽引する。まずダークマターの塊であるミニハローが誕生し、その内部に集められた高密度ガスで初代星が形成される。こうした始原的ガス雲はビッグバン後5,000万年頃(赤方偏移 $z \sim 50$ )から現れ始め、初代星形成は2億年頃( $z \sim 20$ )に最も活発になる<sup>4)</sup>。

始原的ガス雲の進化過程は、現在の宇宙で見られる星形成と大きく変わらない。ガス雲は冷却しながら徐々に収縮していき、ある段階で重力的に不安定になると暴走的収縮を開始する。最終的に密度中心で星の種となる原始星が誕生する。ガス雲の収縮進化は多くの理論研究・数値実験に牽引されて明らかになっており、最終的に2008年に宇宙論的初期条件から原始星誕生までの一連の進化過程が数値シミュレーションにより示された<sup>5)</sup>。

## 2.2 原始星の降着進化

生まれたばかりの原始星質量は $0.01 M_{\odot}$ でしかない。原始星は周囲を取り囲んでいる約 $1,000 M_{\odot}$ のガスが降り積もることで成長し、ガス降着が止まると星質量が決まる。近年、初代星研究者の注目が降着進化段階に向けられるようになった<sup>6)</sup>。

現在の星形成では星周ガスが含む重元素(ダスト)が星からの輻射圧により力を受けるため、原始星質量が増加すると星の光度が上昇して輻射圧が増し、ガス降着が止まる。重元素を含まない始原ガスではこの抑制効果は働かないが、以下に述べるような別の輻射フィードバックによってやは

りガス降着は止まる<sup>7)</sup>。原始星が収縮して表面温度が上昇すると紫外光が放射され始め、降着円盤の垂直方向にある低密度ガスがまず電離される。高温の電離領域のガス圧力によって星周ガスは吹き飛ばされ、降着円盤はそれ以上成長できなくなる。さらに降着円盤は電離領域との接触面で数万度に加熱され、重力的に束縛されなくなると系から脱出する(光蒸発)。こうして降着円盤のガスは失われていき、原始星へのガス降着が止まる。

初代星の質量を求めるためには、ガス降着・輻射フィードバックを介した星周物質・原始星の相互作用を調べる必要がある。2011年に輻射流体シミュレーションによる初代星質量の直接計算が初めて行われ<sup>8)</sup>、他のグループの結果も合わせて $20\text{--}40 M_{\odot}$ という初代星質量が報告されている<sup>9),10)</sup>。直接計算より示された“数十 $M_{\odot}$ の初代星”という結果は、それまで考えられていた“数百 $M_{\odot}$ の初代星”という描像を大きく書き換えるため、初代星の観測可能性や宇宙初期における役割が見直されたりと、研究が一挙に活気づいた。

## 3. 典型的な初代星質量?

以上が今回の研究を始めようとしていた頃の初代星業界の状況であり、目標だった初代星質量が直接計算されるようになっていた。恒星進化計算より初代星の一生が質量にどう依存するかは調べられており、初期宇宙における初代星の振る舞いは解明されたように思われていた。

当時、3グループが初代星質量を計算していたが、それぞれ一つの始原ガス雲で誕生する初代星質量しか報告がなかった。一方で星質量は形成環境に依存して増減する可能性があり、実際に星形成ガス雲の性質によって星質量が変化することが確認されていた。先行研究で計算されていた始原ガス雲が初代星の典型的な形成環境かは明らかではないため、初代星が典型的に数十 $M_{\odot}$ になる保証はない。また、銀河進化などを考える際は星質量の確率分布を表す初期質量関数が使われるが、

先行研究からはこれには言及できない。

ここで初代星形成の初期条件が原理的に決まっていることを思い出そう。宇宙論的シミュレーションより始原ガス雲を多数採取すると、この宇宙論的サンプルには多様な初代星形成環境が自然と含まれる。各ガス雲で誕生する初代星質量を計算することで、形成環境に依存した星質量分布が得られる。

本研究を開始するまで、私は3次元流体コードを用いた宇宙論的シミュレーションを行っており<sup>11),12)</sup>、始原ガス雲の進化過程はサンプルによって異なることは認識していた(図1)。星質量計算に限らず、さまざまな初代星の形成シミュレーションが報告されるなか、典型的な形成環境が不明なまま議論が行われているのは気になっていたところであった。始原ガス雲の収縮進化(§2.1)を計算する準備ができており、原始星の降着進化(§2.2)の計算手法を細川隆史氏より新たに学ぶことで、宇宙論的初期条件から初代星質量を求めることが可能になった。

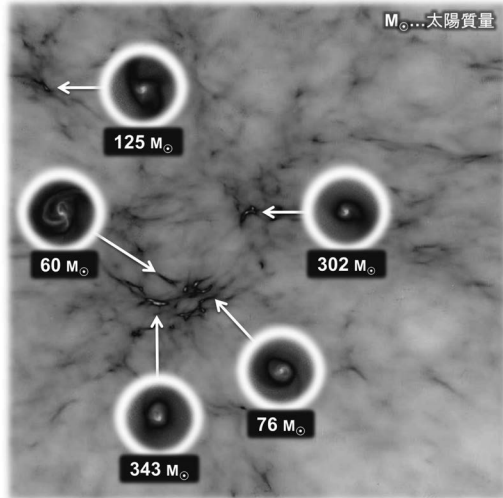


図1 宇宙年齢2億年頃の宇宙の密度分布(背景図;濃淡は密度の大小)。高密度領域で初代星形成ガス雲が形成される(拡大図)。数値は各ガス雲で誕生する初代星の質量を表しており、形成環境が異なるため星質量は変化する。

#### 4. さまざまな初代星形成過程

最終的に初代星形成過程を110例計算した。同様な系統的調査として始原ガス雲を10例ほど調べたものは存在したが<sup>13)</sup>、原始星進化までの星形成過程を比較したのは今回が初めてとなる。

すべての場合で輻射フィードバックが有効となり、最終的にガス降着は止まった。初代星質量は10-1,600  $M_{\odot}$ と予想以上に広い分布を示した(図2)。先行研究で示されていた数十 $M_{\odot}$ の場合がある一方、従来想定されていた数百 $M_{\odot}$ 以上の大質量初代星も含まれている。これは形成環境がいかに星質量、または星形成を左右するかを表している。

星質量は原始星にガスがどれだけ降り積もれるかで決まる。重力不安定となったガス雲が自由落下時間で原始星に落ち込むと考えると、このときのガス降着率は温度の1.5乗に比例する。よってガス雲の温度が原始星への降着率を左右し、高温のガス雲では降着率が高く大質量星を形成し、低温のガス雲では原始星はあまり成長できない。

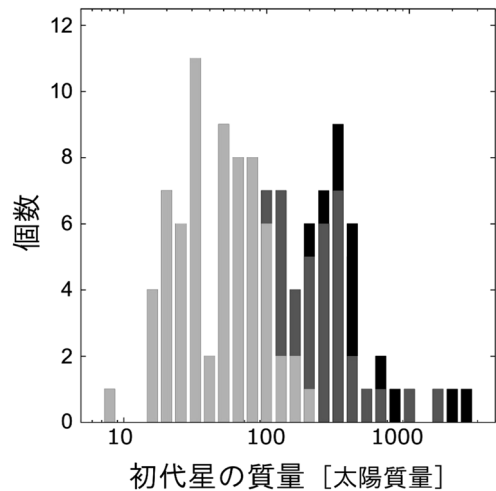


図2 初代星質量は形成環境によって異なり、10-1,600  $M_{\odot}$ と広い分布を示した。色は後述する原始星進化に対応(濃い色から順に超巨星、振動、KH収縮原始星)。

今回、さまざまな物理状況を含む多数の始原ガス雲で星形成過程を調べた結果、知られていなかった進化過程がいくつも確認された。これらは幅広い星質量分布が現れた原因となっている。星形成過程は大きく2段階、星形成ガス雲が冷却しながら重力収縮していき中心部で原始星を形成する前期段階と、ガス降着によって原始星が成長する後期段階に分けることができる。以下で各段階に現れた多様な進化経路を説明していく。

#### 4.1 前期段階 — 始原ガス雲の温度進化

重力収縮するガス雲の温度進化は、現在と宇宙初期とで大きく異なる。現在の星形成ガス雲は重元素によって10 K (ケルビン) 前後まで冷却されるのに対して、始原ガス雲での主な冷却源は水素分子 ( $H_2$ ) であり、ガス雲は200 K程度までしか冷却されない。降着率の温度依存性を用いると、原始星への降着率は始原ガスのほうが  $(200/10)^{1.5} \sim 100$  倍大きいと見積もられるため、初代星は太陽近傍の星々に比べて大質量星になると考えられる。

実際には、同じ始原ガスでも温度進化は異なる。図3では4例の計算結果 (シンボル) を示しているが、重力不安定となる温度最低値は50-300 Kと大きく異なる。これは収縮速度がガス雲によって異なるからである。収縮が遅いほど同じ収縮段階で冷却によって失うエネルギーが増加するため、ガス雲の温度は低下する。確認のため、収縮速度を変えた場合のガス雲温度進化を計算したが (実線)、3次元計算の傾向をよく再現している。

さらに、温度進化には質的に異なる2通りの経路が存在する。ガス雲温度が200 K以下まで下がると、ガス冷却が急激に進んでいることが確認できる (図3の  $t_{\text{coll}}/t_{\text{ff}} > 1.8$  の場合)。このとき  $H_2$  冷却に加え、低温でしか有効にならない重水素分子

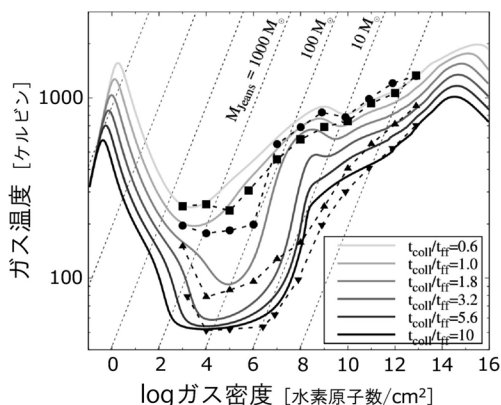


図3 重力収縮する始原ガス雲の温度進化。実線はワンゾーン計算、シンボルは3次元計算の例 (●, ■, ▲印はそれぞれ超巨星, 振動, KH収縮原始星, ▼印はHD冷却した場合)。温度進化は収縮の遅さ ( $t_{\text{coll}}/t_{\text{ff}}$ ; ワンゾーン計算で用いる収縮時間  $t_{\text{coll}}$  と自由落下時間  $t_{\text{ff}}$  との比) に依存しており、収縮が遅いほど低温になる。

(HD) 冷却が効き出す。ガス雲温度がさらに下がるとHD冷却はますます有効になり、最終的に宇宙の背景温度\*1までガス雲は冷える。理論モデルとして、ガス雲収縮が十分遅ければHD冷却が有効になることは示されていたが<sup>14)</sup>、宇宙論的初期条件からそのような星形成環境が実現されることは初めて確認された。

#### 4.2 後期段階 — 原始星の降着進化

降着率が温度に依存するため、ガス雲の温度進化の多様性は、原始星降着進化における多様性を予期させる。実際に計算から求められた原始星への降着率は1桁以上ばらつき、結果的にさまざまな質量の初代星が形成された。また原始星進化には降着率に応じた質的变化が確認され、3通りの進化過程が現れた (図4)。

1. 降着率が十分低い場合 ( $< 0.004 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ )、原始星は質量成長とともに重力収縮する (ケルビン-ヘルムホルツ収縮; 以下KH収縮)。星が収縮

\*1 宇宙膨張とともに宇宙の平均温度は低下し、赤方偏移  $z$  での温度は  $2.73(1+z)$  K と表される。初代星の形成時期 ( $z \sim 20$ ) では約50 K、現在の宇宙 ( $z=0$ ) では2.73 Kとなる (宇宙マイクロ波背景放射の温度)。

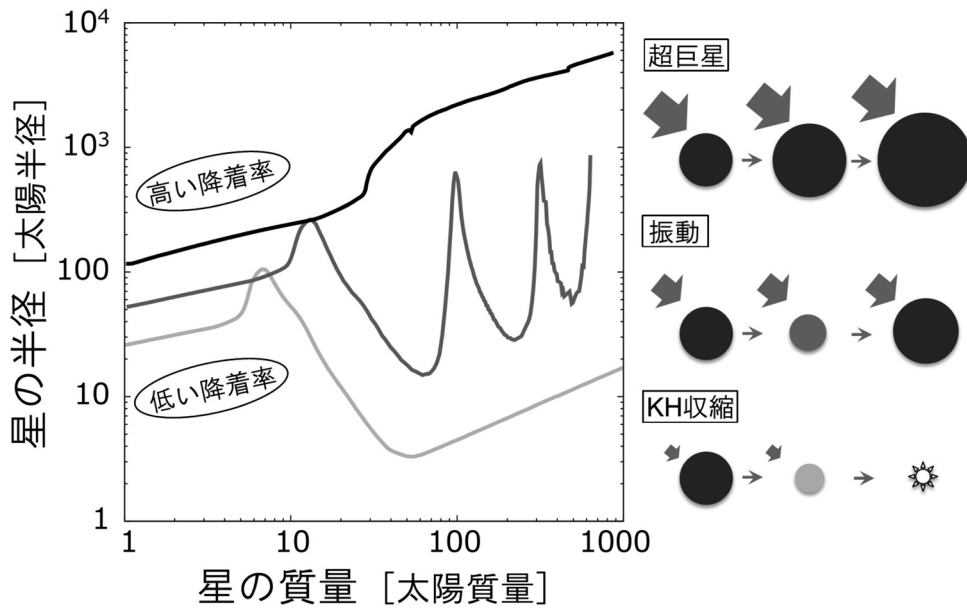


図4 左図：降着率によって質的に変化する原始星進化. 右図：3種類の原始星進化の模式図. 濃淡は星の表面温度を表し、薄いほど高温. 星が収縮すると表面温度が上昇し、輻射フィードバックが働いて降着を止める. 降着率がある臨界値以上あると原始星は収縮しないため輻射フィードバックは働かず、妨げられることなく降着が続く.

すると表面温度が上昇して紫外光を発するため、2.2節で説明した輻射フィードバックが働く. ガス降着はやがて止まり、星質量が決まる.

2. 降着率がより大きいと ( $>0.004 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ), KH収縮は途中で止まり、星は膨張し始める. 星自身の光度と降着ガスによる光度の合計がエディントン光度に達してしまうため、原始星は急激に膨張する. 膨張するとエディントン光度を下回るので再び収縮するが、降着率が下がらない限り収縮と膨張を繰り返す (振動原始星<sup>15)</sup>). 膨張した原始星では表面温度が常に低く、十分な紫外光が生じないため輻射フィードバックは働かない.

3. さらに降着率が高いと ( $>0.04 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) 星の内側が収縮する一方で表面は膨張し続けるため、やはり輻射フィードバックは働かない (超巨星原始星<sup>16)</sup>).

図4は降着率が一定の場合の原始星進化になるが、実際はガス雲に含まれるガスは有限なので、

降着率は徐々に低下していく. 降着率がある臨界値以上のうちは振動・超巨星原始星となり輻射フィードバックは働かないが、臨界値以下になるとKH収縮を開始して輻射フィードバックが有効になり、ガス降着は止まる. 極めて降着率が高い場合、最大でジーンズ質量程度まで原始星に降り積もることができるため、図2に見られる  $1,000 M_{\odot}$  以上の初代星も形成される.

原始星進化の直接計算をしていた先行研究ではKH収縮原始星が暗に仮定されていた. 実際には降着率に応じて原始星進化は変化し、それが輻射フィードバックのオン・オフを左右することが明らかになった. 振動・超巨星原始星は理論的モデルとしては考えられていたが、宇宙論的初期条件より実際に起こりうる進化経路であることが今回確認された.

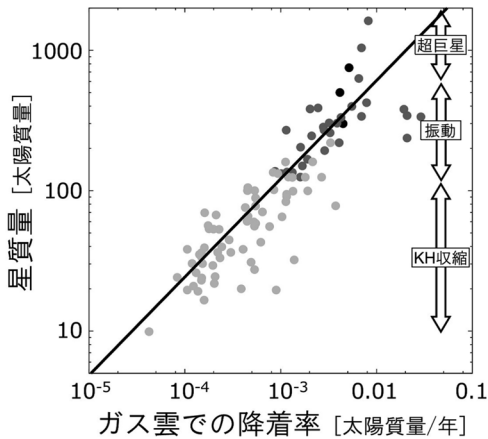


図5 重力不安定ガス雲の収縮率と計算された星質量との相関. 濃淡は三つの原始星進化に対応 (濃い色から順に超巨星, 振動, KH収縮原始星).

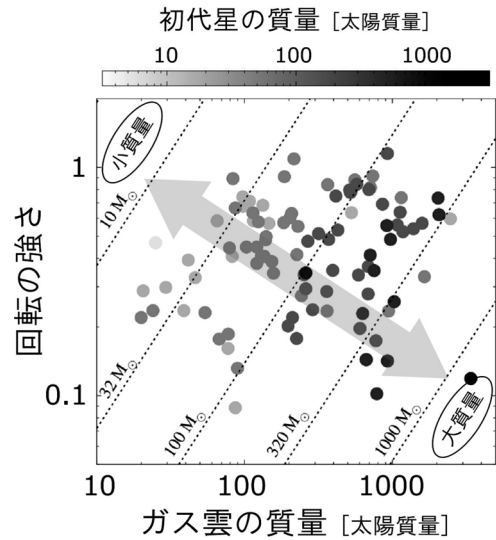


図6 初代星質量は重力不安定ガス雲の質量と回転速度に依存する. 質量が大きく, 回転が遅いほど, 原始星への降着率は大きくなり大質量星が誕生する.

### 5. 初代星質量の形成環境への依存性

宇宙論的サンプル110例は前章で述べたような多様な星形成過程を含み, 図2のような質量分布の原因となっている. では, 星形成過程, さらには星質量を左右する起源はどこにあるのだろう.

原始星進化や輻射フィードバックが効き出す時期は, 原始星への降着率の大小に依存している. 降着率は原始星形成時の周囲の物質分布で決まる. ガス雲全体の降着率分布の大小を, ガス雲が重力不安定になった時点での降着率で代表させると, 図5のような星質量との良い相関を示した. このパラメータの大きさによって三つの原始星進化は綺麗に分かれており, 原始星進化が降着率によって系統的に変化する様子をよく再現している. ガス雲の重力不安定化は星形成の初期段階に起こるため, その後のガス雲収縮・原始星降着進化はこの初期パラメータによってほぼ決定されることがわかる.

この相関を用いると, ガス雲がジーンズ不安定になるまで計算するだけで, その後のたいへんな計算を行わずに初代星質量を見積もれる. これは初代銀河のように多数の初代星形成を含むスケー

ルの進化計算において, 各始原ガス雲の性質に応じた初代星質量を求めることを可能にする. 十分大きな宇宙論的サンプルを構築すれば, 初代星の初期質量関数を直接計算することができるだろう.

降着率はガス雲の性質に依存しているはずだが, 決め手は何だろうか. サンプルを解析したところ, 星形成ガス雲の二つの物理パラメータが重要であることがわかった. 一つはガス雲の質量(ジーンズ質量)である. 原始星に降着する可能性のあるガス質量に対応するため, ガスが豊富にあるほうが降着率は増大する. もう一つはガス雲の回転速度である. 回転が速いほどガスは原始星に落下しにくくなり, 降着率は減少する. よって, ガス雲の質量が大きく, 回転が遅いほど, 降着率は増大し初代星質量も大きくなる(図6).

初代星形成ガス雲はミニハローの高密度領域で形成される. よってガス雲の物理量はミニハローの性質に依存すると考えられ, 星形成の環境依存性をさかのぼれるはずである. サンプルを解析し

たところ、より宇宙初期（高赤方偏移）で質量の大きなミニハローほど、大質量の初代星が形成される傾向が見られた。形成時期は宇宙の平均密度、ミニハロー質量は回転速度に関係しており、その後のガス雲進化に影響する。しかしガス雲スケールに比べるとハロースケールの相関は弱く、今後より詳細に検討する必要がある。

## 6. 星質量から星質量分布へ

初代星の形成初期条件が始原的密度揺らぎとして一意に与えられることを活かして、初代星形成過程の多様性を調べた。計算された初代星質量は形成環境の多様性によって10–1,000  $M_{\odot}$ と幅広く分布した。このため、研究開始時に報告されていた数十  $M_{\odot}$ の初代星というのは分布の一例であり、従来の大質量な初代星という描像は棄却されないことが明らかになった。幅広い星質量分布は、初期宇宙における初代星のさまざまな影響を示唆しているおり、数十  $M_{\odot}$ では重力崩壊型超新星や極超新星、数百  $M_{\odot}$ での対不安定型超新星や大質量ブラックホールとなるため、それらを重ね合わせて初期宇宙進化を考えなければならない。

将来的には理論的に示された初代星質量（分布）を観測的に検証することになる。星としての初代星の直接観測は、次世代の大型望遠鏡を用いても残念なことに望み薄である。初代星が最期に引き起こす爆発現象であれば観測可能だとする報告はある。間接的には、第2世代星と考えられる超低金属量星の化学組成から初代星の質量が調べられている。星がどのような元素合成を行うかは星質量によって異なるため、第2世代星の化学組成から親星となる初代星の質量を推定できる。これまで数十  $M_{\odot}$ の初代星質量を示唆する結果があったが<sup>17), 18)</sup>、最近になって数百  $M_{\odot}$ という大質量初代星の兆候が報告された<sup>19)</sup>。こうした観測結果は今回の得られた幅広い初代星質量分布という描像に一致しており、今後観測数が増えることで理解が進むと期待される。

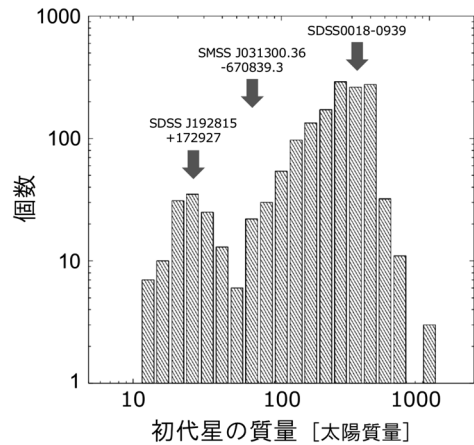


図7 宇宙論的サンプルより求めた初代星質量分布<sup>20)</sup>。矢印は観測された超低金属量星の化学組成より推定された親星初代星の質量<sup>17)–19)</sup>。

銀河や宇宙全体の進化をモデル化するには、星質量の確率分布である初期質量関数がよく用いられる。初代星の初期質量関数を直接計算から求めるには今回のサンプル数では不十分である。初代銀河スケール以上の宇宙論的領域に現れるすべての始原ガス雲を網羅する必要があるが、それでは計算コストが膨大になってしまう。今回得られた“降着率–星質量”相関を用いると、始原ガス雲のジーンズ化まで計算するだけで星質量が決まり、計算コストを抑えることができる。私たちは本研究の拡張として約1,500例の始原ガスからなる大規模サンプルを構築し、図7のような質量分布を求めた<sup>20)</sup>。質量範囲は今回と同程度（10–1,000  $M_{\odot}$ ）に広がっているが、分布にはっきりとしたピークが現れた（縦軸が対数プロットであることに注意）。これは初代星に典型的な質量が存在することを示している。二つのピークは  $H_2$  冷却（大質量側）と HD 冷却（低質量側）で温度進化する場合にそれぞれ対応しており、多様な形成過程を考慮する必要性が示されている。

## 7. おわりに

今回、形成環境の多様性が初代星形成にどう影

響するかを包括的に理解するため、宇宙論的初期条件から得られるさまざまな始原ガスで誕生する初代星の質量を計算した。すると当初意図していなかった形成過程が次々と現れた。星質量という「木」から質量分布という「森」に視野を広げることで、初めて豊かな星形成過程の全貌をつかむことができた。

初代星形成過程の理論的理解はいまだ完全ではない。今回の星形成計算では取り入れなかった物理過程も存在しており、初代星質量分布への影響を今後詰めなくてはならない。降着円盤の分裂や磁場による角運動量輸送などどれも一筋縄ではいかなない難問だが、一方これは現在の星形成研究も同様に直面している問題であるため、ある意味では初代星研究がようやく追いついたと言える。問題設定がより簡単な初代星の場合で実験し、現在の星形成では観測結果と付き合わせて調べるなど、互いに情報交換しながら研究を進められればと思う。

初代星研究は宇宙論・星形成・恒星進化・元素合成といった多くの分野が交わる興味深い実験場である。理論的研究から初代星の特徴を明らかにすることで観測可能性を十分議論し、2020年代の大型望遠鏡時代に備えたい。

## 謝 辞

本稿の科学的な内容は、2014年に筆者らが発表した投稿論文<sup>21)</sup>に基づいています。今回紹介した研究にご協力くださった共同研究者の皆様に深く感謝いたします。原稿に有益なコメントをいただいた細川隆史氏、櫻井祐也氏、高橋亘氏に御礼申し上げます。最後に、本稿を執筆する機会を与えてくださった町田正博氏に感謝いたします。

本研究で行った数値計算はT2k-Tsukuba（筑波大学計算化学研究センター）、SR16000（京都大学基礎物理額研究所）、XT4・汎用PC（国立天文台天文シミュレーションプロジェクト）を利用されています。本研究は東京大学グローバル

COE “未来を拓く物理科学結集教育研究拠点”の援助のもと行われました。

## 参考文献

- 1) 吉田直紀, 2006, 天文月報 99, 452
- 2) 大向一行, 2006, 天文月報 99, 462
- 3) 細川隆史, 2013, 天文月報 106, 772
- 4) Tegmark M., et al., 1997, ApJ 474, 1
- 5) Yoshida N., et al., 2008, Science 321, 669
- 6) Clark P. C., et al., 2011, Science 331, 1040
- 7) O’Shea B. W., Norman M. L., 2008, ApJ 673, 14
- 8) Hosokawa T., et al., 2011, Science 334, 1250
- 9) Stacy A., et al., 2012, MNRAS 422, 290
- 10) Susa H., 2013, ApJ 773, 185
- 11) Springel V., 2005, MNRAS 364, 1105
- 12) Hirano S., Yoshida N., 2013, ApJ 763, 52
- 13) O’Shea B. W., Norman M. L., 2007, ApJ 654, 66
- 14) Ripamonti E., 2007, MNRAS 376, 709
- 15) Omukai K., Palla F., 2003, ApJ 589, 677
- 16) Hosokawa T., et al., 2012, ApJ 756, 93
- 17) Caffau E., et al., 2011, Nature 477, 67
- 18) Keller S. C., et al., 2014, Nature 506, 463
- 19) Aoki W., et al., 2014, Science 345, 912
- 20) Hirano S., et al., 2015, MNRAS 448, 568
- 21) Hirano S., et al., 2014, ApJ 781, 60

## Mass Distribution of First Stars — Various Paths of Star Formation in the Early Universe

Shingo HIRANO

Department of Physics, Graduate School of Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: We perform a large set of radiation hydrodynamics simulations of primordial star formation in a fully cosmological context. Our statistical sample of “100 First Stars” show that the first generation of stars have a wide mass distribution  $M_{\text{star}} = 10\text{--}1,000 M_{\odot}$  reflecting the diversity of the initial states of star-forming clouds. The obtained wide mass range suggests that the first stars play a variety of roles in the early universe, by triggering both core-collapse supernovae and pair-instability supernovae as well as by leaving stellar mass black holes.