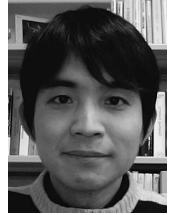


宇宙最初の星の質量

細川 隆史*¹

〈東京大学理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センター / 物理学教室
〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1 理学1号館923〉
e-mail: takashi.hosokawa@phys.s.u-tokyo.ac.jp



宇宙最初の星（初代星）はいったい何太陽質量であったのか。これはその後の宇宙の構造形成を左右する問題であり、近年活発に研究が行われている。われわれは多次元輻射流体シミュレーションと星の進化計算を組み合わせる独自の方法により、星質量は以前考えられていたよりも小さく、数十太陽質量の初代星が容易に形成されうることが示した。以下ではこの研究の経緯とこれまでの進展、そして予想される今後の展望について紹介する。

1. はじめに

今回、“現在ならびに初期宇宙における大質量星形成過程の研究”という内容で研究奨励賞をいただいた。これからわかるように、私はこれまで現在の宇宙（銀河系）と、それとは全く異なる環境である宇宙初期の星形成、特に質量の大きい大質量星形成の理論的研究を続けてきた。

このうち、以下では後者、すなわち宇宙最初の星（初代星）形成についての研究¹⁾を紹介する。私は2005年に学位を取得したのだが、それ以来しばらくは前者の銀河系での大質量星（OB型星）のフィードバックや形成過程を研究してきた。初代星形成の研究が始まったのは2009年に私がポスドクとして米国に渡った頃であり、私の中でも比較的新しい研究テーマである。紙面の都合上、銀河系での大質量星形成の研究の詳細については触れられないが、これについては天文月報2009年10月号の記事¹⁾を参照していただきたい。実際、銀河系の大質量星形成の研究で培った経験は、以下で紹介する初代星形成の研究でも活

かされ研究の一つの特色になったように思われる。

2. 宇宙最初の星形成

初代星形成の研究は銀河系での星形成研究と比べると歴史が浅く、特に活発に行われるようになったのは90年代後半以降である。日本人研究者の貢献も顕著であり、これら進展の詳細については私の共同研究者でもある大向一行氏と吉田直紀氏の2006年奨励賞記念記事^{2), 3)}にまとめられている。以下では私の研究に特にかかわりの深い背景だけを簡潔に述べることにする。

2.1 “素性の良い”問題

初代星形成で特筆すべきことのひとつはその初期条件が非常に良い精度で定まっていることである。宇宙の晴れ上がり時の密度揺らぎは今や驚くべき精度でわかっており、その後の重力不安定による大規模構造形成も十分予言可能なレベルにある。ダークハロー中のバリオンの進化が星形成の鍵を握るが、ガスが重元素を含まず組成が単純なこともあり、放射・化学過程は現在の宇宙より

*¹ <http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~takashi.hosokawa/>

ずっと簡単である。また問題を複雑にする磁場や乱流などの寄与もおそらくそれほど大きくはないと考えられてきた。

そういうわけで初代星形成は物理的には非常に“素性の良い”問題であり、観測がほとんどないなか、特に理論研究者の人気を集めて研究が進展してきた。

2.2 原始星誕生まで

ここでは私が初代星形成の研究を始めようとしていた2008年頃の現状について述べる。当時私はまだこの分野の人間ではなかったが、この頃は初代星形成の大まかな枠組みはすでに完成したかのような雰囲気か漂っていたように思われる。

実際、宇宙論的な初期条件から始めてダークハロー中に始原ガス雲ができ、ガス雲の重力崩壊の結果、原始星が誕生するまでのすべての進化を追跡する3次元数値シミュレーションが吉田、大向両氏らによりすでに行われていた⁴⁾。初代星の輻射などの影響を受けた始原ガスから第二世代の星が生まれる場合についても同様の計算は行われており、もはや金属量ゼロでの星形成研究は終わったという人もいた。

しかし、上の状況はそれまで銀河系での大質量星形成を研究していた私には奇異に思われた。というのは、原始星が誕生した時点では星形成過程はほんの始まりにすぎないというのが当然の前提だったからである。初期宇宙でも現在の宇宙でも、星形成の大まかな理論的枠組みは共通であり、ガス雲は放射冷却により重力収縮して中心密度が上昇する。ただし、このときガス雲は一様に収縮するのではなく、崩壊する中心コアとそれを取り囲むエンベロープに分れて動的に進化する。中心コアの質量は常にジーンズ質量程度であり、これは密度上昇とともに減少する。すなわち、崩壊するコアから見ると質量が常に周りのエンベロープに流出し、収縮すればするほどどんどん質量が小さくなっていく。そのうち放射冷却の効率が悪くなるとガス圧力が効いて崩壊が止まり、原

始星が誕生するのだが、このときの質量は当然始めのガス雲の質量と比べて極めて小さく、およそ $0.01 M_{\odot}$ 程度になることがわかっている⁵⁾。始原ガス雲の典型的な質量は $1,000 M_{\odot}$ 程度だが、この大量のガスは原始星を取り囲むエンベロープに残されたままなのである。

この、極めて小質量の原始星とそれを取り囲む大量のガスエンベロープという状況は銀河系の星形成でも同様に実現すると考えられている。標準的な形成シナリオでは、原始星に周囲のエンベロープからガス降着が起きて星質量が増加する(この時期を質量降着期、または後期段階と呼ぶ)。銀河系の大質量星形成の研究は専らこの質量降着期の進化が対象であった。そもそも星質量がOB型星程度まで増加するのは正にこの時期であるからである。

当然、初代星形成の場合でも同じように原始星が生まれた後、すなわち質量降着期の詳しい研究が必要のように思われた。特に、上述したように初代星形成の場合はガス雲質量が $1,000 M_{\odot}$ 程度と極めて巨大であり、このことから形成される星もやはり非常に大質量ではないかと古くから考えられてきた。銀河系の大質量星形成で開発されてきた手法がそのまま初代星形成に使えるのではないかと…こうして新しい研究の方向が見え始めた。

2.3 初代星は何太陽質量か?

星の質量はエンベロープからのガス降着により大幅に増加するので、逆に言うと生まれてくる星の質量はこのガス降着がいつまで継続するかによって決まることになる。星質量は星の一生を左右する最も基本的な物理量であるため、質量降着期の進化を詳しく調べて星の最終質量を決定することは極めて本質的な問題である。

質量降着期の進化で重要になるのは星に降り積もるガスの降着率である。一般に、質量降着期のガス降着率はおよそ

$$\dot{M} \approx M_J / t_{\text{ff}} \propto T^{1.5} \quad (1)$$

で見積もることができる。ここで M_f はジーンズ質量、 t_{ff} は自由落下時間である。もとのガス雲の質量はジーンズ質量程度でその大半はエンベロープに残っており、これが自由落下時間程度で原始星に降り積もるので、上式ようになる。始原ガス雲の典型的な温度は数百-千K程度であり、上式から降着率は $10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$ である。星の寿命は星質量が大きくなると常に百万年程度なので、この間ガス降着がずっと続くとするともとの星の質量は約 $1,000 M_{\odot}$ 、つまりもとのガス雲質量と同じくらいである。

ところが、このガス降着がずっと続く、というのは単なる仮定である。普通、星質量が大きくなると星の光度は急激に増加するので、この非常に強い放射が降着してくるガスの運動に影響し、降着を途中で止めてしまうのではないかという考えは当然あってしかるべきである。ところが、放射フィードバックは初代星形成ではあまり有効ではないと考えられてきた。この際、銀河系の大質量星形成の研究がしばしば比較のため言及されてきた。というのは、銀河系では放射フィードバックは非常によく効くことが知られているのだが、これはガス中のダスト粒子にはたらく放射圧を介してのものだからである⁶⁾。金属量ゼロの初代星形成ではダスト粒子がなく、当然この効果は働かない。よって放射フィードバックは銀河系に比べて極めて弱く、ガス降着は阻害されずに大質量の星が形成されるであろうと考えられたわけである。

ところが、放射フィードバックに関して別のアイデアがほかならぬ2008年に提案された⁷⁾。放射圧ではなく、星が放射する紫外光による加熱がガス降着の阻害に効くのではというのである。紫外光にあぶられたガスは数万度の高温になるので、もしそうした高温ガスが星から十分離れたところまでできれば重力的に束縛できず系から逃げってしまう(光蒸発)。原始星へのガス降着は星周円盤を通じて進むと考えられるが、円盤はこの光蒸発によりやがて失われてしまい、それに合わせ

て星へのガス降着も終わってしまう。解析的なモデル計算によるとこの効果は星質量 $150 M_{\odot}$ 程度で十分に効くと見積もられた。

初代星形成でも激しい放射フィードバックによる何かとても動的な進化を経て星質量が決定されるという考えは当時の私にとっても新鮮に感じられた。銀河系の大質量星形成の研究では数値シミュレーションによりこうした動的進化が調べられており^{8), 9)}、同様の計算は初代星形成の場合でも有効ではないかと思えた。かなりやりたいことがはっきりしてきた。

3. 直接数値シミュレーション

このとき、ちょうど私はいわゆる学振PDで国立天文台にいたのだが、海外長期滞在が許されていたためその渡航先を考えていた。初代星形成後期段階の直接数値シミュレーションという目標がすでにあったので、この問題に使えるような計算コードをもっていたHarold Yorke氏のいるNASAジェット推進研究所に行くことにした。Yorke氏は銀河系での大質量星形成の理論研究で著名で以前からの知り合いだったが、私も彼もこれまで初代星形成の研究をしたことはなかった。ただ、“こういうおもしろい問題があるので計算コードを使わせてもらえませんか?”と頼んだときにそれはおもしろいねと言ってすぐにOKしてもらえた。何か新しいことが始まると感じてとてもわくわくした。

星形成の質量降着期の進化を数値シミュレーションで追うことは一般に難しい。これは原始星と降着ガス流の動的時間スケールの違いのためである。今、エンベロープのガスは10-100万年かけて原始星に降り積もるが、原始星表面で起こる現象の時間スケールははるかに短い(太陽の表面振動やフレアが数分程度で起きていることを思い出すとよい)。このような分スケールの現象を追跡しながら10年以上の進化を追うのは最新のスーパーコンピュータを使ったとしても全く不可

能であり、何らかの工夫がいる。

この問題は当然銀河系の星形成研究でも認識されており、星内部とそのごく近傍を含む領域はガスを吸い込む“穴”（シンク領域／粒子）に置き換えてマスクし、計算領域から外してしまう手法がよく用いられる。ただし、大質量星形成ではこの穴の中で星がどのように成長するかも考える必要がある。星からの輻射フィードバックは星の放射強度と温度に依存するが、これらはガス降着している原始星の内部構造を解いて初めてわかる量だからである。

問題は複雑だが、こういうときにしばしば有効な方法は問題を分割することである。原始星へ降着するガスの動的進化は多次元輻射流体シミュレーションで計算し、原始星内部はいわゆる星の進化計算をして構造を決めればよい。輻射流体計算から星へのガス降着率を求め、この降着率を使って星の進化計算をする。星の内部構造が決まると星光度と有効温度がわかるので、これを輻射流体計算に戻して降着流へのフィードバックを計

算する。するとフィードバック強度に応じてまた星への降着率がわかり…というのを繰り返すのである。

輻射流体シミュレーションと星の進化計算を同時並行で行うというアイデアは、人に話すとしばしば驚かれることがある。これはおそらく、両者はほとんど別分野になるくらい技術的にかなり異なっているため、両方を使う研究者がそもそも普通ないせいではないかと思う。幸いなことに、私には銀河系の大質量星形成の研究で両方の経験があった^{10), 11)}ので、これは自然な研究の流れであった。2次元軸対称の輻射流体計算コードを初代星形成の場合に適用できるように準備し、2011年に最初の結果が得られた¹²⁾。

4. 初代星成長の自己抑制

4.1 $43 M_{\odot}$ の初代星

図1は結果の一例を示している。この計算で $0.01 M_{\odot}$ の原始星が生まれたのち約10万年間の進化を追っている。中心にある原始星周囲のエン

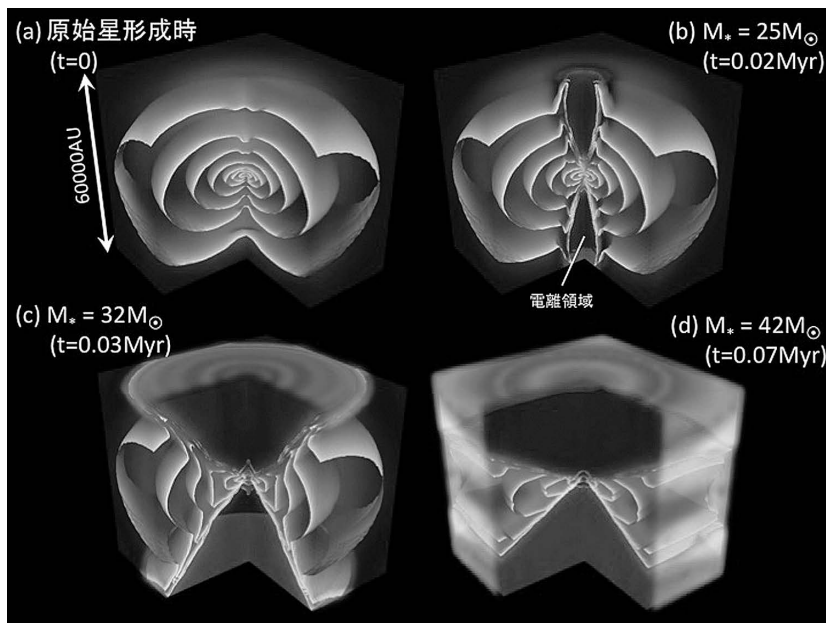


図1 原始星の紫外光フィードバックに伴う電離領域の形成と膨張。(a)→(d)の順に時間進化を表す。各パネル中ではコントアが密度分布、色が温度分布を示している。

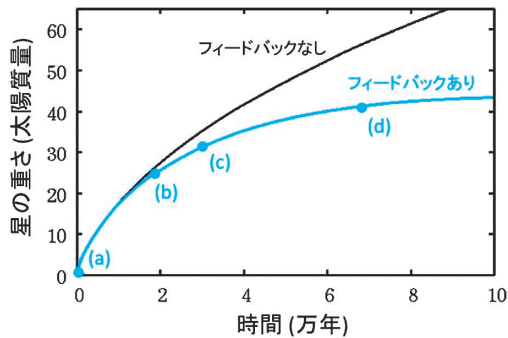


図2 星質量の時間進化. 紫外光フィードバックありの通常の場合と、同じ設定でフィードバック効果を切った場合の計算結果を示す. フィードバックありの場合の (a)-(d) の点は図1の四つのスナップショットの時期に対応する.

ベロープからガス降着が起き、星質量は時間とともに増加する。ガス雲は自転しているため、ガスは星周円盤を通じて最終的に星表面に達する（ケプラー円盤のサイズは数百AUであり、図1ではごく中心部にある）。星質量が $20 M_{\odot}$ 程度に達したところに、円盤の両極方向に電離領域が成長していくのがわかる。その後、電離領域はさらにエンベロープ中を爆発的に膨張していく。星質量が $40 M_{\odot}$ 程度になったところには円盤背後の影になった部分を残し、円盤の上空は完全に電離領域に覆われている。この間も中心星へのガス降着は続いているが、電離領域の膨張が始まってからは降着率がしだいに低下し、ついに星質量が $43 M_{\odot}$ 程度になったところで星質量の増加はほとんど終わってしまった（図2）。歴史的には初代星は数百-千太陽質量といわれた時期が長かったのだが、質量降着期の進化をきちんと計算してみるともっと低質量の星が容易に形成されることがわかったのである。

星への降着が止まってしまったのは星の紫外光フィードバックのためであり、銀河系の大質量星

形成で働く輻射圧効果とは全く別のプロセスである。紫外光により励起された電離領域内部はガスが数万Kと高温になっており、周囲のエンベロープに比べて圧力超過がある。この圧力差のため電離領域は爆発的に膨張し、ガスを吹き飛ばしてまず星周円盤への降着が止まる。ガス供給の断たれた円盤は紫外光にさらされて光蒸発が進みしだいにやせ細っていく。図中では明らかでないが、電離領域内では円盤から蒸発したガスが数十km/sの速度で両極方向に流出しつつある。

4.2 系内金属欠乏星組成と初代星質量

初代星形成は当然のことながら観測による検証が非常に難しい。しかし、それでもわずかながら初代星質量を制限する観測結果がある。なかでも現在最もよく考慮されるのは銀河系内の金属欠乏星の組成観測である。このような星は、ほとんど単一の超新星爆発によりわずかに重元素汚染されたガスから誕生したと考えられるので、逆に星の重元素組成を調べることで超新星爆発を起こした親星の性質を制限できるという考えである。

特に初代星質量がこれまで思われてきたような数十太陽質量の範囲にあると、星は寿命を迎えた際に対不安定型超新星爆発^{*2}を起こす。このタイプの超新星爆発では核反応が暴走的に進むので、非常に特徴的な重元素の組成分布が作られることが知られている¹³⁾。ところが、このような組成パターンは系内金属欠乏星には一切見られないのである¹⁴⁾。むしろ観測的には初期宇宙でも数十太陽質量の星が通常重力崩壊型超新星爆発を起こし重元素汚染が進んだ描像を支持している。われわれの計算ではこの程度の質量の星が原始星からの紫外光フィードバックが効くことにより自然に形成されるので、この観測結果をうまく説明することができた。

*2 星内部で光子が電子陽電子のペアを生成することにより内部エネルギーが消費され、星の自己重力を圧力で支えられなくなって引き起こされる超新星爆発。

5. その後の進展と今後の展望

5.1 低下する初代星質量

上の結果は2011年末ごろいくらかの紆余曲折を経たのち出版された。この研究を始めた2009年以降、初代星形成の描像は大きく変わったように感じられる。昔は星質量は非常に大きく、数百-千太陽質量の星が普通に考えられていたが、2013年現在では多くの研究者が数十太陽質量の初代星を想定するようになった。これは私の研究を含め、原始星誕生後の質量降着期の研究が進んだためである。

実は、2010年以降は私の研究以外にも、初代星形成の質量降着期の進化に関する論文はたくさん出版されている。私の研究は特に紫外光フィードバックの数値シミュレーションに特化したものであったが、他のいくつかのグループは星周円盤の重力不安定による分裂過程を詳しく調べている¹⁵⁾⁻¹⁸⁾。円盤が分裂して分裂片から複数の星が生まれると、星一つあたり降着するガスの量は減るので、結果として誕生する星の質量は小さくなると予想される。ただし、これらの多くは計算量の限界のため質量降着期のごく初期の進化しか追っておらず、最終的にはやはり紫外光のフィードバックが効いて星の最終質量が定まると予想される。星質量を精度よく決めるためには3次元輻射流体シミュレーションを原始星進化も考慮しながらできるだけ高空間分解能で長期間行う必要がある、すでにこの方向で研究が進みつつある^{19), 20)}。

一方、初代星を生み出すガス雲の性質（質量、回転強度など）は場合によって大きく異なり、この違いを反映して形成される星質量も分布をもつことが予想される。これを調べるためには宇宙論的シミュレーションから星形成が起きる始原ガス雲を多数採り、それぞれのガス雲で星質量が決定されるまでの進化を計算すれば良い。われわれは実際100例以上のガス雲で同様の計算を行い、すべて

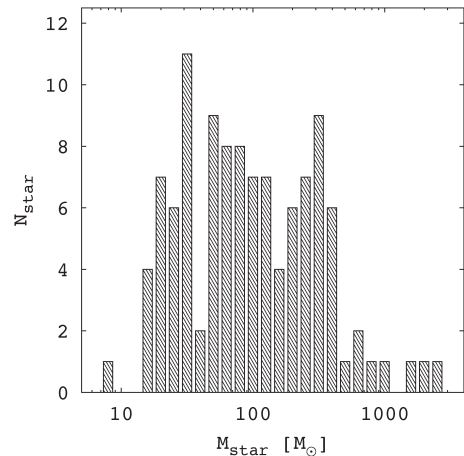


図3 初代星質量の分布。100個以上のガス雲で図1, 2と同様の計算をした結果得られたもの。

の場合で電離領域形成に伴う紫外光フィードバックが働いて星質量が決定されることを示した²¹⁾。図3が星質量の分布であり、やはり100 M_{\odot} 以下の初代星が多数ある一方、星質量分布は2桁近い広がりを持ち100 M_{\odot} 超の星も相当数できていることがわかる。

まだ状況は混沌としているが、少なくとも数十太陽質量の初代星が相当数できるという描像は定着しつつある。100 M_{\odot} 超の星がどれくらいの頻度でできるのかはいまだはっきりしないが、銀河系に比べればありふれていると予想される。これは銀河中心に見られる巨大ブラックホールの起源とも関係が深い。最近の観測によると赤方偏移6以上の時期ですでに $10^9 M_{\odot}$ を超えるような巨大ブラックホールが見つかっており²²⁾、ビッグバン後数億年内の短時間にどうやってこれらが形成されたのか問題となっているからである。より大質量の星からはより大質量の種ブラックホールが供給されると考えられるので、ごく希に超大質量の星が生まれた可能性もある。このように、初期宇宙で原理的に最大何太陽質量の星までが形成可能なのか、その場合に一体何が起きるのかという問題²³⁾も今後重要なテーマになるだろう。

5.2 初期宇宙から現在の星形成へ

これまでは初期宇宙での星形成、それも初期条件が宇宙論のみでほとんど定まる初代星形成を考えてきた。初代星はこれまで思われてきたよりも低質量かもしれないというのが主な結論だが、銀河系での典型星質量は $0.6 M_{\odot}$ 程度でありこれと比べれば依然ずっと大きい。明らかに初期宇宙と銀河系の星形成過程は大きく異なっており、どこかの時点で典型的星質量が低下し、現在の姿になったと考えられる。

この、星形成モードの相転移ともいえる変化がいつ、どのようにして起きたのかという問題は初期宇宙と銀河系での星形成分野のまさに境界にあり、未踏の部分が多く将来の発展が期待されている。例えば私が研究してきた大質量星形成の問題を考えると、初期宇宙ではダストがないため紫外光フィードバックで原始星へのガス降着が抑制されたが、銀河系ではダストに働く輻射圧の効果が非常に強く、同じ数十太陽質量の星ができる場合でもその様子は大きく異なる。遠方銀河では中間的な低金属量環境が実現していると思われるので、この問題は銀河形成の観点からも重要である。深宇宙探査では大質量星起源の放射に頼るため、今後JWSTやTMTなどの将来計画が現実になるとともに一挙に分野が拓けるかもしれない。ALMAによりマゼラン雲など近傍低金属銀河での星形成過程の詳細観測が進むことも期待されている。

6. おわりに

以上、初代星形成に関する最近の研究の進展についてわれわれの研究成果を中心に紹介させていただいた。この分野はここ数年間で大きく様変わりし、質量降着期の進化と星の最終質量が中心テーマとなって現在まさに研究が進められている段階である。他分野の皆さんに対しては話がころころ変わってとても心苦しいのだが、そこは現在進行中の研究ということで暖かい目で見守って

ただきたい。

冒頭にも述べたように、私はこれまで銀河系と初期宇宙での星形成過程を研究してきたが、実際両者には似ている点と大きく異なる点の両方がある。これらを合わせて考えることはしばしば非常に有益であり、結果として私に広い視点をもたらしてくれた。今になって振り返ると、これは研究を進めるうえでとても役立つように思う。私が初代星形成の研究を始めたのはすでにポストクとなって数年が経過してからであったし、初めての海外生活などもありいろいろな面で一つのチャレンジだった。しかし、思い切って飛び込んでみたことで研究をとても楽しむことができたように感じる。今後もこういうチャレンジ精神を忘れることなく研究に励んでいきたい。

謝 辞

本稿で紹介した研究は大向一行、吉田直紀、Harold W. Yorke各氏との共同研究として始まりました。これはそのまま現在の研究につながっており、私が日本に帰国してからは大学院生の人たちも加わってくれています。これらの人々には今でもたいへんお世話になっており、とても感謝しています。また、より若い頃の私を辛抱強く見守ってくださった犬塚修一郎、嶺重 慎、早田次郎、中村卓史各氏をはじめ京都大学と国立天文台の(元)関係者の方々にも深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 細川隆史, 2009, 天文月報102, 595
- 2) 大向一行, 2006, 天文月報99, 462
- 3) 吉田直紀, 2006, 天文月報99, 452
- 4) Yoshida N., Omukai K., Hernquist L., 2008, *Science* 321, 669
- 5) Omukai K., Nishi R., 1998, *ApJ* 508, 141
- 6) Wolfire M. G., Cassinelli J. P., 1987, *ApJ* 319, 850
- 7) McKee C. F., Tan J., 2008, *ApJ* 681, 771
- 8) Yorke H. W., Sonnhalter C., 2002, *ApJ* 569, 846
- 9) Krumholz M., et al., 2009, *Science* 323, 754
- 10) Hosokawa T., Inutsuka S., 2006, *ApJ* 646, 240
- 11) Hosokawa T., Omukai K., 2009, *ApJ* 691, 823
- 12) Hosokawa T., Omukai K., Yoshida N., Yorke H. W., 2011, *Science* 334, 1250
- 13) Umeda H., Nomoto K., 2002, *ApJ* 565, 385
- 14) Frebel A., Johnson J. L., Bromm V., 2009, *MNRAS* 392, L50
- 15) Stacy A., Greif T. H., Bromm V., 2010, *MNRAS* 403, 45
- 16) Clark P., et al., 2011, *Science* 331, 1040
- 17) Greif T. H., et al., 2011, *ApJ* 737, 75
- 18) Machida M. N., Doi K., arXiv: 1308.2754
- 19) Stacy A., Greif T. H., Bromm V. 2012, *MNRAS* 422, 290
- 20) Susa H., 2013, *ApJ* 773, 185
- 21) Hirano S., et al., arXiv: 1308.4456
- 22) Mortlock D. J., et al., 2011, *Nature* 474, 616
- 23) Hosokawa T., et al., arXiv: 1308.4457

Masses of the First Stars in the Universe**Takashi HOSOKAWA**

Department of Physics and Research Center for the Early Universe, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: The mass distribution of the first stars impacts the subsequent structure formation in the early universe. Our recent work utilizing both radiation-hydrodynamic simulations and stellar evolution calculations shows that their typical mass should be lower than previously thought. I review the basic results of this project, and describe prospects for future studies.