

論文の内容の要旨

論文題目

Mass Distribution of Primordial Stars:

Various Paths of Star Formation in the Early Universe

(始原星の質量分布: 宇宙初期における星形成の多様性)

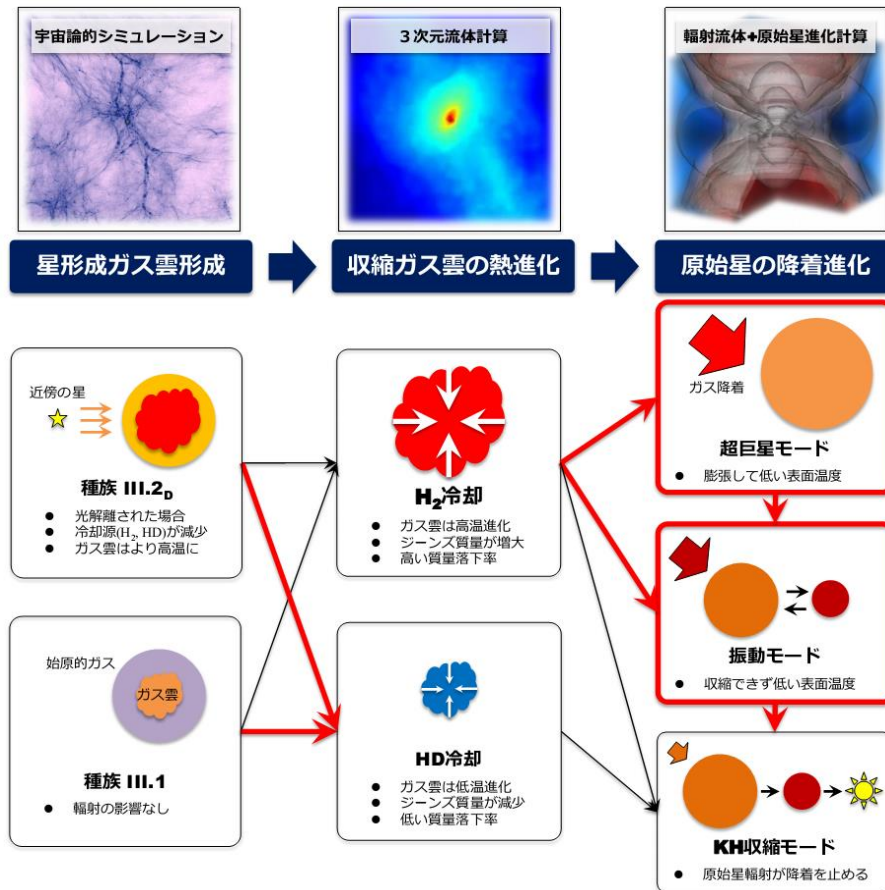
氏名

平野 信吾

ビッグバン後の始原的元素組成ガスから誕生する宇宙最初の天体・始原星（種族 III 星）は宇宙の再電離や化学進化の先駆けとしてその後の銀河進化を左右する。星がその周囲に与える力学的・輻射的・化学的影響は、星の進化と最期を決めるパラメータである星質量に依存する (e.g., Heger & Woosley 2002)。宇宙初期の天体現象を理解するには、始原星の典型的質量やその分布を明らかにする必要がある。

様々な素過程を含む複雑な星形成過程を理解するため、多数の数値シミュレーションが行われてきた (e.g., Abel et al. 2002; Yoshida et al. 2008; Clark et al. 2011)。近年、原始星への質量降着過程の詳細な計算が複数のグループによって行われ、求められた始原星質量が報告された (Hosokawa et al. 2011; Stacy et al. 2012; Susa 2013)。これらの先行研究ではそれぞれ 1 例の星形成過程しか調べられていないが、実際の星形成はその初期状態に強く依存する (図 1: 外部輻射による星形成ガス雲の化学的変性、複数の冷却源が存在する始原的ガス雲の熱進化、降着率によって異なる原始星進化)。先行研究が始原星形成の典型例を扱っているという保証がないためこれらの星質量が一般的かどうかは不明であり、まして質量分布には全く言及できない。一方、始原的星形成ガス雲は宇宙論的シミュレーションを行うことで第一原理的に計算できるため、大規模な宇宙論的サンプルを構築することで始原的星形成ガス雲の物理的性質とその分布を調べるのが可能である。

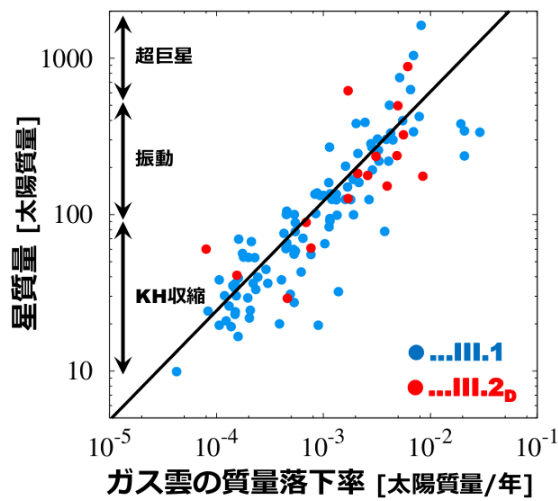
図 1. 始原星形成の様々な経路。矢印は各段階の進み方、赤線は本計算により見つかった新たな経路を示す。



本研究では多数の宇宙論的シミュレーションを用いて始原的星形成の多様性を調べ、始原星の質量分布を理論的に求める。一連の星形成過程を数値計算する中で、始原的星形成は図 1 にまとめたような様々な経路を取り得ることが分かった。この形成・進化過程の多様性が最終的な星質量を左右し、結果的に始原星質量は広範囲にわたって分布する。

まず、外部輻射の影響のない場合（種族 III.1 星；初代星）の形成進化を 110 例の宇宙論的サンプルについて計算した。その結果、種族 III.1 星ではこれまで考慮されなかった形成過程が確認された（図 1 の赤矢印）。前期段階では、水素分子（ H_2 ）冷却に加えて重水素化水素（HD）冷却が有効になるガス雲が存在する。HD 分子はガス雲を宇宙マイクロ波背景放射温度近くまで冷却する。ガス雲が重力不安定となるジーンズ質量は温度の 1.5 乗に比例するため、低温のガス雲では星形成ガスの質量も小さくなる。この影響もあり、ガス雲の質量落下率はサンプルによって大きく異なった（図 2 の横方向分布）。これは後期段階における原始星への降着率を左右し、その大きさに応じて原始星は異なる 3 つの降着進化

図 2. ガス雲の物理量と星質量の相関



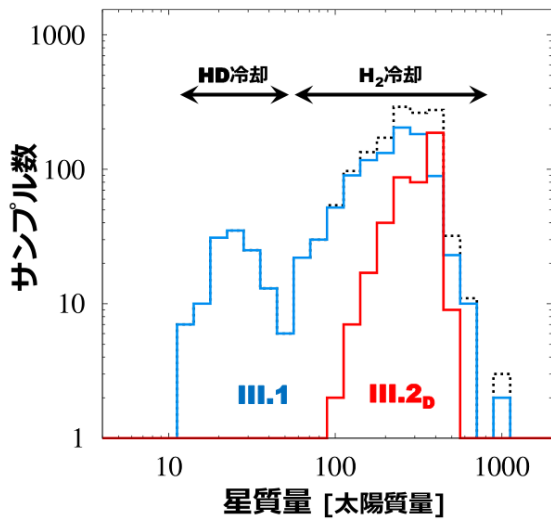
てエネルギーを失うと再び収縮するが、降着率が下がらない限り収縮と膨張を繰り返す(振動モード; Omukai & Palla 2003)。さらに降着率が大きい場合、星の内側が収縮する一方で表面は膨張し続ける(超巨星モード; Hosokawa et al. 2012a)。振動・超巨星モード中の膨張した原始星では表面温度が低くなるため、輻射フィードバックは働かない。降着率が高いほど輻射フィードバックは効かにくくなり、原始星はより大質量まで成長できる(図 2 の縦方向分布)。

110 サンプルの原始星進化を計算した結果、星質量は太陽質量の 10 倍から 1600 倍まで広く分布した。興味深いことに、星質量は星形成ガス雲の初期性質(重力不安定となった時点での質量落下率)との間により相関を示した(図 2 の青点)。この関係式を用いると、後期段階の輻射フィードバックを取り入れた原始星進化計算を経ずに星質量を推定することができる。

次に、外部輻射によってガス雲が光解離された場合(種族 III.2_p 星)について調べた。この時、始原的ガスの主な冷却源である H_2 ・HD 分子は光解離されて減少し、収縮ガス雲はより高温になる。そのため基本的に、解離輻射が強いほど原始星への降着率は高く・星質量は重くなった。一方でこうした単純な応答を見せないガス雲も存在する。例えば、内部エネルギーを抜き去る冷却効率が下がるためガス雲収縮は遅れるのだが、この間に低い冷却効率にも関わらず長時間冷却されてガス雲が十分低温になると HD 冷却が効き出す。このように外部輻射はガス雲進化に複雑に影響するが、一方で重力不安定となったガス雲の性質と星質量の間に種族 III.1 と同様の相関が確認された(図 2 の赤点)。これは高密度になるとガスの自己遮蔽によって光解離が効かないため、以降は種族 III.1 星と同様に扱えることを示している。よって外部輻射の有無に関わらず、一定段階までの星形成ガス雲進化を計算すれば、星質量を見積もることができる。

を示した。降着率が低い場合、原始星が質量成長すると重力収縮が進む(KH 収縮モード)。収縮が進むと表面温度は上昇し、高温の星表面から高エネルギー光子が生じて周囲の始原的ガスを電離する。電離領域が膨張してガス降着円盤に接触すると、ガスが接触面から蒸発するのでガス降着率は低下し、やがて完全に止まる(輻射フィードバック; McKee & Tan 2008)。一方、降着率が一定以上になると、KH 収縮の途中で降着ガスの重力解放エネルギーが星の自己重力を支えて収縮は止まり、星は膨張を始める。膨張し

図 3. 始原星の質量分布



よって始原星の質量分布を求めるためには、宇宙論的に **non-biased** な星形成ガス雲のサンプルを構築し、ガス雲の質量落下率から始原星質量を決めればよい。大規模な宇宙論的シミュレーションより 1540 の始原的星形成ガス雲を取得した。各ガス雲での解離輻射光度を計算することで種族 III.1 と III.2d に星形成過程を分類し、形成される星質量を決定した。最終的に図 3 の星質量分布が得られた。始原星質量は幅広く分布するが、約 300 太陽質量を中心とした鋭いピークを持つ。

これは星形成ガス雲に標準的な場合が存在することに

対応する。さらに形成時期による分布の系統的变化も確認された。初期（赤方偏移 $z \sim 25$ ）は解離輻射が強いため種族 III.2d 星が全体の半分近くを占め、星質量も平均的に重い。赤方偏移が低くなると共に種族 III.2d 星の割合は減少し、平均的な星質量も低下する。後期（ $z < 15$ ）になると殆どが種族 III.1 星となるが、その半数では HD 冷却が有効となり数 10 太陽質量の比較的低質量な星が形成される。

これまでは始原星質量が“太陽質量の何倍か”という議論が主だった。本研究では始原的星形成の多様性に着目し、様々な形成経路によって始原星が広い質量範囲を取り得ること、つまり小質量・大質量始原星のどちらもが一定の確率で含まれることを示した。さらに星形成ガス雲の性質分布から決まるピーク質量があること、それらが形成時期に応じて変化することを数値計算より確認した。

研究が進展することで、始原星形成シナリオは将来更新される可能性は残る。しかし星形成ガス雲の初期性質分布は宇宙論的初期条件から決まっているため、始原星質量分布の系統的特徴（ピーク値、赤方偏移依存性）が存在するという本研究の結論は変わらない。

宇宙進化は大質量星に左右されるため、初期質量関数 (IMF) の大質量側の取り扱いが特に重要である。今回得られた始原星の質量分布が示す形状はよく使われる **Constant / Salpeter IMF** とは異なっており、初代銀河や背景輻射などのモデル計算結果を変更する可能性がある。さらに質量分布の赤方偏移依存性は、始原星が初期宇宙進化に及ぼす影響が時間と共に変化することを示している。始原星の平均質量は時間経過と共に減少するので、初期は数 100 太陽質量のブラックホールや対不安定型超新星になり、後期には数 10 太陽質量の極超新星や重量崩壊型超新星となる。これは初代銀河モデルや次世代望遠鏡による観測可能性を議論する際に重要な示唆を与える。