

論文内容の要旨

論文題目 Star Formation Triggered by the First Generation of Stars

(第一世代星による誘発的星形成)

氏名 長倉 隆徳

本論文では、第一世代星 (宇宙で最初に形成される星) 形成に伴うフィードバック効果を詳細に調べ、次世代星が誘発的に形成される可能性について考察した。現在までに、第一世代星の形成について、準解析的手法やシミュレーションを用いた多くの研究がなされており、その質量は数百太陽質量であると示唆されている (Abel et al.; Bromm et al.)。宇宙初期では、ガスは水素、ヘリウムからなる始原組成であるため、低温で有効な冷却剤は水素分子のみである。水素分子は電気双極子がないため、最低励起温度が約 512 K であり、ガスは 200 K 程度までしか冷えない。このため、低密度 ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) でのガスの分裂質量は大きくなる ($\sim 100 - 1000 M_{\odot}$)。また、近年の 3 次元シミュレーション (Yoshida et al.) から、より高密度でガスの再分裂は起こらないことが示唆されており、この大質量のガス雲から第一世代星が形成されると考えられている。さらに、原始星コア誕生からの質量降着計算 (Omukai & Palla) では、現在の星形成の場合よりも星周物質の温度が高く、ガスが非常に光学的に薄いため、星からの輻射圧で質量降着を止めることができずに第一世代星は大質量となる。一度、大質量星が形成されると、星からのさまざまなフィードバック効果により、その後の星形成は複雑になる。例えば、第一世代星から大量の輻射が放射されるため、周囲の物質は電離され、同時に低温のガスを有効に冷却する唯一の冷却剤である水素分子は解離される。このため、第一世代星形成により、次世代星形成が阻害されるのか、あるいは、促進されるのかは未だに解決されていない大きな問題である。第一世代星は寿命を迎えたとき、その質量により、崩壊し直接ブラックホールになる場合と超新星爆発を起こす場合とに分かれることが知られている。我々は、この 2 つの場合をそれぞれ調べ上げ、次世代星形成が誘発されるかどうかを調べた。その結果、第二世代星が形成される条件は、周囲の環境に強く依存することが分かった。それぞれの場合について、概要は以下の通りである。

まず我々は、質量の小さなダークハローで形成された第一世代星がその終焉で直接ブラックホールに崩壊した場合、その後に取り残される電離領域 (化石電離領域) でのガスの進化を調べた。その際、我々は一次元

球対称流体シミュレーションと非平衡化学反応を同時に解き、同一のハローで星形成が可能かどうかを調べた。その結果、第一世代星形成によって周囲のガスは電離加熱されるため、星が死んだ後のガスは膨張を続けるが、ダークハローの質量が大きい場合には、その重力により中心のガスはやがて収縮を始め、同一ハロー内で次世代星形成が起こり得ることが分かった。我々は、次世代星が形成されるために必要なダークハローの質量を見積もった。その結果、質量が $10^6 M_{\odot}$ 以上のダークハローでは、同一のハローで次世代星形成が可能であることを見出した (図1 参照)。

このとき、化石電離領域内には電子が大量に存在するため、電子を触媒とした水素分子形成反応が効率よく起こるが、その水素分子による輻射冷却でガスは十分に低温 (150 K) まで冷やされ、HD 分子が形成されることが分かった。この HD 分子は電気双極子をもつため、最低励起温度が 128 K 程度であり水素分子よりも低温で有効な冷却剤となる。宇宙初期では宇宙背景放射の温度が 40~50 K 程度であり、ガス温度がこの温度を下回ると、宇宙背景放射が有効な加熱源となり、ガスは輻射では宇宙背景放射の温度以下には下げられない。このため、ガスの分裂のスケールとその後の星へのガス降着率は、この宇宙背景放射の温度でほぼ決まることになる。したがって、HD 分子で温度が下がるとは言え、現在の星の典型的な質量 ($\sim 1 M_{\odot}$) に比べ、かなり質量の大きなガスに分裂する可能性があることが分かった。第一世代形成時にはガス温度が 200 K 程度までしか下がらないため、HD 分子はほとんど形成されないことが分かっており、第一世代星形成時と同じ組成でありながらも、より小さい質量の星が形成される可能性があることが分かった。

次に、我々は、第一世代星がその終焉で超新星爆発を起こす場合、爆発によって形成されるシェルの熱的進化を詳細に調べた。また、我々は少量の炭素と酸素の冷却の影響がその超新星残骸の進化に与える影響も同時に調べた。その際、我々は、一次元球対称流体と非平衡化学反応を同時に計算し、衝撃波によって掃き集められて形成されるシェルから次世代星が形成される可能性について考察した。我々は、爆発エネルギー $E_{SN} (= 10^{52}, 10^{52} \text{ erg})$ 、周囲の数密度 $n_0 (= 0.1, 1, 10 \text{ cm}^{-3})$ 、重元素量 $Z (= 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2} Z_{\odot})$ をパラメータとして、広範囲に渡って超新星残骸の進化を調べた。まず、我々はシェル内部の熱的構造が物理的にどのような機構で決まるのかを調べた。その結果、シェルの中心部のガスは断熱膨張により冷え、シェルの縁側、つまり、シェルに取り込まれた直後のガスは輻射冷却で冷えることが分かった。

まず、重元素量が少ない場合 ($Z \leq 10^{-3} Z_{\odot}$)、炭素、酸素の微細構造遷移冷却が有効でないことが分かった。シェルの中心部では膨張による密度低下により、HD 分子形成が阻害され、それに伴い宇宙背景放射による加熱率が低下し、 $\sim 10 \text{ K}$ 程度にまで下がることが分かった。一方、シェルの速度が十分に遅くなるまでからシェルに取り込まれたガス (シェルの縁側) は、密度が十分に高くならない。そのため、周囲のガス密度が小さい場合には、放射冷却があまり効かなく、温度は十分に下がらない。一方、周囲のガス密度が大きい場合には放射で冷えることができることが分かった。重元素が多い場合 ($Z = 10^{-2} Z_{\odot}$)、炭素、酸素の微細構造遷移冷却が有効に働くことが分かった。このため、シェル中心部では、低温での宇宙背景放射による加熱が断熱膨張による急激な温度低下を阻止することが分かった。一方、シェルの縁側では、周囲の密度が低い場合には、重元素量が小さい場合同様の理由で温度が十分に下がらないが、周囲の密度が高い場合には、炭素、酸素の微細構造遷移冷却により十分に温度が下がることが分かった。今までの先行研究では、シェルの温度は水素分子や HD で下がると考えられてきた (Salvaterra et al.; Machida et al.) が、我々の計算では、それはシェルの縁側で起こり、シェルの中心部では膨張による冷却が支配的であることを新たに見出した。

我々は、流体計算で得られたシェルの温度と膨張減速シェルの線形解析 (Elmegreen) を組み合わせて、シェルが重力的な不安定を起こし分裂するかどうかについて考察した。重力不安定を起こすためには、シェルの温度が十分に冷えなければならないが、シェルの温度は爆発のエネルギーと周囲の密度に強く依存する。爆発の

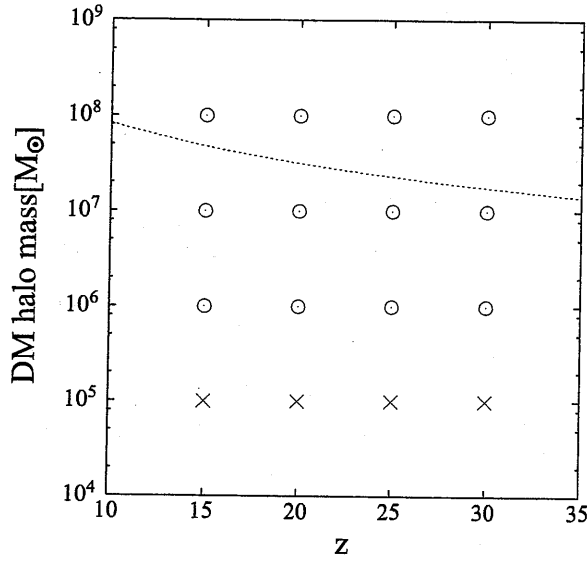


図1 ガスが収縮を起こすかどうかを表した、ハローが virial 化するときの赤方偏移 z_{vir} とハローの質量 M_{halo} の関係。ガスが収縮する場合を○、収縮できない場合を×で表す。点線は virial 温度 $T_{\text{vir}} = 10^4$ K のハロー。

エネルギー、周囲の密度が高くなればなるほど、シェルに取り込まれるガス質量が大きくなり、シェルの密度が大きくなるため、シェルは放射冷却で冷えやすくなる。そのため、爆発のエネルギー、周囲の密度が大きいほど、シェルは分裂しやすくなる。我々の流体計算の結果を用いると、 $(E_{\text{SN}}, n_0) = (10^{52} \text{ erg}, 10 \text{ cm}^{-3})$ の場合と $(E_{\text{SN}}, n_0) = (10^{51} \text{ erg}, 10^3 \text{ cm}^{-3})$ の場合に、シェルが重力不安定により分裂することが分かった。その分裂質量はそれぞれ $\sim 10^4 M_{\odot}$ 、 $\sim 10^3 M_{\odot}$ であることが分かった (図2 参照)。この結果と one-zone (一領域) 近似を用いた先行研究 (Machida et al.) とを比較すると、我々の結果の方がシェルは分裂しにくいことが分かった。これは、先行研究のシェル温度がシェルの中心部を表しているのに対し、我々の結果はシェルの縁側の高い温度の寄与が大きいためである。また、シェルが分裂するためには重元素量はほとんど関係なく、周囲の密度と爆発のエネルギーが重要であることが分かった。これは、シェルの縁側の温度が重要であることを意味している。

我々は、さらに分裂条件から、第二世代の星形成が誘発されるための宇宙論的な条件を見積もった。冷たい暗黒物質モデル (CDM) の枠組みでは、第一世代星は virial 温度が 10^4 K 以下の小さなダークハローの中で形成される。近年の第一世代星形成に伴う電離領域の進化計算によると、小さいダークハローでは電離領域はハローの外まで広がり、衝撃波によって密度は低い値 (0.1 cm^{-3}) にならされる (Kitayama et al.; Whalen et al.)。したがって、このような質量の小さなハローでは次世代星形成は困難である。しかし、質量の十分大きいハローでは、電離領域の膨張に伴って生じる衝撃波の伝播半径は小さく、ガスは十分にハロー内に留まる。よって、質量の大きなハロー内で第一世代星が超新星爆発を起こした場合、次世代星形成が可能であることが分かった。我々は、分裂条件の結果を用いて、分裂可能なハローの最小質量を見積もった。その結果、 $(E_{\text{SN}}, n_0) = (10^{52} \text{ erg}, 10 \text{ cm}^{-3})$ の場合、最小質量は $5.6 \times 10^6 M_{\odot}$ であり、 $(E_{\text{SN}}, n_0) = (10^{51} \text{ erg}, 10^3 \text{ cm}^{-3})$ の場合、最小質量は $4.1 \times 10^6 - 10^7 M_{\odot}$ に制限されることが分かった。

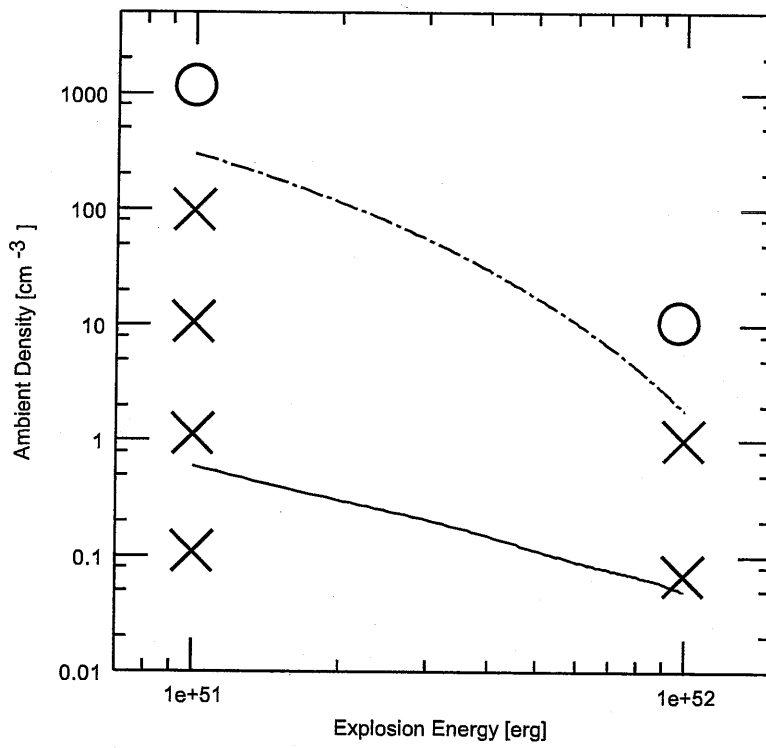


図2 シェルの分裂が起こるパラメータ範囲。分裂が起こる場合は○、起こらない場合は×。比較のため、一領域近似で求めた $Z = 10^{-4} Z_{\odot}$ の場合の結果を実線で表す。この線より上の領域では分裂可能である。また、シェル温度を 300 K に固定した場合の結果をドット・ダッシュ線で表す。この線より上の領域では分裂可能である。