

論文内容の要旨

論文題目 Evolution of Population III Very Massive Stars with Mass Accretion (質量降着を伴う種族 III の巨大質量星の進化)

氏 名 大久保 琢也

宇宙の第一世代星の質量及び進化の様子を詳細に調べることは、宇宙の構造形成や化学進化の歴史を探るうえで大変重要である。

近年の宇宙論的構造形成シミュレーションによると、赤方偏移が 20 前後でダークマターハローが形成され、そのダークマターの重力にバリオンが引きつけられて集合し最初の星が形成されたことが示されている。形成された星は質量降着によって徐々に質量を増やしながら進化してゆくことになる。本研究では、このような描像に基づき、質量降着を伴う初期に重元素を含まない種族 III 星 (Pop III 星) の進化を重力崩壊の段階まで計算した。質量降着率は以下の 4 つのモデルを採用した。

- (1) 上述の 3 次元宇宙論的シミュレーションから得られた質量降着率 (5 モデル)
 - (2) 星からのフィードバックにより質量降着が途中で妨げられるもの (3 モデル)
 - (3) 宇宙論的シミュレーションでまわりの星よりも時間的に遅れて星形成が始まった場合の質量降着率 (1 モデル)
 - (4) 質量降着率が一定 ($1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, 3 モデル)
- (1) と (4) のモデルは進化の間中質量降着がつづき、(2) と (3) のモデルは途中で降着が止まるものである。宇宙論的なシミュレーションから求めた質量降着率 ((1) と (3) のモデル) では、(1) の状況で形成された星を Pop III.1、(3) で形成された星を Pop III.2 と呼んでいる。

これらのモデルの計算結果を質量降着のない星の進化計算と比較し、進化の共通点及び相違点を調べた。以下に主な結果をまとめる。

- (I) 星の最終質量、最終的な運命について

(1) と (4) のモデルでは、星の最終質量は非常に大きくなる傾向にあった。特に (1) の Pop III.1 のモデルでは、ほとんどのモデルで $300M_{\odot}$ から $1000M_{\odot}$ の巨大質量星となり、最終的に重力崩壊を起こしてブラックホールを形成する。数百太陽質量のブラックホールは中間質量ブラックホールと呼ばれ、観測的にも近年その候補が発見され、また、銀河中心に存在する巨大質量ブラックホールの種として、理論的にも注目が集まっている。 $300M_{\odot}$ 以上の巨大質量星は現在の宇宙では見られないが、放射圧や脈動による質量放出が少ない Pop III 星では存在が可能である。Pop III の巨大質量星は中間質量ブラックホールの起源となりうる。また、これらのモデルと最終質量が同じで、質量降着のない星の進化計算を行って結果を比較したところ、質量降着があるモデルのほうが寿命が延びていることがわかった。モデルによっては寿命が 2 倍近く延びたものもある。質量降着をするモデルは初めの段階では低質量のため、その分だけ寿命が延びるのである。

(2) のモデルでは、星が主系列に達するところにフィードバックの効果により質量降着が止まるため、その後一定の質量で進化する。よってその後の進化の様子は質量降着なしのモデルとほとんど変わらない。星の最終質量は星形成の環境やフィードバック効果のパラメータ不定性が大きく、 $50\text{--}350M_{\odot}$ の範囲になる。この質量範囲は進化の途中で核燃焼の暴走により星全体が爆発する Pair Instability Supernova (PISN) となる $140\text{--}300M_{\odot}$ の範囲を含む。しかし、PISN により放出された重元素の存在比は銀河ハローの古い星 (金属欠乏星) や銀河団ガスの化学組成と全く一致しない。従って、フィードバックが重要な場合は、質量増加は $140M_{\odot}$ に達する以前にストップすると想定される。

(3) のモデルでは、降り積もるガスの量がもともと少ないため、 $40M_{\odot}$ 程度の通常の大質量星が形成される。このような星は進化の最終段階で重力崩壊を起こし、中心部はブラックホールとなるが、その過程で超新星爆発を起こし重元素を放出する。このタイプの超新星により放出された各元素の質量比は銀河ハローの金属欠乏星の化学組成を説明でき、宇宙・銀河の化学進化に大きく寄与したと考えられる。

(II) 巨大質量星の進化の最終段階

Pop III 星の進化については、多くの先行研究があるが、その多くは水素燃焼・ヘリウム燃焼までのものである。特に $300M_{\odot}$ 以上の巨大質量星のヘリウム燃焼以降の進化 (酸素燃焼、ケイ素燃焼、重力崩壊) については計算例が少ない。(1) のモデルの結果から、 $300M_{\odot}$ 以上の巨大質量星は、Pop III 星の候補として重要であり、本研究ではこれらの進化を重力崩壊に至るまで計算し、その特徴を調べた。このような質量の星の特徴として、PISN を起こす星と同様、酸素燃焼の段階で核反応は爆発的に進むが、星が重いために重力束縛エネルギーの方が大きく、PISN とはならない。最終的には重力崩壊を起こしてブラックホールとなる。

特記すべきことは、中心部が重力崩壊を起こす段階で鉄コアおよびケイ素層の質量が 2 倍近く大きくなる、ということである。これは、ケイ素及び酸素の殻燃焼が爆発的に進み、そのタイムスケールが重力崩壊のタイムスケールとほぼ同じ程度に短くなるためである。その結果、鉄コアの質量は星全体の質量の 20–25% と大きくなる。

それに対し、同じく重力崩壊を起こす $140M_{\odot}$ 以下の星では、ケイ素及び酸素の殻燃焼は安定的に進むため、核燃焼のタイムスケールが重力崩壊のタイムスケールに比べてかなり長い。その結果、鉄コアの質量は星全体の質量の 5% 程度

と小さい。このように内側のコアが大きいことが巨大質量星の特徴であることを明らかにした。この特徴は、重力崩壊の進行や、ジェット状爆発が起こるような場合の元素合成にとって重要なものとなる。

(2) のモデルでは、最終質量として $100M_{\odot}$ 程度のもも考えられるが、 $80 - 140M_{\odot}$ の星は酸素燃焼・ケイ素燃焼の段階で CO コアが振動を起こす。このような星の進化計算を重力崩壊に至るまで計算し、振動の様子を調べた。その結果、質量の大きい星ほど振動回数が少ない、振幅が大きい、1 回の振動周期が長い、ことがわかった。また、膨張のエネルギー源は初期の振動では中心部の核燃焼であるが、末期では中心部で燃料が燃え尽きているため、殻燃焼が主となる。この範囲の質量の星は重元素を含んだ場合でも振動を起こすことが知られていて、近年見つかった非常に明るい超新星の親星となる可能性もある (SN2006gy)。Pop III の場合でもこのような振動を起こすことが確かめられた。これらの星は、最終的には中心部が重力崩壊を起こしてブラックホールを形成する。

まとめと結論

本研究では、質量降着を伴う Pop III 星の進化計算を行い、最終的な星の質量、また、各質量の星の進化の詳細を主系列前から重力崩壊に至るまで調べた。質量降着率には、フィードバックの有無や強さなどの不定性は残るものの、宇宙論的シミュレーションから導かれた質量降着率に基づく次のようなシナリオを提示したい。まわりの領域に比べ早い段階で星形成が始まる Pop III.1 の星 ((1) のモデル) は $300M_{\odot}$ 以上の巨大質量星となり、中間質量ブラックホールを形成する。まわりの領域に比べ遅れて星形成が始まる Pop III.2((3) のモデル) は $40M_{\odot}$ 程度の質量となり、超新星爆発により宇宙・銀河の化学進化に寄与する。このような描像により、観測事実として PISN の痕跡が見られない理由が説明できる。

$300M_{\odot}$ 以上の巨大質量星は現在のところ見つかっていないが、このような星が重力崩壊を起こす際に放出されるニュートリノや重力波のスペクトルは特徴的であることが近年の研究で示唆されている。将来的には、それらの観測により、第一世代星としての巨大質量星の存在が検証されることが期待される。