

連載

最新宇宙誌【11】

エポックⅢ：宇宙の再電離

～暗黒時代の終わり&天体時代の始まり（後編）～

福江 純（大阪教育大学）

5. 最初の天体

このエポックに関する最後の問題として、宇宙の再電離を起こした＜最初の天体＞について述べておこう。

現在のおおかたの考えとしては、宇宙再電離の電離源は、宇宙初期に誕生した高温で大質量の星か、あるいは初代の活動銀河／クェーサーあたりだったのではなかろうかと思われる。どちらも強い電離源になりうるが、違う点としては、最初の星は強い紫外線を出すものの X 線はあまり出さないが、クェーサーは紫外線も X 線も両方出すことだ。そのため、初代星周辺の宇宙ストレームグレン球は割と境界がはっきりしているが、X 線は貫通力が高いのでクェーサー周辺の宇宙ストレームグレン球はややぼやけてしまうことになる。電離源として、どちらがより重要だったのか、あるいは両方とも電離源として働いたのかは、まだ決着がついていない。

5.1 最初の星

宇宙の中で基本的な天体である星については、現代物理学が発展した 20 世紀に、非常に精力的に研究されてきた。コンピュータの発達によって数値シミュレーションが可能になったこともあり、“通常の”星の構造や進化については、誕生時と終末時を除き、かなり解明されたといっていいたいだろう。

ところが最近、星の研究がふたたび脚光を浴び始めている。それは、「最初の星（first star）」問題が起こったためだ。すなわち、宇宙の歴史の中で、最初の星はいつできたのか、最初の星はどんな星だったのか、最初の星は

どういう進化をしたのか、そして最初の星は初期宇宙の環境やさらには宇宙の進化にどのような影響を与えたのか、といった内容が問題になり始めたのである。過去の研究で重点的に調べられたのは“現在の星”であって、実は、宇宙の“最初の星”についてはあまり調べられていなかったのだ。

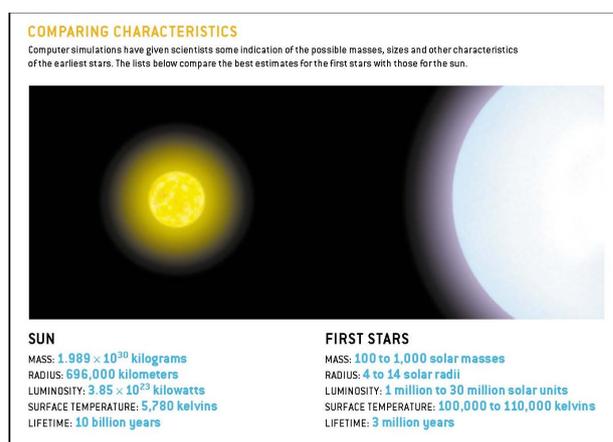


図 12 太陽(左)と最初の星(右)(Bromm 2001)
最初の星は大質量で高光度の星だった。

ちょっとと思うと、星はいつできても星だろうという気がするかもしれないが、膨張宇宙においては、できる時期によって星の性質は異なってくる。具体的には、星を作っている元素の成分が異なってくるのである。宇宙のごく初期でまだ星も生まれていない時期には、宇宙には水素とヘリウムしか存在しなかった。その後、星の内部の核反応により重元素が形成されて、現在の宇宙には、水素やヘリウム以外にも、炭素や窒素や酸素や鉄などの元素も微量ながら存在している。そしてそれらの重元素は、グラファイトやシリケートその他、

しばしばダスト（塵）として存在している。

これらの重元素は、微量ながら星の形成や構造に大きな影響を与えることがわかっている。星が形成される際に、ガスの温度を下げる“冷却剤”として働くからだ。ガスの集まりが重力で収縮していくとき、熱を逃がすことができなければ温度がどんどん上昇していき、ガスの圧力も上がって行って、星になる前に収縮がストップしてしまう。しかし、重元素のダストが存在していると、ダストは赤外線を効率的に放射するので、どんどん熱を逃がすことができ、ガスは収縮しやすくなるのである。その結果、質量が比較的小さいガスの塊でも星になりやすい。“現在の星”の典型的な質量が太陽程度なのは、そのことが一つの大きな理由である。太陽は、ごく典型的な星の一つなのだ。また同時に、あまり質量が大きな星もできなくなり、“現在の星”の質量は最大でも太陽の100倍程度だと考えられている。

逆に言えば、水素とヘリウムだけしか存在しない初期の宇宙で生まれた“最初の星”の場合、重元素／ダストによる冷却効果がないので、質量の小さな星は形成されにくいだろう。実際、最近の数値シミュレーションなどの結果では、宇宙で生まれた最初の星は、太陽の100倍から1000倍もの質量をもった非常に大質量の星々だったと見積もられている。宇宙の一番星はきわめて巨大な星々だったのだ。

水素とヘリウムしかない初期宇宙で、なんとか大質量で高光度の最初の星が形成され、それらの星が進化し、赤色巨星となり超新星を経て、重元素を撒き散らして爆散したからこそ、重元素を含む後代の星や惑星系が生まれる土壌が醸造され、そして現在の宇宙における生命の発生へとつながったのである。

余談ではあるが、少し前に読んだアレステア・レナルズの分厚いSF『量子空間』（ハヤ

カワ文庫）では、銀河史の初期に“黎明期戦争”というものがあったとされている。すなわち、銀河の最初の歴史においては、金属元素が少なかったために、銀河の初期に発生し宇宙に進出した生命体の間では、金属をめぐる熾烈な戦争があったというものだ。

5.1.1 最初の星の構造と大気

現在の星と最初の星について、まず具体的な数値を挙げて比較してみよう。

■太陽（現在の星の例）■

組成：水素 $X=73\%$ 、ヘリウム $Y=25\%$ 、
重元素 $Z=2\%$

質量： $1.99 \times 10^{30} \text{kg}$ （太陽質量）

半径： $6.96 \times 10^8 \text{m}$ （太陽半径）

平均密度： 1.41g/cm^3

表面温度： 5780K

光度： $3.85 \times 10^{25} \text{W}$ （太陽光度）

寿命：100億年

■最初の星■

組成：水素 $X=75\%$ 、ヘリウム $Y=25\%$ 、
重元素 $Z=0\%$

質量：100太陽質量～1000太陽質量

半径：4太陽半径～14太陽半径

平均密度： $2.20 \sim 0.514 \text{g/cm}^3$

表面温度： $100000 \sim 110000 \text{K}$

光度：100万太陽光度～3000万太陽光度

寿命：300万年

現在の星と最初の星について、横軸を表面温度の対数、縦軸を光度の対数に取った“HR図”を描くと、図13のようになる。同じ質量で比較してみると、最初の星は現在の星に比べて、光度はさほど変わらないのに表面温度が高い。ということは、半径が小さいことを意味している（ステファン・ボルツマンの法則）。結果、星の中心温度も高いことを意味している。

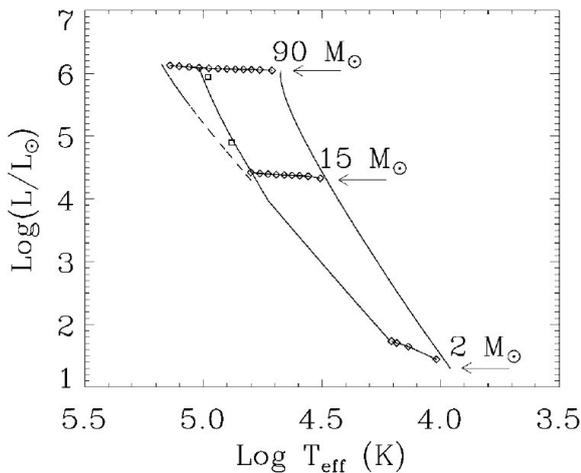


図 13 現在の星（種族Ⅰ）の0歳主系列（右側の実線）と最初の星（種族Ⅲ）の0歳主系列（左側の実線）(Tumlinson & Shull 2000)。

ダイヤモンド印は現在の星から重元素を下げていった場合の位置で、2 太陽質量の場合は右端の $Z=0.02$ から 10^{-5} まで、15 太陽質量では 10^{-10} まで、そして 90 太陽質量では 10^{-13} まで小さくしてある。ちょっと細かい話を書くと、重元素が少しでもある星は一番最初の星ではないので、そういう意味で、重元素僅少量を種族Ⅲと使い分けることもあるようだ。

これはどういうことかということ、宇宙初期の核融合で触れたように、星の核融合には、主に、水素水素連鎖反応 (pp chain; pp チェイン) と炭素・窒素・酸素を触媒とする CNO サイクル (CNO cycle) があるが、最初の星では触媒となる CNO がいないために、pp チェインしか起こらない。高温になると pp チェインは CNO サイクルより効率が悪いため、星の質量を支えるためには、半径を小さくして中心部を圧縮し高温にして、核反応を起こさせる必要があるのだ。そのため、最初の星は、同じ質量で比べると、現在の星よりも、より小さくて高温の星になるのである。

星の構造と表面温度が決まれば、モデル大気の計算が可能になる。星はおおざっぱには

黒体放射で近似されるが、高温星では電離のため、低温星では分子の存在のために、黒体放射からのずれが大きくなる。したがって、観測はもとより、周辺環境へ与える影響を調べるためにも、詳しくやろうとすればするだけ、モデル大気の計算は重要になってくる。そのような計算の一例を図 14 に示す。

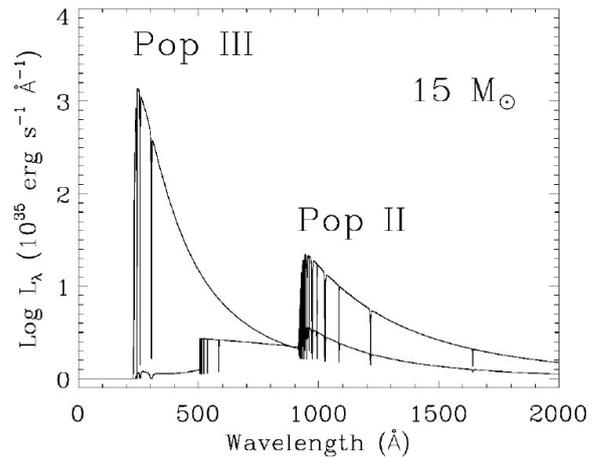


図 14 モデル大気のスペクトル(Tumlinson & Shull 2000)。

成分は水素とヘリウムのみで、Pop II ($Z=0.001$) の有効温度は 36000K、Pop III ($Z=0$) の有効温度は 63000K とした。

図 14 は、15 太陽質量の種族Ⅱ ($Z=0.001$ 、 $T_{\text{eff}} = 36000\text{K}$) と種族Ⅲ ($Z=0$ 、 $T_{\text{eff}} = 63000\text{K}$) について計算したモデル大気のスペクトルだ。

星の構造や進化には重元素が劇的に影響するが、モデル大気のスペクトルを左右するのは温度である (重元素がスペクトルに影響しないわけではない)。図 14 のスペクトルで崖みたいなのは、いわゆる「電離端 (ionization limit)」で、たとえば、 912\AA (91.2nm) の「(中性水素の) ライマン端 (Lyman limit)」は、水素の電離エネルギー 13.6eV (91.2nm) より高いエネルギー (短い波長) では水素が電離してしまうので、そのような光子が激減することを示している。また 504\AA (24.6eV)

は中性ヘリウムのライマン端、 230\AA は一回電離ヘリウムのライマン端、だと思ふ(自信、70%)。36000Kの種族IIの星では、中性水素のライマン端と中性ヘリウムのライマン端がみられるが、もっと温度の高い63000Kの種族III星では中性ヘリウムのライマン端は見えなくなり、一回電離ヘリウムのライマン端が幅を利かせている、のだと思ふ(リュードベリの公式からヘリウムの電離エネルギーを計算すると、こちらに相当するモノになる)。

5.1.2 最初の星の形成

現在の宇宙では、通常物質は星や星間物質、さらにそれらの巨大な集合体である銀河といった様相を取っているが、暗黒物質は銀河や銀河間空間に広範に拡がっていて、通常物質の分布と暗黒物質の分布とは、ときとしてずれができていく(図15)。しかし、まだ星や銀河が形成されていない初期宇宙では、通常物質と暗黒物質は入り交じっていた、と想像されている。

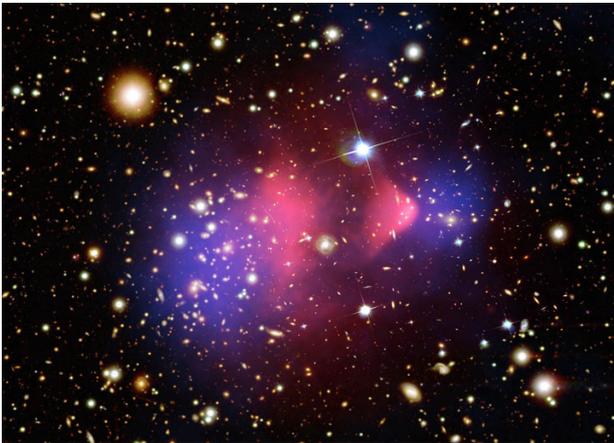


図15 弾丸銀河団 1E0657-56 (Bullet Cluster)。画像出典：http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/photos06-096.html。

この銀河団は二つの銀河団が衝突合体して形成されたと考えられている。多くの白や薄いオレンジ(原図では)の丸い像は、ハッブル宇宙望遠鏡などで撮像された可視光画像で、銀河団

に含まれる多数の銀河である。もやもやした画像が左右に四つほど並んでいるが、中央付近のピンク(原図)の二つの像は、X線衛星「チャンドラ」が撮像したX線像で、高温のガスを表しており、また同時に銀河団に含まれる大部分の通常物質の分布を示していると考えられている(可視光で見える銀河よりガスの方が質量が多い)。さらに、その両側の二つの青い(原図)丸い像は、重力レンズ効果を用いて推定された通常物質よりはるかに大量の暗黒物質の分布を表している。通常物質よりはるかに大量の暗黒物質が、通常物質とは違う分布をしていることがわかる。ちなみに“弾丸”の由来は、中央の二つのX線像のうち、右側のものが右に尖った鏃(やじり)のようにみえるためらしい。

初期宇宙のわずかなゆらぎを種として、通常物質と暗黒物質は、太陽の10万倍くらいの質量をもつガス雲——「ミニハロ(minihalo)」と呼ばれることもある——を形作り、その中で、最初の星が形成されたと考えられているのだ。

このガス雲における通常物質の成分は、言うまでもなく、水素とヘリウムだけだ。水素は大部分が原子状態だったが、そのごく一部、1000分の1ほどは水素分子になっている。量的にはわずかだが、この水素分子が非常に重要な役割を果たした。低温のガスでは、水素分子のみが、「冷却剤(coolant)」として働くからだ(図16、図17)。

すなわち、約10000Kよりも温度が高いと、原子状態の水素が励起して、その際に放射する光がガスからエネルギーをもちだし、ガスが冷えることが可能になる。しかし、10000Kより低温では水素が励起されないため、中性水素が光を放出することが難しくなる。逆に、低温で分子が形成されていれば、分子の振動状態の変化や回転状態の変化に伴って電磁波を放出するので、エネルギーを抜くことが可

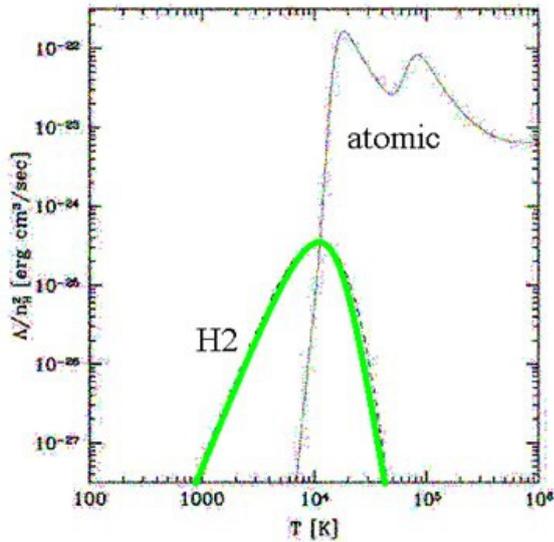


図 16 温度の関数で表したガスの冷却率 (Barkana & Loeb 2001)

冷却剤としては、10000K 以上だと水素原子、より低温では水素分子が働く。

能になるのだ。

ただし、現在の星間空間で見られる CO などの非対称な分子はバランスが悪いので効率よく電磁波を放出できるが、水素分子は対称性があるので電磁波の放出効率は非常に悪い。だから一般には（現在の星間空間では）、ガスの冷却剤としては役に立たないと思われていたが、初期宇宙では意外に役に立つのである（というか他にないから仕方ない）。

これらのミニハロが冷えた結果、重力収縮し、さらに重力不安定で分裂して、数百太陽質量程度の規模の小さなガス雲になり、それらから最初の星ができると思われている。シミュレーションなどの結果では、宇宙が開闢してから、1 億 5000 万年から 2 億年ぐらいにかけてではないかと想像されている。最近では精力的にさまざまなシミュレーションが行われているので、ぼくもプライオリティの所在がよくわからないが、目についたものを少し挙げてみよう（図 18、図 19）。

Reactions

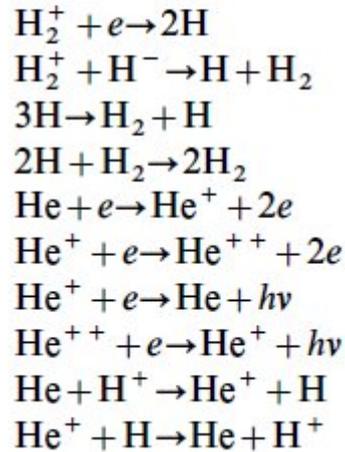
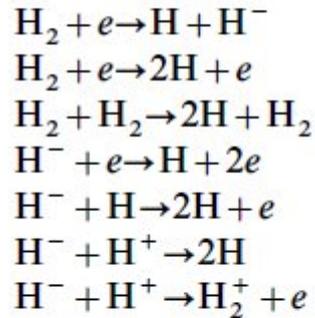
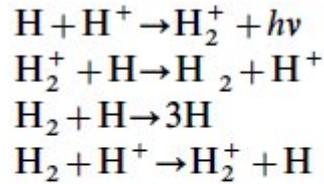
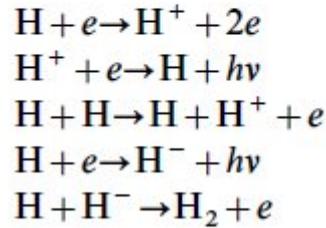


図 17 分子の形成過程

現在の星間空間では、主に、ダスト表面の吸着過程で形成される。ダストのない初期宇宙では、電子を触媒として水素マイナスイオンを経たり、陽子を触媒として H₂ プラスイオンを経て形成される。

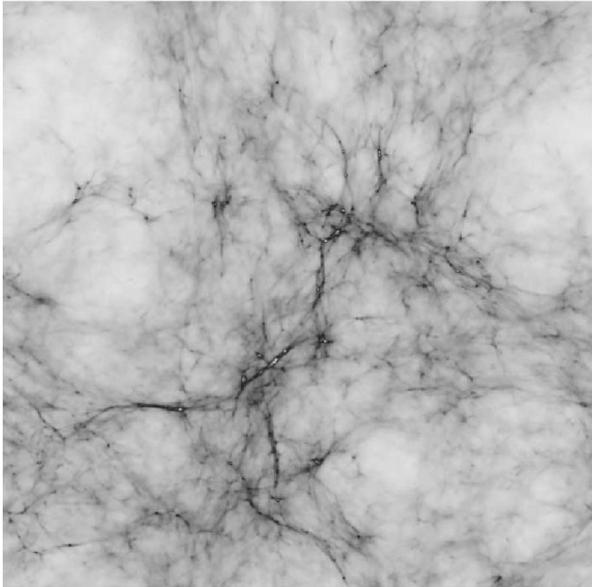


図 18 宇宙項 (Λ 項) と冷たい暗黒物質 (CDM) を含む Λ CDM 膨張宇宙モデルのもとで、始源ガス雲の振る舞いをシミュレーションしたもの (Yoshida *et al.* 2003)

赤方偏移が $z=17$ まで来たときで、図の差し渡しは 600kpc ほどである。始源ガスはフィラメント状に集まり、さらにフィラメントの交叉点にはより濃いガス雲—初代天体—が形成されていることがわかる。これに先立つ $z=25$ から 30 ぐらいの時期にできた 10 万太陽質量ぐらいのミニハロから、このような構造ができてきた。

こうして生まれた最初の星 (核反応を起こしていない最初の原始星) は、実はまだあまり質量は大きくない。太陽の 10 倍ぐらいか、もっと小さいという計算もある。しかし、最初の星の周辺にはまだ大量のガスが残っているので、それらのガスが「降り積もる (accretion)」ことにより、最初の星は引き続いて“成長”して、大質量の星になると考えられている。

星が生まれた後に、周囲に取り残されたガスが降り積もる質量降着は、現在の宇宙の星形成領域でも起こっているが、現在の宇宙と初期宇宙とでは、いくつか条件が異なっている。

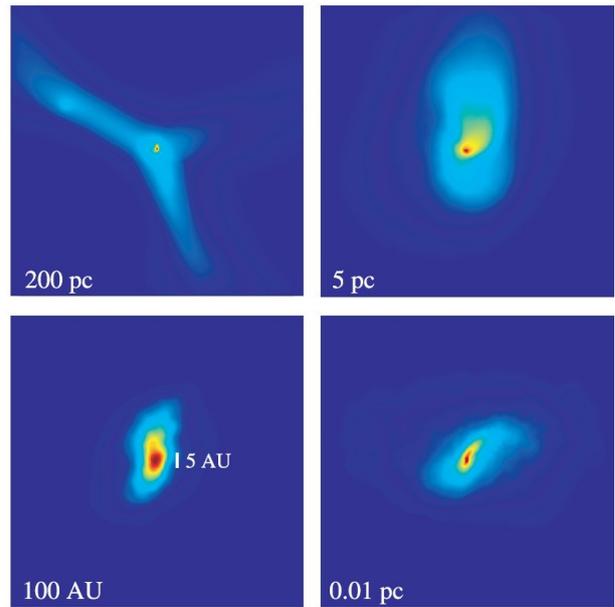


図 19 やはり Λ CDM モデルのもとでの、最初の星 (最初の原始星) が形成されるシミュレーション (Yoshida *et al.* 2006)

赤方偏移は $z=19$ ぐらいの時期で、左上から右回りの拡大した画像してある。

・質量降着率:最初の星の構造でみたように、最初の星はダストによる冷却がないため、ダストによる冷却がある現在の宇宙の同じ質量の星と比べて、より高温で高密度の星になる。したがって、同じ質量では、最初の星は現在の星より重力が強い。その結果、周囲のガスをより強く引きつけることになり、ガスが降ってくる割合—「質量降着率 (mass accretion rate)」が大きくなる。具体的には、

現在の星：100 万分の 1 太陽質量/年

最初の星：1000 分の 1 太陽質量/年

のように、最初の星の方が 1000 倍くらい大きくなりそうだ。

・不透明度：周辺に十分なガスがあっても、無限に星に降り積もっていくわけではない。星の質量が十分に大きくなって、核反応を起こすようになり、星が明るく輝きはじめると、星からの放射圧でガスは影響を受けるようになる。とくに現在の宇宙にあるダストは放射

圧の影響を受けやすく、その外向きの放射圧によって質量降着はストップする。しかし、最初の星ではダストがなく、質量降着をなかなか止めることができないため、大質量になるまで成長を続けると予想されている。

上記のようなことを念頭に置いて行われた数値シミュレーションの一例が図 20 だ。質量降着率をいろいろに変えた場合の、星の質量（横軸：太陽質量単位）と半径（縦軸：太陽半径単位）の変化を示している。

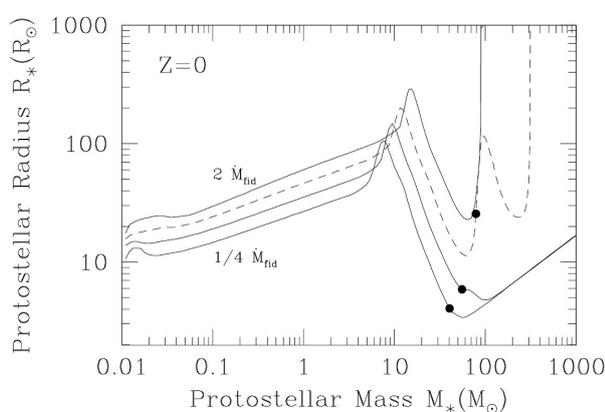


図 20 最初の星のガス降着成長 (Omukai and Palla 2003)

横軸は太陽質量を単位とした星の質量、縦軸は太陽半径を単位とした星の半径。質量降着率は、 4.4×10^{-3} 太陽質量/年を基準（この質量降着率の場合に、ある段階でエディントン臨界に到達する）にして、下から、その 1/4 倍、1/2 倍、1 倍、2 倍とした計算例。黒丸は水素燃焼が起こる時点。

図 20 からは、質量降着を受ける原始星から主系列星への成長には、大きく三つのフェーズ（Ⅰ～Ⅲ）があることが見て取れる（定性的には現在の星でも同じ）。

フェーズⅠ 断熱降着期：まず太陽質量の 10 倍ぐらいまでは、質量降着によって星の質量が増加するとともに、星の半径も増加している。増加の仕方は直線的だが、図のメモリは対数目盛なので、実際には質量のべき乗に

比例して半径は増加していることになる。この時期は、エネルギーの収支を考えない、単純な球対称質量降着モデルで説明できる。

フェーズⅡ 重力収縮期：10 太陽質量を超えたあたりから、質量が増加するにもかかわらず、半径は減少するという状態に移行する。星の質量が増加すると、星の内部での重力収縮によるエネルギー解放が利いてきて（まだ核反応は起こっていない）、エネルギーバランスを保ちながら、星は自分自身の重力で収縮する時期に入るためだ。この重力収縮期は「ケルビン＝ヘルムホルツ収縮期 (Kelvin-Helmholtz contraction phase)」とも呼ばれる。図では時間の経過がわかりにくいだが、動的なタイムスケールで進む質量降着期に比べると、熱的なタイムスケールで進む重力収縮期は桁で長くなる。

フェーズⅢ 主系列降着期：重力収縮が進んで星の中心部での温度が高くなると、50 から 100 太陽質量ぐらいでついに核融合反応が起こり始めて、最初の星は 0 歳主系列に到達する。図中の黒丸が核融合の火が灯ったときだ。

この計算例では、質量降着率によって、フェーズⅢの振る舞いが異なることがわかる。質量降着率が基準（この質量降着率の場合に、ある段階でエディントン臨界に到達する）とした値よりも小さいと（図の下の方）、50 太陽質量ぐらいで 0 歳主系列になり、静かに進化していく。しかし、質量降着率が大きいと（図の上の方）、星の半径はふたたび急激に増加する。というのも、質量降着率がこの基準値より大きいと、ある段階で星からの放射が強くなり、形成されたばかりの（形成されつつある）外層大気は、放射圧加速恒星風として吹き出すため、大気が実質的に膨張するのである。

なお、最初の星は大質量で高温の星なので、放射されるエネルギーは紫外線などになる。

それがそもそも宇宙の再電離に働くわけだが、同時に周囲へ放射圧を与えたり、その他、多大な影響を与え、それらの多くは、さらなる星の形成を妨げる方向に働く。しかし、星形成過程は相当に複雑な過程で、まだまだ研究の途上というべきだろう。

5.1.3 最初の星の進化

ここで、比較的質量の大きな星、とくに重元素を含まない大質量星（すなわち宇宙最初の星）の進化に関して、最近の研究をざっとまとめておこう（図 21）。

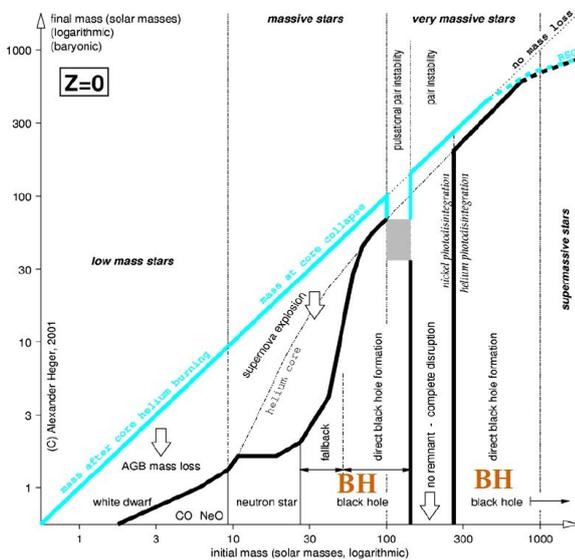


図 21 重元素のない ($Z=0$) 大質量星の進化 (Heger & Woosley 2002)

横軸が星の初期質量で、縦軸は星の最終質量（共に太陽質量単位の対数值）。斜めの直線は最終質量が初期質量と等しい線だが、進化の途中のさまざまな質量放出によって、太い実線のように最終質量は初期質量より小さくなる。

(1) 太陽質量 < 星の質量 < 8 太陽質量

白色矮星が残る。星は、主系列星の段階では、水素がヘリウムに核融合する際に発生する熱で自らを支えている。しかし中心部の水素がヘリウムに変換すると熱源がなくなるため、ヘリウムの芯は収縮する一方、外層大気

は膨張して赤色巨星となる。この時期、とくに「漸近巨星枝/AGB 星 (asymptotic giant branch)」と呼ばれるフェーズで、星は質量放出をしながら外層大気の多くを失ってしまい、残された中心核は CO 白色矮星になる。白色矮星の最大質量（チャンドラセカール質量）は太陽の 1.4 倍程度である。なお、この AGB 星時代にどれくらいの質量が失われるかは、現在でもまだ十分にはわかっていない。

(2) 8 太陽質量 < 星の質量 < 30 太陽質量

中性子星が残る。この質量範囲では、星は進化の最終段階で、重力崩壊型超新星爆発を起こし、星の大部分を吹き飛ばして、中心部は縮退して中性子星になる。中性子星の質量は 2 太陽質量前後である。

(3) 30 太陽質量 < 星の質量 < 140 太陽質量

ブラックホールが残る。この質量範囲でも、星は進化の最終段階で、重力崩壊型超新星爆発を起こすが、星のすべてが吹き飛ばすわけではなく、ガスの一部が「フォールバック (fallback)」してきて中心部の質量が中性子星の上限質量を超えてしまい、中心部はブラックホールになる。

ただし、質量がある程度大きいと、そもそも超新星爆発を起こさずに星全体がひっそり重力崩壊して、そのままブラックホールになると考えられている。ちなみに、そのような華々しくない超新星のことを「暗黒超新星 (dark supernova)」と呼ぶことがある。また、ひっそりとできるブラックホールを「無音ブラックホール (silent black hole)」と呼ぶようだ。ブラックホールとしてもっとも有名な はくちょう座 X-1 (10 太陽質量程度) は、まさに“無音過程”でできたブラックホールなのではないかという意見もある。

(4) 140 太陽質量 < 星の質量 < 260 太陽質量

残存物なし。実はこの範囲内の星は、意外なことにブラックホールにならない。「電子陽電子対不安定 (pair instability)」と呼ばれる

ある種の不安定を起こして、星全体が吹き飛んでしまうのだ。

この「電子陽電子対不安定型超新星爆発 (pair-instability supernova)」は聞いたことがない人が多いと思うので、少し詳しく説明しておこう (図 22)。



図 22 電子陽電子対不安定型超新星爆発のイメージ (出典: http://www.popsci.com/files/imagecache/article_image_large/files/articles/bigboom_main.jpg)

星は、自身の重さを、高温の中心部から外向きの圧力で支えている。太陽のような小質量の星では、外向きの圧力は高温になったガスの圧力——「ガス圧 (gas pressure)」が担っている。しかし、星の質量が大きくなり同時に中心の温度が高くなると、ガス圧よりも「輻射圧 (radiation pressure)」の方が効いてくる (ガス圧は温度に比例するが、輻射圧は温度の 4 乗に比例する)。すなわち、大質量星は、中心の核融合で生成された光子の圧力で支えられているのだ。

さて、通常の大質量星の超新星爆発の場合、星の進化が進み中心部の元素が鉄まで融合してしまうと、それ以上の核融合は起こらないので熱源がなくなり、中心核が崩壊して、ちょっと粗っぽく言えば、まあ、その反作用で超新星爆発を起こす。これは「重力崩壊型超新星」で、外層大気にはまだ大量の水素を保

持していたため、観測的にはしばしば水素のスペクトル線をもつⅡ型超新星爆発として観測される。

しかし、さらに大質量になると、中心部の温度が非常に高温になり、そのため光子のエネルギーも非常に高くなって、光子同士の衝突で電子・陽電子のペアが生成されるほどになる——「対生成 (pair creation)」と呼ぶ。純粋なエネルギー (光子) の状態ではそのエネルギーすべてが圧力に寄与していたが、電子と陽電子になるとエネルギーの大部分は静止質量に転化してしまい圧力として働かない (もとの光子のエネルギーから静止質量エネルギーを引いた残余が運動エネルギーとして圧力に働く)。結果、中心部の圧力がごそっと抜けて、星は「爆縮 (implosion)」し、中心核周辺から落下した物質が急激に圧縮されて、残っていた燃料が一気に核融合し大爆発するのだ。大量の物質が一気に融合したエネルギーはすさまじく、ブラックホールさえ残さずに星は爆散してしまうと考えられている。

(5) 260 太陽質量<星の質量

ブラックホールが残る。さらに質量が大きくなると、中心核の重力崩壊に伴って、超新星爆発は起こさずに星全体が重力崩壊し、直接にブラックホールになる。

5.1.4 最初の星の影響

すでに触れたように、最初の星は大質量で高温の星なので、放射される紫外線は、ガスを電離したり逆にガスの収縮を妨げたり、周辺環境へ多大な影響を与える。それら放射される電磁波による影響を「放射的フィードバック (radiative feedback)」と呼ぼう。

たとえば、ガスの収縮を妨げる負のフィードバックとしては、紫外線による水素分子の解離がある。初期宇宙の水素ガスは一部が水素分子になっていて、その水素分子が冷却剤として働いてガスの収縮をそこそこに可能に

している。しかし、水素分子は壊れやすい分子で、11.2~13.6eVの紫外線を受けると簡単に破壊されてしまうのだ。そのため、最初の星ができてしまうと、最初の星から放射される紫外線によって周囲のガス中に含まれる水素分子が破壊され、新たな星が形成されにくくなるのである。

一方、星の進化の結果においても、たとえば、最初の星の超新星爆発は規模が大きいので周囲への影響も大きい。さらに、重元素の生成という観点でも、後の世代の星形成への影響が大きい。このような元素組成に関わるものを「化学的フィードバック (chemical feedback)」と呼ぶ。

誕生時の星の質量にはさまざまなものがあり、それぞれの質量の星がどれくらい生まれるかという割合を「初期質量関数 IMF (initial mass function)」と呼んでいる。星の世代交代による重元素生成や銀河進化への影響を考えると、この初期質量関数は欠かせない重要情報である。

最近の数値シミュレーションでは、最初の星の初期質量関数 IMF など得られている

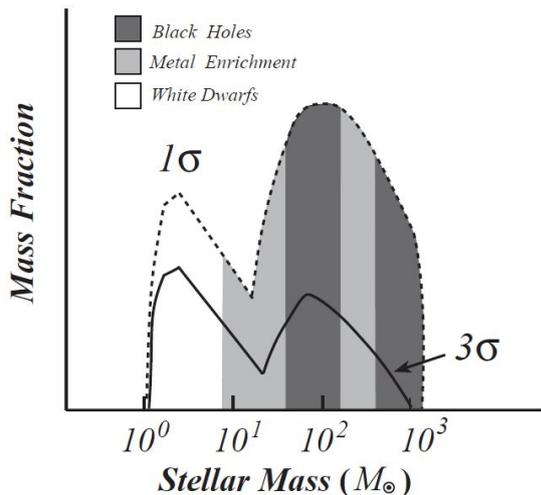


図 23 最初の星の初期質量分布の予想 (Nakamura & Umemura 2001)

横軸は星の初期質量で、縦軸はその質量をもつ星の割合。二山になっている点に注意。

(図 23)。この IMF が、1~2 太陽質量付近と、10~100 太陽質量付近とで、二山になっているのが興味深い。

上記に述べた最初の星の進化と照らし合わせると、図 23 の白い範囲 (1~8 太陽質量あたり) は最終的に白色矮星になってしまうだろう。また、薄い灰色の部分 (8~40 太陽質量と 140~260 太陽質量) は超新星爆発で重元素を星間空間に撒き散らすので、重元素の増加に貢献することになる。さらに、濃い灰色の部分 (40~140 太陽質量と 260 太陽質量以上) は、ブラックホールになってしまうので、重元素の増加には関係ない。

5.2 最初のクェーサー

この 5 節で述べた最初の天体の第一候補はもちろん“最初の星”だし、天体現象の基本が星であることは、今も昔も変わらない。一方、最初の星の寿命は先に述べたように短命で数百万年しかない。したがって、最初の星ができれば、宇宙史的にはほぼ同時に“最初の (恒星質量) ブラックホール”ができたはずだし、“最初の連星”における“最初の降着円盤”や亜光速ジェットを吹き出す“最初のマイクロクェーサー”が現れただろう。さらに“最初の活動銀河”、すなわち“最初の大質量ブラックホール+降着円盤システム”を含む“最初のクェーサー”が形成され、その中心からは“最初の宇宙ジェット”が吹き出したことだろう。もちろん“最初の極超新星やガンマ線バースト”とピカピカ光ったことに違いない。宇宙が生まれて数億年から 10 億年ぐらいの時代は、とにかく<最初の天体>オンパレードだったのであるから。

最初の X 線連星にせよ、最初のガンマ線バーストにせよ、さまざまな最初の天体が初期宇宙に与える影響は、もしかしたら、並々ならぬものがあつたかもしれないが、ここではとくに最初のクェーサー<大質量ブラックホ

ール+降着円盤システム>について、少し触れておくことにする。

さて、ブラックホール周辺の光り輝く降着円盤について、その基本的な描像はほぼ確立している（非定常な振る舞いや相対論的影響そしてジェットとの関連など、まだまだ解明すべき点が多いが）。そして、降着円盤から放射される光のスペクトルは、いわゆる「円盤黒体放射 (disk blackbody)」とか「多重温度スペクトル (multi-color spectrum)」などと呼ばれるものになることがわかっている。

通常の場合、その表面温度はほぼ一様なので、星が放射するスペクトルは、単一の温度の黒体放射スペクトルで近似できる（実際には、高温度星ではバルマー端などでの強い吸収が、低温度星では分子の吸収バンドなどがあるため、黒体放射とはずいぶん違ってくるが）。

一方、降着円盤の場合、その表面温度は中央ほど高温で周辺部ほど低温になるため、場所によってさまざまな温度の黒体放射を放出している。結果、降着円盤のスペクトルは、さまざまな温度の黒体放射スペクトルを、その放出面積に比例する割合で足し合わせたものになり、単一温度の黒体放射スペクトルを少し引き延ばしたようなものになる。それを円盤黒体放射などと呼んでいるのだ。

以上のような定性的な特徴は、最初の降着円盤も現在の降着円盤も大きく変わらない。しかし定量的には、主に二つの点で、最初の降着円盤は現在の降着円盤と異なると予想される。

まず一つは、円盤ガスの組成だ。最初の星と同様に、最初の降着円盤も重元素は含まない。その結果、円盤の内部構造などは、最初の降着円盤と現在の降着円盤は、定量的には少し違いが出てくることがわかっている。ただし、重元素組成の違いは、降着円盤の放射スペクトルにはさほど影響を与えない。とい

うのも、降着円盤から放射されるエネルギーは、基本的にはガスの位置エネルギーの解放で決まっているので、円盤を構成している物質の有様には関係ないためだ。

もう一点の定量的な違いは、円盤のサイズと温度である。現在の降着円盤の場合、中心が太陽の10倍程度のブラックホールだとすると、ブラックホールのサイズは数十kmほどで、円盤の内縁のサイズも同じくらいになり、また円盤の内縁（一番温度が高い部分）の温度は1000万度ぐらいになる。しかし、最初の降着円盤の場合、最初の星が太陽の100倍とか1000倍で、それらの最初の星から生まれるブラックホールも同じくらいの質量をもっているため、そのサイズは数百kmから数千kmになり、また円盤の内縁の温度は数百万度ぐらいになる。中心のブラックホールの質量が大きくなると、降着円盤のサイズは大きくなり、温度は下がっていくのである。実際の計算例を図24に示す。

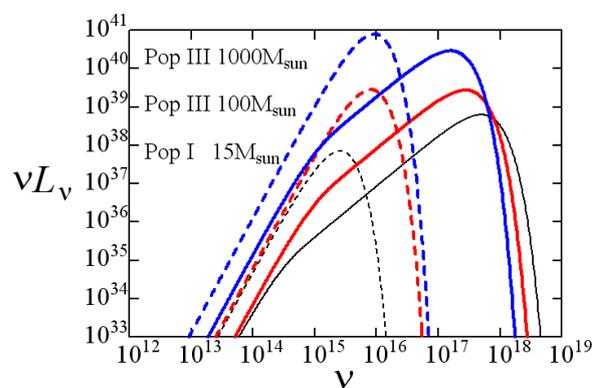


図24 最初の降着円盤のスペクトル(Fukue & Takeuchi 2007)

横軸は光の振動数（単位は Hz）、縦軸は光の強度に振動数を掛けた値をプロットしてある。単独の星のスペクトル（破線）は単純なピークをもつ黒体放射になるが、降着円盤のスペクトル（実線）はピークが横に延びた円盤黒体放射になっている。

図 24 で示したスペクトルは、

■星（破線の下から上へ）

星の種類	質量	表面温度
種族 I（現在の星）	15 太陽質量	30000K
種族 III（最初の星）	100 太陽質量	100000K
種族 III（最初の星）	1000 太陽質量	100000K

■降着円盤（実線の下から上へ）

ブラックホールの質量	内縁半径	内縁温度
15 太陽質量	約 150km	1000 万 K
100 太陽質量	900km	560 万 K
1000 太陽質量	9000km	320 万 K

というパラメータで計算してある。

図からわかるように、星のスペクトル（破線）は単純なピークをもった黒体放射になっている。また最初の星（破線の上の二つ）は紫外線付近にピークがあることがわかる（したがって、宇宙の再電離を起こす第一候補である）。一方、降着円盤のスペクトル（実線）はピークの広がった円盤黒体放射になっている。また現在の降着円盤（一番下の実線）より最初の降着円盤のピークは低振動数にずれてはいるが、それでも最初の降着円盤のスペクトルピークが X 線領域であることがわかる（したがって、やはり宇宙の再電離を引き起こしたかもしれない）。

このような最初の降着円盤や最初のジェットが初期宇宙に与える影響も、今後、研究すべき重要な課題である。ちなみに、最後に余談ながら、この「最初の降着円盤モデル」は“悲しい”エピソードをもっている。これは 2 年ほど前に計算して、他のいろいろな性質と併せて学術論文にまとめ、日本天文学会欧

文研究報告誌に投稿したのだが、論文の査読者（レフリー）の“練習問題に過ぎない”という手厳しいコメントとともに掲載拒否（リジェクト）されてしまったものである。面白い内容だと思ったんだけどなあ、と著者が思っても、レフリーと見解の相違が生じることは時折ある。

文 献

- Bromm, V. (2005) *ARA&Ap*, **42**, 79.
 Bromm, V. (2006) *Sky & Tel.*, **5**, 30.
 Bromm, V., Larson, R. B. (2004) *ARA&Ap*, **42**, 79.
 Fan, X. *et al.* (2006) *AJ, in press* (astro-ph/0512082) .
 Fan, X., Carilli, C. L., Keating, B. (2006) *ARA&Ap*, **44**, 415.
 Fukue, J., Takeuchi, S. (2007) unpublished.
 Heger, A., Woosley, S. E. (2002) *ApJ*, **567**, 532.
 Larson, R. B., Bromm, V. (2001) *Sci. Ame.*, **12**, 64.
 Loeb, A. (2007) astro-ph 0711.3463v1.
 Nakamura, F., Umemura, M. (2001) *ApJ*, **548**, 19.
 Omukai, K., Palla, F. (2003) *ApJ*, **589**, 677.
 Songalia, A. (2004) *AJ*, **127**, 2598.
 Tumlinson, J., Shull, J. M. (2000) *ApJ*, **528**, L65.
 Yoshida, N., Abel, T., Hernquist, L., Sugiyama, N. (2003) *ApJ*, **592**, 645.
 Yoshida, N., Omukai, K., Hernquist, L., Abel, T. (2006) *ApJ*, **652**, 6.
 ライマン・シュピッツァー・Jr (1980) 『星間物理学』, 共立出版.
 小暮智一 (1994) 『星間物理学』, ごとう書房.
 福江 純 (2007) 『輝くブラックホール降着円盤』, プレアデス出版.

福江 純（大阪教育大学）