

https://farid.ps/articles/we_are_made_of_stardust/ja.html

ビッグバンから恒星核合成まで：我々は星屑でできている

宇宙は、星の光とそれらが作り出す元素で彩られた広大で動的なキャンバスです。ビッグバンの壊滅的な誕生から、遠く冷えゆく宇宙の未来まで、恒星世代——第三世代（ポピュレーションIII）、第二世代（ポピュレーションII）、第一世代（ポピュレーションI）、そしてその潜在的な後継者たち——は、宇宙の化学的、物理的、生物学的進化を形作ってきました。星々は、燃え盛る生涯と爆発的な死を通じて、銀河、惑星、そして生命そのものを構成する元素を生み出してきました。このエッセイでは、宇宙の時代を探り、恒星世代の起源、環境、遺産を深く掘り下げ、恒星核合成——星を動かし、宇宙の元素を生み出す鍊金術的プロセス——を詳細に検討します。そして、我々が古代の星の灰から生まれ変わった星屑であるという深い真実にたどり着き、暗くなる宇宙における星形成の未来を考えます。

第1章：ビッグバンと宇宙の夜明け

宇宙は約138億年前のビッグバンで始まり、無限の密度と温度の中で、すべての物質、エネルギー、空間、時間が単一の特異点から生まれました。この原始の炎は、 10^{32} Kを超える高温で、基本的な力——重力、電磁気、強い核力、弱い核力——を統一された状態で保持し、宇宙の対称性の瞬間を一瞬だけ保ちました。

宇宙の膨張と冷却

10^{-36} 秒以内に、インフレーション——指数関数的膨張——が宇宙を亜原子スケールからマクロな次元にまで引き伸ばし、不規則性を滑らかにし、後に銀河を形成する密度ゆらぎの種を蒔きました。 10^{-12} 秒までに、強い力が電弱力から分離し、約 10^{-6} 秒で温度が 10^{15} Kを下回ると、電磁気と弱い力が分離しました。これらの分離は、クォークから銀河まで、物質を支配する物理法則を確立しました。

原始元素の形成

1秒後、宇宙は約 10^{10} Kまで冷え、クォークとグルーオンが強い核力を通じて陽子と中性子に凝縮することを可能にしました。次の数分間——ビッグバン核合成（BBN）の時代——陽子と中性子は融合して原始元素を形成しました：約75%の水素-1 (^1H 、陽子)、約25%のヘリウム-4 (^4He)、そして微量の重水素 (^2H)、ヘリウム-3 (^3He)、リチウム-7 (^7Li)。高温（約 10^9 K）はこれらの核をイオン化状態に保ち、荷電粒子のプラズマを維持しました。

再結合と宇宙マイクロ波背景放射

約38万年後（赤方偏移 $z \approx 1100$ ）、宇宙は約3000 Kまで冷え、陽子とヘリウム核が電子を捕獲して再結合し、安定した水素とヘリウム原子を形成しました。これによりプラズマが中性化し、自由電子によって以前は散乱されていた光子が解放され、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）——現在、膨張により2.7 Kに赤方偏移した熱的スナップショット——が生まれました。CMBの微小なゆらぎ（約 10^5 分の1）は、プランクなどの観測装置で現在検出可能な、宇宙構造の種を明らかにします。

暗黒時代

再結合後、宇宙は暗黒時代に入り、星のない時代で、中性の水素とヘリウムガスが支配的でした。暗黒物質のハロー内での重力崩壊が密な塊を形成し始め、最初の星のための舞台を整えました。原始元素は単純で少なく、星形成の原材料であり、暗黒物質が重力の足場を提供しました。

第2章：ポピュレーションIIIの星——第一世代：宇宙の開拓者

ポピュレーションIIIの星、最初の恒星世代は、ビッグバンから約1億～4億年後（ $z \approx 20-10$ ）に点火し、暗黒時代を終えて「宇宙の夜明け」を迎えるました。これらの星は、密度が高く（約 10^{-24} g/cm³）、暖かく（CMB 約20–100 K）、化学的に純粋な宇宙で形成され、ほぼ完全に水素（約76%）とヘリウム（約24%）で構成され、金属量は $Z \approx 10^{-10} Z_{\odot}$ でした。

環境と形成

初期宇宙の高密度は、暗黒物質のミニハロー（約 10^5 – 10^6 太陽質量）内でガス雲が崩壊することを可能にし、密度は約 10^4 – 10^6 粒子/cm³に達しました。重力圧縮により雲は約 10^3 – 10^4 Kにまで加熱されましたが、冷却は分子水素（H₂）に依存し、 $H + e^- \rightarrow H^- + \gamma$ 、続いて $H^- + H \rightarrow H_2 + e^-$ のような反応で形成されました。H₂の回転および振動遷移による冷却は非効率的で、雲を高温に保ち、断片化を防ぎました。高いジーンズ質量（約 10^2 – 10^3 太陽質量）は、大質量の原始星を形成する傾向にありました。

特性

ポピュレーションIIIの星は、おそらく大質量（10–1000太陽質量）、高温（表面温度約 10^5 K）、そして高輝度で、強烈な紫外線を放射しました。高い質量は、主にCNOサイクル（初期融合からの微量の炭素を利用）を通じて急速な融合を駆動し、約100万～300万年で燃料を枯渇させました。それらの運命は様々でした：
- **10–100太陽質量**：核崩壊超新星、炭素、酸素、鉄などの金属を散乱。
- **>100太陽質量**：ブラックホールへの直接崩壊、初期のクエーサーの種を形成する可能性。
- **140–260太陽質量**：対不安定超新星、電子-陽電子対生成が完全な破壊を引き起こし、残骸を残さない。

意義

ポピュレーションIIIの星は宇宙の建築家でした。それらの紫外線放射は水素をイオン化し、再イオン化（ $z \approx 6-15$ ）を推進し、宇宙を透明にしました。超新星は星間物質（ISM）を金属で

富化し、ポピュレーションIIの星形成を可能にしました。放射、風、爆発からのフィードバックが星形成を調整し、初期銀河を形成しました。それらのブラックホールの残骸は、銀河中心の超大質量ブラックホールの種を形成した可能性があります。

観測の可能性と将来の展望

ポピュレーションIIIの星の直接観測は、距離と短い寿命のため困難です。ジェームズ・ウェーブ宇宙望遠鏡（JWST）は手がかりを提供しています：2023年、GN-z11 ($z \approx 11$) は金属線のないイオン化ヘリウム (He II) 放射を示し、ポピュレーションIIIの星を示唆しました。RX J2129-z8He II (2022年、 $z \approx 8$) も潜在的な兆候を示しましたが、活動銀河核 (AGN) や金属の少ないポピュレーションIIの星が代替案として残っています。確認には、金属の不在と強いHe II 1640Å放射を確認する高分解能分光が必要です。

非常に大型望遠鏡（ELT）やJWSTのNIRSpecなどの将来の機器は、 $z > 10-20$ を探索し、純粋な銀河を標的にします。シミュレーションでは、ポピュレーションIIIの超新星をその独特な光度曲線や対不安定爆発からの重力波で検出することが示唆されています。銀河ハローの金属の少ないポピュレーションIIの星は、ポピュレーションIIIの超新星の収量を保存し、間接的な証拠を提供する可能性があります。これらの努力は、ポピュレーションIIIの星の質量、金属量、宇宙進化における役割を明らかにする可能性があります。

第3章：ポ \boxtimes る

ポピュレーションIIの星は、ビッグバンから約4億年～数十億年後 ($z \approx 10-3$) に、銀河が組み立てられる中で形成されました。これらの星は、原始時代から現代の銀河への橋渡しとなり、金属の富化を通じて複雑さを構築しました。

環境と形成

宇宙の平均密度は膨張により低下しましたが、初期銀河内の星形成雲は、大きな暗黒物質ハロー（約 10^7 – 10^9 太陽質量）内で約 10^2 – 10^4 粒子/cm³に達しました。CMBは約10–20 Kに冷え、ポピュレーションIIIの超新星によって富化した雲は、金属量 $Z \approx 10^{-4}$ – $10^{-2} Z_{\odot}$ を持っていました。炭素や酸素などの金属は、[C II] 158 μm、[O I] 63 μmなどの原子線を通じて冷却を可能にし、温度を約 10^2 – 10^3 Kに下げました。微量の塵は熱放射を通じて冷却を強化しました。減少したジーンズ質量（約1–100太陽質量）は断片化を可能にし、多様な恒星質量を生み出しました。

特性

ポピュレーションIIの星は、低質量（0.1–1太陽質量、寿命 $> 10^{10}$ 年）から大質量（10–100太陽質量、約 10^6 – 10^7 年）まで及びます。銀河ハロー、球状星団（例：M13）、初期のバルジに存在し、低金属量で、より赤いスペクトルを生み出します。それらのクラスター内での形成は断片化を反映し、超新星はISMを約 $0.1 Z_{\odot}$ までさらに富化しました。

意義

ポピュレーションIIの星は銀河進化を推進しました。超新星はシリコン、マグネシウムなどの重元素を合成し、星形成を促進する塵と分子を形成しました。低質量のポピュレーションIIの星は、球状星団や銀河系のハローで観測可能で、ポピュレーションIIIの超新星の痕跡を保存しています。放射と爆発からのフィードバックは銀河ディスクを形成し、星形成を調整しました。これらはポピュレーションIの星と惑星系の基盤を築きました。

観測証拠

ポピュレーションIIの星は、球状星団、銀河ハロー、金属の少ない星（例：HD 122563、 $Z \approx 0.001 Z_{\odot}$ ）で観測可能です。極端に金属の少ない星（ $Z < 10^{-3} Z_{\odot}$ ）は、ポピュレーションIIIの収量を反映する可能性があります。SDSSやガイアなどの調査や、将来のELT観測は、ポピュレーションIIの形成と初期銀河の組み立てに関する理解を深めるでしょう。

第4章：ポピュレーションIの星——第三世代：惑星と生命の時代

ポピュレーションIの星は、約100億年前から現在（ $z \approx 2-0$ ）にかけて形成され、銀河系のディスクのような成熟した銀河を支配します。これらの星、太陽を含む、は金属豊富な環境を通じて惑星と生命を可能にしました。

環境と形成

宇宙は希薄（約 10^{-30} g/cm^3 ）で、渦巻き密度波や超新星によって引き起こされる密な分子雲（約 10^2 – 10^6 粒子/ cm^3 ）で星形成が起こります。CMBは2.7 Kで、 $Z \approx 0.1$ – $2 Z_{\odot}$ の雲は、COやHCNなどの分子線と塵放射を通じて約10–20 Kに冷えます。低いジーンズ質量（約0.1–10太陽質量）は小さな星を好みますが、活動的な領域では大質量の星も形成されます。

特性

ポピュレーションIの星は、赤色矮星（0.08–1太陽質量、 $>10^{10}$ 年）からO型星（10–100太陽質量、約 10^6 – 10^7 年）まで及びます。高い金属量は、Fe IやCa IIなどの線を持つ明るく金属豊富なスペクトルを生み出します。オープンクラスター（例：プレアデス）や星雲（例：オリオン）で形成されます。46億歳のポピュレーションIの星である太陽は典型的です。

意義：惑星と生命

高い金属量は、原始惑星ディスクの塵と金属が微惑星を形成することで、岩石惑星の形成を可能にしました。太陽のディスクは約45億年前に地球を生み出し、シリコン、酸素、鉄が地球型惑星を形成し、炭素が有機分子を可能にしました。太陽の安定した出力と長い寿命は、液体水の居住可能ゾーンを維持し、何十億年も炭素ベースの生命を育みました。ポピュレーションIの星の多様性は、ISMの継続的な富化を推進し、星と惑星の形成を維持します。

観測証拠

ポピュレーションIの星は、星形成領域やクラスターで観測可能な銀河系のディスクを支配します。ケプラーーやTESSなどの系外惑星調査は、金属豊富な星が惑星をホストする可能性が高いことを示し、太陽のような星の約50%が岩石の惑星を持つ可能性があります。分光法は、累積的な富化を追跡する金属豊富な組成を明らかにします。

第5章：未来の恒星世代：より暗く冷たい宇宙

暗黒エネルギーが宇宙膨張を推進するにつれ、宇宙はより冷たく、密度が低く、金属豊富になり、星形成が変化します。約1000億年後 ($z \approx -1$)、星形成は減少し、約 10^{12} 年後には停止し、暗くエントロピックな宇宙に至る可能性があります。

未来の条件

平均密度は減少し、銀河を孤立させます。CMBは <0.3 Kに冷え、 $Z > 2-5 Z_{\odot}$ の雲は、[Fe II]、[Si II]などの金属と塵を通じて効率的に冷えます。星形成は、星形成、超新星、またはブラックホールジェットによって銀河ガスが枯渇するため、まれなガスケットに依存します。銀河の合併は一時的に星形成を促進する可能性があります。

未来の星の特性

未来の星は、効率的な冷却と低いジーンズ質量により、低質量の赤色矮星（0.08–1太陽質量、 10^{10} – 10^{12} 年）になります。大質量の星は、高い金属量が大きな原始星の集積を妨げるためまれです。これらの星は微弱な赤外光を放射し、銀河を暗くします。金属豊富なディスクは岩石惑星を好みます。

宇宙の展望

星が死ぬにつれて銀河は薄れ、白色矮星、中性子星、ブラックホールが残ります。生命は人工エネルギーやまれな恒星オアシスに依存し、「熱死」に近づく宇宙で生き延びる可能性があります。

第6章：恒星核合成：元素の鍛造とニュートリノバースト

恒星核合成は、星が軽い元素から重い元素を合成する宇宙の鍛冶場であり、宇宙の化学進化を推進します。星の核での静かな融合から超新星での爆発的プロセスまで、惑星、生命、銀河を形成する元素を生み出します。陽子-陽子連鎖、CNOサイクル、トリプルアルファプロセス、sプロセス、rプロセス、pプロセス、光崩壊、そしてニュートリノバーストに至るまで、元素形成の複雑なメカニズムを明らかにし、超新星の迅速な検出を可能にします。

陽子-陽子連鎖

陽子-陽子 (pp) 連鎖は、低質量の星 ($T \approx 10^7$ K、例：太陽) を動かします。2つの陽子が融合してジプロトンを形成し、それがベータ崩壊して重水素 (${}^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu_e$ 、ニュートリ

ノを放出)になります。次のステップには以下が含まれます: $-{}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (光子放出)。 $-{}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$ 、2つの陽子を放出。

pp連鎖には枝 (ppl、ppII、ppIII) があり、異なるエネルギー (0.4–6 MeV) のニュートリノを生み出します。これは遅く、太陽を約 10^{10} 年維持し、ボレキシノなどの実験で検出されたニュートリノは恒星融合モデルを確認します。

CNOサイクル

炭素-窒素-酸素 (CNO) サイクルは、大質量の星 (>1.3 太陽質量、 $T > 1.5 \times 10^7$ K) で支配的です。 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{14}\text{N}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ を触媒として4つの陽子を ${}^4\text{He}$ に融合します: $-{}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$ $-{}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$ $-{}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$ $-{}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$ $-{}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ $-{}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$

CNOサイクルは速く、急速な融合 (約 10^6 – 10^7 年) を推進し、より高エネルギーのニュートリノ (約1–10 MeV) を生み出し、スーパーカミオカンデで検出可能です。

トリプルアルファプロセス

8太陽質量を超える星では、ヘリウム燃焼 (T 約 10^8 K) が3つの ${}^4\text{He}$ 核を ${}^{12}\text{C}$ に融合するトリプルアルファプロセスを通じて行われます。2つの ${}^4\text{He}$ が不安定な ${}^8\text{Be}$ を形成し、別の ${}^4\text{He}$ を捕獲して ${}^{12}\text{C}$ を形成し、 ${}^{12}\text{C}$ のエネルギー準位の共鳴を利用します。一部の ${}^{12}\text{C}$ は ${}^4\text{He}$ を捕獲して ${}^{16}\text{O}$ (${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$) を形成します。このプロセスは約 10^5 年続き、炭素と酸素の生産に重要で、生命を可能にします。

高度な燃焼段階

大質量の星は急速な燃焼段階を経ます: - **炭素燃焼** (T 約 6×10^8 K、約 10^3 年): ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{20}\text{Ne} + {}^4\text{He}$ または ${}^{23}\text{Na} + {}^1\text{H}$ 。 - **ネオン燃焼** (T 約 1.2×10^9 K、約1年): ${}^{20}\text{Ne} + \gamma \rightarrow {}^{16}\text{O} + {}^4\text{He}$ 。 - **酸素燃焼** (T 約 2×10^9 K、約6か月): ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{28}\text{Si} + {}^4\text{He}$ 。 - **シリコン燃焼** (T 約 3×10^9 K、約1日): ${}^{28}\text{Si} + \gamma \rightarrow {}^{56}\text{Fe}$ 、 ${}^{56}\text{Ni}$ (光崩壊と捕獲を通じて)。

鉄ピーク元素は融合の終わりを示し、それ以上の反応は吸熱的です。

sプロセス (遅い中性子捕獲)

sプロセスは、AGB星 (1–8太陽質量) や一部の大質量星で発生し、中性子がゆっくり捕獲され、捕獲間でベータ崩壊が可能 (例: ${}^{56}\text{Fe} + n \rightarrow {}^{57}\text{Fe}$ 、その後 ${}^{57}\text{Fe} \rightarrow {}^{57}\text{Co} + e^- + \bar{\nu}_e$)。中性子は、AGB星のヘリウム殻での ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ などの反応から生じます。ストロンチウム、バリウム、鉛などの元素を約 10^3 – 10^5 年で生産し、恒星風を通じてISMを富化します。

rプロセス (速い中性子捕獲)

rプロセスは、超新星や中性子星の合併などの極端な環境で発生し、中性子フラックスが約 10^{22} 中性子/ cm^2/s です。核はベータ崩壊より速く中性子を捕獲し、金、銀、ウランなどの重元素を

形成します（例： $^{56}\text{Fe} + \text{複数}n \rightarrow ^{238}\text{U}$ ）。超新星の衝撃波や合併放出物で数秒続き、重元素の約50%を占めます。

pプロセス（陽子捕獲/光崩壊）

pプロセスは、超新星で陽子豊富な希少同位体（例： ^{92}Mo 、 ^{96}Ru ）を生産します。高エネルギー・ガンマ線（T 約 $2\text{--}3 \times 10^9$ K）がsおよびrプロセスの核を光崩壊させ（例： $^{98}\text{Mo} + \gamma \rightarrow ^{97}\text{Mo} + n$ ）、または陽子豊富な環境で陽子が捕獲されます。低い効率はp核の希少性を説明します。

超新星での光崩壊

核崩壊超新星では、鉄核（T > 10^{10} K）での光崩壊が ^{56}Fe を陽子、中性子、 ^4He に分解します（例： $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n$ ）。この吸熱プロセスは圧力を下げ、中性子星またはブラックホールへの崩壊を加速します。衝撃波は爆発的核合成を引き起こし、元素を放出します。

ニュートリノバーストと超新星検出

核崩壊中に、超新星のエネルギーの約99%（約 10^{46} J）が、中性子化（ $p + e^- \rightarrow n + v_e$ ）および熱的プロセス（ $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ ）を通じてニュートリノとして放出されます。約10秒のバーストは光学爆発に先行し、スーパーカミオカンデ、アイスキューブ、DUNEなどの施設で検出可能です。SN 1987Aの約20ニュートリノがこれを確認しました。複数の検出器からの三角測量は、超新星を数秒以内に特定し、光学、X線、ガンマ線での追跡観測を可能にし、前駆体特性と核合成収量を明らかにします。

不均等な豊度

元素の豊度は核合成を反映します： - **H**、**He**：BBNから約98%。 - **C**、**O**、**Ne**、**Mg**：融合から豊富。 - **Fe**、**Ni**：核安定性によるピーク。 - **Au**、**U**：rプロセスから希少。 - **p核**：pプロセスから最も希少。

ケーススタディ：ウラン-235とウラン-238

^{235}U と ^{238}U は、超新星または中性子星の合併でのrプロセスを通じて形成されます。 ^{235}U （半減期約7.038億年）は ^{238}U （半減期約44.68億年）より速く崩壊します。地球の形成時（約45.4億年前）、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比は約0.31（約23.7% ^{235}U ）でした。約20億年前には約0.037（約3.6% ^{235}U ）で、核分裂に十分でした。ガボンのオクロ反応炉は、高品位ウラン鉱（約20–60%ウラン酸化物）が堆積プロセスで濃縮され、地下水と相互作用して中性子を調整したときに形成されました。同位体濃縮は発生せず、自然の約3.6% ^{235}U が臨界を可能にし、約15万～100万年にわたる断続的な核分裂反応を維持し、 ^{143}Nd などの同位体と熱を生産しました。

結論：我々は星屑であり、宇宙の炎から生まれ変わった

ビッグバンの燃える誕生から薄れゆく未来まで、星々は宇宙を形作ってきました。ポピュレーションIIIの星は宇宙に火をつけ、最初の金属を鍛造しました。ポピュレーションIIの星は複雑さを構築し、ポピュレーションIの星は惑星と生命を可能にしました。陽子-陽子連鎖、CNOサイ

クル、トリプルアルファプロセス、s、r、pプロセス、光崩壊を通じての恒星核合成は元素を作り出し、ニュートリノバーストがその爆発的拡散を信号します。自然の²³⁵Uの豊度に駆動されたオクロ反応炉は、この遺産を象徴しています。我々は古代の星の灰から生まれ変わった星屑であり、その元素を我々の体に宿しています。宇宙が暗くなるにつれ、我々の宇宙的遺産は、未来の世代がエントロピーの虚空で新たな星を灯すことを鼓舞するかもしれません。