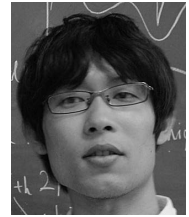


# 低金属量収縮ガス雲の熱化学進化と 星形成過程



千 秋 元

〈甲南大学大学院自然科学研究科物理学専攻 理論研究室 〒658-8501 神戸市東灘区岡本 8-9-1〉

e-mail: chiaki@center.konan-u.ac.jp

われわれの銀河系にある長寿命の金属欠乏星を見ることで、初期宇宙の化学組成と星質量分布の進化に対して示唆を得ることができる。近年、極低金属量（千分の一太陽金属量以下）ながら質量の小さい（1太陽質量以下）星が発見されているが、その形成過程はまだ解明されていない。本研究では、さまざまな金属量をもついくつかのガス雲に対して化学反応と放射冷却過程を精密に考慮した3次元流体シミュレーションを行い、ガス雲が単一の大質量星になるか、小質量の星団に分裂するかどうかを確かめた。その結果、これまで金属量が大きいほど放射冷却によってガス雲が不安定になって分裂すると考えられてきたが、分裂条件が金属量のみによるわけではないということが明らかになった。

## 1. 金属欠乏星の起源

近年大規模なサーベイによって、銀河系内の古い星が数多く観測されるようになってきた<sup>1)</sup>。これらの星は宇宙年齢程度（～100億年）という長い寿命をもち、宇宙初期の元素組成と星質量分布の進化についてヒントを与えてくれる。長寿命ということは質量の小さい（ $\leq 1 M_{\odot}$ ： $M_{\odot}$ は太陽質量）星が選び出されていることになるが、なかには低金属量（ $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ ）<sup>\*1</sup>のものがみつかり、このような小質量の金属欠乏星がどのようにして生まれたかはよくわかっていない。

現在の星（ $[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0$ ）を見てみると、その質量は典型的に太陽質量以下である<sup>2)</sup>。というのも、星間ガス雲が重力収縮するとき、星間塵（ダスト）の熱放射による冷却により、不安定となって分裂するため<sup>3)</sup>。一方、金属量が極めて小さ

いと、冷却率の比較的小さい水素分子冷却が支配的となり、ガスは1,000 Kという高温を保つ。密度 $\rho$ 、温度 $T$ のガスに対し、重力収縮できる領域の質量（ジーンズ質量）は

$$M_J \sim G^{-3/2} \rho^{-1/2} T^{3/2} \quad (1)$$

となるように、温度に比例して大きくなる。図1で模式的に示したように、冷却が不十分な場合はガスが安定に収縮し、単一の大質量星が形成される傾向となる<sup>4)</sup>。極端に金属量が小さい場合でも同様に、小質量星は形成されにくい傾向になると考えられる。

## 2. 臨界金属量の存在？

低金属量での小質量星形成過程はいくつか考えられているが、ここでは星形成ガス雲がある程度の金属量をもっており、その放射冷却によって分

\*1 元素AとBの組成比は、太陽の組成比で規格化され、 $[A/B] = \log_{10}(N_A/N_B) - \log_{10}(N_A/N_B)_{\odot}$ として表されることがよくある。

\*2 ほかの金属欠乏星形成シナリオとして、後述（§4.2）の円盤分裂によって形成された小質量初代星が金属汚染を受けたものとする説もある<sup>5)</sup>。

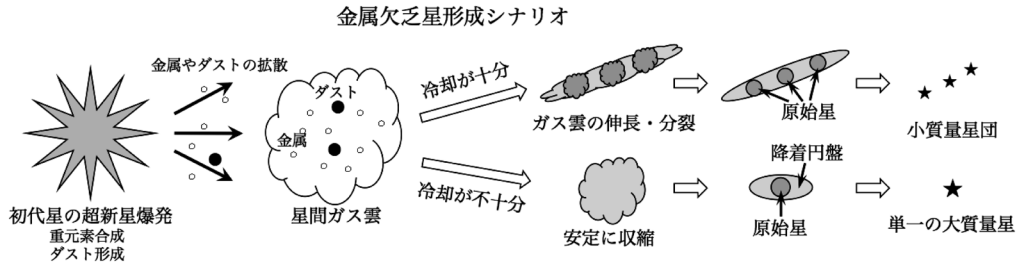


図1 金属やダストの冷却による金属欠乏星形成シナリオの模式図。

裂するシナリオに着目した\*2。ガス冷却が十分であれば、図1のように、ガスが不安定となって分裂し、小質量星団が形成される。分裂を引き起こすのに最低限必要な金属量を臨界金属量といい、金属欠乏星形成条件を表すうえで重要な量として考えられてきた。

**2.1 C/O冷却によるガス雲の分裂**

金属欠乏星が形成されるほどの初期宇宙においてダスト量は不確かであるため、気相中の化学種による放射冷却に焦点が当てられた。特に、金属欠乏星のほとんどは鉄に対する炭素組成が大きい炭素過剰金属欠乏 (CEMP) 星であることから<sup>7)</sup>、何人かの研究者は炭素と酸素原子の微細構造遷移線が重要と考えた<sup>8), 9)</sup>。ところが、詳細に化学反応と冷却過程を調べた結果、C/O冷却では小質量星形成は困難であることが明らかになった<sup>10), 11)</sup>。炭素酸素冷却は、まだガス密度が小さいうち ( $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ) に局所熱平衡 (LTE) に至る。断熱圧縮加熱は密度の1.5乗に比例するのに対し、LTEに至ったときの冷却率は密度の1乗にしか比例しないので、冷却は頭打ちになってしまう。このときのガスのジーンズ質量 (式(1)) は  $\sim 100 M_{\odot}$  と大きく、現在まで生き残るような太陽質量程度の星が形成されるとは考えにくい。

**2.2 ダスト冷却によるガス雲の分裂**

**2.2.1 超新星ダストモデル**

そこで、現在の星形成と同じように、低金属量星形成においてダストの熱放射による冷却が重要であると提唱された<sup>10), 11)</sup>。ダストの冷却率は同質量の金属と比較して大きく、より小さい金属量でもガスの分裂を促進する。金属がダストに凝縮する割合 (凝縮率) を現在の星間ガス中と同じ50%とした簡単な見積もりを行うと、 $\sim 10^{-5} Z_{\odot}$  ( $Z_{\odot} \approx 0.02$  は太陽金属量) 程度で冷却が重要となる。また、炭素酸素冷却と比較して、冷却が効く密度が大きい ( $\sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )。この場合、ジーンズ質量は  $\sim 0.01 M_{\odot}$  であり、小質量星の形成が期待される。

現在の宇宙のダスト供給源としては、超新星、小質量星の漸近巨星分枝における星間風、活動銀河核などがある。その一方で、初期宇宙では、親星の寿命が短い超新星が主な供給源に限られたと考えることができる<sup>12), 13)</sup> (図1)。さらに、ダストは逆行衝撃波によって一部破壊されるため、初期宇宙では現在よりも凝縮率が小さかったと考えられている。野沢らは、幅広い親星質量 (13-200  $M_{\odot}$ ) に対してダストの形成過程を追い、凝縮率は数%から数十%程度になると結論づけた<sup>14), 15)</sup>。また Schneider らは、超新星ダストを含む収縮ガ

\*3 CEMP星の形成シナリオにはさらにさまざまなものがある。例えば、金属欠乏星に伴星があると、その伴星からのガス降着の時に炭素が供給されるというモデルがある。炭素のほかに中性子過剰元素が降着する場合もあり、確かにCEMP星のうち、中性子過剰元素過剰が認められるものの視線速度を見ると、ほとんどが連星系であることが確認されている<sup>6)</sup>。

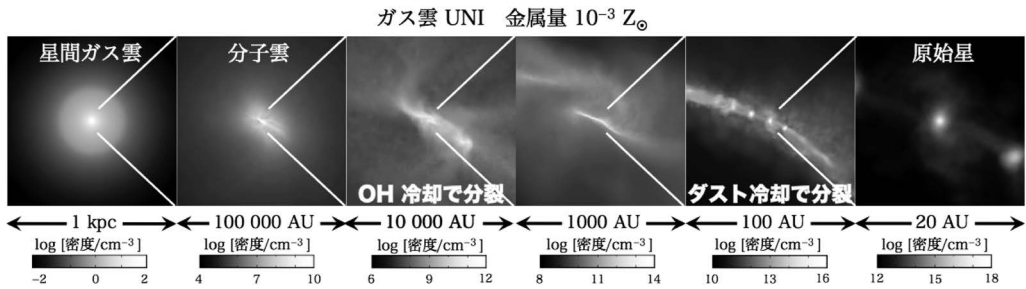


図2 初期に一樣密度をもつガス雲 (UNI) に金属量  $10^{-3} Z_{\odot}$  を与えたモデルに対し、原始星形成後36.4年のガス雲の中心部をズームインした様子。左から右へスケールが小さくなっていく。

ス雲の熱的進化を準解析的モデルで追い、凝縮率が小さいほど、ガス雲の分裂が促進されるためにより大きい金属量を必要とすることがわかった<sup>16)</sup>。

### 2.2.2 ダスト成長

加えて、われわれの研究グループは、低金属量の環境下においてもダスト成長が重要となることを突き止めた<sup>17), 18)</sup>。ダスト成長といえば、惑星形成の分野で重要となるようなダスト同士の合体成長を思い浮かべるかもしれないが、ダスト量の小さい環境では、気相中の金属原子の降着によるダスト成長が支配的となる。超新星ダストモデルを含むガス雲の温度進化を準解析的に追ったところ、ダスト成長によって臨界金属量が変化することがわかった。特に、凝縮率がある程度小さい(数%)モデルでは、臨界金属量が1桁程度小さくなる。このように、初期宇宙のダスト量をより正確に見積もるためには、超新星によるダストの形成モデル(超新星ダストモデル)とダスト成長を考慮しなければならない。

## 3. 低金属量ガス雲の収縮過程

そこでわれわれはSPHシミュレーションコードを用いて、低金属量星形成ガス雲の収縮過程を3次元的に追った。超新星ダストモデルとダスト成長を含め、低金属量ガスで重要となる非平衡化

学反応と加熱冷却過程を網羅している。また、ガス雲の収縮は星間ガスから原始星までおよそ20桁もの密度幅をもつ現象であり、中心部の解像度を段階的に上げていく技術(ズームイン法)として、SPH法では質量の大きいSPH粒子(親粒子)を質量が小さいもの(娘粒子)に置き換える粒子分割法が用いられる。われわれは親粒子が作るポロノイ図に沿って娘粒子を配置するという方法を開発し、本研究に適用した<sup>19)</sup>。

われわれは一樣密度をもつガス球 (UNI) と、宇宙論的シミュレーション<sup>20)</sup> から取り出した三つのミニハロー \*4 (MH1, MH2, MH3) にそれぞれ  $10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-3} Z_{\odot}$  (それぞれ Z6, Z5, Z4, Z3) というさまざまな組成の金属を与え、分裂する条件を調べた。

図2はガス雲UNIが金属量  $10^{-3} Z_{\odot}$  をもつ場合に、原始星が形成されて数十年経過したときに中心部をズームインしたものである。ポロノイ粒子分割により、キロパーセク程度のガス雲から天文単位程度の原始星の内部構造まで、10桁ものスケール幅を分解できたが、このようなシミュレーションは世界でも数例しかない。さらに、OH, H<sub>2</sub>O分子生成を含む非平衡化学反応と冷却に加えて、超新星ダストモデルとダスト成長も考慮したのは本研究が初めてである。

\*4 重力的に束縛された暗黒物質のかたまりをハローと言う。ガスが水素分子冷却によって束縛される程度までハローの合体成長が進むと、そこで初代星形成が起こる。それらのハローは、質量が  $10^5$ - $10^6 M_{\odot}$  と小さいため、ミニハローと呼ばれる。

図2を見ると、UNI-Z3ではガス雲の分裂が10,000 AUと100 AUのスケールで2回起こっていることがわかる。前者はOH分子冷却が効く密度 $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ で起きており、OH分子冷却がガス雲の分裂を引き起こすことがわかった。ただし、それぞれの分裂片の質量は左から $15 M_{\odot}$ 、 $8 M_{\odot}$ であり、OH冷却が直ちに低質量星形成をもたらすわけではない。より小スケールでの分裂はダスト冷却によるもので、フィラメントに沿っていくつかの原始星が数珠状に並ぶ特徴的な構造をしている。各原始星の質量は $\sim 0.1 M_{\odot}$ 程度で、続くガス降着によって太陽質量程度の低質量星が形成されることが期待される。したがって、ダスト冷却がガス雲の分裂を促進することで低質量星形成を引き起こすというシナリオは、この初期条件に対しては正しいようである。

## 4. さまざまなガス雲の分裂条件

### 4.1 概観

さらにほかのガス雲、金属量についても分裂するか否かを見ていこう。図3はUNI, MH1, MH2, MH3の四つのガス雲について、金属量を $10^{-6}$ から $10^{-3} Z_{\odot}$ の幅で変えたときの結果である。白の破線より上のガス雲ではダスト冷却が効率的となるが、その大半において分裂が起きていない。さらに、MH1-Z6ではダスト冷却が重要ではないにもかかわらず、降着円盤で分裂が起きている。このことから、ガス雲の分裂条件は単純に金属量のみによるわけではないことがわかる。

### 4.2 フィラメント分裂vs.円盤分裂

ただ、分裂を起こしたモデルに着目すると、分裂片の位置関係は金属量への依存性をもっている

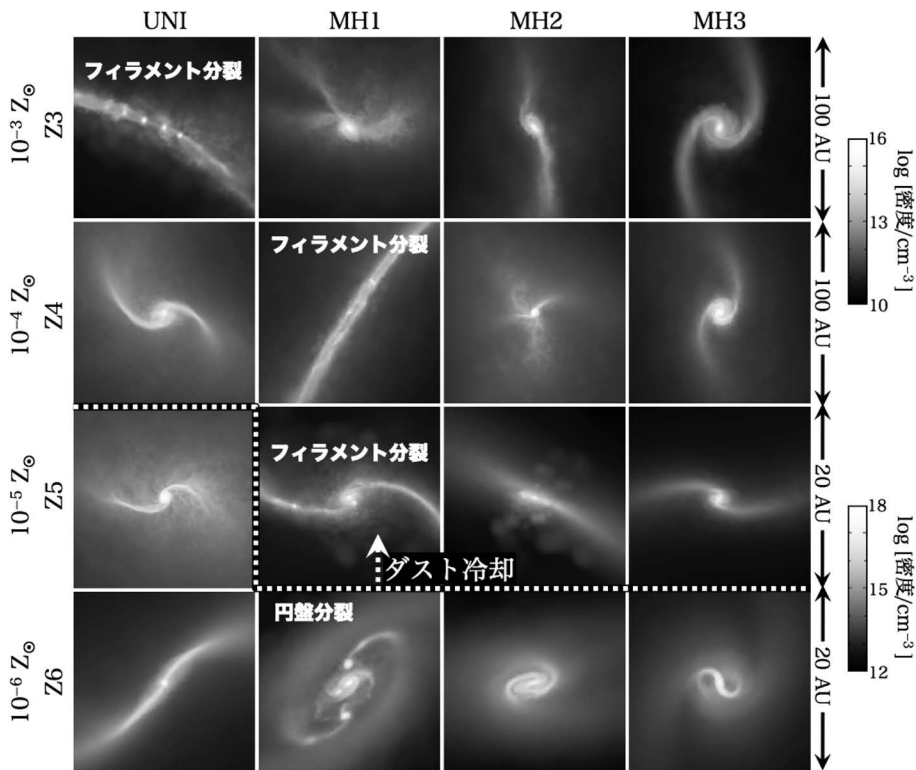


図3 原始星形成後数十年のガス雲中心部の様子。同じ列は同じガス雲の結果を表し、左から初期に一樣密度をもつガス雲 (UNI), 宇宙論的ミニハロー (MH1, MH2, MH3) である。それぞれ下から順に $10^{-6} Z_{\odot}$ から $10^{-3} Z_{\odot}$ まで1桁ずつ金属量を上げたときの結果を表している。

ようである。モデルMH1-Z5, MH1-Z4, UNI-Z3では共通してフィラメントに沿ってほぼ等間隔に分裂片が並ぶ数珠状の構造が見られる。ダスト冷却によって、ガス雲は非球対称摂動に対して不安定になり、このようなフィラメントが形成される<sup>21), 22)</sup>。本研究ではこのような分裂モードを“フィラメント分裂”と呼ぶ。

もう一方はモデルMH1-Z6で見られるように、中心の原始星の周囲の降着円盤中での分裂である。冷却によるフィラメントの形成が起こらない代わりに、ガスの降着率が大きいため、自己重力に対して不安定な円盤が形成され、分裂を起こしたものである。このような分裂モードを、前述のフィラメント分裂と区別して“円盤分裂”と呼ぶ。

このように、ガス雲の分裂にはフィラメント分裂と円盤分裂という二つのモードがあることがわかった。これら二つのモードはそれぞれ異なるシミュレーションで独立に報告されているが<sup>23)-26)</sup>、一連のシミュレーションで二つが起こることを示したのは本研究が初めてである。円盤分裂の条件はさまざまなものが考えられており<sup>27)</sup>、本研究ではフィラメント分裂の条件について詳細に調べた。

### 5. フィラメント分裂の条件

冷却がガス雲の非球対称摂動を増大させるという点を考えると、金属量が大きく、冷却率が大きいほどフィラメント分裂は起こりやすそうであるが、実際はそうはなっていない。

#### 5.1 ガスの熱進化が与える影響

図4上段は、さまざまな金属量に対してガス雲MH1の中心密度が上昇していく過程で温度がどのように変化していくかを示している。以下、この図を用いて、ガスの加熱冷却過程がどのようにガス雲の分裂条件に影響を与えているかを見ていこう。特に、われわれは、ダスト冷却 (§5.1.1)、水

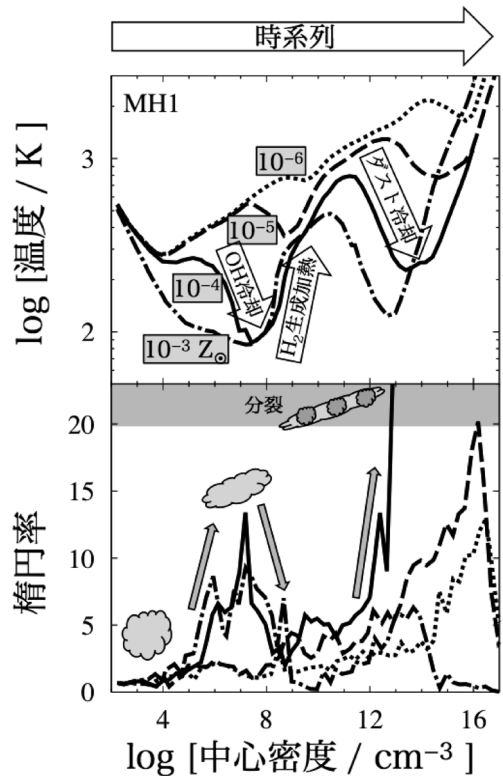


図4 さまざまな金属量に対する、ガス雲MH1の中心密度の上昇過程での温度（上段）と楕円率（下段）の進化。

素分子生成加熱 (§5.1.2)、OH/H<sub>2</sub>O冷却 (§5.1.3) という三つの加熱冷却過程が重要であることを発見した。

#### 5.1.1 ダスト冷却

まず、§2.2で見たように、ダスト冷却は小質量のガス片への分裂を引き起こす点で重要である。フィラメント分裂が起こったUNI-Z3, MH1-Z4, MH1-Z5では、いずれも密度 $10^{12}$ - $10^{14}$  cm<sup>-3</sup>でダスト冷却が支配的となっている。図4下段はガス雲の楕円率を示しており、ダスト冷却によって楕円率が上昇していることがわかる\*5。ガス雲が分裂するためには十分楕円率が大きくならなければならない ( $\geq 20$ : 図中の影をつけた領域)、モデル

\*5 各時刻での最大密度  $n_{H,max}$  に対し、 $n_{H,max}/3$ 以上の密度をもつ領域の長軸と短軸の長さがそれぞれ  $a, b$  だとすると、楕円率は  $a/b - 1$  として求めている。したがって、球形のガス雲の楕円率は0である。

MH1-Z4とMH1-Z5ではその条件を満たしている。

### 5.1.2 水素分子生成加熱

モデルMH1-Z3では、ダスト冷却が支配的となっているにもかかわらず、フィラメント分裂が起きていない。そこで図4を見ると、金属量 $10^{-3} Z_{\odot}$ に対し、密度 $10^9 \text{ cm}^{-3}$ 程度で温度が急激に上昇していることがわかる。これは水素分子生成に伴うガス加熱が原因である。水素分子が生成されるとき、解放された束縛エネルギーがガスの熱エネルギーに転化する。この急激な加熱により、ガス雲の楕円率は減少する(図4)。すると、つづいてダスト冷却が重要になっても、ガスが十分伸長するタイムスケールがガス雲の動的時間より長く、分裂するのに十分な楕円率に到達できなくなる。

低金属量( $\leq 10^{-3} Z_{\odot}$ )においては、ある程度水素分子の割合が増えると、ガスは水素分子生成加熱と水素分子冷却の釣り合いの温度をとる。この温度は金属量には依らずほぼ同じであるから、水素分子生成加熱が効く直前の(密度 $\leq 10^8 \text{ cm}^{-3}$ )温度が低いほど加熱が顕著になる。密度 $\leq 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で重要となるのはOH冷却であり、金属量が大きいほど効率的になる。金属量が大きいほどガスが分裂しやすい傾向になると考えがちだが、詳細な化学反応や冷却過程を考慮すると、必ずしもそうではないことがわかる。

### 5.1.3 OH/H<sub>2</sub>O冷却

ただ、モデルMH1-Z4を見ると、水素分子生成加熱が効いているにもかかわらず、ガス雲が十分伸長し、分裂が起きていることがわかる。この場合は、ちょうど $10^6\text{--}10^8 \text{ cm}^{-3}$ でOH分子が急速に生成され、その冷却が効果的となり、このあと起こる水素分子生成加熱の効果を相殺している。図4下段を見ると、MH1-Z4ではOH冷却によって楕円率が上昇し、水素分子生成加熱による楕円

率の減少を抑えることができています。

### 5.1.4 フィラメント分裂過程

この内容をまとめると、フィラメント分裂を起こすためには、まずダスト冷却が必要となる。そして、水素分子生成加熱を避けるか、それが起こったとしてもOH/H<sub>2</sub>O分子冷却が起きれば分裂が起きることがわかった。つまり、フィラメント分裂には次の二つの過程がある：

*Path 1:* ダスト冷却が効率的で、水素分子生成加熱が非効率的

*Path 2:* ダスト冷却とともに水素分子生成加熱も効率的であるが、OH/H<sub>2</sub>O分子冷却も効率的

## 5.2 ガス雲の“個性”

ガス雲の分裂条件は、これまで考えられていたようにダスト冷却の有無のみで決まるというわけではなく、その他の冷却加熱過程にも依存する。これは、図3でも見られるように、同じ金属量でもガス雲によって分裂条件が変わりうることを意味する。図5は金属量 $10^{-4} Z_{\odot}$ における各ガス雲の温度進化を表している。ガス雲MH1では、密度 $10^7 \text{ cm}^{-3}$ でOH冷却が効くため、*Path 2* (§5.1.4)によって分裂が起きた。一方、その他のモデルではOH冷却が不十分なため、ガスの伸長が促進されず、分裂が起きなかったことがわかる。

同じ金属量にもかかわらず熱進化過程が異なるのは、収縮時間がガス雲によって異なるためである。金属量 $10^{-4} Z_{\odot}$ の場合、UNI, MH1, MH2, MH3の収縮時間は順に3, 4, 11, 19 Myrである。収縮が遅いほど断熱圧縮加熱率は小さくなり、図5のように温度の低い経路を通る。本研究では、収縮時間というガス雲の“個性”によって、分裂条件にも違いが出ることを初めて明らかにした<sup>\*6</sup>。

<sup>\*6</sup> ガス雲によって収縮時間が異なるそもその理由は、背景の暗黒物質ハローのポテンシャルの深さが関係している。ビリアル半径 $R_{\text{vir}}$ と質量 $M_{\text{vir}}$ をもつ初代星形成ハロー52個についてポテンシャルの深さ $GM_{\text{vir}}/R_{\text{vir}}$ とガス雲の収縮時間 $\rho/(d\rho/dt)$ を比較したところ、ポテンシャルが浅いほど収縮時間は長くなるという傾向が確かめられた。

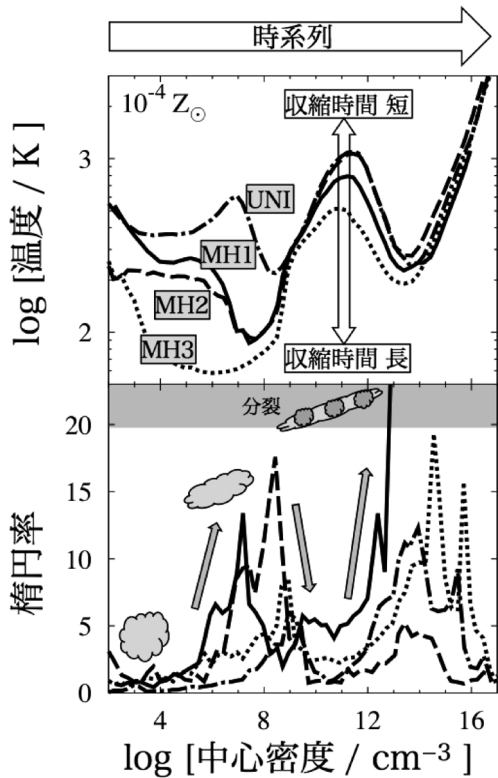


図5 金属量 $10^{-4} Z_{\odot}$ に対する、さまざまなガス雲の中心密度の上昇過程での温度（上段）と楕円率（下段）の進化。

## 6. まとめと今後の展望

このように、ガス雲の分裂条件はこれまで考えられていたように金属量のみで決まるというわけではない。ダスト冷却だけでなく、水素分子生成加熱とOH/H<sub>2</sub>O分子冷却が分裂条件を決めるということがわかった。また、重要となる冷却加熱過程がガス雲によって異なるのは、収縮時間がガス雲によって異なるためである。本研究では初めて、複数の低金属星形成ガス雲において重要となるすべての化学反応と冷却加熱過程を考慮した。その結果、低金属の環境下で起こるあらゆる現象を理解することができた。

ここで注意すべきことは、ガス雲が小質量の分裂片に分裂することが直ちに小質量星形成を意味

するということではない、ということである。形成された原始星はこのあと周囲のガスの降着により質量を獲得し、ゼロ歳主系列へ移行して初めて星の質量が決まる<sup>3)</sup>。したがって、最終的にどのような質量の星が形成されるかを知るためには、原始星へのガスの降着過程を最後まで追う必要がある。

また、§5.1.1のように、金属やダストは初代星の超新星によってもたらされる。このとき、衝撃波の伝播によって駆動された乱流が分裂を促進する可能性も示唆されている<sup>25), 26)</sup>。本研究では比較的乱流強度の小さいミニハローを初期条件としたが、次のステップとして、宇宙論的初期条件のシミュレーションを行う必要がある。

将来的には、宇宙論的な構造形成から始まり、初代星形成を経て、金属欠乏星が形成される様子を調査する。初代星の超新星爆発による衝撃波の伝播と金属汚染過程を追い、複数の金属欠乏星形成環境について調べることで、金属欠乏星の統計的な性質が明らかになり、銀河系ハローの観測との比較を行うことが可能となる。

## 謝辞

本稿の内容は、筆者らの投稿論文<sup>28)</sup> および博士論文<sup>29)</sup> に基づいています。初期宇宙の天体形成という面白いテーマを紹介していただき、博士過程修了までご指導くださった吉田直紀氏に厚く御礼申し上げます。また、平野信吾氏、仲谷峻平氏には原稿に有益なコメントをいただきました、感謝いたします。本研究で行ったシミュレーションはXC30 ATERUI（国立天文台天文シミュレーションプロジェクト）とCOMA（筑波大学計算科学研究センター）によって行われました。

## 参考文献

- 1) Beers T. C., Preston G. W., Shectman S. A., 1992, AJ 103, 1987
- 2) Kroupa P., 2002, Science 295, 82
- 3) Larson R. B., 1969, MNRAS 145, 271

- 4) 吉田直紀, 2006, 天文月報99, 452
- 5) 須田拓馬, 2014, 天文月報107, 268
- 6) Komiya Y., Suda T., Fujimoto M. Y., 2015, ApJL 808, L47
- 7) Beers T. C., Christlieb N., 2005, ARA&A 43, 531
- 8) Bromm V., Ferrara A., Coppi P. S., Larson R. B., 2001, MNRAS 328, 969
- 9) Frebel A., Aoki W., Christlieb N., et al., 2005, Nature 434, 871
- 10) 大向一行, 2006, 天文月報99, 462
- 11) Schneider R., Ferrara A., Salvaterra R., Omukai K., Bromm V., 2003, Nature 422, 869
- 12) Dwek E., Galliano F., Jones A. P., 2007, ApJ 662, 927
- 13) Todini P., Ferrara A., 2001, MNRAS 325, 726
- 14) Nozawa T., Kozasa T., Umeda H., Maeda K., Nomoto K., 2003, ApJ 598, 785
- 15) Nozawa T., Kozasa T., Habe A., et al., 2007, ApJ 666, 955
- 16) Schneider R., Omukai K., Bianchi S., Valiante R., 2012a, MNRAS 419, 1566
- 17) Chiaki G., Schneider R., Nozawa T., et al., 2014, MNRAS 341
- 18) Chiaki G., Marassi S., Nozawa T., et al., 2015, MNRAS 446, 2659
- 19) Chiaki G., Yoshida N., 2015, MNRAS 451, 3955
- 20) 平野信吾, 2015, 天文月報108, 337
- 21) Hanawa T., Matsumoto T., 2000, PASJ 52, 241
- 22) Tsuribe T., Omukai K., 2006, ApJL 642, L61
- 23) Hosokawa T., Hirano S., Kuiper R., et al., 2016, ApJ 824, 119
- 24) Susa H., Hasegawa K., Tominaga N., 2014, ApJ 792, 32
- 25) Smith B. D., Wise J. H., O'Shea B. W., Norman M. L., Knochfar S., 2015, MNRAS 452, 2822
- 26) Safrank-Shrader C., Montgomery M. H., Milosavljević M., Bromm V., 2016, MNRAS 455, 3288
- 27) 高橋実道, 2015, 博士論文(京都大学)
- 28) Chiaki G., Yoshida N., Hirano S., 2016, MNRAS 463, 2781
- 29) 千秋元, 2016, 博士論文(東京大学)

## Chemo-Thermal Evolution of Collapsing Clouds and Metal-Poor Star Formation

Gen CHIAKI

*Department of Physics, Konan University, 8-9-1 Okamoto, Higashinada-ku, Kobe 658-8501, Japan*

Abstract: Observations of long-lived and metal-poor stars give us the implication about the evolution of stellar mass and chemical abundances in the early Universe. Recently, metal-poor (less than a thousandth solar metallicities) and low-mass (less than one solar mass) stars have been discovered. It is unknown how these metal-poor stars are formed. We follow the process of gravitational collapse of several clouds with various metallicities, performing three-dimensional hydrodynamics simulations which include all relevant chemical reactions and radiative cooling, to see whether these clouds monolithically collapse into one single massive object or fragment into clusters of low-mass stars. We find that cloud fragmentation does not depend solely on the gas metallicity against the conventional knowledge.