

星間現象 18b 「初代星形成における水素分子冷却モデルの影響」

平野信吾 (東京大学 M2)

1. Introduction — 初代星と水素分子冷却

ファーストスター(初代星, PopIII)は重元素を含まない原始ガスから形成される、宇宙で最初に誕生する星である。初代星はその後の星形成や再電離など宇宙初期の天文現象に強く関係し、特にその初期質量関数が重要なパラメータとなるため、その形成・進化過程を解明すべく様々な研究が行われている。宇宙の初期密度揺らぎを計算初期条件とする宇宙論的シミュレーションは、初代星の形成時期($z \sim 20-30$)や形成場所($10^5-10^6 [M_{\text{sun}}$ のダークマターハロー)、原始星($\sim 0.01 [M_{\text{sun}}$)の形成までを明らかにしてきた。原始星への質量降着、ガス雲の分裂による連星・多重星の形成など、結論の出ていない問題は多い。

重元素やダストが冷却に寄与しない原始ガスでは、収縮は主に水素分子冷却によって進む。初代星の質量や連星形成の可能性を議論するためには、原始ガスの熱進化・熱的不安定を正しく取り扱う必要があり、水素計算への冷却過程の導入は注意深く行われる必要がある。

原始ガス雲で重要となる水素分子の冷却過程として、水素の輝線冷却(H2 line cooling)がある。ガス雲の重力収縮が進み密度が上昇すると、水素分子を形成する 3 体反応が始まり、水素分子が急激に増大する。このとき、水素分子からの輝線放射が主要な冷却過程となってガス雲は熱エネルギーを捨て、収縮は加速する。ガス雲は輝線放射を吸収するくらいに高密度となり(opaque)、line cooling による冷却効率が低下する。この時、ガス雲の opacity は輻射輸送を解くことで厳密に求めることができるが、実際の計算では近似的に計算されることが多い。3次元計算にも用いられている opacity 計算モデルとして、初代星形成の 1次元球対称計算から求められた解析的近似モデルがある ([1], 以下"RA04")。

H2 line cooling probability (1D; RA04)

$$L_{\text{lines,thick}}(T) = L_{\text{lines,thin}}(T) \min \left\{ 1, (n/n_0)^{-\beta} \right\}$$
$$n_0 = 8 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}, \beta = 0.45$$

これは密度だけの関数となっており、ガス雲の空間分布は考慮しない。しかし数値シミュレーションを行うとガス雲は球対称には収縮せず、opacity は球対称ではなく方向によって異なるはずであり、RA04 の解析モデルは適当ではない。計算中の冷却効率が変わるとガス雲が収縮タイムスケールも変化するため、最終的なガス雲の構造に影響を与える。

今回、H2 line cooling の冷却効率 (opacity) の計算方法によって初代星形成シミュレーションの結果にどの程度の影響が現れるのかを比較・検討した。そのため1次元・3次元的な opacity 計算を採用した宇宙論的シミュレーションを行った。

2. Method — 宇宙論的数値シミュレーション

計算には宇宙論的シミュレーションコード *GADGET-2* [2] を使用する。原始ガスにおける化学反応・冷却・加熱過程を解き [3]、宇宙論的な初期密度揺らぎから初代原始星の形成まで計算を行う。今回は初代星を形成する初期条件として 3 通りのモデルを用意し、それぞれ 2 種類の opacity モデルで計算した。

空間依存性を含む opacity モデルとして、Sobolev 法を用いる。Optical thick な領域の冷却率は、escape probability β を用いて次式のように表される。

$$\Lambda_{\text{H}_2, \text{thick}} = \sum_{u,l} h\nu_{ul} \beta_{\text{escape}, ul} A_{ul} n_u$$

escape probability β を求めるため、この輝線に対する opacity τ を求める。

$$\tau_{lu} = \alpha_{lu} L$$

吸収係数 α は計算可能であるので、ガス雲の典型的大きさ L を求めればよい。この時、よく用いられる近似である Sobolev Length を用いる。すると opacity から最終的に escape probability β が求まる。

H2 line cooling probability (1D; RA04)

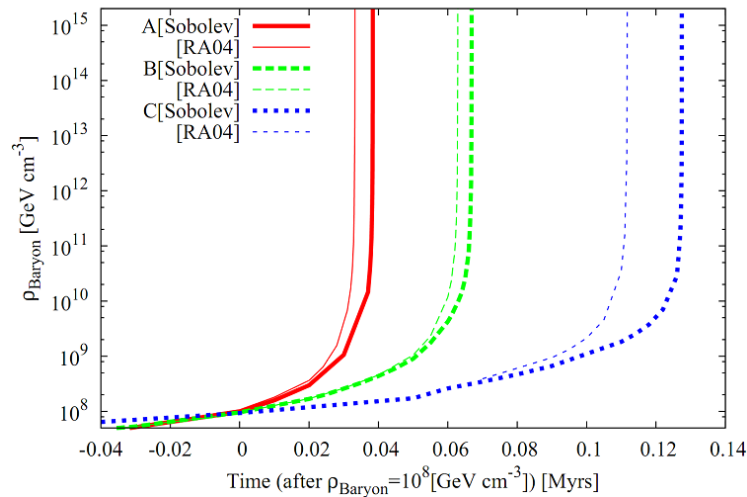
$$L_{\text{lines, thick}}(T) = L_{\text{lines, thin}}(T) \min \left\{ 1, (n/n_0)^{-\beta} \right\}$$
$$n_0 = 8 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}, \beta = 0.45$$

実際の計算では、3次元の各空間方向の opacity, escape probability を計算し、その平均を各 SPH 粒子における冷却効率とした。

3. Results — opacity の計算モデルによる差異

3 モデルの計算結果を示す。宇宙論パラメータは全て同じ(WMAP-7Years) である。最終的には原始星スケールまで計算を進めることができた。Case-A, B は最終的に棒渦巻き構造をとり、Case-C は円盤構造を保ちつつ収縮した。

図1. 中心ガス密度の時間変化



数値計算から得られた、ガス雲の中心密度の時間発展を図 1 に示す。3 つの初期条件がそれぞれの色に対応し、太線は 3 次元的 opacity (Sobolev Method) を用いた計算、細線は 1 次元的 opacity (“RA04”) を用いた計算を表す。3 モデル全ての場合において、1 次元的な冷却効率計算を行った場合、密度進化が早まるという結果になった。つまり冷却効率を過大に計算することで収縮し易くなっており、2 つの計算方法による時間進化の差はおよそ 5000~10000 年となった。これは中心密度 10^9 [cm^{-3}] における力学的タイムスケールより大きい。

図2. 平均冷却効率

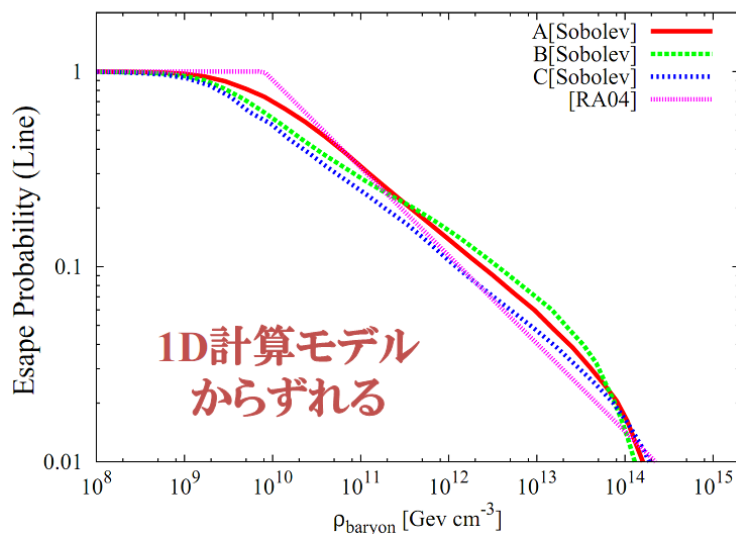
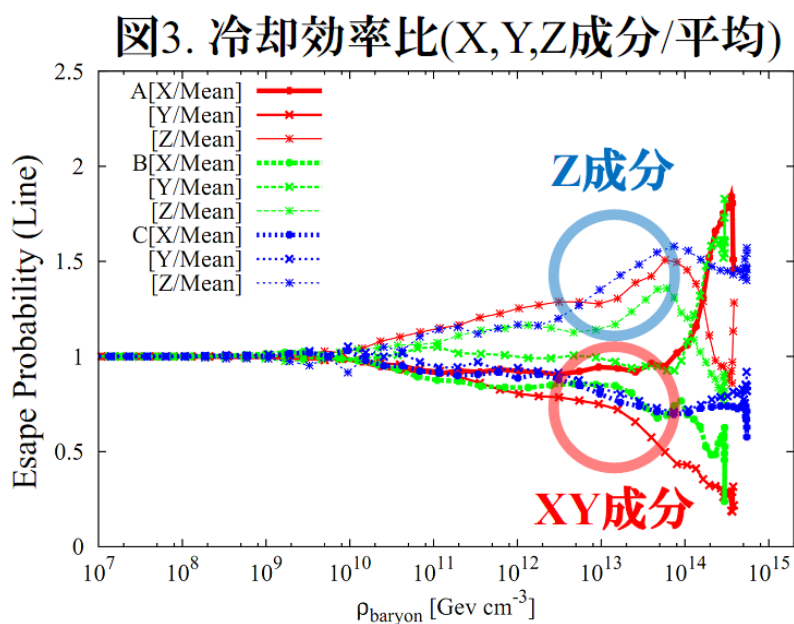


図2は各計算モデルにおける冷却効率(escape probability)の密度分布を示している。3モデルの値は3次元空間成分の平均値となる($\beta = (\beta_x + \beta_y + \beta_z)/3$)。1次元モデルの場合は密度の関数となるので3モデルで同じ結果となる(“RA04”)。この図より、空間成分の平均値も“RA04”モデルとは一致しないことがわかる。特に最初の冷却効率の低下を遅く見積もることになり、このことが前述した収縮の速まりに繋がると考えられる。更に、計算モデルによって冷却効率の分布も異なるため、解析的モデルを用いて計算を行うのは結果を誤る可能性がある。



最後に方向依存性を比較する。ここでは、XY平面をガス円盤構造に平行にとり、Z軸を回転軸にとる。図3では冷却効率の3方向成分値と平均値の比をプロットした。図より、冷却効率のZ成分は平均値より大きい、つまり冷却が効きやすく、逆にXY成分は冷却が効きにくくなっている(柱密度が大きい=opaque)。このことから、単にRA04モデルが適さないだけでなく、方向依存性がここでの原因となっていることがわかる。

4. Conclusion — これからの初代星形成シミュレーション

我々は高解像度な宇宙論的シミュレーションを行い、初代星の形成過程の諸性質について調べている。今回は水素分子の輝線冷却(H2 line cooling)に対するガス雲の opacity の計算方法を評価するため、1次元的/3次元的計算モデルを用いた数値計算を行った。ガス雲の形態は数値シミュレーションから非球対称に分布することがわかっているため、この時 opacity も非等方性を持つと考えられ、その計算方法によってガス雲の冷却過程に影響が出ると予想される。

計算結果を比較したところ、1次元的な opacity 計算モデルを用いた場合、ガス雲の密

度成長が早まっていることが確認された。**Opacity** の 3 次元方向成分を比較してみると、確かにディスク方向・回転軸方向で値が異なり、ガス雲の構造による影響が現れている。このとき生じる密度進化の遅延時間は、違いが現れ始める密度における力学的タイムスケールより大きい。このため、ガス雲の熱的不安定性を数値計算を用いて調べる場合、今回の結果は大きな影響を及ぼす。

References

- [1] Ripamonti, E. & Abel, T., 2004, MNRAS, **348**, 1019
- [2] Springel, V., 2005, MNRAS, **364**, 1105
- [3] Yoshida, N., et al., 2006, ApJ, **652**, 6