

銀河へのガス降着モードについて

小谷 和也 (大阪大学大学院 理学研究科)

Abstract

本研究は [Dusan Keres et al. , 2005 RAS, MNRAS 363, 2-28] のレビューである。従来はガスが銀河に降着する際に一度ビリアル温度程度 ($T \sim 10^6 K$) にショックヒーティングされてから冷却・凝縮されて星を形成すると考えられていたが、SPH を用いた非粘性粒子の流体シミュレーションから、より低い温度 (典型的には $T \sim 10^5 K$) でその重力エネルギーを放出しショックヒーティングされることなく降着するモード (cold mode) もあることが発見された。前者 (hot mode) の降着流が準球状であるのに対し “cold mode” の降着流はフィラメントを形成することで遠い距離から効率的に降着することができると考えられている。またこのシミュレーションから赤方偏移が大きいと “cold mode “ での降着がより効きやすいこともわかる。しかし、フィラメント形成や “mode” の赤方偏移依存性への物理的解釈はまだ完全には得られていない。また、現在の銀河分布においてこのシミュレーションがもたらす結果と観測結果が一致しない問題も抱えている。

1 導入

90 年代までは、ガスが銀河に降着する上でガスは重力ポテンシャルを解放してビリアル温度程度になり、その後冷却されながら銀河に準球状に降着するモデルが考えられていた。そこで、ガスの冷却や過熱を考慮した時、ガスがどのように銀河に降着するかを研究することを目的とする。

$$n_{He+} = \gamma n_H / \left(1 + \frac{\alpha_{He+} + \alpha_d}{\Gamma_{eHe0} + \Gamma_{\gamma He0}/n_e} + \frac{\Gamma_{eHe+} + \Gamma_{eHe+}/n_e}{\alpha_{He++}} \right) \quad (4)$$

$$n_{He++} = \frac{n_{He+} (\Gamma_{eHe+} + \Gamma_{\gamma He+}/n_e)}{\alpha_{He++}} \quad (5)$$

$$n_e = n_{H+} + n_{He+} + 2n_{He++} \quad (6)$$

2 Radiative Cooling and Photonization Heating

ガスは図 1 (Black, 1981) の 5 つのプロセスで放射を行い冷却される。図 1 は各プロセスでの冷却率を図 2 は再結合率と電離率を表した表で、温度と数密度で決まることがわかっている。また、光電離は次の式で書け、

$$\Gamma_{\gamma i} \equiv \int_{\nu_i}^{\infty} \frac{4\pi J(\nu)}{h\nu} \sigma_i(\nu) d\nu \quad s^{-1} \quad (1)$$

電離平衡と水素数, ヘリウム数, 電子数の保存則から以下の数密度を求めるための方程式が導きだされる。

$$n_{H0} = n_H \alpha_{H+} / (\alpha_{H+} + \Gamma_{eH0} + \Gamma_{\gamma H0}/n_e) \quad (2)$$

$$n_{H+} = n_H - n_{H0} \quad (3)$$

COOLING RATES		
Process	Species	Rate* (ergs s ⁻¹ cm ⁻³)
Collisional excitation	H ⁰	$7.50 \times 10^{-19} e^{-118348.0/T} (1 + T_3^{1/2})^{-1} n_e n_{H0}$
	He ⁺	$5.54 \times 10^{-17} T^{-0.297} e^{-473638.0/T} (1 + T_3^{1/2})^{-1} n_e n_{He+}$
Collisional ionization	H ⁰	$1.27 \times 10^{-21} T^{3/2} e^{-157809.1/T} (1 + T_3^{1/2})^{-1} n_e n_{H0}$
	He ⁰	$9.38 \times 10^{-22} T^{3/2} e^{-285335.4/T} (1 + T_3^{1/2})^{-1} n_e n_{He0}$
	He ⁺	$4.95 \times 10^{-22} T^{3/2} e^{-631515.0/T} (1 + T_3^{1/2})^{-1} n_e n_{He+}$
Recombination	H ⁺	$8.70 \times 10^{-27} T^{-3/2} T_3^{-0.2} (1 + T_6^{0.7})^{-1} n_e n_{H+}$
	He ⁺	$1.55 \times 10^{-26} T^{-0.3647} n_e n_{He+}$
	He ⁺⁺	$3.48 \times 10^{-26} T^{1/2} T_3^{-0.2} (1 + T_6^{0.7})^{-1} n_e n_{He++}$
Dielectric recombination	He ⁺	$1.24 \times 10^{-13} T^{-1.5} e^{470802.0/T} (1 + 0.3 e^{-94080.0/T}) n_e n_{He+}$
Free-free	All ions	$1.42 \times 10^{-27} g_{ff} T^{1/2} (n_{H+} + n_{He+} + 4n_{He++}) n_e$

* $T_6 = T/10^6 K$.

図 1: Cooling Rate

また、光電離による加熱は次のように書ける。

$$[Heat] = n_{H0} \epsilon_{H0} + n_{He0} \epsilon_{He0} + n_{He+} \epsilon_{He+} \quad erg \ s^{-1} \ cm^{-3} \quad (7)$$

$$\left(\epsilon_i = \int_{\nu_i}^{\infty} \frac{4\pi J(\nu)}{h\nu} \sigma_i(\nu) (h\nu - h\nu_i) d\nu \quad erg \ s^{-1} \ cm^{-3} \right) \quad (8)$$

さらに宇宙背景放射による冷却 λ_c も考慮して、以上の加熱冷却を加味した基礎方程式を SPH 法に沿って解く。

$$\lambda_c = 5.41 \times 10^{-36} n_e (1+z)^4 \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-3} \quad (9)$$

(Ikeuchi & Ostriker, 1986)

RECOMBINATION AND COLLISIONAL IONIZATION RATES	
Parameter	Value
α_{HI}	$8.4 \times 10^{-15} T^{-1/2} T_3^{-0.2} (1 + T_3^2)^{-1}$
α_{He}	$1.5 \times 10^{-10} T^{-0.6353}$
α_{H}	$1.9 \times 10^{-3} T^{-1.5} e^{-47000.0/T} (1 + 0.3e^{-94000.0/T})$
α_{He}	$3.36 \times 10^{-10} T^{-1/2} T_3^{-0.2} (1 + T_3^2)^{-1}$
Γ_{eff}	$5.85 \times 10^{-11} T^{1/2} e^{-157809.1/T} (1 + T_3^2)^{-1}$
Γ_{eff}	$2.38 \times 10^{-11} T^{1/2} e^{-285335.4/T} (1 + T_3^2)^{-1}$
Γ_{eff}	$5.68 \times 10^{-12} T^{1/2} e^{-631515.0/T} (1 + T_3^2)^{-1}$

図 2: Recombination and Collisional Ionization Rate

3 結果・考察

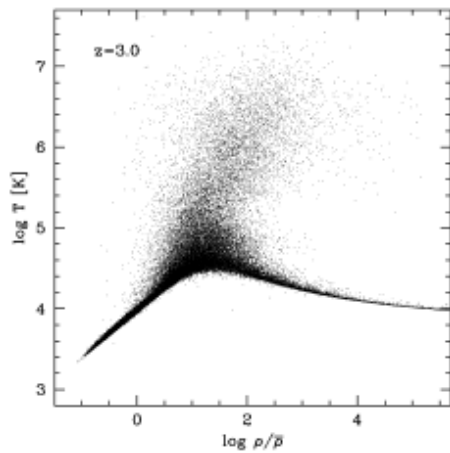


図 3: T-ρ グラフ (z=3)

図 3 より、低音低密度、高温、低音高密度の 3 つの要素に分かれていることが見て取れる。図 4 より、高温を経てから高密度領域に入る (降着する) 粒子 (hot mode) と低音のまま降着する粒子 (cold mode) が存在することが分かる。図 5 を見ると、宇宙初期では cold mode が降着の大部分を占め、現在の宇宙に近づくにつれて hot mode の割合が大きくなっていく。cold mode の降着が効率が良いのはフィラメン

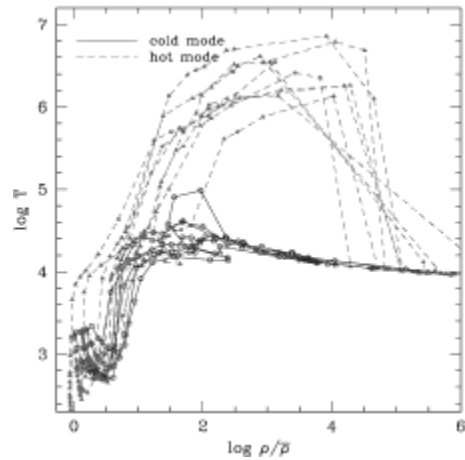


図 4: T-ρ グラフ。15 個の粒子をランダムに選択し、 $z=14.9$ から $z=3$ まで追跡したグラフ。

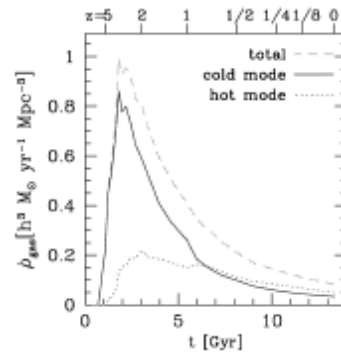


図 5: $\dot{\rho}_{\text{gas}}-t$ グラフ。hot mode と cold mode は $T_{\text{max}}/T_{\text{vir}} = 1$ で分けている。 T_{max} は粒子の最高温度で、 T_{vir} はビリアル温度。

トを形成して降着すると考えられている。図 6 は同様の手法でのスナップショットである。(Keres et al., 2009)

図 6 から、確かに hot mode が準球状に降着している一方で cold mode はフィラメントを形成して降着していることがわかる。この cold mode でのフィラメント形成を物理的に理解することが今後の課題である。その物理事象が理解できれば mode の赤方偏移依存性 (図 5) についても物理的に解釈できるであろう。最後に、このシミュレーションにおける今後の課題として現在の高質量の銀河と低質量の銀河を観測結果 (Bell et al., 2003) よりも多く生成してしまうという問題がある。この問題を解消す

るために AGN や超新星爆発などによるフィードバックをシミュレーションに組み込む試みが成されているがまだそれらの扱いは完全とは言えない。(Keres et al. , 2009)

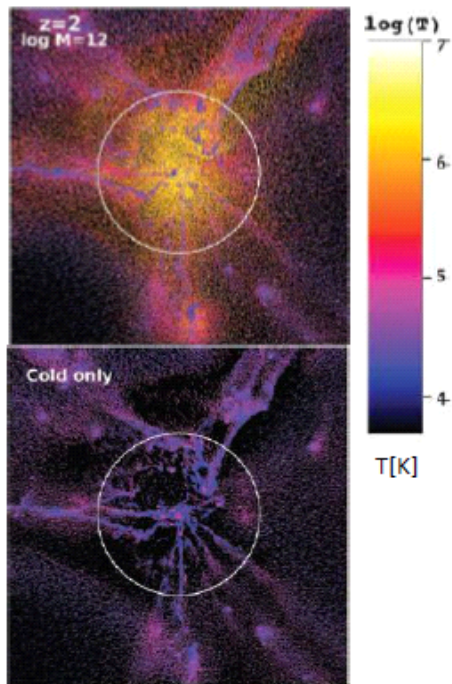


図 6: 上図: $z=2$, $\log M = 12$ での降着の様子。下図: $T < 10^5$ K のみを描写。

Reference

Dusan Keres, Neal Katz, David H. Weinberg and Romeel Dave. 2005. RAS, MNRAS 363, 2-28

Dusan Keres et al. 2009. RAS, MNRAS 395, 160-179

Neak Katz et al. 1996. ApJS, 105, 19-35