

紫外背景輻射による銀河形成の抑制

岡本 崇

〈筑波大学数理物質科学研究科（計算科学研究センター） 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1〉

e-mail: tokamoto@ccs.tsukuba.ac.jp



宇宙再電離以降、紫外背景輻射は銀河間ガスを1万度程度まで加熱し、矮小銀河のような小天体の形成を阻害すると考えられている。筆者らは、高分解能の宇宙論的シミュレーションを用いて、この効果を調べた。その結果、紫外背景輻射によってその内部での銀河形成が抑制されるダークハローの特徴的な質量は、従来考えられていたものよりも1桁近く小さいことが明らかになり、今までの研究が紫外背景輻射の影響を過大評価していたことが明らかになった。この特徴的なダークハロー質量は星間ガスの温度とダークハローのピリアル温度から簡単に求めることができる。ここでは筆者らの行ったシミュレーションの結果と、シミュレーション結果を説明・再現する準解析的モデルを紹介する。

1. はじめに

ビッグバン以降、宇宙が膨張するにつれて、宇宙の温度は下がり、水素やヘリウムの原子核は電子と結合して原子となる。やがて宇宙で最初の星が形成され、その後宇宙で最初の銀河が形成されると考えられている。これら初期天体が放出した紫外光は銀河間ガスを再び電離する。これを宇宙再電離と呼ぶ。この宇宙再電離により銀河間ガスは1万度程度^{*1}に加熱される。

さて、宇宙の構造形成の標準理論となっているコールドダークマター (CDM) モデルでは、宇宙の物質密度のほとんどをダークマターと呼ばれる謎の物質が占め、宇宙初期の微小な密度揺らぎが自己重力によって成長、重力崩壊することによって天体が形成される。この天体をダークハローと呼ぶ（以下ではハロー）。一方、水素やヘリウムなどのいわゆるバリオン^{*2}はダークマターの重力に

ひかれてハローに集まり、衝撃波加熱された後に、光を出して冷え、ハローの中心に集まる。この冷たい高密度のガスから星が形成されれば銀河となるわけである。

ガスのもつ熱エネルギーが十分小さければ、ハロー内に含まれるダークマターとバリオンの質量比は宇宙全体のダークマターとバリオンの密度比に等しくなる。一方、紫外背景輻射による光電離加熱により銀河間ガスの熱エネルギーが増すと、重力ポテンシャルの浅いハロー内のバリオンの割合は宇宙全体のそれよりも減少すると期待される。CDM モデルでは天の川銀河の衛星銀河のような、矮小銀河サイズの天体のもととなる小ハローが実際に観測されるよりも形成され過ぎる^{*3}ことが知られているが、このような紫外背景輻射による小銀河形成の抑制を考慮することで、この問題が解決できるという指摘もある³⁾⁵⁾。

これら、紫外背景輻射の影響を考えることによ

*1 この温度はどのような天体からの光によってどのように再電離が行われるかによって数万度から10万度程度になりうる。

*2 われわれを構成するような普通の物質のことだが、ここでは主にガス。

*3 衛星銀河問題と呼ばれる²⁾。

り衛星銀河問題を解決したと主張している研究は、フィルタリング質量⁶⁾を用いて銀河形成抑制の効果を取り入れている。ではこのフィルタリング質量は正しいのだろうか？*4 もし間違っているのだとしたら、実際には紫外背景放射による銀河形成の抑制はどのような物理で説明されるのだろうか？というのが本研究の主な動機である。では実際の研究の話に入る前にフィルタリング質量がどういうものであるか次章で見ていく。

2. フィルタリング質量

前述したように、ガスの温度が無視できないほど高くなると、バリオンの密度揺らぎの成長は(圧力を感じない)ダークマターのそれよりも遅れることになる。一般には、密度 ρ 、温度 T のガスはジーンズ波数 $k_J = (a/c_s)\sqrt{4\pi G\rho}$ より大きな波数*5(もしくは $\lambda_J = 2\pi/k_J$ より小さな波長)では重力不安定を起こせず、これより小さな波長のバリオンの密度揺らぎは成長できない。 $a(t)$ は宇宙の膨張を表すスケールファクターで、共動座標系での長さに $a(t)$ をかけたものが物理的な長さになる、またここで c_s は音速であり、温度の1/2乗に比例する。構造形成の場合は過去の履歴を引きずるのでGnedin & Hui⁷⁾によれば、フィルタリングスケール $2\pi/k_F$ 以下のバリオンの密度揺らぎは成長できない。 k_F は

$$\frac{1}{k_F^2(t)} = \frac{1}{D(t)} \int_0^t dt' \frac{\ddot{D}(t') + 2H(t')\dot{D}(t')}{k_J^2(t')} \times \int_{t'}^t \frac{dt''}{a^2(t'')} \quad (1)$$

のように定義され、ジーンズ波数は $k_J(t) = a(t)\sqrt{4\pi G\langle\rho_{\text{tot}}\rangle}/c_s(T_0)$ のように、宇宙の平均物質密度(ダークマターを含んだ密度)、 $\langle\rho_{\text{tot}}\rangle(t)$ 、宇宙

の平均バリオン密度をもつガスの温度 $T_0(t)$ によって決まる。変数 $D(t)$ や $H(t)$ は $a(t)$ と同様に宇宙モデルを決めれば宇宙年齢の関数として与えられるため、結局 $k_F(t)$ も宇宙モデルと宇宙の熱史が決まると、宇宙年齢の関数として一意に定まる。結局Gnedin⁶⁾によれば、質量

$$M_F(t) = \frac{4\pi}{3} \langle\rho_{\text{tot}}\rangle \left(\frac{2\pi a}{k_F}\right)^3 \quad (2)$$

以下のハローにはバリオンは重力崩壊することができず、 M_F 以下の小さなハローで銀河形成が強く抑制されることになる。以上の議論は一見もっともらしく見えるが、充分波数が小さいという仮定をしておき、密度揺らぎが重力崩壊するような小さなスケールには適用できないはずである。彼らのシミュレーションの結果⁶⁾は、上の議論とよく合うのだが…次章で実際にシミュレーションを用いて確認してみる。

3. シミュレーション

筆者らが行ったシミュレーション⁸⁾では、宇宙の構造形成の標準理論となっている Λ CDMモデルを採用し、赤方偏移、 $z=9$ に水素の再電離が、 $z=3.5$ にヘリウムの再電離が起こることを仮定している*6。紫外背景放射の効果に注目するために、星形成やそれに伴う超新星爆発などは今回の計算では取り入れていない。図1に、宇宙再電離直前と直後のガスの分布を示してある。輝度は宇宙の平均バリオン密度で規格化したガス密度、 $\Delta = \rho/\langle\rho\rangle$ (以下、簡単のために Δ をガス密度と呼ぶ)、を表しており、白っぽい部分がハローの中に含まれているガスに相当する。右のほうが密度の低いフィラメント状の構造が減っているはずなのだがわかるだろうか*7。以下で、紫外背景放射のこの何と

*4 疑問文でこう書くときは大抵、正しいわけがないという確信をもっているものだ。
 *5 共動座標系で考えているので、宇宙の膨張を表すスケールファクター $a(t)$ が入っている。 c_s は音速。
 *6 赤方偏移と上で出てきたスケールファクターには $a=1/(1+z)$ の関係があり、現在の宇宙で $z=0$ ($a=1$)となる。 $z=9$ というのは宇宙のサイズが現在の1/10だった時刻を意味する。
 *7 アハ体験? この図でわかる人は多分気のせい。

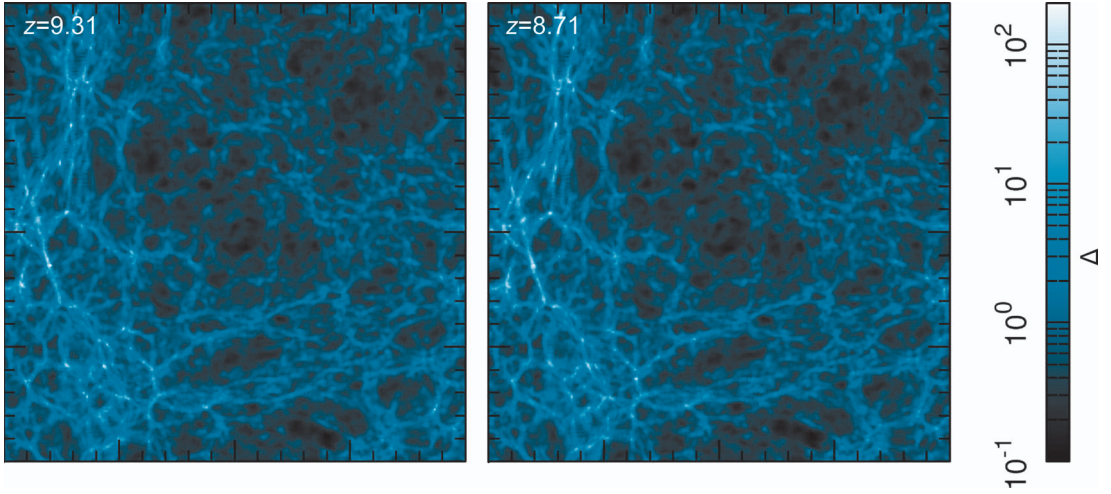


図1 シミュレーション領域の、ある断面でのガスの分布（一辺は $4 h^{-1} \text{ Mpc}$ ）。輝度は宇宙のバリオン平均密度 $\langle \rho \rangle$ で規格化したガス密度 $\Delta \equiv \rho / \langle \rho \rangle$ を表している。左が宇宙再電離直前、右が直後のガスの分布である。この研究では $h=0.73$ を仮定している。

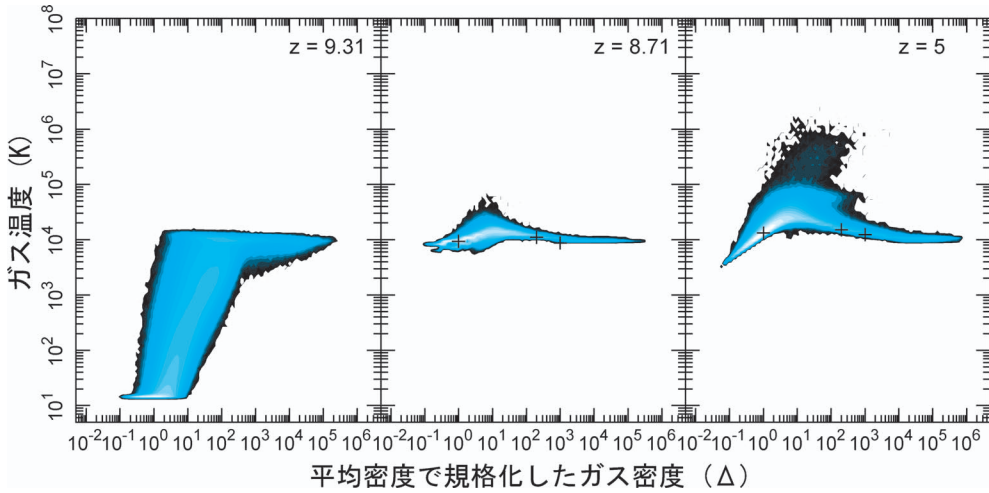


図2 温度-密度平面上でのガスの分布。左から $z=9.31$ （宇宙再電離直前）、 $z=8.71$ （宇宙再電離直後）、 $z=5$ （もっと後）。輝度の高い領域が、この平面上でガスが多く分布している領域。また、中央と右の図には、シミュレーションで用いた、加熱・冷却関数から求めた平衡温度を $\Delta=1, 200, 1,000$ に対して '+' で示している。大部分のガスが平衡温度に沿って分布していることがわかる。

微妙な影響を定量的に明らかにしていく。

まず、図2に、温度-密度平面上でのガスの分布を示した。再電離前には、平均密度以下のガスは宇宙膨張により断熱的に冷却し、逆に高密度ガスは圧縮/衝撃波加熱によりいったん加熱され、放射冷却により速やかにエネルギーを失うことで1

万度程度の温度になっている。宇宙再電離中に低密度ガスもいったん1万度程度まで加熱され、宇宙はほぼ等温の状態に達する（中央図）。その後、低密度ガスは再び宇宙膨張により断熱的に冷却される（右図）。中央と右図には $\Delta=1, 100, 1,000$ に対して、紫外背景放射による光電離加熱と放射冷

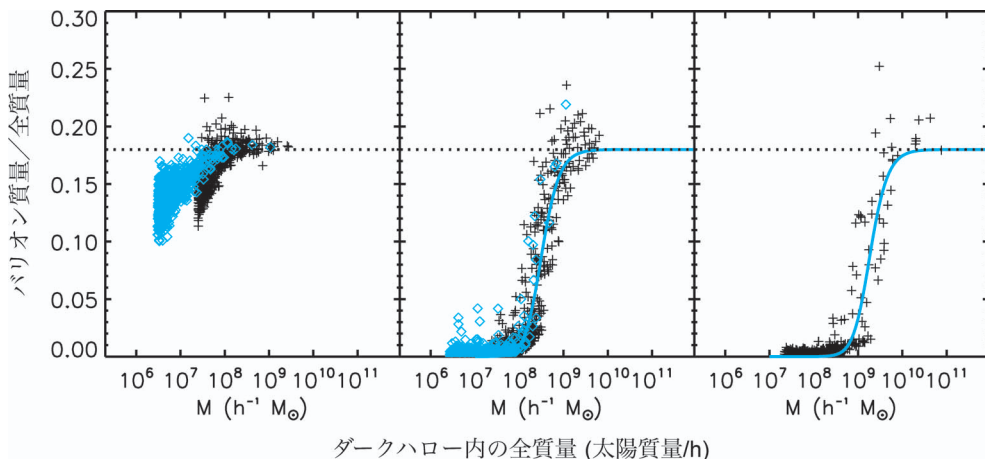


図3 ハローに含まれるバリオンの割合。ハロー内の全質量（バリオン+ダークマター）の関数として示してある。左から $z=9.31$ （宇宙再電離直前）、 $z=5.0$ 、 $z=2.09$ である。左と中央にはダイヤモンドで、プラスマークのそれより8倍質量分解能の高いシミュレーションによる結果も示した。水平な点線は宇宙全体でのバリオンの割合を示したもの。また青い実線は(3)式によるフィッティングの結果である。

却*8が釣り合う温度（平衡温度）を‘+’で示してある。ほとんどのガスが平衡温度に沿って分布していることがわかる。つまり、ある赤方偏移の紫外背景放射を決定すると、ガスの密度（と金属量）の関数として温度が求められることになる。

それでは実際に紫外背景放射がどのように銀河形成を抑制するかを見ていく。図3にハロー内の全質量の関数として、バリオンの占める割合を示した。水平な点線は宇宙全体の質量密度におけるバリオンの割合である。宇宙再電離前以前はすべてのハローでバリオンの割合は宇宙の平均とほぼ一致していることがわかる。小質量ハローのほうでバリオンの割合が減少しているのはシミュレーションの分解能の影響であることが、より高分解能のシミュレーションの結果と比較から理解できる。

一方、宇宙再電離後は、小さなハローほどバリオンを失い、宇宙の平均と同程度のバリオンをもつハローとほとんどバリオンをもたないハローを分ける特徴的なハロー質量が存在する。この遷移を特徴づけるために以下のようなフィッティング

関数を利用する。

$$f_b(M, z) = \langle f_b \rangle \left\{ 1 + (2^{2/3} - 1) \left[\frac{M}{M_c(z)} \right]^2 \right\}^{-3/2} \tag{3}$$

ここで、 f_b はハロー内のバリオンの割合（図3の縦軸）、 M がハローの全質量（横軸）である。一方 $\langle f_b \rangle$ が宇宙の平均のバリオンの割合であり（図3の水平点線）、 M_c がフィッティングパラメーターである。(3)式は、 $M=M_c$ となるハローでは、バリオンの割合が宇宙平均の半分になることを意味する。図3に、実際にフィッティングを行って得られた f_b を青い実線で示してある。このようにして得られた M_c を‘特徴的質量’と呼ぶ。Gnedin⁶⁾の主張は(2)式によって得られるフィルタリング質量がこの特徴的質量とよく一致するというものであった。

次に、さまざまな赤方偏移で図3と同様にフィッティングを行い、特徴的質量の赤方偏移変化を求め、筆者らのシミュレーションの熱史から得られたフィルタリング質量と比較を行う。図4に、数値分解能や計算領域の大きさを変えた、さ

*8 $\Delta=1$ （平均密度）に対しては宇宙膨張による断熱冷却の効果も考慮している。

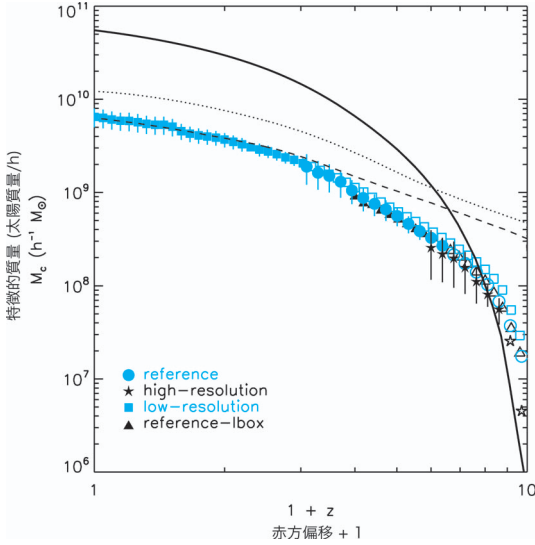


図4 特徴的質量 M_c の赤方偏移進化. 縦軸が質量 (単位は太陽質量) で横軸が赤方偏移に 1 を加えたもの. 宇宙再電離が起こったのが $1+z=10$ で, $1+z=1$ が現在の宇宙. 標準的なシミュレーションから得られた M_c を丸印, 高分解能シミュレーションから得られたものを星印, 低分解能の大きな計算領域のシミュレーションから得られたものを正方形, 標準的なシミュレーションの計算領域を大きくしたものの結果を三角形で示した. 塗りつぶされた記号は, 一つのハローに十分な数の粒子が含まれ, 解像度の問題がないことを意味する. 実線は筆者らのシミュレーションから得られた銀河間ガスの熱史を用いて計算したフィルタリング質量. 赤方偏移の小さなところで特徴的質量を大きく上回っていることがわかる. 点線と破線はそれぞれ密度 $\Delta = \Delta_{\text{vir}}/3$, 1,000 での平衡温度に対応するビリアル温度をもつハロー質量を示している.

さまざまなシミュレーションから得られた特徴的質量をそれぞれ印を変えて示してある. 質量分解能を 64 倍変えても結果が綺麗に収束していることから, 筆者らの行ったシミュレーションが信用できるものであることがわかる.

一方, 図中に実線で示してあるのが筆者らのシミュレーションから得られた銀河間ガスの熱史を用いて (2) 式から求めたフィルタリング質量である. 再電離直後は合っているとも合っていないとも

い難いが, 低赤方偏移では明らかに特徴的質量を過大評価し, $z=0$ ではその差は 1 桁ほどにもなる. これまでの準解析的銀河形成モデルは, このような誤った理論に基づいて, 「宇宙再電離と紫外背景放射を考慮すれば CDM モデルの衛星銀河問題は解決できる」と主張していたのである³⁾⁻⁵⁾.

4. シミュレーション結果の物理的解釈

さて, フィルタリング質量が特徴的質量とは一致しないことはわかった. では紫外背景放射はどのように銀河形成を抑制し, バリオンの豊富なハローと欠乏したハローを分ける特徴的質量はどのような物理によって決定されているのだろうか. 最も単純な議論は以下のようなものとなる. ハローの重力ポテンシャルと力学的に釣り合うガスの温度はビリアル温度として以下のように定義できる.

$$T_{\text{vir}} \equiv \frac{1}{2} \frac{\mu m_p}{k_B} \frac{GM}{R} \quad (4)$$

ここで, μ は平均分子量で, 完全電離ガスの場合は 0.59, m_p は陽子の質量, k_B はボルツマン定数, M はハロー質量で R がハローの半径である.

紫外背景放射により, ハローのビリアル温度より高温となったガスは, その熱エネルギーによってハローの重力ポテンシャルに束縛されなくなる. そのため, そのようなハローでは新たなダークマターが降着してきてハロー質量が増える際に, ガスは降着できず, ハロー質量だけが増加し, バリオンが欠乏したハローとなる.

前述したように, ハローのビリアル温度はその質量とサイズが決まれば式 (4) から求められる. ではハローへと降着してくるガスの温度はどのようにして求めることができるだろうか. 図2で示したように, ガスは温度-密度平面上で, 光電離加熱と放射冷却の釣り合う温度である, 平衡温度に沿って分布する. つまり紫外背景放射の赤方偏移進化を与えれば, ガスの温度は密度と赤方偏移の

関数として求めることができる。ガスがダークマターと同じように分布していると仮定してハロー全体で平均したガス密度（ビリアル密度） $\Delta_{\text{vir}}(z)$ は宇宙モデルと赤方偏移によって決まる*9。等温的なガス分布を仮定するとハローの端ではハロー全体で平均したものの3分の1程度になる。では $\Delta = \Delta_{\text{vir}}/3$ でのガスの平衡温度をビリアル温度とするハロー質量が特徴的質量になっているだろうか。

図4にこのようにして求めた質量を点線で示してある。ハローに降ってくるガスの温度とビリアル温度の関係から求めた質量はシミュレーションから得られた特徴的質量を過大評価していて、あまり合っていないことがわかる。一方、ビリアル密度の3分の1ではなく、 $\Delta = 1,000$ での平衡温度から求めた質量は低赤方偏移側で特徴的質量とよく合っているように見えるし、そのように主張している研究も存在する*9)。しかし $\Delta = 1,000$ といえばハローの中心部であり、このようなガスの温度が特徴的質量を決めるとは考え難い。そもそもガス密度 Δ を大きくしていけば対応する平衡温度は下がるので、シミュレーションとどこかで合わせることは可能なのである。単なる偶然の一致と考えるのが妥当だろう。

では一体、上の議論の何が問題だったのだろうか。考えられるのは、

1. CDM宇宙ではハローは合体・集合を繰り返して成長するにもかかわらず、先の議論では合体してくるハローが持ち込むバリオンを考慮していない
2. いったんハロー内部に取り込まれたガスが紫外背景輻射による加熱により、ハローのビリアル温度を超えて蒸発するという過程を無視している

の2点である。この二つの効果を陽に取り入れるためにモデルに変更を加えよう。まず先ほど特徴

的質量を求めるのに用いたシミュレーションから個々のダークハローの合体形成史を構築する。バリオンの振舞いはモデルの方で指定するので、ここではダークマターだけを考慮する。そして次の仮定を置くことにより、個々のハロー内のバリオンの量を準解析的に求める：

1. 宇宙再電離以前は、すべてのハローでバリオンの割合は宇宙全体のそれ $\langle f_b \rangle$ と同じである。
2. ハローのビリアル温度がハロー周囲のガス温度($\Delta = \Delta_{\text{vir}}/3$ での平衡温度)よりも高い場合、ハローの質量増加分のうち、 $\langle f_b \rangle$ はバリオンである。ハローに降着したバリオンは放射冷却により速やかにエネルギーを失い、ハロー中心部に低温高密度ガスとして分布する。
3. ハローのビリアル温度がハロー周囲のガスの温度よりも低くなった場合は、ハローの質量が増加してもハローに含まれるバリオンの質量は増加しない（つまりハローに含まれるバリオンの割合は減少する）。
4. 合体してくるハローに含まれるバリオンは（蒸発がない限り）そのまま合体先のハローに取り込まれる。
5. 高密度ガスの温度（今回は $\Delta = 10^6$ での平衡温度とする）がハローのビリアル温度を超えた場合は、ハロー内に存在したバリオンはそこでの音速程度でハローから蒸発する。

ハローがダークマターやバリオンの降着によって質量を増す描像が仮定2,3で取り入れられ、合体、蒸発の効果がそれぞれ仮定4,5で考慮されている。複雑な仮定をしているように見えるが、基本的には「ビリアル温度より平衡温度の高いガスはハロー内に重力的に束縛されることはできない」という当たり前のことをCDMにおける階層

*9 詳しい議論は省くが、 Λ CDMでは180-400程度。

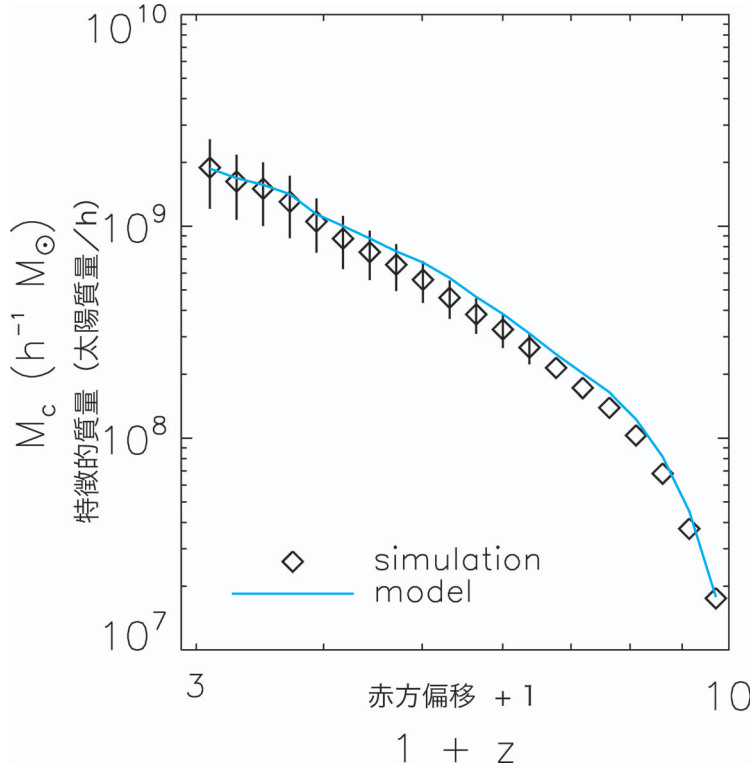


図5 シミュレーションから得られた特徴的質量と、筆者らのモデルが予言する特徴的質量の比較. 図4と同様の図であるが、図4で丸印で示されていたシミュレーションの結果をダイヤモンドマークで、同じシミュレーションから得られたハローの合体形成史に対してモデルを適用して得られた特徴的質量を青い実線で示した.

的構造形成の描像と組み合わせているにすぎない.

さて、シミュレーションから得られたハローの合体形成史に対して上記のモデルを適用することで、「個々のハロー内の」バリオン質量が得られる。つまりモデル計算から図3のようなハロー内のバリオン質量の割合の分布が得られるのである。これは従来のフィルタリング質量がハローの質量に対する「平均的な」振舞いしか与えなかったことと比較すると著しい進歩と言える。図3のような分布が得られれば当然(3)式によるフィッティングを行って個々の赤方偏移で、モデルが予言する特徴的質量を得ることができる。このよう

にして得られた特徴的質量と対応するシミュレーションのそれを図5で比較している。思わず目を疑ってしまう*10ほどよく一致している。

ここでは見せていないが、他の分解能の異なるシミュレーションから得られたハローの合体形成史に対してモデルを適用した場合も同様にシミュレーションとのよい一致が見られた⁸⁾。これは、

1. 降着してくるガスの温度がハローのピリアル温度よりも高いと、ガスはハローに降着できない。
2. 降着してくるガスの温度は密度 $\Delta = \Delta_{\text{vir}}/3$ での平衡温度で近似できる。

という筆者らの仮定が妥当であること、および、

*10 幸運に慣れてないので常にバグの存在を疑うのである。

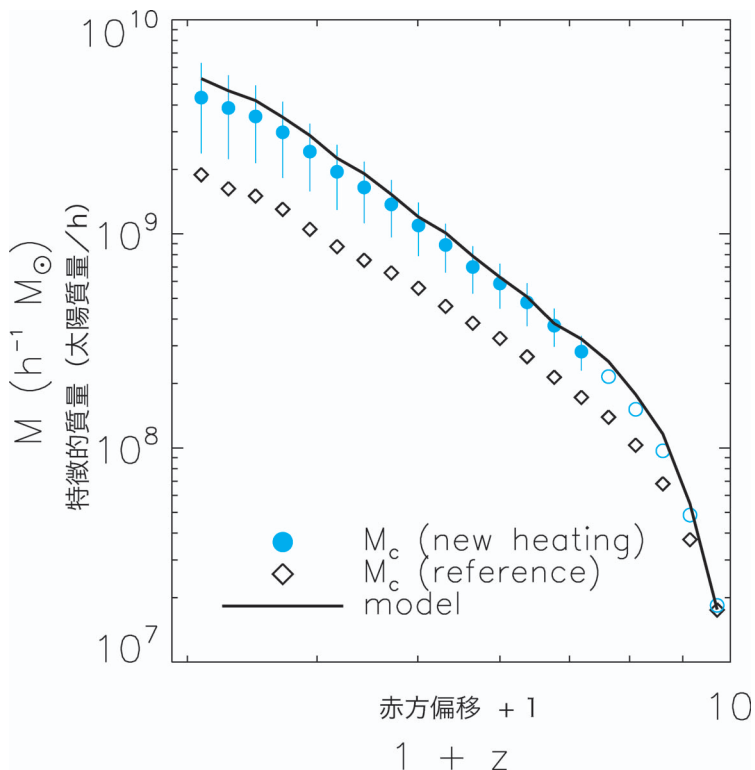


図6 高密度ガスに対する加熱を人工的に大きくした場合の特徴的質量. 図4で示されていた標準的なシミュレーションの結果をダイヤモンドで, 新しい加熱関数を用いた同様のシミュレーションの結果を青丸で示してある. 新しい加熱関数を用いたモデル計算が黒い実線.

紫外背景放射が銀河間ガスの温度を上昇させ、ハローへのガスの降着を阻害することで銀河形成を抑制していることを意味する. 筆者らのモデルを使えばどのような紫外背景放射に対しても、その影響を正しく準解析的銀河形成モデルに取り入れることが可能になる^{*11}.

以上の手続きには少し問題があるのがわかるだろうか? それは筆者らがシミュレーションの結果を見てからモデルを構築していることである. 理想的には、結果を知らないシミュレーションとモデルを比較すべきであろう. そのついでにフィルタリング質量に止めを刺しておこう. そこで追

試として、紫外背景放射による加熱を $\Delta > 10$ の高密度ガスに対してのみ、人為的に10倍にしてシミュレーションとモデル計算を行った. 低密度ガス ($\Delta \leq 10$) に対しては先ほどまでと同じ加熱を仮定する.

実は、これはかなりクリティカルな問題設定になっている. 降着してくるガスの密度として仮定した、 $\Delta_{vir}/3$ はおよそ $\Delta \sim 60-100$ なので、筆者らの理解が正しければ、ハローに降着してくるガスの温度は先ほどまでのシミュレーションよりも高くなり、結果として特徴的質量も大きくなるはずである. その場合、モデルもこの増加を正しく再

*11 シミュレーションで得られているものをなぜ準解析的モデルでやる必要があるのか、という疑問をもつかもしれない. 理由は、ガス入りのシミュレーションは、ダークマターのみよりはるかに計算資源と計算時間が必要だからである. ダークハローの合体形成史のみをシミュレーションから構築するのはバリオン入りのシミュレーションと比較してずっと容易である¹⁰⁾.

現するであろう。一方、フィルタリング質量は、(1)式(とその下)で明らかのように、平均密度のガス($\Delta=1$)の温度に依存するので $\Delta>10$ での加熱を大きくしても変化しないはずである。つまり、このような設定でシミュレーションを行って、特徴的質量が元のそれよりも大きくなれば、フィルタリング質量は間違っただ理論に基づいていたことが証明される。

図6にこのシミュレーションの結果を示した。高密度領域で加熱を強くしたシミュレーションでは実際に元のシミュレーションに比べて特徴的質量が大きくなっている。つまり、フィルタリング質量は、特徴的質量とは何の関係もないということが言える。一方、新しい加熱関数を用いたモデルは、このシミュレーションをほぼ完全に再現し、筆者らの理解が正しいことが明らかになった。

5. おわりに

高分解能の宇宙論的流体シミュレーションを行い、紫外背景放射によってダークハロー中のバリオンの量がどのように変化するかを詳細に調べた。特に、バリオンが豊富なハローと欠乏したハローを分ける特徴的質量に注目して解析を行った。その結果、この特徴的質量を見積もるのに使われていたフィルタリング質量⁶⁾が、特徴的質量を1桁近くも過大評価すること、そもそも特徴的質量を決める物理とフィルタリング質量は関係がないことを明らかにした。さらに簡単なモデル計算を行うことにより、ハロー内のバリオンの量は、ハローのビリアル温度と降着してくるガスの温度、そしてハローの合体形成史によって決まることを示した。言われてみれば当たり前のこの物理過程が10年近くの間誤解されてきたのはひとえに、Gnedinらの議論がもっともらし

かったことと^{6),7)}、彼らのシミュレーションがフィルタリング質量をよく再現していたことによる。どうしてそんなことが起こったのか直接メールで質問してみたところ「シミュレーションの数値分解能が足りなかった。好きに批判してくれ。」との返事もらった^{*12)}。シミュレーションを行う者はその結果がどこまで信用できるのか徹底的に検証する必要がある^{*13)}。

最後になるが、紫外背景放射の効果が今まで仮定されていたものより弱いことが判明したことで、衛星銀河問題はどうなったのであろうか? CDMモデルはやはり小さなスケールで問題を抱えているのだろうか? 実際のところ、紫外背景放射以外にも加熱源は星の数ほど^{*14)}あるので、超新星爆発などによる加熱が十分効けば特に問題はなさそうである^{11), 12)}。十分に、というのがどの程度なのかはほかの論文^{13), 14)}で議論しているので、興味をもたれた方はそのうちそちらを読んでいただけるとありがたい。

謝辞

本研究は私がDurham大学でLiang Gao, Tom Theuns両氏と共同で行ったものである。両氏に感謝する。また、いつも強烈に励ましていただいたCarlos Frenk氏と、議論にも付き合っていた長島雅裕氏に感謝する。

*12) 間違っただ理論と不適切なシミュレーションの幸運なマリージュ。

*13) 「シミュレーションってそもそも反則もされてないのにペナルティーエリア内で倒れてPKもらおうとすることやろ?」などと言わせないためにも。

*14) という言い方が不適切なら大質量星の数ほど

参考文献

- 1) 例えば, 大向一行, 2006, 天文月報 99, 462
- 2) Moore B., Ghigna S., Governato F., Lake G., Quinn T., Stadel J., Tozzi P., 1999, ApJ 524, L19
- 3) Bullock J. S., Kravtsov A. V., Weinberg D. H., 2000, ApJ 539, 517
- 4) Benson A. J., Frenk C. S., Lacey C. G., Baugh C. M., Cole S., 2002, MNRAS 333, 177
- 5) Somerville R. S., 2002, ApJ 572, L23
- 6) Gnedin N. Y., 2000, ApJ 542, 535
- 7) Gnedin N. Y., Hui L., 1998, MNRAS 296, 44
- 8) Okamoto T., Gao L., Theuns T., 2008, MNRAS 390, 920
- 9) Hoesft M., Yepes G., Gottlöber S., Springel V., 2006, MNRAS 371, 401
- 10) 例えば, 郷田直輝, 2000, 天文月報 93, 60
- 11) Okamoto T., Eke V. R., Frenk C. S., Jenkins A., 2005, MNRAS 363, 1299
- 12) Libeskind N. I., Cole S., Frenk C. S., Okamoto T., Jenkins A., 2007, MNRAS 374, 16
- 13) Okamoto T., Frenk C. S., 2009, MNRAS 399, L174
- 14) Okamoto T., Frenk C. S., Jenkins A., Theuns T., arXiv: 0909. 0265

Suppression of Galaxy Formation Due to an Ultraviolet-Background Radiation

Takashi OKAMOTO

Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba 305-8577, Ibaraki, Japan

Abstract: An ultraviolet background radiation suppresses formation of small cosmic objects such as dwarf galaxies. We have investigated this effect by performing a series of high-resolution cosmological hydrodynamic simulations. We find that the filtering mass, which has been widely used to estimate a characteristic mass below which galaxy formation is suppressed, largely overestimates the characteristic mass. We describe a simple physical model that explains the characteristic mass from the virial temperature of a halo and the temperature of the accreting gas.