

# 銀河形成における背景紫外放射場の役割

須 佐 元

〈立教大学理学部物理学科 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1〉

e-mail: susa@rikkyo.ac.jp

われわれの宇宙には多種多様な銀河が存在している。その広がりには質量にして約6桁もあり、また大変バラエティに富んだ形状と色を持っている。これらの銀河がどのように形成され、またいかにしてこのような多様性を持つにいったかは、現在の宇宙論における主要かつ遠大な研究テーマのひとつである。銀河形成時に満ちていた紫外線背景放射場はいくつかの物理的スケールを導入するため、このような多様性を生み出す可能性がある。

本稿では、背景紫外線放射場が銀河の形成過程にどのような影響を及ぼすかについて概説する。

## 1. 紫外線背景放射場

大小さまざまな銀河は赤方偏移 ( $z$ ) で 1–10 の時期に形成されてきたと今日では考えられている。一方、宇宙は  $z \sim 1000$  で一度電離したプラズマ状態から中性化しているが、銀河形成期に宇宙は再び電離される<sup>1)</sup>。この宇宙の再電離は、ごく宇宙の初期に生まれた第一世代天体や、クエーサーなどから放射される紫外線によって引き起こされる。

したがって多くの銀河は銀河間空間を電離するような紫外線の背景放射場の中で生まれてくることになり、その物理的影響をよく吟味する必要がある。紫外線の背景放射場は、いくつかの観測からその強度が測定されている。昔の宇宙 ( $z > 2$ ) での強度は、クエーサーのスペクトルに現れる多数の吸収線 (ラインマン  $\alpha$  吸収線系) の観測を通して、クエーサーの近くのガス雲がクエーサーの影響で蒸発する効果 (クエーサーへの接近効果) を調べることによって測ることができる<sup>2)</sup>。それによると、 $1.7 < z < 3.8$  では  $I_{21}$  (ラインマン端での放射強度を  $10^{-21} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{str}^{-1} \text{Hz}^{-1}$  で規格化した量) の値はおおよそ1程度になる。またわれわれの近くの背景放射場については、孤立した銀河の中性水素

ガスの分布を調べて外層部をモデル化することにより決定したり<sup>3)</sup>、銀河、クエーサー、活動銀河核などからの紫外線の量を足し合わせることで見積もったり<sup>4)</sup>、あるいは比較的近くのクエーサーで先にのべた接近効果を調べることによっても求められている。接近効果で調べた結果によれば、 $z < 1$  では  $I_{21} = 0.065$ 、 $1.67 > z > 1$  では  $I_{21} = 0.1$  が示唆されている<sup>5)</sup>。

これに対し、 $z > 4$  の宇宙では  $I_{21}$  は昔に遡るにつれて急速に強度が落ちていくことが予想されている。筑波大学のグループでは、3次元空間で光がガス中をガス粒子と相互作用しながら進んでいく様子 (放射輸送) を調べることによって非一様宇宙の再電離の様子を明らかにした。そのうえで、コンピュータ上で作った宇宙を実際の観測と同じ手法で観測し、それを観測データと比較することによって紫外線背景放射場の進化をしらべた。その結果、 $z = 4$  を境に  $z$  の増加に対して激しく減少し、 $z = 3$  で  $I_{21} \approx 1$ 、 $z = 4$  で  $I_{21} \approx 0.1$ 、 $z = 5$  で  $I_{21} \approx 0.01$  であればよいことがわかった。以上をまとめると、紫外線の背景放射場は、 $z > 4$  の時代に急激に増加し、その後  $z = 2$  付近まではほぼ一定値 ( $I_{21} \approx 1$ ) をとり、その後現在にかけてゆっくりと一桁程度

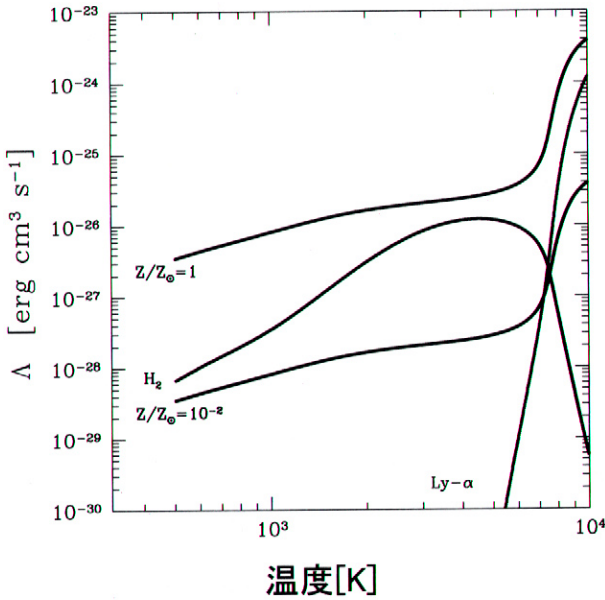


図1 1万度以下の冷却関数. それぞれの線はラベルがついており, それぞれ水素分子による冷却関数<sup>12)</sup>, 重元素によるもの<sup>13)</sup>, 水素原子のラインマン $\alpha$ 輝線によるものに対応している. 重元素によるものは重元素量を太陽組成と同じにしたものと, 組成は同じで量を100分の1にしたものを描いている.

の減少が見られる, というように進化してきたと考えられる<sup>1)</sup>.

## 2. 密度揺らぎの成長とガスの冷却, 加熱

ここで上記のような紫外線背景輻射場の銀河形成への影響を議論する前に, 銀河の種となる密度揺らぎの成長と, 天体形成にとって基本的に重要な冷却についてまとめておこう.

銀河は, 宇宙初期のごく小さい密度の揺らぎが自分の重さによって収縮し, その結果生まれると考えられている. 揺らぎによって密度が最初に少し高くなっていた領域は, 最初は宇宙とともに膨張するが, やがて収縮に転じ, 天体を形成する. ここでもしも系のエネルギーが保存すると考え, ビリアル定理 (安定な系の性質をあらわす力学の関

係式) を用いると, 銀河の大きさは最大膨張時 (膨張から収縮に転じるとき) の半分程度にしか縮めない. 密度にすれば最大膨張時のおよそ8倍, 銀河形成時の宇宙平均密度の約180倍程度となる. 今, 銀河の元となる揺らぎが $z = 4$ で天体を形成したとすれば, 先のビリアル定理とエネルギー保存則から導かれる天体の密度は, およそ $10^{-3}$ 個/cm<sup>3</sup>であり, これは銀河内ガスの現在の平均密度1個/cm<sup>3</sup>にくらべてはるかに小さい. したがって銀河形成が起きるには, かなりの量の熱エネルギーが取り除かれることで収縮しなければならないことがわかる. 一方, 原始組成のガスはさまざまな素過程によって放射冷却する. 主な冷却過程は1万度以上で水素原子, およびヘリウム原子 (束縛-束縛遷移, 束縛-自由遷移, 制動放射等) が担い, 1万度以下では水素分子の回転・振動順位間の遷移が担っている. 重元素が存在する場合には, これらも冷媒として振舞うが, 太陽組成の100分の1以下では千度以上の放射冷却にはあまり影響しない. 図1は特に1000度から1万度の間での

ガスの冷却率 (冷却関数) を描いている. 重元素による冷却への寄与は太陽の値とその100分の1の値を仮定している. この図で指摘しておくべきことは, 重元素による冷却は, 重元素量が太陽近傍の100分の1程度だと1000度から1万度の範囲では水素分子の寄与にくらべてあまり重要ではないということである. また観測から, 銀河間空間での重元素量はおよそ太陽近傍の100分の1程度と考えられており, この温度帯では水素分子による冷却がもっとも重要である.

さて原始銀河ガス中では, 形成時に断熱的にあるいは衝撃波加熱によって系のビリアル温度 (力学平衡な系を特徴付ける温度) 程度まで温度があがる. このまま熱エネルギーを失わなければ先に述べたようにそのまま銀河になることはない. 銀河のビリアル温度は質量によって大きく変化するが,

大きいもので50万度、小さいもので数千度から1万度程度となっている。これらの温度ではもっとも有効に放射冷却に寄与する素過程は様々で、互いに異なっている。しかし見方を変えて、単に少し密度を上げるだけでなく、銀河中で星形成が起きるほど放射冷却する必要があると考えてみる。銀河中の星形成領域は1万度よりはるかに冷たいことを考えると、どの銀河でも星形成が起きるためには1万度以下の冷却過程は等しく重要である、ということになる。この意味で星形成まで含めた意味での銀河形成の問題には、水素分子による放射冷却が不可欠である。これに対して本稿の主題である紫外線輻射場はガスを加熱する(光加熱)。これは紫外線が中性水素を電離する際に、自身のエネルギーから電離エネルギーを引いた差分を電子の運動エネルギー(すなわち熱エネルギー)としてあたえるというプロセスである。これによって銀河の種となるガスは高温に保たれる。前節で述べた観測的にもっともらしいと思われる値( $I_{21} = 0.1-1$ )を仮定し、輻射が十分原始銀河ガスに浸透していると仮定すると、放射冷却(主に水素の束縛—束縛遷移)と光加熱とのつりあいによって温度はほぼ1万度—10万度の範囲に保たれることが知られている<sup>6)</sup>。

### 3. 銀河形成への物理的影響

#### ～紫外線の原始銀河へのしみ込み具合の重要性

前節で見たように紫外線背景輻射場は、原始銀河ガスに十分浸透できれば、これを1万—10万度程度に加熱する。

その結果、銀河形成に対して二つの重要な効果が期待される。まず一つ目は比較的小さい銀河がその系全体の力学に強い影響を受ける効果である。これは銀河の質量が、加熱されたガスのジーンズ質量(自分の重力の強さとガスの圧力が釣り合う質量)を下回るときに顕著になる。つまり熱せられたガスの熱エネルギーが銀河の重力エネルギーを上

回り、銀河が収縮できなくなる。したがってこの加熱効果により矮小銀河の形成や、大銀河のダークハロー中の小構造の形成が阻害されることが期待される。

一方で、われわれの銀河系のような大銀河は系全体の力学としてはあまり影響を受けないことが予想される。これはもちろんわれわれの銀河の質量が光加熱によって加熱されたガスのジーンズ質量を大きく上回っており、十分重力が強いため少々の加熱でもその収縮は影響を受けないからである。

二つ目の重要な効果については前節で少し触れたが、銀河中の星形成の抑制である。まず、紫外線によって光加熱された銀河中でのジーンズ質量(ここでは特に1万度以下での冷却が利かない場合の予想される星の質量)を計算してみると、銀河ガスの密度を $1\text{ cm}^{-3}$ として計算するとおよそ10万太陽質量になり、これは星の質量からはかけ離れており、さらに何らかの冷却過程が働かなければ星形成はおきないであろう。これは観測的にもある程度裏付けられている。実際に近くの矮小銀河の中性水素を観測すると、冷たい領域( $\sigma \sim 4\text{ km/s}$ )と高温の領域( $\sigma \sim 10\text{ km/s}$ )が観測されており、この冷たい中性水素領域の存在が、銀河中の星形成活動と強い相関をもっていることが指摘されている<sup>7)</sup>。

このように、もしも紫外線光子が原始銀河ガスに十分しみ込む場合には、小さい銀河は形成が阻害され、大きい銀河は全体の形成は阻害されないもののその内部での星形成が大きな影響を受けることが予想される。しかし原始銀河雲に紫外線輻射が十分浸透するかどうかは、計算してみなければわからない(このような計算を輻射輸送の計算という)。紫外線光子が、原始銀河外層のガスに吸収されて、銀河内部が電離および加熱から免れる効果を「自己遮蔽」という。この自己遮蔽の程度が銀河中の星形成への紫外線輻射場の影響、あるいは小さい銀河が紫外線輻射場による加熱に耐えて生き残るかどうかを決める物理であるといえる。

水素原子核数/1平方センチ:  $3 \times 10^{21}$  乗

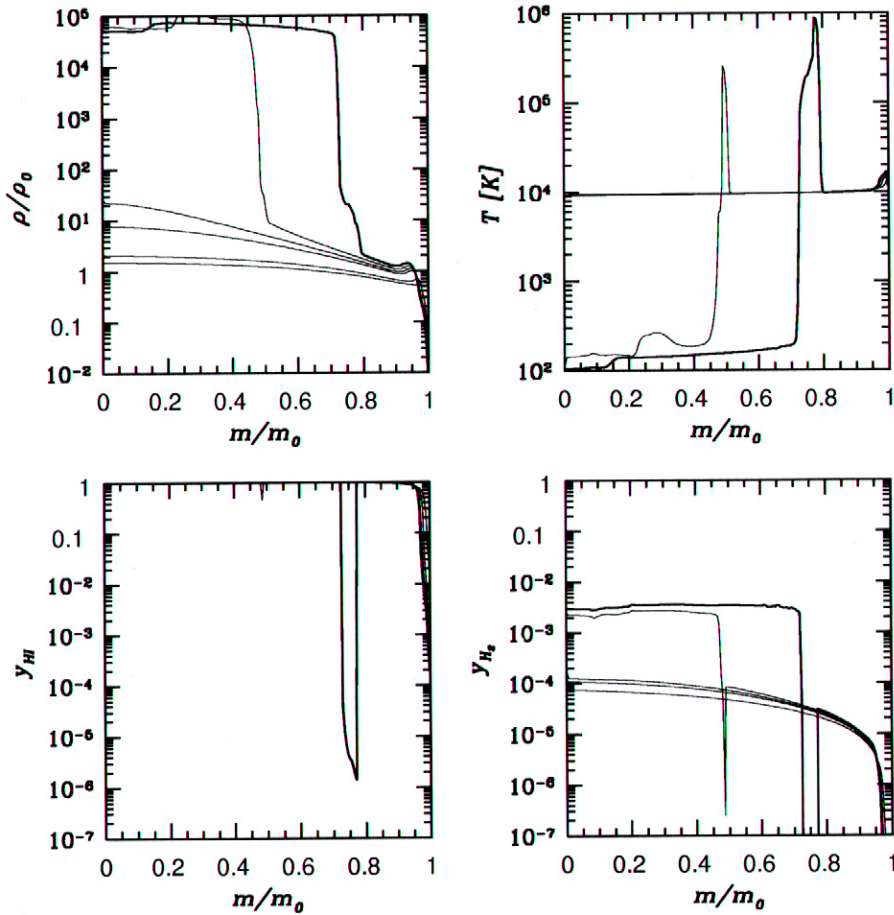


図2 中心面に向かって収縮する平行平板の物理量の空間分布. 複数の線があるのはいくつかの時刻でのスナップショットに対応している. もっとも太い線が最終状態を表している. 横軸は中心から測ったラグランジュ座標 (物質に固定した座標), 4つの図の縦軸はそれぞれ, 左上は密度, 右上は温度, 左下は中性水素の質量比, 右下は水素分子の質量比をあらわす. この図は比較的柱密度が大きく, 中心部が収縮とともに自己遮蔽されて冷却する場合である.

#### 4. 多様な銀河と紫外背景放射場の関係

##### 1) 大きな銀河の分岐

前節で見たように紫外線の背景放射場は銀河形成に対してさまざまな物理的影響を持つ. このような素過程を取り入れてわれわれはいくつか数値

実験を行った. まず比較的大きな銀河 ( $M > 10^{10}$  太陽質量) について知見を得るために, 1次元面対称の仮定の下で, ガス雲の重力収縮を調べた<sup>8)</sup>. この計算では電離光子のしみ込み具合, 放射冷却, 1次元の流体力学を正しく考慮して計算を行った. その結果, 結果は初期条件によって2つのクラスに分かれることがわかった. 図2と3に典型的な

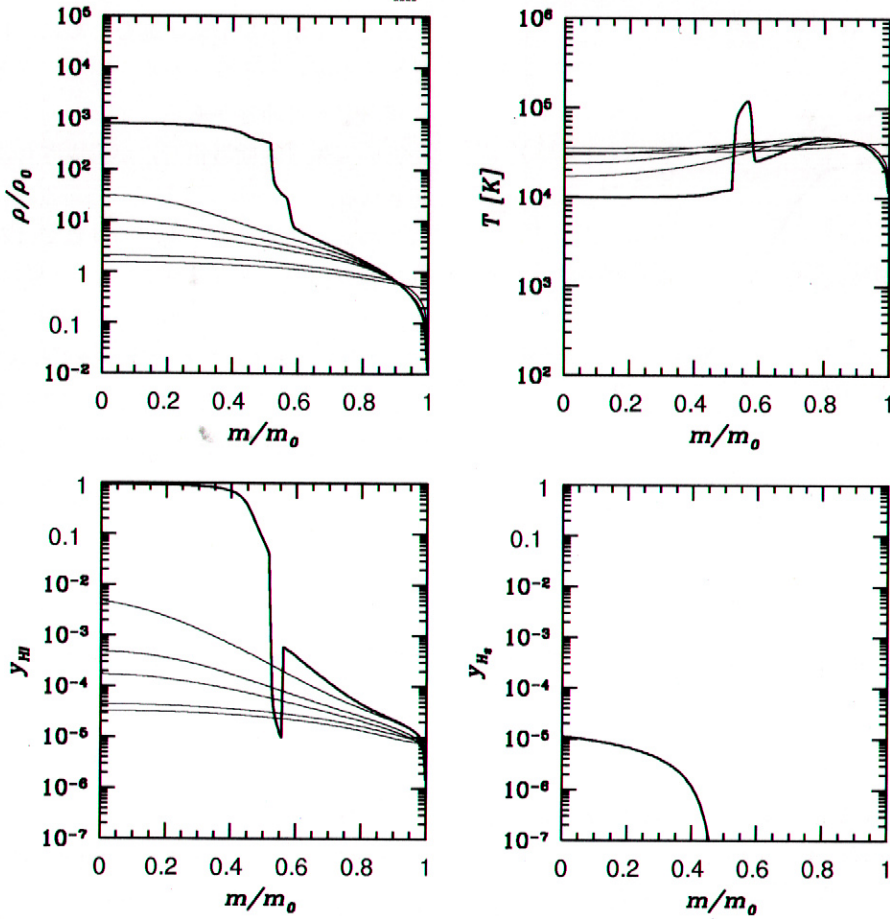
水素原子核数/1平方センチ:  $1.5 \times 10^{19}$  乗

図3 図2と同じだが、比較的柱密度の小さい場合の結果である。

2つの結果を示す。図2は水素の柱密度が比較的大きいケースのさまざまな物理量の空間分布である。重要なことは初期には外部からの紫外線輻射場が浸透してほぼ1万度付近に加熱されているが、その後の収縮の過程で内部が徐々に遮蔽され、最終的には内側で100度付近まで冷却が進むということである。また内部の遮蔽された領域では、低温での冷媒である水素分子が多量に作られていることもわかる。それに対して図3では水素の柱密度が比較的小さい場合に対応しており、この場合

には系の収縮が進んでも、遮蔽効果が効かないので中心部で水素分子もあまりできない。結果として温度も下がらず、圧力によって収縮がとめられてしまう。ほかにも多くのパラメータで計算を行い、結果をまとめると、2つのクラスはほぼ  $M_{SB} = 2.2 \times 10^{11} M_{\odot} [(1+z_c) 5]^{-4.2} (I_{21}/0.1)^{0.6}$  で表される境界によって分けられる。ここで  $z_c$  は銀河の形成時期である。問題はこのクラスわけと実際の銀河との対応だが、筆者らは以下のように理解できると考えた。まず、遮蔽されて冷却した領域では

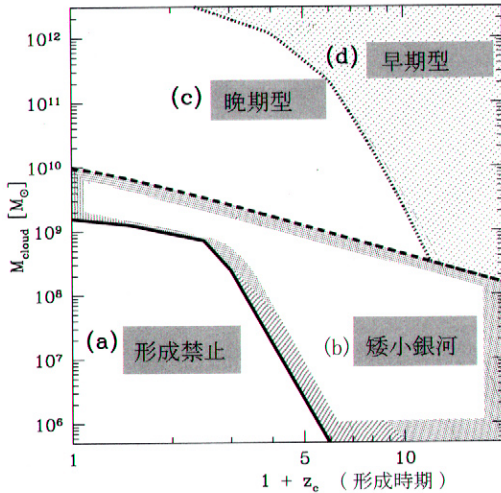


図4 形成期と質量で、銀河形成過程のクラスを分けた図。領域(a)では加熱によって銀河形成が禁止される。(b)では禁止はされないが、加熱されたガスの圧力が重力と同等に重要な値を持つ。比較的小さい質量の銀河(矮小銀河)が形成されることが予想される。(c)は、加熱による系全体の収縮の阻害は起きないが、星形成は抑制される(円盤銀河)。(d)は系全体の収縮も星形成も阻害されない(楕円銀河、銀河バルジ)。

星形成が活発に進むと考えると、 $M > M_{SB}$ の天体では系全体での収縮が進む前に、すなわち平板に平行な方向への収縮が進む前に星形成が進むことになる。このように「星形成→系全体の重力エネルギーの解放」の順序で銀河形成が進む場合は、非散逸的銀河形成のシナリオと呼ばれる。このようなシナリオではもともと銀河のもっている回転エネルギーが小さいために、最終的に回転で支えられる系には落ち着かず、楕円銀河、あるいは銀河バルジのような天体(早期型銀河)が形成されることが予想される。

それに対し、 $M < M_{SB}$ の系では、1次元方向への収縮が進んでもそれだけでは冷却が進まず、星形成はおきにくいと思われる。したがってさらに平板に平行な方向にさらに収縮が進まなければ星形成が起きないということになる。このように「系全

体が重力エネルギーを開放→星形成」の順序で銀河形成が進む場合は、散逸的銀河形成のシナリオと呼ばれる。このシナリオでは、重力エネルギーを十分失ってから星形成が進むために、相対的に回転エネルギーが重要となり、回転で支えられた系に落ち着く可能性がある。すなわちより円盤銀河に近い天体(晚期型銀河)が形成されることが予想される。

このように簡単な1次元の計算ではあるが、紫外線背景放射場の浸透具合によって銀河の代表的な形態である早期型と晚期型が説明できる可能性がある。もっとも、現在広く受け入れられているコールドダークマター宇宙では、小さい構造から階層的に形成が進む。結果としてこのピクチャーのような滑らかな媒質からの銀河形成はひとつの極限の場合であり、現実にはより凹凸の激しい媒質で銀河ができることが予想される。したがって現実の宇宙でこのような銀河形態の分岐が放射の浸透度によっておきるかどうかを調べるためには、凹凸のある3次元の放射流体計算を行う必要があり、現在それに取り組んでいる<sup>9)</sup>。

## 2) 小さな銀河はどうなる？

一方、より小さな銀河の形成時における背景放射場の役割も重大である。光加熱された銀河の種となるガスが1万度-10万度に加熱されているために、ビリアル温度が1万度以下となるような小さな系(およそ矮小銀河程度の大きさ以下の系)は先に述べたようにガス成分が収縮できない。また収縮したとしても十分冷却して星成分に転換されなければ、外層からガスが剥ぎ取られて蒸発してしまう。したがって、ガスが水素分子によって十分冷却し、冷たい中性水素領域ができて初めて小質量の銀河が形成されると考えるべきである。

この問題に関してもわれわれのグループで、1次元球対称の仮定のもとで数値計算を行った<sup>10)</sup>。ここで1)と違い、球対称を仮定したのは、この質量スケールでは電離ガスの圧力によって収縮が比較

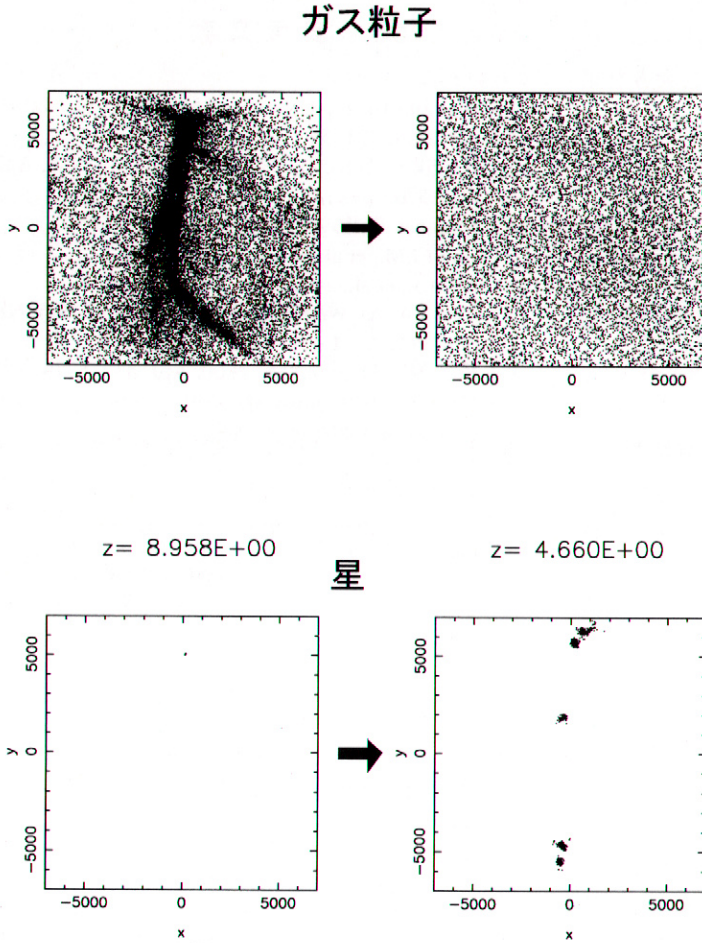


図5  $z_c = 1.5, M = 2 \times 10^8 M_\odot$  の銀河がコールドダークマター宇宙でどのように形成されるかを輻射流体計算によって行った例。左の列は宇宙再電離の前の状態をあらわし、右の列は後の状態を表す。また上の行はガス粒子の分布を表し、下の行は数値的に形成された星粒子の分布を表す。再電離後にはほとんどのガスは失われるが、密度揺らぎのピークの位置では星形成が進んでいることがわかる。

的球対称にすすむことを期待しているためである。その結果は図4に1)の大きい銀河の結果とあわせて示されている。図4の横軸は天体の形成される赤方偏移、縦軸は天体のガス質量である。まず(a)で示されている領域は、光加熱によって天体形成が阻害されてしまい、冷たい中性水素領域が形成されないまま、圧力によって膨張してしまう。それに対して(b)であらわされる領域は球対称の

計算で冷たい中性水素領域が形成されたパラメータ範囲である。したがって小さい銀河の形成は赤方偏移の小さいところ( $z < 4$ )では紫外輻射場によって著しく阻害されるということがわかる。これに対して領域(c)と(d)は、系の質量が(先にのべたゾーンズ質量より)十分大きいために、電離ガスの圧力があまり重要でなく、収縮が球対称には進まないことが予想される。そこで1)の1次元面対称の結果を使うと、 $M_{SB}$ によって二つの領域に分けることができ、(c)は晩期型の銀河になり、(d)は早期型になることが予想される。このように小さい銀河の形成において光加熱されたガスの圧力が天体形成を妨げる重要な要因となるが、この計算についてもやはり滑らかな球対称の分布を仮定していることによる実際の宇宙での銀河形成との違いは無視できないであろう。実際に筆者は今3次元の計算によって、図4の領域(a)のパラメータで、実際に何が起きるかをしらべている<sup>11)</sup>。3次元計算でコールドダークマター宇宙の揺らぎを考

慮した場合、図5のように、滑らかな球対称の場合とは異なって、より小さい質量の天体がいち早く形成し、自己遮蔽した領域を作って直ちに冷却する。これはコールドダークマター宇宙での密度揺らぎは、小さいスケールのものほど最初から大きい値をとるからである。

もちろん質量の大部分は光加熱によって蒸発するので、定性的には1次元計算と同じだが、完全

に蒸発するのではなく一部は星になる。一方、ダークマターは加熱されたガスの圧力を感じることなく集まるので質量と明るさの比が非常に大きな銀河ができるのではないかと考えられる。

## 5. まとめ

本稿では紫外線の背景放射場が銀河形成に及ぼす影響について概観し、筆者らによるいくつかの計算を紹介してきた。それによれば、紫外線背景放射場は、いくつかの物理的に重要な効果を持つが、大きく分けて2つの効果が期待される。まず①光加熱による原始銀河中での星形成の抑制効果、もうひとつは②同じく光加熱によって数万度付近に温度が保たれるために、小さい天体（小さめの矮小銀河クラスの天体）の形成そのものを著しく阻害する効果である。①の効果が著しければ銀河は円盤銀河に進化し、あまり重要でなければ楕円銀河あるいは銀河バルジに進化することが期待される。また②は形成時期が比較的新しく ( $z \leq 4$ ) 質量の小さい ( $M \leq 10^9 M_{\odot}$ ) 銀河の形成を妨げることがわかった。今後は、3次元の放射流体計算を駆使してより現実的な銀河形成モデルの構築を目指していこうと考えている。

## 謝辞

本稿は主に梅村雅之氏、北山 哲氏との共同研究に基づいています。改めて両氏に感謝いたします。立教大学の牧秀樹氏には校正の段階で助けていただきました。ありがとうございました。また、ほとんどの計算は筑波大学計算物理学研究センターの計算設備を使用させていただきました。ありがとうございました。

## 参考文献

- 1) Nakamoto T., Umemura M., Susa H., 2001, MNRAS, 321, 593
- 2) Bajtlik S., Duncan R. C., Ostriker J. P., 1988, ApJ, 327, 570
- 3) Maloney P., 1993, ApJ, 414, 41
- 4) Shull J.M., et al., 1999, AJ, 118, 1450
- 5) Scott J., et al., 2002, ApJ, 571, 665
- 6) Thoul A. A., Weinberg D. H., 1996, ApJ, 465, 608
- 7) Young L. M., Lo K. Y., 1997, ApJ, 490, 710
- 8) Susa H., Umemura M., 2000, ApJ, 537, 5789
- 9) Susa H., Umemura M., 2001, in proc. of IAU Symposium 208, in press
- 10) Kitayama T., Susa H., M.Umemura., S. Ikeuchi., 2001, MNRAS, 326, 1353
- 11) Susa H., Umemura M., 2002, in proc. of Numerical Simulations in Astronomy 2002, in press
- 12) Hollenbach D., Mckee C. F., 1979, ApJS, 41, 555
- 13) Dalgarno A., McCray R. A., 1972, A R A&A, 10, 375

### Role of Ultraviolet Background Radiation Field on the Formation of Galaxies

Hajime SUSA

College of Science, Rikkyo University

Abstract: There are various types of galaxies in our universe. They are distributed over six orders of magnitude in mass, and have wide varieties of morphologies and colors. It is one of the main and far-reaching research themes in the present cosmology how these galaxies are formed and they come to have such diversity. These varieties might be caused by ultraviolet background radiation field (UVB) filled the universe in the era of galaxy formation, because UVB introduces a few physical scales to the formation processes of galaxies. In this paper, I will try to outline the effects of ultraviolet background radiation field on the formation of galaxies.