

連載

最新宇宙誌【13】

エポック : 星と銀河の形成

～構造形成の時代 (中編)～

福江 純 (大阪教育大学)

承 前 (『天文教育』2009年5月号より)

宇宙の暗黒時代については、すでに述べたとおりである。宇宙初期の高温プラズマが再結合して宇宙が晴れ渡り透明となった約 38 万年 (赤方偏移 1088) 時点から、最初の星あるいは銀河が形成される約 2 億年 (赤方偏移 10 ぐらい) 時点ぐらいの間は、宇宙に光るモノが存在しなかった。いずれはニュートリノや重力波でその時代を調べることも可能になるかもしれないが、現在のところはその時代を探る術がないため、その間は宇宙の暗黒時代となっている。しかし、その宇宙の暗黒時代に、銀河や銀河団など現在の宇宙に存在する大規模構造の骨組みができあがっていったことは、まず間違いない。人類の歴史と同じく、記録の存在しない暗黒時代こそが、宇宙の歴史の上でも重要な時代だったのだ (図 26)。

暗黒時代にできあがっていったはずの大規模構造を観測的に調べるためには2つの方向がある。一つは、2dF や SDSS などに代表されるように、現在に近い側から、銀河や銀河団の分布を過去に遡って調べる方法だ。もう一つは、暗黒時代の過去の側において、大規模構造のタネを調べる方法だ。こちらは 3K 宇宙背景放射を利用する (後述する)。

観測と並行して、理論的研究も必要なのだが、銀河や大規模構造の形成に関する理論は、ぼくが大学院に在籍していた 1980 年ごろの境に大きく変化したと思う。

まず 1980 年ごろ以前の銀河形成理論は、非常に素朴ながらも基本的な理論が並立していた。

有力な説の一つに、トップダウン式に、まず超銀河団ほどの大きなガス雲が重力によって収縮し、その過程で、銀河団ほどのガス雲に分裂し、さらに多数の銀河に分裂していったという、「パンケーキ説 (pancake model)」である。旧ソ連のゼルドヴィッチらが中心に唱えていた、と思う。

もう一つの立場としては、逆に、ボトムアップ式に、まず最初に、球状星団のような銀河より小さい規模の天体ができ、それらが集まり銀河を作り、さらに重力の作用で銀河が集まって、銀河団や超銀河団になっていったという「重力クラスタリング説 (gravitational clustering model)」があっ

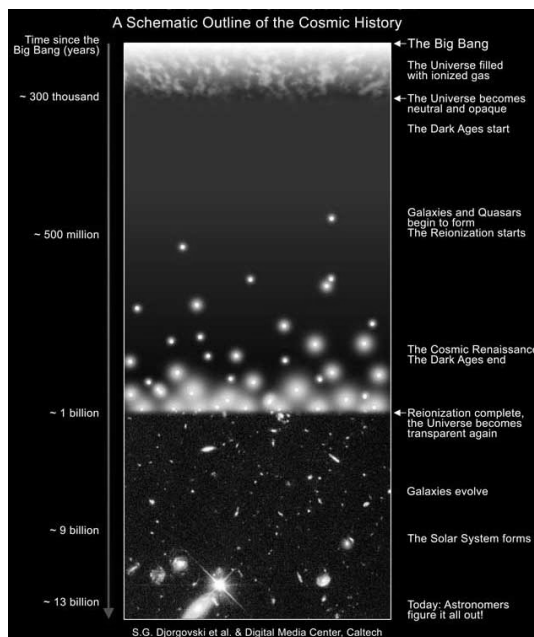


図 26 宇宙の晴れ上がり、暗黒時代、再電離 (出典 : http://abyss.uoregon.edu/~js/images/dark_ages.jpg)

た（図 27）。アメリカのピーブルスらが中心だった。

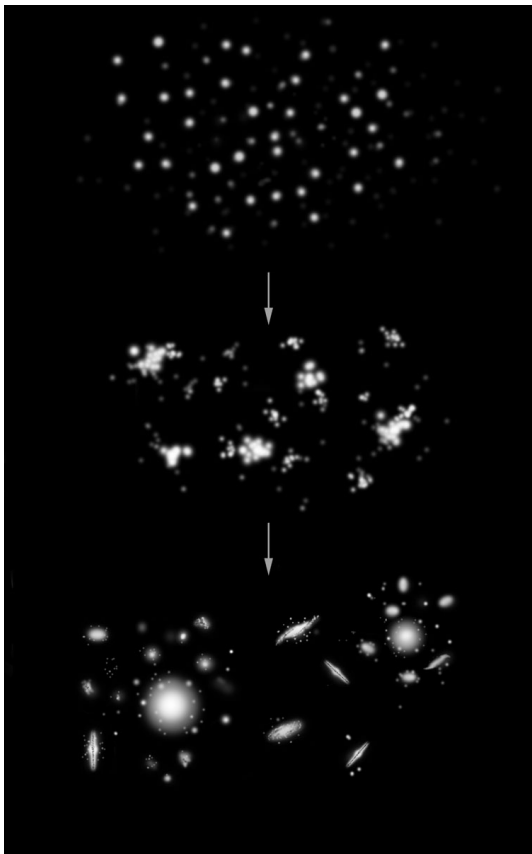


図 27 銀河の形成

まず比較的小さなサイズの天体ができて、それらが集まり、銀河や銀河団になっていったのだろうか。

（出典：http://www.gemini.edu/files/docman/press_releases/pr2004-1/Galaxy-formation_med.jpg）

このような状況にあった中で、1980年代には、観測的および理論的に大きな展開が起こった。その当時、観測的な側面としては、ダークマターの存在が広範に受け入れられるようになってきた。ダークマターについては、銀河団の振る舞いを調べていたツヴィッキー（Fritz Zwicky）が 1933 年にはすでにその

存在を指摘していたのだが、銀河の回転曲線など多くの観測的証拠が集まり、ダークマターの存在を信じざるを得なくなったのが 1980 年代である。

また主に理論的には、小林益川理論で導かれた素粒子の三世代モデルによって、ニュートリノなど素粒子の性質がかなりわかってきて、いわゆる素粒子論的宇宙論が論じられるようになってきた。

これらの結果、1980 年代以降は、銀河や大規模構造の形成を論じるためには、（冷たい）ダークマターと素粒子論的宇宙論をベースにすることになったのだ。

4. 重力不安定とジーンズ質量

宇宙におけるさまざまな構造は、もとは非常に小さなゆらぎ（タネ）が、次第に成長し、複雑に絡み合っ、できあがっていったものだと考えられる。すなわち、宇宙のごく初期、インフレーションからビッグバンに移行したころは、宇宙は全体としてほとんど均質だったろう。ただし、その中でも、ほんのわずかな“ゆらぎ”があったと考えられている（3K 宇宙背景放射にもムラムラとして残っているものだ）。そのゆらぎは、一番最初は量子的なゆらぎだったかもしれないし、カオス的なゆらぎだったかもしれないが、ある程度マクロになった段階では、一般に「密度ゆらぎ（density perturbation）」と呼んでいる。そのような密度ゆらぎが重力作用によって次第に成長していくのが最初の段階だった。

構造形成の基礎的概念として、ここでは膨張宇宙における密度ゆらぎの重力不安定について、まとめておく。

4.1 重力不安定

まず最初に、星間ガスから星ができるような、通常の空間での重力不安定を導いておこう。

星間ガスにせよ銀河間ガスにせよ、地球大気などに比べれば真空に近いほど希薄だが、物質であるからには重力によって引き寄せ合っている。一方、同時に、ガス同士の圧力によって反発し合っている（磁場や回転も反発力として働くが、簡単のために以下では考えない）。

もし身の回りの空気のように重力よりも圧力の方が大きければ、重力的に収縮することはないが、重力の方が圧力より優れば、重力的に不安定になり収縮を起し始める。これを「重力不安定 (gravitational instability)」とかイギリスの物理学者ジェームズ・ジーンズ (James Jeans) にちなんで「ジーンズ不安定 (Jeans instability)」と呼ぶ。

ガスの密度や圧力が一定ならば、大きな体積を取れば取るほど、中に含まれる質量は大きくなるので、したがって重力も大きくなり、いつかは重力不安定が起きる。すなわち重力不安定を起す質量には、ガスの温度や密度で決まる臨界値が存在する。以下、定性的な議論 (オーダーエスティメーション) によって、その臨界質量を求めてみよう。

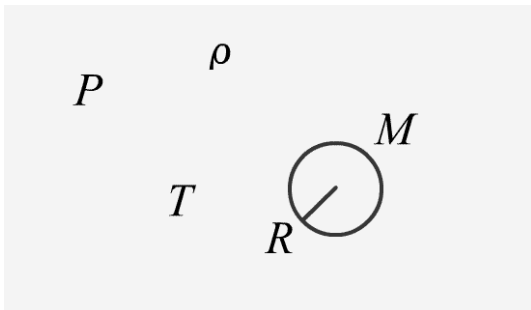


図 28 一様なガス中に想定した、半径が R で質量が M の仮想球体

星間ガスが均質な密度 ρ 、一定の温度 T で一様に広がっているとすると (図 28)。このとき、星間ガスの圧力 P も一定で、理想気体の状態方程式 (ボイル=シャルルの法則) から、

$$P = \frac{R_g}{\mu} \rho T \quad (1)$$

となる。ただしここで、 $R_g (= 8.314 \times 10^7 \text{ erg g}^{-1} \text{ deg}^{-1})$ は気体定数で、 μ はガスの平均分子量である。中性水素の場合、 $\mu = 1$ としてよい。

さて、この星間ガスの一部で、半径 R の領域を考えてみよう。この中に含まれる質量 M は、当然、以下のようなになる。

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \quad (2)$$

この球状部分のガスが、自分自身の重力で収縮しようとする力と、ガスの圧力で拮抗しようとする力を比較するのだが、その際に、周囲のガスのことは忘れてしまうのが、こういうときの秘訣である。またオーダー評価ということで、重力は質量 M の物質が自分自身 (質量 M) と引き合う万有引力程度とする。ガスの圧力は、圧力差があってはじめて作用するので、中心の高圧部 (圧力 P) と周辺の低圧部 (圧力 0) が半径 R で拮抗していると考える。

そうすると、結局、この半径 R の領域がお互いに引き合う重力の強さ (圧力差と揃えるために単位体積あたりとした) と、この領域における圧力勾配力 (圧力差) は、それぞれ、以下のようなになる。

$$F_{\text{grav}} \sim \frac{GM\rho}{R^2} \quad (3)$$

$$F_{\text{gas}} \sim \frac{P}{R} \quad (4)$$

このラフな評価の後には一本道だ。もし前者 (重力) が後者 (圧力) より大きくなれば、考えている領域は重力的に不安定になり、収縮を始めるだろう。すなわち、重力不安定が起こる条件として、以下の不等式が得られる。

なお、不等式の後半では、状態方程式 (1) を用いた。

$$\frac{GM}{R} > \frac{P}{\rho} = \frac{\mathcal{R}_g T}{\mu} \quad (5)$$

さらに (2) 式を使うと、ガスの密度と圧力の関数として、重力不安定を起し始める臨界半径および臨界質量が得られる。この臨界半径 R_J を「ジーンズ半径 (Jeans radius)」、臨界質量 M_J を「ジーンズ質量 (Jeans mass)」と呼ぶ (以下の (6) 式と (7) 式)。なお、以下の (8) にあるように、理想気体の音速 c_s を用いると、ジーンズ半径およびジーンズ質量は、もう少しすっきりした形に表せる。

$$R > R_J \equiv \sqrt{\frac{\mathcal{R}_g T}{4\pi G \mu \rho}} \quad (6)$$

$$M > M_J \equiv \sqrt{\frac{\mathcal{R}_g^3 T^3}{36\pi G^3 \mu^3 \rho}} \quad (7)$$

$$c_s^2 \equiv \frac{\mathcal{R}_g T}{\mu} \quad (8)$$

$$R_J \equiv \sqrt{\frac{c_s^2}{4\pi G \rho}} \quad (9)$$

$$M_J \equiv \sqrt{\frac{c_s^6}{36\pi G^3 \rho}} \quad (10)$$

以上は、定性的な話だが、定量的で正確な議論をする際には、一様な媒質に微小なゆらぎ (線形ゆらぎ) を与えて、いわゆる「線形解析」を行う。そうした線形解析で得られるジーンズ半径とジーンズ質量は、以下の (11) 式から (14) 式のようになる。

定性的な結果と比較してわかるように、密度や温度など物理量への依存性は変わらない。数値係数が少し違うだけに過ぎない。つまり、本質的な部分はオーダー評価で尽きているのである。すなわち、密度が均質で温度が一定

$$R_J \equiv \sqrt{\frac{4\pi \mathcal{R}_g T}{G \mu \rho}} \quad (11)$$

$$= \sqrt{\frac{4\pi c_s^2}{G \rho}} \quad (12)$$

$$M_J \equiv \sqrt{\frac{16\pi^5 \mathcal{R}_g^3 T^3}{9G^3 \mu^3 \rho}} \quad (13)$$

$$= \sqrt{\frac{16\pi^5 c_s^6}{9G^3 \rho}} \quad (14)$$

の一様なガス中で、ジーンズ半径/ジーンズ質量よりも大きな領域 (ガス塊) は、自然に発生するゆらぎで少し収縮したりすると、重力の方が強く、そのまま収縮し続けてしまうのだ。これが重力不安定である。

逆に、ジーンズ半径/ジーンズ質量に満たない領域は、何らかのゆらぎで少し収縮したとすると、密度が高くなり圧力も高くなる。そして、重力作用よりも、圧力による反発力でもとに拮抗しようとする作用の方が強く、その結果、膨らんでしまう。そして膨らむと、ものごとには勢いというものがあるため、もとの大きさよりも膨らみすぎて、密度や圧力が少し下がり、今度は収縮に転じる。その結果生じる圧縮性の振動は、まさに「音波」と同じもので、圧力を復元力とする振動になってしまうのだ。

力学系においては、振動と不安定は、ある臨界値を境にした、隣り合わせの現象である。

星間雲や分子雲などに対応するいくつかの密度や温度に対する、ジーンズ半径とジーンズ質量を表に示しておく。

表 1 ジーンズ半径とジーンズ質量

n	T	R_J	M_J
100 個/cm ³	100K	10pc	10 ⁴ M_\odot
10 ⁴ 個/cm ³	100K	1pc	10 ³ M_\odot

4.2 膨張宇宙での重力不安定

膨張宇宙における重力不安定も、星間空間の場合と基本的には同じである。ただし、いくつか変更しなければならない。

まず、膨張宇宙では、媒質の密度や温度は時間 (赤方偏移) と共に変化するので、考える時期によって、ジーンズ半径やジーンズ質量は変化する。宇宙の平均密度 (輻射密度 + 物質密度) や温度は時間 (赤方偏移) の関数としてわかっているので、結局、膨張宇宙においては、ジーンズ半径やジーンズ質量を時間 (赤方偏移) の関数として求めることになる。

また星間空間では、通常はガス物質だけで

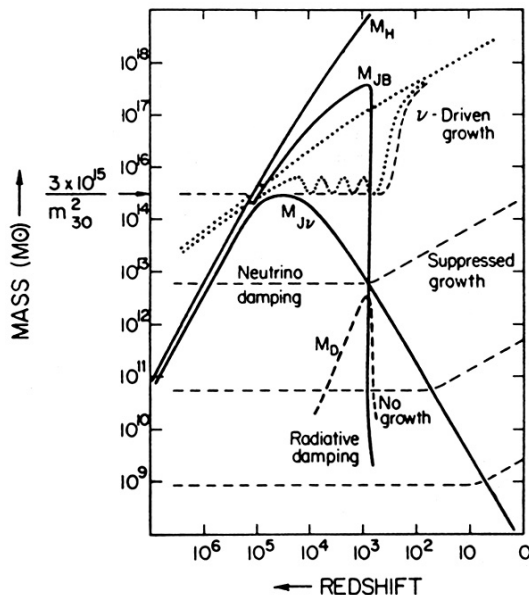


図 29 横軸を赤方偏移 (左が宇宙初期、右端が現在) としたときの、さまざまな質量 (太陽質量単位) の時間変化 (after Silk 1982) 上から、地平線質量 M_H 、バリオンのジーンズ質量 M_{JB} 、ニュートリノのジーンズ質量 $M_{J\nu}$ 、散逸質量 M_0 などを表す。ただし、30 年近く前の図なので、数値的にはかなり違っている。

(出典 : <http://nedwww.ipac.caltech.edu/level1/March02/Efstathiou/Figures/figure9.1.jpg>)

考えればいいが、膨張宇宙では、輻射の存在が重要になる。等密度時以前には、そもそも宇宙のエネルギー密度は輻射密度が優勢である。等密度時以降でも、再結合時以前だと、輻射圧がガス圧より優っている。ジーンズ質量に対して輻射の影響がなくなるのは、再結合時以降である。

さらに、膨張宇宙においては、ジーンズ質量に関連して、地平線質量と散逸質量 (シルク質量) という量も重要になってくる (図 29)。いきなり全体図を見せられても何が何だかだろうし、以下では、それらをひとつひとつ順に計算していこう。何しろ、ぼく自身、実際に手を動かして計算するのははじめてだ。教科書などに結果だけはたいてい書いてあるのだが、なかなか思う値が出てこない。結局、半年ぐらい頭をあれこれ悩ましたが、ここで潮時だろうか。半年前の文章は他人が書いたみたいになってきたし (笑)。

4.2.1 膨張宇宙の物理量 (まとめ)

最初に、以下の計算で用いる数値などについて、すでに掲載したものが大部分だが、ここで簡単にまとめておく。

まず、宇宙年齢、ハッブル定数、その逆数のハッブル時間、そして臨界密度など、膨張宇宙の基本パラメータが (15) 式から (18) 式である。また、臨界密度をベースとした密度パラメータが (19) 式から (23) 式である。これらは宇宙の内容物の内訳でもある。

基本パラメータ

$$t_0 = 137 \text{ 億年} \quad (15)$$

$$H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc} \quad (16)$$

$$\frac{1}{H_0} = 1.356 \times 10^{10} \text{ yr} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \rho_{c,0} &= \frac{3H_0^2}{8\pi G} \\ &= 1.0 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3 \quad (18) \end{aligned}$$

密度パラメータ

$$\Omega_0 \equiv \frac{\rho(t_0)}{\rho_{c,0}} = \frac{\rho_0}{\rho_{c,0}} \quad (19)$$

$$\Omega_{r,0} \sim 8.4 \times 10^{-5} \quad (20)$$

$$\Omega_{m,0} \sim 0.3 \quad (21)$$

$$\Omega_{\Lambda,0} \sim 0.7 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Omega_0 &= \Omega_{r,0} + \Omega_{m,0} + \Omega_{\Lambda,0} \\ &= 1 \end{aligned} \quad (23)$$

つぎに、宇宙の膨張則（時間の関数として表した赤方偏移）およびその逆関数（赤方偏移の関数として表した時間）が、放射優勢期と物質優勢期のそれぞれについて、(24)式から(27)式となる。これらの式で、必要な場合には、ハッブル定数その他のパラメータには、最初にまとめた基本パラメータを代入する。

膨張則

放射優勢宇宙

$$\frac{1}{1+z} = \frac{a}{a_0} = \sqrt{2\sqrt{\Omega_{r,0}}H_0t} \quad (24)$$

$$H_0t = \frac{1}{2\sqrt{\Omega_{r,0}}}(1+z)^{-2} \quad (25)$$

物質優勢宇宙

$$\frac{1}{1+z} = \frac{a}{a_0} = \left(\frac{3}{2}\sqrt{\Omega_{m,0}}H_0t\right)^{2/3} \quad (26)$$

$$H_0t = \frac{2}{3\sqrt{\Omega_{m,0}}}(1+z)^{-3/2} \quad (27)$$

密度変化

$$\begin{aligned} \rho_r(z) &= \rho_{r,0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^4 \\ &= \rho_{r,0}(1+z)^4 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \rho_m(z) &= \rho_{m,0} \left(\frac{a_0}{a}\right)^3 \\ &= \rho_{m,0}(1+z)^3 \end{aligned} \quad (29)$$

温度変化

$$\begin{aligned} T_r(z) &= \propto \rho_r \propto a^{-1} \\ &\propto (1+z) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} T_m(z) &= \propto \rho_m^{2/3} \propto a^{-2} \\ &\propto (1+z)^2 \end{aligned} \quad (31)$$

また、宇宙膨張における密度変化（輻射密度と物質密度）と温度変化（輻射温度と物質温度）は、それぞれ(28)式から(31)式となる。なお、時間の関数として表すなら、放射優勢期と物質優勢期は別の表現になるが、赤方偏移の関数として表している範囲では、同じ形になる。

最後に、上記の基本パラメータや膨張則などと合致するように定めた（どちらが先というものでもないが）、基本時代の境界における赤方偏移・時刻・温度などを(32)式から(47)式にまとめておく。

基本時代の境界値 等密度時

$$z = 3570 \quad (32)$$

$$t = 47000 \text{ yr} \quad (33)$$

$$H_0t = 3.465 \times 10^{-6} \quad (34)$$

$$T = 9730 \quad (35)$$

再結合時

$$z = 1370 \quad (36)$$

$$t = 240000 \text{ yr} \quad (37)$$

$$H_0t = 1.769 \times 10^{-5} \quad (38)$$

$$T = 3737 \quad (39)$$

晴れ上がり時

$$z = 1088 \quad (40)$$

$$t = 380000 \text{ yr} \quad (41)$$

$$H_0t = 2.801 \times 10^{-5} \quad (42)$$

$$T = 2968 \quad (43)$$

現在

$$z = 0 \quad (44)$$

$$t = 137 \text{ 億年} \quad (45)$$

$$H_0t = 1.217 \quad (46)$$

$$T = 2.728 \quad (47)$$

実は、これらのパラメータの値が少し違っただけで、ジーンズ質量その他の見積もりが桁で違ってしまう。さまざまな教科書などではそれぞれ微妙に異なるパラメータが使われ

ているため、なかなか数値が一致せずに整合性が取れなかったが、ここでは上記の値を用いた計算だと考えて欲しい。

4.2.2 地平線質量

まず最初に、先の図 29 に示されたさまざまな質量のうち、宇宙の地平線内に存在する「地平線質量 (horizon mass)」 M_H について説明する。

ここで「宇宙の地平線 (horizon)」とは、宇宙が生まれてから光が到達しうる距離、すなわちある時刻以内で因果関係をもちうる距離のことで、おおざっぱには、(48) 式のように、宇宙誕生以来の時刻に光速を掛けたもので表される。細かい計算では 2 が付いたり 3 が付いたりするようだが、ここでは (48) 式の形にしておく。

地平線半径と地平線質量

$$r_H = ct = \frac{c}{H_0} H_0 t \quad (48)$$

$$M_H = \frac{4\pi}{3} \rho_m r_H^3 \quad (49)$$

放射優勢宇宙

$$r_H = 7.02 \times 10^{29} \text{ cm } (1+z)^{-2} \quad (50)$$

$$= 5.51 \times 10^{22} \text{ cm at } z = 3570$$

$$M_H = 2.18 \times 10^{27} M_\odot (1+z)^{-3} \quad (51)$$

$$= 4.80 \times 10^{16} M_\odot \text{ at } z = 3570$$

物質優勢宇宙

$$r_H = 1.57 \times 10^{28} \text{ cm } (1+z)^{-3/2} \quad (52)$$

$$= 7.34 \times 10^{22} \text{ cm at } z = 3570$$

$$M_H = 2.42 \times 10^{22} M_\odot (1+z)^{-3/2} \quad (53)$$

$$= 1.14 \times 10^{17} M_\odot \text{ at } z = 3570$$

また、ここで地平線と言っているのは実際には「粒子的地平線 (particle horizon)」と呼ばれるもので、(48) 式のように時間と共に光速で広がっていく。それに対して、いくら時間が経っても絶対的に観測できない「事

象の地平線 (event horizon)」という領域も場合によっては存在するが、まあ、ここではあまり関係ない。

そして、この宇宙の地平線内に存在する物質の質量が地平線質量である。こちらは単純に、地平線内の体積 (時間と共に増える) にバリオン物質の密度 (時間と共に減少する) を掛けて (49) 式のようにになる。

これらの式に、前節でまとめた $H_0 t$ に対する (25) 式あるいは (27) 式と、 m に対する (29) 式を代入して整理し、さらに密度パラメータの値などを入れれば、具体的な数値で表した式が得られる。すなわち、放射優勢期における地平線半径と地平線質量は、それぞれ、(50) 式と (51) 式のようになり、物質優勢期では (52) 式と (53) 式のようになる。また赤方偏移の関数として表した地平線質量を図 30 に示す。

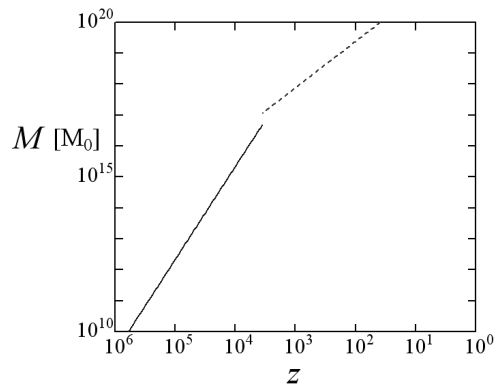


図 30 赤方偏移の関数として表した地平線質量

宇宙の地平線が広がるために、時間が経つと共に (赤方偏移が減少すると共に) 地平線質量も増加するが、輻射優勢期 (実線) と物質優勢期 (破線) では増加の傾きが異なる。等密度時で少しギャップがある。図 29 の一番上のグラフに相当するものだが、図 29 は 30 年ぐらい前のデータで計算されたものなので、数値的にはこちらの方が正しい (はず)。

なお、本当は、放射優勢期と物質優勢期の境界である等密度時 ($z=3570$) で値が一致するはず (だと思ったの) だが、たとえば、地平線半径の値をみてわかるように、微妙に差が残っている。ここらへんの不整合に半年悩んだようなもんだが、ところどころ簡略化しているために、合わせられないようだ。

4.2.3 ジーンズ質量

つぎは、重力不安定を起こす臨界質量である (バリオン物質の) ジーンズ質量 M_J だ。星間空間の場合と異なり、ジーンズ質量は時間とともに複雑に変化する (図 29)。この宇宙膨張におけるジーンズ質量の変化を調べるためには、各時期において、放射と物質の質量密度はどちらが大きいのか、圧力はどちらが

ジーンズ半径とジーンズ質量

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\pi c_s^2}{G\rho}} \quad (54)$$

$$M_J = \frac{4\pi}{3} \rho_m \left(\frac{\lambda_J}{2}\right)^3 \quad (55)$$

放射優勢宇宙

$$\rho = \rho_r = \rho_{r,0}(1+z)^4 \quad (56)$$

$$c_s = c/\sqrt{3} = 0.577c \quad (57)$$

$$\lambda_J = 4.10 \times 10^{30} \text{ cm } (1+z)^{-2} \quad (58)$$

$$= 3.22 \times 10^{23} \text{ cm at } z = 3570$$

$$M_J = 5.45 \times 10^{28} M_\odot (1+z)^{-3} \quad (59)$$

$$= 1.20 \times 10^{18} M_\odot \text{ at } z = 3570$$

物質優勢宇宙

$$\rho = \rho_m = \rho_{m,0}(1+z)^3 \quad (60)$$

$$P = P_r = P_{r,0}(1+z)^4 \quad (61)$$

$$c_s = \sqrt{\gamma P_r / \rho_m}$$

$$= 2.49 \times 10^8 \text{ cm/s } (1+z)^{1/2} \quad (62)$$

$$\lambda_J = 0.988 \times 10^{27} \text{ cm } (1+z)^{-1} \quad (63)$$

$$= 2.77 \times 10^{23} \text{ cm at } z = 3570$$

$$= 0.72 \times 10^{24} \text{ cm at } z = 1370$$

$$M_J = 7.60 \times 10^{17} M_\odot \quad (64)$$

大きいのか (密度が大きい方が圧力も大きいとは限らない)、さらに宇宙に満ちているガスの音速はどうなっているか、などを丁寧に考えていかなければならない。そこらへんをはっきりさせるために、再度、ジーンズ半径とジーンズ質量の式も出して置く。

気を付けないといけない点は (ぼくも最初の計算では間違えていた)、宇宙初期の場合には光子 (放射) も多いので、物質だけでなく放射を考慮しないといけないことだ。たとえば、ジーンズ半径の (54) 式において、密度には場合によっては放射の密度も含まれるし、音速 c_s の評価でも放射圧などを入れないといけない。一方、ジーンズ半径内に含まれるジーンズ質量の (55) 式では、密度は物質密度だけで評価すればよい。

さて、まず放射優勢期 ($z > 3570$) では、物質密度よりも放射密度の方が大きいことから、ジーンズ半径の密度は (56) 式のように放射密度で評価する。また、このような放射流体 (光子ガス) はもとより相対論的な流体なので、その音速は (57) 式のように光速の 0.577 倍であることがわかっている。これらの評価で具体的な数値を計算すると、放射優勢期におけるジーンズ半径とジーンズ質量は、それぞれ、(58) 式と (59) 式のようになる。放射優勢期におけるジーンズ質量の赤方偏移依存性は、地平線質量と同じ形だが、それより値が大きい (この点はあとで述べる)。

つぎに、物質優勢期 ($3570 > z > 1370$) では、ジーンズ半径の密度は (60) 式のように物質密度で評価する。ただし、物質優勢期でも、再結合以前では宇宙の物質と放射はまだ熱平衡になっていて、宇宙の温度 (すなわち物質の温度 & 放射の温度) はまだ非常に高い。その結果、圧力についてはガス圧よりも放射圧の方が大きいので、(物質+光子) ガスの圧力としては、(61) 式のように放射圧で評価しないとイケない。そして、そのような

流体の音速は (62) 式のように与えられることがわかっている。これらの評価で具体的な数値を計算すると、物質優勢期におけるジーンズ半径とジーンズ質量は、それぞれ、(63) 式と (64) 式のようになる。ここで興味深いのは、物質優勢期におけるジーンズ質量は、赤方偏移到依存せずに、一定の値になっている点である。

赤方偏移の関数として表した輻射優勢期と物質優勢期のジーンズ質量を図 31 に示す。

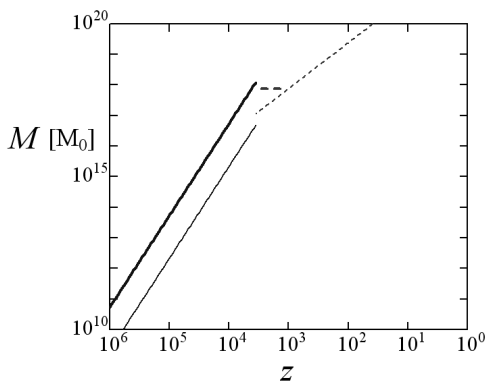


図 31 赤方偏移の関数として表したジーンズ質量 (太線) と地平線質量 (細線)

ジーンズ質量は輻射優勢期 (太い実線) には時間と共に増加するが物質優勢期 (太い破線) では一定の値になる。図 29 の M_B とラベルが付けられたグラフに相当する。

さて、上でも触れたが、図 31 ですぐ気づくのは、放射優勢期にせよ物質優勢期にせよ、ジーンズ質量が地平線質量よりも大きいことである。しかし、先の図 29 にもあるように、教科書に描かれているこの種のグラフでは、通常はジーンズ質量の方がやや小さい。この不一致が、この半年悩んだ (とりあえず忘れていた) もっとも大きな問題点である。最初は輻射密度を入れ忘れていたり、何度も計算間違いをしたので、計算ミスかとも思ったが、これ以上は原因が不明なので、そのまま載せることにした。最近のバーバラ・ライデンの

教科書では、物質優勢期のジーンズ質量は (64) 式の値より 1 桁大きいので、ここでの計算も間違っていないのかもしれない。

ジーンズ半径とジーンズ質量 (続)

再結合以降 ($z \leq 1370$)

$$\rho = \rho_m = \rho_{m,0}(1+z)^3 \quad (65)$$

$$T = T_m = 3737 \frac{(1+z)^2}{1370^2} \quad (66)$$

$$P = P_g = \frac{\mathcal{R}}{\mu} \rho_m T_m \quad (67)$$

$$c_s = \sqrt{\gamma P_g / \rho_m} = \sqrt{\frac{5}{3} 2 \mathcal{R} T_m}$$

$$= 743 \text{ cm/s } (1+z) \quad (68)$$

$$\lambda_J = 2.94 \times 10^{21} \text{ cm } (1+z)^{-1/2} \quad (69)$$

$$= 7.95 \times 10^{19} \text{ cm at } z = 1370$$

$$M_J = 20.1 M_\odot (1+z)^{3/2} \quad (70)$$

$$= 1.02 \times 10^6 M_\odot \text{ at } z = 1370$$

さらに、物質優勢期で膨張が進むと、陽子と電子が水素原子に再結合し ($z=1370$)、宇宙全体が晴れ上がる ($z=1088$)。この再結合時には、膨張宇宙のジーンズ質量に劇的な変化が起こる。再結合以前では宇宙全体が不透明で熱平衡状態になっていて、ガス粒子などに働く圧力としては輻射圧が支配的だった。しかし、再結合して輻射とガスの相互作用が切れると、輻射とガスの熱平衡も終わり、圧力も輻射圧ではなくガス自体のガス圧が働くことになる。この段階では通常理想気体と同じ状態になって、密度・温度・圧力の評価は、(65) 式から (67) 式のようになる。さらに音速の評価も、ガス圧とガス密度そして比熱比 (水素原子のような単原子理想気体では $5/3$) などで見積もることになる。…ここまで書いて、また微小な間違いに気づいた。いつもの習慣で平均分子量 μ は水素プラズマ ($\mu=0.5$) の場合で計算していたけど、中性水素 ($\mu=1$) で計算しないといけない。ただし、以下の議論は変わらない。

ともあれ、再結合以降、宇宙のガスが中性水素になったとして見積ると、再結合直前よりも音速は4桁ぐらいガクッと落ちてしまい、同時に、(69)式のジーンズ半径なども直前より4桁ぐらい小さくなる。ジーンズ半径が大幅に小さくなることはそのままジーンズ質量の激減を引き起こし、(70)式のようにジーンズ質量も劇的に減少する。

赤方偏移の関数として表した再結合期以降も含めたジーンズ質量を図32に示す。

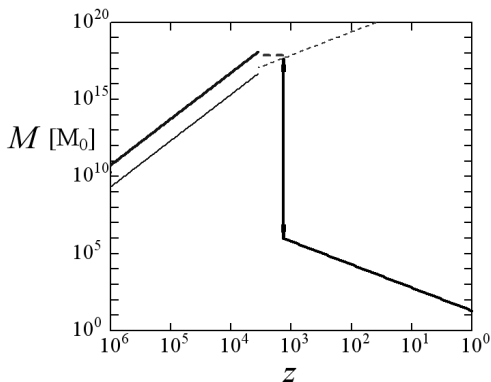


図32 赤方偏移の関数として表したジーンズ質量(太線)と地平線質量(細線)

ジーンズ質量は輻射優勢期(太い実線)には時間と共に増加するが物質優勢期(太い破線)では一定の値になり、再結合時に劇的に減少する。縦軸のスケールは図31より大きい。

ここで重要なポイントの一つは、再結合時にジーンズ質量が劇的に減少するという点である。これは膨張宇宙における重力不安定の成長に大きく影響を与える。またもう一つは、再結合直後のジーンズ質量の値が、(70)式にあるように、 10^6 太陽質量(パラメータによっては 10^5 太陽質量ぐらいから)程度になっていることである。この値は、現在の宇宙における銀河の典型的な質量よりかなり小さい。球状星団か矮小銀河ぐらいの質量しかない。このことは、後でまたきちんと述べるが、再結合直後に形成された天体は、現在の銀河

のような巨大な天体ではなく、球状星団程度の質量をもった小さな天体である可能性を意味する。初期宇宙における最新の銀河形成論では、話はもっと複雑になっているが、これらの古典的な見積もりは、おそらく(笑)大筋では現在でも正しいと思う。

その古典的な銀河形成論の話へ進む前に、もう一つ、特別な質量を説明しておく必要がある。

4.2.4 散逸質量(シルク質量)

最後に、少しややこしい概念だが、膨張宇宙初期における重力不安定を抑える働きに関係する「散逸質量(dissipative mass) M_D 」を紹介する。1968年の論文で最初に指摘したジョセフ・シルクの名前を取って「シルク質量(Silk mass)」とも呼ぶことも多い。

さて、ここまでずっと、再結合時($z=1370$)以前の宇宙では、物質(ほぼ水素ガス)と輻射は熱平衡にあったと仮定してきた。しかし厳密に言えば、完全な熱平衡になっているわけではない。

この時代は非常に高温なので、輻射と物質の相互作用は、光子と電子の衝突である「電子散乱(トムソン散乱)」がメインである。すなわち、水素(+ヘリウム)と電離した自由電子と輻射が衝突散乱し合って、運動量やエネルギーを交換し、温度が一樣になろうとする。一方、ガス内では、自由電子同士や陽子と自由電子のクーロン衝突によって、それらがエネルギーを交換し、温度が一樣になろうとする。ただし、これらのタイムスケールは同じではなく、クーロン衝突のタイムスケールよりも電子散乱のタイムスケールの方が長い。

その結果、陽子と自由電子は常に同じ温度の熱平衡になっているが、輻射は熱平衡からちょっとだけ遅れてしまい、それが物質に対して粘性として働く作用をもたらすのだ。こ

れを「輻射粘性 (radiative viscosity)」と呼んでいる。輻射粘性は、ガス物質内に生じた密度ゆらぎを均して散逸させる作用を起こす。

このような拡散過程は、じわじわと伝播していく過程なので、遠方まで影響を与えるには時間がかかる。そのため、重力不安定で生じた密度ゆらぎを均すとはいっても、均すことができる密度ゆらぎのサイズには上限があり、したがって、その範囲に含まれる物質の質量にも上限がある。輻射粘性によって均される上限質量を、散逸質量/シルク質量と呼ぶのである。

シルク質量

放射優勢宇宙

$$M_S = 1.93 \times 10^{25} M_{\odot} (1+z)^{-9/2} \tag{71}$$

$$= 1.99 \times 10^9 M_{\odot} \text{ at } z = 3570$$

物質優勢宇宙

$$M_S = 1.81 \times 10^{24} M_{\odot} (1+z)^{-15/4} \tag{72}$$

$$= 8.62 \times 10^{10} M_{\odot} \text{ at } z = 3570$$

$$= 3.13 \times 10^{12} M_{\odot} \text{ at } z = 1370$$

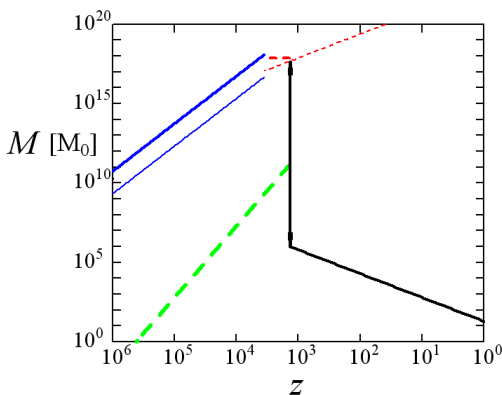


図 33 赤方偏移の関数として表した散逸質量/シルク質量 (太い破線)

図 29 では MD と表記されているもの。

散逸質量/シルク質量の具体的な表記を、(71) - (72) 式、および図 33 に示しておく。散逸質量/シルク質量の変化の仕方は、(71) 式と (72) 式にあるように、放射優勢期と物質優勢期では少し違うのだが、大勢には関係ないので、簡単のために、図 33 では (71) 式をそのまま描いてある。

以上、いろいろな質量の評価をしたが、それらの中で、とくに重要な質量が、

- 再結合直前のジーンズ質量 = $10^{18} M$
- 再結合直後のジーンズ質量 = $10^{5\sim 6} M$
- 再結合時のシルク質量 = $10^{12\sim 14} M$

である。

これで、ようやく銀河形成論へ進める。

……つづく……

参考文献

- [1] パーバラ・ライデン (2003) 『宇宙論入門』 (牧野伸義 訳), ピアソン・エデュケーション.
- [2] Gerhard Borner (1993) “The Early Universe”, Springer-Verlag.
- [3] Davis, M., Peebles, P. J. E. (1977) *ApJS*, **34**, 425.
- [4] Silk, J. (1968) *ApJ*, **151**, 459.
- [5] Silk, J. (1982) in *Astrophysical Cosmology*, H. A. Bruck *et al.* (eds), Pontificia Academia Scientiarum, p.427.
- [6] Zeldovich, Ya. B. (1970) *A&A*, **5**, 84.
- [7] Longair, M. S. (2008) “Galaxy Formation”, Springer, New York.

福江 純 (大阪教育大学)