

連載

最新宇宙誌【14】

エポック : 星と銀河の形成

～構造形成の時代 (後編 1)～

福江 純 (大阪教育大学)

承 前 (『天文教育』2010年1月号より)

このところ、必要な雑用の激増に加えて、不要あるいは無駄さらには有害な雑用も大激増していて、途切れ途切れになっているので、中間まとめをしておかないと、こちらは何の話をしていたのか忘れてしまっている (笑)。忘れてしまっているのは雑用のせいだけじゃないかもしれないが (泣)。

膨張宇宙における重力不安定の話だった。膨張しつつある宇宙において、銀河や銀河団サイズの巨大な集合体が形成されるためには、膨張宇宙とともに物質すべても膨張して希薄になってしまっただけで、宇宙の各所でガス物質の一部は重力的に引き寄せ合い、宇宙膨張から切り離されて局所的に重力収縮する必要がある。すなわち、ガス (物質) 自身の重力による重力不安定を考えないといけないが、宇宙膨張にしたがって、時間とともにガスの平均密度その他の状態が変化するので、重力不安定を起こす条件 (ジーンズ質量) も時間とともに変化した (図 33)。

とくに重要な質量の値が、

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 = $10^{5-6} M$

再結合時のシルク質量 = $10^{12-14} M$

であった。

なお、重力不安定を起こした後の密度ゆらぎの成長の仕方も、星間ガスの場合と膨張宇宙とは異なる。媒質が静止している星間ガスの場合は、ジーンズ質量を超えた密度ゆらぎがいったん重力不安定を起こすと、そのゆらぎは時間の指数関数的に成長する (Jeans 1902)。しかし、媒質が時間とともに希薄に

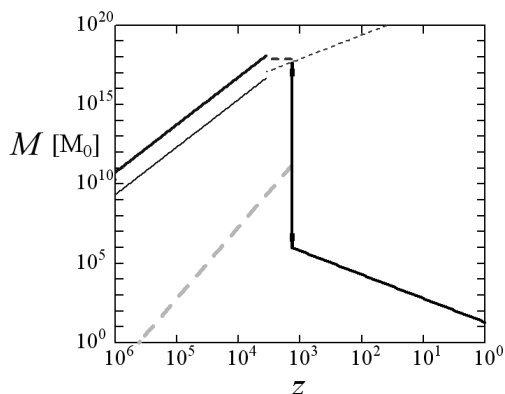


図 33 赤方偏移の関数として表したジーンズ質量 (太い実線) と散逸質量/シルク質量 (太い破線)

再結合時にジーンズ質量は激減する。

なっていく膨張宇宙の場合には、成長の仕方は指数関数的ほど急速ではなく、時間のべき乗 (累乗) 的にしか成長しない (Lifshitz 1946)。このことは、膨張宇宙において銀河などの構造が形成されるためには、それなりに時間が必要なことを意味している。

5. 古典的シナリオ: パンケーキ説とクラスタリング説

膨張宇宙におけるジーンズ質量の時間変化と、輻射場による散逸の問題が済んだので、膨張宇宙における密度ゆらぎの成長について考えることができる。ここでは、先に触れた、1980年頃までの古典的な考え方を紹介しよう。密度ゆらぎのタイプによって、トップダウン式のパンケーキ説と、ボトムアップ式のクラスタリング説とがあった。

5.1 断熱ゆらぎ→パンケーキ説

まず密度ゆらぎが、周囲と熱の交換がない「断熱ゆらぎ (adiabatic perturbation)」だったとしよう。これは音波と同じタイプのゆらぎである。すなわち、ジーンズ質量よりも大きな密度ゆらぎは重力不安定で収縮して成長するが、ジーンズ質量よりも小さなゆらぎは音波として振動することになる (図 34)。

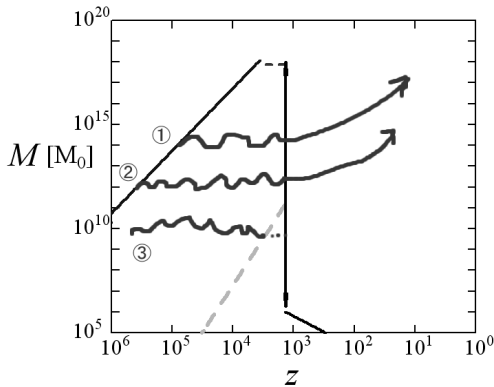


図 34 膨張宇宙における密度ゆらぎの成長の仕方

波打っているのが音波振動のイメージで、右上がりの矢印が成長するイメージ。

具体的には、再結合直前のジーンズ質量は、

$$M_J = 10^{18} M$$

直後のジーンズ質量は、

$$M_J = 10^{5.6} M$$

だった。したがって、再結合以前に $10^{18} M$ 以下の質量をもった密度ゆらぎは、再結合時点までは、重力不安定を起こすことなく、質量の大きなものは長い波長の音波として (図 34 の①)、質量が小さくないものは短い波長の音波として (図 34 の②)、膨張宇宙の中で振動していた。しかし、物質が再結合を起こすと、ジーンズ質量が激減するので、その時点で $10^{5.6} M$ 以上の質量をもっていた密度ゆらぎは重力不安定を起こして収縮し始め、かなり大きな重力塊を形成していくことになる。

ただし、一方で、この音波的振動を均す作用として、輻射粘性があった。再結合時における散逸質量/シルク質量は、

$$M_S = 10^{12-14} M$$

である。この質量以下の密度ゆらぎは、輻射粘性のために再結合時以前の段階で散逸してしまっただろう (図 34 の③)。

以上の結果、断熱ゆらぎが起こっていた場合には、再結合時の段階で、 $10^{14-18} M$ の範囲、まあ、 $10^{15} M$ や $10^{16} M$ とか、銀河団あるいはそれ以上の大きな密度ゆらぎが成長することになる。すなわち、星・銀河・銀河団と続く大規模構造のトップからできるわけだ。

このような密度ゆらぎの成長はきれいな球対称には起こらず、回転その他の影響で、一般には扁平に、さらにはいびつにつぶれていく。すなわち、銀河団規模の巨大な密度ゆらぎが、扁平な“パンケーキ状”につぶれていき、それらが分裂して、トップダウン式に個々の銀河に収縮していったと考えられる。そこで、このような構造形成モデルは、「重力分裂説 (gravitational fragmentation model)」とか「パンケーキ説 (pancake model)」などと呼ばれた。最初に提案したのは、旧ソ連のゼルドヴィッチ (Ya. B. Zeldovich ; 1914~1987 ; 図 35) のグループである (Zeldovich 1970 ; Doroshkevich *et al.* 1974)。



図 35 ヤコブ・ボリソビッチ・ゼルドビッチ (説明は次ページ)

図 35 (説明)

あまり有名ではないかもしれないが、物理学から宇宙物理学にわたって、非常に多くの仕事を成し遂げた旧ソ連時代の大科学者である。もちろん当時として、核兵器開発でも中心的な役割を果たした。

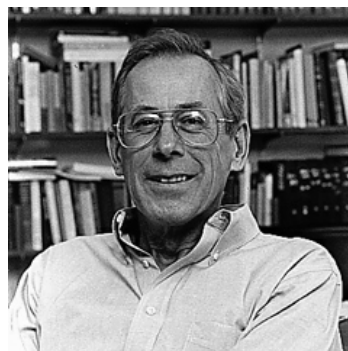


図 36 P・ジェイムズ (ジム)・E・ピーブルス (プリンストン大学名誉教授)

天文業界の銀河関係では著名だが、ゼルドヴィッチと異なり、ウィキではヒットしなかった。彼の著した“Physical Cosmology”は1980年代における宇宙論の名著と言っていいと思う。

5.2 等温ゆらぎ→クラスタリング説

密度ゆらぎのもう一つのタイプが、周囲と常に温度が等しい「等温ゆらぎ (isothermal perturbation)」である。この場合、物質と輻射の温度が等しいのだから、そもそも輻射粘性などは働かない。

輻射場による散逸効果がなければ、密度ゆらぎが成長する質量の下限値は、再結合時直後のジーンズ質量である、

$$M_J = 10^{5.6} M$$

ほどまで落ちる。これは球状星団程度の質量である。そして密度ゆらぎの起こり方としては、小さいものの方ができやすい。すなわち大規模構造の中では、まずボトムができるわけだ。

こちらのシナリオでは、最初に球状星団程度の小さい天体ができて、そして小さい構造が重力作用で集まって行って、ボトムアップ的に銀河や銀河団などの巨大な構造が組み上がっていったと考える。そこでこのような構造形成モデルは、「重力集団化説 (gravitational clustering model)」とか単に「クラスタリング説 (clustering model)」と呼ばれた。アメリカのピーブルス (P.J.E. Peebles; 1935～; 図 36) らのグループが中心になって提唱した (たとえば、Davis and Peebles 1977)。

5.3 古典的シナリオの問題点

パンケーキ説にせよクラスタリング説にせよ、それぞれに説得力もあり、膨張宇宙における銀河形成・構造形成の基本モデルとして

一世を風靡した。ぼくが大学院に入った1970年代末期には、宇宙論／銀河形成といえば、ここらへんを勉強したものである。まず相対論と標準ビッグバンモデルを学んだ後で、ピーブルスのテキスト“Physical Cosmology”を読むのが基本だった。しかし大学院に在学している間に、これらの古典的シナリオの大前提がひっくり返ることになった。ダークマターである。

ぼくが博士課程に進学した1980年ごろ、天文学界ではダークマター問題がかなりの懸案事項になっていた。ダークマターの存在自体は、はるか1933年にフリッツ・ツヴィツキーが、銀河団の振る舞いから推測して指摘していたが、半世紀近く経って、ようやくその実在が認められ始めつつあったのだ。

ダークマターを受け入れざるを得なくなった理由の一つは、円盤銀河の回転の度合い(いわゆる銀河の「回転曲線」)が、光り輝く星々の振る舞いだけでは決して説明できないことが、ベラ・ルービンらによって明瞭に示されたことだ。ろくに英語も聞き取れない院生時代、昔は武道館だったらしい古い建物を転用

した校舎の、床が板張りの講義室でルービン女史の話を聴いて、ゾクゾクした感じをいまでも思い出す。また、理論的にも銀河を形作る星々の大規模力学シミュレーションが行われ始め、星々だけでは銀河円盤が壊れてしまうが、ダークマターを仮定すると、銀河円盤が安定に存続できることがわかったのも同時期である。

ところで話が少し脱線するが、ダークマターを必要としない考え方もある。というのは、目には見えないが重力作用をもつ物質として、ダークマター（暗黒物質）という存在を仮定する・仮定せざるを得ないのは、ニュートンの重力理論とアインシュタインの一般相対論が“正しい”という大前提のもとでの話だ。

一方、それとは別の立場として、ダークマターを必要としないように、重力理論を修正するという考え方もあるのだ。もちろん、地球上や太陽系など身近なスケールではニュートン重力はきわめて高い精度で正しい。が、ダークマターが必要になる銀河や銀河団のような遠距離スケールでニュートン重力が正しいという証明は、実はない。ニュートンの万有引力の法則では、距離の2乗に反比例して重力が弱くなるが、非常に遠距離でニュートン重力を修正すれば、ダークマターなしでも、銀河の回転曲線その他の観測事実を説明できるのだ。

このような考え方は、一般に「修正重力理論」と呼ばれており、ダークマター問題が浮上した1980年代のモルデハイ・ミルグロム（Mordehai Milgrom；1946～）による「修正ニュートン力学（Modified Newtonian Dynamics；MOND）」あたりが嚆矢で、現在に至るまで、さまざまな修正重力理論が提案されている。またミルグロム自身も、いまでもMONDの研究をしているようで、Astro-PHと呼ばれる天文学の学術論文の速報サイトにもよく投稿している。

なお、これらの修正重力理論は、巷にあふれている相対論をまったく理解していないトンデモ系“相対論は間違っている”本とはまったく異なるものだ。修正重力理論の提唱者は、ニュートン重力理論はもちろん一般相対論も熟知した上で、観測事実とは矛盾しない新理論を構築しようとしているのだ。1980年代に、ミルグロムの論文もいくつも読んだが、きちんとした学術誌に掲載されたまっとうな学術論文で、それなりに勉強にもなったものである。ちなみに、このミルグロムという人は、ぼく自身の研究分野である宇宙ジェット関連でも、SS433ジェットの歳差モデルをいち早く提案した研究者で、1980年当時から現在まで、イスラエルのワイズマン科学研究所（イスラエルの大統領だったワイズマンが設立した国家規模の研究施設；日本の理化学研究所をもっとでかくしたような感じじゃないかと思う）に所属している。

ぼく自身はいまだ一般相対論の“信者”であって、修正重力理論派ではないのだが、特異点を残していることや、量子論と整合性がない点など、一般相対論が完全な重力理論でないのもまた事実である。

余談が長くなったが、通常のバリオン物質のみで考えていた古典的シナリオは、ダークマターが物質の多くを占めることがわかった段階で、大前提が崩れてしまったのである。通常のバリオン物質ではなく、ダークマターのゆらぎを考えないといけない。銀河などの“巨大集合体”は、ダークマターのゆらぎに付随して巻き込まれてしまった物質の欠片にすぎない。銀河をみて宇宙構造を語るのは、風に舞う木の葉をみて木の葉が自分で勝手に動いていると勘違いするような可能性がある。目には見えない主体（ダークマター／風）の振る舞いを考えないといけないのである。

さらに、関連して、観測的にも、古典的シナリオでは背景放射のゆらぎが足りないとい

う観測事実が明らかになってきた。すなわち、古典的シナリオで通常のバリオン物質だけが重力収縮して銀河や銀河団などの巨大構造を形成できるためには、宇宙の再結合時には、すでに、密度ゆらぎの相対的な大きさが、平均的な密度に対して、1/1000 ぐらい必要である。つまり、再結合時の時期に周囲に対して 1/1000 ぐらい密度が高い領域があれば、その領域が重力収縮して巨大構造を形成できることがわかっていて、膨張宇宙では密度ゆらぎの成長が遅いという性質が、再結合時にこれだけの密度ゆらぎを必要とするのである。

そして、再結合までは物質と輻射は一緒に振る舞っていたのだから、再結合時に物質に 1/1000 のゆらぎがあれば、輻射にも同じ程度のゆらぎがあつていいはずだ。しかし、長年にわたり 3K 宇宙背景放射のゆらぎを調べても、そんなに大きなゆらぎは発見できなかったのである。さらに、近年の COBE や WMAP などによる詳細な観測の結果、3K 宇宙背景放射のゆらぎは 10 万分の 1 程度であることが観測的に立証された。

ダークマターによって、古典的シナリオは根底から再検討せざるを得なくなった。で、まあ、百家争鳴的に、いろいろなシナリオが提案されたが、1980 年代後半から 1990 年代は銀河形成のモデルがあまりにも乱立しすぎていて、勉強する気にもならなかった。その後、ダークエネルギーの発見によって膨張宇宙のモデル自体が修正されたことなどもあり、これらのさまざまなモデルは大部分が紙くずになったんじゃないかなあ。と書くと、銀河形成の専門家に文句を言われると思うけど、1980 年代から 1990 年代にかけては、銀河形成論があまり進捗しなかったように、ぼくは思っている。それが、ダークエネルギーの発見や、宇宙の再電離の発見などによって、2000 年前後から、初期宇宙の研究が盛んになり、現在ではふたたび銀河形成論は非常に活

発な研究分野に再び咲いた。

……つづく……

参考文献

- [1] バーバラ・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] Davis, M., Peebles, P. J. E. (1977) *ApJS*, **34**, 425.
- [3] Silk, J. (1968) *ApJ*, **151**, 459.
- [4] Silk, J. (1982) in *Astrophysical Cosmology*, H. A. Bruck *et al.* (eds), Pontificia Academia Scientiarum, p.427.
- [5] Jeans, J. (1902) *Phil. Trans. Roy. Astron. Soc.*, **199**, 1.
- [6] Lifshitz, E. (1946) *Jl. Phys. Acade. Sci. USSR*, **10**, 116.
- [7] Zeldovich, Ya. B. (1970) *A&A*, **5**, 84.
- [8] Doroshkevich, A., Sunyaev, R., Zeldovich, Y. (1974) *IAU Symp No 63*, 213.
- [7] Longair, M. S. (2008) "Galaxy Formation", Springer, New York.

福江 純 (大阪教育大学)