

宇宙の大域的構造の形成と真空の相転移

佐藤勝彦（東大理）

研究会で報告したものの概略である。ほぼ同様のものが参考文献 1)、2)でも報告されているので御参考下さい。

§ 1 宇宙の大域的構造の観測

一般に宇宙は次のような階層構造を持っていることが知られている。

第 1 表

階層	半径 (p c)	平均距離 (p c)	質量 ($M_{\odot}$)
星	10^{-3}	1	1
星団	10	1 k	10^6
銀河	10 k	1 M	10^{11}
銀河団	1 M	10 M	10^{15}
超銀河団	10 M	100 M	10^{16}
Void	30 M	100 M	?

近年の観測結果の解析技術の進歩や、CCD（荷電結合素子）の使用などの観測機器の進歩により、非常に多くの銀河の赤方偏移の測定が可能になった。これにより、我々は以前とは異なり、宇宙の大域的構造（ $\sim 100 \text{ Mpc}$ ）について3次元的な分布の情報をかなり豊富に手に入れられるようになった。その結果、1970年代の終わり頃から、宇宙にはほとんど物質の存在していないような大きな穴があるのではないかと、かなり驚くべき事実を示唆する観測結果がだされるようになった。現在では宇宙の大域的構造として、つぎのような見方がかなり一般的に支持されるようになってきたようである。

- 大多数（9割程度）の銀河は、銀河団－超銀河団といった、より上の階層構造に属している。
- これらの超銀河団は、糸状あるいは面状の構造になっており、隣り合ったものどうしがお互いに連結して、一種の網状あるいは細胞状の3次元構造を形づくっている。
- この細胞状構造の内側の部分は、物質（少なくとも光っている物質）の疎な領域－ボイドーによって占められている。
- ボイドの密度は、宇宙の平均密度の2割から3割程度で、直径は、 20 Mpc から、 100 Mpc にもおよぶものまであり、全宇宙の体積の、90%以上を占めていると考えられる。

§ 2 銀河形成の理論

いわゆる標準ビッグバン理論は、宇宙は空間的にいたるところ一様かつ等方であるという宇宙原理と、一般相対論を組み合わせただけのものである。この最も単純でかつ簡単な理論が、宇宙膨張（Hubbleの法則）、 3° K 黒体輻射、Heの合成などに代表される宇宙論の基礎的問題に対して、明確な解答を与えてくれることは、ほとんど奇跡的なことである。しかし、ビッグバン宇宙に於いて銀河や銀河団が形成されるためには、初めに空間的な密度ゆらぎが存在していることが必要である。ビッグバン宇宙は、輻射（光子）と物質（核子）という2成分で構成されているので、密度ゆらぎにも、輻射と物質とが同じようにゆらいでいる断熱ゆらぎと、輻射は空間的に一様だが物質だけがゆらいでいる等温ゆらぎとの2つのモードが存在する。前者は非

常に自然なゆらぎであるが、後者は銀河形成のための御都合主義的な感じがしないでもない。そこで、以下ではまず前者のモードについて考えてみることにしよう。

1) Jeans の理論

一般相対論の発表される10年以上前に、Jeans によってすでに、銀河形成に関しての最初の本格的な仕事が行なわれている。彼は、一様な流体で満たされた宇宙を考え、連続の式、Euler 方程式、重力場の方程式の3式を連立させ、これらに加えられた摂動の安定性を議論した。これによって得られた分散関係は、良く知られているプラズマ中での電磁波の分散関係と、本質的には全く同じである。しかしこの場合には、重力が引力であることに起因した不安定性が生じ、Jeans 質量として知られる質量よりも大きな質量をもったゆらぎは自己重力のため収縮することになる。

このJeans の仕事は、Lifshitzにより膨張宇宙の場合に拡張され、Jeans 質量よりも大きな質量をもったゆらぎの密度比 δ は指数関数的ではなく、 $\delta \sim t$ (輻射優勢期)、 $\sim t^{2/3}$ (物質優勢期) の如く、時間のべきで増加することが示された。

Jeans 質量は、宇宙初期においては宇宙の膨張とともに単調増大するが、宇宙の温度が 4000°K 、つまり電子が陽子と結合して水素原子となる時期(再結合時刻と呼ぶ)に、最大値 $10^{16} M_\odot$ となり、その後急激に減少する。これは、輻射と物質間の相互作用を媒介していた自由電子がなくなるために、この相互作用がきれ、音速が急に減少するためである。あるゆらぎの1波長程度のなかに含まれる質量が、その時刻のJeans 質量よりも小さい時期は、そのゆらぎは弾性波として振動するが、この期間に光子と電子との間のThomson 散乱によって、ある限界質量 $\approx 10^{12} M_\odot$ (Silk質量と呼ばれる)以下の小さな波長のゆらぎは散逸してしまうことが知られている。そして散逸しなかったものは、以後成長を続けることになる。

このように、断熱ゆらぎに対しては2つの特徴的な質量の大きさが現われることになるが、これらが、それぞれ銀河、及び超銀河団の大きさに対応していることは、非常に興味深いことであるといえる。

2) 負の密度ゆらぎの成長

§1で述べたようなボイドについての観測ができるようになってしばらく後、宇宙の大域的構造は密度の高い部分の成長よりもむしろ、まわりに比べて密度の低い領域、つまり負の密度ゆらぎの成長によってうまれてきたのではないかとする考えがあらわれた。つまり、ボイドが速く膨張することによって、途中にある物質を隣り合ったボイドの間に押し込め、超銀河団などの構造をつくるのではないかというものである。これはちょっと考えると、単にバンケーキ理論を逆手にとったものに過ぎないようであるが、バンケーキ理論ではあまりうまく説明できない超銀河団の隣り合ったものどうしの網状あるいは細胞状の3次元的構造を自然に説明してくれる。

最近では、このような観点にたった数値計算も数多く行なわれるようになってきている[3]。

3) 2次元、3次元数値実験

一方、近年の電子計算機の発達、特にSupercomputer の出現により、以前には想像もできなかったような大掛かりな数値実験が可能になってきた。これを利用して、複雑な宇宙の大域的構造を2次元、及び3次元的に取り扱おうとする動きが非常に盛んになってきている[4,5]。この方面の仕事はまだ始まったばかりであり、現段階ではまだ単なるデモンストレーションの域をこえていないことは否めないが、今後の急速な計算機の進歩とともに、我々に新たな知識を提供してくれるようになることはまちがいない。

5) 断熱ゆらぎ理論と、その困難

このように見てくると、銀河形成は割合うまく説明されているように思われるかもしれないが、実は必ずしもそううまくはいっていない。いままでの話はすべて、何かしらのゆらぎの存在を仮定してのうえのことであった。宇宙のゆらぎには、断熱ゆらぎと等温ゆらぎが存在することは前に述べたが、断熱ゆらぎのみで銀河形成を論ずることが恐らく一番自然であり、いわば正統派の立場であると思われる。ところが、この断熱ゆらぎの大きさに対しては、 3°K 黒体輻射の等方性の観測から得られる上限値—再結合時刻の密度ゆらぎに換算して、 $|\delta\rho/\rho| < 10^{-4}$ —が存在する。残念ながらこの程度の大きさから出発したのでは、正統派理論に従う限り、成長速度が遅すぎて、現在までに、いまみえているような宇宙の大域的構造をつくりあげることが不可能であるように思われる。

§3 密度ゆらぎの生成

1) 相転移と地平線問題

標準ビッグバンモデルでは、銀河が形成されるためには極めて一様な宇宙の中に、大きくも小さくもない適度の密度ゆらぎが必要である。振幅が大きければ、それは成長しすぎてブラックホールになってしまうし、小さければ銀河は作られない。それでは、このような都合のよいゆらぎは、どのようにしてつくられたのだろうか？ もっとも自然な考えは、宇宙初期におこるなんらかの相転移現象により、空間的一様性が自発的に破れゆらぎが生成されたという考えであろう。近年自然界に存在する4つの力をゲージ理論に基づいて統一する研究が盛んに進められているが、これらは単に力の統一にとどまらず、宇宙の初期において、“真空”の相転移がおこったことを示唆している。ゲージ理論による相互作用の統一理論はまだ完成しているわけではないが、昨年のCERNにおけるW、Z粒子の発見により、その最初のステップである電磁相互作用と弱い相互作用の統一理論はほぼ認められたといえる。色の力をも含む大統一理論は、宇宙の温度が 10^{15} GeVとなった時、統一力から色の力が枝わかれをおこす相転移が起こることを、温度が 10^{15} GeVでは、電磁相互作用と弱い相互作用の分離をひきおこす相転移が起こることを、示唆する。一方、色の力の理論、量子色力学は、温度が 200 MeV あたりで、クォークからハドロンへの相転移が起こることを予言している。

これらの相転移によって銀河の種となるゆらぎは生成されないのだろうか？ こう考えたとき、まず問題となるのは“宇宙の地平線”である。宇宙開びゃくの瞬間にある点から出発した光が時刻 t までに到達する領域の大きさを時刻 t における宇宙の地平線とよぶ。相転移によって作られるゆらぎの波長は、この地平線を越えて大きくなることはあり得ない。一様な状態から空間的ゆらぎをつくるためには、エネルギーの輸送が行なわれねばならないが、これは光速以下でしか進み得ないからである。地平線は時間とともに広がるが、これは逆に言えば宇宙の初めでは極めて小さかったことを意味する。例えば、色の力の枝わかれがおこる相転移の頃の地平線は 10^{-26} cm という小ささであり、その中に含まれているバリオン数はわずか 10^3 程度なのである。最後におこるクォーク・ハドロン相転移時においても地平線は 10 km 程度、そのなかの核子の質量は 10^{26} g 、つまり月の質量程度であり、とても銀河の質量には及ばない。この様に標準モデルでは、宇宙論的スケールの長波長のゆらぎを作るには原理的な困難がある。

上の議論では宇宙は完全に一様な状態から出発したという前提条件をおいているが、これは 3° K 黒体輻射の一樣等方性という観測事実に基づいている。しかし考えてみれば、この観測事実も実に不思議なことである。宇宙の初めでは、地平線は極めて小さく、これを越えたところとは一度も因果関係をもったことがないのであるから、密度などの物理量がピタッと等しいという理由はまったくないはずである。むしろ地平線を越えたスケールでは宇宙は激しくでこぼこであるのが自然である。物質を混ぜ合わせて一樣化するプロセスの速さは光速以下であり、地平線を越えてはおこり得ない。地平線を越えて宇宙が一樣であるという事実は、地平線問題として昔から知られていた問題であるが、宇宙論的スケールのゆらぎをつくるという問題と実は表裏一体の問題である。

2) インフレーション宇宙モデル

最近、これら標準宇宙モデルの困難を一挙に解決するために、インフレーション宇宙モデルとよばれる新しいモデルがGuthや佐藤によって提案され、現在一つの流行となっている。[6] このモデルは簡単にいえば、次のような筋書きとなる。

a) 統一理論の示唆する相転移のモデルとして、その進行が宇宙膨張に比べておそいモデルをとる。この場合宇宙の温度が臨界温度以下になっても、ヒグス場（相転移の秩序パラメータ）はしばらく対称状態のままとどまる。

b) 対称状態のエネルギーは対称性の破れた状態よりも高く、これに働く重力効果はアインシュタイン方程式に宇宙項を導入したのと同じ効果を持つ。したがって宇宙は指数関数的な急激な膨張をおこし、相転移前には小さなスケールでしかなかった一樣領域を宇宙論的スケールまで広げる。このことが現在の宇宙の一樣性を説明する。

c) 相転移の過程での量子的ゆらぎによって小さなゆらぎがつくられ、これも指数関数的に大きくなり、銀河の種となる。

以上述べたようなインフレーション宇宙モデルには、細かな点では多くの問題が残されている。しかし、地平線問題を始めとして平坦性問題（宇宙はなぜ、曲率が測定できないほど平坦なのか？）など宇宙論の根本問題を解くには、インフレーション、つまり指数関数的な急激な宇宙膨張は不可欠のものだという認識は現在しだいに定着しつつあるように思われる。

3) 等温ゆらぎの生成

大統一理論は、ゆらぎのもうひとつのモード、等温ゆらぎをもつくる可能性を示唆している。大統一理論のもとでは陽子さえも崩壊するように、バリオン数はもはや保存量ではない。現在の宇宙をつくっている物質（正のバリオン）は、温度が 10^{15} GeV くらいの頃、 X^- 粒子、 H^- 粒子とよばれる粒子の崩壊によっ

て作られたものであり、もしその生成率が空間的にゆらぐならば、等温ゆらぎが作られることになる。そのようなモデルもすでにつくられているが、現在の段階に於いて必ずしも説得力のあるものとはいえない。

§ 4 おわりに

銀河、銀河団、そしてボイドの形成はこの物質世界で最初で、かつ最大スケールのパターン形成である。

なんらかの相転移現象に伴って作られた微小振幅が重力不安定性により成長し現在の宇宙の大域的構造を作り上げたと考えるのが、現在の正統的な考えであるが、最近これとは異なるモデルも多く提案されている。

(たとえばオストライカー・池内[7])

なお、この研究会報告の作成にあたっては須藤 靖君に大変お世話になった。ここに謝意を表します。

文献

- 1) 佐藤 勝彦、須藤 靖、日本物理学会誌 第39巻10号(1984)、778を参照
- 2) 佐藤 勝彦、科学朝日、1983年8月号24
- 3) Y.Suto, K.Sato and H.Sato, Prog.Theor.Phys. 71 (1984) 938
- 4) A.L.Melott, Mon.Not.R.astro.Soc. 202 (1983), 595
- 5) J.Centrella and A.L.Melott, Nature 305 (1983), 1966
- 6) 例えば 総合報告としては K. Sato, in Grand Unified Theories and Related Topics, 1981, World Scientific, 289 and in Cosmology of the Early Universe, ed L Z Fang and R Ruffini (1984, World Scientific) 165 又日本語による解説としては 佐藤勝彦、自然 1983年5月号、A.Guth and P.Steinhardt, 日経サイエンス 1984年8月号
- 7) 池内了、物理学会誌 39 (1984), 429