

宇宙の大構造

梅村雅之*・池内 了*

1. ボイドの発見

数年前，“宇宙に巨大な空洞発見”という記事が新聞の第一面を飾ったことを記憶に留めている人は少なくないであろう。ここで言う空洞（ボイド）は、物質が存在しない空間というよりも、銀河が観測されない空間という意味である。ボイドの広がり、数 10 Mpc (1 Mpc = 3.3×10^6 光年) に達し、これは、宇宙の地平線までの距離の百分の一に匹敵する大きさである。この巨大なボイドの周辺には、銀河が数千個集まった“超銀河団”と呼ばれる銀河の大集団が存在する。その全質量は、およそ $10^{15} M_{\odot}$ (M_{\odot} : 太陽質量) である。これまでの観測で、ボイドと超銀河団の組み合わせの構造は、かみのけ座/A 1367、ヘルクス座、ペルセウス座、うしかい座の方向に見つかっている。それらの観測から、超銀河団は、単独で存在するのではなく、平板状或いはフィラメント状に互いにつながった構造を作っており、その間の空間に穴があいたようにボイドが存在する、ということが明らかにされてきた。即ち、我々の宇宙は巨大な細胞構造を示すのである。このような大構造の発生には、宇宙進化の壮大なドラマが凝縮されていると我々は考えている。

2. 大構造を作る種

“蒔かぬ種は生えない”から、宇宙にボイドと超銀河団という大構造がある以上、その原因となる物理過程が存在したはずである。それが何であったか、又何故に上のような大きさの構造となったかは、宇宙論の大問題である。我々は、その起源は少なくとも宇宙が今よりも 10^8 倍以上小さかった昔の宇宙にあると考える。宇宙膨張の赤方偏移を z とし、 $1+z \geq 10^8$ の頃の宇宙における密度ゆらぎに銀河分布とその空洞の種が仕込まれたと考える (今の宇宙の大きさ a_0 と赤方偏移が z の頃の大きさ a との関係は $a = a_0/(1+z)$ である)。この場合、ゆらぎの置き方には二通りある。1つは、正の密度ゆらぎ $\Delta\rho/\rho > 0$ を置くもので、適当な形のゆらぎは、自らの重力によってその最も短かい軸に沿って一番早く収縮し、パンケーキ状のものが出来ることが 1970 年にゼルドビッチによって示された。パンケーキ理論と呼ばれ、超銀河団を直接的に作るやり方である。これに対して、むしろ積極的にボイドを作り、超銀河団がそのまわりに結果的に

生まれるとする考えもある。ハッブル膨張をしている宇宙に負の密度ゆらぎ $\Delta\rho/\rho < 0$ を置く場合、その部分は密度が低い分だけ重力の効果が小さいので、周りの一様な部分のハッブル膨張よりも速く膨張し、より密度の低い穴となる。同時にその周辺の球殻には物質がたまり、高密度の領域が穴を取り囲む。これを最初に数値計算したのはビーブス (1982 年) である。この高密度の球殻が超銀河団へと進化すると考えるわけである。ただ、そんな構造が出来てくる、というだけの議論で済むのなら話は楽なのだが、いつまでに銀河を作ってくれという注文がある。注文の期日は、クエーサーの $z \sim 3.8$ という現在観測されている最も大きな z に対応する時期までである (月報 1983 年 5 月号高原氏の記事参照)。それは、宇宙年齢にして 6×10^8 年まで、ということになる。現在の宇宙年齢はおよそ 10^{10} 年だから 6×10^8 年までに銀河を誕生させるのはかなり速い料理である。

さて、初期のゆらぎを考えた $1+z \geq 10^8$ の時期には物質は高温でほぼ完全電離の状態にあった。このとき核子 (バリオン) と放射場とは強く結合しあっていて同じ運動をし、初期の物質のゆらぎは放射場をも同じようにゆらがせたと考えるのが自然である (断熱ゆらぎ理論と呼ばれる)。そうすると、物質が中性化するまでは放射圧のためにゆらぎは成長できない。中性化する $1+z_{\text{dec}} \sim 10^8$ の時期から後にバリオンのゆらぎは成長することが出来る。これまでの数値計算によれば、 $z \sim 4$ までに高密度の球殻を作ろうとすると、① 宇宙平均密度を密度パラメーターで $\Omega \sim 1$ ほどになるようにとり ($\Omega = 8\pi G\rho/3H_0^2$, H_0 はハッブル定数で、観測から $H_0 = 100h \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $h = 0.5 \sim 1$), ② $1+z_{\text{dec}}$ でゆらぎの大きさを $\Delta\rho/\rho \geq 10^{-2}$ とし、という 2 条件をみたく必要がある。ところが、これをバリオンのゆらぎだとすると、そのように大きなゆらぎは存在した筈がないことが 3K 宇宙黒体放射のゆらぎの観測からわかっている。この宇宙黒体放射とは、物質が中性化する時期の放射場を見ているもので、もしこの時期にバリオンのゆらぎが存在すれば、放射の強度分布 (従って温度分布) にもゆらぎが存在することになる。ところが 3K 黒体放射はきわめて等方的で、ゆらぎの大きさは $\Delta T/T \leq 10^{-4}$ と非常に小さく、バリオンのゆらぎにして $\Delta\rho/\rho_0 \leq 3 \times 10^{-4}$ しかない。 $1+z_{\text{dec}}$ で、こんなに小さいゆらぎでは、 $z \sim 4$ どころか現在 ($z=0$) までたっても、銀河は言うまでもなく、 $\rho \geq 2\rho$ 程度の密度の高い球殻すら出来てこないものである。その上、バリ

* 北大理 Masayuki Umemura and Satoru Ikeuchi:
Large-Scale Structure in the Universe

オンの密度パラメーターは別の条件から $\Omega_b \leq 0.1$ とおさえられており、 $\Omega \sim 1$ ほどに大きくとることなどとても出来ない。どうもバリオンの密度ゆらぎを種とするのは見通しが暗い。

3. ニュートリノ支配宇宙

ところが、バリオンではなく、 Ω は大きくとれて輻射を引きずらない無衝突粒子を考えると事情はがらりと変わる。バリオンの密度パラメーターは $\Omega_b \leq 0.1$ であるのに対して、運動から決める質量を用いて Ω を決定してやると、 $\Omega \geq 0.2$ となり重大な違いがある。これはこの宇宙にバリオン以外の何やら得体の知れない質量を持った物質があることを意味している。それは何であろうか？

その有力な候補の一つは、質量を持ったニュートリノである。ニュートリノがもし数 eV の質量を持てば（陽子は $m_p \approx 10^9$ eV）、その密度はバリオンを上回る。よって、ニュートリノの質量が $m_\nu \geq 10$ eV であれば、宇宙の物質密度は、ニュートリノによって支配されることになる。その密度パラメーターは、 $m_{\nu 30} \equiv m_\nu / 30$ eV とし、 $\Omega_\nu \approx 0.3 m_{\nu 30} h^{-2}$ と書ける。1980年リュビモフらは、3重水素のベータ崩壊の測定から $20 \leq m_\nu \leq 40$ eV という値を出した。ニュートリノがもしこの程度の質量を持つとすると、 $h=0.5 \sim 1$ を考えて $\Omega_\nu \sim 1$ となる可能性は十分にある。2節で述べた2つの条件のうちの1つが、これによって解決される。もう1つは $1+z_{\text{dec}}$ におけるゆらぎの大きさである。ニュートリノのゆらぎが成長し始める時期は $1+z_{\text{dec}} \approx 10^3$ よりもずっと前で、 $1+z_\nu \approx 1.8 \times 10^5 m_{\nu 30}$ の頃である。そしてその典型的スケールは、質量にして $M_\nu = 4.0 \times 10^{15} m_{\nu 30}^{-2} M_\odot$ 、半径で $R_\nu = 12.5 m_{\nu 30}^{-1} (1+z)^{-1}$ Mpc である。なんとこれは、現在即ち $z=0$ で、典型的なボイドの半径と同じではないか！ $1+z_\nu$ の時期から $1+z_{\text{dec}}$ まで、バリオンは輻射場を引きずっているためにゆらぎは成長せず振動するだけなのに対し、ニュートリノの方は輻射場に束縛されていないのでゆらぎが成長できる。 $1+z_\nu$ で両者のゆらぎの大きさが同じだとすると、バリオンのゆらぎが黒体輻射の条件 ($1+z_{\text{dec}}=10^3$ で $\Delta\rho_b/\rho_b \leq 3 \times 10^{-4}$) を満たすようにとると、ニュートリノのゆらぎは $1+z_{\text{dec}}$ で最大 $(\Delta\rho_\nu/\rho_\nu)_{\text{max}} \sim 5.4 \times 10^{-2} m_{\nu 30}$ ほどには成り得る。 $\epsilon_\nu \equiv \Delta\rho_\nu/\rho_\nu \geq 10^{-2}$ 的な大きなゆらぎをとってこれるわけである。さらに、のよプレスとビッシュニャックは、丁度 $1+z_{\text{dec}}$ の前後に、 $10^{16} M_\odot$ までのバリオンゆらぎは光子の拡散によって減衰してしまうことを示した。この場合 $1+z_\nu$ でのバリオンゆらぎをもっと大きくとると、 $1+z_{\text{dec}}$ の時期には黒体輻射の条件を満足するくらい小さく減衰してしまうので、 ϵ_ν はもっと大きくとれる可能性がある。このように、ニュートリノが支配する宇宙を考えたとき、密

度ゆらぎの問題が解決するだけでなく、宇宙の大構造の特徴的なスケールまで自然に出てくる。

ニュートリノの質量がまだ確定したわけではないのに、多くの宇宙物理学者がニュートリノに多大な期待を寄せるのは、上記の様な効能から、これこそは宇宙の不老不死の妙薬であると密かに思っているからに他ならない。

4. ニュートリノ支配宇宙でのボイド及び銀河の形成

1984年4月、サイエンスの表紙に何やら宇宙の細胞構造らしき絵が掲載された。これは、セントレラとメロットが、衝突しない粒子を空間にばらまいて3次元のシミュレーションをして得た結果に色づけをしたものである。この図を直ちに宇宙の銀河分布の立体図と考えるのは早合点というものである。何故なら、この計算は $\Omega \sim 1$ として無衝突粒子で計算したものであり実際にはニュートリノの分布を計算したようなものである。ピープルスが行ったボイドの計算もそうであった。前に述べたように“そんな構造が出来てくる”というだけの議論ならよいが、銀河の分布と結びつけようとする、それを構成しているバリオンを含めその散逸の効果を考えに入れなければ、銀河形成の時期やその質量、それらの分布を議論することはできない。しかし彼らの計算でも、今あるスーパーコンピューターの機能を限界近くまで使って成し得たことである。それにさらに衝突（散逸）という性質を持った粒子を混入させることは容易なことではない。容易ではないからまだやられていない。しかしそのような大計算をやらずとも、より簡単なモデルでその本質的な物理過程をつかみ出すことはできる。それは、球対称を仮定してニュートリノ（無衝突系）とバリオン（散逸系）の2粒子系の計算をすることである。これは先に述べたように、負の密度ゆらぎが成長してボイドができる時には必ず球対称に近づくということに注目したモデルである。

4.1 計算モデル

基礎方程式として、時間 t 、半径 r 、速度 v 、密度 ρ 、圧力 P を使って、

$$\text{運動方程式} \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{GM_r}{r^2} \quad (1)$$

$$\text{連続の式} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho v) = 0 \quad (2)$$

を、ニュートリノ (ν) とバリオン (b) の両方についてたてる。ただし、圧力 P は、

$$P = \begin{cases} k \rho_b T_b / \mu_H & \dots\dots \text{バリオン} \\ 0 & \dots\dots \text{ニュートリノ} \end{cases} \quad (3)$$

であり、 $M_r \equiv \int_0^r 4\pi r'^2 (\rho_\nu + \rho_b) dr$ である。 k はボルツマン定数で、 μ_H はニュートリノを除いた粒子1個当りの平

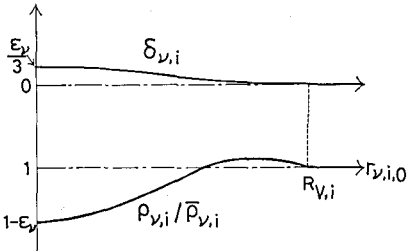


図 1 初期 ($1+z_{dec}=10^8$) のニュートリノ密度ゆらぎ.

均の質量である。又、今の計算では断熱を仮定するので、比熱比を $\gamma (=5/3)$ として次の式

$$\frac{d}{dt} \ln(T_b/\rho_b^{\gamma-1})=0 \quad (4)$$

によってバリオンの温度 T_b が決定される (初期の温度は $T_b(z_{dec})=4000$ K)。これらの方程式を連立させて数値的に解く。進化を追うのは、中性化の時期 ($1+z_{dec}$) から現在 ($z=0$) までである。次に、初期の密度ゆらぎの与え方であるが、密度ゆらぎはそもそも構成粒子の運動の一樣からのずれによって起るものであるから、ニュートリノに $r_{ν,i}=r_{ν,i,0}(1+\delta_{ν,i})$ という変位を与えて作ることにする (0 は一樣な場合を表わす)。 $\delta_{ν,i}$ は図 1 上の様な、なめらかな関数である。その結果として図 1 下の様な形の密度ゆらぎができる。中心でのゆらぎの大きさ

$\Delta\rho/\rho_v$ が ϵ_v である。図 1 で $R_{ν,i}$ は $R_{ν,i}(0)=R_{ν,i}(1+z_{dec})$ がおよそ最終的に ($z=0$ で) できるボイドの半径だとして値を選ぶ。

4.2 パラメーターと運動のスケーリング

この計算を行う際、色々な値を取り得るパラメーターがいくつかあり、最初に決めてやらなければいけない。それらは、 ϵ_v , Ω_v , Ω_b , $R_{ν}(0)$ (又は $R_{ν,i}$) である。ところが、運動方程式 (1) は $r \rightarrow \beta r$, $v \rightarrow \beta v$, $M \rightarrow \beta^3 M$, $\rho \rightarrow \rho$, $P \rightarrow \beta^2 P$ という変換をしても形が変わらない。このとき、運動は上の変換によってスケールされていると言う。このことを利用すると、たとえば $R_{ν,i}=R_{ν}(0)/(1+z_{dec})=10\text{Mpc}/10^9=10^{-2}\text{Mpc}$ の場合について計算すれば、他の $R_{ν,i}$ に対する結果は $\beta \equiv R_{ν}(0)/10\text{Mpc}$ として上の変換則に従って換算して求めることができる。即ち、ボイドの大きさに応じて物理量が決められるわけである。 Ω_b は観測からある程度決まっている。 ϵ_v も、許される値の最大値をとることにすると、 ϵ_v , Ω_v 及びゆらぎのスケール R_v まで、ニュートリノの質量だけを与えれば決まってしまうから、結果を支配するパラメーターは m_ν 1 つということにもなる。ニュートリノの質量が、宇宙の全体像を決めてしまうという事態になるわけだ。軽いニュートリノでも荷の重い役を演じているのである。

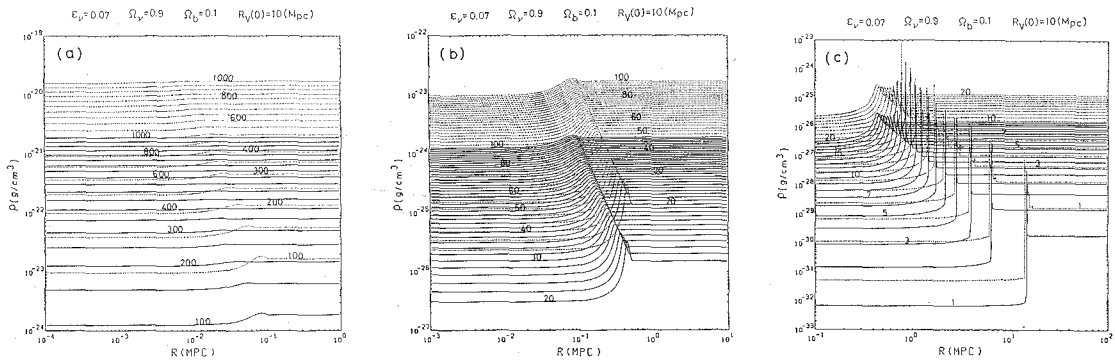


図 2 ニュートリノ (点線) とバリオン (実線) の密度分布の時間変化。(a) $1+z=1000\sim 100$, (b) $100\sim 20$, (c) $20\sim 1$ (現在)。(線のすぐ上の数字が $1+z$ の値.)

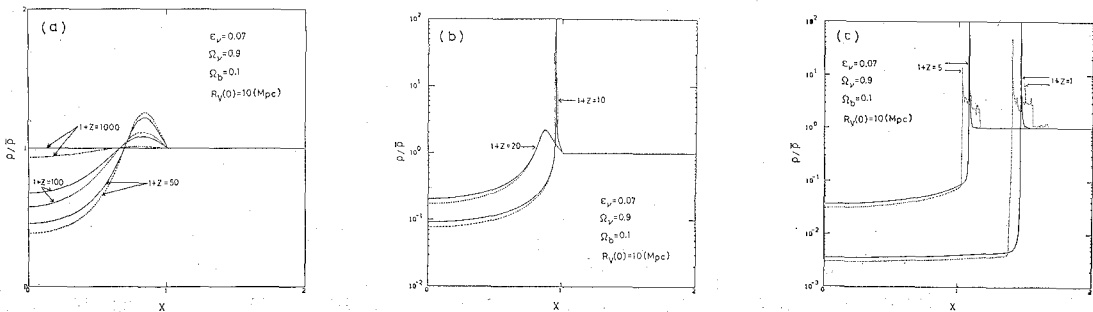


図 3 宇宙膨脹に乗った座標系 $X=r(1+z)/R_{ν}(0)$ での密度比 $\rho_v/\bar{\rho}_v$ (点線), $\rho_b/\bar{\rho}_b$ (実線) の分布。 $\bar{\rho}$ は各粒子の平均密度。

我々の計算は、後々のことを考え $\Omega_v=0.9$, $\Omega_b=0.1$ ($\Omega=\Omega_v+\Omega_b=1$) のインシュタイン・ド・ジッター宇宙か、 $\Omega_v=0.1$, $\Omega_b=0.05$ の開いた宇宙モデルを採用した。ニュートリノ密度ゆらぎの大きさは、3節で述べた議論に従い不定性を考慮して $\epsilon_v=0.01\sim 0.1$ とした。バリオンの $1+z_{dec}$ におけるゆらぎは、 ϵ_v より2桁以上小さいのでゼロとしても結果に影響を与えない。

4.3 ボイドと高密度球殻の形成

図2と3には、 $\epsilon_v=0.07$, $\Omega_v=0.9$, $\Omega_b=0.1$, $R_v(0)=10$ Mpc とした場合の密度分布と時間変化を示した。初期に一樣であったバリオンは、ニュートリノゆらぎの成長に引きずられ、 $1+z\approx 50$ の時期にはニュートリノと同形の分布をするようになることがわかる。そして、 $1+z\approx 20$ には密度の高い球殻の部分で $\Delta\rho/\rho=\rho/\bar{\rho}-1>1$ となり密度ゆらぎは非線型になる。これはさらに成長し $1+z_{cross}\approx 11$ で、ニュートリノ、バリオン共に非常にシャープな球殻ができ、密度はこの成長過程で最大となる。ここで、ニュートリノの運動に引張られてきたバリオンガスは急激に散逸して温度が急上昇する。温度の時間変化は図4の $T(r_m)$ で示した。一方、ニュートリノの方は衝突しないので、すれ違いが起る。このようにして“散逸による分離”が起ったとき、密度が最大、自由落下時間は最小となるので、銀河形成はこの後に起ったものと考えられる。これから先、両者の密度分布は明確に異なり、図5に示すように、ニュートリノは次々に高密度球殻に集ってくるものと共に互いにすれ違いをし、厚みのある、およそ3ピークの構造を作るのに対し、バリオンはその中心部にシャープな球殻を形成する。中心部

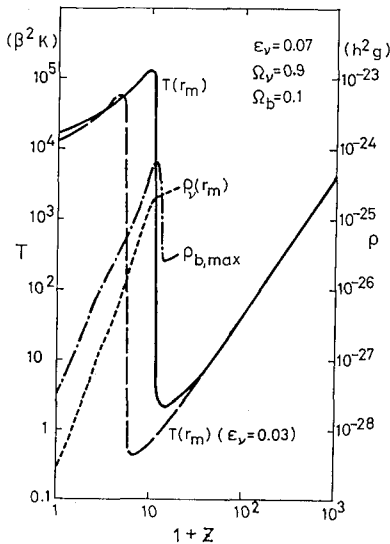


図4 バリオン密度の最大値 $\rho_{b,max}$ と、その部分の温度 $T(r_m)$ 及びニュートリノ密度 $\rho_v(r_m)$ の時間変化。

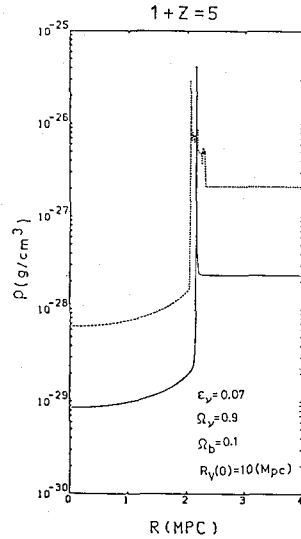


図5 $1+z=5$ における密度分布の拡大図。点線はニュートリノ、実線はバリオン。

での密度は、バリオンの方がニュートリノよりも大きい(図4の $\rho_{b,max}$, $\rho_v(r_m)$ 及び図5を参照)。 $1+z_{cross}$ 以降、高密度球殻の前面は、自己相似解という解析解に従って膨脹し、 $R_s \propto (1+z)^{-6/5}$ で半径が増大して行く(図6参照)。これは、ハッブル膨脹 ($R \propto (1+z)^{-1}$) をしている周囲のガスよりも速い膨脹なので、高密度球殻が周りのガスを掃き集めて行くことになる。掃き集めたガスの量が元々の高密度球殻のガスの量を上回ると、球殻の質量は $M_s \propto (1+z)^{-3/5}$ で増大して行く。

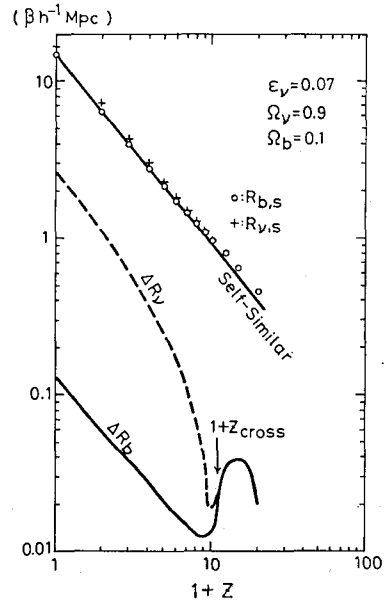


図6 高密度球殻前面の半径 $R_{b,s}$, $R_{v,s}$ 及び球殻の厚み ΔR_v , ΔR_b の時間変化。直線は自己相似解。

4.4 高密度球殻の重力不安定

このように成長してきたバリオン・ニュートリノ混合高密度球殻の重力不安定質量を“エネルギー原理”によって求めることにする。球殻がこの不安定な質量を持った塊に分裂し、その各々が銀河として進化して行くと考え。 “エネルギー原理”というものは、運動エネルギー (E_K)、重力エネルギー (E_G)、熱エネルギー (E_I) を合わせた全エネルギー (E_T) が負になったとき、重力不安定が起こるとするものである。これを調べるために、球殻から切り出した半径 a のパンケーキの全エネルギーを計算する。このとき $E_K = Aa^2$, $E_G = -Ba$, $E_I = C$ 即ち $E_T = Aa^2 - Ba + C$ の形で表わされ、 $a_1 < a < a_2$ なるパンケーキに対して $E_T < 0$ となる。 E_T が最小となるのはパンケーキ半径が a_m のときで、これは重力的に最も不安定である。すぐわかるように、 $a_m = B/2A$ は、熱エネルギー C (即ち温度) には依らない大きさである。このような半径 a_m のバリオン・バーガー (図7) の質量を計算し、その時間変化を示したのが図8である (単位はスケール項 $\beta = R_v(0)/10 \text{ Mpc}$ と h 依存性を考慮してある)。図8を見てわかるように、 $1+z_{\text{cross}}$ 以降であら

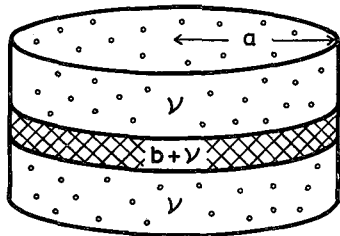


図7 高密度球殻から切り出したバリオン・バーガー

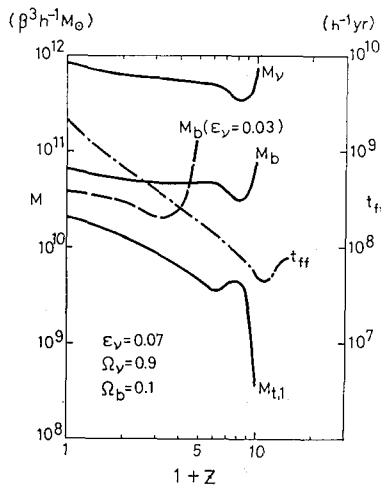


図8 バリオン・バーガー (図7) の質量 (M_b はバリオンだけ、 M_b はニュートリノだけの質量) と、重力的に不安定な最小の質量 ($M_{t,1} = M_{b,1} + M_{\nu,1}$) 及び自由落下時間 (t_{ff}) の時間変化。

ば、どこで分裂しようと、その質量はあまり変わらず、典型的な大きさ ($\beta=1\sim 2$) のボイドが出来るとき、それは典型的な銀河の質量となる。又図8には自由落下時間 t_{ff} と不安定な最小の質量 (半径 a_1 のパンケーキ質量) $M_{t,1} = M_{b,1} + M_{\nu,1}$ の時間変化を合わせてプロットした。 t_{ff} は $1+z_{\text{cross}}$ 以後 $t_{ff} \approx 0.2H^{-1}$ (ただし $H = H_0(1+z)^{3/2}$) であり、これは常にその時の宇宙年齢 ($\frac{2}{3}H^{-1}$) の3分の1程度の大きさである。現在 ($z=0$) に近づくほど、収縮してつぶれる迄の時間は長くなる。又 $M_{b,1} \approx 0.1M_{t,1} = 10^{7-9}\beta^3 h^{-1} M_\odot$ は、クエーサーのスペクトルに観測されているライマン α 吸収雲の質量に相当する大きさである。

4.5 ϵ_ν と Ω_ν に対する依存性

図4と8には、 $\epsilon_\nu = 0.03$ 即ち $1+z_{\text{cross}} = 5$ の場合の $T(r_m)$ と M_b をプロットしたが、4.4で述べた結果は $1+z_{\text{cross}}$ 以降であれば ϵ_ν にはあまり依存しないことがわかる。問題は、 $z \sim 4$ までに銀河を作れるか ($z_{\text{cross}} \geq 4$ となるか) という点だけである。 $1+z_{\text{cross}}$ の ϵ_ν に対する依存性は図9に示した。 $\Omega_\nu = 0.9, \Omega_b = 0.1$ (太線) の場合、 $1+z_{\text{cross}} \approx 1.6 \times 10^2 \epsilon_\nu$ という比例関係が成り立つので $\epsilon_\nu \geq 0.03$ であれば $z_{\text{cross}} \geq 4$ となる。 $\Omega_\nu = 0.9$ となるのは、ニュートリノの質量が $m_\nu = 10 \sim 90 \text{ eV}$ のときである。そして、 ϵ_ν の上限値を3節の議論に従って $5.4 \times 10^{-2} m_{\nu,30}$ とすれば、 $\epsilon_\nu \geq 0.03$ は $m_\nu \geq 17 \text{ eV}$ を必要とするので、およそ $m_\nu \geq 20 \text{ eV}$ であれば $z \geq 4$ 度うまく銀河作りに成功する。

しかし、 $\Omega_\nu = 0.1$ ($m_\nu = 1 \sim 10 \text{ eV}$ のとき)、 $\Omega_b = 0.05$ の場合 (図9細線)、 $z_{\text{cross}} \geq 4$ となるためには $\epsilon_\nu \geq 0.07$ が必要で、 $m_\nu \geq 40 \text{ eV}$ が要求されることになるので、 Ω_ν

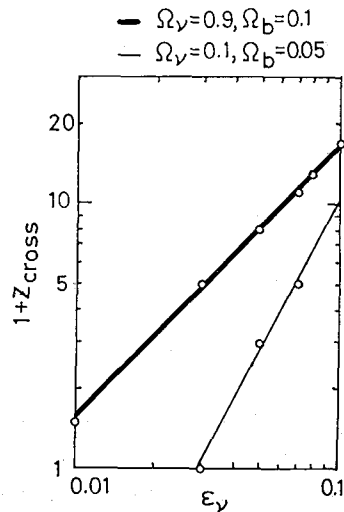


図9 高密度球殻形成時期 ($1+z_{\text{cross}}$) と初期のニュートリノ密度ゆらぎ (ϵ_ν) の関係。

の値との間に矛盾をきたす。ニュートリノの質量が $m_\nu = 1 \sim 10 \text{ eV}$ の場合、 $z \geq 4$ での銀河形成は説明しづらいということになる。もちろん、先に述べた中性化の時期におけるバリオンゆらぎの減衰が非常に大きかったとすれば、まだ $\Omega_b = 0.1$ の宇宙が助かる望みはあるが。

5. 結論——宇宙の大構造

以上、得られた結果を数 10 eV の質量をもつニュートリノと結びつけると、実に自己矛盾のない統一的宇宙像が出来上がるのである。

$\Omega_b = 0.9$, $\Omega_m = 0.1$ のアインシュタインード・ジッター宇宙を考えたとき (再び $m_{\nu,30} = m_\nu/30 \text{ eV}$, $h = H_0/100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ として),

I—宇宙初期に存在したニュートリノゆらぎのうち、最初に成長する

$$R_\nu = 12.5 m_{\nu,30}^{-1} (1+z)^{-1} \text{ Mpc}$$

の大きさのゆらぎは、即現在のボイドの大きさを示唆し、高密度球殻の質量は現在、バリオンだけで

$$M_{s,b} \approx 7 \times 10^{14} m_{\nu,30}^{-3} h^{-1} M_\odot,$$

ニュートリノと合わせると

$$M_{s,t} \approx 1 \times 10^{16} m_{\nu,30}^{-3} h^{-1} M_\odot$$

である。そして、分裂する塊の質量はボイド半径の3乗に比例して

$$M_b \approx 2 \times 10^{11} m_{\nu,30}^{-3} h^{-1} M_\odot$$

$$M_l \approx 2 \times 10^{12} m_{\nu,30}^{-3} h^{-1} M_\odot$$

となる。即ち、半径数 10 Mpc の典型的なボイドの周辺には、典型的な質量 ($10^{11} \sim 10^{12} M_\odot$) の銀河が数千個できることになり、観測されている銀河の分布がそのまま再現

される。

II—球殻の膨張速度のハッブル膨張からのずれは、 $300 \sim 500 \text{ km s}^{-1}$ である。この一部が散逸すると、それは各銀河の無秩序な速度になると考えられるが、我々の住むおとめ座銀河団中で観測されている銀河の無秩序速度は、 200 km s^{-1} 程度である。

III—高密度球殻のバリオンガスは、 $T \approx 2 \times 10^5 m_{\nu,30}^{-2} \text{ K}$ まで再加熱されるので、銀河のような塊にならなかったガスは、高温高電離状態で天体の周りを満たしていることになる。これは、ガン・ピーターソンの観測と一致する。

以上のように、ニュートリノが数 10 eV の質量を持つならば、この宇宙は銀河スケールに至るまで、統一的に説明することが可能なのだ。

6. さらなる可能性

しかし、ニュートリノの質量が数 10 eV もないということが判明したとしても、この理論を潔く諦め過ぎない方が良いかもしれない。ここで得られた“典型的な大きさのボイドができるとき典型的な質量の銀河が生まれる”という重要な結論は、無衝突粒子で $\Omega \sim 1$ になり得て、中性化の時期に 3 K 黒体輻射の等方性と矛盾せずに大きなゆらぎをとってこれる物質に対しては、公平に成り立つことなのだから。最近では、素粒子物理学の方から、何やらまさにつかみどころのない粒子が次々に誕生している。とにかく、ゆらぎの大きさも含め、宇宙が今より千倍以上小さかった昔の話は、まだ語り継がれるほどの筋骨きを持ってはいないのである。

雑 報

CCD による微光天体の観測

CCD の測光精度の高さを生かして、夜空よりも暗い天体が観測されている。夜空自体を非常に高い精度で測光しておいて、差し引きをすれば、夜空の光の中に埋もれていた天体を浮かび上がらせることができるわけである。実際には、CCD の各ピクセル間には数パーセントの感度ムラがあるので、単純な差し引きだけでは、夜空の 10 分の 1 の明るさの天体までしか検出できない。そこで、ピクセル間の感度差を除去する方法がいろいろと考案されている。中でも、ドリフト＝スキャンという方法は非常に強力である (天文月報 2 月号参照)。これは、クロックに同期して CCD チップを機械的に 1 ピクセル分づつずらすことにより、天空上の一点から来た光を、同一コラムに属す全てのピクセルに平等に感光させようというものである。この操作により、同一コラムに属すピクセル間については、感度差を較正する必要がなくな

る。各コラム間の感度差については、各コラムで得た夜空の明るさが等しくなるように補正する。

図 1 上の写真は、キット＝ピークの 4 m 望遠鏡にドリフト＝スキャン CCD を用いて、露出時間 70 分で撮影したものである。シーイング＝サイズは、 1 秒角以下であった。フィルターは、Rバンド ($600 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$) 用よりやや広めのものが使われている。視野の広さは $249'' \times 138''$ で、銀河北極方向が写っている。GEC の素子数 385×576 の CCD が使われているが、CCD をスキャンしているため、写真の分解点数は縦 512 、横 3000 になっている。

どれくらい暗い天体が写っているかを知ってもらうために、いくつかの天体について、R 等紙を表示した。印刷したときに出るかどうか心配であるが、限界等級 (25.9 等) の天体の一つを十字で囲った。夜空の明るさは 19.7 等である。原版では、この写真の中に、 25.9 等の天体が 400 個写っている。夜空の明るさは光子数換算で 10^6 個である。ショット＝ノイズで決まる 0.1 パーセ