

# 見えない質量と銀河形成

藤原 隆 男\*

## 1. はじめに

宇宙には見えない物質が大量に存在する。その正体については天文屋と物理屋がさかんに議論しているが、ふつうの物質でない可能性が大きい。有力な候補はニュートリノであるが、最近では他の様々な粒子も候補にあげられている。見えない物質は宇宙の質量の大部分を担っており、銀河形成に重要な役割を果たしたと考えられる。以下では、ニュートリノを中心に、見えない物質が天体の形成にどうかかわったと考えられるかを見てみよう。

## 2. 見えない質量

見えない物質は、力学的にその存在がわかるだけで、光では全く見えず、「見えない質量」、「隠された質量」などとよばれている。「ミッシング・マス」(見あたらない質量)という言葉もよく使われるが、行方不明になっているのは光の方だから「ミッシング・ライト」とよぶべきかも知れない。

見えない質量の存在は銀河団について既に 1930 年代に知られていた。銀河のでたらめな運動の速度から求めた銀河団の質量が、銀河の質量・光度比を用いて推定される質量の 10 倍から 100 倍もあったのである。1970 年代になって、見えない質量が個々の銀河にも存在することがわかってきた。渦状銀河の回転速度を星がほとんどない数十 kpc の遠方 (1 pc は 3.26 光年) まで測ってみると、予想に反して回転速度は一定となっていたのである。これは光らない物質が銀河のまわりをとり囲んでいることを意味する (その密度  $\rho$  は、中心からの距離を  $r$  として  $\rho \propto r^{-2}$ 。この見えない物質は、100 kpc あたりまで広がっていればその質量が見える銀河の 10 倍にもなることから、銀河の大質量ハローとよばれる。我々の銀河については、太陽が銀河の中 (中心から 8-9 kpc) にあるため遠方の回転速度を測れないが、隣の銀河 M31 との相対運動から、2つの銀河の質量の和は約  $5 \times 10^{12} M_{\odot}$  と推定されている ( $M_{\odot}$  は太陽質量)。我々の銀河は M31 よりやや小さいが、それでも質量は  $10^{12} M_{\odot}$  以上はあるだろう。これは見える部分の質量より 1 桁大きい。大質量ハローの形状については、向きが異なる 2つのガスリングをもつ銀河の観測から、球に近い (平らではない) ことが知られている。

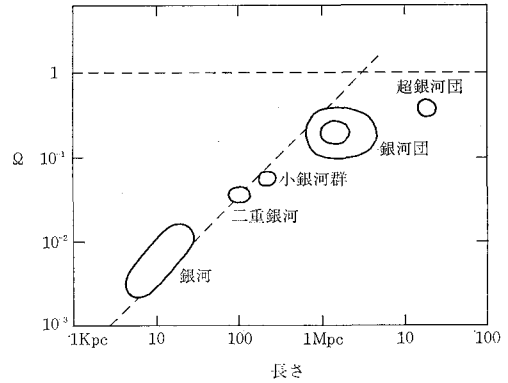


図1 天体の質量から推定される宇宙の密度。図中の銀河の位置は大質量ハローを含めれば二重銀河のあたりになる。デイビス達 (1980) による。

図1は、銀河以上の天体について、その質量から推定される宇宙の密度を表わしたものである。 $\Omega$  は、宇宙を閉じさせるのに必要な臨界密度  $\rho_c = 1.9 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3}$  を単位とした密度である ( $h$  はハッブル定数を  $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  で割ったもので、観測的には  $0.5 \leq h \leq 1$ )。図の右上は、我々の銀河を含む局所銀河群がおとめ座超銀河団に向かってもつ速度から推定された密度で、 $\Omega$  は約 0.4 である。図からわかるように、大きいスケールで見ると見えない質量は高い割合で含まれており、宇宙全体で見れば  $\Omega$  が 1 の前後であることも十分考えられる。

さて、見えない質量の正体は何か。その答に対する一つの制限が元素合成からつけられる。宇宙の温度が  $10^9 \text{ K}$  の頃、陽子と中性子から軽い元素が合成されたが、このときできる重水素の量は核子 (陽子と中性子) の密度に強く依存する。宇宙の標準モデルによる理論値と観測される重水素量の比較から、核子の密度は  $\rho_c$  を単位として  $\Omega_N \approx (0.01-0.02)h^{-2}$  となる。全質量密度  $\Omega$  が 1 に近いとすれば、核子はその数パーセントしか占めていないことになる。核子以外の物質として有望視されている粒子の一つが、質量をもつという実験的兆候のあるニュートリノ (中性微子) である。次の節では、ニュートリノが質量をもつ場合、銀河形成のシナリオがどう書かえられるかを述べよう。

## 3. 銀河形成のシナリオ

### 3.1 見えない質量がないとき

まず、核子だけの宇宙 ( $\Omega < 1$  とする) での銀河形成

\* 京大理 Takao Fujiwara: Unseen Matter and The Formation of Galaxies

についておさらいしよう。宇宙がもし完全に一様であれば、どんな天体もできなかったであろう。銀河は物質密度のわずかなゆらぎが重力によって成長してできたと考えられる。ゆらぎは、水素が電離している間は輻射に妨げられて成長できなかったが、温度が  $T \sim 3000 \text{ K}$  まで下がって水素が中性化すると、輻射との結合が切れて成長を始めた。中性化の直前のゆらぎには、輻射と一緒に音波のように振動する断熱ゆらぎと、核子密度の「むら」である等温ゆらぎ（またはエントロピーゆらぎ）の 2 種類が考えられる。銀河のでき方は、どちらのゆらぎが主役であったかによって異なる。図 2 は、それぞれのゆらぎに対する銀河形成のシナリオを概念的に表わしたものである。天体ができたとされる時期を赤方偏移  $z$  で示した。水素の中性化の時期は、 $z_{\text{dec}} \sim 1000$ 、現在は  $z=0$  である。[宇宙での時期を表わすとき、時間  $t$  の代わりに  $z$  がよく用いられる。  $z$  を使うと、輻射の温度は  $T = T_0(1+z)$ 、膨張パラメータ（一様膨張にのった 2 点間の距離）は  $a = a_0(1+z)^{-1}$  と表わせる（添字 0 は現在の値で、 $T_0 = 2.7 \text{ K}$ ）。また、 $\Omega = 1$  の宇宙では  $1+z = (t/t_0)^{-2/3}$  が成り立ち（ $t_0 \sim 10^{10}$  年）、ゆらぎの成長は  $\delta\rho/\rho \propto (1+z)^{-1}$  と表わせる。 $\Omega < 1$  の開いた宇宙も、 $1+z \sim \Omega^{-1} - 1$  の時期までは  $\Omega = 1$  の宇宙で近似できる。]

断熱ゆらぎには、あるサイズより小さいゆらぎが存在しない [図 2 (a)]。これは、波長の短いゆらぎが輻射（光子）の拡散によって減衰してしまったためである。最小波長に含まれる質量は減衰質量（またはシルク質量）とよばれる。 $z \sim 1000$  での値は、密度が臨界密度の数パーセントのとき約  $10^{15} M_{\odot}$  である。これは銀河団の質量にあたる。ゼリドピッチらは、減衰質量のゆらぎが成長して天体をつくるとき、ある方向の収縮が先行してぺちゃんこのパンケーキ状になると考えた。銀河はパンケーキのガスが分裂してできたことになる。断熱ゆらぎによる銀河形成説は「パンケーキ説」、「分裂説」などとよばれる。

等温ゆらぎがあれば、図 2 (b) のように小さいサイズのゆらぎも残っていたと考えられる。水素の中性化とともにジーンズ質量（重力で成長できる最小の質量で、約  $10^6 M_{\odot}$ ）以上のゆらぎは成長を始める。このときは、小さい天体がまず現われ、それが集まって次々に大きな天体をつくっていく。等温ゆらぎによる銀河形成説は「集団化説」とよばれる。

ところで、パンケーキ説には重大な問題点がある。断熱ゆらぎは輻射ゆらぎを伴うので、宇宙背景輻射の温度ゆらぎとして観測にかかる可能性がある。ところが、観測された温度ゆらぎの上限（今のところ上限しかわかっていない）は、現在までに天体ができるのに必要な断熱ゆらぎから期待される振幅よりも小さかったのである。パンケーキ説には次に述べるように見えない質量の存在が必要である。等温ゆらぎの方は輻射ゆらぎを伴わないので背景輻射からの制限を受けない。等温ゆらぎから生まれる初代の天体（ $10^3 \sim 10^8 M_{\odot}$ ）の一部がブラックホールや光らない小質量の星となり、それが見えない質量の正体だとする説もある。

### 3.2 見えない質量がニュートリノであるとき

はじめにニュートリノの性質について少し述べておこう。ニュートリノは相互作用が極めて弱い粒子で、かつて熱平衡にあった粒子・反粒子対が現在まで対消滅もせずに残っている。ニュートリノは少なくとも 3 種類（ $\nu_e, \nu_{\mu}, \nu_{\tau}$ ）あり、現在の個数密度は 1 種類につき約  $110 \text{ 個} \cdot \text{cm}^{-3}$ （光子の 3/11 倍）である。質量が  $30 \text{ eV}$  程度（電子の約  $10^{-4}$  倍）あれば宇宙の密度を説明しうる（1 種類だけが重くて、その質量が  $m_{30} \times 30 \text{ eV}$  であれば、ニュートリノの密度は  $\Omega_{\nu} = 0.3 m_{30} h^{-2}$ ）。ニュートリノは、昔はほぼ光速で走っていたが、宇宙膨張とともに非相対論的になってくると宇宙の質量の大半を担うようになる。ニュートリノのジーンズ質量はこの頃（ $z_m \sim 4 \times 10^4 m_{30}$ ）最大値  $M_{J, \text{max}} \sim 5 \times 10^{15} m_{30}^2 M_{\odot}$  をとる。ニュートリノは無衝突粒子なので、もしニュートリノに

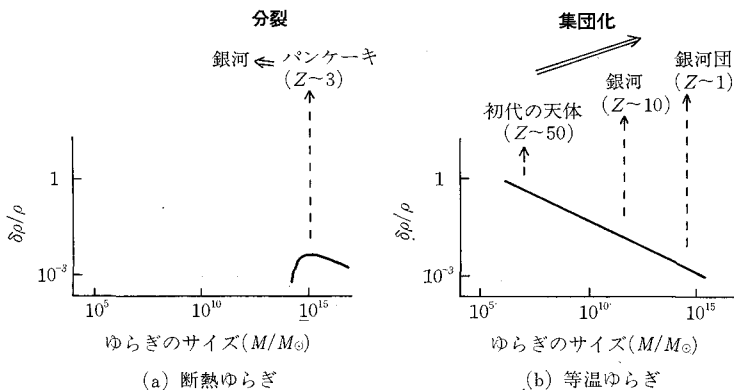


図 2 断熱ゆらぎと等温ゆらぎによる銀河形成のシナリオ。ゆらぎのサイズはゆらぎの波長に含まれる質量  $M$  で表わした。

ゆらぎがあっても  $M_{J, \max}$  より小さいゆらぎは速度分散の効果で減衰してしまう。ニュートリノのジーンズ質量はこのあと、 $M_J(z) = 7 \times 10^8 m_{30}^{7/2} (1+z)^{3/2}$  に従って小さくなる。

さて、ニュートリノ優勢宇宙 ( $\Omega \sim 1$  とする) での銀河形成はどのように起こるのであろうか。まず断熱ゆらぎがある場合を考える。ニュートリノのゆらぎ  $\delta\rho_\nu/\rho_\nu$  はもともと核子の断熱ゆらぎ  $\delta\rho_N/\rho_N$  と同じ位の大きさであったと考えられている。 $z_m$  の時点で  $M_{J, \max}$  以下のニュートリノゆらぎは消えているので、 $M_{J, \max}$  のサイズのゆらぎに注目しよう。これは超銀河団の質量にあたる。ニュートリノゆらぎはこのあと自由で成長できるが、核子ゆらぎの方は輻射に妨げられて  $z_{\text{dec}} \sim 1000$  (水素の中性化) の時期まで成長が止められる。従って  $z_{\text{dec}}$  の時点ではゆらぎの振幅に 1 桁以上の開きができていくことになる。このあと、ニュートリノゆらぎは核子を率いて成長し、超銀河団のサイズのパンケーキをつくる。ところで、 $z \sim 3$  の頃にパンケーキができるためには、 $z_{\text{dec}}$  で  $\delta\rho_\nu/\rho_\nu$  が  $10^{-2}$  近くなければならないが、これに伴う背景輻射のゆらぎは  $\delta T/T \sim 10^{-4}$  となり、観測からの条件  $\delta T/T \leq 10^{-4}$  をかろうじてパスする (もっとも、このあたりの議論は微妙で、必要なゆらぎの大きさは観測と矛盾するという人もいる)。

図 3 は無衝突粒子 (ニュートリノ) のゆらぎの成長のシミュレーションの結果である (メロット 1983)。初めに与えられたゆらぎの最小波長は画面 1 辺の 1/6 である。現われた構造は、最近明らかにされた銀河の大域的分布の様子とよく似ている。密度の高い壁 (パンケーキ) あるいは紐状の部分は超銀河団に、密度の低い部分は銀

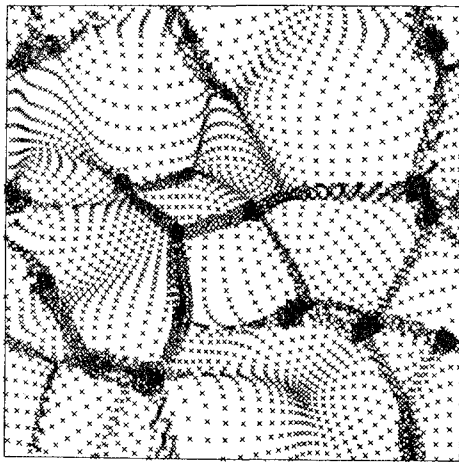


図 3 無衝突粒子のゆらぎの成長によって現われた構造。X は粒子の位置を表わす。計算は 2 次元で、紙面に垂直な方向には一様と仮定してある。メロット (1983) による。

河がほとんど存在しないボイド (空所) とよばれる領域に対応すると思われる。この構造は重力によってゆっくり崩れていくと考えられる。超銀河団の中で密度が特に高くなった部分が銀河団であろう。ところで、 $M_{J, \max}$  に対応するニュートリノゆらぎの最小波長は現在の長さで約  $50 m_{30} \text{ Mpc}$  であるが、これが観測されるボイドの大きさ (数十 Mpc) と一致することは注目すべきである。

銀河はニュートリノのパンケーキの中にできる薄い核子のパンケーキが分裂してできたと考えられる。ニュートリノの方は無衝突粒子なのでパンケーキに収縮するとき  $1000 \text{ km s}^{-1}$  の大きな速度分散を得る。この速度はニュートリノが銀河サイズに分裂するには大きすぎるので、断熱ゆらぎでは銀河の大質量ハローを説明できないように見えた。ところが、一部のニュートリノはパンケーキの中央面に高密度で速度分散が小さい ( $100 \text{ km s}^{-1}$  以下) 薄いシートをつくるのがメロット (1982)、ボンダ達 (1983) によって明らかにされた。このシートでは、しばしば問題になる位相空間密度はほぼ原始の値に保たれる。銀河の大質量ハローは、銀河がニュートリノのシートの中で生まれたと考えれば説明がつく。この銀河形成のシナリオでうまく銀河の質量が説明できるかどうかは、今後の興味ある問題である。

一方、核子の等温ゆらぎが銀河の種となったことも考えられる。核子のゆらぎの成長は質量の大部分を占めるニュートリノの影響を受ける。ゆらぎの質量を  $M$  としたとき、ニュートリノのジーンズ質量が  $M$  より大きい場合はゆらぎはほとんど成長できず、 $M_J(z) \sim M$  となってやっとなニュートリノをひきつれて実質的に成長を始める。銀河 ( $M \sim 10^{12} M_\odot$ ) が  $z \sim 3$  の頃まででできるためには核子に  $\delta\rho_N/\rho_N \sim 1$  の大きいゆらぎが必要である。銀河団や超銀河団は集団化によってできたと考えなければならない。等温ゆらぎのスペクトルの傾きによっては、 $M_J(z_{\text{dec}}) \sim 10^{13} M_\odot$  の天体が最初にできたことも考えられる。また、断熱ゆらぎが共存すれば、銀河形成は収縮しつつあるパンケーキの中で進行することになる。原始 (超) 銀河団の中での銀河形成は佐藤と高原 (1981) によって論じられた。

さて、実際の銀河の分布の様子はどちらの説に有利であろうか。パンケーキ説では図 3 に見られるような網目状の構造が予想される。集団化説では銀河のかたまりが支配的となるが、密度の高い部分に着目すればやはり網目のように見えてしまう。つながった構造を調べるのに適したパーコレーション理論による銀河分布の解析 (シャンダリンとゼリドピッチ 1983) では、パンケーキ説に分があるようである。

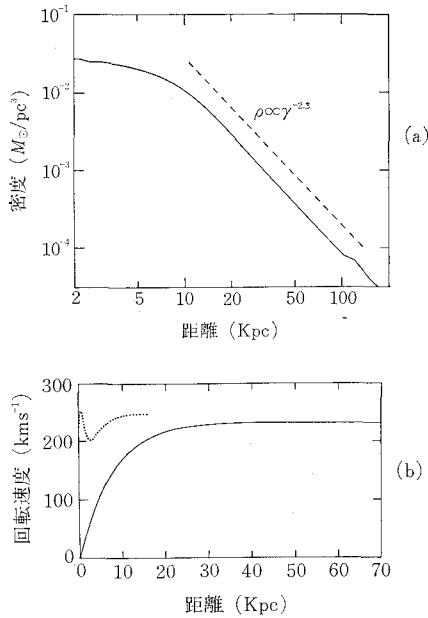


図 4 ニュートリノの収縮によってできる銀河の大質量ハロー. (a) は密度分布を, (b) は対応する回転速度を表す. 図の単位は, 回転速度を  $230 \text{ km s}^{-1}$ , ニュートリノの質量を  $30 \text{ eV}$  としたときの値. (b) の点線は我々の銀河の回転速度.

#### 4. 銀河の大質量ハロー

銀河ハローは本当にニュートリノであろうか. 図 4 は筆者が行なったニュートリノによる銀河ハローの形成のシミュレーションの結果である. 計算では, 臨界密度より少し密度が高い膨張媒質に球対称のゆらぎを与えてその収縮を追った. 得られた密度分布は外の方が  $\rho \propto r^{-2.2}$  となっており, 密度分布に対応する回転速度はほとんど一定となる. 実際には, 核子成分(ふつうのガス)がエネルギーを失って中心部に集積し星からなる見える銀河をつくると思われるので, 中心付近の回転速度はずいぶん変えられるだろう. ところで, 中心部の密度分布がほぼ一様な領域(コア)ではニュートリノの位相空間密度は原始の値に近かった. これは, コアの広がりやニュートリノの質量によって決まることを意味する. 得られた密度分布を我々の銀河のハローのモデルと合わせれば, ニュートリノの質量として約  $30 \text{ eV}$  が出てくる.

$\rho \propto r^{-2.2}$  というゆるやかな密度分布はニュートリノの速度分布の形(一種のフェルミ分布)と関係あると思われる. 筆者の計算では, 他の速度分布, 例えばマックスウェル分布をもつ粒子を収縮させると, 密度分布はもっと急になってしまう. また, ニュートリノより速度分散の小さい粒子であれば, 収縮の途中で大きな速度分散を与える何かのメカニズムが働かない限り, 小さい高密度

のコアができてしまうはずである. このように, 大質量ハローの密度分布の形を説明するにはニュートリノはたいへん具合がよい.

#### 5. EXOTICS

エキゾティクスといっても沢田研二のバンドではない. ここでは素粒子論で存在が議論されている不思議な粒子たちを考えよう.

ニュートリノは速度分散が大きいのが特徴で, 「熱い残存物」とよばれることがあるが, 同じフェルミ粒子としてグラビティーノ(重力微子), フォティーノ(光微子)があげられる. これらはニュートリノより更に相互作用が弱く, 個数密度も低いので, 見えない質量を説明するには  $1 \text{ keV}$  程度の質量が必要である. 速度分散はニュートリノより小さいので, 「温かい残存物」とよべるだろう. ニュートリノでは典型的な質量( $M_{J, \text{max}}$ )として超銀河団が出てきたが, 今度はちょうど銀河質量となる. これらの粒子は直接銀河質量を説明しようという点で興味深い. 別の粒子としてはアクシオン(軸性子)があげられる. これはボーズ粒子で, 凝縮状態にあった粒子が大量に残っていると考えられ, 質量が  $10^{-5} \text{ eV}$  もあれば見えない質量を説明できる. 速度分散が極端に小さいので「冷たい残存物」ともよばれる. どのように天体の形成にかかわってくるかはよくわかっていないが, ジーンズ質量が小さいことから, アクシオンの星あるいはブラックホールになっている可能性もある. 温かい残存物, 冷たい残存物が見えない質量である場合には, 銀河団や超銀河団は集団化によって説明しなければならないだろう.

#### 6. おわりに

銀河の質量がなぜ  $10^{11} \sim 10^{12} M_{\odot}$  なのか, 銀河がいつ頃できたのかという間に答えられる確定的な理論は残念ながらまだないが, 見えない質量がその答のカギをにぎっているような気がする. その正体については, 今後の物理の進歩に期待しなければならないだろう. 断熱ゆらぎか否かについては, もし断熱ゆらぎがあれば背景放射の非等方向性がもう少しのところで検出できると思われるので, 観測限界が下がることが望まれる. 銀河の分布の定量的解析も銀河形成のシナリオにとって重要である. 特に, ボイドに全く銀河がないのかどうかは興味ある問題である. また, 大質量ハローがもしニュートリノであれば, ハローのコア半径  $R_{\text{core}}$  と銀河の回転速度  $V$  の間に  $R_{\text{core}} \propto V^{-1/2}$  の関係が予想されるが, これは近傍の銀河の詳しい質量モデルをつくることによって見出せるかも知れない.

ここで述べたように、ニュートリノは宇宙の密度、ボイドの大きさ、銀河の大質量ハローの密度分布を同時に説明できるという点で最も都合がよい。楽観的な人の中には、我々は今世紀のうちに宇宙の歴史を自信を持って

語れるようになるだろうという人もいる。もっとも、ニュートリノが質量をもっていなければ話にならない。筆者としては、ニュートリノ（どの種類でもよい）が然るべき質量を持つことを祈る次第である。

学会だより

〔欧文研究報告、天文月報バックナンバーの頒布〕

欧文研究報告のバックナンバーを下記価格(送料実費)にてお分けします。なお、General Index (1巻～30巻)は1部 1600円, 送料 70円です。

天文月報のバックナンバーは各号1部 300円(送料実費)です。下記の欠号分についても同価格でコピー致します。

御希望の方は学会事務所へ御連絡下さい。

電話 0422-31-1359

記

Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)

Back'number Price List (1984)

単位: 円

Year	Vol.	Each Pricd	
		Vol.	No.
1949~1959	1~11	2,000	500
60	12	2,400	600
61~ 63	13~15	2,800	700
64	16	3,200	800
65~ 67	17~19	3,600	900
68~ 71	20~23	4,400	1,100
72~ 74	24~26	7,000	1,750
75~ 77	27~29	14,000	3,500
78~ 83	30~35	16,000	4,000

天文月報バックナンバー欠号表

Year	Vol.	No.	Year	Vol.	No.	Year	Vol.	No.
1908~10	1~3	全	43	36	4~12	66	59	4, 5, 11
11	4	3	44	37	1~ 7	67	60	1, 4
18	11	10~12	47	40	全	69	62	9
19	12	5	57	50	12	70	63	2~ 5
20	13	1~ 2	58	51	1	71	64	1~ 8
22	15	全	59	52	1~ 5	74	67	4~10
24	17	1~ 3	61	54	11	75	68	4~ 8
27	20	8~10	62	55	5, 11	77	70	4~ 9
28	21	1~ 8	63	56	6	81	74	4~ 7
42	35	4~ 5	65	58	2, 10, 11	82	75	6

(38巻, 39巻は発行中止です)