

銀河・銀河団の回転速度関数

鳴 作 一 大

〈東京大学理学部 〒113 東京都文京区弥生2-11-16〉

銀河と銀河団をその力学的性質を用いて統一的に捉え、銀河形成の謎を解く手がかりにする。

1. 初めに

1.1 宇宙は銀河で満ちている

まず初めに、1つ問題を出しましょう。空の適当な場所を世界有数の大望遠鏡で何時間も露出したら、何が見えると思いますか。むやみに星が写っていることが容易に予想されますが、答えはそう単純ではありません。確かに非常に多くの星が写ります。しかし、みかけは暗くて小さいものの明らかに星とは異なる天体が星の数を上回るほどあることに気づきます。その数のあまりの多さは視野を埋め尽くすほどです。これらはいったい何でしょうか。

太陽は銀河系と呼ばれる星の大集団に属していますが、こうした星の大集団は宇宙に広く存在しており、これらは銀河と呼ばれます。実は、先の質問で視野を埋め尽くすほど写っていたものは銀河なのです。銀河系の外に出て宇宙をながめると、目につく天体はほとんどが銀河でしょう。その意味で、銀河は宇宙の基本的な構成天体といえます。銀河は宇宙に一様に分布しているわけではなく、数十から数千個集まって銀河群・銀河団を作っている場合もあります。銀河群・銀河団は銀河どうしの結びつきがゆるやかで、独立した天体と認め得るぎりぎりの天体です。

1.2 銀河形成は大問題

膨張宇宙論によれば、宇宙は百数十億年前に原

因不明の大爆発によって誕生し、今に至るまで膨張を続けています。膨張宇宙論には多くの根元的・哲学的問題が残されていますが、宇宙膨張の歴史のなかで銀河がどうやって生まれたかも、宇宙論、さらには天文学の最大の謎の1つです。

現在、多くの銀河形成モデルがありますが、その多くは、宇宙初期に僅かな密度のむらむら（これを密度ゆらぎといいます）を仮定し、それを時間とともに成長させて銀河や銀河団を作るというものです。ここで仮定されている宇宙初期の密度ゆらぎは、昨年4月にアメリカのCOBE衛星がおこなった大発見によって、強力な支持を得ました。すなわち、宇宙初期の名残りとして存在している電波（いわゆる背景輻射）の強度がかすかに空間的にゆらいでいることを発見したのです。宇宙初期には陽子や電子などの普通の物質と光が強く相互作用していたので、電波のゆらぎはそのまま物質の密度ゆらぎとみなせます。

2. 宇宙論テストで理論を試す

COBE衛星の観測は、宇宙のある時期の密度ゆらぎの大きさを決めた点で、銀河形成論に1つの制限を与えます。たとえば、宇宙初期に非常に大きな密度ゆらぎを想定しないと現在までに銀河を作れない理論は、COBEの観測によって否定されてしまいます。各々の銀河形成モデルは、銀河が誕生した時期、その進化のしかた、宇宙空間での銀河分布の様子など、銀河進化の各段階でそれぞれ異なった予言をします。さらに、宇宙の基本定

Kazuhiro Simasaku: Velocity functions of galaxies and clusters of galaxies

数の値によっても結果は大きく変わります（宇宙の基本定数とは、宇宙の膨張の速さや質量密度など、宇宙の大局的性質を特徴づける量です。残念ながら、これらの量は観測的によく決まっているとはいえません）。したがって、宇宙のさまざまな時期の銀河の性質をいろいろな切り口で観測すれば、モデルの淘汰や宇宙の基本定数の推定ができます。こうした観測はよく“宇宙論テスト”と呼ばれています。この呼び名は何か大それた響きがありますが、実は、今から紹介する私の研究はまさにこの宇宙論テストの話です。すなわち、現在の宇宙にどんな大きさの銀河・銀河団がどれくらいあるかということを観測データを用いて調べ、それを銀河形成論のテストに使ってみようというものです。

宇宙論テストについてもう少し説明しておきましょう。宇宙のさまざまな時期の銀河を観測するといっても、現在の観測技術ではあまり昔、すなわち遠くの宇宙はわかりません。クエーサーなど例外的に明るい天体は赤方偏移で5という遠方で観測されていますが、赤方偏移が1以上の天体については、一般に観測例が十分ではなく、銀河形成論に関わる精度良い観測結果はやはり比較的近い銀河から得られています。

銀河形成論といってもあまり細かな予言はできないので、観測と比較すべき項目は単純なものばかりです。観測によれば、宇宙空間の銀河分布にはかなりの疎密があります。その分布のしかたを定量的に表す方法に、例えば2体相関関数があり、それを用いて理論の予想と観測とを比べます。また、銀河は平均して200—300 km/s の速度で無秩序運動をしていることが知られています。さらに、差し渡し数十 Mpc という広い領域の銀河が数百 km/s の速さで同じ向きに動いているという観測もあります。これらの観測は代表的な宇宙論テストです。

3. 回転速度関数の導入

3.1 銀河の重さが測れない

さて、ここからが本題です。銀河形成を考えるうえで、どれくらいの重さの銀河が宇宙にどのくらいあるかは非常に基本的な量です。これを銀河の質量関数といいます。正確には、宇宙空間での銀河の数密度を銀河の質量の関数として表したものが質量関数です。銀河形成モデルを考えるときには、その予言する質量関数が観測と合うかどうか検討しなければなりません。ところが、質量関数を比較する際に困ったことが1つあります。それは、銀河の質量を観測的に求めるのがたいへん難しいということです。

銀河の質量はどうやって測ればいいでしょう。よく行われるのは、銀河の明るさから推定する方法です。普通の星はその明るさと質量との間により相関があるので、銀河がどういう星でできているのかわかれば、銀河全体の明るさから星の総質量が推定できます。ところが、この方法には大きな欠点があります。というのは、星は銀河の質量のごく一部しか担っていないからです。図1を見て下さい。これは、渦巻銀河の半径と回転速度の関係の観測結果を示しています。渦巻銀河は最もありふれた銀河で、薄い円盤上に星が文字通り渦巻状に分布し、それを取り囲むように淡く水素ガスが分布しています。これらの星およびガスは、回転運動の遠心力で銀河中心への引力とつりあっています。この図から、その回転速度が観測限界までほぼ一定であることがわかります。太陽系のように系全体の質量が太陽に集中している場合、外側の惑星ほど公転速度は落ちます。渦巻銀河がそうならないのは、半径とともにその内側に含まれる質量が増え続けることを意味します。星が存在しないほど外側でも、質量を担う“何か”が広がっているのです。水素ガスの質量程度では説明できません。この“何か”は電磁波で見えないことから暗黒物質と呼ばれています。暗黒物質の正

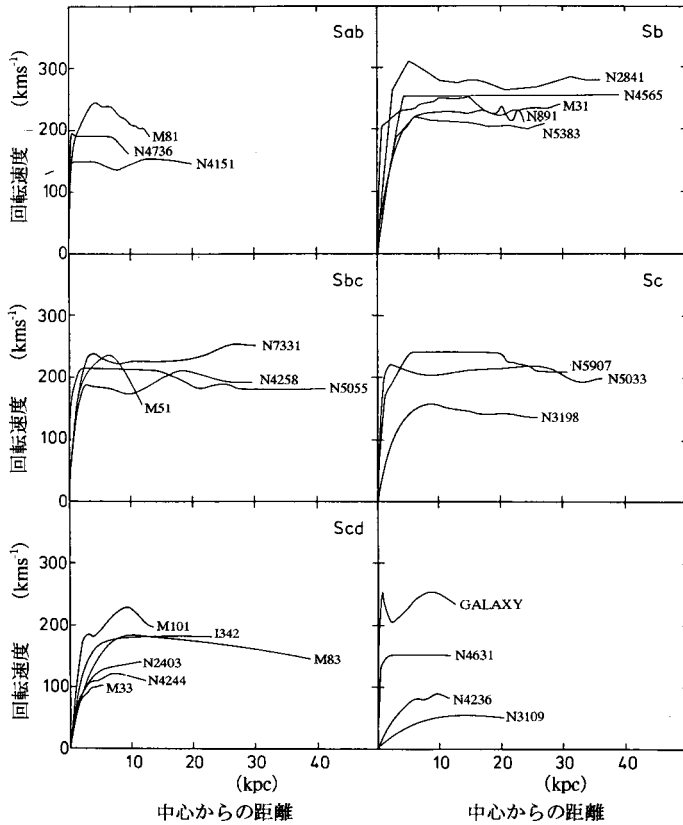


図1 中性水素ガスの輝線観測から得られた渦巻銀河の回転速度。

体はわかっていますが、それが何であれ、回転速度の観測からも銀河の質量はその下限しかわかりません。なぜなら、回転速度が落ち始めるほど外側までの観測がないからです。銀河の質量の決定法は他にもありますが、どの方法も桁程度の精度しかありません。

そこで、理論の方から観測に歩み寄ることが考えられます。すなわち、銀河形成論のほうで銀河の明るさまで計算し、得られた光度関数—どれくらいの明るさの銀河がどれだけあるか—を観測と比較しようというものです。しかし、確かに光度関数は観測では精度良く求めることができますが、理論で計算する場合、質量関数と異なり、力学進化だけでなく銀河の中での星形成の歴史を追跡しなければならず、困難な上に不定変数の量がずっと増えます。したがって、星形成の歴史そのものに興味をもつ場合は別として、光度関数を用

いるのはうまくないやり方でしょう。

3.2 回転速度で橋渡し

では、理論・観測双方が求めやすい量はないでしょうか。実は、回転速度を用いる方法があります。回転速度は銀河の力学進化を追うだけで大体計算できますし、観測からも直接測れるので、双方にとって都合のよい量であるといえます。

銀河のようにほぼビリアル平衡になった系では、その内部の密度は中心からの距離の2乗におおよそ反比例します。そして、そのような密度分布のもとでは、回転速度は、中心からの距離によらずに一定値になります(図1がまさにそうです)。したがって、銀河全体を観測しなくとも、その銀河の回転速度はわかります。

今から、私が行った研究、(1)現在の銀河・銀河団の“回転速度関数”を観測的に求める、(2)最もポピュラーな銀河形成モデル、CDMモデルを用

いて銀河・銀河団の回転速度関数を計算し、観測と比較する、を紹介していきます。ここで、(1)の銀河団の回転速度関数というものを説明しておきます。銀河だけでなく銀河団の回転速度関数も考えるのは、銀河と銀河団を力学的に同列に議論しようという狙いです。銀河団もほぼビリアル平衡にある系なので、その内部の質量分布も銀河のそれと同じようなものです。銀河団の構成要素で目立つのは銀河と高温ガスですが、銀河団にも暗黒物質の存在が示唆されています。銀河団内のこうした物質は渦巻銀河の場合の星と異なり、銀河団中心のまわりの回転ではなく、速度分散、すなわち無秩序運動で銀河団全体からの重力とつりあっています。しかし、実際に回転してなくても、重力とつりあうという意味での回転速度を定義できます。

3.3 回転速度関数を観測的に求めよう

銀河・銀河団の回転速度関数を求めるのに用いた観測データに触れておきます。銀河に対しては、RC 3 カタログという銀河カタログを用いて距離 20 Mpc、絶対等級 -17.5 等までの完全サンプルを作り、それに含まれる銀河について回転速度データを集めました。銀河の主なタイプには渦巻銀河のほかに楕円銀河とレンズ状銀河があります。実は後の二者は銀河団と同様に速度分散によってそのかたちを支えています。そこで、これらの銀河の“回転速度”は星の速度分散のデータから簡単な力学モデルを用いて推定しました。使用した銀河数は、渦巻銀河、楕円銀河、レンズ状銀河がそれぞれ 712, 66, 135 個です。

次に銀河団について述べます。本研究では、銀河団内に広く分布している高温ガスの温度を用いて回転速度を推定しました。ガスの温度はすなわち速度分散のことなので、回転速度との間には 1 対 1 の対応がつかます。ガスの温度データは X 線衛星の観測データを用いました。

4. 観測結果

図 2 が、こうして求めた銀河・銀河団の回転速度関数です。この図でまず気づくことは銀河と銀河団の回転速度関数は殆ど連続的につながることです。両者の間には小さな隔たりがありますが、ここには、今回考慮しなかった大楕円銀河や銀河群が入っていると思っています。いずれにしても、この図は銀河と銀河団が力学的に見て 1 つの対象としてまとめ得ることを強く示唆しています。

図 2 でもう 1 つ目につくことは、銀河のタイプによって回転速度関数がかなり異なるということ

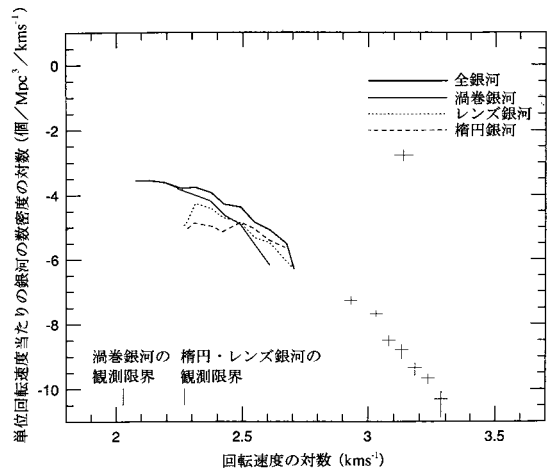


図 2 観測に基づく銀河・銀河団の回転速度関数

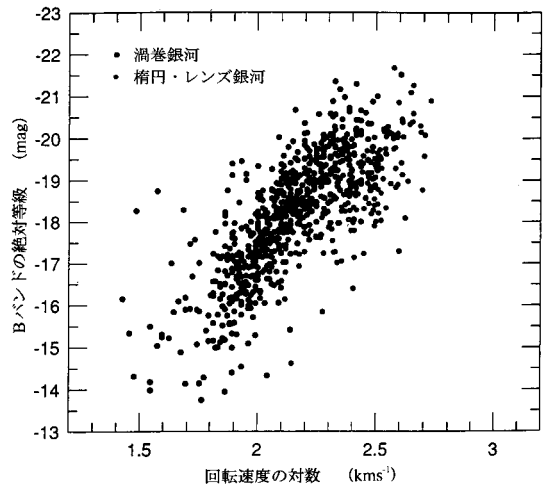


図 3 銀河に見られる等級一回転速度関係。

です。図3を見て下さい。この図は速度の直接測定がある銀河について、その絶対等級と回転速度の関係を示したものです。この図の縦軸をつぶすと回転速度関数、横軸をつぶすと光度関数になります。光度関数でみると明るい端から暗い端まで楕円銀河とレンズ銀河は目立ちませんが、回転速度の大きい銀河の殆どはこれらの銀河です。これらは明るさの割に回転速度が大きく、銀河団への橋渡しをしています。

5. CDMモデルと比較してみよう

5.1 いかにも宇宙論的な話

こうして銀河・銀河団の回転速度関数が観測的に求まりました。ではこれを再現するような銀河形成モデルはあるのでしょうか。

残念なことに、銀河・銀河団の回転速度関数(質量関数も同様ですが)を予言できるような理論はそうありません。定量的議論ができるのはコールドダークマター(CDM)モデルだけでしょう。先に暗黒物質(英語でダークマターといいます)について触れましたが、どういう種類の暗黒物質を仮定するかによって銀河形成の過程はがらりと変わります。暗黒物質の正体がわからないのを幸い、さまざまな性質のものを仮定して銀河形成の議論がなされています(このへんがいかにも宇宙論)。CDMは速度分散の小さい無衝突粒子の総称です。無衝突粒子とは陽子や電子などの通常の物質に比べて重力以外による相互作用が極めて弱い粒子のことをいいます。CDMモデルによれば、宇宙の質量の大部分はCDMが担っています。宇宙初期に存在したわずかな質量ゆらぎが時間とともに成長し、あちこちでCDMの小さな集合体ができます。集合体は次第に合体してより大きなものになり、ついには銀河・銀河団程度の質量の塊にまで成長します。CDMの中にまじっていた通常の物質もCDMの重力に引かれて集合し、ガス雲ができ、星が生まれます。このようにCDMモデルは極めて単純なモデルです。

5.2 CDMモデルをテストする

もちろん、実際の宇宙に満ちている暗黒物質がCDMである証拠は全くありませんが、観測・理論双方の精度を考慮すると、CDMを仮定した銀河形成モデルが観測結果と絶望的にずれた予言をすることはまだありません。さらに、CDMモデルは不定変数が少ないこと、定量的計算が比較的しやすいことから、ここ10年ほど活発に研究がおこなわれています。ここでも、CDMモデルを用いて回転速度関数を求めてみましょう。

CDMモデルの不定変数は、ハッブル定数 H_0 、宇宙の密度パラメータ Ω_0 、宇宙定数 λ_0 、バイアスパラメータ b です。 H_0 とは、現在の宇宙膨張の速さを示す量です。 Ω_0 は宇宙の中の質量密度を示す量です。 λ_0 はアインシュタインが導入したあの宇宙定数と同類の定数です。いまのところ、 $\lambda_0=0$ でなければならないという観測や理論はなく、 $\lambda_0>0$ を示唆する観測もいくつかあります。最後に b について説明しましょう。宇宙に暗黒物質があるとすれば、光で見えている銀河の分布が本当の質量分布を反映している保証はなくなります。そこで、銀河の分布のむらむらが本当の質量分布のむらむらの何倍かという量、すなわちバイアスパラメータを導入します。種々の観測で許容されるこれらの変数の範囲はおおよそ $50 \text{ km/s/Mpc} < H_0 < 100 \text{ km/s/Mpc}$, $0 < \Omega_0 < 1$, $0 < \lambda_0 < 1$, $1 < b < 3$ です。そこで、これら4つの変数をこの範囲で変化させて回転速度関数を求めました。

5.3 平坦な宇宙が好き

図4はこうして求めた回転速度関数を観測と比較したものです。代表的な2つの場合を示しています。(1)の変数値の組合せは審美的に最も好ましい(?)もの、(2)はどちらかという観測値を意識した組合せです。なお、 H_0 の値を上記の範囲で変えても結果はあまり変わりません。また、 λ_0 は殆ど効きません。したがって、 Ω_0 と λ_0 だけが敏感な変数です。 b を大きくすると一般に銀河の数密度が下がるのは、銀河分布のむらむらは観測で固定

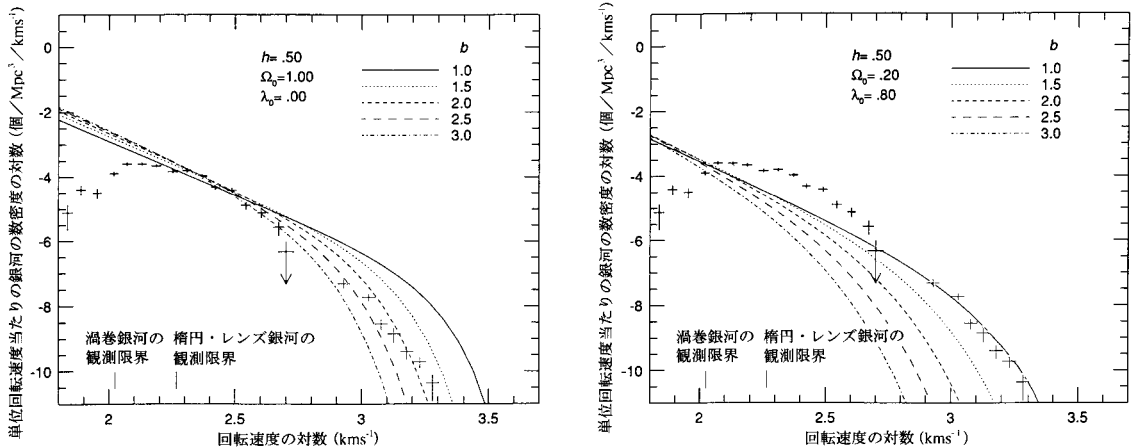


図4 CDMモデルから予想される回転速度関数 ($h=H_0/100\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$)

されているので、 b が大きいと相対的に質量密度のむらむらが小さいことになり、銀河・銀河団ができにくくなるからです。また、 Ω_0 が小さいと宇宙の単位体積あたりの質量が少なくなり、銀河が生まれにくくなります。

観測と比較してみると、まず銀河に対しては $\Omega_0=1$ のモデルが合うことがわかります。この結果は b の値にはあまり依りません。一方銀河団については、最も良く合うのは $\Omega_0=0.2$ 、 $b=1$ の場合ですが、 $\Omega_0=1$ 、 $b=2-3$ でもそう悪くはありません。したがって銀河団だけでは Ω_0 と b は独立には決まらないといえます。なお、 H_0 の変化はあまり影響しないといいましたが、それでも小さい H_0 のほうがよく合うようです。

以上まとめると、銀河・銀河団双方に合うのは $H_0=50$ 、 $\Omega_0=1$ 、 $b=2-3$ という組合せになります。これらの値で特徴づけられる宇宙は、CDMに支配され、年齢が約130億年であり、空間的に平坦な(将来収縮に転ずるかどうかのちょうど境目ということ)ものです。

5.4 やつぱり矛盾がでてきたか

これらの値は他の宇宙論テストから示唆される値と比較してどんなものでしょうか。最後にこのことに触れておきます。実はここで求めた値、すなわち $H_0=50$ 、 $\Omega_0=1$ 、 $b=2-3$ は、数年前までは標準とされた値です。ところが、その後主に宇宙

の大きなスケールの構造の観測・理論計算が進み、最近ではむしろ $H_0\sim 100$ 、 $\Omega_0\sim 0.2$ 、 $b\sim 1$ の、いわゆる低密度・低バイアスモデルが流行しています。大きなスケールとは、銀河団かそれ以上のスケール、すなわち宇宙の大規模構造と呼ばれるものです。ここで注目すべきは、銀河団の回転速度関数は低密度・低バイアスモデルと矛盾しないこと、一方で、銀河の回転速度関数の場合、 $\Omega_0=0.2$ では他の変数をいかに変化させても、観測された回転速度関数とは縦軸で1桁も食い違うことです。したがって、大きなスケールの観測から好まれる低密度モデルとは相容れず、CDMモデルでは双方の観測に合う変数の組合せはないことになります。もちろん、回転速度関数も含めて、いずれのテストも理論計算にはある程度の単純化をおこなっており、それによる不定性を詰めなければそう簡単にCDMモデルを捨てることはできません。これは今後の課題ですが、回転速度関数が1つの面白いテストになり得ることはデモンストレーションできたと考えています。

参考文献

- 1) Bosma, A. 1981, *Astron. J.*, **86**, 1825.
- 2) Shimasaku, K. 1993, *Astrophys. J.*, in press.
- 3) Frenk, C. S. 1991, *Physica Scripta*, Vol. T36, 70.