

銀河の回転

祖父江 義明

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: sofue@mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

銀河系や銀河の回転曲線はダイナミクスや質量分布を求めるのもっとも基本的な観測量である。しかし従来の観測では系外銀河の回転曲線と私たちの銀河系の回転は特に中心部で非常に異なっていて、その違いは謎であった。ところが中心部で正確な速度測定が可能な一酸化炭素 (CO) 輝線の高分解データを使って回転曲線をもとめてみると、ほとんどすべての銀河について、私たちの銀河系とそっくりの回転曲線が求められた。「銀河系と系外銀河の回転は本質的に同じである」という、当たり前のようだが、実は最近研究によって明らかにされた事実について紹介する。

1. 天体の回転は天文学の永遠のテーマである

自分が宇宙の中心にいて考えていた時代には天空の回転について研究が行われた。ガリレオの時代にいたって地球の自転がわかり、望遠鏡の発明によって黒点が日々動いていくことから太陽も回転していること、そして木星など惑星の回転も知られるようになった。コペルニクスやケプラーによって惑星は太陽のまわりを公転していることが発見された。そしてニュートンによりこれら回転現象が重力と運動の法則によって自然に理解されることになった。

今世紀に入り、太陽系も夜空の無数（といっても約 2000 億個）の星と同じで、円盤形をした銀河系の一員であり、その中ほどに位置していることがわかってきた。さらに 20 世紀半ばになると星の視線運動や固有運動（視線に横むきの動き）の解析、さらに中性水素ガスの 21 cm 輝線のドップラー効果の観測から銀河系の

回転の様子が明らかになってきた。今日では、私たち太陽系が銀河中心から 2 万 5 千光年のところにあり、2 億年かけて銀河系の中心のまわりを公転していること、さらに天の川銀河系は天体写真でおなじみの渦巻き型の銀河であることがよく知られている。

さらに大望遠鏡によるスペクトル観測が進むにつれ、系外の渦状銀河も銀河系と同じように回転していることがわかってきた。そして銀河における回転速度の分布が求められると、それを力学的に解析することによって銀河内の質量分布や構造が次第に明らかになってきた (図 1)。

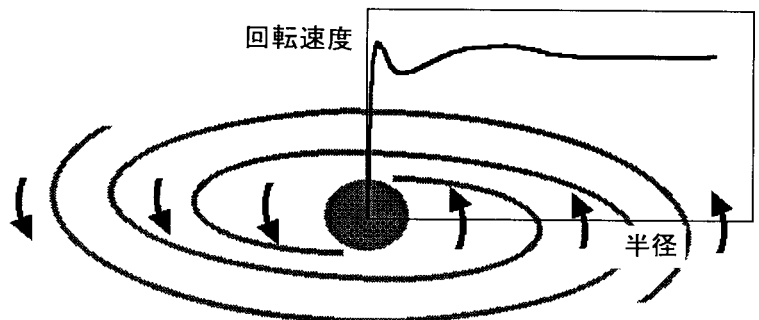


図 1 : 銀河系や銀河の回転速度の分布。半径に対して速度をプロットした図を回転曲線という。

2. 天の川銀河系と系外銀河の回転の違い

ところが天の川銀河系と系外銀河の回転が詳細に調べられるにつれて、両者に甚だしい食い違いが存在することもわかってきた。この食い違いは銀河中心から数千光年以内できわめて顕著である。銀河系の回転速度は中心からすぐに 250 km/s のピークに達し、以後いったん減少したのち回復してほぼフラットな速度を銀河系の端まで保つ。これに対して系外銀河の回転速度はゆっくりと立ち上がってフラットになる（図2：このカーブを回転曲線という）。

つまり銀河系の中心部にはバルジとその中心にさらに芯のように集中した質量のかたまりがあるのに対して、系外銀河にはバルジなど中心集中した質量が存在しないことになる。しかしこのことは天体写真でおなじみの系外銀河の形からは納得できないことである。また、もしこの食い違いが事実なら私たちの銀河系はふつうの銀河にくらべて特異な質量分布や構造をもっていることになりその違いは謎である。

3. 銀河中心部の回転

この謎を解くために私たちは系外銀河の中心部の回転を詳細に決定する研究を開始した。我が銀河系についての回転曲線はかなり良い精度で求められているはずであるから、むしろいままで求められてきた系外銀河の回転曲線（図2、図3）が中心部では正確ではないのではないかという予想のもとにである。

従来銀河回転の測定は光学や中性水素ガスの 21 cm 線観測をもとにしてきた。しかし光学観測では H α スペクトル線のドップラー効果によって回転の速度を測るわけであるが、中心部ではバルジや中心核の明るい光にじゃまされて精度の良い速度測定がむずかしいはずである。いっぽう中性水素ガスは銀河の外側には多量に分布しているが中心付近では稀薄であるために、やはり中心部の速度決定に対して良いデータにならない。

4. 完璧にサンプリングされた回転曲線

そこで私たちは銀河中心に多量に集中して存在

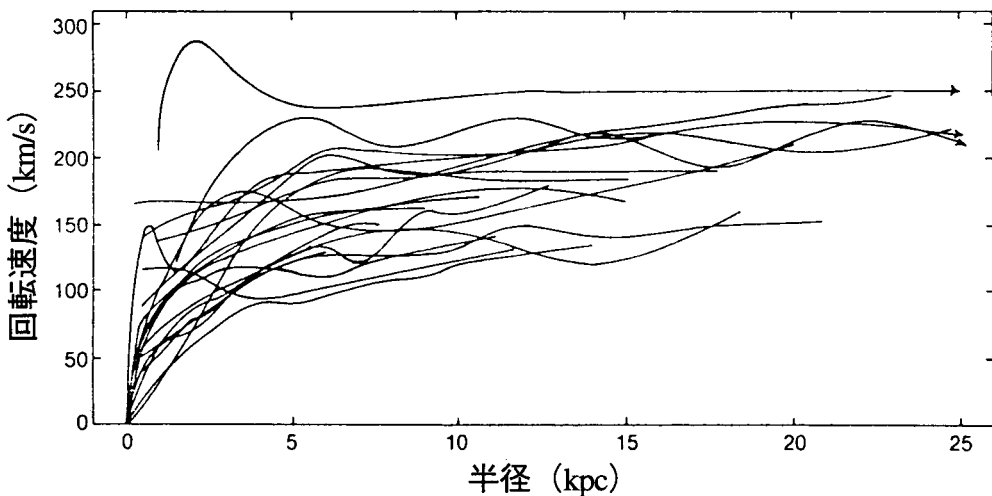


図2：天の川銀河系の回転曲線¹⁾と系外銀河の従来知られていた回転曲線。中心近くで大きな食い違いをみせる。

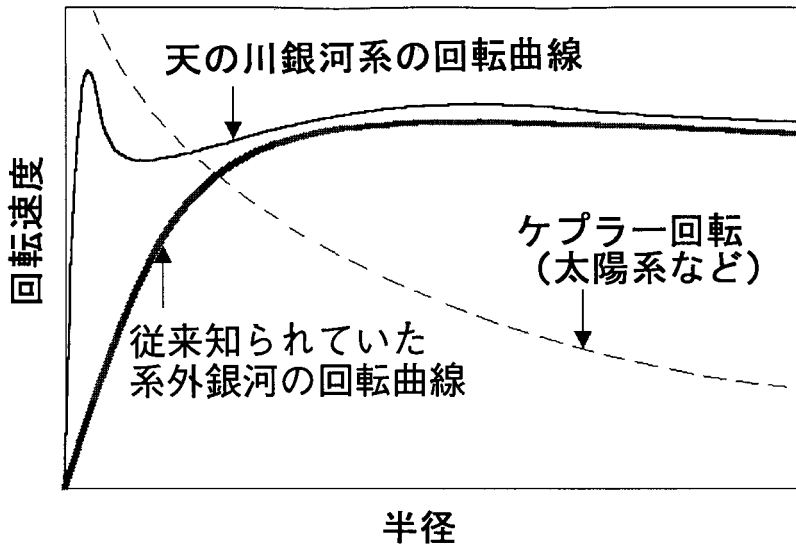


図3：従来光学的に知られていた銀河の回転曲線^{2), 3)}.

し、かつ精度のよいドップラー効果の観測が可能な一酸化炭素 (CO) のミリ波輝線を用いればよいことに注目した。もちろん、詳しい回転速度の解析をするには中心部の高分解能の観測データが必要である。さいわい我が国には野辺山宇宙電波観測所の45 mミリ波望遠鏡や干渉計による世界最高精度のデータが山積している。

考え方と筋道は単純である。銀河中心部についてのミリ波データを従来の光学や21 cm電波データと合成して、中心から円盤部までの新しい回転曲線を求めればよいわけである。もっとも、実際に始めてみると、スペクトルデータを整約しさまざまな補正を加えて回転速度をもとめ、別の望遠鏡でとられた観測データと合成する作業はなかなか大変である。

とはいえこつこつと作業をこなしていけば解決する作業である。(観測天文学では黙々と職人的に作業をこなしていくことが本質的であることが多い。)そしてとりあえず最近私たちが観測し手元に質の良いデータが存在する2つの銀河 NGC 891 (45 m

望遠鏡データ)と NGC 3079 (5素子干渉計データ)について作業をすすめ「完璧にサンプリングされた回転曲線」を作ってみた。その結果は案の定、これらの2つの銀河は天の川銀河系にそっくりの回転曲線をもっていることがわかったのである(図4, 図5, 図6, 図7)。

5. 「銀河の回転法則は天の川銀河系と本質的に同じである」

これに勇気づけられさらにこつこつと10個あまりの系外銀河の回転曲線を作っていくと、驚いたことに1つの例外もなくすべての銀河がじつは私たちの銀河系とほとんど同じ回転法則をしめすことがわかってきた(図8)。つまり系外の渦状銀河の回転法則は天の川銀河系と本質的に同じであるということが明らかになったのである。

この当たり前のように見えるステートメント—それは多かれ少なかれ銀河天文学者が抱いていた予測でもあったが—が詳細なデータと本格的な解析にもとづいて実証されるまでに、銀河系や渦状

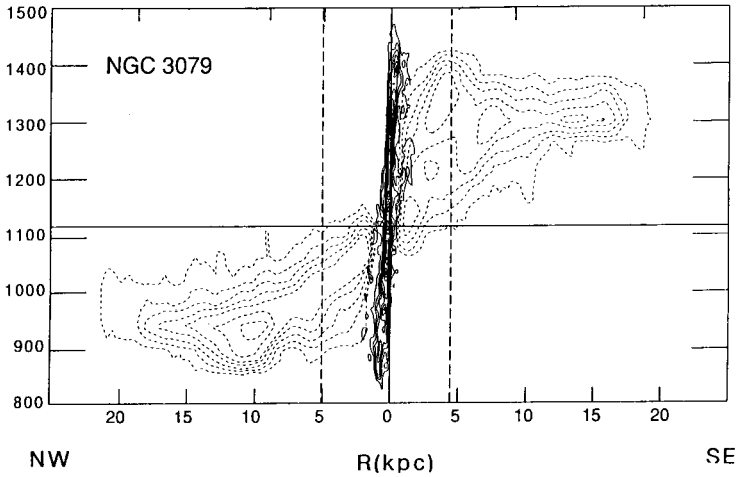


図4：中心部のミリ波輝線（CO輝線）データと外周部の中性水素ガス21-c m観測や光学観測データを合成して作った、「完璧にサンプリングされた回転曲線」。

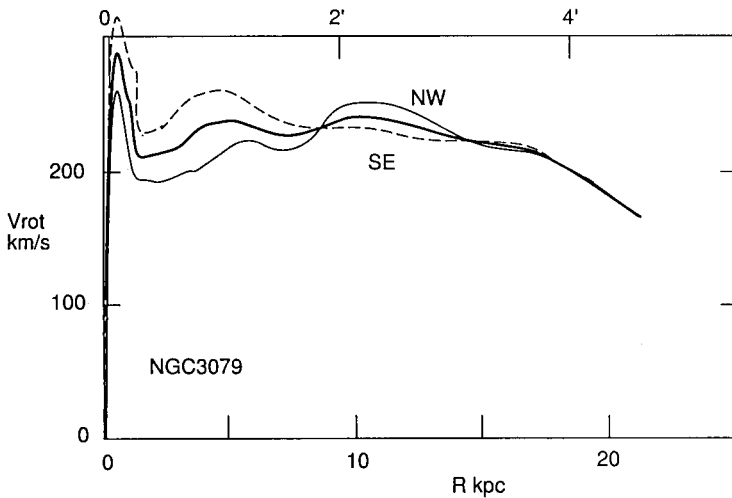


図5：図4のデータから作られたNGC3079の回転曲線。銀河系のそれとそっくり⁵⁾。

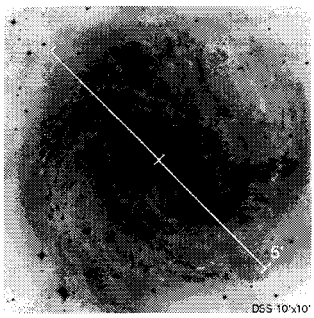
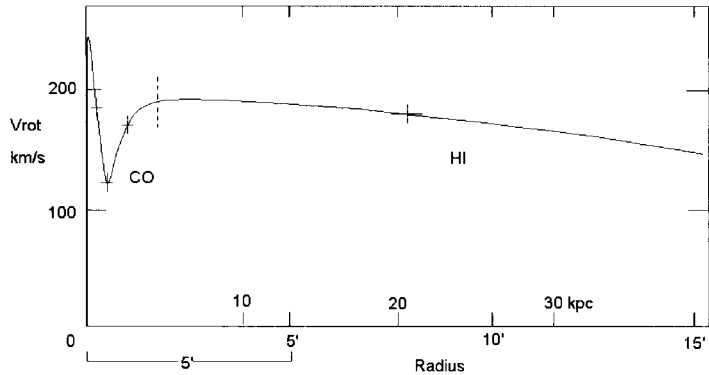
銀河の回転が発見されてから実に半世紀を費やしたことになる。それが我が国の大型装置によるミリ波電波観測をまって初めて可能になったことは私にとってまことに愉快的ことであった。

とはいえ数ある銀河のなかで詳しく調べることができたのはまだ30個あまりである。実際今回の解析は天の川銀河と類似の立派なしかも Sb, Sc 型銀河について得られたことであって、矮小銀河や超巨大銀河については今後の解析にまたねばな

らない。さらにこの回転法則が本当にユニバーサルかどうかを多数の銀河について検証していく必要がある。

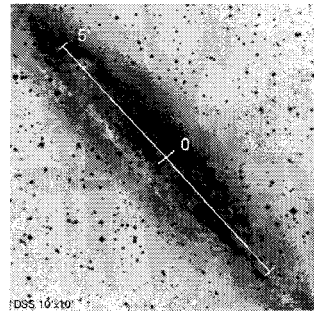
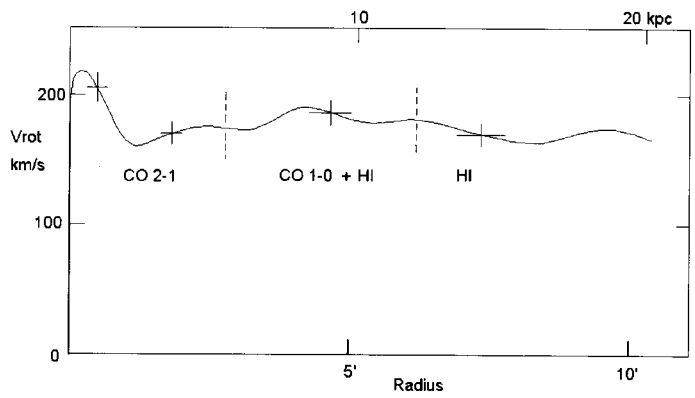
6. 銀河ダイナミクス進化論の観測的研究

近傍の銀河についての回転法則がある程度わかってくると、つぎは回転の法則が銀河の形成や進化とどのように関連しているのかという疑問もわ



NGC 5236, M83
 SBc
 i=24d
 PA=45d
 D=8.9 Mpc

図6：銀河の回転曲線の例。M83の例。



NGC 4945
 SBcd
 i=78d
 PA=43d
 D=6.7Mpc

図7：南天の銀河，NGC4945の例。

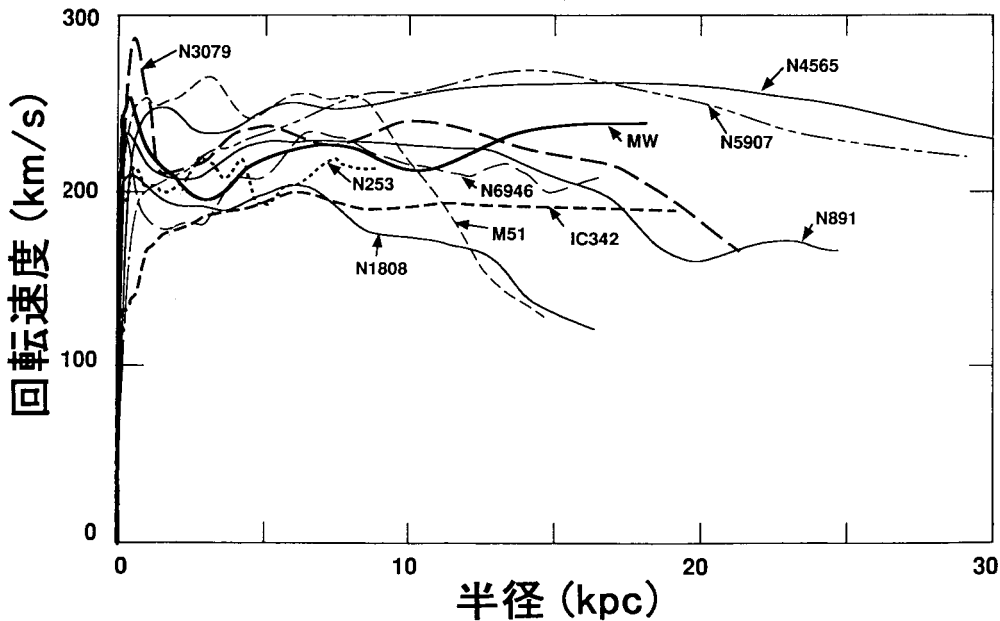


図8：「完璧にサンプリングされた回転曲線」⁵⁾

いてくる。進化との関連を知るには宇宙初期の銀河すなわ赤方変位が大きな遠方の銀河について回転曲線を求める必要がある。銀河進化をダイナミックスの側面から回転曲線というツールを使って調べていくという興味深い研究テーマが浮かび上がってくる。しかもバルジや円盤など銀河の骨格の形成に関連した情報を得るには中心付近の回転曲線が決定的な役割をはたす。それには光学や中性水素ガスの観測では不十分で、中心に集中する分子ガスについての観測情報が不可欠である。計画中の大型サブミリ波干渉計 (LMSA) はこの目的に最もあなばいのよい装置である。実現が待ち遠しい。

参考文献

- 1) Clemens, D. P. 1985, ApJ, 295, 422
- 2) Rubin, V. C., Ford, W. K., Thonnard, N. 1980, APJ, 238, 471
- 3) Rubin, V. C., Ford, W. K., Thonnard, N. 1982, APJ, 261, 439
- 4) Sofue, Y. 1996, ApJ, 458, 120
- 5) Sofue, Y., Honma, M., Arimoto, N. 1994, AA 296, 33

Rotation of Galaxies

Yoshiaki SOFUE

Institute of Astronomy University of Tokyo Mitaka, Tokyo 181

Abstract: It has been a mystery why the rotation curves of inner regions of galaxies, as derived from optical and neutral hydrogen observations, are so different from that known for our Milky Way. We have derived rotation curves for the inner regions of the galaxies using high-resolution position-velocity diagrams observed along the major axis of spiral galaxies in the CO-line emission. We have combined the inner rotation curves with the outer HI and optical rotation curves to obtain the total rotation curves. The inner rotation curves are characterized by a steep increase within a few hundred pc radius, indicating a compact massive concentration near the nucleus. We show that the rotation curves of galaxies are generally very similar to that of our Milky Way.