

サイエンス・ナウ②

渦巻く銀河の謎

家 正則 国立天文台助教授

宇宙の芸術／渦巻銀河

渦巻銀河の姿はどれもじつに個性的で美しい。渦巻きをめぐる疑問は、銀河が発見されて以来、多くの天文学者の心を捕えてきた。いったい、どんな物理法則がこのようないろいろな渦巻きを作り出すのだろうか。

渦巻き腕の成因として、内因性の重力不安定説、山火事伝播説、外因性の潮汐説が提案されている。これらの説を紹介し、渦巻きが語る銀河の生い立ちについて考えてみよう。

巻き込みのジレンマ

カップに入れたコーヒーをかきまぜてクリームを注ぐと、クリームは流れに乗って渦模様を描く。よく見ていると、この渦模様は次第に巻き込んでゆくことに気がつく。

これは、コーヒーの回り方が渦の外側ほどカップの壁などで減速されるためである。レコード盤のような剛体の回転では、周期は中心からの距離によらない。このような回転運動を一樣回転と呼ぶ。それに対し、周期が中心からの距離に依存する回転運動を差動回転という。我々の太陽系は銀河系を約二億年かかって一回りしている。銀河系を一回りする周期は銀河系中心に近い星ほど短い。我々の銀河系に限らず、どの銀河も内側ほど短時間で回るという差動回転をしている。

渦巻き腕で輝いているのがいつも同じ集団の星々だとすると、銀河の差動回転のため腕は数億年できりきりと巻き込んでしまうはずである。腕の巻き具合が数億年で変化しても良さそうだが、そう考えるには無理がある。まず、腕の巻き方のゆるい銀河

が数多く存在し、しかもその大半が少なくとも約一〇〇億年を経た銀河であることが説明できない。バルジと呼ばれる球状の恒星系の大半は数億年では変化しないはずだが、バルジの大きさと腕の巻き具合に関係があることも説明しにくい。腕

が数億年で巻き込んでしまっては、いろいろな観測事実とつじつまが合わないのである。これを「巻き込みのジレンマ」という。

銀河のつむじは右巻き？ 左巻き？

天球面上の銀河には、我々から見てSの字に渦巻くものと逆S（Zと書こう）に渦

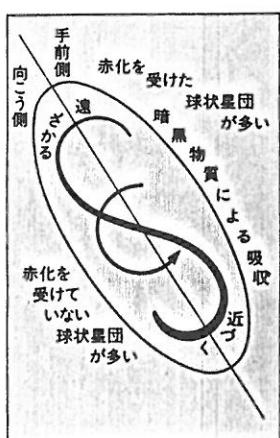


図1 球状星団の色から決まったアンドロメダ大星雲の銀河の傾き

る説明として、この説を支持する論文が続出した。

渦巻き腕がすぐにはこわれないことは密度波の考へてほぼ説明できた。しかし、同じマサチューセッツ工科大学のトウームレの詳しい研究で、ゆつくりとではあるが密度波もやはり巻き込んで崩れてゆくことが示された。リンのグループとトウームレの渦巻き論争は、見ごたえのあるものだつた。

一度渦滞の波が発生すれば渦滞が新たな渦滞を呼び、差動回転の中でもすぐには渦滞が解消しないことを密度波理論は示したのだが、なぜ渦巻き状の渦滞が発生するのかは説明していない。そこで、渦巻き腕の発生メカニズムを解明することが次の問題となつた。

腕の種をつくる重力不安定性

天体现象では多くの場合、重力が最も大きな役割を果たす。銀河の中でも星の分布密度にわざかなゆらぎがあると、密度の濃い部分は重力が強くなり更に周りから星やガスを集めようとする。濃い部分をより濃くし、薄い部分をより薄くするという、えこひいきの不安定な性質を重力は持つている。この不安定性を打ち消そうとする平等主義者が、星の乱雑運動と銀河の回転運動である。回転運動は波長の長い密度のゆらぎが増大するのを妨げ、乱雑運動は波長の短いゆらぎをならしてしまつ。横円銀河では星の乱雑運動が大きいため、密度のゆらぎはならされてしまふ增大しない。したが

つて横円銀河には模様がない。

一方、円盤型の銀河では回転運動は大きいか乱雑運動が小さいため、ある波長の密度ゆらぎに対しても、重力が勝つて不安定となる。このようにして成長する密度波は、差動回転する銀河では必然的に渦巻き模様になる。

渦巻きモード

どのような渦巻き模様になるかは、銀河のモデルを与えると理論的に予測できる。

銀河内の質量分布、回転速度、乱雑運動の大きさ、などにより、一本腕に限らず、三本腕や四本腕の渦巻きが同時に発生する場合もあれば、渦巻きより棒状構造が目立つ場合もある。実際に銀河のモデルを観測から決めるうえでは、星の乱雑運動の測定が最も難しい。日本のハーメートル級大型望遠鏡（JNLT）などが活躍するようになれば、かなりの数の銀河について精密なモデルを作ることができる。理論的に予測される渦巻きモードが、実際に見えている渦巻き模様と合致するかどうかを調べることにより、銀河の地震研究ができるようになるかもしれない。

渦巻き腕の識別はパターン認識の問題になる。銀河の渦巻き構造に一本腕の成分、三本腕の成分などがどれだけあるかを客観的に調べてみると、どの銀河も何種類かの渦の重ね合わせになつてていることが分かる。たとえば、NGC 4254の渦巻き模様では、一本腕、三本腕、五本腕の渦巻き成分

が著しい（図3）。渦巻き構造は青色フィルタを用いて撮った写真で特に著しい。渦巻きの位置では星やガスの流れが渦滞し、後からきたガスが前のガスに追突する。このため衝撃波が発生することを名古屋大学の藤本が指摘した。衝撃波が発生すると星が生まれやすくなる。生まれたの青白い若い星が輝くため、渦巻き腕は青色で目立つのである。これらの星の寿命は約二〇〇〇万年、青二〇〇〇万オドである。渦巻き腕は星のゆりかごといえる。

複合メカニズム

渦巻き腕の外因性の成因として、銀河の近くを別の銀河が通り過ぎる場合を考えることができる。月が地球に及ぼす潮汐力で、地球の海が月の方向とその反対方向に膨れ上がり、潮の満ち引きが一日に二回起こる。これと同じように、別の銀河による重力が潮汐力として働き、一本の渦巻き腕を作る。潮汐説では、銀河のニアミスマ直後の一過性の現象としてはあるが、かなりくつきりした渦巻き腕を作ることができ。計算機シミュレーションで現実の銀河に良く似た渦巻きを作る試みがいくつか成功している。この場合、ほとんどは巻き込み型の渦巻きとなる。ほどけ型の渦巻きは、銀河の自転方向と逆向きに相手の銀河が回り込んでくるときにのみ発生することがある。潮汐説は個性のある渦巻きを作つてくれるが、すべての渦巻きをこのメカニズムで説明することはできない。このような外

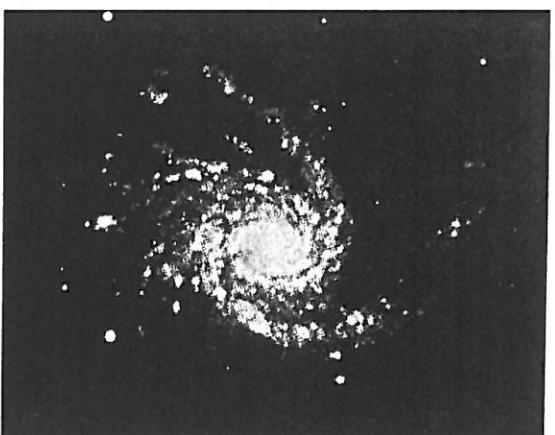


図3 1本腕、3本腕、5本腕の渦巻き成分が見られる銀河NGC4254

巻くものがある。S巻きの数とZ巻きの数はほとんど同じであり、どの銀河群や銀河團でも特にどちらが多いということはないようである。渦巻銀河を表から見るか裏から見るかでS巻きとZ巻きとが入れ代わるのだから、これはもつともらしい。

S巻きの渦巻きを右巻き（時計回り）と呼ぶか左巻き（反時計回り）と呼ぶかは、趣味の問題で人により違い、混乱している。

Sの字を中心から外にたどれば右回り（時計回り）だが、外側から中心にたどれば左回り（反時計回り）となるからである。台風の渦のように吸い込み型の流れでは中心に向かってたどるのが素直であろう。北半球では台風は、上から見てSの字であり、左巻きと呼ばれている。人間のつむじについては中心から外側へたどるのが普通だとすると、S巻きは右巻きとなる。筆者の頭は左巻きである。

余談はさておいて、銀河の渦巻きが差動回転の流れに乗ったとき、今後更に巻き込む形か、それともほどけてゆく形かを考えよう。あとで述べる密度波の場合、差動回転の流れのなかでも渦巻きの形はゆっくりとしか変化しないが、これは右巻き左巻きの呼び方の議論と違つて、渦巻きの発生メカニズムを調べるうえで、物理的には意味のある重要な問題である。渦巻きがほどけ型か巻き込み型かを判定するには、(1)天球面上でS巻きかZ巻きか、(2)銀河の回転の向き、(3)銀河面がどう傾いているか、の三つの情報が必要である。(1)は渦巻き模様が後述の図3や図

4の銀河のようにはつきりしていれば、誰の目にも明らかである。(2)は銀河のスペクトル観測を行つて、ドップラー効果の測定から、ドップラードとドウボーカールルの大論争があつた。一応、銀河面の暗黒物質による吸収の著しいほうが近い側であるとされているが、いまひとつつきりした根拠が無かつた。

アンドロメダ大星雲M31の球状星団の色を調べることにより、この解釈が正しいことを私達は裏づけた。球状星団はやや暗く赤っぽく球状に分布する。M31の銀河面内にあるチリにより光が吸収されるため、M31の銀河面の背後にある球状星団はやや暗く赤っぽくなる。したがつて、どちら側に赤い球状星団が多いかを調べれば、M31の銀河面がどう傾いているかが分かるはずである。実際に調べてみると、暗黒物質が著しく見える方向に赤い球状星団が多いことが確認されたのである(図1)。三つの情報が確実に得られる二〇個ほどの銀河を調べて見ると、例外なく巻き込み型になつてゐる。こうしてほとんどどの渦巻銀河は巻き込み型であることが確實視されるようになった。

観測される銀河の渦巻きは九九%以上巻き込み型であろうと推定されている。ほどけ型の渦巻きはあとで述べる近接遭遇効果により一時的に発生することがあるが、S巻きとZ巻きの渦巻きを合わせ持つ銀河(図2)が〇・一%程度しかないことからも、極めてまれな現象と考えられている。

ジレンマを解消する密度波説

渦巻き腕の密度波理論は、巻き込みのジレンマを解消する説として、マサチューセッツ工科大学のリンのグループが一九六四年に発表した。これは、銀河を回る星々の流れが重力の強いところで渦滞し、そこが渦巻き腕として見えるという説である。渦巻き腕は星が混んでいて渦滞が起つりやすい難所であり、そこに突つ込む星は次々に入れ代わる。こう考えれば一様回転でなくても渦巻き腕がこわれない可能性がある。巻き込みのジレンマをエレガントに解消す

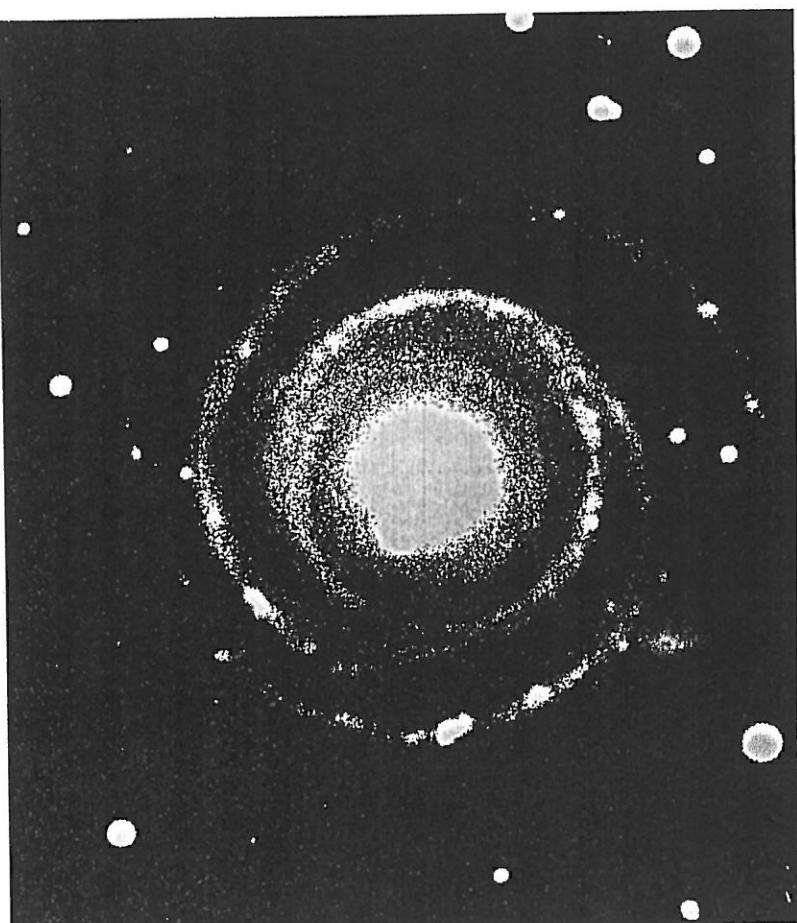
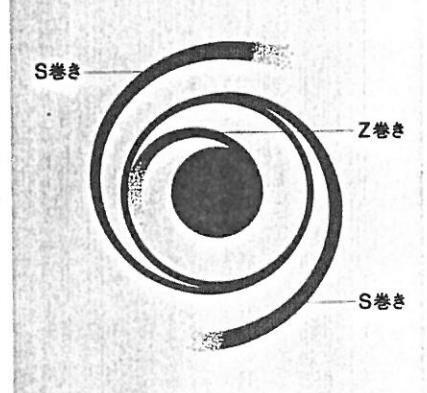


図2 S巻きとZ巻きの渦巻きを合わせ持つ数少ない銀河の一つNGC4622

部原因説に対し、内部原因説には前述の重力不安定説の他、山火事伝播説という考え方がある。

銀河のあちこちで始まつた星の誕生は山火事のように広がる傾向がある。差動回転がなければ、山火事は丸く広がってゆくが、

差動回転する銀河円盤では燃え広がった領域が引き伸ばされるため、青い星が渦巻き状に連なつて見えるというものである。重力不安定説や潮汐説は大模様の渦巻きを作りやすいのに対し、山火事伝播説では切れぎれの巻き込み型の腕ができる（図4）。

実際の渦巻き腕は、重力不安定性、潮汐作用、山火事伝播の三つの作用が状況に応じて、複合してできると考えるのが自然であろう。

銀河スピンの起源

銀河に様々な渦巻き構造ができるのも、結局は銀河が差動回転しているからである。

銀河のこのような自転運動は、いつどのようにして始まつたのだろうか。銀河がどのようにして誕生したかという問題は、宇宙論での最大の謎である。銀河形成論は銀河の自転の起源についてもきちんと説明しなければならない。いくつかの銀河形成説から予想される銀河の自転の性質は次のようになる。

(1) ワイズッカーの原始渦説では、大きな原始渦が小さな渦に分裂する過程で銀河が生まれる。この場合、銀河の自転軸はもと

の原始渦の方向にそろついているはずである。

(2) ゼルドビッチらのパンケーキ説では、

原始銀河團雲が平たく収縮する過程で、銀河團面に両側から集まつたガスが衝突して

銀河が生まれる。国立天文台の池内らの泡宇宙説でも、泡と泡のぶつかつた面で銀河が生まれる。これらの場合、銀河の自転軸は銀河團面に平行になっているはずである。パンケーキ説では、自転の強さは銀河團の周辺部で生まれた銀河ほど大きいと考えられる。

(3) ピープルズの潮汐説では、自転は銀河の誕生時に近くの銀河の潮汐力により発生する。この場合には、全体としては自転軸の向きはバラバラのはずである。ただし、潮汐作用を及ぼした銀河としては、その自転軸が銀河を結ぶ線に垂直な面内にあるはずである。

このように銀河の生まれ方によって、自転軸の分布には違いがあるはずである。私達は約一万個の渦巻銀河の向きを調べているが、原始渦説は観測と合わないことが分かつた。パンケーキ説・泡宇宙説と潮汐説はこの観点だけからは今のところ優劣をつけられない。厄介なことに、生まれたときの自転軸分布が保存されているとも限らない。特に混み合つた銀河團の中では銀河どうしのニアミスマッチ事件が起きやすく、自転軸の向きが乱される可能性がある。自転角運動量が銀河の一生の間にどれくらい変動するのかは、全く分かつていない。銀河團全体として銀河の自転角運動量の分布に偏りがないかどうか

などを現在調べている。

渦の向きと宇宙の対称性

ミクロの素粒子の世界では、原子核のスピントを手掛かりにして、弱い相互作用についてパーティの対称性が破れていることが示されている。なぜ対称性が破れる。

生物界のDNAのらせん構造や、かたつむり、朝顔のつるなどの巻く向きを決めているのは、自転する地球の上での流れに対するコリオリ力と呼ばれる力の作用である。銀河の場合も台風のように中心へ向かつて星やガスが流れ込んでいれば、コリオリ力が働いて渦巻きを作りやすくなる。しかしながら、星間ガスは別としても、星々が全体として銀河中心へ落ちてゆく速度は極めて小さい。銀河と台風とは状況が違っている（図5）。

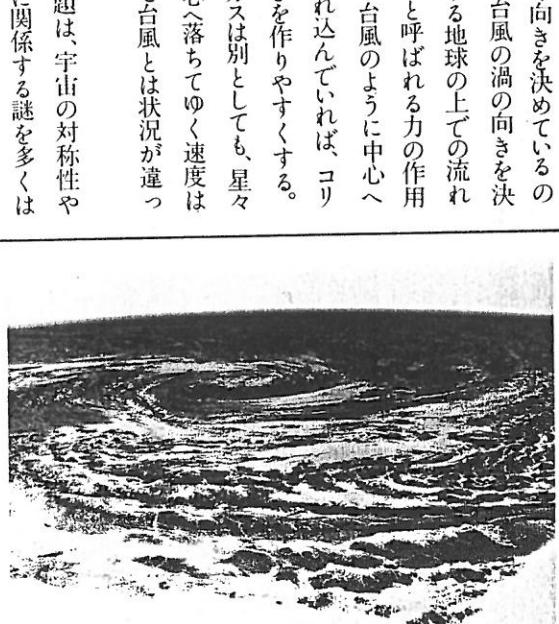


図5 台風の渦の向きは、自転する地球の上での流れに対する力の作用により、北半球ではS巻きに、南半球ではZ巻きになる

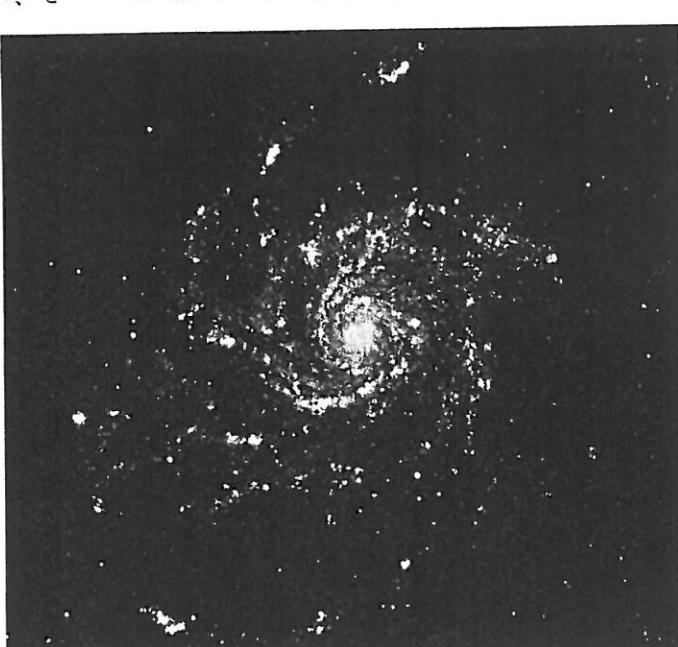


図4 切れぎれの巻き込み型の腕ができる銀河NGC5457。山火事伝播説で説明される典型的なもの