

銀河の渦状構造と星の形成

土 佐 誠*

1. はじめに

天体写真のトップスターは渦状銀河であろう。大望遠鏡によって写し出されたその雄大な渦巻はダイナミックに変転する宇宙の姿を象徴している。我が天の川銀河も渦状銀河の仲間である。銀河の存在は古くから知られていた。それが詳しく研究されるようになったのは大望遠鏡が出来て後のことで、今世紀の前半になり銀河は星やガスの回転する大集団であることがわかった。しかし渦巻構造の正体がわかってきたのはここ数十年のことである。本稿では、渦状構造は何か、そこで何が起っているかを密度波理論をもとに調べてみる。

2. 銀河の渦状腕

図1はおなじみの渦状銀河 M51 の青い光による写真である。この銀河には渦状構造の特徴が良く出ているので詳しく見てみる。銀河をとりまく光った2本の渦がまず目につくが、これを渦状腕と呼んでいる。銀河を構成する天体はそれぞれ特有の波長域の電磁波を出すので、見る波長によって銀河の様相は異なる。図2は黄色い光による写真(黄～緑色写真から青い色をさし引いた合成写真)である。これを見ると図1に比べて構造がほとんどなくなってスムーズな腕を見せている。したがって腕を際立たせているのは青い色の光を出す天体といえるが、これは腕に沿って高温の青い星が沢山あることを示している。このような星は寿命が短かいので、腕に沿って盛んに星が生まれていることになる。図3は水素の $H\alpha$ 線による写真である。 $H\alpha$ 線は高温の電離ガスから発せられるもので、この写真は電離領域(H II 領域)を示している。これを見ると腕はずっと細くなり、H II 領域が点々と腕に沿ってならんでいる。これらのH II 領域は高温のOB型星の紫外線によって電離・加熱されている。これらの星は寿命が大変短かい(3×10^7 年以下)ので図3は現在星が形成されている場所を示していると考えてよい。したがって星は腕に沿った非常に狭い領域で形成されていることになる。

腕をよく見ると腕の中心に向いた側に非常にシャープな細い黒い筋が見られる。これはダーク・レーンと呼ばれ、そこに濃いガスがあって、ガスに含まれている塵が光をさえぎり黒い影をつくっている。腕に沿って複雑に入り組んだ黒い吸収物質が見えるが、これは腕に多量のガスが存在することを示している。中性水素の出す 21-

cm の電波による観測からもガスが腕に集中していることがわかる。

図1に示した等高線は連続スペクトル電波の波長 21 cm での強度分布である。これを見ても電波は腕に沿って強い。この電波は高エネルギー電子が磁場中を運動するときに発せられるシンクロトロン輻射である。したがって腕では磁場が強く、高エネルギー粒子(宇宙線)が多いと考えられる。更に図をよく見ると電波の強い所は光の明るい所から少しずれてダーク・レーンと一致しているのが特徴である。

銀河は比較的古い星が質量の大部分を占めているので全体の力学的構造はそのような星がきめている。しかし渦状腕では、これまで見たようにガスや出来たての若い星が重要な役割を果している。以下、渦状腕やその構造がどのようにしてできるか考えてみよう。

3. 密度波理論：銀河円盤の波模様

渦巻は流体の運動のある所どこにでも見られる。例えば、コーヒーにミルクを注いでかきまぜると白いミルクの渦巻形ができる。銀河の渦巻もこのコーヒーカップの中のミルクの渦巻と同じようなものであろうか。答は否である。銀河の回転は中心に近い程速く回転しているので、もし渦状腕がミルクの渦巻のようなものであればど

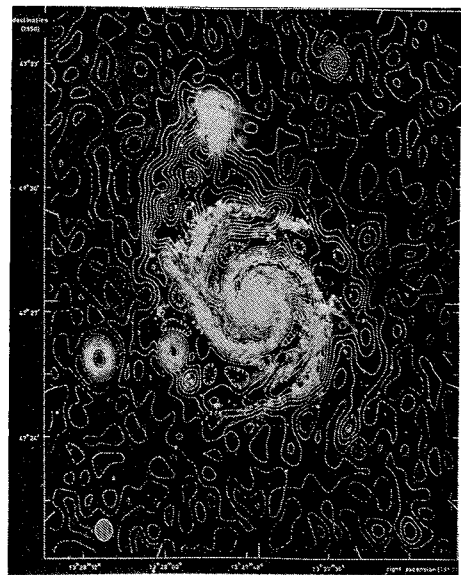


図1 M51. 青い色による写真に連続スペクトル電波(波長 21 cm)の強度分布を重ねたもの。この銀河は反時計回りに回転している。

* 名古屋大学理学部 M. Tosa: Spiral Structure of Galaxies and Formation of Stars

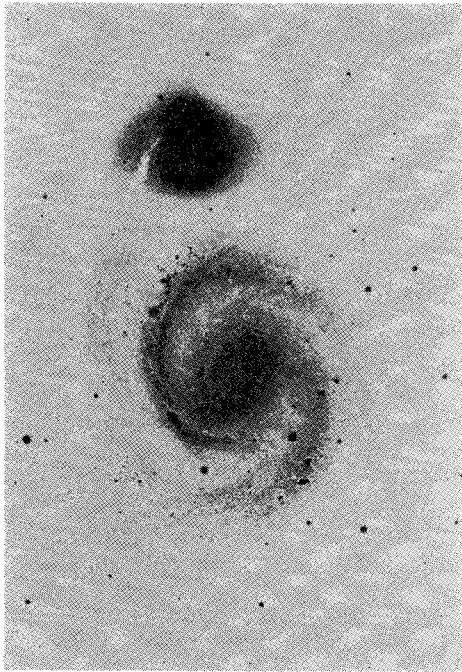


図2 M51. 黄色による写真(合成写真, 白黒が反転している).

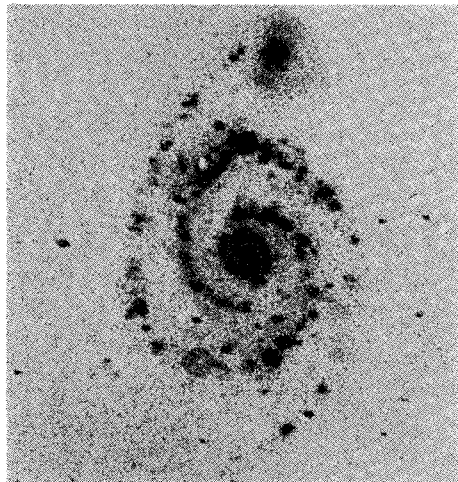


図3 M51. 水素 H α 線による写真(白黒が反転している).

んどん巻き込まれてしまう。しかし観測される渦状腕は多くて2巻程度で、「ミルキウェイ」と言われていてもミルクの渦巻では説明することができない。これは「巻き込みの困難」と言われ天文学者を長い間悩ませてきた問題である。

このような困難を避けるために、渦巻構造は銀河円盤の波動現象による波模様とする考えが出て来た。渦状銀河では星やガスは薄い円盤をなしている。その銀河円盤に渦巻形の波面をもつ波が形を変えずに存在することが

C・C・リンとF・シュー(1964年)によって示された。この波は密度波と呼ばれ、音波と同じ粗密波で、星々が自己重力で集まろうとするのに対し、無秩序運動や回転の効果によって広がろうとする傾向が復元力となって振動し、それが銀河円盤を伝わってゆく。そして銀河の回転と波の伝播がうまく打消し合うところで、渦巻形の波動パターンが維持される。渦状腕は、この波の密度の高い部分に相当する。したがって腕では重力が強く、重力ポテンシャルの谷になっている。この理論は密度波理論と呼ばれ、重力だけで渦状構造のいろいろな性質をうまく説明できることから現在最も広く受け入れられている。

近年電子計算機によって、重力相互作用する多数の粒子系の数値実験が行われるようになった。それによっても、上に述べたような性質を持つ密度波の存在が確かめられている。

密度波の振幅(星の密度の変動量)は、その星やガスの運動に及ぼす効果などから考えて、数%程度と考えられる。しかしこの程度の密度のコントラストでは観測されるような顕著な腕を説明することは無理である。ところで、腕を際立たせているのはガスや若い星であった。そこで、次はガスの振舞を調べてみよう。

4. 銀河衝撃波：ガスの渦状腕

密度波の渦状パターンは、我々の銀河の場合、太陽近傍の銀河回転(約 10^8 年で一回転)の半分位の角速度で回転している。銀河回転するガスは、次々と密度波を追い越してゆくののでガスの運動は、密度波に伴う重力場によって、絶えず乱されることになる。

ガスの流れが乱されたときの振舞は、流れの速度が音速をこえる(超音速)か、こえない(亜音速)かで大きく異なる。ふつうガスに乱れが生じると、それはまわりのガスに次々と伝えられてならされてしまう。乱れは音速で伝わるので、亜音速流の場合は流れが乱されてもそれはならされてしまい、流れはスムーズに変化する。ところが超音速流の場合は乱れは上流に向けては伝わることはできないので、流体は乱れの源に来て突然乱されることになり、そこで流れは不連続的に変化する。この超音速流に発生する不連続的な変化を衝撃波と呼ぶ。衝撃波では、ガスがぶつかる勢いで強く圧縮されるので、圧力や密度が不連続的に増大する。衝撃波は、超音速ジェット機によって大気中に発生する。それが地上に届くと大音響になる。衝撃波に似た現象は、我々身をもって体験することがある。例えば、ラッシュの時の通路で、人がころんだりすると、後から来た人がそれにつまずいて次々に倒れ、押しつぶされてしまう。これは、人がころんだ情報が後の人に伝えられる速さ(音速に相当)より速く人々が歩いているときに起きる。ここで、後の人が次

々と倒れた人にぶつかる様子は、人々を気体分子に置き換えると気体の衝撃波によく似ている。

銀河の場合、ガスの音速は 10 km/秒 足らずであるのに対し、ガスが腕を横切る速度(腕に垂直な成分)は 20~25 km/秒で、超音速になっている。従って腕に沿って衝撃波が予想される。密度波の腕に沿って、大規模な衝撃波が発生することは、藤本光昭(1966年)によって発見され、その後、W・W・ロバート他の人々によって研究され、銀河衝撃波と呼ばれるようになった。衝撃波となると、銀河は大変騒々しいことになるが、星間空間は、大気に比べて圧力や密度が何十倍も小さいので、仮に太陽系が銀河衝撃波を通過したとしても、我々には何の影響もないので心配はいらない。

図4に密度波の腕、ガスの流線、そして衝撃波の位置を示す。ガスの流線は、密度波のために円からずれ衝撃波の所で折れまがっている。流線に沿って密度の変化をみると、図5のようになる。星間ガスは、腕に出あうと、衝撃波によって強く圧縮され、密度は一挙に5~8倍に

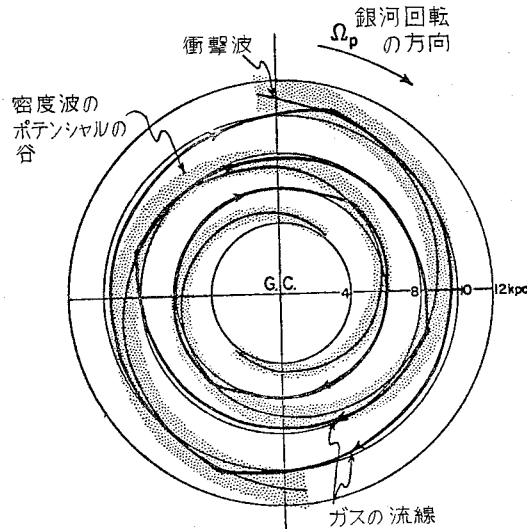


図4 密度波、ガスの流線と衝撃波の関係。

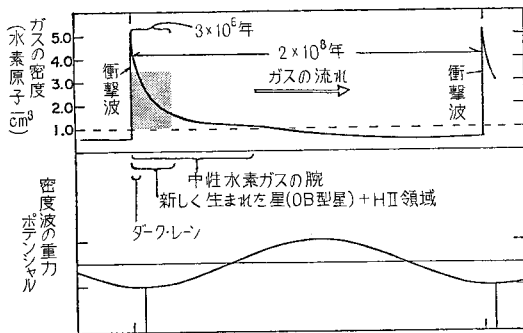


図5 流線に沿ったガスの密度変化。

なる。この密度のピークは腕に沿ったダーク・レーンとして見える。

銀河には磁場が存在する。磁場は、ガスとともに圧縮されるので、衝撃波で非常に強くなる。そのためシンクロトロン放射による電波もそこで強くなるはずである。図1でみたように、電波の強い所がダーク・レーンに一致することは、このことをよく示している。

星は星間ガスが収縮して生まれる。衝撃波はガスを強く圧縮するので、星の形成を促進するであろう。その結果は生まれた星によって光った腕が作られるとすると、星が腕に沿った非常に狭い領域で形成されていることや、その他の構造が自然に説明がつく。そのように考えると、ダーク・レーンと光る腕のズレは、ガスが収縮を始めてから星になって光り出る迄の時間をあらわすことになる。その時間は約 3×10^7 年である。

5. 銀河衝撃波における星間雲の収縮と星の形成

最後に星間ガスの構造を考慮して、銀河衝撃波における星間ガスの振舞を調べてみる。星間ガスは、一様ではなく、物理状態の異なるガスがまじり合い、大変複雑な構造を持つ。それを単純化すると、低温(50-100°K)、高密度(10 水素原子/cm³)のガスの塊、星間雲と、その間をみたしている高温(約1万度 K) 低密度(0.1 水素原子/cm³)のガス(インタークラウドと呼ぶ)から成る二相ガスとして扱うことができる。星間雲は蒸発してインタークラウドになったり、逆にインタークラウドが冷えて収縮し星間雲になったりすることができる。このように二相ガス中の衝撃波の構造は図6のようになるであろう。衝撃波はインタークラウドにでき、流れは不連続的に変化し、圧力や密度は急上昇する。星間雲の方は各々独立に振舞い、衝撃波に突入すると押しつぶされな

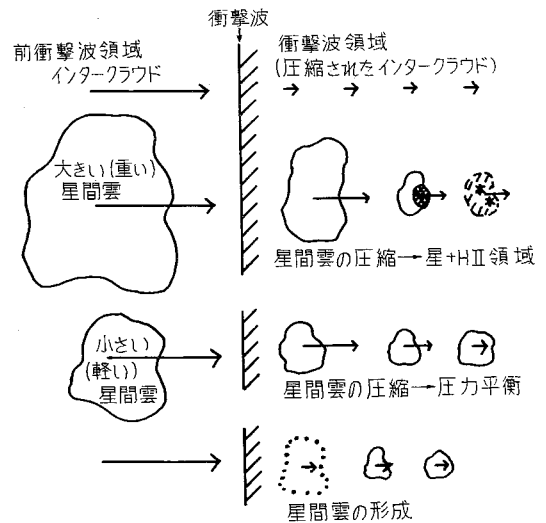


図6 二相星間ガス中の銀河衝撃波の構造(模式図)。

がらインタークラウドの抵抗で減速され、やがて下流にたまりガスの濃い領域を作る。質量の小さい星間雲は、インタークラウドと圧力がつり合うところで収縮が止まるが、重い星間雲は圧縮されると自己重力でつぶれてしまい、やがて星が生まれる。また圧縮されたインタークラウドの一部から星間雲ができたりもする。

P・R・ウッドワード(1976年)は、星間雲が銀河衝撃波に突入して押しつぶされる過程を電子計算機によって追跡した。図7は、最初半径が15 pc, 500太陽質量の星間雲が銀河衝撃波に突入してから 6×10^6 年後の断面図である。星間雲は進行方向に平たく押しつぶされている。急激に押しつぶされたために内部に内向きの衝撃波が発生し、その背後にガスが押しつけられて高密度ガスの殻ができている。一番内側の白い部分はまだ外からの影響が届いていない部分である。表面の突起は、インタークラウドとの相互作用によって生じた不安定性(ケルビン・ヘルムホルツおよびレーリー・テラー不安定性)が成長してできたものである。この星間雲の前面の中心近くに非常に密度の高いかたまりができている。この部分を取り出して調べてみると、質量は約25太陽質量で、自己重力がかなり効いている。この部分はやがて重力でつぶれ、星が形成されると考えられる。重力でつぶれ始めた星間雲は、星になるまでには分裂したり角運動量や磁場を捨てたりいろいろな過程を経なければならぬが、ここではそれらにふれる余裕はない。

銀河衝撃波は星間雲の重力収縮を引き起こす引金として大変有効であり、その結果星が生まれているとすると、観測される腕の構造をよく理解することができる。渦状腕でのガスの振舞いは、湿った風が山脈に当たった時に雲が発生し雨が降る気象現象にも例えることができる。銀河では、星間ガスの風が密度波の山(重力の谷)に当たると星間雲が発生し星の雨が降るというわけである。

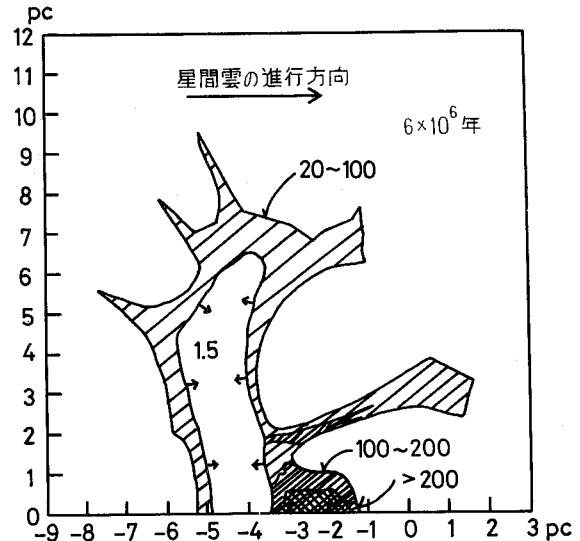


図7 銀河衝撃波で押しつぶされる星間雲。数値はガスの密度(水素原子/cm³)。最初の半径は15 pc, 密度は1.5 水素原子/cm³。

6. おわりに

密度波と銀河衝撃波理論に基づいて渦状腕の構造や星の生成を調べてきたが、現状はやっと一応の筋道をつけて考えることができるようになったというところであろう。密度波理論もまだ不完全で解決すべき問題も多い。星の形成にしても、大マゼラン雲のようにはっきりした腕構造がないのに盛んに星が生まれている銀河もあり、銀河衝撃波一本槍というわけにはいかないようである。

しかし、最近、分子や大干渉計による電波観測をはじめ人工衛星望遠鏡などの新しい観測手段や、電子計算機による数値実験などの新しい研究手段が実現しつつあり、今後銀河の研究は、今迄にない新しい進展を見せるものと大いに期待される。

雑 報

Her X-1 にサイクロトロン線スペクトルみつける

連星系をつくっているX線パルサーとして知られているHer X-1の硬X線観測の中に 10^{12} ガウスの磁場の存在を直接的に示すサイクロトロン線が発見されたことが昨年J. Trümperにより報告された。その時はサイクロトロン基本波が約53 keVのところ鋭いピークを持つことが示されただけであった。ところがAp. J. Letters, 219巻, 105頁の論文によれば、同じ気球観測のデータを再解析してみたところ、約110 keV付近にサイクロトロンの第2高周波があることが判明した。こ

れにより、硬X線で線スペクトルを発生する他の原因、例えば ^{119}Pt からのライマン α 線というような原子的過程による線スペクトルや Am^{241} からの核ガンマ線というような可能性はゼロに等しくなり、中性子星のまわりの 10^{12} ガウスの強い磁場中でサイクロトロン運動をする電子から硬X線で線スペクトルが放射されているとする説が非常に有力になった。発見されたサイクロトロン線の幅が狭いことも重要なことで、約10 kmの中性子星の磁極付近のわずか700 m以内の小さい領域から強力なX線パルスが出ていることになる。今後、衛星による精密観測も進むだろうし、中性子星物理の飛躍的發展が期待される。(大木健一郎)