

# 星雲の渦状構造

宮本 昌典\*

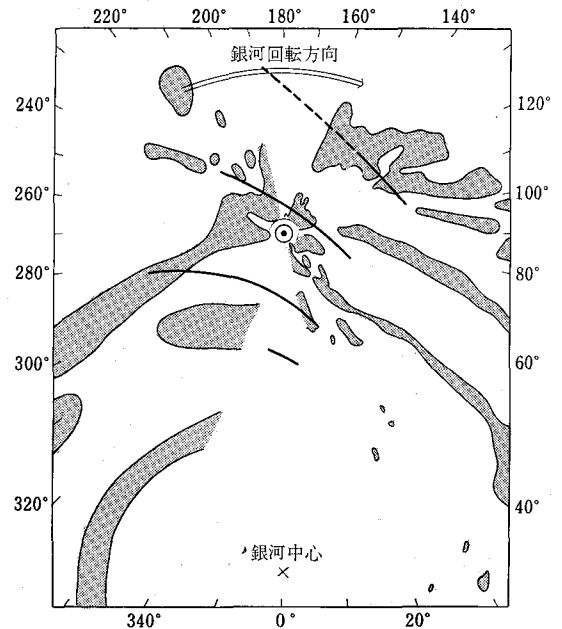
最近、銀河系や銀河系外星雲における渦状構造を、銀河中心のまわりに形を崩すことなく伝播する星間ガスや星々の分布の疎密波として説明する試みが、マサチューセッツ工科大学の乱流境界層理論を専門とするリンやトーマー等によってなされ、彼等の線型理論によって少なくとも理想化された銀河模型においては準定常的な波模様が矛盾なく実現されるかの如く樂觀されたが、またまた理論が最初設定した模型の中で閉じなくなりました。ここでは最近提唱された渦状構造の形成と維持についての興味深い理論を紹介し、それぞれの直面している困難について多分に私見を交えながらふれてみよう。

## 1. 観測から判断できること

偏平な銀河系外星雲の写真をながめるとき、渦状の模様(渦状構造)がごく普遍的な現象であり、渦状の模様に沿ってだけ物が集積しているかの如き印象を与えていることは誰しも認めることである。実際に物がこのように分布しているかどうか直接観測で確かめるには、銀河系や銀河系外星雲(以下星雲)において、あらゆる形態の物質の分布を数え落すことなく勘定すればよい。ところが、光学観測に直接かからない暗い星々があまにも多すぎてこのようなことはとても不可能である。そこで、われわれの持ち合わせている知識から常識的に判断することになると、物が渦巻という奇妙な形に沿ってだけ分布しているとすれば、このような構造は1銀河回転時間(約2億年)程度の、銀河系の年齢150億年に比較すればまたたく間に崩壊を余儀なくされるはずである。従って、もしこのくらいの時間間隔で再び渦状構造を作り上げるような強力な原因がない限り、星雲の渦状構造を普遍的なものとして認めることができないはずだ。だいいち、このような短い時間で渦状構造が現われては消えることを繰り返しているとすれば、そのような急激な変化は当然大規模な物質の運動として観測にかかってくるはずである。従って、銀河系や偏平な星雲では、大ざっぱに言って、力学的定常状態が実現し得るような質量分布(軸対称分布)になっており、偏平な星雲に見られる渦状構造は単なるアクセサリーにすぎない、つまり、星雲全体の質量に比較すればむしろ稀な人目をひくようなある種の形態の物質だけが渦状の模様に沿って特別多く分布しているにすぎないと考えた方がよさそうだ。

実際、人目をひく形態の物質——星間ガス、散光星雲(H II 領域)、OB アソシエーション、散開星団、青色超巨星等極端な種族 I の物質に注目して、これらの分布状況を丹念に調べると素直な渦状構造が銀河系や星雲において現われてくる(第1図、第2図)。一方、S0型という赤味を帯びた偏平な星雲は、いわば化粧を洗い落してしまった星雲であって、星間ガスとか散光星雲の存在を全く示さないと同時に、構造といえればせいぜい同心円状のぼやけた模様しかもっていない。アクセサリーを除去してしまえば質量分布が殆んど軸対称になっていること、偏平な星雲において渦状構造が形成されるためには、星間ガスの存在が必要不可欠であることを示している。しかも星雲の全質量に対しわずか数パーセントの星間ガスがあれば充分であることが銀河系内の観測から推定される。

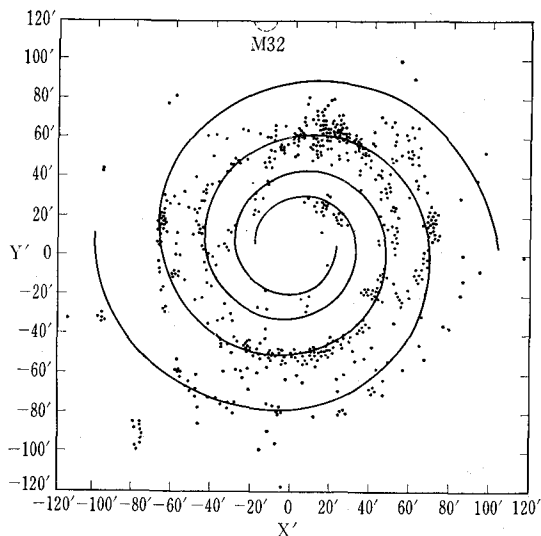
第1表は、太陽近傍において一辺10パーセク(pc)の立方体に含まれているいろいろな形態の物質の量を太陽質量を単位として示している。この表は、銀河系においても前述の力学的定常状態が実現しているとしたとき



第1図 銀河系における渦状構造：太実線は散光星雲、OB アソシエーション等の分布。黒くぬりつぶしてあるところは中性水素の分布。図の周囲の数字は銀経を示す。(F. J. Kerr, 1962; T. Schmidt-Kaler, 1964 による)

\* 東京天文台

M. Miyamoto: Spiral Structure in Galaxies.



第2図 アンドロメダ星雲における散光星雲の分布。星雲の傾きを補正して真上からながめたようになっている。(H. Arp, 1964 による)

全質量密度  $150 M_{\odot}/(10 \text{ pc})^3$  が要求されることに基づいて作成されている。銀河系全体の質量に対する星間ガスの存在比 $\sim 3\%$  (オールド, 1961) に比較すれば、確かに太陽近傍における局所的質量密度はかなり大きくなっている (17%)。このことは、星間ガスが銀河面に強く集中していること以外の多くのことを意味してはならないが、この程度の星間ガスが渦状構造の形成に寄与していると考えてよい。また表の通り、太陽近傍においてすら、暗い極端に赤色の主系列星であろうと想像されている“得体の知れない”物質 (unknown objects) が43%も存在するのだから、渦状構造に星々がある程度寄与しているとしても、どの種の星がどの程度分布しているかなどというこまかな議論はできない。

## 2. 渦状構造はどのようにして形成されるか

ロス (Lord Rosse, 1850) が M51 において渦状構造を発見して以来、古くはジーンズ (Jeans, 1919) による回転流体の赤道放出 (equatorial ejection) 理論、ハイゼンベルクとウィツェッカー (W. Heisenberg & C. F. Weizsäcker, 1948) の乱流理論、そして最近のリンダブラード (B. Lindblad, 1956; P. O. Lindblad, 1960) の分散環 (dispersion ring) による共振理論、ホイールとアイルランド (F. Hoyle & J. G. Ireland, 1960) 及び大木・藤本・一柳 (1961) 諸氏による電磁流体力学的な説明など、渦状構造がどのようなメカニズムによって形成されるか説明する試みが数多く提唱されているが、いずれの試みもある可能性を強調したもので一長一短がある。以下、興味深い質点力学的な説明と電磁流体力学的な取扱

第1表 太陽近傍における天体の存在密度。  
(A. Blaauw, 1965 による)

対象	密度 ( $M_{\odot}/(10 \text{ pc})^3$ )
星間ガス	25
O~B 5 型星	0.11
セフィイド	$3 \times 10^{-4}$
散開星団 (O~B 6)	0.03
散開星団 (B 7~F)	0.05
B 8~A 5 型星	1.7
F 型星	2.5
dG 型星	3.5
dK 型星	9
dM 型星	29
gG 5~8 型星	0.2
gK 0~5 型星	0.5
gM 型星	0.01
白色矮星	8
unknown objects	64
全質量	150

いについて触れてみたい。

### i) リンドブラード父子による質点力学的取扱い\*

中心近くではほぼ一様回転し、中心から遠く隔ったところでケプラー運動に近づくような偏平な非一様回転系においては、棒状の密度波 (bar-type density wave) と楕円形をした分散環が形成され易いことをリンダブラードは理論的に導き、これら二種の非軸対称重力擾乱によって、銀河系内でほぼ円軌道を描いている物質の運動が乱され物質の分布が二本腕の渦状あるいは棒渦状になるであろうと予想した。息子の P.O. リンドブラードは父の予想を数値実験によって確かめた。

P.O. リンドブラードの数値計算によると、渦状構造は最初巻き出しの腕 (leading arm; 銀河回転の方向に渦が巻き出る状態) として出現し、その後質量の大規模な再分配を経過して、巻き込みの腕 (trailing arm) が形成され、最終的には物質の運動は偶然運動に近い状態になる。この間約10億年を要した。このように銀河系において最も支配的と考えられる重力のみによって、渦状構造の発展を数値実験によって目の当り実現してみせたことには、誰しも一驚を喫したが、彼等の主張にも問題点がないではない。例えば、次のような疑問をいだかせる。

- この結果は、質点力学を駆使して得られた。星間ガスのような流体が実際に質点と同様に振舞うか。
- 取扱われた問題は完全に初期値問題である。そし

\* リンドブラードの理論については、清水彊「リンドブラードの業績を憶う」(天文月報, 第59巻第5号, 109頁)を参照されたい。

て渦状構造を作成するための“種”としての特殊な非軸対称擾乱の存在を前提としている。このような特殊な“種”の発生の可能性は充分考えられるとしても、存在し得る別種の偶然的な微小擾乱からもっと速かに渦状構造に発展してしまう可能性はないか。

c) 特殊な非軸対称擾乱による偶力が原因で一時巻き出し腕が出現した。だから巻き出し腕の出現はこのような擾乱特有の現象ではなからうか。

d) できるだけ系統的な模様を得るために、二質点が近接遭遇した際ニュートン力以外の力を仮定している。人為的に偶然運動の発生を抑制しているわけだ。偶然運動があれば、非軸対称擾乱との共振はそれほど顕著には起らないだろう。

e) ひとたび乱されてしまった物質の運動を再び円運動に整理するような別のメカニズムを導入しない限り、再び渦状構造が形成されることはないであろう。たった10億年でアクセサリーがこわれてしまった。銀河系あるいは星雲が、アクセサリーをつけて晴姿になるのは一生に一度だけのことであろうか。

#### ii) 電磁流体力学的取扱い

渦状構造が出現するためには、まず星間ガスの存在が不可欠である。一方、ニュートン力が支配しているとは思われないような奇妙な星雲や橋渡しされた星雲が存在すること、銀河磁場や星雲間磁場が存在することなど、注目すべきいくつかの事実がある。これらの事実が、星間ガスと磁場の相互作用の下に渦状構造が形成される可能性を論ずるきっかけを与えている。

ホイールとアイルランドが、渦巻の腕は巻き込まれつつある磁力管であるというアイデアを出してから間もなく、大木・藤本・一柳の諸氏は、星々の分布によって決まる定常的な重力場のもとで非一様回転する星間ガスが、磁場の影響を受けてどのように渦状構造を形成していくか詳しく追跡した。その結果、銀河系における現在の渦の巻き込み具合と渦巻の腕に沿う  $10^{-6}$  ガウス程度の磁場が得られるまでの渦状構造の形成時間は、たった1銀河回転程度であった。このような割合で渦の巻き具合が変化してゆくとすれば、あとおよそ同程度の時間しか渦状構造は維持されないことになってしまう。つまり電磁流体力学的なメカニズムによって渦状構造が形成されたとすれば、渦状構造の寿命は1銀河回転時間に比べてそう長くはなく、渦巻と磁場は銀河系の非一様回転によってギリギリ巻き込まれてしまうわけだ。

ここで、渦状構造は出現しては消えることを何回となく繰り返す模様であるというイメージをもつなら、ひとたび巻き込んでしまった磁場からどのようにして再び渦状構造が形成されるかという磁場のあと始末の問題が起ってくる。実際には、ここで取扱われたような単純な

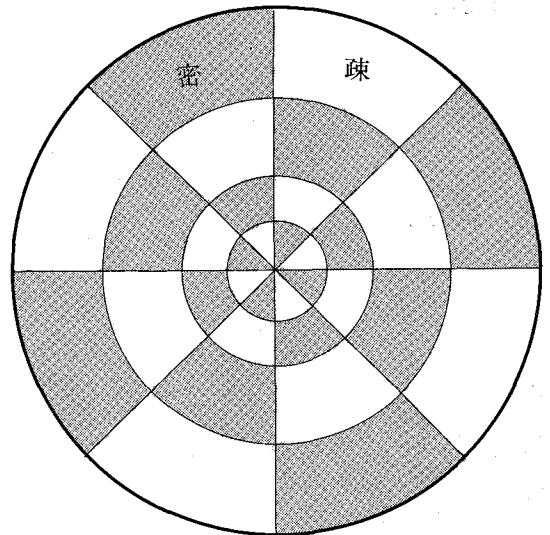
磁場ではなく、ホイールたちが主張したように、銀河磁場は渦巻の腕に螺旋状にまつわりついており、そのために腕が補強されて、非一様回転のために巻き込まれることがある程度防がれているのかもしれない。最近、マシューソン (D. S. Mathewson, 1968) らの偏光観測によると、少なくとも太陽近傍のオリオン腕の部分では、きついピッチで腕にまつわりつく螺旋磁場になっていることがわかって来た。渦状構造に対する磁場の役割を再検討する必要がある。

### 3. 渦状構造はどのようにして維持されるか

渦状構造を理解するには、少なくとも渦の形成と維持の問題が観測事実と抵触しないように説明できなくてはならない。星雲に見られる模様の多様性を考慮するとき、素直な二本腕の渦状構造しか説明できないような偏狭な理論であってもならないことはいうまでもない。

前述の二つの理論は、渦状構造の維持の問題、あるいは再び渦状構造が発生するための素地がどのようにしてつくられるかという問題を解決する段階で壁にぶつかっている。さらに、渦状構造が非一様回転する媒体によって“受身的”に運搬されていることも共通している。

維持の問題に直面して手をこまねいている間に、他の可能性を検討してみることは意義のあることである。ひとたび形成された渦状構造が、非一様回転する媒体中を形を変えることなく“自主的”に伝播することが可能ならば、前述の二つの理論における困難は一応解決されることになる。この見地からストレームグレン (B. Ström-gren) とウォルチャー (L. Woltjer) に示唆を与えられたハンター (C. Hunter 1964~5)、トゥーマー (A. Toomre, 1964)、リンとシュー (C. C. Lin & F. H. Shu,



第3図 一様回転円盤上の波模様

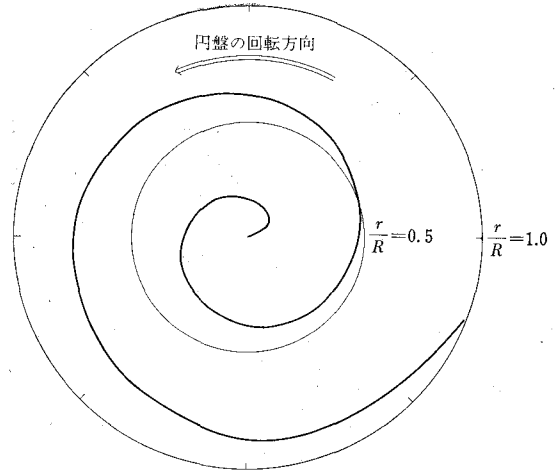
1964~6) は、扁平な星雲中心のまわりに適当な角速度で伝播する定常的あるいは準定常的な物質の疎密の波模様として渦状構造を理解しようと試みた。

われわれの銀河系や扁平な星雲が常に内蔵していると考えられるあらゆる微小な擾乱(密度のむら)のうち、渦状の擾乱だけが他の諸々の擾乱より速かに成長する、あるいは、何か適当なメカニズムによって他の諸々の擾乱は速かに減衰して渦状の擾乱だけが準定常的な状態を保つことができる、というような結論が得られればわれわれの興味は一応満たされる。

まず、重力と遠心力とが釣合って回転する無限に薄い円盤を扁平な星雲の模型と考え、この模型の固有振動を明らかにすることによって星雲の力学的本質をあばこう。一樣回転しながら自己重力と遠心力と圧力とが釣合った回転流体としてマクローリンの回転楕円体があるが、この回転体の極限状態として自己重力と遠心力とだけで釣合が保たれる円盤がある。ハンターはこの一樣回転円盤に着目する。このような円盤なら、回転流体の安定性を調べるための数学的手段を使うことができるからである。彼の解析によると、円盤全体を引き伸ばしたり縮めたりするような振動以外の波動はことごとく不安定であり、その不安定性は波長が短いほど、つまり波模様がこまかいほど不安定であることがわかった。それらの波模様は例えば第3図のように描けるわけであるが、密度の高い場所がけって滑らかな縞模様になることはなくモザイク模様になってしまった。この結果は悲観的なものではなくむしろ曙光を投げかけるものであった。なぜなら、疎密の波模様が渦巻模様になるためには、円盤が扁平な星雲のように非一樣回転していなくてはならないことを暗示しているからである。それにしても、波動のがらがこまかいほど不安定性が大きく、こまかな擾乱ほど成長速度が大きいということはわれわれにとって不都合なことである。というのは、がらの大きな渦状の擾乱などがらの小さな擾乱の成長によって相対的におおいかくされてしまうからだ。

波長が短い擾乱ほど速く成長するという性質は一樣回転している円盤に特有な性質ではなく、重力と遠心力だけで釣合って回転している円盤に共通な性質である。このような円盤においては、疎密波に対する復元力は流体要素の角運動量保存に基づく遠心力だけで、しかもこの復元力は波長に比例している。そのために波長の短いむらほど復元作用が乏しく、ひとたび生じた疎密のコントラストがますます誇張されてしまうわけだ。

このような考察から、渦状構造の説明に不都合な短波長の擾乱を抑制するために自己重力と遠心力以外の第三の力が必要であることが暗示された。つまり、自己重力と遠心力だけで釣合って回転する円盤は、二本腕の渦状

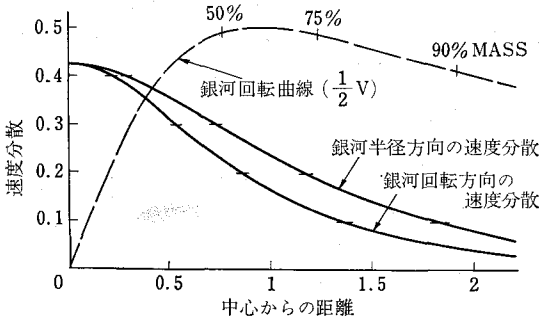


第4図 非一樣回転円盤上の不安定な波模様(太実線). これと対称なもう一本の渦状模様は省略してある。

構造のような長波長の模様が卓越している星雲の模型としては不適當ということになる。復元作用を与える他のメカニズムは、星間ガスのガス圧とか星間ガスや星々の偶然運動に原因する統計的な圧力作用であろうが、このような量まで辻つまの合うように考慮する方法がない。そこで、甚だ歯ぎれの悪いことではあるが、差し当り遠心力だけを復元力とする模型で得られる波動のうちで特別な渦巻模様が最も卓越するらしいということを、圧力効果に関する別の物理学的考察から予想する以外には手はない。

このような事情から、まず第一歩として、極端に単純化された模型について波模様を机上で実現してみること、数学的にきちんと解いておくことは有意義であろうと考える。ハンター(1965)は次に、非一樣回転円盤(圧力無視)上の疎密波と取組んだが、興味的である非軸対称波動を表現する複雑な行列が無限行列になってしまい、解析的な結論が得られる限界をはるかに越えてしまった。ただ、不安定な波動でない限り渦巻模様にならないという回転円盤の性質に既に気付いたことは収穫であった。一方、現実問題として結果に大きな影響を与えるかどうか別問題としても、数学的な見地からハンターによる円盤境界の取扱いはすっきりしない。藪下(1968)氏は、境界の取扱いを工夫して非一樣回転円盤に生じ得る渦巻模様を実際に数値解析した。ハンターの結論のように、勿論渦状模様は不安定な波動であって複素共役対として得られているが、驚くべきことに時間と共に成長する渦状の波動は巻き出し模様になった(第4図)。

ところで、復元力として遠心力だけを考慮した場合に必然的に現われる短波長の波動の不安定性を、星間ガス



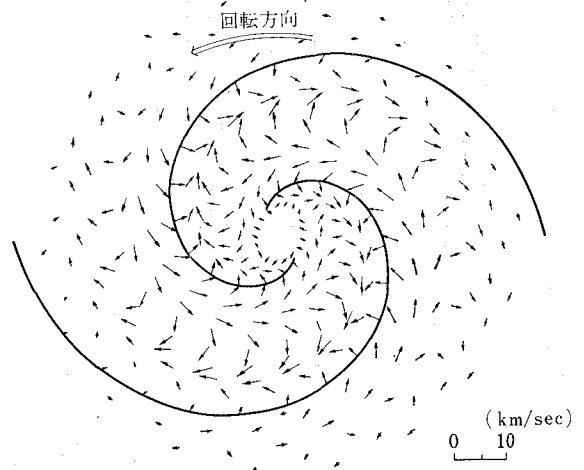
第5図 すべての同心円状の波模様が平滑化されるために要求される最小の速度分散。速度分散は最大銀河回転速度を単位として測っている。銀河回転速度は半分に縮めてある。

や星々の偶然運動による統計的な圧力を導入して抑制し準定常的な波動を見出そうという試みが、不完全な取扱い方ではあるが、提出されている。トゥーマー (1964) は、重力と遠心力と星々による統計的な圧力が釣合った (と彼はみなしている) 円盤の一部分における軸対称振動を調べた。第三の力をも他の力と平等に操作しなくてはならないために、渦状構造の特徴の一部分を無視せざるを得ない。彼の議論では、円盤全体にわたった渦状構造を論ずることを最初から放棄する。しかし、円盤の半径に比べて波長が短い Sa 型星雲の渦状構造を論じていると思えば全く現実ばなれしているとはいえない。彼は、長波長の擾乱に対しては遠心力による復元作用が、短波長の擾乱に対しては圧力による復元作用が、それぞれ重力による集積作用を凌駕して、それぞれの擾乱は平滑化されてしまうと考える。そしてある特別な波長の擾乱に対してだけ、それらの復元作用と集積作用とが互角になって、その特殊な擾乱がいつまでも維持される——これが星雲の同心円状の模様であると考えられる。

星雲中の星間ガスばかりではなく星々までがすべて同様に波模様と与っているとしたとき、ある臨界波長の波動以外のすべての波動が平滑化されるために、円盤の部分ごとに要求される平均速度分散は第5図のようになった。勿論、彼の仮定から本当に信頼のできるのは半径の大きな部分における結果だけである。この結果をわが銀河系の太陽近傍に適用してみると、同心円状 (とみなせるとして) の腕が定常状態を保てるよう星々に要求される平均速度分散は 60~70 km/sec にもなってしまう。そのときの臨界波長は 6~7 kpc になった。ちなみに、太陽近傍における平均速度分散は ~30 km/sec、腕と腕との間隔は 2~3 kpc である。観測とのギャップが大きすぎる。実は、円盤を構成するすべての質量が同等に波動に寄与すると考えたところにあやまりがあったようだ。彼の議論を精密化して、銀河模型としての円盤が、大き

な速度分散をもった晩期星 75%、中間的な分散をもった星と星間ガス20%、極端に小さな分散をもった星間ガス 5% から構成されているとすれば銀河系の腕間距離は説明できるとグラハム (R. Graham, 1967) はいっている。

ともあれ、われわれの根本的な興味は、渦状の波模様が最後には生き残るということを説明することにある。復元作用と集積作用が互角になるような波長の波動が星雲の模様であるに違いないと考える点ではトゥーマー達と同様であるが、リンとシュー (1964) は、次のような QSSS 仮説と称する作業仮説を提出した。即ち、円盤全体にわたる非軸対称の波動に対しても、適当な波長に対しては前述の作用が互角になり、しかも非一様回転にもかかわらずそのような波動が形を崩すことなく円盤中心のまわりに伝播することができるはずだ——そのような状態の波動が渦状構造に他ならないと考える。彼等は、渦の巻き数が極めて多い場合に、微小振動の解を巻き数に対して漸近的に表現する方法を考案し、渦巻の巻き数と振動数との関係つまり波動の分散式を導いた。そして円盤質量が中心に強く集中するほど、渦巻の巻き数は Sa 型星雲のように多くなるという結果を得た。一方、波模様の円盤における存在範囲、波長、伝播速度は、波模様が定常になるために要求される星々や星間ガスの速度分散を考慮して決められる形式になっているが、筆者の知る限りの彼等の論文では詳らかではない。なお、トゥーマーやリンは速度分散による圧力効果を考察しているが、全体として回転し、自己重力と速度分散による圧力で平衡が保たれる “reasonable” な軸対称恒星系が未だ理論的に完成されていない (G. L. Camm, 1941 及び W.



第6図 非一様回転円盤の星間ガス成分だけによって形成される波模様。矢印は星間ガスの運動を示す。

Fricke, 1952) ことを付言しておきたい。

藤本 (1968) 氏は、リン達の作業仮説に従って数値解析し、巻き数の少ない渦状の波模様のうちにもほぼ定常 (安定) な波動が存在し得るといっている。藤本氏の取扱いにおいては、疎密波に効果的に応答できる質量は、速度分散の小さな、即ち統計的な圧力が無視できる星間ガスだけであろうとして、波動に寄与している質量は円盤の一部分の質量だけである。思考上の操作によって、速度分散の大きな星々による圧力効果を考慮したことになっているが、数式処理においては、圧力効果は全く無視されている。だから、このようにして得られた波模様は、重力と遠心力とだけで釣合ったハンター達の回転円盤上の波動と本質的には同じであって、厳密には不安定な波動である。しかし、無限に存在し得る渦状の擾乱の中には、長時間にわたって形も濃さも変えることなく伝播する数値的に殆んど定常な波動が存在することは注目される (第6図)。

丁度この頃、復元作用を導入すれば、安定な渦状の波模様が実現するはずだというリン達の考えを否定する結果が出されるという一幕があった。

リンデンベルとオストリカー (D. Lynden-Bell & J. P. Ostriker 1967) は、自己重力と遠心力と圧力で釣合が保たれている圧縮性回転流体の安定性を一般的に論

じ、平衡状態における回転体の内部運動が回転体の赤道面に平行である場合には、安定な波動は渦状の波模様を形成し得ない (anti-spiral theorem) ことを導いた。つまり、圧力を考慮しても渦状の波模様は必ず不安定であるというのである。微小 (一次の無限小) 振動論の範囲内で、定常 (安定) な渦状の波模様として星雲の渦状構造を理解できるかもしれないという安易な考えは殆んど否定されてしまったわけだ。

リンデンベル達の結論によって、星間ガスに働く重力と遠心力と圧力が、大きなスケールの渦状構造の形成と維持に与る最も重要な因子であろうという考えが否定されたわけではなく、渦状構造というものが本質的に不安定な疎密波であると判断すべきことが要求されているわけである。渦状構造に沿って生れたての星が多く分布していることを 1. で認めた。星が誕生するためには一次の無限小とみなされ得ないほど多くの星間ガスの集積が必要だから、微小振動論の範囲内で渦状の波模様の濃淡のコントラストが時と共に増す傾向にあるという結論が得られたことは、むしろ円盤上を伝播する波模様として渦状構造を理解する試みに希望をいだかせる。集まりすぎる星間ガスは星々の形成によって常に稀釈されるだろうから、ある有限振幅の波模様が保たれているのかもしれない。



B 6判 122ページ

定価250円 円55円

(お近くの書店でお求め下さい)

## ことしも天体観測は 「天文年鑑」で…… 1969年版 発売中!

■観測の年次計画、季節計画、月別計画に——

■毎日の目標決定に、ぜひご利用ください

毎日の天文現象が、1年を通してひと目でわかる観測ガイドブックです。惑星・月の出没図と時刻、木星の衛星の位置図と時刻、日食・月食・星食の子報、日面経緯度・視半径・均時差、太陽の月面余経度と月面緯度、惑星のこよみ、小惑星・彗星・流星・変光星の子報、日本の日出没時と月出没時、春分点の正中時、人工天体一覧、1年間の天文界のおもな動き、おもな天文書などを掲載すると共に、ユリウス日や天文常数など必要な資料はすべて取めてあります。特に1969年版では、天体写真撮影のための感光材料や露出のくわしいデータをさらに充実させました。星図と共になくてはならない本です。ぜひそなえて、広く活用してください。

週刊**天文ガイド**の 誠文堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5 振替東京6294番