

●●●●あの論争は…いま？ (5) ●●●●

渦巻腕を生み，支える機構とは

Driving and Supporting Mechanisms of Spiral Arms

江 草 芙 実

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

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

論争の種：渦巻銀河の腕の形成・支持機構

論争の期間：1920年代から現在まで

主な対立説：密度波理論，星形成の伝播，銀河回転による分子雲の引き伸ばし

現在有力な説：腕のはっきりした銀河では，密度波が主要．そうでない銀河では？

銀河にはさまざまな形状のものが存在するが，近傍銀河のカタログ^{1),2)}によれば，その約半数が渦巻銀河に分類されている．渦巻銀河とは，銀河円盤をもち，その円盤部に腕と呼ばれる渦巻状の構造をもつ銀河のことである．このように宇宙の主要な構成要素である渦巻銀河だが，その渦巻腕を形成し支える機構については古くから多くの説が提唱され，議論されてきた．今回はこれらのさまざまな説や議論をまとめ，渦巻腕の謎に迫る．

発端は，1900年頃にはすでに議論されていた「腕の巻き込み問題」であった．この問題を理解するため，図1左上のような渦巻腕が，ガスや星が帯状に連なってできていると考えよう．ガスはやがて収縮して星を生み，成長した星は爆発してガスに戻る．この過程をひたすら繰り返している帯が銀河円盤内にあつたら，どうなるのだろうか？ここで重要なのが，銀河円盤は剛体回転ではなく差動回転している，という事実である．つまり，半径によって回転周期が異なっていて，中心に近いほど周期が短いのである．この帯が銀河の回転とともに運動しているとすると，図1に示すように時間がたつほど銀河中心に近い部分ほどぐるぐる巻きになってしまう，元の形状を保つことがで

きない．そして数億から数十億年のうちには巻き込んだ腕と腕がくっついてしまい，もはや渦巻銀河とは分類されなくなってしまうのである．宇宙年齢が約130億年であることを考えれば，今現在多くの渦巻銀河が観測されるという事実と矛盾する．これが，「腕の巻き込み問題」である．

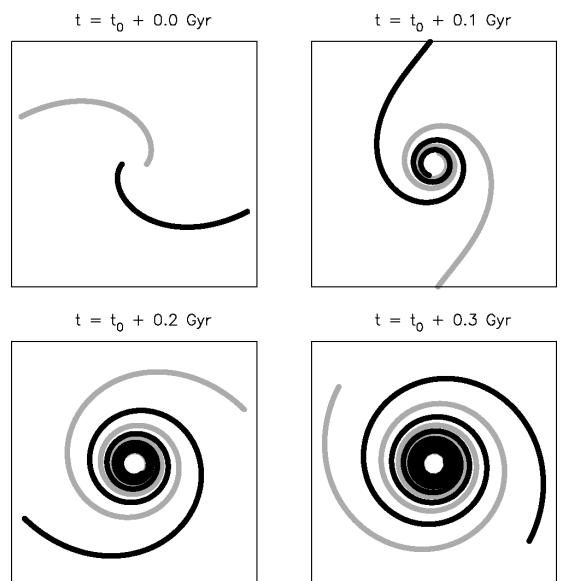


図1 腕が巻き込む様子（回転速度は200 km/s，銀河の半径は10 kpc）．

1950年代頃まで、渦巻腕は銀河磁場と星間物質の相互作用でできるのではと考えられていた。しかし現在、星間磁場はガスのエネルギーを説明できるほど強くはないことがわかっている。そんななか、腕構造を力学的に説明しようと試みたのが、**Bertil Lindblad** である。彼は1920年頃から40年もの間、星の重力と軌道から腕を形成できると主張していたが、当時はほぼ孤立無援状態だったようである。しかし晩年になって、渦巻腕が準定常に存在しうることを示すと³⁾、同じ年には**C. C. Lin** と **Frank Shu** により、腕は星の密度波で説明できるという論文⁴⁾が発表された。密度波とは文字どおり、密度の濃淡が波のように伝わっていくことである。最も身近な例は音波で、媒質（音波の場合は空気、星の密度波の場合は星自身）の運動とは違う速度で波が伝わるのが特徴である。つまり、渦巻腕とは常に星の密度が高く重力ポテンシャルが低い状態にある領域を指すが、個々の星は腕に対して運動していて、腕を形成している星はいつも同じではないということである。交通渋滞でたとえると、ある場所がいつも渋滞していたとしても、ずっと同じ車とその渋滞につかまっているわけではないのと同じである。彼らはこの密度波の概念を銀河円盤の力学に導入することで、「腕の巻き込み問題」を解決し、準定常な腕を作ることに成功した。この翌年に **Lindblad** は亡くなってしまったが、その後この論文をきっかけにして銀河衝撃波の理論^{5), 6)}が構築され、渦巻腕の理解は急速に進んだ。銀河衝撃波とは、星の腕の部分つまりは重力ポテンシャルの底付近をガスが通過する際にその運動速度が音速を超え、衝撃波を形成してガス密度が急激に上昇することを指す。この理論は、銀河円盤の重力の大部分を占める中小質量星の腕に比べてガスやそのガスから生まれる若い大質量星の腕が細いことを的確に説明している。また、腕の部分でのガスや星の運動が円運動から逸脱していることや、図2のように星形成領域の腕がガスの腕よりも下流にあるこ

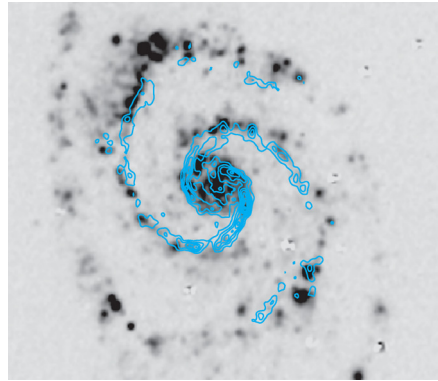


図2 渦巻銀河 M51（等高線が分子ガス (CO)、グレーが星形成領域 (H α) を表している) 銀河の回転は反時計回り。

となどが、密度波の存在を強く示唆している。しかし、腕の部分での重力ポテンシャルの深さや、パターン速度と呼ばれるそのポテンシャルの回転速度など、観測的に測定することが困難なパラメーターが多いという欠点もある。

一方、密度波以外の機構で渦巻腕を説明しようとする理論も数多く存在する。一つめは、星形成が波のように伝わるという理論^{7), 8)}である。大質量星が超新星爆発を起こすと、周囲の星間ガスを吹き飛ばし、その先で衝撃波を生み星間ガスが圧縮されて、ガス密度の高い領域ができる。するとその高密度領域で星形成が誘発され、やがてまた超新星爆発が起こり、さらに外側の領域で衝撃波が生まれて……という過程が繰り返され、星形成領域がホイヘンスの波束のように伝播していくという理論である。これは腕を密度波ではなく物質波として表現しているが、大質量星の寿命が短いために巻き込みにくい腕になると主張している。また、腕の巻き方がゆるい銀河ほど銀河回転の速度が小さい⁹⁾という傾向を説明できている。しかし密度波理論で説明できた、腕での速度場の歪みやガスと星の腕の位置関係を説明できないほか、きれいな腕を作るにはパラメーターである星形成率を微調整する必要があるなどの欠点がある。

二つめは **Chaotic Spiral** と呼ばれる理論で、自

己重力で収縮した分子雲が差動回転の影響で引き伸ばされ、他の分子雲とつながって腕のように見えるというものである。これは **Flocculent** と呼ばれるあまり腕のはっきりしない銀河を説明するには適しているが、**Grand-design** と呼ばれるはっきりした腕が円盤全体に存在する銀河を説明するには十分でない。

ほかに、伴銀河との潮汐力によって腕ができるという説や、銀河中心の棒状構造や軌道の歪みによって腕ができるという説などがある。しかし伴銀河も中心の棒状構造もない渦巻銀河を説明することができないため、渦巻腕形成の一般的理論とは言えない。

以上のように、これまで密度波理論をはじめとするさまざまな理論が渦巻銀河の腕を説明するために提唱されてきた。これらの中で現在最も観測と整合性が高いのは密度波理論と考えられている。**Grand-design** 銀河ではもちろんだが、最近では **Flocculent** に分類されている銀河でも密度波が存在している可能性の高いものがあることがわかってきている¹⁰⁾。しかし渦巻銀河の形態の多様性を見れば明らかなように、密度波理論のみですべての渦巻銀河の腕を説明できるわけではない。銀河中心の棒状構造が円盤部の腕構造の強さを増

幅していたり、銀河団に属している銀河では銀河間物質の影響を受けて腕が曲がったりしていることもわかっている。また、**Flocculent** 銀河では星形成の伝播や差動回転による分子雲の伸長の効果が密度波より大きいかもしれない。このように、渦巻腕は複数の異なる物理過程がお互いに関係し合い、形成されていると考えられる。したがって、今後はどの過程がどの程度寄与しているかを明らかにすることが、渦巻銀河の形態と力学の関係を理解するうえで重要である。

参考文献

- 1) de Vaucouleurs G., et al., 1991, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York)
- 2) Tully R. B., 1988, *Nearby galaxies catalog* (Cambridge University Press, Cambridge and New York)
- 3) Lindblad B., 1964, *ApNr* 9, 103
- 4) Lin C. C., Shu F. H., 1964, *ApJ* 140, 646
- 5) Fujimoto M., 1968, *IAU Symp.* 29, 453
- 6) Roberts W. W., 1969, *ApJ* 158, 123
- 7) Mueller M. W., Arnett W. D., 1976, *ApJ* 210, 670
- 8) Seiden P. E., Gerola, H., 1979, *ApJ* 233, 56
- 9) Kennicutt R. C., 1981, *AJ* 86, 1847
- 10) Thornley M. D., Mundy L. G., 1997, *ApJ* 484, 202