

# 銀河ダイナモ：銀河の磁場はどのように作られるか？

土 佐 誠\*

## はじめに：宇宙の磁場

宇宙には重力(万有引力)という強力な独裁者がいる。重力の命令に背いては天体は存在出来ない。しかし、宇宙には重力に反逆する者もいる。それは磁場である。

磁場は大変「保守的」でどんな変化にも逆らおうとする。その結果かえって変化を大きくすることになる。例えば、磁場はガス雲の回転を止めようとするが、その結果、ガス雲が重力で潰れるのを助けることになる。重力と磁場の「戦い」(といっても最後には磁場が必ず負けてしまうのだが)が重力だけでは作り出せない様々な面白い現象を作り出している。もし、磁場が無かったら宇宙は大変寂しいものになったはずである。

天体の磁場のルーツを探ると銀河の磁場に行き着く。例えば、太陽の磁場は、誕生するときに星間ガスと一緒に取り込んだ銀河の磁場が種になっている。

銀河の磁場は銀河内部の発電作用によって発生すると考えられている。銀河は電磁石、それも宇宙で最も巨大な電磁石なのである。銀河の自発的な磁場生成機構を銀河ダイナモと呼んでいる。近年、銀河磁場の観測の発展に伴って、銀河ダイナモの研究が盛んである。

そこで、銀河ダイナモの仕組みや、どのような磁場が作りだされるか、また現在何が問題になっているのかなどを調べてみたい。銀河ダイナモの理論は物理学的にも数学的にも複雑で解りにくいと「悪名」高い。ここでは、本質的な部分を直感的に説明したいと思う。

## 銀河の磁場を観測する

磁場があると、電磁波(光や電波)の放射や伝播の性質が変わり、電磁波の振動面が特定の方向を向くようになる(偏光あるいは偏波)。この性質を利用して、星の偏光や電波源の偏波の解析から銀河磁場の情報を得る。

観測結果を要約すると、銀河系の広い範囲にわたって磁場が存在し、厚さ数 100 pc で円盤部(ガス円盤)に集中している。磁場は非常に乱れていて無秩序に見えるが、100 pc 以上の領域で平均すると規則的な構造(平均磁場)が現れてくる。平均磁場は銀河面に平行で、渦状腕に沿っていると思われる。平均磁場の強さと、乱れた磁場の強さは同じくらいで、数マイクロガウスである。

銀河系の磁場の情報は主として太陽系近傍(数 kpc 以

内)に限られ、銀河系全体の構造は良く解らなかつたが、近年、系外銀河の高分解能電波観測等によって、銀河全体の大局的磁場構造が明らかになってきた。

図1は渦状銀河 M51 における磁場の方向を示したものである。磁場が渦状腕に沿っていることが良く解る。一般に渦状銀河では、磁場の方向が渦状腕に良く沿う。太陽近傍に観測される平均磁場はこのような大局的な磁場構造の一部を見ているものと思われる。



図1 M51の磁場構造

シンクロトロン放射による電波の偏波解析によって得られた磁場の方向を示す。

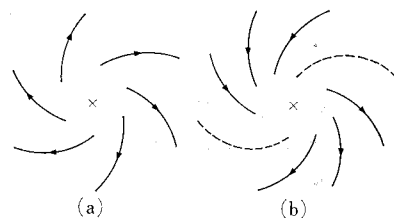


図2 渦状銀河の大局的磁場構造

- a) 軸対称構造磁力線の傾きが小さいときにはリング状構造になる。
- b) 非軸対称構造(BBS構造)。磁気中性線(点線)があり、そこで磁場の方向が逆転する。矢印は磁場の方向を示す。

\* 東北理 Makoto Tosa: Galactic Dynamo: How magnetic fields are generated in galaxies

いろいろな渦状銀河の磁場構造を調べると、軸対称構造（磁力線の傾きが小さい場合にはリングに見える）と非軸対称構造（BSS 構造と呼ばれる、Bisymmetric Spiral Structure の略）とに分類される（図 2）。

BSS 構造は、名古屋大学の藤本光昭氏と共同で行なった M51 の解析から初めて得られた。BSS 構造はその後の高分解能電波観測によって確認されたが、後に述べるように、銀河ダイナモの理論に対し非常に困難な問題を提起することになる。

### 磁場とガスの結び付き：磁場の凍結

銀河磁場を考える上で、まず注目すべきことは、「磁場（磁力線）は導体と一体となって運動しようとする性質を持つ」ことである。つまり、磁力線は運動する導体に引きずられたり、反対に、磁場が強ければ、磁場が導体を引きずったりする。

このような磁場と導体の結び付きは電磁誘導の性質から導かれるものであるが、直感的には磁場の「変化を嫌う保守的な性質」の現れと考えるとよい。磁場と導体为一体となって運動すれば、磁場と導体の関係は変化しないので、磁場はそうのように振舞おうとするわけである。

導体が完全伝導体の場合には、導体と磁場は完全に一体となって運動する。このような状態を「磁力線が導体に凍結している」という。

星間ガスは、星の紫外線などによって部分的に電離しているので、伝導体である。従って、銀河の磁場も銀河のガスと一体になって運動しようとする。しかし、星間ガスは完全伝導体ではないので、短い時間で見ると磁場が凍結しているように見えても、長い時間でみると、凍結が破れ磁場はガスをすり抜けてしまう。また、大きなスケールでは磁場がすり抜けるのに時間がかかるので、磁場の凍結が長時間つづく。

磁場が星間ガスに凍結していると考え、磁場がガス円盤に強く集中していることが自然に理解出来る。

もし磁場がガス円盤から逃げようとする、ガスも一緒についてこようとする。しかし、ガスは銀河の重力場に引かれて逃げることができない。その結果、磁場もガス円盤に閉じ込められることになる。つまり、ガスが磁場を銀河に留める錨の役割を果たしているのである。

### 巻き込みの困難

銀河のガス円盤は銀河中心の回りを回転しているが、差動回転といって内側ほど回転角速度が速い。そのため、内側と外側のガスの流れにズレ（シアという）がある。銀河の磁場はシアのためにひねられ、内側からどンドン巻き込まれて行く。

もし、銀河を貫く一本の磁力線を考えると、約 1 億年

で一巻きする。銀河の年齢を約 200 億年とすると、もし磁場が完全に凍結していれば、銀河の磁力線は何百回も巻き込まれたことになる。これは観測事実と反するのでどこかに間違いがある。この問題は巻き込みの困難と呼ばれ、長い間天文学者を悩ませてきた問題である。

### 乱流による磁場の拡散

銀河の磁場がガスに完全に凍結していると、上に述べたような巻き込みの困難が起こる。そこで、ガスと磁場の関係をもう少し詳しく調べてみる必要がある。

星間ガスは毎秒約 10 km で無秩序に乱流運動している。流体が乱流状態にあると、流体中に混ざっている物質は良く混ざりあい、それと同時に短時間に遠方まで運ばれ薄められる。乱流拡散と呼ばれる現象である。乱流状態にある流体中の磁場についても同じ事が起こる。ガスの乱流運動によって磁力線は引きずられて、引き延ばされたり、繋ぎ変わったりして、遠方まで運ばれる。

乱流拡散が働いていると、ガス円盤の深いところにあった磁場も短時間にガス円盤の表面に運ばれ、そのまま円盤の外に逃げる事ができる。従って、銀河ガス円盤の磁場は乱流拡散のために約 1 億年足らずで失われてしまう。もし、補給がなければ、銀河磁場はとうの昔に消えてしまっているはずである。このことは、銀河磁場が絶えず生成され入れ替わっていることを示している。

磁場が絶えず失われてはまた作り出されていけば、先に述べた巻き込みの困難も解消する。きつく巻き込まれる前に、元々の磁場構造が乱流拡散によって失われるからである。

乱流拡散は巻き込みの困難を解消するが、銀河の磁場を短時間に弱めてしまうので、磁場を生成する機構が必要になる。それが銀河ダイナモである。そこで、次に磁場を強める機構を考えてみよう。

### ω 効果：銀河の差動回転による磁場の生成

ガスの運動は磁力線の束を圧縮したり、ひねったりすることにより磁場の強さを変えることが出来る。

銀河の差動回転のシアは半径方向を向いた磁場（半径成分と呼ぶことにする）を接線方向にひねろうとする。その結果、接線方向の磁場成分（接線成分と呼ぶことにする）が作られ、強められる。シアはいつも運動方向の磁場を強め、運動に垂直方向成分の強さは変えない。

従って、銀河ガス円盤に半径方向の成分があれば、シアによって接線成分が急速に増大する。このような効果を ω 効果と呼んでいる。

銀河ガス円盤の差動回転のシアは非常に強いので、銀河に磁場があれば、必然的に回転方向に引き延ばされ、銀河面に平行な接線成分が支配的になる。観測される銀

河の平均磁場が銀河面に平行で接線方向を向いているのはこのためである。

このようにして、半径成分があれば、磁場の接線成分が生成される。では半径成分はどのように作られるのだろうか。それが、次に述べる  $\alpha$  効果である。

**$\alpha$  効果：乱流による磁場の生成**

銀河のガス円盤は乱流状態にあるが、乱流と磁場の関係は大変複雑で銀河ダイナモの最も難しい部分である。

銀河の乱流を、対流が発生する時の様子から類推し次のように考えてみよう。ガスの塊り（これから乱流要素と呼ぶ）が浮力を得て浮上し始めたとする（例えば、ガスが加熱されて軽くなった場合を考えてみる）。浮上に伴って銀河面から離れると、周囲のガス圧が急速に減少するので、乱流要素は急激に膨張する（ガス円盤の圧力は地球大気の圧力のように高くなると急激に減少する）。回転している系でガスが膨張するとコリオリ力によって回転運動を起こす。このようなコリオリ力による回転は、台風や低気圧に伴う大気のコリオリ力と同様である。気圧の差によって半径方向の運動が生じると、コリオリ力によって回転運動が変わるのである。銀河ダイナモ理論の先駆者 E・パーカーはこのような回転する乱流要素をサイクロニック事象と呼んだ。星間ガスの乱流は同じ方向に回転する沢山のサイクロニック事象の集まりと考えることが出来る。

このように乱流要素が上昇回転すると、磁力線もガスに引きずられて浮き上がり（図 3a）、さらにひねられ図 3b の様な磁力線のループを作る。

図のように、回転する乱流要素によって、半径方向の成分を持つ磁場のループが銀河面全体に沢山出来る（図にはその 1 部しか描かれていない）。このようなループの集団を平均すると、図 3c のように銀河面とガス円盤表面近くに半径方向の平均磁場が生成されたことになる。

表面近傍の磁場は拡散によって急速にガス円盤の外に放出され失われる。

このような、乱流によって、元々あった磁場に垂直な成分を作り出す効果を  $\alpha$  効果と呼ぶ。

**銀河ダイナモ： $\alpha\omega$  ダイナモ**

銀河ダイナモの基礎過程が揃ったので、次に銀河のダイナモがどのように働くか調べてみよう。

始めに、接線方向の磁場があったとしよう。接線成分があると、 $\alpha$  効果によって半径成分が作られる。半径成分が作られると、今度は  $\omega$  効果によって、接線成分が作られる。その結果、もともとあった磁場（接線成分）が再生産され、強められることになる。このように、 $\alpha$  効果

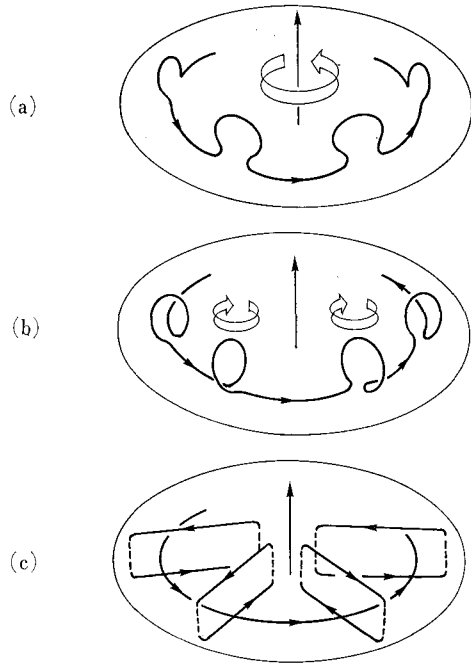


図 3  $\alpha$  効果

回転する乱流要素により、接線成分から半径成分がつくられる。

- a) 浮上する乱流要素により磁力線のループが出来る。
- b) コリオリ力による乱流要素の回転により、ループが回転する。このようなひねられたループがガス円盤内に沢山出来る。
- c) 沢山のループを平均すると、大きなスケールの半径方向の磁場が作られる。

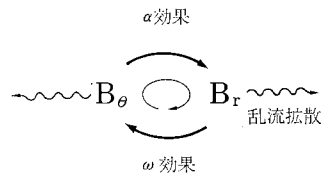


図 4  $\alpha\omega$  ダイナモ

半径成分 ( $B_r$ ) から  $\omega$  効果により接線成分 ( $B_\theta$ ) が作られ、接線成分から  $\alpha$  効果により半径成分が作られる。このサイクルを繰り返すことにより、磁場を増幅する。

と  $\omega$  効果のサイクルを順に繰り返すことにより磁場が強められる。このような機構は  $\alpha\omega$  ダイナモと呼ばれ、回転する円盤の磁場を作り出す最も基本的な機構である。

ここで、まだ忘れていた効果がある。それは、乱流拡散である。乱流拡散は、このようなダイナモサイクルのあらゆる段階で働き、磁場を減少させようとする。従って、銀河ダイナモによる磁場の増幅は、 $\alpha$  効果及び  $\omega$  効果と乱流拡散との競争で決まる。磁場が増幅されるためには、乱流要素の回転の強さと差動回転のシアの強さがある限界より大きくなければならない。

銀河磁場を乱しているのは乱流であるが、その乱流が  $\alpha$  効果を通して、スケールの大きな規則的磁場を作りだしている。

### 銀河ダイナモによって作られる磁場の構造

銀河ダイナモにとって最大の障害は、乱流拡散による磁場の消失と、反対向きの磁場同志が打ち消し合う効果である。方向が頻繁に逆転するような磁場構造は、打ち消し合う効果が大きいために実現しにくい。磁場の向きがあまり変化しないということは、磁場が単純な構造をしているということである。

銀河面に垂直な構造を考えてみよう。最も基本的な(単純な)磁場構造を考えると、銀河面の上下で磁場の方向が同じ(銀河面に対して対称的な)構造と反対(反対称)の構造が考えられる。

反平行構造の場合には、反対向きの磁場が打ち消し合う。一方、平行構造の場合には、磁場の向きが、同じなので、打ち消し合う効果はない。従って、平行構造の方が反平行構造より実現し易い。

ダイナモの能率が高くなると、反平行構造も成長するようになるが、平行構造の方はもっと速く成長できる。速く成長するモードが磁場構造を支配するので、銀河の磁場は銀河面の上下で同じ方向を向いていると予想される。

銀河面に平行な構造についても、同じことがいえる。一般的に、磁場の方向が出来るだけ緩やかに変化するような単純な構造が実現しやすい。

### 渦状密度と磁場

渦状腕の密度波理論によると、銀河の渦状構造は銀河円盤の波動現象で、渦状腕ではガスが圧縮されて密度が高く、腕と腕の間(インターアームと呼ぶ)ではガスが膨張して密度が低い。銀河のガスや磁場は銀河回転しながら腕やインターアームを順に通ってゆく。

ガスが圧縮されると、それに伴い磁場も圧縮されるので、シンクロトロン放射の電波も強くなる。

密度波によるガスの圧縮・膨張は主に半径方向に起こるので、磁場の接線成分が渦状腕で強められ、インターアームで弱められる。半径成分はあまり変化しない。

系外銀河の高分解能電波観測によると、渦状腕に沿って電波が強い。これは、渦状腕に沿って磁場が強いと解釈される。渦状腕で磁場が強くなることは、渦状密度波によって自然に理解することが出来る。

しかし、密度波の振動は周期的なので、ガスの圧縮によって渦状腕で強められた磁場は渦状腕を通り抜けると、ガスの膨張によって弱められ元に戻る。従って、これまで、このような密度波の効果は単に磁場を周期的に

変化させるだけで、磁場の平均値を強めたりしないと考えられてきた。しかし、果たしてそうであろうか。

### 渦状密度波はダイナモ作用を促進するか？

渦状密度波はガスや磁場を周期的に圧縮・膨張させるので、それが、 $\alpha$  効果や  $\omega$  効果にどのような影響を与えるか考えてみよう。

渦状腕では星の生成が盛んなので、星のエネルギーによって周辺の星間ガスが加速され乱流が強いと考えられる。一方、インターアームでは星の生成が少ないので乱流が弱いと考えられる。従って、 $\alpha$  効果は、渦状腕で強く、インターアームでは弱いことが期待される。

シアーの方は密度波によってどう変わるだろうか。一般に、円運動している 2 つの天体を半径方向に近づけると、速度差が小さくなる。つまり、シアーが減少する。直感に反するようにも見えるが、これは、回転している系に特有の性質(角運動量保存則)による。つまり、2 つの物体の距離が減少する効果より、角運動量保存則によって速度差が大きくなる効果の方が大きいのである。反対に、2 つの物体を半径方向に引きはなそうとすると、速度差が大きくなるので、シアーが増大する。

ところで、密度波理論によると、ガスは渦状腕では主として半径方向に圧縮され、一方、インターアームでは、半径方向に膨張する。従って、上に述べた性質によって、渦状腕ではシアーが減少し、インターアームでは増大する。すなわち、インターアームでは  $\omega$  効果が増大し、渦状腕では減少することになる。

このような密度波による  $\alpha$  及び  $\omega$  効果の変動は銀河ダイナモにどのような影響を与えるだろうか。

磁場は銀河回転するガスによって運ばれるので、銀河回転に乗って磁場の変化を追ってみよう。

渦状腕に入ると  $\alpha$  効果が増大するので、半径成分の生成が盛んになる。ところで、渦状腕では接線成分がガスの圧縮によって強められているので、相乗効果によって半径成分の生成が著しく増大する。

渦状腕を出てインターアームになるとガスと磁場は膨張する。磁場やガスの膨張は半径方向に起こるので、膨張して減少するのは接線成分で、半径成分は本質的に変化しない。従って、渦状腕で強められた半径成分は膨張による減少を免れてインターアームに行く。インターアームでは、 $\omega$  効果が増大するので、渦状腕で強められた半径成分から、接線成分が能率良く生成される。

密度波は渦状腕で  $\omega$  効果を、また、インターアームで  $\alpha$  効果を減少させるが、上に述べた効果はそれを上回るので、結果として、ダイナモ作用の効率を上げることが出来る。

このようにして、渦状腕があることによってダイナモ

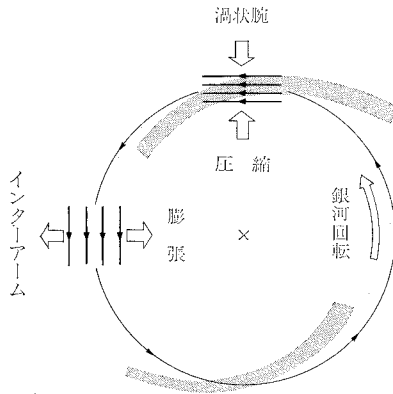


図5 渦状腕と銀河ダイナモ

密度波によるガスの圧縮・膨張は主に半径方向に起こるので、渦状腕ではガスの圧縮により接線成分が強められ、インターアームではガスの膨張により接線成分が弱められる。渦状腕では星生成による乱流の加速によって  $\alpha$  効果が増大し、インターアームではシアの増大により  $\omega$  効果が増大する、これらの効果により、渦状腕では  $\alpha$  効果による半径成分の生成が促進され、インターアームでは、 $\omega$  効果による接線成分の生成が促進される。

の効率が高くなり、一般に、渦状密度波の強い銀河ほど磁場が強いことが期待される。

### BSS 磁場の困難

渦状銀河には BSS 構造を持つものが観測されていたが、BSS 磁場の存在によって銀河のダイナモ理論は大変難しい問題に直面する。

ダイナモ理論では、磁場の方向が反転するような構造は、互いに打ち消し合うので、反転の無い構造に比べて、実現しにくい。ところで、BSS 構造では磁場の向きが必ず反転する(図 2b の磁気中性線)。もし、BSS 磁場構造が実現すれば、当然軸対称構造はもっと容易に実現し、その結果軸対称磁場が支配的になるはずである。

そこで、磁場のダイナモを詳しく計算していろいろ調べたところ、次のようなことが明らかになった。まず、銀河のダイナモ作用が活発な場合には BSS 磁場が生成されるが、BSS 構造に比べて、いつでも軸対称磁場構造の方が能率良く生成される。また、BSS 磁場が生成出来たととしても、それらは銀河面内の非常に狭い領域でしか実現しない。

このようにして、これまでの標準的なダイナモ理論では観測されるような磁場を説明することは極めて困難で

あることがはっきりしてきた。

### BSS 構造の生成: 密度波による磁場のパラメータ励振

そこで、この問題を解決するために、東北大学の千葉 稔司氏と、渦状腕が銀河ダイナモに及ぼす効果を詳しく調べることにした。

ダイナモ作用が活発になると様々な性質の磁場が増幅されるようになり、振動する磁場も生成されるようになる。銀河ダイナモが振動する磁場を生成することが出来る場合には、磁場の振動と密度波によるダイナモ効果の振動との結合という大変興味ある問題が出てくる。

磁場と振動とダイナモ効果の振動の関係は、ブランコの振動とブランコを漕ぐ人の上下の振動の関係に良く似ている。ブランコを漕ぐ場合、ブランコの振動に上手に合わせて腰を上下すると、ブランコのゆれが大きくなる。しかし、ブランコの振動と上手に合わせないと、うまく振れなかったり、揺れが小さくなったりする。つまり、ブランコと腰の上下運動の振動数と位相の関係がある条件を満たすと、ブランコの揺れを大きくすることが出来る。このような現象をパラメータ励振と呼ぶ。

銀河磁場の場合、振動する磁場がブランコに相当し、密度波の振動が腰を上下する動作に対応する。

非軸対称渦状磁場の場合について調べたところ、磁場の振動数、密度波の振動数、磁場の渦巻きの本数、そして密度波による渦状腕の本数の間にある関係が成り立つときに、パラメータ励振が起こることがわかった。この関係を 2 本腕の渦状銀河に適応すると、パラメータ励振を起こす銀河の構造は BSS 銀河構造になる。つまり、2 本腕の渦状密度波の場合、BSS 磁場がパラメータ励振によって選択的に増幅されることになる。もし、パラメータ励振によって増幅された磁場構造が銀河磁場を支配するようになれば、BSS 磁場として観測されることになる。

我々は、このような増幅機構を銀河磁場のスウィング エクサイテーションと呼ぶことを提案している。

### おわりに

我が国における銀河磁場の研究としては、東北大学における藤本光昭、大木俊夫、一柳寿一等による先駆的な研究があるが(約 30 年前!)、最近の銀河磁場研究の発展においても、理論および観測の両面でも、我が国の研究者が大きな貢献をしていることを付記しておきたい。