

渦状銀河の磁場

千葉 柁 司

〈東北大学理学部 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

我々の住む銀河系や一般の渦状銀河には、円盤全体を貫く大きなスケールの磁力線が存在することが、近年の連続電波の観測によって確認されている。このような銀河磁場の起源は一体何なのだろうか。どういった機構によって保たれ現在に到ったのだろうか。この長年の問いかけに対して、幾つかの最近のアイデアを紹介しながら真の答えに迫ってみる。

1. はじめに

筆者が小学生だった頃、遠足といえば自慢の水筒をぶら下げて行くことが楽しみの一つであった。その頃は、水筒の蓋に方位磁石が付いているようなものを持っている人があまりいなかったからである。目的地まで行く間、列を乱さないように注意しながら、あ、今は西の方に向かっていな、とか、こっちが北海道か（ちなみに筆者は津軽生まれ）などと不思議に感心したものである。地球自身が一つの磁石なんだと、ズックのかかたを気にしながら一所懸命歩いたおかげでようやく実感できた。後に、地球の磁石は地球内部の発電機で起こされた電磁石なんだと教わって、とても驚いたものである。この稿では、いちいち方位磁石をあてて実感するわけにはいかない銀河スケールでの磁場について紹介し、特に銀河自身も巨大な電磁石であるのかどうか、最近の動向を踏まえて述べてみよう。

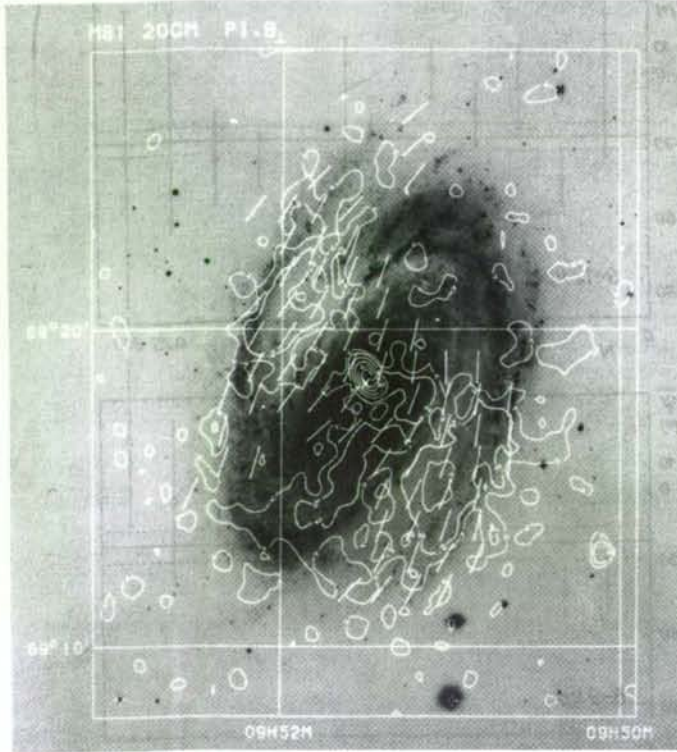
2. 銀河磁場の観測

一般に、磁場あるいは磁力線というものは実体があるようでないようなものだから、その放射を

直接観測してああこれが磁場だと確認できるわけではない。なにかしら磁場が関与している現象を観測して間接的に認識する他ない。幸い銀河には、高エネルギー荷電粒子すなわち宇宙線が、銀河磁場に捕捉されて反磁性的に回転しており、その時に発するシンクロトロン放射としての電波を観測してやれば、磁場の強度や向きといった情報を得ることができる。

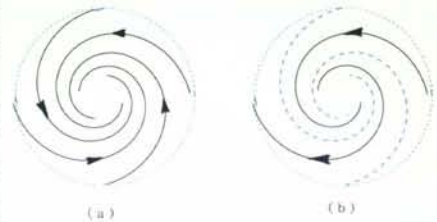
太陽系近傍の観測から、磁場は銀河ガス円盤の厚さ約 500 pc (1 pc = 3.26 光年) の範囲に集中し、さらに広がったハロー領域にも存在していることがわかっている。磁場は細かく見ると、スケールが数 100 pc 以内で非常に乱れた構造をしており、数マイクロガウスの強度である。これ以上のスケールで見渡すと平均的な規則正しい磁場（平均磁場）が見えてきて、その方向は円盤に沿っておりかつ赤道面に対して対称である。平均磁場の強度は、乱れた磁場より少し弱い程度である。局所的には、星間ガスの乱流圧と乱れた磁場の圧力、さらに宇宙線の圧力とが大体等しい関係にある。すなわち、銀河磁場に捉えられた宇宙線は、磁場の源としての電流を通して星間ガスに間接的に圧力を加え、互いにつり合った状態になっているのである。

では、系外銀河の磁場はどのようなになっている



◀ 図1 M81における磁場分布と連続電波の偏波成分のマップ。Krauseらの観測より。

▼ 図2 正面から見た銀河磁場の2つのタイプ。破線は磁気中性線を表す。
(a) ASS 磁場 (b) BSS 磁場



のだろう。図1は、ボンにある100 m電波望遠鏡で観測されたM81の磁場構造を表したものである。個々の棒は、磁場の方向と強度を示している。渦巻き腕に良く沿って分布していることがわかるであろう。実際に磁場の向きも決めてやると、図2bに示したように銀河回転方向に一度反転する磁場構造が浮かびあがってくる。このような渦巻状の磁場(BSS磁場と呼ばれる)を持つもの他に、図2aのような構造(IC342)やリング状構造(M31)、つまり軸対称的な磁場(ASS磁場と呼ばれる)を持つ銀河の2つのタイプが知られている。尚、最近の高分解能電波観測によれば、どちらも区別が付け難い複雑な磁場構造が現れて、観測者がその解析に苦勞している。これは空間スケールの小さな磁場が見えているのであり、一般に物事を細かく見るほど全体像が見えなくなるものである。

3. 銀河磁場の起源

銀河のガスは、周囲の星からの紫外光によって部分電離しており、電気伝導体である。観測されるような数マイクロガウスの磁場を、少なくとも銀河年齢 t_0 (約150億年)の間保つためにはどのぐらいの強さの電圧をかけてやればよいであろうか。ファラデーの誘導則を使うと、電圧はおおよそ BhR/ct_0 と表される。ここで、 B は磁束密度、 h と R はそれぞれ電離ガス円盤の厚みと半径で、 c は光速である。典型的な値($h \sim 400$ pc, $R \sim 15$ kpc)を採用すると、なんと 10^{12} ボルトもの電圧が必要となりギネスもんである。一体全体それ程の起電力を生む機構が、銀河円盤に存在するのだろうか？

一番簡単な答えは、そんなムリムリそうな機構なんか考えないで磁場は最初から存在していたとすればよい。これは原始磁場仮説と呼ばれており、

名のとおり (!?) 何十年も前から言われてきた説である。つまり、銀河が生まれるときに周囲にあった磁力線（宇宙磁場）を引き込んで現在に到っているとするものである。図2を思い出していただきたい。いかにもそれっぽく思えてしまう。なぜなら、一般に銀河円盤は内側ほど速く回転（差動回転）するから、磁力線は渦巻状にカールがかかるからである。

しかし事はそんなに簡単ではなかった。銀河は現在までにもう何十回と回転しているから（一回転は約2億年）、磁力線は何十重にも巻き込まれていて、銀河回転のエネルギー程度に強いはずである。これは観測と矛盾する。カールをかけすぎなのである。もっと現実的に検討してみると、星間ガスの運動は数100パーセク以内のスケールでは乱流状態になっており、このような環境の下では弱い化石磁場はいわゆる乱流拡散を受けて、約1億年のタイムスケールで円盤の外にすり抜けてしまう。磁束が足りなくなってしまうのである。さらに問題となるのは、円盤を構成する個々の恒星は、一生の間に（太陽で50億年）コンマ数マイクロガウス程の磁場を数10pc³の星間空間に掃き出したり、特に重い星は超新星爆発によってマイクロガウス以上の磁場を10³pc³の空間に作り出す。この結果、銀河の磁場は乱れに乱れて、たとえ銀河回転によって揃えようとしても観測されるような奇麗なパターンは作れない。結局、どの説明もすっきりいかないのである。

4. ダイナモ理論

先に、星間ガスは電気伝導体であると述べた。磁場が与えられた系の中でどのように振舞うか考える目安として、磁場が散逸ですり抜けるタイムスケールを電導流体の運動のタイムスケールで割ることによって磁気レイノルズ数 R_m が定義される。天体では R_m が非常に大きい、と言うのは、天体の空間スケールは地上の実験室系と比較にならないほど大きいので、磁場が天体からすり抜けて

しまう前に天体内部の運動でその形を変えてしまう。言い変えると、ガスの運動エネルギーは容易に磁気エネルギーに転化されるのである。この性質をうまく使ってやれば、銀河全体に渡るガスの運動から莫大な起電力を発生させて、電波観測で見られるような規則正しい磁場構造が作られるかもしれない。但し、ガスの運動がある特殊な構造をしていないと、磁場の变化のスケールが縮まってかえって散逸が促進されることになる。星間乱流による平均磁場の乱流拡散がこれに対応する。

基本的には次のような作用を考える。最初に、種となる磁力線があったとする。この磁束は星間ガスの乱流運動によって円盤から急速に抜けていくから、電流を流して磁束を新たに付け足してやれば良い。これを発電（ダイナモ）作用と呼ぶ。銀河では星間ガスのグローバルな銀河回転運動とミクロな乱流運動の2つを動員してダイナモ作用を考える。円盤は差動回転しているから、半径方向の磁場成分 B_r は回転方向にひねられて新たな磁場成分 B_θ を作る。これを ω 効果と呼ぶ。もう一方の効果は少し複雑である。ガスの乱流を対流に置き換えて考えてみると、個々のガスの塊は熱せられて膨張しながら持ち上げられたり冷えて沈み込んだりし、さらにコリオリ力の影響で回転運動を伴っている。丁度地上で発生する台風や高気圧みたいなものである。そうすると、ガス塊に捉えられている磁力線は回転によってひねられ小さなル

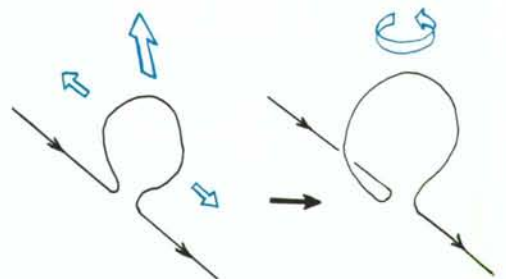


図3 α 効果。膨張しながら上昇するガス塊はコリオリ力で回転する。そのため、磁力線は小さなループ状となり、最初にあった磁力線と垂直な方向に新しい磁場成分が作られる。

ープを作る。円盤内にはこのような磁力線のループがたくさんでき、全体で平均すると元あった磁力線に垂直な方向に新たな磁場成分を作る(図3)。このような乱流による発電機構を α 効果と呼ぶ。そうすると、先ほど ω 効果で作られた磁場成分 B_θ から α 効果によって元々の B_r 成分を作ることができる。すなわち最初にあった磁力線に対し、この2つの効果を組み合わせることによって新たな磁力線を付け加える、つまり磁束を増やすことが可能になる。この一連の発電サイクルを $\alpha\omega$ ダイナモと呼んでいる。

地球の場合は、内部の外核と呼ばれる所にある電導流体が発電を起こし、自転軸にほぼ一致するような軸を持つ双極子型磁場を作る。だから地上のどこにいても方位磁石は南北方向を向くのである。では、仮に銀河もこのような一種の電磁石になっているとしたら、どのような磁場構造が励起されるのであろうか。図4は銀河面に分布する磁力線ベクトルを正面から見た様子である。銀河の強い差動回転の効果が反映して、磁力線ベクトルは主に接線方向を向いている。大局的には四重極子型の構造をしており、地球の場合と違う。これは、発電を起こす領域の形(地球は丸く銀河は円盤)の違いが効いているからである。図4aはASS磁場に対応しており広く分布するが、BSS磁場の方(図4b)は狭い空間領域にしか現れずしかもなかなか励起されないことがわかった。言い変えると、最初にあった磁場の非軸対称成分はすぐに減衰するか成長してもわずかであり、それよりも軸対称の成分が大きく卓越してしまうのである。これではBSS磁場が説明できない。この事実は多くの研究者の悩みの種になり、銀河ダイナモではムリだとも言われていた。

5. 渦状腕の役割

天体写真集を眺めると、渦状銀河は名のごとく美しい渦巻パターンをしていることがわかる。その多くは人間の腕のように2本構造になってお

り、我々は腕またはアームと呼んでいる。このアームを作ることもなかなか容易にはいかないのだが、現在のところ星と星間ガスが一体となって円盤上を伝播する粗密波であると思われる。これを渦状密度波と呼ぶ。星間ガスは腕を横切るときに圧縮を受け腕の外では膨張する。差動回転によるシアの強さも腕で少し弱まり腕の外で強くなる。このように、星間ガスの運動は渦状腕によって大きく影響されているのである。

では銀河ダイナモによる磁場の生成に対して渦状腕はどのような影響を与えるであろうか。磁力線も星間ガスと同様に、渦状腕の所で圧縮を受け腕の外では膨張しながら接線方向に引き伸ばされる。つまり、周期的に磁場の強さが変化する。し

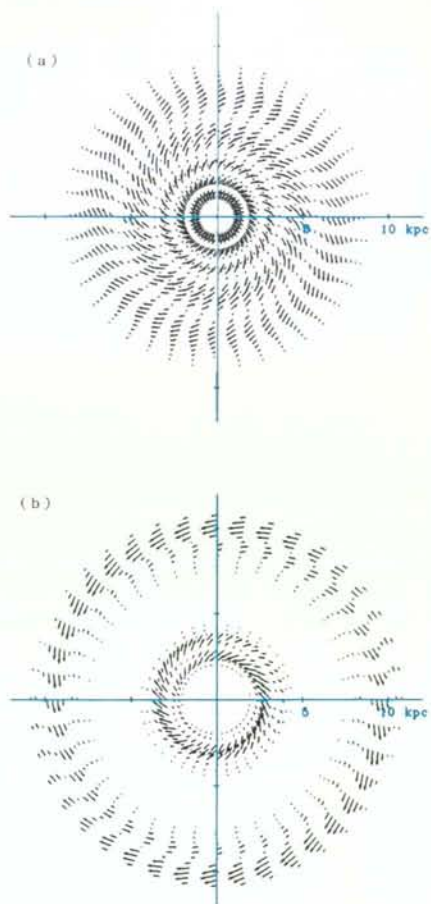


図4 モデル計算から得られた磁場構造。(a) ASS磁場 (b) BSS磁場

かし銀河回転で一周し元の位置に戻ると、磁場の強さは元に戻ってしまう。これでは何も変化が期待できない。何かしら変化が起きるためには、星間ガスが銀河一周し終わって元の位置に戻ったとき、磁場のパターンは元の位置に戻らないか行きすぎていけばよい。つまり磁場パターンが円盤上を移動する速度が銀河回転速度と違っていけばよい。このようになるためには磁場自身が独自に波運動をしていなければならない。普通はそのようなことは起こり得ないが、銀河ダイナモが働いていけば可能性が充分ある。波とは場所場所の時間変動が空間を伝わることである。地球の磁石は過去360万年の間に9回ほど向きを変えた。太陽磁場も11年周期で変化している。また、このような時間変動と共に空間変動も観測されている。これらはまさにダイナモ作用によって駆動された磁場の波であり、ダイナモ波と呼ばれている。そうすると、もし銀河円盤上でダイナモ波が励起されていけば、渦状腕による磁場の変動とダイナモによる磁場の振動とが結合して、磁場生成の効率を高めることができる。この現象は、ブランコこぎに例えてみれば良く理解できる。ブランコの振れ(ダイナモによる磁場の振動)を大きくするには、うまいこと腰を上下(渦状腕による振動)させればよい。但し、ブランコが全く振れていない(ダイナモ波が立っていない)時はいくら腰を揺らしてもブランコは振れてくれず何も変化がない(磁場の強度は変わらない)。

このように渦状腕によって磁場生成の効率が高まる機構が考えられるが、では励起される磁場構造にはどのような変化が予想されるであろうか。渦状腕は非軸対称性があるから、誘起されるガス運動の変動も非軸対称となり、軸対称磁場(ASS磁場)の成長過程になんら寄与しない。一方、非軸対称の磁場に対しては、磁場の磁気中性線の本数が渦状腕の本数と一致するような磁場構造の成長が効率良く行なわれることになる。特に、2本腕を持つ銀河では、BSS磁場が選択的に増幅され

る。但し、渦状腕の効果は腕の強さ(発達度)がある一定値以上ないと効いてこない。電波観測の結果によれば、BSS磁場が確認できるのはM81やM51といった2本腕が顕著な銀河ばかりであり、ここで説明したような機構が働いているのかもしれない。

この機構によって励起される、円盤全体の具体的な磁場構造はまだ調べられていない。3次元の計算を目一杯やらなければだめでとても大変な計算だからである。但し、ある制限を付けて円盤の一部分だけ取り出して計算することはできる。図5は、一個の渦状腕の周りのガス密度と磁力線の分布を腕に垂直な断面で描いたものである。この計算では、成長する磁場のパターンが渦状密度波を変える力(ローレンツ力)も考慮しており、ちようど系が平衡状態に達したときを図示してある。ここではガスと磁場のパターン両方が同じ速度で円盤上を伝播しており、密度波とダイナモ波が相互作用しながら伝わっていることに対応している。実際に渦状腕の周りでこのような磁力線構造をしているかどうかは、将来の観測を待たなければわからない状況である。

6. おわりに

以上、渦状銀河自身が一個の電磁石である可能性について述べた。しかし今のところ、本当に銀河ダイナモが実在するのか全くと言っていい程証拠がない。銀河回転による ω 効果は確かであろうが、 α 効果については理論的な予想だけである。観測からその証拠が見つければよいのだが、 α 係数は 1 kms^{-1} のオーダーと評価され、観測から求めるのは絶望的である。地球や太陽のように特徴的な磁場の時間変化がわかれば一定の手がかりがつかめるのであるが、銀河ではあまりにもその空間スケールが大きいために、時間変化のスケールは1億年のオーダーとなってしまう。そこで、できるだけ自然な考え方で現在の磁場構造を合わせるしか手がない状況なのである。

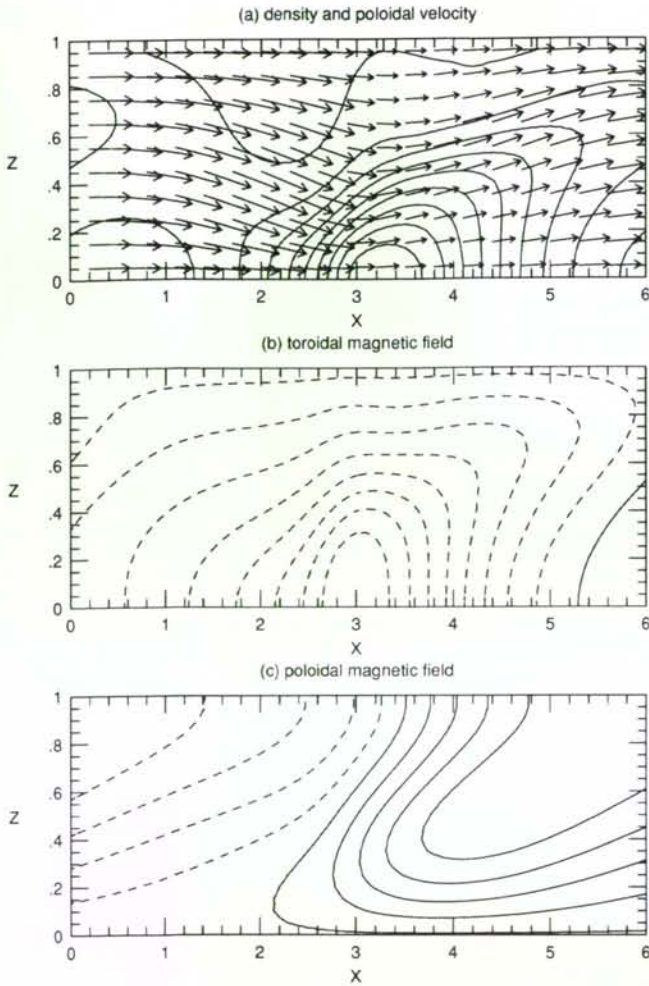


図5 渦状腕とダイナモとの相互作用から達成される平衡状態。x軸は腕に垂直で円盤に沿った方向、z軸はハローの方向にとっている。
 (a) ガス密度 (等高線) と流れ (矢印) の分布。
 (b) 腕に平行な磁場 B_ϕ の等高線 (実線は+, 破線は-の符号)。
 (c) 腕に垂直な磁力線 (実線は右回り, 破線は左回りの方向に走る)。

原始磁場仮説も未だ健在である。赤方変位が2のあたりにある銀河間雲でマイクロガウス程度の磁場を持つものが報告されており、このような銀河初期ではダイナモによる磁場の生成が間に合わないから、やっぱり宇宙磁場であろうという見方もある。昨年行なわれた国際的なワークショップ

でも、銀河ダイナモはいいのか、原始磁場で大丈夫なのかといった議論が夜遅くまで続けられたが、結局結論は出なかった。「誰が結局 winner 何だ？」とぼやいたある研究者の言葉が象徴的であった。銀河磁場の問題はやはり「古くて新しい問題」として依然残されているのである。