

銀河の磁場

祖父江 義明*

序

渦状銀河の二本腕（スパイラル・アーム）は、宇宙から巻きこんだ磁力線でつくられる。この考えは 1950 年代に華々しく議論されたが、その後“巻きこみの困難”のために放棄され、かわって密度波理論が栄えた。しかし最近の精密な電波観測で、それほどきつくは巻きこんでいない渦状の磁場構造が、いくつもの銀河で次々と発見されている。“巻きこまない渦巻き磁場”をめぐる、観測、理論の両面から、渦状銀河の構造と進化についての研究に、いま新しい風がふきこんでいる。

銀河中心やキューサーのジェットは、中心核円盤をつらぬく垂直磁場で加速される。この考えは宇宙ジェットの発生に興味をもつ多くの研究者にうけ入れられようとしている。そして、いくつかの銀河の中心部で垂直磁場の存在が知られるようになった。ではなぜ中心核近くの磁場は垂直でなくてはならないのだろうか。その磁場は銀河全体の磁場構造とどうかかわっているのだろうか。

銀河の磁場に関する話題について、最新の研究から紹介しよう。

磁場の測り方

銀河磁場や星間磁場の測り方には二通りの方法がある。星の光の偏光を使う方法と、電波の直線偏光を使う方法である。

(a) 光学的な方法：星間塵（ダスト）はガスや互の摩擦で帯電している。帯電した粒子が回転していると回転軸方向の磁気モーメントをもつ。このモーメントのためにダストの回転軸は磁力線の方向にそろえられる。粒子は回転方向（磁場に垂直方向）に大きな自由度をもつので、星の光のうち回転方向に平行な偏光成分を選択的に散乱する。したがって磁力線とダストを通過してくる光は磁力線に垂直方向の偏光成分をこの散乱によって失っている。つまり光は磁場の方向に偏光して私達に到達する。この現象をデイビス・グリーンスタイン効果という。この効果を測ることによって、星と太陽系の間にある磁場の視線に直角方向の向きを知ることができる。星の光が届く範囲は太陽から 2～3 キロパーセク（1 パーセク = 3.26 光年）程度であるから、私達はこの方法によって太陽の近傍の銀河磁場についての情報を得ることができる。しかし磁力線の立体的な構造、つまり磁場のベクトルの三次元的要素を決めることはできない。ま

た、この効果の定量的な取扱いは難しいので、磁力線の強さを出すこともできない。

(b) 電波による方法：太陽から遠くはなれた星間空間や銀河全体の磁場構造、あるいは系外銀河の磁力線構造についての情報は、主としてシンクロトロン放射による電波の直線偏光の観測によって得ることができる。

銀河系には、超新星の残骸やパルサー、星間衝撃波などによって加速された高エネルギーの荷電粒子、すなわち宇宙線が満ちている。宇宙線電子は星間磁力線とのローレンツ力ではせん運動をするので、その加速度に応じたシンクロトロン（磁気制動）放射による電波を放出する。電波の強度は磁場の強さの二乗と宇宙線の密度に比例する。宇宙線と磁場は互に圧力（エネルギー）バランスを保っているため、宇宙線密度と磁場強度には一定の比例関係がある。従って私達はシンクロトロン放射による電波（非熱的電波という）の強度を測定することで磁力線の強さを知ることができる。

磁力線ベクトルのうち視線に直角な成分の位置角は電波の偏波角度から知る。シンクロトロン電波は磁場に垂直に偏光して放出されるからである。しかし電波の偏波面は伝播方向に平行な磁力線成分と熱電子によってファラデー回転をうけて回転してしまうので、これを補正してやらねばならない。ファラデー回転というのは、方向性（いまの場合磁力線）をもった媒質中を通過するとき、右まわりと左まわりの円偏光電波の屈折率（伝播速度）が異なるために二つの円偏光のたしあわせである直線偏光面が回転する現象である。ファラデー回転量は、視線に平行な成分の磁場強度と、熱電子密度、伝播距離、そして波長の二乗に比例する。したがって波長をいろいろ変えて偏波角を測ると、この回転量を知ることができる。ファラデー回転量が与えられれば、視線に平行な磁場の強さ（向きを含めて）が求まる。ここで熱電子密度は別の観測から知られている値を想定する。回転量が求まればこれを補正することによって電波を放出する場所の偏波面の向き（固有偏波面）がわかり、従って磁力線の天球に投影した成分の方向をわり出すことができる。

このように、電波の直線偏波とファラデー回転の測定によって、磁力線ベクトルの三方向の成分を知ることができる。

天の川銀河系の磁場

電波でみる天の川銀河系は厚さ 500 パーセク程の円盤形をしている。銀河面近くの電離水素ガスによる熱的な

* 東大理 Yoshiaki Sofue: Magnetic Fields in Spiral Galaxies

電波輻射成分を除くと、この円盤は大部分がシンクロトロン輻射をする非熱的な、ひろがった電波源である。つまり宇宙線と磁場は厚さ ~ 500 パーセク、直径 ~ 20 キロパーセクの円盤を満たしている。磁場の強さは太陽の近傍で 4×10^{-8} ガウスである。渦状腕に沿って整然と走る、そろった磁場と、星間ガスの乱流や宇宙線の圧力による泡などで、くねくねと曲がったランダムな磁場の二つの成分が重ねあわさっている。両成分ともだいたい同じ強さをもつ。

太陽からごく近く ($100 \sim 1000$ パーセク) の磁力線の様子は、星の光の偏光や、銀河電波の直線偏波から知ることができる。マシューソンとフォードは約千個の星の偏光の分布を調べ、磁力線はおおよそ銀河面に平行に走っていることを示した。また、そろった磁場に加えて、銀河円盤のいたるところから、磁力線がアーチ(ループ)状にふき上がっている様子も知ることができた。星の偏光から知られた磁力線の構造は、ファラデー回転をうけない近い距離からの銀河電波の偏波から求めた磁場の方向と一致している。また磁力線のアーチやループは、中性水素ガスや暗黒物質のアーチにそって走っていて、銀河円盤が磁力線を介して活発な沸騰現象をおこしていることを物語っている。

銀河系全体をつらぬく磁場の構造は、キューサーなど系外電波線の偏波の天球上での分布から推定する。天の川からの電波は、ごく近くからのものは除いて、大きなファラデー回転によって偏波を失ったり、いろいろな構造(天体)を視線に沿って重ねて見てしまうために複雑に偏光していて、大局磁場の構造をわり出すのにつかうのは難しい。さて、キューサーなど偏光した電波線のファラデー回転量は、銀経とともに大きく変化する。回転量は白鳥座の方向(銀経 80 度)で平均するとマイナスとなり、磁力線はこの方角では、私達から遠ざかるセンスに走っている。一方その反対側(銀経 260 度)ではファラデー回転量はプラスとなり、磁力線は私達に向ってくる。この事実から私達は、磁力線が、太陽の位置する渦状腕を、銀経 260 度から 80 度の方向に向ってつらぬいていることを知ることができる。さらに、太陽軌道の内側の渦状腕(いて座アーム)の二つの接線方向、銀経 50 度と 310 度では、回転量はこの逆、つまりプラスとマイナスになる傾向を示す。このことは、いて座アームでは磁力線が白鳥座アームと反対方向に走っていること、つまり磁力線の向きがアームからアームで反転していることを示唆している。図 1 (表紙) にこれらの事実から推定される銀河磁力線の大局的な構造を示そう。しかし残念ながら、私達は銀河面にどっぷりつかっているために、磁力線についてのこのような描像も、電波源の方向の視線成分を矛盾なく再現できる磁場の分布の、一

つの可能性にすぎず、所詮は推測の域を出ない。

もっと確実な銀河磁場の形状は、系外銀河の観測によって求められる。

渦巻き銀河の磁場

銀河を外から眺めて、ファラデー回転量と固有の偏波面の分布を知ることができれば、ほぼ確実に銀河磁場の構造を描き出すことができる。しかしそのためには、微弱な系外銀河の電波のきわめて精密な直線偏波の測定を、多周波で、しかも十分な角分解能で行わなければならない。幸い近年の電波観測技術の進展はめざましい。特に西独のボンにある 100 m 電波遠望鏡による偏波観測データの精力的な積み重ね(マックスプランク研究所ヴィーレビンスキー、ベックらの研究グループ)と、わが国(藤本、土佐、沢、筆者らのグループ)における銀河磁場の系統的な研究、および両グループの緊密な共同研究によって、渦状銀河の磁場に関する知見が、この数年間で飛躍的に増大した。

銀河の面上に投影した磁場ベクトルの位置角の分布をみてみよう。これは視線に直角な磁場の成分であるから、固有偏波面を 90 度回転すれば求めることができる。固有偏波面は、ファラデー回転を多周波の観測で補正して得られる。あるいはファラデー回転の無視できる短い波長 (3 cm 以下) での観測によって求まる。こうして求めた磁場ベクトルの分布をみると、ほとんどすべての観測例について、磁力線はスパイラル・アームにきれいに沿って走っていることがわかった。実例として渦状銀河 NGC 6946 について得られた結果を図 2 に示そう。

磁場がアームにそっていることはわかった。では磁力線は実際にアームとともに銀河の外側から内側に向って巻きこんでいるのであろうか。あるいは円盤上の磁力線がアームで一時的に圧縮されるために、見かけ状スパイラムに見えるのだろうか。幸い銀河面は視線に対して傾いているので、ファラデー回転量の解析で視線成分の磁力線の向きを調べれば、この疑問に答え、磁力線の三次元的な構造を知ることができる。すなわち、図 3 に示すような解析から、磁力線が腕から腕で反転する、双対称の渦まき形(BSS=bisymmetric spiral)なのか、あるいはリング状であるのかを明確に識別することが可能だ。

現在までに 10 コ程の近傍の銀河についてくわしい解析がされている。その結果によると、文字通り十中八、九の銀河については(M 33, M 51, M 81, NGC 6946, NGC 253 など) BSS 磁場が確認された。また M 31 については、リング状の磁場、IC 342 についてはスパイラルだが、すべての磁力線が中心へ向う(あるいはその逆)の単極(回転軸に対して対称)の構造をしていることがわかった。このうち M 31 (アンドロメダ銀河) については、さらにくわしい解析の結果、リングに加えて、

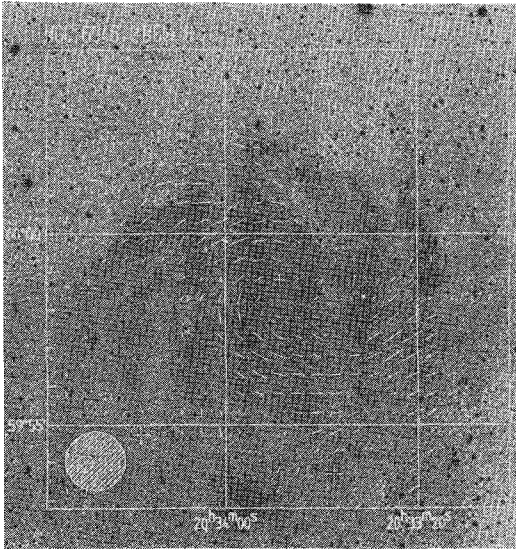


図 2 渦巻き銀河 NGC 6946 の磁場ベクトルの分布. 磁力線はスパイラル・アームにそって走る. Klein らによる観測から.

BSS 磁場が重なっていることが最近になって判明した. 巻きこまない渦巻き磁場

パーカーのダイナモ理論以来, 銀河の磁力線はリング状でなくてはならないと考えられてきた. というのも, 磁力線と星間ガスが互に凍結しているとする常識的な仮定にたつと, 渦状の磁場が存在したとしても, 銀河円盤の差分回転によって, 磁力線は過去に百回近くも巻きこまれてしまう. したがって事実上渦巻きの形を保つのは不可能と考えられてきたからだ. ダイナモ作用とは, 地球の磁場を生み出すのと同じメカニズムで, 回転しながら対流をもっている流体内で磁場が作られたり, 消滅し

たりする作用である. 銀河の場合は差分回転と銀河円盤の上下の対流 (磁気の泡が浮かびあがる現象) によって, 磁力線はリング状に増巾されてゆく. アンドロメダ銀河のリング磁場はこの理論によってよく理解される.

ところで大方の銀河で確認されたゆるい渦巻きをした磁場構造は, いままでの考え方では理解できない. つまり“巻き込みの困難”を克服しなければならない. そこで登場するのが, ダイナモ作用に加えて乱流拡散を考慮し, 銀河円盤に加えて分厚いハローまで含めた空間で磁力線を扱う, 銀河の三次元電磁流体のモデルである. このモデルは藤本, 沢, 土佐らの研究で成功し (図 4), ソ連のルズマイキンらも独自の理論を展開している.

BSS 形の渦巻き磁場は, 原始銀河が銀河間の磁場 (宇宙磁場) を巻き込んで発生する. しかし磁力線は巻き込まれた分だけ, 乱流拡散とダイナモ作用によって, 一部はハローにはき出され, 一部は円盤内で消滅する. 乱流拡散のタイムスケール, $t=L^2/vl$ はおよそ 10^{7-8} 年である. ここに L は問題にしている天体のサイズで, 今の場合にはガス円盤の厚さ 100~200 パーセク, v は乱流の速度 20~30 km/s, l は乱流の塊のサイズ ~100 パーセクである. ところで巻きこみのタイムスケールは, およそ 1 銀河回転 ($\sim 10^8$ 年) で, 拡散のタイムスケールとはほぼひとしい. したがって巻きこまれた磁場のエネルギーは拡散で熱化して消散するエネルギーとつりあい, 磁力線は二本腕の渦巻き構造を定常的に保つことができる.

ハローと円盤部では磁場やガスの交換が行われる. ハローにはき出された磁場は巨大なハローを形づくる. 実際エッジオン (横向き) の銀河を電波で観測すると, 数千パーセクの厚さの磁場ハローが見つまっている. また私達の銀河系のまわりにも磁場がハローをつくっている

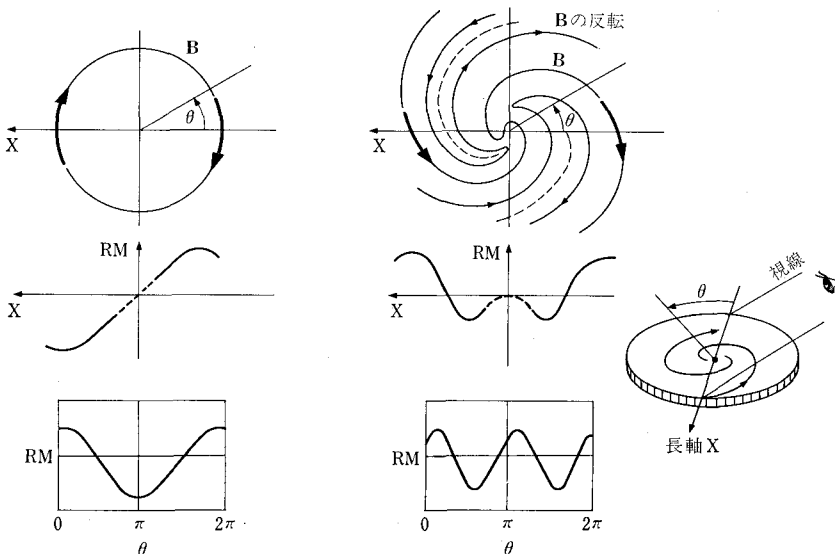


図 3 ファラデー回転量 (RM) の銀河面上の方位角 θ , あるいは長軸 X に対する変化を調べると, 磁力線がリング状か, スパイラル状 (BSS) かを判別できる.

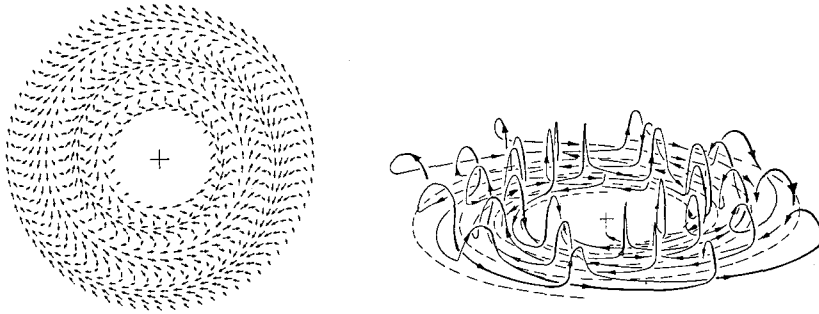


図 4 沢・藤本の銀河磁場モデル。銀河面上では定常的な BSS 磁場となる。

ことが、キューサーのファラデー回転量の銀緯依存性を統計的に調べて示すことができる。これらハローの磁場の強さは $\sim 10^{-6}$ ガウスで、ハロー全体の磁場のフラックスは円盤部のそれよりも大きい。銀河全体でみるとハローは磁力線の熱溜めになると考えてよいだろう。

磁場の原初起元説と垂直磁力線

BSS 形の銀河磁場の起源は、その形状などから推して、原始銀河誕生の時に宇宙磁場をまきこんだと考えるのが自然である。前節では銀河円盤内の銀河面に平行な磁場成分について主として述べた。しかし磁力線がもともと宇宙から来たものだとすれば、円盤に垂直な成分も等しく存在したにちがいない。銀河全体をつらぬく垂直磁場はどんな進化をたどったのであろうか。

垂直な磁場の拡散のタイムスケールをあたってみよう。上に出た式で L を銀河半径 $R \sim 10$ キロパーセクとおけばよい。タイムスケールは 10^{11-12} 年となり、垂直磁場は、一度とらえられたが最後、円盤からぬけ出すことはできない。つまり垂直磁場と銀河ガス円盤の凍結は良い近似でなりたっている。一方、銀河円盤部のガスは、渦状腕の衝撃波や、渦まき磁場によるブレーキなどで、角運動量と回転エネルギーを失い、銀河中心へと落ちこんでゆく。ガス円盤の表面密度は、銀河系の場合 $R \sim 4$ キロパーセクおよび $R \leq 500$ パーセク（中心核円盤）に極大をもっている。特に $R \leq 500$ パーセクでは太陽周辺の表面密度に比べて、 $10^2 \sim 10^8$ 倍のガスが集中している。垂直磁場はガスに凍結しているとすると、磁場の強さはガスの表面密度に比例すると考えられる。つまり垂直磁場の強さは $R \sim 4$ キロパーセクで極大となり、さらに中心核円盤部では、太陽近傍にくらべて百～千倍の強さになっていることが予想される。

原始銀河をつらぬいていた宇宙磁場（現在 $\sim 10^{-9}$ ガウスとされる）が、上の割合で銀河中心部に集中しているとすれば、中心部では垂直磁場が卓越していて、その強さは $\sim 10^{-4}$ ガウスに達するはずである（図 5）。

銀河系の中心部には、実際に強い垂直磁力線が銀河面

をつらぬいて走っていることが、最近の電波観測で明らかになっている。ユゼフ・ザデとモリスらの VLA 観測、井上、坪井らの野辺山での観測、筆者とライヒらの 100 m 鏡をつかった観測などから、この磁力線は図 5 に示したようなねじれた円筒形をしていると考えられる。またベルクイゼンらの最近の観測によると、M 31 の中心核の磁場の方向は、短軸方向をむいていて、やはり垂直磁場の存在を示唆している。また NGC 253 や NGC 7331 のようにエッジオンに近い銀河の光学写真から判明することだが、これらの銀河は星間塵が豊富で、無数のダストレーン（暗黒雲のすじ）が円盤内を走っている（サンデー著、ハッブル・アトラス参照）。そしてよくみると、これらの銀河の中心部（ $R \leq 2$ キロパーセク）では、ダストレーンが銀河面に垂直に、しかも銀河面から 1 キロパーセクの高さまで整然と立ちのぼっていることがわかる。このような垂直ダストレーン構造も垂直磁場と深く関連していると思われる。

銀河中心部の垂直磁場はさらに、中心核からの宇宙ジェット現象にも密接にかかわっている。最近の内田、柴田のモデルによれば、宇宙ジェットは、銀河中心部の垂直磁力線を降着するガス円盤のガスがひねり、ひねられ

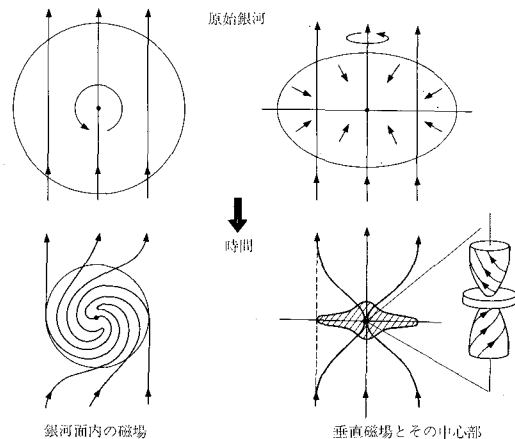


図 5 銀河磁力線の原初起源。

た磁場が回転によって、床屋さんのネジリンボウよろしくガスを垂直方向に加速して、鋭くしぼり出すという。

結 び

渦巻き状の銀河磁場がいくつもの銀河で発見され、確立された。また、巻きこまない渦巻き磁場の理論が成功するにおよんで、銀河の電磁流体学的な研究は一つのエポックをむかえたといつてよい。磁場のエネルギーは星間物質のエネルギー密度や、スパイラル・アーム中のガスの重力エネルギーとほぼ同等である。このことから、磁場がアームの成因に強くかかわっているであろうことが予想される。磁場で渦状腕の成因を説明する試みは1950年代にフェルミヤ、大木・藤本・一柳らによってなされたが、その後の密度波理論の隆盛で長い間とだえていた。藤本・沢らはいま新しい観点からこの可能性にidonでいる。渦状構造の新しい展開が期待される。

銀河磁場の原初起源説は垂直磁場の存在を想起させた。銀河中心部では垂直磁場が、中心核ジェットの加速にあずかるなど、様々な活動現象に関連しているらしい。垂直磁場については観測・理論ともに、まだ端緒についたばかりだ。今後の発展が強くのぞまれる。

日本学術会議だより No. 7 より抜粋

第14期日本学術会議会員選出のための 登録学術研究団体の概況

本会議では、現在第14期（昭和63年7月22日～昭和66年7月21日）会員（定員210人）選出のための手続きが進められているが、先頃6月末日を締切期限として、学術研究団体からの登録申請が受け付けられた。その後日本学術会議会員推薦管理会で審査が行われたが、結果は次のとおりであった。

学術研究団体の登録申請の審査結果

申請団体数……………900 団体

登録団体数……………836 団体

* 日本学術会議会員推薦管理会が登録した836団体名は「日本学術会議月報」11月号に掲載されるので、ご参照願いたい。

天体観測専門誌

天文ガイド

1月号 定価450円+税 12月5日発売/

日食・月食予報、彗星、星食、流星群…

1988年の天文現象

下保奨励賞受賞

大森茂雄さんの「小惑星の形」

3月中旬に見られる

インドネシア日食取材状況

新連載

太陽系の仲間たち

9月23日の

カラーで紹介日食特集

- 1月のスター・ウォッチング ● 1月の観測資料
- 観測ガイド ● 情報ボックス…など情報満載!!

新刊・案内

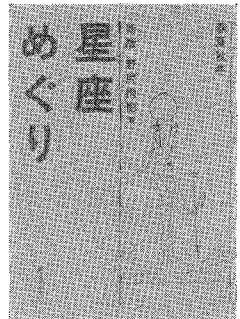
新版 星座めぐり 春夏秋冬

多くの天文ファンを生んだ名著
大好評発売中! 定価1800円。

星座案内を、香り高い文学として完成させた、故・野尻抱影先生の不朽の名著!

あいつぐ空襲の間にかい間見た星空、荒廃した戦後の澄み切った星座を、敗戦前後の人人の星に寄せる想いを込め、格調高いエッセイとともに案内した「新星座めぐり」4分冊を1冊にまとめて復刻。

- 野尻抱影著
- 四六判/360ページ
- 定価1800円



誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
電03(292)1221 振替東京7-128