

氏名・(本籍)	ちばまさし 千 葉 榎 司
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 第 970 号
学位授与年月日	平 成 3 年 6 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和63年3月 東北大学大学院理学研究科 (前期2年の課程)天文学専攻修了
学位論文題目	Generation of Large-Scale Magnetic Fields in Spiral Galaxies (渦状銀河における大局磁場の生成)
論文審査委員	(主査) 教 授 土 佐 誠      教 授 竹 内 峯 教 授 関 宗 蔵

## 論 文 目 次

謝 辞

要 旨

第一章 銀河における乱流発電の大局的な振舞いについて

(大局解の基本性質と問題点の考察)

第二章 渦状密度波による銀河磁場の Swing Excitation について

(発電作用における渦状腕の役割の考察)

第三章 銀河ダイナモにおける共鳴機構について

(共鳴機構の数値実験による考察)

第四章 渦状腕と銀河磁場の非線型相互作用について

(平衡状態の数値実験による考察)

結 論

## 論文内容要旨

本学位論文において、我々の銀河系や近傍の系外銀河に一般に存在している大局磁場の、生成と進化に関する理論的考察をなす。特に銀河磁場と渦状腕との間の共同現象に注目した、幾つかのモデル計算の結果を報告する。そして、本論文における考察の結果、一般の渦状銀河における大局磁場の構造や進化は、渦状腕によって基本的に決定づけられていることを示し、さらに、その結論が、現在連続電波の観測結果と矛盾しないことを述べる。

本論文のテーマは、天文学における当分野の、最近の観測、理論両面の目ざましい発展に動機づけられたものである。すなわち、系外の銀河から放射されるシンクロトロン放射の偏波成分が、高分解能に観測されてきたこと、さらに、観測技術の発展に刺激されて、銀河磁場の理論的な研究が、新たな段階に突入したことによる。本論文では、現段階における理論的問題点を提示し、その解決に貢献すべき新たな機構を提案するものである。

一般の渦状銀河における磁場の問題は、しばしば渦状腕の形成機構と関連して、古くから議論されてきたのだが、その起源や、構造、進化といったことは、未だ明確に理解されていないのが現状である。我々の銀河系の磁場は、パルサーや系外電波源から観測される電波の回転量を解析することによって得られるが、観測点である太陽系の銀河面上での位置が、解析結果の解釈を困難にしている。また、系外電波の観測については、観測データの分解能の荒さにより、磁場構造を導くことが不可能であった。一方、理論研究においては、有名な渦状腕の巻き込みの困難が、リン・シュー等の密度波理論の登場により、磁場を介した銀河理論が返り見られなくなったことがあげられる。しかし、1976年にセガロビッツ等が初めて系外銀河からの連続電波の精度の良い観測を行なったこと、また、その結果に基づいて、土佐・藤本が系統的に磁場構造を導く手法を考察したこと、などにより、当分野に新たな局面がもたらされた。最近の VLA による高分解能観測は、以下のような結果を導いている。M31 や IC342 といった銀河では、大局磁場の構造が軸対称的であり (M31 ではリング磁場)、他方、M51 や M81 などでは、渦状腕にほぼ沿って分布する非軸対磁場 (いわゆる BSS 磁場) が卓越している。一方 NGC6946 や M83 では、上記のような単純な磁場構造はしておらず、銀河円盤の回転方向に何度もその方向を変化する磁力線の存在を示唆している。

このような観測結果を、理論はどう説明するのであろうか。現在の磁場が、宇宙磁場の化石であるという考えが古くからあったが、巻き込みの問題や観測されるような様々な磁場構造を説明することは困難である。一方、渦状銀河において、その差動回転の効果と星間乱流の電磁流体力学的な振舞いによって発電作用を考える。いわゆる銀河ダイナモが近年考察されてきている。ルズマイキンのグループは初めて、その発電作用がシンクロトロン放射の分布を説明できることを示した。では、上記に上げたような、様々な磁場構造を説明できるであろうか？これに関して、我々は一般的なモデルの解析を行ない、その結果を本論文の第一章にまとめた。その考察によれば、現状の標準モデルは、上記の観測事実、特に BSS 磁場の卓越性を予言でき

ないことがわかった。つまり、非軸対称的な磁場は、差動回転に伴う巻き込みによって散逸の効果を強く受け、銀河円盤上で維持され得ない。また、強い発電効果を仮定しても、成長できる磁場の構造は空間的に局所化され、円盤全体に分布することが不可能である。

これまでのモデルでは、数学上の取り扱いの困難を避けるために、軸対称な銀河円盤を採用していた。しかし実際は、渦状腕が星間ガスのダイナミクスを支配しており、本質的には非軸対称構造の円盤を与える。そこで我々は、渦状腕を積極的に取り入れたモデルを構築した。基本的な物質過程を見るために線型密度波を仮定し、磁場の時間発展を解析的に導いた（第二章）。単純化したモデルによると、磁場が乱流発電によって周期的にその方向と振幅を変化させていれば、その振幅性が渦状腕によって引き起こされたものと結合し得ることがわかった。また、この共鳴作用によって励起される磁場は、特徴的な空間構造かつ時間発展を呈することが導かれた。特に M51 や M81 といった 2 本腕の渦状銀河においては、BSS 磁場が共鳴条件を満足することが示唆される。これは、観測結果と矛盾しない。

第三章ではさらに、前記の単純化をやめ、かつ共鳴状態にある磁場の実際の空間構造と時間発展を見るために、数値実験を行なった。渦状腕の効果は、与えるガスの速度場に反映させ、また、腕に沿った活動的な星形成や超新星残骸に伴う発電効果の増大をも考慮した。幾つかのモデル計算によると、密度波によって乱された磁場は、ある時間間隔の調節の後、密度波の構造を反映した。空間構造に収束し、かつそのような磁場のパターンは、与えた密度波と共に伝播することがわかった。そして、幾つかの場合で解析した結果、前章で導出した物理過程が、実際の系の本質を決めていることが確認された。

以上の研究により、銀河磁場を考える際に渦状腕が大変重要であることが示された。しかしながら、本研究やこれまでの解析は、主に線型の理論に従っており、成長する磁場の星間ガスに対する複雑なフィードバックを考慮していない。特に、渦状腕とどのように非線型相互作用を行なうかは、磁場の最終状態を決める上で重要である。そこで、第四章では、磁気力のバックリアクションを考慮した数値実験を試み、その結果をまとめてみた。注目している問題を定式化すると、渦状腕の効果は、重力場の揺らぎと星間ガスの慣性との比  $\Gamma^d$  で表現される。モデル計算によると、有限なローレンツ力の作用で、系は定常状態に収束することが観測された。また、磁場成長の抑制過程を詳しく分析した結果、以下のことが明らかになった。つまり、ローレンツ力によってガスの速度場が変化し、その力の働き方が、密度波との共鳴条件を僅かに崩す方向にある。そして、最終的には、解析解から導かれる成長率ゼロの状態になるように、ガスの速度場が調節される。磁場のエネルギーと星間ガスの回転運動を差し引いた運動エネルギーの比の平衡値は、 $\Gamma^d$  に反比例することがわかった。つまり、渦状腕が強いほど、ガスの運動（あるいは密度のゆらぎ）における磁気力の貢献は小さい。また、注目すべき結果として、最終状態の磁場構造は、本質的に共鳴状態時の構造を強く反映することが示唆される。

以上の考察を踏まえ、本論文では、渦状銀河における大局磁場の本質は、渦状腕によって決定づけられていると結論する。従って、渦状腕付近の詳しい磁場構造の電波観測は、本論文の

モデル計算との比較をする意味で、これからの課題である。

## 論文審査の結果の要旨

近年、系外銀河の高分解能電波観測などから銀河の大局的磁場の構造や性質が明らかになり、その生成機構などが理論的に問題になっている。銀河の磁場は星間ガスの乱流拡散によって急速に減衰するので、磁場を絶えず増幅・維持する機構が必要である。そのような機構として銀河ガス円盤の回転と乱流による自発的発電機構（銀河ダイナモ）が最も有力で詳しく研究されてきた。しかし、最近の観測結果は、銀河の大局的磁場構造は従来のダイナモ理論では理解できないことを示している。

千葉柁司提出の論文は、従来の銀河ダイナモ理論を拡張して、銀河ダイナモに及ぼす渦状構造（渦状密度波）の効果を詳しく調べ、銀河ガス円盤中に生成される大局的磁場構造と渦状腕の関係を明らかにしたものである。そのなかで、銀河ダイナモによって生成される磁場の振動と渦状密度波によるガス振動が結合してパラメータ励振がおり、磁場が効率的に増幅されることを示した。これによって、2本腕の渦状銀河では双対称的渦状構造を持ち得ることが示された。さらに、銀河ダイナモの2次元数値シミュレーションを行ない、このようなパラメータ励振が実際に起こり、渦状密度波と位相を合わせて伝播する双対称的渦状磁場が存在することを確認した。これらの結果、従来の理論では理解できなかった渦状銀河の大局的磁場構造が理解できるようになり、また、従来の渦状腕の理論では理解できなかった渦状腕の電波構造なども自然に理解できるようになった。さらに、磁場が成長して十分に強くなった段階に期待される、磁場と密度波の非線型相互作用についても詳しく調べ、非線型効果によって磁場の増幅が抑制されることを示した。

これらの研究は、銀河ダイナモに対する渦状密度波の効果を世界に先駆けて明らかにしたもので、銀河の大局的磁場構造や渦状腕の構造・力学を解明する上で画期的な研究であり、申請者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、千葉柁司提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。