

氏名・(本籍)	うちだとしお 内田俊郎
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1253号
学位授与年月日	平成4年3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)天文学専攻
学位論文題目	Perturbation Theory of Relativistic Magnetohydrodynamics and Its Application to Black Hole Magnetospheres (相対論的磁気流体力学の摂動理論とそのブラックホール磁気圏への応用)
論文審査委員	(主査) 教授 竹内 峯 教授 土佐 誠

論 文 目 次

1. 序
2. 定常軸対称ブラックホール磁気圏
3. 定式
4. 定常軸対称配位への応用
5. 幾何光学的近似
6. 準定常軸対称変位
7. 結論

論文内容要旨

周知の如く、回転しているブラックホール及び、その周囲の降着円盤は、莫大なブラックホールの回転エネルギーあるいは降着物質の重力エネルギーを狭い領域から開放することを可能とするため、活動的銀河中心核、クェーサー等のエネルギー源の有力な候補と考えられている。さらに相対論的速度にまで加速された大規模なジェットの実在は、荷電粒子に対するコンプトン減速の影響が大きいエネルギー源近傍の高光度な領域をジェットがポインティング・フラックスが支配的な状態で通過する電磁気的なエネルギー抽出過程を魅力的にしている。(ブラックホール、降着円盤はいずれも可能なエネルギー源である。本論では、ブラックホールの回転エネルギーをエネルギー源とする場合が主として考察されるが、議論の多くは、降着円盤がエネルギー源となる場合にも容易に適用できる。)

この様なモデルとしてブランドフォードとナエクによる定常軸対称フォース・フリー・ブラックホール磁気圏モデル、およびその拡張と考えられる磁気流体的なウインドモデルが在り、幾つかの問題点を残しながらも(特に実現可能なエネルギー抽出効率の決定は残された大きな問題である。)定常軸対称な配置におけるブラックホールからのエネルギー抽出過程は明らかにされたといつて良い。残念ながらこれらのモデルにおいては、散逸過程が全て無視されているため、例えば、降着円盤の理論における α ディスク・モデルの様に、直接観測と比較可能な情報をもたないが、これらのモデルを出発点とした、より拡張された理論的考察は十分意義をもつものと思われる。

この様な拡張として特に、ゆっくりとした進化過程はすでに岡本&楠木、パーク&ビシニアクらによって議論されているが、微小摂動の挙動を明らかにすることは、残された重要な問題であり、これが本論の主題である。本論の目的をより明確に述べると以下の様になる。即ち、

1. マックスウェル方程式とフォース・フリー条件をみたす任意の解が存在する時、その解の近傍のそれ自身マックスウェル方程式と線形化されたフォース・フリー条件をみたす任意の微小摂動を扱う一般的な方法を構成する。
2. その理論を定常軸対称ブラックホール磁気圏に適用し、定常軸対称ブラックホール磁気圏の微小摂動の基本的挙いを明らかにする。

以下、本論の概要を節ごとに記す。

第2章では、定常軸対称モデルの数学的扱いが与えられ、定常軸対称な磁気圏の構造、ブラックホールの回転エネルギーの抽出機構が議論される。

第3章では、著者の理論の定式が行われ、さらに理論の対称性からの帰結、保存量、ゲージ変換が考察される。内容は以下のとおり。

(1) ラグランジアン・ディスプレイメントの導入

ラグランジアン・ディスプレイメントは通例流体を含む系において流線の偏位として導入されるが、フォース・フリー近似には流体を含まないので数学的に導入する。

(2) 基礎方程式の導出

ラグランジアン・ディスプレイACEMENTの導入により基礎方程式はラグランジアン・ディスプレイACEMENTを独立変数とする2成分の2階の偏微分方程式にまとめられる。

(3) 変分原理

基礎方程式を与える変分原理が導かれる。これにより保存量の系統的な議論が可能となる。

(4) エネルギー，角運動量保存則

摂動的方法を採用した結果，2次の対称エネルギー・モーメントテンソルは保存しない。従ってブラックホールの質量，角運動量の2次の変化は議論できない。しかし，非摂動状態が定常軸対称の場合，幾何学的対称性により，正準エネルギー，角運動量フラックスは，2次の保存量となる。さらに実効的な電流とみなせる保存するフラックスが存在し，時間に関して周期的な摂動に対するブラックホールの表面積の変化率は，この3つの保存されるフラックスの事象の地平面上での積分で表わされることが示される。

(5) ゲージ変換

ラグランジアン・ディスプレイACEMENTを独立変数とする理想流体の摂動論では，トリビアルディスプレイACEMENTと呼ばれる非物理的な解の存在が知られている。我々の理論にも同様なものが存在し，それが電磁気学におけるゲージ変換に相当していることが明らかにされる。

第4章では，基礎方程式のダイナミカルな性質を調べるためにまず以下のことを行う。

(1) みかけの自由度の消去

適当な基底ベクトルを導入し，実際必要な2成分のみを含む形に基礎方程式を書き替える。

(2) 特性方向の導出

方程式の時間発展は特性曲線にそって伝わる。それ故特性方向を知ることは系のダイナミクスを考える上で重要である。(1)で求めた基礎方程式の形を用い，我々の基礎方程式の特性方向は，ヌル方向，及びヌル方向とフラックス面との交線方向の2方向であることが示される。これらはそれぞれ磁気流体力学におけるファストモードとアルフベンモードのマスレス極限とみなし得ることが明らかにされる。

次いで我々は，非摂動状態が定常軸対称の場合に，基礎方程式を応用するが，一般的扱いは，式の複雑さにより困難である。そこで，(4)において，特殊な非摂動状態を用いて，特にアルフベンモードの性質を議論する。主要な結果は以下のとおり。

1. アルフベンモードに対して，ライト面は特異点となる。
2. ライト面で解析的な解は(少なくともここで考察されたモデルの場合)，ライト面は局所的に安定であることを示す。
3. 波動的な解に対して，ライト面は地平面としてふるまう。

既に述べた様に基礎方程式を解ことは困難であり何らかの近似法が望まれる。第5章ではこれをふまえ幾何光学的近似(WKB近似)が定式される。

(1) 幾何光学的近似

定式が与えられると共に平均変分法による扱いも示される。これにより（既に多くの研究がある）非相対論的波動現象との比較が容易になる。

(2) 2つのモードへの分離

幾何光学的近似の下では、ファスト・モードとアルフベンモードは完全に分離する。

(3) ファスト・モード

ファストモードの性質が明らかにされる。マクスウェル極限ではファストモードは本質的に線偏光した光と同一である。従ってスーパー・ラディアンズが生じ得る。

(4) アルフベン・モード

トリビアル・ディスプレイメントが（形式的には）アルフベンモードに属していること、及びアルフベン波の良く知られた特徴的なふるまいが、ゲージ自由度と電磁場が退化している（即ち $\text{clet } F_{NV} = 0$ ）ことに起因していることが明らかにされる。またアルフベン波にはスーパーラディアンズは生じないが、共回転ポロイダル面を境にエネルギー、角運動量フラックスが符号を変えること、アルフベン波によるブラックホールの表面積の変化には、第3章で導入された実効的な電流が寄与すること等が示される。

第6章においては、基礎方程式の時間及び中に依らない解が考察され、基礎方程式の2成分のうち1成分は積分され、定常軸対称の場合と同様に定式されることが示される。

論文審査の結果の要旨

ブラックホールは一般相対性理論のひとつの重要な結果として得られた概念であって、その実在についてはなお明確ではないが、宇宙の進化において重要な役割を果たす天体と考えられている。ブラックホールの磁気圏は、相対論的磁気流体力学の法則によって支配されており、この領域の諸現象を現す法則性が明らかにされることは、ブラックホール周辺の活動性やエネルギー放出の機構を研究するうえで重要な意味をもっている。

本論文は、ブラックホール磁気圏の性質に関するこれまでの理論的到達点について概説し、その構造を支配する方程式系の主要な性質を考察し、そのうえに立って力が働かない状態を仮定した構造が成立している状態における線形摂動理論を展開したものである。この種の理論は著者が初めて展開したもので、ブラックホール磁気圏の研究に対する重要な寄与であるといえる。

このような理論の一般的な解を得ることは困難であるので、著者は、まず波動の伝播が幾何光学的極限にある場合について考察を行い、ファストモードとアルフヴェンモードの区別について論じ、それぞれのモードの持つ基本的性質を導いた。それらにこれらの成果を、定常的かつ軸対称であるブラックホール磁気圏に応用し、そこにおける波動の諸性質を検討した。次に振動がきわめて緩慢である極限についても検討し、その性質を示す関係を導いた。これらの諸関係はいずれも今後のブラックホール磁気圏研究にとって有用なものである。

以上のように、この論文は宇宙物理学上強い関心を持たれているブラックホールの磁気圏の磁気流体力学的波動に関して基礎的な理論を展開したもので、著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。よって内田俊郎提出の論文は博士(理学)の学位論文として合格と認める。