

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540271

研究課題名（和文） 磁気優勢な領域における相対論的アウトフローの数値的解明

研究課題名（英文） Numerical Study for Relativistic Outflows in Magnetically Dominated Region

研究代表者

小島 康史 (KOJIMA YASUFUMI)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10192577

研究成果の概要（和文）：

パルサー、ガンマ線バーストやブラックホールの周りの降着円盤など種々の天体から相対論的速度の流れが現れる。強い磁場が重要な役割と考えられているが、その実際の機構の理論的理解は依然未解決である。本研究補助金支援期間中に二つの主要な成果が得られた。二流体近似を用いてパルサー磁気圏の数値的モデルを構築したと磁気優勢な状況での磁気再結合の研究である。後者の場合、再結合割合は磁気レイノルズ数と磁化パラメータに依存することを指摘した。

研究成果の概要（英文）：

Outflows with relativistic speed appear in various astrophysical objects such as pulsars, gamma-ray bursts and accretion disks around a black hole. Strong magnetic field has been considered to be an important role on them, but theoretical understanding of the actual mechanism still remains. During the period supported by this Grant-in-Aid for Scientific Research, two major results are achieved. One is numerical construction of pulsar magnetosphere in terms of two-fluid approximation for the plasma. The other is the study of magnetic reconnection in highly magnetized situation. It is pointed out that the rate depends on the magnetic Reynolds number and magnetized parameter.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理学

1. 研究開始当初の背景

活動的銀河中心核、ブラックホールまわりの降着円盤、超新星爆発やガンマ線バーストなど様々な天体で相対論的速度のジェットが形成される。その生成や流れの収束に磁場が大きな役割を果たすという考えは以前から指摘されているものの、理論的および観

測的な問題が残されている。例えばガンマ線バーストの標準的なモデルでは相対論的なジェットと衝撃波の存在が本質的で、それによりガンマ線のバーストからその後にかかる電波のアフターグローまで説明することが試みられている。しかし、時間尺度やエネルギースペクトラムの時間変動など、源ごと

に非常に異なる多様性も観測されており、単純なモデルを修正する可能性が出てきている。さらに、ジェット生成機構とその構造、放射に関する相対論的な粒子の加速などの諸問題を解決するため、磁場が優勢なジェットのモデルの必要性も検討されている。さらに、磁場が支配的な領域での相対論的なプラズマ状態とジェットのモデルを理論的に明確にすることは、パルサーやソフトガンマ線リピータ（マグネターと呼ばれる超強磁場をもつ中性子星が関係する説が有力）からのエネルギー放出に関連性もあり重要な理論的課題として残っている。

これらの系を数値計算により研究する試みとして、(A) 電磁場だけを考えるフォースフリー近似（例えば、Spitovsky(2006)）、(B) 一流体の MHD 近似（例えば、McKinney(2006) Komissarov(2006)）を用いた研究があった。しかし、(A) フォースフリー近似では比較的簡単に解析できるものの、極端に電磁場の量を強めすぎており、物質を特異な形に押し込められている。その特異性のため、物質の影響が考えられない。(B) 一流体の MHD 近似では、流体の方程式に電磁場の効果を取り入れてあるが、数値計算の現状では圧力の比で磁気圧はプラズマのガス圧の 10 倍程度以下、エネルギー密度比では磁場が物質のそれよりはるかに小さい場合に限られている。また、マクスウェル方程式は部分的にしか解かない。非相対論的な場合はその妥当性が論じられるが、相対論的な運動の場合には妥当性の根拠がない。電場と磁場が常に直交することを仮定しており、プラズマの加速が起きない。この近似の元ではプラズマ流の運動エネルギーへの転化、あるいはその逆の過程を明確にすることができない状況であった。

2. 研究の目的

磁場のエネルギーが支配的である天体やある空間領域において、フォースフリー近似や一流体の MHD 近似を超える理論的枠組みを確立し、種々の天体現象解明への新たな理論的道具とすることを目的とする。また、Fermi 衛星では既にガンマ線パルサーなどの高エネルギー天体が多数見つかっており、新たな観測的証拠、正確な源の位置決定や広範囲にわたるエネルギースペクトラムなどが期待されている。このような飛躍的に進歩する観測情報とともに、シミュレーションの内容を逐次改良することで、強磁場が絡む高エネルギー天体現象の理解を進展させる。

3. 研究の方法

磁場のエネルギー密度が物質のそれと同程度となる領域で適応可能な数値計算法を確立し、様々な天体での高エネルギー天体現

象と比較する。具体的には以下の現象を主とする。

(1) パルサー磁気圏構造の解明

一流体 MHD 近似による数値計算の現状では、磁気パラメータ（磁気と粒子のエネルギー密度比）が非常に小さい場合に限られる。これは光速が無限大の極限に対応し、ある意味で非相対論的な場合である。パルサー磁気圏ではこのパラメータは非常に大きく、相対論特有の現象が関連する。これまでの取り扱いでは大域的なプラズマの加速とそれに伴う放射箇所を数値計算で同定できない。マクスウェル方程式の一部しか解かない MHD 近似をやめ、本研究ではマクスウェル方程式系を解く。源となる電荷や電流として正と負の二成分プラズマ（二流体近似）の運動方程式を同時に解く。数値計算上、比較的単純な物理系モデルに対して二つの方向から問題にせまる。ひとつは定常状態を仮定して無矛盾な解を求めることであり、他の一つは時間発展の形式で解くが、散逸効果や計算領域内への流入出等の物理的状況を適切に考慮に入れて定常な解を再現する方法である。その後、放射機構を数値実験に段階的に取り入れる。

(2) 磁気優勢な領域で高速で起こる磁気リコネクションの解明

短時間で起きるに磁気リコネクションのモデルとして、Sweet-Parker タイプのもの相対論的な拡張が考えられている。それらは、定常的な半解析的なモデルや、パルサー風で必要となる磁場より弱い場合である。非相対論的な磁気流体の場合は磁気 Reynolds 数(Lundquist 数)にのみ流れが依存するが、磁気が優勢な相対論的な場合、磁気パラメータにも依存すると予想される。この物理的パラメータ領域で何が起きているのかを計算を通じて明確にする。時間発展の計算コードを用い、定常的になる物理条件や非理想 MHD 条件が発現する条件・場所を明確にする。将来的にはより詳細なモデル構築に役立つ。

(3) その他の天体現象への応用

磁場が支配的な領域でのプラズマ流の大域的な構造とそれに無矛盾な電磁場構造を数値計算により求められれば、電磁場と物質間のエネルギー移流過程や放射機構を組み合わせることにより詳細な理論的研究が可能になる。パルサーより強磁場の天体（マグネター）の場合、磁気パラメータは非常に大きくなり、そこで短時間のフレア現象や磁気優勢なジェット形成が考えられる。また、ブラックホール近傍の曲がった時空の効果を受けて円盤からの回転軸方向への高速のジェットが如何に形成されるかを調べる。

4. 研究成果

磁場が支配的な領域での物理過程に関して、研究テーマごとの成果を発表論文とともにまとめる。期間終了後現在進行中の課題内容や問題点にもそれぞれ部分の最後に触れる。

(1) パルサー (マグネター) の磁気圏構造

磁場が支配的な領域でのプラズマ状態とそこから放出される相対論的な速度の流れの理論的解明するために、二成分プラズマ (二流体近似) の運動方程式とマクスウェル方程式を解いた。軸対称性と定常状態を仮定し定常状態を仮定して無矛盾な解を求めた。(発表論文 6) 方程式系は 4 つの楕円型偏微分方程式の非線形な連立式になり、それをどのように解けるかが物理現象解明の鍵となる。磁場がそれほど強くない場合には比較的簡単に解に収束することが分かった。パルサーやマグネターの磁気圏構造の解明に応用するためには、さらに高精度の計算と効率的な収束方法が必要であることが分かり現在、その困難の克服に努力している。

また、ブラックホールを含む磁気圏にも本研究の応用が可能で、一般相対論の効果を取り入れた定式化とその数値計算コードの開発も手がけた。一般相対論に由来する時空の曲がりには比較的容易に取り入れられことがわかり、今後この分野の研究にも役立てられる試算ができた。パルサー磁気圏やブラックホール磁気圏のモデル構築が可能になる。

他の一つの時間発展の形式では、散逸効果や計算領域内への流入出等の物理的状況を適切に考慮に入れて定常な解を再現する方法であるが、その物理的処方の理解が得られておらず進展していない。最終年に当たる 2011 年には、フォースフリー近似に代わる新たな数値計算法が展開されるようになった。いくつかグループで抵抗性を取り組んだ手法が研究されるようになり、それに対応して計算コードを改良している。

一方、パルサー磁気圏の構造解明に観測的にどの程度定まるかを論じた。(発表論文 2) 観測で求められているガンマ線パルス周期的変化と理論モデルで合わせることで、発光場所の制限が得られる。モデルには幾何学的な位置関係などの情報も必要とするため、利用できる源の数は少ない。Fermi 衛星によりガンマ線パルサーの数が増えたので、いくつかの天体の観測量とモデルとを比較することで、磁気圏構造の全体的傾向が得られた。その結果、フォースフリー近似で求められたものに近いことがわかった。今後、統計量が増えることにより、モデル構築の制限になることが期待される。

(2) 磁気優勢な領域で高速で起こる磁気リコネクション

短時間で起きるに磁気リコネクションのモデルの相対論的な場合への拡張が考えられてきた。非相対論的な磁気流体の場合は磁気 Reynolds 数 (Lundquist 数) にのみ流れが依存するが、磁気が優勢な相対論的な場合、磁気パラメータにも依存すると予想される。2 次元 X 型ヌル領域における MHD 波の集積とそこでの磁気散逸に関する数値計算結果の論文を公表した (発表論文 3)。このモデルの場合に波の振動や減衰に対する磁気パラメータの依存性を明確にした。今後より一般的な拡張や定常になる物理条件や非理想 MHD 条件が発現する条件・場所を時間発展の計算コードを用いて明確にする必要がある。

(3) その他

① パルサーの固有運動速度の起源解明の可能性 (発表論文 4)

超新星爆発の異方性により生じる可能性があるが、そのためには非常に大きな磁場が必要とされる。一方、磁場が中性子星誕生後にダイナモにより増幅されるなら、その後の影響が重要になる。そこで、磁気双極子と高次の多重極で磁気圏が形成されている場合、その配置により電磁気的な運動量を放出する。その反作用として得られる運動速度を見積もった。今後、磁場の増幅過程の理解と観測情報の増加により意義が増す可能性がある。

② ブラックホールのコリメーション機構 (発表論文 7)

ジェットのコリメーション機構の可能性として、ブラックホール自身の自転の効果を議論した。回転軸方向は流れに対して特別な方向であり、この方向に収束するという説がこれまでも論じられてきたが、その妥当性をより詳しく論じることにより、他のモデルとの比較が可能になる。多数の粒子で流れ追うことにより定量的議論が可能となり、ブラックホール自身の自転の効果はそれほど重要でないことを示した。

③ 降着を伴うミリ秒パルサーの質量増加量の観測の統計的性質 (発表論文 5)

ミリ秒パルサーの磁場は弱く、磁気圏は小さい。そのため、降着物質による質量増加も大きいと想像できる。観測的に推察されているパルサーの質量を数多く取り扱うことにより、質量降着の性質の手掛かりとなる。その結果、連星系をなすミリ秒パルサーは比較的質量大きな方へと集団分布していることがわかった。

④マグネターの磁場進化 (発表論文 1)

マグネターは強磁場を持った中性子星であり、その永年的な磁場の進化にはホールドリフトが重要な役割を果たす。そこでその効果を取り入れた磁場の減衰を理論的に計算した。トロイダル磁場とポロイダル磁場が非線形結合を起こし、単純な指数関数的減少でなく、興味ある時間的振る舞いを示した。今後、マグネターの活動性との関連に研究を進展させる予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

(1) Y. Kojima & S. Kisaka
Magnetic field decay with Hall drift in neutron star crusts
Mon. Not. R. astro. Soc. 421 (2012) 2722-2730
査読の有

(2) S. Kisaka & Y. Kojima
Multi-wavelength Emission Region of γ -Ray Emitting Pulsars
Astrophys. J., 739(2011) 14
査読の有

(3) Y. Kojima, J. Oogi, & Y. E. Kato
Relativistic magnetic reconnection at X-type neutral points
Astron and Astrophys. 531(2011) A47-1-4
査読の有

(4) Y. Kojima & Yugo E. Kato
Kick Velocity Induced by Magnetic Dipole and Quadrupole Radiation
Astrophys. J. 728(2011) 75-79
査読の有

(5) J. Wang, C. M. Zhang, Y. H. Zhao, Y. Kojima et al
Spin period evolution of a recycled pulsar in an accreting binary
Astron and Astrophys. 526(2011) A88-1-7
査読の有

(6) Y. Kojima & J. Oogi
Numerical construction of magnetosphere with relativistic two-fluid plasma flows
Mon. Not. R. astro. Soc. 398(2009) 271-279
査読の有

(7) K. Takami & Y. Kojima
Collimation of a spherical collisionless particles stream in Kerr space-time
Class. Quantum Grav. 26(2009) 085013
査読の有

その他の論文 2 (査読の有 1、無 1)

[学会発表] (計 11 件)
(1) 加藤祐悟、小嶋康史
抵抗のあるパルサー磁気圏の数値計算の可能性
日本天文学会 2012 年春季大会
2012 年 3 月 21 日
龍谷大学 (京都市)

(2) 小嶋康史、木坂将大
ホールドリフト期の磁場を示す SGR0418+5729
日本天文学会 2012 年春季大会
2012 年 3 月 21 日
龍谷大学 (京都市)

(3) 小嶋康史
Hall 効果を取り入れた中性子星の磁場の永年進化の数値計算
日本天文学会 2011 年秋季大会
2011 年 9 月 20 日
鹿児島大学

(4) 加藤祐悟、小嶋康史
相対論的磁気リコネクションの磁気パラメータ依存性
日本天文学会 2011 年秋季大会
2011 年 9 月 20 日
鹿児島大学

(5) 木坂将大、小嶋康史
ガンマ線パルサーの放射領域と他の集団的性質への影響
日本天文学会 2011 年秋季大会
2011 年 9 月 20 日
鹿児島大学

(6) 小嶋康史
Hall ドリフトに影響された磁場の進化と流体力学の類似性
日本流体力学会 年会 2011
2011 年 9 月 7 日
首都大学東京 (八王子)

(7) 小嶋康史、加藤祐悟
パルサーキック速度のモデル
日本天文学会 2010 年春季大会
2011 年 3 月 18 日
筑波大学

(8) 加藤祐悟、小嶋康史
X型点における相対論的磁気リコネクション
日本天文学会 2010 年春季大会
2011 年 3 月 18 日
筑波大学

(9) 木坂将大、小嶋康史
多波長光度曲線を用いたパルサーの放射領域の研究
日本天文学会 2010 年春季大会
2011 年 3 月 18 日
筑波大学

(10) 小嶋康史
相対論的天体付近の二流体プラズマと電磁場の大域的構造
日本物理学会 2009 年秋季大会
2009 年 9 月 26 日
熊本大学

(11) 小嶋康史
二成分プラズマの相対論的アウトフローを伴う磁気圏モデル
日本天文学会 2009 年秋季大会
2009 年 9 月 14 日
山口大学

[その他]
特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小嶋 康史 (KOJIMA YASUFUMI)
広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：1 0 1 9 2 5 7 7

(2) 研究分担者

無

(3) 連携研究者

無

(4) 研究協力者

(研究当時 広島大学大学院・大学院生)

高見 健太郎 (TAKAMI KENTAROU)
仰木 淳平 (OOGI JUNPEI)
木坂 将大 (KISAKA SHOTA)
加藤 祐悟 (KATO YUGO)