

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25年 5月31日現在

機関番号：17401
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2012
 課題番号：21540243
 研究課題名（和文） ブラックホール磁気圏における通常プラズマと対プラズマの挙動の違いの解明
 研究課題名（英文） Peculiar behavior of ion-electron plasma and pair plasma in black hole magnetospheres
 研究代表者
 小出 眞路 (KOIDE SHINJI)
 熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
 研究者番号：20234677

研究成果の概要（和文）：一般化された一般相対論的電磁流体力学（GRMHD）方程式を一般相対論的二流体力学方程式より導出し、イオンと電子からなる通常プラズマと電子と陽電子からなる対プラズマのブラックホール近傍での挙動の違いを調べた。導出された GRMHD 方程式によりその違いはオームの法則の熱起電力とホール効果のみであることが明確にされた。まず、ホール効果について通常プラズマには現れるが、対プラズマには現れない。さらに、ガンマ線バーストやマイクロクエーサーのまわりの通常プラズマについてはホール効果が現象に影響を与える可能性が出てくることが示された。また、熱起電力の項はガンマ線バースト、マイクロクエーサー、活動銀河核のまわりの通常プラズマおよび対プラズマいずれに対しても古典電気抵抗の項よりも大きくなるが、電気抵抗により引き起こされる磁気リコネクションのような特異な現象は起こるとは考えられず、プラズマに大きな影響を与えるとは考えられない。

研究成果の概要（英文）： We have investigated the peculiar effects of ion-electron (normal) plasma and positron-electron (pair) plasma using generalized general relativistic MHD (GRMHD) equations. It showed clearly that the peculiar effects are limited to Hall and thermo-electromotive force effects. First, it shows Hall effect may become significant for normal plasmas of gamma-ray bursts and microquasars, however it disappears for pair plasmas. The term of thermo-electromotive force may becomes larger than the classical resistivity for both normal and pair plasmas of gamma-ray bursts, micro-quasars, and active galactic nuclei, however, it is not expected to become significant because it will not cause drastic phenomena like magnetic reconnection, which is caused with resistivity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：ブラックホール磁気圏・通常プラズマ・対プラズマ・一般化 GRMHD 方程式

1. 研究開始当初の背景

われわれは研究開始当初までブラックホール磁気圏のプラズマの挙動を解明するために、一般相対論的な理想 MHD の数値計算を世界に先駆けて行い、ブラックホールのまわりのプラズマと磁場の相互作用による特異な現象を解明してきた(例えば, Koide 2003, Phys. Rev. D 67, 104010)。われわれが開発した数値計算法は改良が加えられ現在一般相対論的 MHD (GRMHD) 数値シミュレーションとして広く行われるようになった。しかし、それらの GRMHD 数値計算はすべて電気抵抗をゼロとした理想 MHD 近似を用いており、さらに放射や粒子素過程を無視するなどかなり大胆な(非現実的な)近似となっている。また、ホール効果や熱起電力の効果など、プラズマの成分に依存する現象も考慮されてこなかった。このプラズマの成分による違いを解明するためにはプラズマの一般相対論的 二流体力学方程式に立ち返って GRMHD 方程式を再検討する必要がある。

2. 研究の目的

宇宙はさまざまなプラズマに満ちている。とくにブラックホール磁気圏では2種類の全く違ったプラズマ、すなわち、電子と陽子からなる「通常プラズマ」と電子と陽電子から構成される「対プラズマ」が存在すると考えられている。すなわち、ブラックホールのまわりの降着円盤は通常プラズマであるのに対し、そのまわりのコロナやその付近で形成される相対論的ジェットは対プラズマで主に構成されていると推察されている。ブラックホール磁気圏のプラズマの理論的研究はこれまでさまざまな手法を用いて行われてきたが、それらのプラズマの性質の違いを考慮に入れた研究はほとんどない。これは、これまでブラックホール磁気圏をプラズマの最も簡単な近似である電磁流体力学(MHD)を用いてきたためと思われる。本研究課題では MHD 近似の妥当性を相対論的 二流体近似から再検討し、通常プラズマと対プラズマの違いを明らかにすることを目的とする。とくに、ブラックホール磁気圏での2つのプラズマの役割について解析的手法と数値シミュレーションの手法を用いて解明する。

3. 研究の方法

ブラックホール磁気圏での通常プラズマと

対プラズマの挙動の違いを明らかにするために一般相対論的 二流体力学方程式から一般化 GRMHD 方程式を導いた。通常、二流体力学方程式から一般化 MHD 方程式を導く場合、近似を用いるが、そうしてしまうと得られる方程式が常に近似で用いた条件で利用範囲が制限されることになる。本研究課題では物理量の平均化を工夫し、新しい平均化の定義を導入することにより、全く近似を用いないで一般化 GRMHD 方程式を導くことに成功した。この一般化 GRMHD 方程式は数学的には元の一般相対論的 二流体力学方程式と同値であるために、利用に際して制限を気にする必要はない。さらに、この方程式はこれまでの MHD 方程式と似ているために、一般化 GRMHD で新しく現れた項を直感的に理解することができる。ただし、新しく導入した平均化の定義の理由付けがまだ十分ではなく、今後その意味について明確にする必要がある。

新しく導出された一般化 GRMHD 方程式には通常プラズマと対プラズマの違いが正電荷の粒子と負電荷の粒子の無次元換算質量 μ および無次元質量差 $\Delta\mu$ として顕われる。通常

プラズマの場合は $\mu = \frac{1}{1800} \ll 1$, $\Delta\mu = 1$ で

あり、対プラズマでは $\mu = \frac{1}{4}$, $\Delta\mu = 0$ とな

り、方程式の違いによりそれぞれのプラズマの挙動の違いを明らかにすることができる。

4. 研究成果

本研究課題では一般相対論的 二流体近似から再検討し、通常プラズマと対プラズマの振舞いの違いを明らかにした。そのために一般相対論的 二流体力学近似から一般化 GRMHD 方程式を導き、通常プラズマと対プラズマの一般化 GRMHD 方程式を比較することにより、その振舞いの違いを明らかにすることができた。それによると、極端に小さいスケールや非常に時間変動の早い場合でない限り、その違いは熱起電力とホール効果のみである。ホール効果は対プラズマでは現れないのに対し、通常プラズマでは無視できない可能性がある。熱起電力については複雑で、電子と正に帯電した粒子との温度差による。具体的には、楕円銀河 M87 の活動中心核の超巨大ブラックホールや銀河系中心 Sgr A* の巨大ブラックホールのまわりのプラズマではホール効果は無視

できる。しかし、ガンマ線バーストやX線連星系のブラックホールではホール効果が無視できない可能性がある。また、熱起電力についてはいずれの場合もその項は古典的電気抵抗の項よりも大きくなる。しかし、電気抵抗は磁気リコネクションにより値が小さくても大きな影響を全体に及ぼす可能性があるが、ホール効果や熱起電力ではそのような効果は知られておらず、今のところ対プラズマと通常プラズマに大きな振る舞いの違いはないと考えられる。

今後、一般化GRMHDを用いた数値シミュレーションなどにより対プラズマと通常プラズマの挙動の違いによるブラックホール磁気圏でのプラズマのダイナミクスの多様性が明らかになると期待される。

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5件)

① Shinji Koide, Charge separation instability in an unmagnetized disk plasma around a Kerr black hole, *Physical Review D*, 査読あり, 83, 2011, 023003

② Shinji Koide, Ryogo Morino, Group velocity and causality in standard relativistic resistive magnetohydrodynamics, *Physical Review D*, 査読あり, 84, 2011, 083009

③ Shinji Koide, Generalized General Relativistic Magnetohydrodynamic Equations and Distinctive Plasma Dynamics Around Rotating Black Holes, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, 708, 2010, pp. 1459-1474

④ Shinji Koide, Generalized relativistic magnetohydrodynamic equations for pair and electron-ion plasmas, *The Astrophysical Journal*, 査読あり, 696, 2009, pp. 2220-2233.

⑤ 小出眞路, ブラックホール磁気圏と相対論的ジェット, *日本物理学会*, 査読あり, 64, 2009, pp. 373-378

[学会発表] (計14件)

① 小出眞路, 森野了悟, ブラックホールが誘

起する磁気リコネクション, 2013年日本天文学会春季大会, 2013.3.22, 埼玉大学 (埼玉)

② Shinji Koide, A review of primary and recent GRMHD simulations, *The biggest accelerators in space and on earth* (招待講演), 2013.3.20, CERN (スイス, ジュネーブ)

③ Shinji Koide, A review of primary and recent GRMHD simulations, *The sixth workshop on black hole magnetosphere*, 2013.3.5, 精華大学 (台湾, 新竹)

④ 小出眞路, 森野了悟, ブラックホール磁気圏における自発的磁気リコネクションの数値計算, 2012年日本天文学会秋季大会, 2012.9.19, 大分大学 (大分)

⑤ Shinji Koide, Ryogo Morino, Numerical simulation of resistive GRMHD, *ASTRONUM2012*, 2012.6.29, Sheraton Keauhou Hotel (米国, ハワイ)

⑥ 小出眞路, 森野了悟, ブラックホール近傍における磁気リコネクションの数値計算, 2012年日本天文学会春季大会, 2012.3.22, 龍谷大学 (京都)

⑦ Shinji Koide, Numerical Simulations with Resistive GRMHD, *Cosmic Acceleration 2012* (招待講演), 2012.2.22, 千葉大学 (千葉)

⑧ Shinji Koide, A model of knot ejection with high energy flare induced by magnetic reconnection, *Taiwan Sub-millimeter VLBI Telescope Workshop* (招待講演), 2011.11.9, Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica (台湾, 台北)

⑨ Shinji Koide, An introduction and results of GRMHD simulations, *IAA Colloquium* (招待講演), 2011.8.26, Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica (台湾, 台北)

⑩ Shinji Koide, A model of jet formation with high energy flare beyond ideal GRMHD, *Workshop "Towards a root of AGN jets: Recent progress"*, 2010.12.15, 京都大学 (京都)

⑪ Shinji Koide, General relativistic

plasmas around rotating black holes, IAU Symposium 275 “Jets at All Scales” (招待講演), 2010. 9. 16, Novotel Buenos Aires (アルゼンチン, ブエノスアイレス)

⑫ 小出真路, 一般化された GRMHD 方程式の示唆するブラックホール周辺プラズマの奇妙な振る舞い, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会 3 学会宇宙プラズマ合同シンポジウム, 2010. 5. 24, 幕張メッセ (千葉)

⑬ Shinji Koide, Generalized GRMHD equations of plasmas in black hole magnetospheres, 第 19 回一般相対論と重力研究会(JGRG19), 2009. 12. 2, 立教大学 (東京) .

⑭ Shinji Koide, Energy extraction of rotating black hole by magnetic reconnection, Matter and Electromagnetic Fields in Strong Gravity (招待講演), 2009. 8. 28, メリーランド大学 (米国, メリーランド)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小出 真路 (KOIDE SHINJI)
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 20234677