

平成23年3月30日現在

機関番号： 82401

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2009～2010

課題番号： 21740149

研究課題名(和文)

近傍銀河中心ブラックホール降着プラズマの一般相対論的効果

研究課題名(英文) General relativistic effects of plasma accreting into black holes in the centers of nearby galaxies

研究代表者

高橋 労太 (TAKAHASHI ROHTA)

独立行政法人理化学研究所・玉川高エネルギー宇宙物理研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号： 40513453

研究成果の概要(和文)：

近未来の最新の望遠鏡によるブラックホール候補天体の電磁波観測データの解釈に必要な理論計算を行うための一般相対論的降着流及び輻射輸送の数値シミュレーション・コードを構築した。これらのコードを用いて回転ブラックホール時空中での降着流を計算し、輻射輸送計算を行うことで、電波及びX線の観測量を計算し、観測可能性を明らかにした。また、これら一連の計算を一般相対論以外の重力理論に適用できる形に拡張した。

研究成果の概要(英文)：

We have developed numerical simulation codes of general relativistic accretion flow and radiative transfer in order to perform theoretical calculations which are required to interpret observational data of black hole obtained by telescopes in near future. Based on these codes, we calculated accretion flows around rotating black holes and performed radiative transfer calculations. Then, observational signatures in radio band and X-ray were calculated and their observational feasibilities are investigated. Moreover, these calculation codes are developed to be used for the cases of other gravity theories than the general relativity.

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	900,000	270,000	1,170,000
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

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, 活動銀河核, 降着円盤, プラズマ, 磁気流体, 輻射輸送, 一般相対論, 電波干渉計

1. 研究開始当初の背景

近未来の最新の望遠鏡によるブラックホ

ール候補天体の電磁波観測により、エネルギー・スペクトルやイメージ、光度曲線などのブラック

ホール時空の一般相対論的な情報を含んだ観測データが得られると期待されている。ブラックホール近傍のような超強重力場領域で、重力理論が一般相対論と異なる場合には、観測量から重力理論に対して制限を与えることができる可能性もある。ところが、一般相対論を仮定した場合に限っても、観測量の計算、特に時間変動の効果を含む場合と実現可能な観測装置や観測の特性（空間分解能、波長分解能、観測データに入り込むノイズの影響など）を現実的に考慮した計算はなかった。これらは、実際に得られたデータを理論的に解釈する際には必須の計算である。また、重力理論を一般相対論と異なるものを仮定した計算に関しても、現実的な降着流の電磁波観測データと直接比較できる理論計算は十分ではなかった。

2. 研究の目的

観測データは、ブラックホール時空の一般相対論の効果、現実的な降着流の様々な効果、観測する際には避けては通れないノイズなどの効果を全て含んだものとなる。また、一般に観測データは時間変動をしている。このような観測データの解釈に必要な理論計算を行うことが本研究の目的である。更に、これらの計算をもとに、近未来の望遠鏡での個別のブラックホール候補天体に対する観測可能性（つまり、ある観測装置でどこまでのサイエンスを実現することができるはずか）を明らかにすることも本研究の目的である。更に、ブラックホール候補天体を観測する目的の一つに重力理論の検証が挙げられるが、一般相対性理論以外の重力理論の場合にも計算を拡張し、観測量のどこに一般相対論とのずれの効果があらわれるのか（もしくは、あらわれないのか）を明らかにすることも研究目的の一つである。

3. 研究の方法

ブラックホール天体の観測量を計算するために、まず、ブラックホール粘性降着流の定常遷音速解を数値的に計算した。また、非定常降着流を計算するために、 $3+1$ 分解に基づく定式化に則り、近似的にRiemann問題を解くことができる一般相対論的流体数値シミュレーション・コードを構築した。数値シミュレーション・コードは任意の次元（1、2または3次元）の計算に対応し、背景時空は解かずに与える形の計算が可能なコードである。研究では、まず、これらの数値計算コードを用いて、ブラックホール降着流の定常及び非定常降着流の数値解を計算した。次に、電磁波、特に電波とX線の観測量を計算するために、一般相対論的な輻射輸送計算コードを構築した。このコードでは、相対論効果はフルに考慮し、厳密に取り扱うことが難しい光子散乱の効果は近似的に取り入れた。

これらの一般相対論的輻射輸送計算では、光子軌道を正確に計算する必要があるのであるが、一般相対論に基づく回転ブラックホール時空（カー・ブラックホール時空）の場合には、解析解を用いたコードを作成し、一般の時空の場合には数値的に光の軌道を計算する数値コードを開発した。この際に用いた微分方程式を解くスキームは、開発が容易な陽的なスキームの他に、開発が手間取ることが計算時間が数桁短く済む陰的なスキームを用いたものも開発した。これらの計算では数値計算精度保証付きのスキームで数値計算の刻み幅を決めた。以上の一般相対論的流体コードと一般相対論的輻射輸送コードの2種の数値計算コードを組み合わせることで、ブラックホール候補天体の観測量（イメージ、スペクトル、偏光、光度曲線）を計算した。

4. 研究成果

近未来の最新の望遠鏡によるブラックホール候補天体の電磁波観測により、エネルギー・スペクトルやイメージ、光度曲線などのブラックホール時空の一般相対論的な情報を含んだ観測データが得られると期待されている。それらの観測に備えるために、観測データの解釈に必要な理論計算技術を整備すると共に、その技術をもとに将来の望遠鏡で得られる可能性のある観測的特質を理論予想した。まず、近傍銀河中心ブラックホール候補天体であるSgr A*とM87の降着流及びそれらの電波及びサブミリ波での観測量（イメージ、スペクトル、偏光、光度曲線）を計算し、干渉計による観測可能性を明らかにした。その為に、観測スペクトルなどを全て再現することが可能な回転ブラックホール時空中での降着流モデルを構築し、この結果を基に曲った時空中での一般相対論的な輻射輸送計算を行うことで、電磁波の観測量を計算した。これらの計算では、必要な特殊及び一般相対論的な効果を全て考慮した。これらの計算結果を、専用のソフトウェアで計算した次世代のスペース電波干渉計で達成できる現実的なuv-coverageと組みあわせることで、我々に届く電磁波成分の望遠鏡による観測可能性を調べた。これらの計算では、望遠鏡観測では必ず入り込むノイズの効果を取り入れ、ノイズの目標値および想定される最大のノイズの場合の両方について可能なサイエンスを判定した。具体的には、ブラックホールの存在を強く示唆するブラックホールの影の観測可能性、ブラックホール降着流の回転によるイメージの非対称性の観測可能性、ブラックホールの角運動量の効果の観測可能性などを理論計算し、標準的な降着流モデルの場合で、ノイズの効果が最悪の場合以外には、いずれも観測可能性があることがわかった。これらの計算結果は、国際会議で発表するとともに(Takahashi 2011)、査読論文として公表した(Takahashi & Mineshige 2011)。また、関連する一般相対論的流体シミュレーション数値計算コードも開発し、結果を国際会議及び国内学会などで公表した(Takahashi 2010)。また、X線連星ブラックホール天体のイメージを計算し、その

イメージをもとに観測量である X 線スペクトルを計算した。一連の計算は、全て回転ブラックホール時空中で行い、観測量におけるブラックホール回転の効果を明らかにした。また、観測イメージと観測スペクトルに関しては、一般相対論以外の重力理論に基づく天体（本研究では、super-spiner と Chern-Simon 重力でのブラックホール）に対する観測量（イメージとスペクトル）を計算し、一般相対論との違いも明らかにした。

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 10 件）

- ① J. Otani, R. Takahashi, Y. Eriguchi, “Equilibrium states of magnetized toroid-central compact object systems”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 396, Issue 4, pp. 2152-2166 (07/2009) 査読有
- ② C. Bambi, K. Freese, T. Harada, R. Takahashi, N. Yoshida, “Accretion process onto super-spinning objects”, Physical Review D, vol. 80, Issue 10, id. 104023 (11/2009) 査読有
- ③ L. Huang, R. Takahashi, Z.-Q. Shen, “Testing the Accretion Flow with Plasma Wave Heating Mechanism for Sagittarius A* by the 1.3 mm VLBI Measurements”, The Astrophysical Journal, Volume 706, Issue 2, pp. 960-969 (12/2009) 査読有
- ④ H. Nagakura, R. Takahashi, “Direct Time Radio Variability Induced by Non-Axisymmetric Standing Accretion Shock Instability: Implications for M87”, The Astrophysical Journal, Volume 711, Issue 1, pp. 222-227 (03/2010) 査読有
- ⑤ Y. Kato, M. Miyoshi, R. Takahashi, H. Negoro, R. Matsumoto, “Measuring spin

of a supermassive black hole at the Galactic centre - implications for a unique spin”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 403, Issue 1, pp. L74-L78 (03/2010) 査読有

- ⑥ R. Takahashi, M. Takahashi, “Anisotropic radiation field and trapped photons around the Kerr black hole”, Astronomy and Astrophysics, Volume 513, id. A77 (04/2010) 査読有
- ⑦ R. Takahashi, T. Harada, “Observational testability of a Kerr bound in the x-ray spectrum of black hole candidates”, Classical and Quantum Gravity, Volume 27, Issue 7, pp. 075003 (04/2010) 査読有
- ⑧ M. Takahashi, R. Takahashi, “Black Hole Aurora Powered by a Rotating Black Hole”, The Astrophysical Journal Letters, Volume 714, Issue 1, pp. L176-L180 (05/2010) 査読有
- ⑨ C. Bambi, T. Harada, R. Takahashi, N. Yoshida, “Outflows from accreting super-spinars”, Physical Review D, vol. 81, Issue 10, id. 104004 (05/2010) 査読付
- ⑩ R. Takahashi, S. Mineshige, “Constraining the size of the dark region around the M87 black hole by space-VLBI observations”, The Astrophysical Journal, Volume 729, Issue 2, article id 86 (03/2011) 査読有

〔学会発表〕（計 4 件）

- ① 高橋 芳太, 日本天文学会, 2009 年 9 月 16 日, 山口大学, 山口市, 発表題目: General relativistic dissipative Bondi flow based on EIT
- ② 高橋 芳太, 日本物理学会シンポ・シ・ウム「一般相対論の直接検証: フ・ブラックホールシャド・ーの直接撮像 と重力波の検出」, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学, 岡山市, 発表題目: ブラックホールシャド・ーと降着円盤の鉄輝線
- ③ 高橋 芳太, 日本物理学会, 2010 年 9 月 11 日, 九州工業大学, 北九州市, 発表題目:

Apparent images of a black hole in
Chern-Simons modified gravity

- ④ 高橋 労太, 日本天文学会, 2010年9月23
日, 金沢大学, 金沢市, 発表題目: プラ
ックホールを通過する流体衝撃波シミュ
レーション

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計0件)
○取得状況 (計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 労太 (TAKAHASHI ROHTA)
独立行政法人理化学研究所・玉川高エネルギ
ー宇宙物理研究室・基礎科学特別研究員
40513453

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし