

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 28 日現在

機関番号：14403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22540251

研究課題名(和文)ブラックホール風の形成と観測的特徴

研究課題名(英文)Formation and Observational Properties of Black Hole Winds

研究代表者

福江 純 (Fukue, Jun)

大阪教育大学・教育学部・教授

研究者番号：80173326

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ブラックホール周辺から光速近くで吹き出す高温のガス流 - ここでは「ブラックホール風」と呼ぶ - の形成や観測的特徴について調べた。まずブラックホール風の観測的特徴に関しては、光子の最終散乱面である見かけの光球と、実際に光子が生まれる熱化面の違いを明らかにした。そして、灰色近似の場合や振動数依存性を入れた場合について、観測されるスペクトルなどを計算した。またブラックホール風との関連で、光輝くブラックホール降着円盤周辺環境でのガス体における相対論的輻射輸送の解析も進めた。さらにガス雲の輻射圧駆動についても研究を実施し、終端速度に対する新しい結果などを得た。

研究成果の概要(英文)：We have examined the formation and observational properties of a black hole wind, which is a relativistic outflow ejected from a black hole or black-hole accretion disks. We found and distinguished an apparent photosphere, which is the last scattering surface of photons, and a thermalization surface, where the photons are created and scattered off up to the apparent photosphere. We further obtained the expected spectra of a black hole wind for gray and non-gray cases. Relating to the black hole wind, we also examined the relativistic radiative transfer problem in gaseous stratified flow of moving around a luminous black-hole accretion disks. We firstly found the formal solutions for the relativistic radiative transfer problem for the plane-parallel flow. Finally, we also studied the radiatively driven winds and jets. Especially, we obtained a new insight to the magic speed for a translucent stratus.

研究分野：数物系

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 降着円盤 宇宙ジェット X線連星 活動銀河核 ガンマ線バースト 相対論的輻射輸送 相対論的輻射流体力学

1. 研究開始当初の背景

大量のガスがブラックホールに落ち込むと、ガスはブラックホールの近傍できわめて高温になり、光り輝くようになる。ガスはしばしば超臨界降着円盤を形成すると同時に、光の放射圧によってガスの多くは吹き飛ばされ、降着円盤風や放射圧駆動ジェットそして「ブラックホール風」などを形成する。

放射圧で駆動する相対論的球対称風については、従来も多くのモデルが計算されてきたが、共動系での拡散近似などが使われており、相対論的な場合に成り立つか保証がない。

また放射圧で駆動される降着円盤風については、近年、多くの数値シミュレーションもあるが、フルに相対論的な扱いはまだない。

さらに、このようなブラックホール風が観測的にどのように見えるのかについては、相対論的輻射輸送の観点からはほとんど調べられていなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、ブラックホール周辺から光速近くで吹き出す放射圧で駆動される輻射流体力学風 - ここでは**ブラックホール風**と呼ぶ - について、その形成や観測的特徴について調べることにした。また併せて、関連現象についても研究する。

具体的には、以下の4本の目標を立てて研究を進めていく。

(A) まず単純な球対称モデルを構築して、ブラックホール風の見え方やスペクトルなど観測的特徴を明らかにする。

(B) 超臨界降着円盤を伴う非球対称モデルの観測的特徴を調べる。とくに、視線の傾斜角による観測的特徴の違いをあらわにする。

(C) 相対論的輻射流体力学の基礎研究および精密化や、さまざまな素過程を取り入れて、ブラックホール風の形成過程や加速メカニズムを求めていく。

関連して、降着円盤や周辺環境での輻射輸送の諸問題を、場合によっては相対論的效果なども考慮して、多面的に調べていく。

3. 研究の方法

(A) 球対称ブラックホール風の観測的特徴簡単なモデルを用いて、ブラックホール風や降着円盤風の観測的な特徴について、相対論的效果を考慮して、見かけの光球面の形状や観測されるスペクトルなどを調べる。

最初は、輻射場は黒体輻射を仮定し、散乱などは考慮せずに、簡単な場合を調べる。続いて、散乱の効果などを入れて、スペクトルなど観測的な特徴がどうなるかを調べる。さらに振動数依存性なども調べる。

一方、相対論的降着流の場合についても、散乱の効果その他を考慮して、観測的な特徴を調べる。

(B) 超臨界降着円盤を伴うブラックホール風の観測的特徴

超臨界降着円盤の中心部から、質量流出率の大きい光学的に厚い風が吹き出すと、ブラックホール風の“光球”によって、中心部は覆われてしまうだろう。その結果、“裸の”超臨界降着円盤に特徴的な平坦なSEDは現れなくなると予想される。超臨界降着円盤からガスが吹き出す物理的なモデルを構築して、超臨界降着円盤風の見かけの光球面の形状やスペクトルなどを求める。

(C) 相対論的輻射流体力学の精密化とブラックホール風への適用

相対論的輻射流体力学の基礎方程式は、相対論的領域でのクロージャー関係が不明なため、未完成である。相対論的輻射流体力学の基礎方程式系の見直しについても、本研究で取り扱う。

最初は、灰色近似のもとで、鉛直方向に1次元で吹き出す流れについて、速度が一定の近似で解析する。続いて、振動数依存性をもった輻射輸送の問題を取り扱っていく。

予備的な段階として、高温ガスでできた降着円盤の静止大気に関して、平行平板近似のもとで、輻射輸送の問題を再検討する。降着円盤の光学的厚みが有限であることや大気内に熱源があることなどを考慮して、降着円盤輻射輸送を解析的に調べる。また中心星の照射や自己照射の効果についても調べる。

4. 研究成果

(A) 球対称ブラックホール風の観測的特徴

まず輻射場について黒体輻射を仮定し、散乱も考慮しない単純なブラックホール風の観測的な特徴について、相対論的效果を考慮して、見かけの光球面の形状や観測されるスペクトルなどを調べた (Fukue 2010, Fukue and Iino 2010)。そのような場合については、ブラックホール風の見かけの光球が非球対称となり、強い周縁減光効果と相対論的ピーキングが働いて、観測されるスペクトルが黒体輻射から大きくずれた多温度黒体輻射的になることがわかった。

続いて、散乱の効果などを入れて、スペクトルなど観測的な特徴がどうなるかを調べた (Ogura and Fukue 2013)。ブラックホール風は高温で密度が低いいため、自由自由吸収に比べて電子散乱が卓越している。そのため、散乱の効果を検討すると、最終散乱面である見かけの光球とガスから光子が生まれる熱化面とが大きく乖離し、熱化面が見かけの光球よりも何桁も小さい内部領域に位置することがわかった。しかも熱化面はほぼ球状になることもわかった。そして、熱化面で生成された高温のスペクトル光子が、見かけの光球まで散乱されて出て行って、最終的に、高温の黒体輻射的なスペクトルとして観測されることが判明した。まったくもって予想外の結果であった。

さらに現在は、自由自由吸収の振動数依存性まで考慮して、ブラックホール風の観測的特徴を調べている (Tomida and Fukue, in preparation)。すなわち、従来は振動数依存性を考慮せず灰色近似で扱ってきたものを、振動数依存性まで考慮して扱うことにした。その結果、高振動数では従来のように散乱が強く効いて、見かけの光球 (最終散乱面) と熱化面が大きく乖離するが、低振動数では吸収が主で散乱領域が狭いことが判明した。

なお、球対称ブラックホール風に関連し、球対称降着流の観測的特徴についても調べ、見かけの光球が大きく球形からずれることなどを発見した (Kobayashi and Fukue 2013)

(B) 超臨界降着円盤を伴うブラックホール風の観測的特徴

超臨界降着円盤の中心部から、質量流出率の大きい光学的に厚い風が吹き出すと、ブラックホール風の“光球”によって、中心部は覆われてしまうだろう。その結果、“裸の”超臨界降着円盤に特徴的な平坦なSEDは現れなくなると予想される。実際に、超臨界降着円盤からガスが吹き出す物理的なモデルを構築して、超臨界降着円盤風の見かけの光球面の形状やスペクトルなどを求めた (Fukue 2011c)。その結果、やはり平坦なSEDとは違ったスペクトルが得られた。

(C) 相対論的輻射流体力学の精密化とブラックホール風への適用

最初は簡単な場合として、灰色近似のもとで、鉛直方向に1次元で吹き出す流れについて、速度が一定の近似で解析し、相対論的輻射輸送の新しい解析解を求めることに成功した (Fukue 2011a, 2011b)。

またやはり振動数依存性を考慮しない灰色近似は置いたが、散乱の効果を取り入れて、相対論的平行平板流における相対論的輻射輸送問題を調べ、散乱の入った解析解を求めるなど、新しい知見を得た (Fukue 2012a)。

一方で、高温ガスでできた降着円盤の静止大気に関して、平行平板近似のもとで、輻射輸送の問題を再検討した。まず、降着円盤の光学的厚みが有限であることや散乱の効果などを考慮して、降着円盤輻射輸送を解析的に調べ、散乱の効果を入れた解析解をはじめて得ることができた (Fukue 2011d)。また中心星の照射の効果についても調べ、やはり散乱の効果を得た解析解などを得た (Fukue 2012b)。さらに、散乱が非等方な場合などについても、基礎的研究を実施した (Fukue 2012c)。

ブラックホール風や相対論的輻射輸送との関連で、光輝くブラックホール (降着円盤) 周辺環境でのガス体における相対論的輻射輸送の解析も進めた。まずガス雲が静止している場合について、ガス雲内部での輻射輸送やスペクトルなどについては解析を終えた (Fukue 2013a, 2013b)。現在は、ガス雲が

相対論的運動をしている場合の解析を続けている。さらにガス雲の輻射圧駆動についても解析して、終端速度に対する新しい結果などを得た (Fukue 2014a, 2014c)。

もっとも直近の成果としては、鉛直方向1次元の平行平板近似のもとで、相対論的輻射輸送方程式の形式解をはじめて求めることに成功した。そして相対論的平行平板流に適用し、相対論的形式解を数値的に積分し、逐次的に厳密な解を得て、相対論的平行平板流におけるエディントン因子の振る舞いなどを明らかにした (Fukue 2014d, submitted)。

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 19 件) すべて査読有

- 1) Fukue, J., 2010, PASJ 62, No.2, 255-262
- 2) Fukue, J., Iino, E., 2010, PASJ 62, No.6, 1399-1405
- 3) Fukue, J., 2011a, PTP 125, No.4, 837-850
- 4) Fukue, J., 2011b, PTP 126, No.1, 135-155
- 5) Fukue, J., 2011c, PASJ 63, No.3, 803-811
- 6) Fukue, J., 2011, PASJ 63, No.5, L53-L55
- 7) Fukue, J., 2011d, PASJ 63, No.6, 1273-1280
- 8) Fukue, J., 2012a, PASJ 64, No.3, 52-1-52-12
- 9) Fukue, J., 2012b, PASJ 64, No.5, 106-1-106-10
- 10) Fukue, J., 2012c, PASJ 64, No.6, 132-1-132-9
- 11) Kobayashi, H. and Fukue, J. 2013, PASJ 65, No.1, 36-1-36-4
- 12) Fukue, J., 2013, PTEP 053E02, 1-17
- 13) Ogura, K. and Fukue, J., 2013, PASJ 65, 92-1-92-6
- 14) Fukue, J., 2013a, MNRAS 436, 2550-2559
- 15) Fukue, J., 2013b, MNRAS 436, 2560-2575
- 16) Fukue, J., 2014a, PASJ, 66, No.1, 13(1-7)
- 17) Fukue, J., 2014b, PASJ, in press
- 18) Fukue, J., 2014c, PASJ, in press
- 19) Fukue, J., 2014d, PASJ, submitted

[学会発表] (計 22 件)

- 1) 福江 純 2010年9月23日
日本天文学会 2010年秋季年会 (金沢大学)

- 2) 齊藤秀樹、福江 純 2010年9月23日
日本天文学会2010年秋季年会(金沢大学)
- 3) 福江 純 2011年3月16日
日本天文学会2011年春季年会(筑波大学)
- 4) 齊藤秀樹、福江 純 2011年3月16日
日本天文学会2011年春季年会(筑波大学)
- 5) 龍野洋平、福江 純、渡會兼也
2011年3月18日
日本天文学会2011年春季年会(筑波大学)
- 6) 福江 純 2011年9月20日
日本天文学会2011年秋季年会(鹿児島大学)
- 7) 小倉和幸、福江 純 2011年9月20日
日本天文学会2011年秋季年会(鹿児島大学)
- 8) 小倉和幸、福江 純 2012年3月20日
日本天文学会2012年春季年会(龍谷大学)
- 9) 福江 純 2012年3月20日
日本天文学会2012年春季年会(龍谷大学)
- 10) 小林 弘、福江 純 2012年9月19日
日本天文学会2012年秋季年会(大分大学)
- 11) 福江 純 2012年9月19日
日本天文学会2012年秋季年会(大分大学)
- 12) 小倉和幸、福江 純 2013年3月21日
日本天文学会2013年春季年会(埼玉大学)
- 13) 福江 純 2013年3月21日
日本天文学会2013年春季年会(埼玉大学)
- 14) 梅津寛明、小倉和幸、福江 純
2013年3月22日
日本天文学会2013年春季年会(埼玉大学)
- 15) 竹中萌美、福江 純 2013年3月22日
日本天文学会2013年春季年会(埼玉大学)
- 16) 福江 純 2013年9月10日
日本天文学会2013年秋季年会(東北大学)
- 17) 小倉和幸、福江 純 2014年9月10日
日本天文学会2013年秋季年会(東北大学)
- 18) 梅津寛明、小倉和幸、福江 純
2014年9月10日
日本天文学会2013年秋季年会(東北大学)
- 19) 福江 純 2014年3月20日
日本天文学会2014年春季年会(ICU)
- 20) 小倉和幸、福江 純 2014年3月20日
日本天文学会2014年春季年会(ICU)
- 21) 富田瑞穂、福江 純 2014年3月20日
日本天文学会2014年春季年会(ICU)
- 22) 増田剛大、福江 純 2014年3月20日
日本天文学会2014年春季年会(ICU)

〔図書〕(計11件)

- 1) 福江 純 『SFアニメを科楽する』
2010年3月15日
日本評論社
- 2) 福江純編著 『天文マニア養成マニュアル
未来の天文学者へ送る先生からのエール』
2010年8月12日
恒星社厚生閣
- 3) 天文宇宙検定委員会編 『天文宇宙検定3
級 公式テキスト - 星空博士』
2011年6月15日
恒星社厚生閣
- 4) 天文宇宙検定委員会編 『天文宇宙検定2
級 公式テキスト - 銀河博士』

- 2011年8月30日
恒星社厚生閣
- 5) 天文宇宙検定委員会編 『天文宇宙検定1
級 公式問題集 - 天文宇宙博士』
2012年7月10日
恒星社厚生閣
- 6) 天文宇宙検定委員会編 『天文宇宙検定4
級 公式テキスト - 星博士ジュニア 20
12 ~ 2013年版』
2012年8月7日
恒星社厚生閣
- 7) 天文宇宙検定委員会編 『天文宇宙検定3
級 公式テキスト - 星空博士 2013 ~
2014年版』
2013年5月30日
恒星社厚生閣
- 8) 天文宇宙検定委員会編 『天文宇宙検定2
級 公式テキスト - 銀河博士 2013 ~
2014年版』
2013年5月30日
恒星社厚生閣
- 9) 福江 純 『完全独習 現代の宇宙論』
2013年10月30日
講談社サイエンティフィク
- 10) 福江 純 『マンガでわかる量子力学』
2014年1月25日
ソフトバンククリエイティブ
- 11) 福江 純、和田桂一、梅村雅之 『宇宙流
体力学の基礎』
2014年2月25日
日本評論社

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
福江 純 (FUKUE, Jun)
大阪教育大学・教授

研究者番号：80173326

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：