

令和 3 年 5 月 3 日現在

機関番号：14403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03701

研究課題名（和文）相対論的輻射輸送・相対論的輻射流体の基礎研究

研究課題名（英文）Fundamental Study of Relativistic Radiation Hydrodynamics

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） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：相対論的輻射流体力学と呼ばれる難解な理論天文学の一分野について、基礎的な研究と応用研究を行った。基礎的な研究としては、平行平板など簡単化した状況で、相対論的輻射輸送方程式を厳密に解いて適切なクロージャー関係を見だし、限定的ではあるが、相対論的輻射流体力学の定式化を完成させた。

応用的な研究としては、ブラックホール降着円盤からの相対論的輻射圧駆動風を数値的に解き、また球対称な輻射圧駆動ブラックホール風の詳細な解析も行った。

さらに、輻射性衝撃波の問題にも取り組み、円盤降着流においてはじめて輻射性衝撃波の問題を扱い、衝撃波前駆領域の構造を解くことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールのような高エネルギー天体の周辺では、周囲から落下してくるガスが数千万度から数十億度もの高温状態となり、回転運動のために、しばしば光り輝くブラックホール降着円盤を形成している。そのような高温ガスと輻射（光）の混合流体においては、ガスと輻射の相互作用を考慮した相対論的輻射流体力学という取り扱いが必要となる。本研究ではまず基礎的研究を行った。

さらに応用研究としては、ブラックホール降着円盤から輻射の圧力で押し出される降着円盤風や、ブラックホール近傍から球対称に吹くブラックホール風を解析した。なんでも吸い込むと思われるブラックホール近傍からは高エネルギーの風が吹いているのである。

研究成果の概要（英文）：We performed the fundamental and applied studies on the relativistic radiation hydrodynamics in the field of theoretical astrophysics. As fundamental studies, we formulated the basic equations for the relativistic radiation hydrodynamics under the plane-parallel and spherical approximations.

As applied studies, we solved the relativistic radiative winds from a black hole accretion disk under the double iterative method. We also solved the relativistic spherical black-hole winds, focusing our attention on the critical points.

In addition, we have examined the radiative shocks in the disk accretion flows, and firstly solved the radiative precursor. We also examined the relativistic radiative shocks in the one-dimensional case and disk accretion flows.

研究分野：天文学

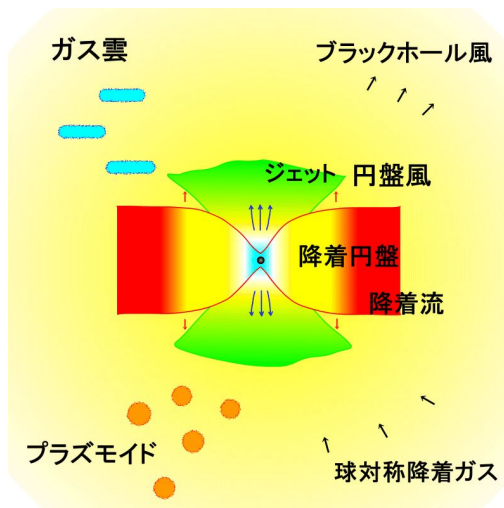
キーワード：ブラックホール降着円盤 ブラックホール風 相対論的輻射流体力学 輻射性衝撃波

1. 研究開始当初の背景

ブラックホール風を近似的なモーメント式ではなく相対論的輻射輸送で解く

マイクロクェーサーからクェーサーまで、ブラックホール活動天体の観測は近年ますます進展している。鉄吸収線などでもアウトフローの証拠が見つかり、細く絞られた亜光速ジェット以外にも、BAL (broad absorption line) クェーサーや UFO (ultra-fast outflows) など高速アウトフローが発見された。ブラックホール周辺環境ではさまざまな相対論的ガス流が存在している(図1)。

図1：ブラックホール周辺環境のガス流のイメージ。ブラックホール風や降着円盤風、降着流など大局的の流れ、および個別のガス雲は、ブラックホール降着円盤からの強い輻射を受け、運動量やエネルギーを授受して駆動されると同時に、流れの内部やガス雲中で相対論的輻射輸送が起こり、放射スペクトルを変質させている。



一方、このような光速近い領域における相対論的輻射輸送の理論研究は、まだまだ発展途上で未解決の問題が山積みである。

たとえば、ブラックホール風や中性子風など、輻射圧で駆動される相対論的球対称風の計算は、通常、流体方程式と輻射モーメント式をカップルさせて解かれている。しかし、FLD (flux-limited diffusion) 近似などのクロージャー関係は相対論的領域では因果律に抵触するため不適切で、また球対称流ではエディントン因子も大きく変化する。したがって、近似的なモーメント式を使わずに、相対論的輻射輸送方程式をまじめに解くことが重要な課題である。

そこで、【1】基礎研究として、相対論的平行平板流における輻射輸送の相対論的形式解を、はじめて導出した (Fukue 2014)。続いて、相対論的輻射輸送方程式と相対論的流体方程式を同時に逐次近似で数値的に解くことにより、平行平板流 (Fukue 2015) や球殻風 (Fukue 2016) などの場合で、輻射場と速度場の厳密解を得ることができるようになった。

さらに、平行平板に引き続き、【2】相対論的球対称流における輻射輸送の相対論的形式解も、インパクトパラメータ法の考え方にもとづいて、はじめて導出できた (Fukue 2016)。

以上の状況のもとで、相対論的輻射輸送方程式をきちんと解いて、輻射圧で駆動される球対称なブラックホール風の問題に精力的に取り組む準備が整った。

2. 研究の目的

多年にわたり、「ブラックホール風」をキーワードに、モーメント式を用いた輻射圧駆動風の精密なモデルや、ブラックホール風の観測的な特徴を調べ、相対論的ピーキング効果や散乱の効果など、興味深い成果を挙げてきた。しかしながら、研究を進めれば進めるほど、新たな未解決の問題が続々と現れてきた。相対論的平行平板流における輻射輸送の相対論的形式解の発見なども、その一例だ。さらに、ブラックホール風や中性子風など輻射圧で駆動される相対論的球対称風を正しく扱うためには、相対論的輻射輸送方程式を厳密に解く必要があることがわかった。

ブラックホール周辺環境における相対論的輻射輸送・輻射流体の諸問題を系統的に解決する。

本研究の研究期間内には、相対論的輻射輸送・輻射流体の手法を用いて、ブラックホール風や降着円盤風の形成を調べる。さらには周辺のガス雲やガス流における相対論的輻射輸送と輻射流体の問題を多面的に調べ、観測的特徴を明らかにしていくことが目的である。

3．研究の方法

【A】相対論的輻射輸送の基礎研究とブラックホール風の形成

ブラックホール風における、相対論的輻射輸送方程式と相対論的流体方程式を同時に解く際、最初の段階では、簡単のために、中心天体の重力場、ガスの圧力勾配、輻射場の振動数依存性などは無視して取り扱う。続いて、(1)重力場の考慮、(2)ガス圧の考慮など、適用範囲を広げていく

【B】相対論的な降着円盤風の形成

平行平板近似のもとで、相対論的な降着円盤風の形成モデルが構築できたら、BAL クェーサーやUFOなどの天体に対しても、相対論的輻射輸送を用いた解析を行う。

【C】相対論的輻射性衝撃波の構造

当初予定にはなかったが、円盤降着流における輻射性衝撃波の構造や、相対論的輻射性衝撃波の構造も求めることにした。

4．研究成果

まず、基礎研究部分については、平行平板流 (Fukue 2015) や球対称流 (Fukue 2016) などである程度は実績を積んできた。さらに、降着円盤の強い輻射場によって鉛直方向に駆動される輻射圧駆動風を、相対論的輻射輸送方程式を厳密に解きながら、輻射場の逐次近似と、輻射場と流体場の逐次近似という二重逐次近似で解くことができた (Takeda and Fukue 2019)。

またこれまでに培ってきた相対論的輻射流体力学の知見を使い、輻射流体力学における波動現象の一つとして、輻射性衝撃波の問題に取り組んだ。まず、円盤降着流においてはじめて (非相対論的な) 輻射性衝撃波の問題を取り扱い、衝撃波前駆領域の構造を解くことに成功した (Fukue 2019a)。さらに相対論的な輻射性衝撃波の問題に進み、単純な1次元輻射性衝撃波と円盤内の輻射性衝撃波の構造を、それぞれ解くことにも成功した (Fukue 2019b, c)。球対称降着流における輻射性衝撃波についても構造解析を行った (Fukue 2019d)。

これまで培ってきた知識や手法を用いて、標準降着円盤の鉛直方向の構造について、非常にシンプルな解析的モデルを作ることに成功した (Fukue 2020a)。同じく副産物として、光り輝く星団からの輻射圧駆動星団風についても調べた (Fukue 2020b)。

最後に、長年の懸案であった、輻射圧駆動ブラックホール風について、詳細な解析も行った (Yamamoto and Fukue 2020)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 71
2. 論文標題 Radiative shocks in spherical accretion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PASJ	6. 最初と最後の頁 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 70
2. 論文標題 Albedo of an irradiated plane-parallel atmosphere with finite optical depth	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PASJ	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 70
2. 論文標題 Radiatively-suppressed spherical accretion under relativistic radiative transfer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PASJ	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 J. Fukue	4. 巻 476
2. 論文標題 Radiatively driven relativistic spherical winds under relativistic radiative transfer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 MNRAS	6. 最初と最後の頁 1840-1848
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty358	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 70
2. 論文標題 Similarity solutions of time-dependent relativistic radiation-hydrodynamical plane-parallel flows	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PASJ	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 71
2. 論文標題 Radiative shocks in disk accretion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PASJ	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 483
2. 論文標題 Relativistic radiative shocks revisited	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MNRAS	6. 最初と最後の頁 2538-2548
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 483
2. 論文標題 Relativistic radiative shocks in disk accretion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MNRAS	6. 最初と最後の頁 3839-3850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 483
2. 論文標題 Relativistic radiative shocks in disk accretion	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MNRAS	6. 最初と最後の頁 3839-3850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty3380	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Fukue	4. 巻 499
2. 論文標題 Analytical model for the local vertical structure of thin accretion discs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MNRAS	6. 最初と最後の頁 3571-3577
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa3052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jun Fukue	4. 巻 72
2. 論文標題 Radiative wind from a luminous star cluster	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PASJ	6. 最初と最後の頁 96 (1-13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Yamamoto and J. Fukue	4. 巻 502
2. 論文標題 Radiatively-driven black hole winds revisited	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MNRAS	6. 最初と最後の頁 5797-5807
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab346	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 福江 純
2. 発表標題 球対称降着流における輻射性衝撃波の構造
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大海ほのか、福江 純
2. 発表標題 Influence of the magnetic field for radiative shocks
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福江 純
2. 発表標題 相対論的状態方程式を用いた相対論的輻射性衝撃波の構造
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福江 純
2. 発表標題 円盤降着流における輻射性衝撃波の構造
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福江 純
2. 発表標題 円盤降着流における相対論的輻射性衝撃波の構造
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹田奈央、福江 純
2. 発表標題 輻射圧駆動降着円盤風のモデル
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福江 純
2. 発表標題 相対論的状態方程式を用いた相対論的輻射性衝撃波の構造
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大海ほのか、福江 純
2. 発表標題 Influence of the magnetic field for relativistic radiative shocks
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本凌也
2. 発表標題 一般相対論的輻射圧駆動ブラックホール風の再考
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 福江 純 他編	4. 発行年 2020年
2. 出版社 恒星社厚生閣	5. 総ページ数 290
3. 書名 極・宇宙を解く	

1. 著者名 Shoji Kato and Jun Fukue	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 625
3. 書名 Fundamentals of Astrophysical Fluid Dynamics	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------