

令和元年6月13日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03638

研究課題名(和文) 一般相対論的輻射流体によるブラックホール超臨界降着流と超大質量星の研究

研究課題名(英文) Study of Supercritical Black Hole Accretion and Supermassive Stars with General Relativistic Radiation Hydrodynamics

研究代表者

梅村 雅之 (Umemura, Masayuki)

筑波大学・計算科学研究センター・教授

研究者番号：70183754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,400,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホール時空の下で輻射流体力学計算を実現するため、一般相対論的輻射流体輸送コードARTISTの開発を行った。ブラックホール時空としては、Kerr-Shild座標によるKerr時空を用いた。ARTISTは、共変形式の輻射輸送方程式を解き、測地線に沿って光の軌跡を時間依存で解くため、因果律が厳密に満たされ、光線の湾曲、時空の引きずり、重力赤方偏移等の一般相対論効果を正しく扱うことができる。このコードを用いて、ブラックホールを周回する光源が発する光の波面の伝播を解いた結果、これまでの近似法のように波面の衝突は起こらず、一般相対論効果を正しく扱うことが可能なことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般相対論的なブラックホール時空における輻射輸送を解くARTISTコードは、曲率空間における光の測地線に沿って共変な輻射輸送方程式を解く方法であり、世界初の試みである。これを用いることで、ブラックホール周りの光学的に厚い媒質において、正確な輻射輸送計算が可能になり、超巨大ブラックホールの起源を解く鍵となる超臨界降着や超大質量星の一般相対論的輻射流体計算が大きく進展することが期待される。これにより、高赤方偏移クェーサーや銀河バルジの中心に普遍的に観測されている超巨大ブラックホールの起源、ならびに銀河との共進化関係に迫ることができる。

研究成果の概要(英文)：We have developed a general relativistic radiation transfer code ARTIST (Authentic Radiation Transfer in Space-Time) to realize radiation hydrodynamics calculation under black hole space-time. The Kerr-Shild coordinates are employed in the Kerr metric. Since ARTIST solves the covariant radiative transfer equation with tracing the light propagation along geodesics, it satisfies the causality strictly and treat properly the general relativistic effects such as light bending, frame dragging, and gravitational redshifts. Using ARTIST, we have solved the propagation of wave fronts from a rotating source around a black hole, and demonstrated that ARTIST can properly treat the general relativistic effects without the collision of wave fronts.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 一般相対性理論 輻射輸送 輻射流体力学 数値シミュレーション

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

楕円銀河や円盤銀河バルジの中心領域の星やガスの運動の観測から、楕円銀河および銀河バルジの中心に超巨大ブラックホールが存在し、ブラックホール質量はバルジ質量の約 1/1000 になっているという“ブラックホール-バルジ質量関係”が見出されている (Kormendy & Richstone 1995; Magorrian et al. 1998; Merrifield et al. 2000; Merritt & Ferrarese 2001, Marconi & Hunt 2003)。これは、銀河中心に超巨大ブラックホールを作る普遍的なメカニズムが存在することを示している。しかし、そのメカニズムはまだ明らかにされていない。最近発見された赤方偏移 7 を超えるクェーサー (Mortlock et al. 2011) は、2 億太陽質量に達する超巨大ブラックホールが、宇宙年齢 8 億年で誕生していることを明らかにした。これは、超巨大ブラックホール形成メカニズムを解き明かす上で、重要な制限を与える。ブラックホールの種が初代星の超新星残骸として生まれる数 10 太陽質量のブラックホールであるとする、8 億年以内に 2 億太陽質量巨大ブラックホールを作るためには、エディントン比 1.4 の質量降着を続ける必要がある。エディントン比が 1 を超える“超臨界降着”は理論的には可能であることが先行研究で示されている (Abramowicz et al. 1995)。しかし、超臨界降着流は輻射性フィードバックにより数億年にわたって維持することは困難であるということが指摘されており (Milosavljevic et al. 2009a,b)、かつ観測されているクェーサーの平均的なエディントン比は 0.1 程度である (Steinhardt & Elvis 2010)。このことを考えると、クェーサー・ブラックホールができるずっと前にエディントン比 1 を大幅に超える超臨界降着を実現しなければならない。しかし、これまでの研究で、そのような超臨界降着が可能であるかは明らかにされていない。

超臨界降着は、輻射優勢のガス降着であるため、輻射圧に妨げられない降着を実現する必要がある。これを可能にするのは、光子捕獲である。光子捕獲とは、輻射性拡散によって、輻射が降着円盤から脱出する前にブラックホールに吸い込まれる過程である。光子捕獲は、ブラックホール半径にエディントン比を

乗じた半径以内で起こるため、一般相対論的な現象である。これまで、光子捕獲を入れた数値シミュレーションが行われてきたが (Ohsuga et al. 2005, 2011)、非相対論的な拡散近似を用いたものであった。この問題の正確な答えを得るためには、一般相対論的な輻射流体計算が必要になる。輻射流体計算では、流体方程式と輻射場の連立方程式系を閉じさせるクロージャー関係が必要になる。一般相対論的輻射流体計算は、この数年 FLD 法 (フラックス制限拡散近似) や、M1 クロージャー近似を用いた計算が行われるようになってきた (表 1)。しかし、FLD 法は輻射エネルギーの情報しか持たず、M1 クロージャーは輻射フラックスまでの近似になっており、輻射輸送を正確に扱ったものではない。これらの近似は輻射場の波面を扱っていないため、ブラックホール近傍での輻射の振る舞いは正しく解けていない。そこで我々は、一般相対論的なブラックホール時空における輻射輸送を正確に解く方法を開発する。これは、曲率空間における光の測地線に沿って共変な輻射輸送方程式を解く方法であり、世界初の試みである。これを用いて正確なクロージャー関係であるエディントン・テンソルを決定することで、完全な一般相対論的輻射流体計算が実行できる。

### 2. 研究の目的

超臨界降着について明らかにすべき問題は、“どれだけの質量降着が可能であるか”である。超臨界降着円盤については、これまでの FLD 近似計算で、光子捕獲効果を入れることにより、円盤光度の質量降着率依存性が示されている。しかし、FLD 近似では、光学的厚さが 1 より大きい領域から 0 に近づく領域で、正しい輻射輸送計算が行われていない。本研究では、Kerr 時空の中で、一般相対論的な輻射輸送計算と流体計算を結合し、超臨界降着円盤の物理を明らかにする。Kerr 時空として、地平線を超えてブラックホールに吸い込まれる光の軌道を扱える Kerr-Schild 座標を用い、我々が開発したコードにより、測地線に沿った共変系の輻射輸送方程式を解く。そして、輻射輸送計算の結果からエディントン・テンソルを求め、これによって輻射流体方程式系を閉じさせ、これをテトラド変換により、局所ローレンツ系から曲率空間座標系に変換することで、光線の湾曲、時空の引きずり、重力赤方偏移等の一般相対論効果を正しく入れた完全一般相対論的な計算を行う。さらに、ブラックホールが星間ガス中を運動する場合のホイール・リットルトン降着について、超臨界降着が可能であるかを明らかにする。

曲率空間での輻射輸送方程式を解く一般相対論的な輻射流体計算は世界初である。これを用いることで、銀河中心の超巨大ブラックホールの起源を解く鍵となる超臨界降着と超大質量星の完全一般相対論計算を世界で初めて実現できる。これにより、高赤方偏移クェーサーや銀河

	輻射計算			
	Optically-thin または ポリトロープ	FLD (Flux Limited Diffusion)	M1 Closure	6次元輻射輸送
非相対論	40年	20年	10年	10年
特殊相対論	30年	10年	数年	数年
一般相対論	30年	数年	数年	初の取り組み (本研究)

表 1: 3次元輻射流体計算: 世界におけるこれまでの取り組み年数

バルジの中心に普遍的に観測されている超巨大ブラックホールの起源に迫ることができる。本計算では、輻射輸送計算により、超臨界降着がどのように観測されるかを正確に予言することができる。これを、巨大ブラックホールが急速成長段階にあると考えられている狭輝線 1 型 Seyfert 銀河の観測スペクトルと突き合わせることで、ブラックホール成長段階を明らかにすることができる。

### 3. 研究の方法

代表者と分担者は、既に共同で一般相対論的輻射輸送計算コードを開発中であり、本研究では、これを流体計算と結合して一般相対論的輻射流体計算コードの開発を行う。一般相対論的輻射輸送コードは、梅村らが開発した非相対論的な 6 次元輻射輸送コード ART の計算手法を、一般相対論的な時空計量に適用したものである。この輻射輸送コードは、測地線に沿って光の軌跡を時間依存で解くため、因果律が厳密に満たされ、光線の湾曲、時空の引きずり、重力赤方偏移等の一般相対論効果を正しく扱うことが可能である。また、これまでの近似法のように波面の衝突は起こらず、波として交差することが可能である。これによって、超臨界降着流におけるブラックホール近傍での光子捕獲を正確に扱うことができる。本研究では、固定時空 (Kerr 時空) の下で一般相対論的輻射輸送計算コードを改良し、光学的に厚い領域と薄い領域とを分けて扱うことができるようにする。超臨界降着流の計算においては、光子捕獲が起こる光学的に厚い領域と光子の脱出が起こる光学的に薄い領域を同時に扱う必要がある。光学的に十分厚い領域では、光子は多重散乱によって拡散する。一方光学的に薄い領域に入ると、平均自由行程以内で光子は脱出する。これまでの FLD 法 (フラックス制限拡散近似) では、光学的に薄い部分の輻射輸送は解かず、フラックス制限関数によって近似してきたが、我々の方法はこのフラックス制限近似の部分の輻射輸送計算に置き換えることに対応する。さらに因果律を保持する相対論的な輻射拡散の計算法を開拓し、我々が開発した共変形式の輻射輸送計算コードを結びつけ、光学的厚さの広いレンジに渡って適用可能な一般相対論的輻射輸送計算コードが完成する。そして、大局的な一般相対論的輻射輸送計算で得られた局所ローレンツ系でのエディントン・テンソルをテトラド変換により曲率空間 (リーマン空間) へ移し、一般相対論的流体方程式と結合することで、一般相対論的輻射流体コードを開発する。

### 4. 研究成果

宇宙における様々な現象でエネルギー輸送を主として司るのは輻射であり、これを記述する方程式は輻射輸送輻射輸送方程式 (RTE) である。RTE は、光子分布関数のボルツマン方程式であり、空間 3 次元の問題の場合、座標 3 次元、方向 2 次元、振動数 1 次元の 6 次元問題となる。この高次元性のため、1990 年代までは空間 3 次元の RTE を直接扱うことができず、平行平板や球対称問題に限定されて解かれてきた。研究代表者らは、散乱を伴う定常輻射場の輻射輸送問題に対し、世界に先駆けて 3 次元格子上的 RTE を数値的に解く方法を実現した (Nakamoto, Umemura, Susa, 2001, MNRAS, 321, 593)。この方法は各格子で輻射場を内挿補間してつなぐ方法であるため、光の伝播過程で数値拡散を伴う。そこで、光線を空間内で直線状に飛ばし、格子点の両側の輻射場から格子点上の輻射量を求める新たな ART (Authentic Radiation Transfer) 法を開発した (図 1 左)。ART 法は、これまでの方法と比べ計算量はあまり増やさず、数値拡散を押さえ、RTE を精度よく解くことができる。そして、ART 法を用いて散乱を含む輻射輸送問題を精度よく高速に解くことに成功した (Iliev et al. 2006, MNRAS, 371, 1057)。

この実績を基に、代表者と分担者は共同で、一般相対論的輻射輸送計算コードの開発を行った。このコードは、代表者らが開発した非相対論的な 6 次元輻射輸送コード ART の計算手法を、一般相対論的な時空計量に適用したものである。ブラックホール時空としては、Kerr 時空を用いる。Kerr 時空を記述する座標

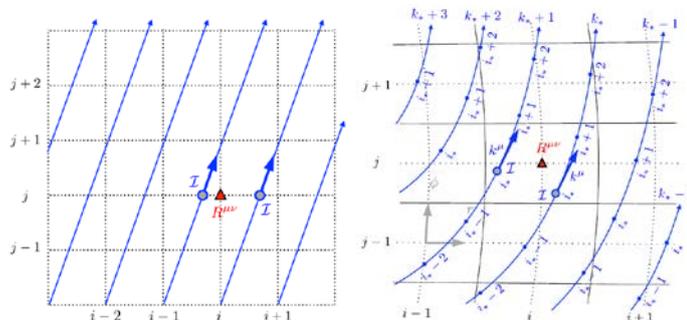


図 1 : 非相対論的輻射輸送コード ART (左) と一般相対論的輻射輸送コード ARTIST (右)

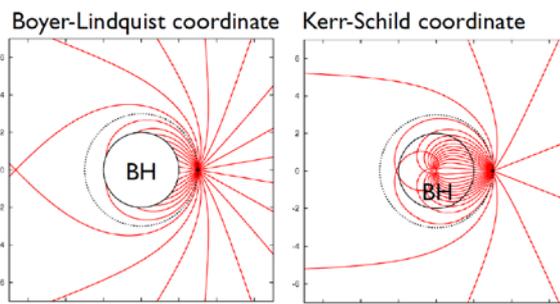


図 2 : Boyer-Linquist 座標 (左) と Kerr-Shild 座標 (右)

系としては、Boyer-Linquist 座標と Kerr-Shild 座標があるが(図 2), Boyer-Linquist 座標は、地平面が特異面となる座標系であるため、光が地平面に近づくにつれて、時間が進まなくなる。この結果、地平面近くでの光の軌跡を追うことが事実上困難になる。一方、Kerr-Shild 座標の場合は、有限時間で地平面を横切る光線を扱うことができ、地平面内に吸い込まれる光と地平面付近を周回して脱出する軌道を同時に解くことが可能となる。本研究では、Kerr-Shild 座標を用いて、共変形式の輻射輸送方程式を解き、測地線に沿って光の軌跡を時間依存で解くため、因果律が厳密に満たされ、光線の湾曲、時空の引きずり、重力赤方偏移等の一般相対論効果を正しく扱うことができることができる一般相対論的輻射流体輸送コード ARTIST (Authentic Radiation Transfer in Space-Time) の開発を行った(図 1 右) (Takahashi & Umemura, 2017, MNRAS, 464, 4567)。このコードを用いて、ブラックホールを周回する光源が発する光の波面を解いた結果、因果律が厳密に満たされ、光線の湾曲、時空の引きずり、重力赤方偏移等の一般相対論効果を正しく扱うことが可能なことが確認できた。この計算で、これまでの近似法のように波面の衝突は起こらず、波として交差することが可能であることも確認した。また、この計算コードの精度を検証するため、ブラックホール周りの測地線に沿って、光の伝播を解析的にレイトレーシングするコード MASTER を開発し、同じ問題を解いた結果、ARTIST の結果は MASTER の結果と非常に良い一致を示した。これによって、ARTIST が十分な精度で輻射伝搬を追えていることを確認できた(図 3)。

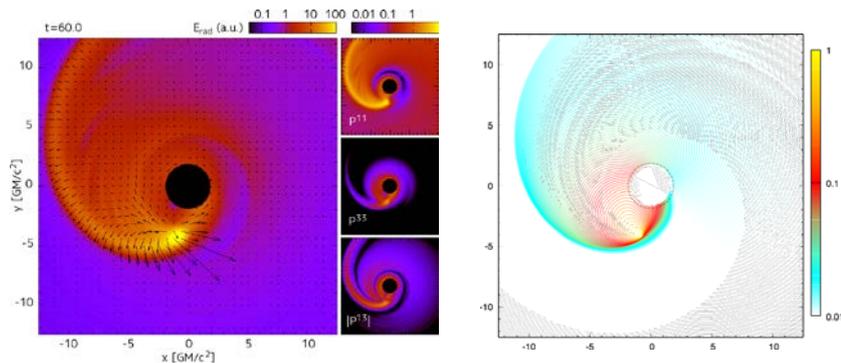


図 3: ブラックホールを周回する光源からの波面の伝播。ARTIST による数値計算 (左) と MASTER による解析的計算 (右)。

ARTIST は、光学的に厚い媒質において一般相対論的輻射輸送を扱うことができるが、光学的に厚さが増し、拡散が支配的になる場合には、因果律を保つ相対論的輻射拡散の扱いが必要になる。特に、超臨界降着流の計算においては、光子捕獲が起こる光学的に厚い領域と光子の脱出が起こる光学的に薄い領域を同時に扱う必要がある。光学的に十分厚い領域では、光子は多重散乱によって拡散する。一方、光学的に薄い領域に入ると、平均自由行程以内で光子は脱出する。これまでの FLD 法(フラックス制限拡散近似)では、光学的に薄い部分の輻射輸送は解かず、フラックス制限関数によって近似してきたが、この方法は相対論的には因果律を破るため、因果律を保持する相対論的拡散近似法の開発を進め、Kerr 時空の下で一般相対論的輻射輸送計算コードを改良し、光学的に厚い領域と薄い領域とを分けて扱うことができる方法を開発した。相対論的拡散近似法の開発を進めた結果、因果律を保持する数学的な方法を見つけることができた。これを数値計算と比較した結果、高い精度で一致することが確認できた。この数学的な方法を用いることにより、相対論的輻射拡散を高速かつ正確に扱うことができる。そして、これを相対論的な流体計算と結合することで、拡散を入れた一般相対論的輻射流体力学が実現できる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- 1) Abe, M., Suzuki, H., Hasegawa, K., Semelin, B., Yajima, H., Umemura, M. 2018. SEURAT: SPH scheme extended with ultraviolet line radiative transfer. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 476, 2664-2673. (DOI: 10.1093/mnras/sty233)
- 2) Miki, Y., Umemura, M. 2018. MAGI: many-component galaxy initializer. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 475, 2269-2281. (DOI: 10.1093/mnras/stx3327)
- 3) Tagawa, H., Umemura, M. 2018. Merger of Multiple Accreting Black Holes Concordant with Gravitational-wave Events. The Astrophysical Journal 856, 47. (DOI: 10.3847/1538-4357/aab0a4)
- 4) Miki, Y., Umemura, M. 2017. GOTHIC: Gravitational oct-tree code accelerated by hierarchical time step controlling. New Astronomy 52, 65-81. (DOI: 10.1016/j.newast.2016.10.007)
- 5) Takahashi, R., Umemura, M. 2017. General relativistic radiative transfer code in rotating black hole space-time: ARTIST. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 464, 4567-4585. (DOI: 10.1093/mnras/stw2479)

- 6) Abe, M., Umemura, M., Hasegawa, K. 2016. Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation - II. Three-dimensional radiation hydrodynamics simulations. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 463, 2849-2863. (DOI: 10.1093/mnras/stw2164)
- 7) Tagawa, H., Umemura, M., Gouda, N. 2016. Mergers of accreting stellar-mass black holes. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 462, 3812-3822. (DOI: 10.1093/mnras/stw1877)
- 8) Namekata, D., Umemura, M. 2016. Sub-parsec-scale dynamics of a dusty gas disc exposed to anisotropic AGN radiation with frequency-dependent radiative transfer. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 460, 980-1018. (DOI: 10.1093/mnras/stw862)
- 9) Wagner, A. Y., Bicknell, G. V., Umemura, M., Sutherland, R.~S., Silk, J. 2016. Galaxy-scale AGN feedback - theory. Astronomische Nachrichten 337, 167. (DOI: 10.1002/asna.201512287)
- 10) Tagawa, H., Umemura, M., Gouda, N., Yano, T., Yamai, Y. 2015. Early cosmic merger of multiple black holes. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 451, 2174-2184. (DOI: 10.1093/mnras/stv1099)

[学会発表] (計 3 件)

- 1) 高橋 芳太, 梅村雅之, 「相対論的流体中での光子多重散乱効果」, 日本天文学会 2018 年秋季年会 (2018 年 9 月 19 日~21 日, 兵庫県立大学, 姫路)
- 2) 高橋 芳太, 梅村雅之, 「相対論的流体における因果律を保った光子多重散乱の効果」, 日本天文学会 2017 年秋季年会 (2017 年 9 月 11 日~13 日, 北海道大学, 札幌)
- 3) 高橋 芳太, 梅村雅之, 「ARTIST コードによるブラックホール時空での一般相対論的輻射輸送シミュレーション」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名 : 高橋 芳太

ローマ字氏名 : Takahashi Rohta

所属研究機関名 : 苫小牧工業高等専門学校

部局名 : 理系総合学科

職名 : 准教授

研究者番号 (8 桁) : 40513453

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。