

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：50102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16K05302

研究課題名（和文）一般相対論的ART法による超巨大ブラックホール形成と成長過程の研究

研究課題名（英文）Study of Supermassive Black Hole Formation and Growth Process by General Relativistic ART Method

研究代表者

高橋 宥太（Takahashi, Rohta）

苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：40513453

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：超巨大ブラックホールの形成過程の候補の一つである超臨界降着過程を理解するためには、輻射過程を考慮した光子ボルツマン方程式を解くことが必要である。本研究では、輻射過程の効果を取り入れてブラックホール時空中で光子ボルツマン方程式を解くためのARTIST法を新規に開発した。この方法により、カー時空中の基本的な問題を解くことが可能となり、一般相対論的光線追跡法の結果も完全に再現することを確認できた（Takahashi & Umemura, 2017, MNRAS, 464, 4567）。次に、相対論的光子多重散乱の準解析的手法の開発とARTISTコードの3次元化を試みたが、これらは開発中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超巨大ブラックホール形成過程は宇宙物理学の未解決問題の一つである。観測で発見された宇宙初期の巨大ブラックホールの形成過程の一つに超臨界降着があるが、輻射性フィードバックのため、この過程は実現しないという指摘もある。この問題を解決するためには、ブラックホール時空中での光子ボルツマン方程式を正確に解くことが必要となる。本研究では、この方程式を厳密に解くための手法であるARTIST法を新たに開発した。新手法では、光学的に薄い状況での湾曲時空中での光子波面のほか、光子多重散乱の効果も取り入れることができる。光子多重散乱の扱いの厳密化、コードの3次元化などの余地があるが、これらは開発途中である。

研究成果の概要（英文）：Supercritical accretion process can be one of the candidates of the formation process of supermassive black hole. In order to understand this process, it is essential to solve the photon Boltzmann equation with radiative processes of emission, absorption and scattering. In this study, we newly develop the ARTIST method by which the photon Boltzmann equation can be numerically solved in black hole spacetime with effects of radiative processes. By this method, we can solve the basic test problems in Kerr spacetime and check that the results obtained by this method can perfectly reproduce the general relativistic ray-tracing results. These results were published in the academic journal (Takahashi & Umemura, 2017, MNRAS, 464, 4567). After this, we next try to establish the method to treat the relativistic photon multiple scattering precisely by the semi-analytic calculations and to extend the ARTIST code in three dimension in Kerr spacetime. These attempts are still under development.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：一般相対論 巨大ブラックホール ボルツマン方程式 輻射輸送 光子 散乱

## 1. 研究開始当初の背景

巨大ブラックホールの形成過程として、大質量星と高密度星団の重力崩壊が提案されてから30年以上経つ(リース・ダイアグラム, Rees 1984)が、今現在でも最終的な知見は得られていない。また、前世紀からの観測により、銀河中心に巨大ブラックホールが存在し、ブラックホール質量は銀河バルジ質量の約千分の一になっているという「ブラックホール - バルジ関係」が観測的に見出されている。この関係は銀河中心に(超)巨大ブラックホールが形成される普遍的なメカニズムが存在することを示唆するが、(超)巨大ブラックホール形成の真のメカニズムは今現在でも未解決である。

ビッグバンから8億年以内に超巨大ブラックホールの質量を質量降着により獲得しようとするとき、エディントン比が1を超える「超臨界降着 (supercritical accretion)」が必要である。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。これを可能とするのが、ブラックホール近傍の「光子捕獲」である。「光子捕獲」とは、輻射性拡散(光子多重散乱)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物理過程であり、この問題の正確な答えを得るためには、ブラックホールの時空・物質・光子の物理過程を正しく解いた一般相対論的な輻射流体計算が必要となる。特に、湾曲時空の光子輻射輸送方程式(一般相対論的ボルツマン方程式)を厳密に解く必要があるが、実現可能な計算手法が存在しない。

相対論的効果が効かない状況(非相対論的な状況)においては、非相対論的輻射輸送方程式を大規模並列計算により数値的に解く手法としてART法が開発されており、光子の位相空間に数値計算用のメッシュを張り、計算をしていることから一般相対論的測地線計算コードと組み合わせることにより、一般相対論化できる可能性があった。

一般相対論的光子輻射輸送方程式を数値的に解く際に、光子の散乱過程も相対論的に正しく扱う必要がある。また、散乱による光子・物質間の運動量・エネルギー輸送を数値的に正確に解こうとしても、適合格子法などを用いたシミュレーションでは散乱光子の最小の平均自由行程(原子スケール)まで分解することは不可能である。また、相対論的状況ではドップラー・ブースティングと時空の引きづり効果のため、(流体計算を行う)大局的な座標では輻射場は非等方になる。これらの問題のため、湾曲時空における非等方輻射場の任意の光学的深さの散乱過程を厳密に追う手法は存在しなかった。

多重散乱光子の振る舞いを記述する解析的な式があれば、数値シミュレーションから来る数値分散の問題から解放される(つまり、多重散乱を厳密に記述できる)。これまで相対論的状況で任意の光学的深さでの散乱を記述する解析式は存在しなかった。

以上のように、研究開始当初の背景として、一般相対論的光子ボルツマン方程式を数値的に厳密に解くための手法の開発にいたる幾つかの道具(の候補)が揃っている状況があった。

## 2. 研究の目的

ブラックホール時空中で一般相対論的光子ボルツマン方程式を解こうとする場合、以下のような相対論特有の困難に直面する。相対論特有の困難を克服することが可能な数値計算アルゴリズムは存在しなかったが、本研究では大規模並列計算に対応した非相対論的ART法と湾曲時空中で厳密に光子軌道を計算することが可能な一般相対論的光子追跡法の考え方を共存させるような数値アルゴリズムを開発することで、上記の困難を解消することが可能な数値計算アルゴリズムを開発することを目的とする。

開発された数値計算アルゴリズムを実現するGPU並列計算コードを開発し、回転するブラックホールの周囲の時空を記述するカー時空中で、一般相対論的輻射輸送計算を実行する。この段階の計算では、光学的に薄い状況では光子追跡法の計算結果を完全に再現し、光学的に厚い状況では光子吸収と光子多重散乱の効果を考慮した数値シミュレーションを実行することを目的とする。また、GPUを用いた並列計算ではGPUのメモリ容量の制限等があるが、現実的なハードウェアに対応した数値計算コードを開発することも目的とする。

以上の計算が実現した場合には、輻射過程(放射・吸収・散乱)のうち、放射と吸収の効果は一般相対論的に厳密に扱うことができるが、散乱の取扱は厳密ではない。散乱を厳密に取り扱うには、散乱光子の最小の平均自由行程(原子スケール)まで分解することが必要である。研究を開始した時点では、散乱光子を扱う手法として、Shibata et al. (2014)で発見された散乱を単純に記述する解析式を上記の計算に実装することで厳密な光子散乱の取り扱いを実現することを目的としていた。

研究を実際に進めて判明したことだが、過去の研究で発見された解析式は一部の領域で因果律を破ることがわかった。つまり、この公式では厳密な光子散乱の取り扱いを実現するという目的は達成できないことになった。この困難を克服する過程と得られた成果に関しては、研究成果の項目で記述する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 一般相対論的光子追跡法による位相空間中の光子測地線の計算

本研究で用いる一般相対論的光子ボルツマン方程式を計算するための手法では、光子の位相空間に光子測地線の数値計算用の離散格子を配置する。本研究では、光子追跡法による一般相対論的光子測地線ソルバー (MASTER コード) を用いて、カー時空中の光子測地線の全てのパターンを網羅した計算を実行することにより、位相空間中の離散格子を作成する。

#### (2) 一般相対論的輻射輸送の GPU 並列計算

(1) で作成した位相空間中の離散格子上で輻射輸送計算を実行する。非相対論的 A R T 法を拡張した数値アルゴリズムを開発し、それを実装した G P U 並列計算コードを開発した (ARTIST コード)。このコードを用いて、カー時空中での一般相対論的輻射輸送計算を実行する。コード開発とテスト計算の段階では、単体の G P U 計算機を用いて計算を行った。空間 3 次元の計算は、筑波大学計算科学研究センターの G P U スパコンを用いて実行した。こちらの計算は主に、研究代表者が開発したコードを研究分担者が所属する大学の学生に渡し、そのコードを元に開発した数値計算コードにより実行した。

#### (3) 光子多重散乱の相対論的モンテカルロ計算

相対論的光子多重散乱の厳密な取り扱い方法を開発する場合、開発した手法が正確であることを確認するために比較用の計算結果が必要となる。本研究では、多数の光子の相対論的多重散乱の確率密度関数を数値的に計算するために、相対論的モンテカルロ計算を実現する G P U 並列計算コードを開発した。この計算結果は、過去の研究で得られた光子散乱に関する公式と本研究で新たに開発した光子散乱を記述する準解析式の正確さの確認の際に活用した。

#### (4) 光子多重散乱の確率密度関数の準解析的計算

過去の研究で発見された解析式は因果律を破ることが判明したため、当初の研究計画では予定していなかった相対論的光子多重散乱を記述する解析式の開発を行った。この開発は主に手計算と数式処理システム Mathematica (および Maple) を用いた計算により実行した。

### 4. 研究成果

#### (1) 一般相対論的光子測地線方程式ソルバー MASTER

本研究では、光子位相空間中に離散格子を配置し、その離散格子上で一般相対論的光子ボルツマン方程式を計算する。位相空間に貼る格子上で物理量を輸送することにより、位相空間で定義される物理量の時間発展を計算することから、離散格子は光子測地線に沿って配置をする。このように配置することで、光学的に薄い状況の場合には、離散光子に沿って輸送することが物理量の時間発展を計算することになり、厳密な計算の実現につながる。

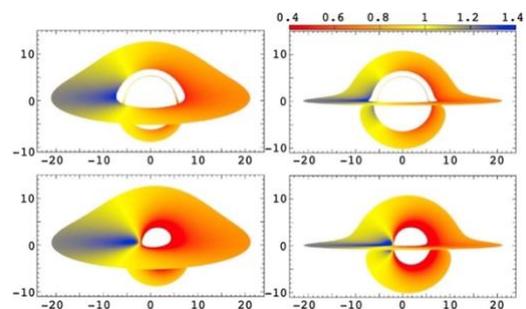
まず、位相空間中の光子測地線を計算するための一般相対論的光子測地線方程式ソルバー (MASTER コード) を開発した。コードは任意の湾曲時空に対応した形で開発されたが、コードのテスト計算は主に一般相対論のもとで自転するブラックホールの時空を記述するカー時空中で行った。図 1 はブラックホール時空中の赤道面にある標準降着円盤 (光学的に厚く幾何学的に薄い粘性降着円盤) を遠方の観測者が見た  $g$  因子のイメージの計算例である。 $g$  因子は重力赤方偏移の効果など光子の振動数の変化を記述する因子である。図 1 は過去の研究で計算されている問題であり、今回作成した MASTER コードで同様の問題を再現できることが確かめられた。

図 1 の例以外でも多くの問題を計算し、MASTER コードでは基本的に過去の研究で計算された代表的な問題をほぼすべて再現できることが確かめられた。これにより、正しい計算結果を与える一般相対論的光子測地線方程式ソルバーが開発できたと判断した。

#### (2) 一般相対論的光子ボルツマン方程式ソルバー ARTIST

本研究では、回転ブラックホールを記述するカー時空中での数値シミュレーションを実行する。そのため、一般相対論的光子ボルツマン方程式を数値的に解くための位相空間中の離散格子はカー時空中に配置する。全てのパターンの測地線のパラメータ領域の全体を網羅するように離散格子を計算した。光子の輻射過程 (放射・吸収・散乱) では、光子は流体と相互作用をする。この輻射過程では、位相空間の離散格子上で計算された光子分布関数の運動量空間積分により計算される輻射テンソルを介して、流体との相互作用が計算される。輻射テンソルが計算される流体計算の離散格子の周囲に位相空間中の離散格子を配置する。輻射輸送シミュレーションでは、位相空間上の離散格子の上で計算された光子分布関数の情報をもとに、運動量積分を実行し、輻射テンソルを計算する。運動量空間積分の際には、積分の重みを測地線偏差の情報を用いることで計算し、高精度の運動量空間積分が実行できるアルゴリズムを開発し、数値コードに実装した。この高精度運動量空間積分を用いて輻射テンソルを実行する手法は、本研究で得られた重要な知見の一つであると認識している。

図 1. 幾何学的に薄い降着円盤の観測イメージ



以上の方針に基づいた一般相対論的輻射輸送計算コード (ARTIST コード) を用いて、輻射輸送シミュレーションを実行した。

### (3) 空間 2 次元一般相対論的輻射輸送シミュレーション

一般相対論的輻射輸送計算コード (ARTIST コード) は、カー時空中のテスト問題を解く作業を行いながら開発した。開発の初期段階では、光学的に薄い状況での光子波面伝搬の問題を解きながらコード開発を行った (図 2)。この問題では、計算結果が一般相対論的光子追跡法の結果を再現し、計算領域のエネルギー総量の変化の減衰も正しく計算されていることが確かめられた。光子の輻射過程 (放射・吸収・散乱) の吸収と散乱を考慮した計算も実行した。図 3 は光子波面伝搬における光子吸収の効果 (点線) と光子散乱の効果 (破線) を考慮した計算結果を吸収・散乱を考慮していない結果 (実線) と比較したものである。吸収がある場合には、吸収により、光子のエネルギー総量が減少していることがわかる。また、散乱がある場合には、光子がブラックホールに吸い込まれる、もしくは、外側に伝搬されることが散乱により阻害され、ブラックホール周囲に光子が存在し続けている様子がわかる。

以上のような計算を実行することにより、カー時空中の赤道面内での一般相対論的輻射輸送シミュレーションを実行した。これらの計算結果は、Takahashi & Umemura (2017) の論文等で公表した。

### (4) 光子多重散乱の準解析解

以上で開発した一般相対論的輻射輸送計算コード (ARTIST コード) では、散乱の効果は散乱係数を介して形式的に取り入れることができるのであるが、この扱いは厳密でない。散乱光子の時間発展は、散乱の最小の平均自由工程 (原子スケール) まで取り扱うことができる手法が必要となる。計算機資源の制約がある数値シミュレーションにおいてはこのような計算は不可能に思えるが、散乱光子の集団としての振る舞いを記述する解析解を用いることができれば、散乱の最小の平均自由工程までを考慮した計算が可能となる。本研究の最初のアイデアとしては、Shibata et al. (2014) で公表された散乱光子の振る舞いを記述する近似的な解析解を用いる計画を立てていた。この解析解は、相対論的光子散乱のモンテカルロ計算を再現するとの報告がなされていたことから、ある程度、散乱の厳密な取り扱いが可能であると予想していた。

当初、このような計画を立てていたことから、散乱光子の振る舞いに関する理解を深めることを目的とし、本研究では相対論的散乱のモンテカルロ・シミュレーションを実行することが可能な GPU 並列計算コードの開発を行った。

図 4 は一方向に流速をもつ相対論的流体中での多重散乱光子の軌道を表示したものである。流体静止系に対して光子が等方散乱されることから、相対論的流体では流体の流れる方向にローレンツ・ブーストされた軌道となっていることが確認できる。相対論的モンテカルロ計算により得られるこれらの結果を用いることで、散乱光子の集団としての振る舞い (時空図上での変化) を調べ、その結果を過去の研究の解析解の結果を比較することで、論文に記載されている内容の理解を試みた。その結果、流体の速度が大きい相対論的な領域において、モンテカルロ計算の結果と解析解の結果が一致しないことがわかった。また、モンテカルロ計算の結果と解析解の結果が一致しない部分では因果律が破れており、光速を超えた情報の伝搬 (非物理的な情報の伝搬) がなされていることに対応していることも把握された。

図 2. カー時空中の光子波面伝搬

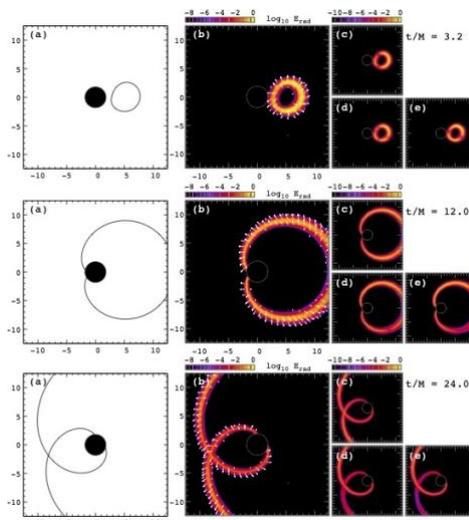


図 3. 光子波面伝搬における光子吸収・散乱の効果

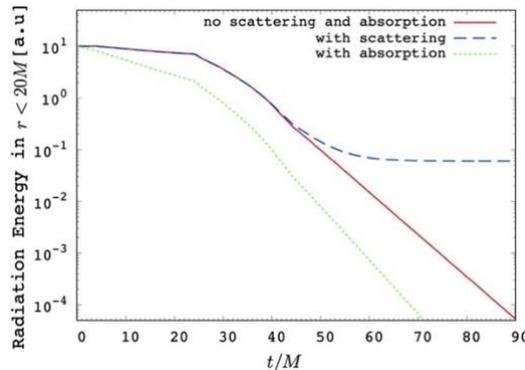
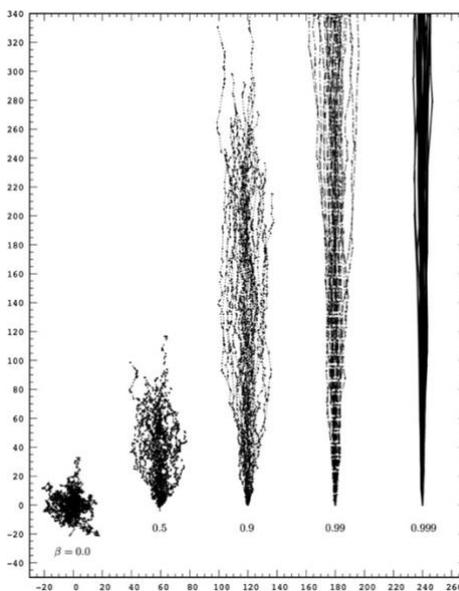


図 4. 多重散乱光子軌道と相対論的ブースト効果



本研究の当初の予定では、過去の研究の解析解を一般相対論的 ARTIST コードに実装することを考えていたが、この解析解は因果律を破り、非物理的であることが把握されたため、当初の予定を変更し、独自に相対論的光子多重散乱の集団としての振る舞いを記述する解析解を開発する方向に計画を変更した。相対論的モンテカルロ計算コードが開発されていたこともあり、このコードを用いて散乱光子の集団としての振る舞いを近似するフィッティング公式を開発するという方向も模索したが、パラメータ領域の一部で確率的な分散により解が収束しない部分が存在することがわかったため、この方針は使えないことも把握された。これらの分析により、当初の計画の予定が変更されることになったが、当初予想できなかったことであり、厳密な計算を実行できる数値コードを開発するという目標を達成するためには他に方法がないと判断した。

相対論的多重散乱光子の集団としての振る舞いを把握することは、時空図上での光子の存在確率を表現する確率密度関数を明らかにすることに対応する。そこで、流体静止系での等方弾性散乱の場合の確率密度関数の導出を試みた。この計算には、多面的な試行錯誤と多くの研究時間を必要としたが、最終的に時空図上での多重散乱光子の集団としての振る舞いを記述する確率密度関数を記述する順解析的な式を得ることができた。

図 5 は散乱回数ごとに光子が分布する空間位置の確率を表す確率分布である。この分布から過去の研究と同様の計算を実行することが可能となり、さらに物理的な解を構成することが可能となる。図 5 の確率分布は、時間方向に時空図上の確率分布を積分することにより得られる。積分前の確率分布を表したのが図 6 である。この図では、多重散乱光子の確率密度関数が時間発展する様子を把握することができる。

計算によると確率分布の進化の初期は光子が自由伝搬する様子を表す確率密度関数であり、拡散速度がブースト速度より遅くなった段階で集団全体がローレンツ・ブーストを受ける段階となり、拡散速度がさらに遅くなると拡散が時間発展を支配する段階になるということも把握できた。このような知見は従来の研究では得られていなかったものであり、本研究で得られた重要な知見の一つであると認識している。図 7 は今回新たに得られた準解析解と相対論的モンテカルロ計算の結果を比較したものである。相対論的モンテカルロ計算の結果は解析解に沿って分布しているが、多くの領域で確率的な分散が大きく、相対論的モンテカルロ計算からでは解析解のような厳密な結果は得られないことがわかる。これにより、結果として変更後の研究の方針は適切であったと認識している。

時間を要したが、当初の予定していた厳密な散乱の効果を取り入れる目処が得られたことから、次の段階として、今回得られた相対論的光子多重散乱を記述する解析解を一般相対論的輻射輸送計算コード (ARTIST コード) に実装する段階が考えられる。また、以上で得られた結果は学会などの発表で公表しているが、研究期間内に査読付き論文上で公表するまでには至らなかったことも報告する。

### (5) 空間 3 次元の一般相対論的輻射輸送シミュレーション

上で報告した ARTIST コードによる一般相対論的輻射輸送シミュレーションは、カー時空中の赤道面内での計算である。空間 3 次元の計算を実行する試みが重要となるが、これに関しては本研究の分担者が所属する大学の研究者と学生の協力のもと進めることになった。本研究で開発した MASTER コードと ARTIST コードを丸ごと譲渡し、それを改良していくことで計算を進めるという方針とした。また、この研究過程で、光子数を厳密に保存するという方針のもとで ARTIST コードのアルゴリズムが改良され、この進展は重要なものと認識している。空間 3 次元化に関しても位相空間内の測地線に沿った離散格子の配置方法に関し進展が見られている。これらの結果の一部は学会などの発表により公表されているが、研究期間内に査読付き論文として公表するまでには至らなかったことも報告する。

図 6. 光子確率密度関数の散乱回数依存性

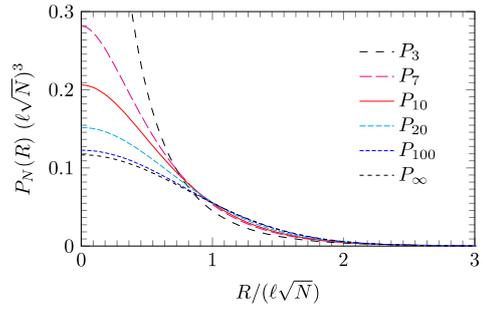


図 5. 光子確率密度関数の時間発展

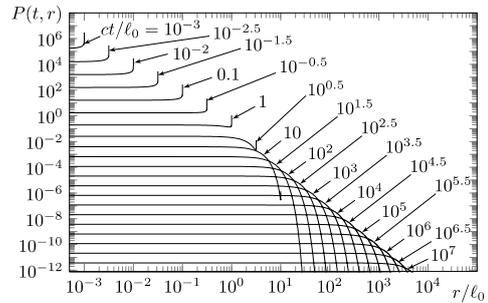
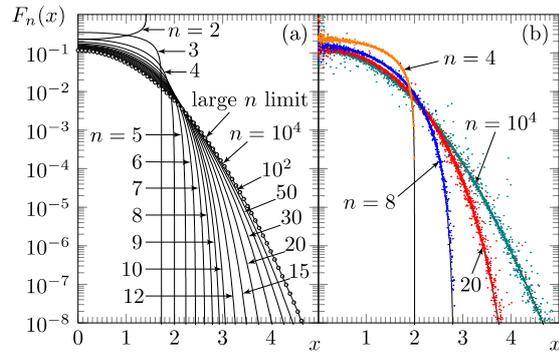


図 7. 光子確率密度関数の解析解と数値解の比較



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Yukihiko Fujimoto, Kohkichi Konno, Tomoaki Nagasawa and Rohta Takahashi	4. 巻 53
2. 論文標題 Quantum Reflection and Transmission in Ring Systems with Double Y-Junctions: Occurrence of Perfect Reflection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical	6. 最初と最後の頁 155302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1751-8121/ab7601	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 K. Konno, T. Nagasawa, R. Takahashi	4. 巻 385C
2. 論文標題 Resonant Transmission in One-Dimensional Quantum Mechanics with Two Independent Point Interactions: Full Parameter Analysis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 729, 743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2017.08.031	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 Rohta Takahashi, Masayuki Umemura	4. 巻 464
2. 論文標題 General relativistic radiative transfer code in rotating black hole space-time: ARTIST	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4567, 4585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw2479	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 Kohkichi Konno, Tomoaki Nagasawa, Rohta Takahashi	4. 巻 375
2. 論文標題 Effects of two successive parity-invariant point interactions on one-dimensional quantum transmission: Resonance conditions for the parameter space	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 91, 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2016.09.012	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10件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋宥太, 小川拓未, 梅村雅之
2. 発表標題 Ray-tracing 法に基づく, 空間 3 次元一般相対論的輻射輸送コードの開発
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会W11b
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋幹弥, 高橋宥太, 大須賀健, 梅村雅之
2. 発表標題 ARTISTコードを元にした空間3次元一般相対論的輻射輸送コードの開発
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会W11b
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋宥太
2. 発表標題 ブラックホール影とブラックホール質量, スピン
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 (素核宇) 19pT21-2 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋宥太, 梅村雅之
2. 発表標題 相対論的流体中での光子多重散乱効果
3. 学会等名 日本天文学会2018年秋季年会S14a
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rohta Takahashi
2. 発表標題 ARTIST: Radiation transfer code in curved spacetime and causal photon diffusion in a relativistic flow
3. 学会等名 Radiation Hydrodynamic Approaches to the Study of Black Hole Accretion and Outflows, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 芳太
2. 発表標題 一般相対論的輻射輸送計算による降着流中でのブラックホール・シャドウ
3. 学会等名 立教大学理学部物理学科理論物理学研究室セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 芳太
2. 発表標題 曲率空間における輻射輸送コードARTIST+Diffusion
3. 学会等名 光バイオイメージング勉強会、浜松医科大学
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 芳太、梅村 雅之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本天文学会2017年秋季年会S40a
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋芳太、梅村雅之
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本天文学会、2016年秋季年会、S01a
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 高橋芳太
2. 発表標題 ARTISTコードによる一般相対論的輻射輸送シミュレーション
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 小島康史、小出眞路、高橋芳太	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 404
3. 書名 ブラックホール宇宙物理の基礎	

1. 著者名 安東正樹、白水徹也、浅田秀樹、石橋明浩、小林努、真貝寿明、早田次郎、谷口敬介	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 432
3. 書名 相対論と宇宙の事典	

〔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
研究 分 担 者	梅村 雅之  (UMEMURA MASAYUKI)  (70183754)	筑波大学・計算科学研究センター・教授    (12102)	

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