

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：32606

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14715

研究課題名（和文）近臨界ブラックホールの対称性とシャドウ

研究課題名（英文）Symmetry and shadow of the near-extremal Kerr black hole

研究代表者

伊形 尚久（IGATA, Takahisa）

学習院大学・理学部・助教

研究者番号：40711487

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：回転ブラックホール時空において、シャドウ（暗いスポット）の周縁部の明環と直接関係する球面光子軌道について研究を行った。ブラックホールスピンの臨界値極限を考えると、球面光子軌道の一部の軌道半径がホライズン半径に極限することを示した。さらに、スピンの臨界値極限において、このクラスに属する光線束の膨張・剪断変形を生成する時空曲率が十分小さくなることが示され、結果としてホライズンの近くを周回運動するときの減光率が抑制されるという結果が得られた。また円軌道の光源から等方的に放射される光子の脱出確率を評価し、円軌道のとり得る半径に依らずに、光子脱出確率が50%を上回ることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

M87銀河の中心に位置する大質量コンパクト天体の電波観測によりシャドウが実際に観測されたものの、この現象はブラックホール時空だけで起きる現象ではないため、中心天体の正体の解明のためにはホライズンの近くで起きるブラックホール特有の現象に着目することが重要である。本研究の成果は、超高速回転ブラックホールのホライズンの近傍領域で起きる特異な性質が観測可能な現象と関係づくことを明らかにするとともに、観測可能性が高くなる傾向にあることを示している。これは今後ブラックホールの観測的な成果が次々に報告される時代に、重要な視点をもたらすと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We study spherical photon orbits, which are directly related to a bright ring at the edge of a shadow (i.e., a dark spot) in spinning black hole spacetimes. Considering the extremal spinning limit of the black hole, we show that several spherical photon orbital radii approach the horizon radius. Furthermore, in the extremal limit, the spacetime curvature that generates the expansion and shear of the light bundle of this class is sufficiently small, suppressing the photon decay rate on the spherical photon orbits near the horizon. We also evaluate the escape probability of isotropically emitted photons from a source in circular orbits and show that the photon escape probability exceeds 50% regardless of the possible radii of the circular orbits.

研究分野：一般相対論

キーワード：ブラックホール 一般相対論 ブラックホールシャドウ 光子脱出確率 ニアホライズン対称性 臨界極限

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は、M87 銀河の中心に位置する大質量コンパクト天体の電波観測の結果が初めて公開されたのとはほぼ同時期に開始された。ブラックホールの光学的な観測に対して、一般相対論の予測から暗いスポット(シャドウ)が現れる可能性が以前から知られていた。M87 銀河の中心の大質量コンパクト天体からシャドウが観測されれば、ブラックホールの研究が大きな転換点を迎えて、新しい時代に入ることが大いに期待されていた。

研究開始からほどなくして、M87 銀河の大質量コンパクト天体のシャドウが観測されたことが報告された。そこで公開された画像には、まさにブラックホールシャドウの理論的予測のような暗いスポットが映し出されていた。本研究計画は、ブラックホールシャドウに関連する現象とそれに潜む物理的な要因を明らかにすることを主な課題としていたため、この観測結果は本研究の動機をより強めるものであった。

シャドウが実際に観測されたものの、本研究にまつわる問題意識はより一層大きなものとなった。ブラックホールのシャドウという現象はブラックホール時空で起きる特徴的な現象の一つであるものの、シャドウという現象自体はブラックホール時空だけで起きる現象ではない。実際に、表面をもつコンパクトな天体の場合にも、シャドウが観測されることが指摘されている。したがって、依然として中心の大質量コンパクト天体は、ブラックホールなのかそうでないのか、ということを決着させるには至っていない。

ブラックホールの境界はイベントホライズン(以下、ホライズンと記す)と呼ばれ、この存在がブラックホールを特徴づけている。ブラックホールの観測を理論的な観点から精査すると、一般相対論に基づくブラックホールはきわめて観測と相性の悪い概念であることが一部の専門家にはよく認識されている。こうした現状を踏まえつつ、ホライズンの近くで起きるブラックホール特有の現象に着目することが、大質量コンパクト天体の正体の解明につながる道であるという認識が根底にある。

## 2. 研究の目的

大質量コンパクト天体がブラックホールかどうかをどう見極めるのか、という問いが本研究の起点である。本研究計画では、ブラックホールのホライズンに極めて近い領域の観測可能性を追求することがその解明につながるという考えのもと立案された。

本研究では、一般相対論の近臨界 Kerr ブラックホール解に着目した。これは超高速回転ブラックホールを記述していて、スピンパラメタが臨界値の 1 にきわめて近い値をとる。この時空がもつ特徴の一つは、ブラックホールの重力場により光が散乱され得る最内半径が、スピンの臨界極限でホライズン半径に漸近することである。シャドウという現象はブラックホール近傍での光の散乱によって決定づけられるため、近臨界 Kerr ブラックホールではシャドウの観測とホライズンのごく近傍領域を結びつく可能性を示唆している。

さらに、M87 銀河中心の大質量コンパクト天体の近くから放出されるジェットのエネルギーから推定されるスピンパラメタは、ブラックホールがとり得る臨界値 1 にきわめて近い値と推定されている。こうした先行研究の予測も、近臨界 Kerr ブラックホールの研究を強く動機付ける。

こうした検討の末に、本研究は、近臨界 Kerr ブラックホールのホライズンのごく近傍において、光が放射・散乱される現象にまつわる特徴的な性質を明らかにすることを目的としている。特に、近臨界 Kerr ブラックホールのホライズンの近くでは、高い対称性(ニアホライズン対称性)が発現するという特異な性質が知られている。この性質は、近臨界 Kerr ブラックホールのホライズン近傍でユニークな光学的現象を引き起こす可能性が高いと考えられるものの、これがシャドウをはじめとする現象にどのように影響を及ぼすかについてはまだ十分研究がなされていない。これを明らかにすることでニアホライズン領域の観測可能性を解明する。

## 3. 研究の方法

本研究は、一般相対論を用いた理論的な手法によって行われた。アインシュタイン方程式の定常軸対称真空解である Kerr ブラックホール解に基づいて、その上の光源と光子のダイナミクスの解析が行われた。課題毎に従来の方法と今回新たに考案した解析とを融合しながら研究を進めた。

(1) Kerr ブラックホール時空における光の軌道を記述する光的測地線方程式を、解析力学の手法であるハミルトン-ヤコビ法で変数分離することで基礎方程式系を簡略化した。このときに Kerr 時空の定常軸対称性に起因する 2 つのキリング対称性および非自明な隠れた対称性であるキリングテンソル対称性を用いることで、光子の運動を特徴づける 2 つの力学量(衝突パラメータ)が保存量になることを用いた。これにより、シャドウの周縁部の明環の形成と直接的な関係がある球面光子軌道(spherical photon orbit)の半径と衝突パラメータの関係が、動径変数の常微分方程式の解析より決定することができる。

(2) スピンの臨界極限における光子球面軌道の衝突パラメータおよび軌道半径の振る舞いを解析した。この際に、臨界極限においてホライズンに漸近する光子球面軌道を適切に解像するための方法として、臨界極限とニアホライズン極限という 2 パラメータ極限を適切にとる解析法を考案して、実際に適用した。

(3) 一般相対論における光的測地線束の方程式に基づいて、光線断面の膨張・剪断変形を評価することで、臨界ブラックホールの近傍を伝播する光の減光率が抑制されていることを示す方法を考案した。この評価では、共形キリング矢野 2 形式をはじめとする非自明な隠れた対称性を使って、光的測地線により平行移動されるフレームを構成した。これを用いて、膨張・剪断変形を生成する要因となる時空の Weyl 曲率のいくつかの成分を、前述の 2 パラメータ極限を適用して評価を行なった。

(4) 光源がブラックホールを円運動で周回する、あるいは最内安定円軌道からの落下運動をする場合などを想定して、そこから等方的に放射される光子の脱出確率を評価した。各光源の軌道を求め、それに沿った局所慣性系を導入した上で、光子の脱出円錐を定義した。一連の定式化と計算法を整備した上で、実際に脱出円錐と光子脱出確率を評価した。

(5) 脱出可能な光子のパラメータのとり得る範囲は、光的測地線方程式の動径方向と天頂角方向の 2 つの方程式を合わせた解析から決定される。これらを臨界ブラックホールおよび非臨界ブラックホールの場合にそれぞれ詳細な解析を行うことで、脱出可能な光子のパラメータ領域を特定することができる。

#### 4. 研究成果

(1) 球面光子軌道が存在するための 2 つの保存衝突パラメータ ( $b, q$ ) の値の系列を決定した。図 1 は近臨界 Kerr ブラックホール ( $a=0.999$ ) の場合のそれを示している。特に、ゼロでない幅を持つあるパラメータ範囲内で衝突パラメータを指定した場合に、対応する球面光子軌道の半径がホライズン半径に漸近することを明らかにした(図 2)。これは Kerr 時空の時間一定面にデカルト座標  $(x, y, z)$  を導入したときの  $(x, z)$  面において、球面光子軌道の最大・最小の天頂角の系列(実線)を示している。実線の一部が一点破線の外側の円(ホライズン半径)に漸近していることがわかる。

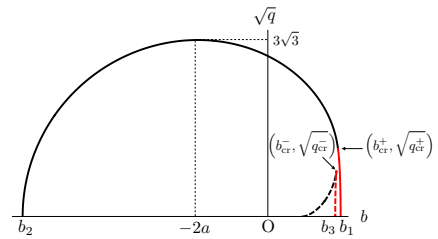


図 1. Igata et al., Phys. Rev. D 100, 044058 (2019)

(2) ホライズンに漸近する球面光子軌道がもつパラメータ領域、およびそのときの最大・最小天頂角の解析的な値を明らかにした。臨界スピン極限において軌道半径がホライズン半径に漸近する球面光子軌道をホライズンクラスと名づけ (図 2 の赤実線)、一方これに含まれない集合は臨界スピン極限において漸近的にカージオイド曲線に漸近することからカージオイドクラスと名づけた(図 2 の黒実線)。臨界スピン極限において定性的に異なる領域へと漸近する 2 クラスの球面光子軌道が存在することが示されたことで、近臨界 Kerr ブラックホールのシャドウの周縁部の明環部は 2 つの性質の異なる球面光子軌道を通った光子から形成されていることが明らかになった。

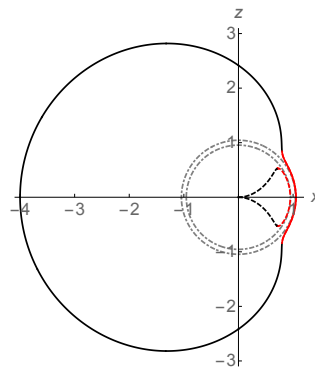


図 2. Igata et al., Phys. Rev. D 100, 044058 (2019)

(3) ホライズンクラスの球面光子軌道に着目して、光的測地線束の断面の膨張および剪断変形を生成する要因となる時空の Weyl 曲率のいくつかの成分を評価した。これにより、臨界パラメータ極限でホライズンクラスの軌道半径がホライズン半径に極限するとき、これらの Weyl 曲率成分がゼロに極限することを示した。これは臨界パラメータ極限でのホライズンクラスの球面光子軌道上では、時空曲率に起因する光線束の広がりがないことを示している。したがって、時空曲率による光線束の広がりが抑制されることから、

光の減光率が抑制される。ホライズンクラスから到達する光子はシャドウの明環の一部を形成するが、カージオイドクラスに対応する明環の一部と比較して、光度が相対的に大きくなることを示している。本解析は、シャドウ周縁部の明環に現れる光度の違いの物理的要因を、近臨界 Kerr ブラックホールのホライズン近傍の重力場の幾何学的性質に求めて明らかにしたと言える。

(4) 近臨界 Kerr ブラックホールのホライズン半径スケールを減光率が抑制されるという結果は、予想以上の光子がホライズン近傍から観測者に届く可能性を示唆している。これを明らかにするために、ブラックホールを円軌道で周回する光源を想定して、これが等方的に光子を放射するとき光子がブラックホールの重力圏を抜けて脱出する割合(光子脱出確率)を解析した。その結果、臨界スピン極限において光源の円軌道の半径はホライズン半径に漸近するが、それでも依然として50%を超える光子が脱出可能であるということが明らかになった(図3)。さらに最内安定円軌道半径を初期条件として光源を落下させ、落下中の各瞬間での光子脱出確率を評価した(図4)。落下後もしばらく脱出確率は50%を上回っていることが明らかになった。これらの一連の結果は、近臨界 Kerr ブラックホールのホライズン近傍領域の光学的な観測可能性が高いことを示している。

(5) 光源の位置座標と衝突パラメタ( $b, q$ )と放射時の動径速度の符号が与えられると光子の軌道は一意に決まる。これにより十分時間が経ったのちに光子が脱出するかホライズンへと落ちるのかの2つに分類することができる。臨界ブラックホールおよび非臨界ブラックホールについてそれぞれ全ての光子軌道に完全な分類を行った。

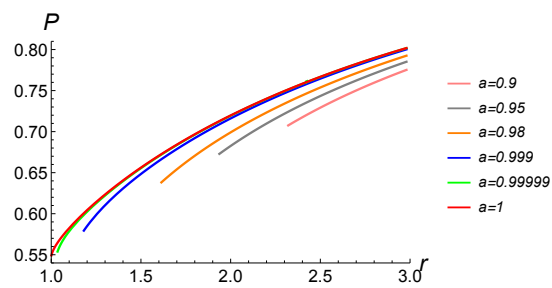


図 3: Igata et al., Phys. Rev. D 101, 044044 (2020)

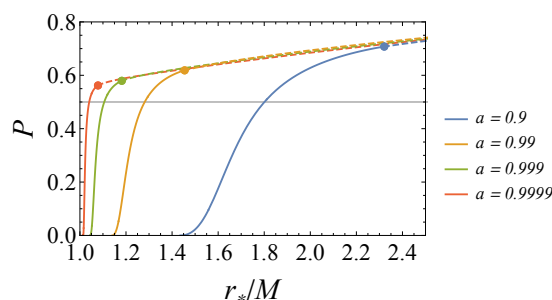


図 4: Igata et al., Phys. Rev. D 103, 104028 (2021)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kota Ogasawara, Takahisa Igata	4. 巻 105
2. 論文標題 Photon escape in the extremal Kerr black hole spacetime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.024031	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 Shinya Tomizawa, Takahisa Igata	4. 巻 103
2. 論文標題 Stable circular orbits in Kaluza-Klein black hole spacetimes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.124004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takahisa Igata, Kazunori Kohri, Kota Ogasawara	4. 巻 103
2. 論文標題 Photon emission from inside the innermost stable circular orbit	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 104028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.104028	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 Takahisa Igata	4. 巻 38
2. 論文標題 Chaos in a generalized Euler 's three-body problem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 195009-195009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac1be7	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 Takahisa Igata	4. 巻 101
2. 論文標題 Particle dynamics in the Newtonian potential sourced by a homogeneous circular ring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124064
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.124064	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 Takahisa Igata	4. 巻 102
2. 論文標題 Chaotic particle motion around a homogeneous circular ring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.044019	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 Takahisa Igata, Shinya Tomizawa	4. 巻 102
2. 論文標題 Stable circular orbits in higher-dimensional multi-black-hole spacetimes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.084003	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 Kota Ogasawara, Takahisa Igata	4. 巻 103
2. 論文標題 Complete classification of photon escape in the Kerr black hole spacetime	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.044029	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 Yasutaka Koga, Takahisa Igata, Keisuke Nakashi	4. 巻 103
2. 論文標題 Photon surfaces in less symmetric spacetimes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.044003	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 Shinya Tomizawa, Takahisa Igata	4. 巻 102
2. 論文標題 Stable bound orbits in black lens backgrounds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124079
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.124079	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 Takahisa Igata, Shinya Tomizawa	4. 巻 103
2. 論文標題 Stable circular orbits in caged black hole spacetimes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 84011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.084011	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 Takahisa Igata, Hideki Ishihara, Yu Yasunishi	4. 巻 100
2. 論文標題 Observability of spherical photon orbits in near-extremal Kerr black holes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.044058	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 Vitor Cardoso, Takahisa Igata, Akihito Ishibashi, Kodai Ueda	4. 巻 100
2. 論文標題 Massive tensor field perturbations on extremal and near-extremal static black holes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.044013	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 該当する

1. 著者名 Shinya Tomizawa, Takahisa Igata	4. 巻 100
2. 論文標題 Stable bound orbits around a supersymmetric black lens	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.124031	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 Keisuke Nakashi, Takahisa Igata	4. 巻 99
2. 論文標題 Innermost stable circular orbits in the Majumdar-Papapetrou dihole spacetime	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.124033	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 Keisuke Nakashi, Takahisa Igata	4. 巻 100
2. 論文標題 Effect of a second compact object on stable circular orbits	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 104006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.104006	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 Kota Ogasawara, Takahisa Igata, Tomohiro Harada, Umpei Miyamoto	4. 巻 101
2. 論文標題 Escape probability of a photon emitted near the black hole horizon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.044023	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 Takahisa Igata, Keisuke Nakashi, Kota Ogasawara	4. 巻 101
2. 論文標題 Observability of the innermost stable circular orbit in a near-extremal Kerr black hole	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.044044	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 Takahisa Igata, Yohsuke Takamori	4. 巻 105
2. 論文標題 Periastron shifts in dark matter distribution with a dense core	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.124029	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 Tomohiro Harada, Takahisa Igata, Takuma Sato, Bernard Carr	4. 巻 39
2. 論文標題 Complete classification of Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker solutions with linear equation of state: parallelly propagated curvature singularities for general geodesics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 145008-145008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac776e	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 該当する

1. 著者名 Takahisa Igata, Tomohiro Harada, Hiromi Saida, Yohsuke Takamori	4. 巻 2202.00202 [gr-qc]
2. 論文標題 Periapsis shifts in dark matter distribution around a black hole	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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 Tomohiro Harada, Takahisa Igata, Hiromi Saida, Yohsuke Takamori	4. 巻 2210.07516 [gr-qc]
2. 論文標題 General formulae for the periaapsis shift of a quasi-circular orbit in a static spherically symmetric spacetime and the strong energy condition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 伊形尚久, 孝森洋介
2. 発表標題 Retrograde periaapsis shift due to extended matter distributions
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田知広, 伊形尚久, 佐藤琢磨
2. 発表標題 FLRW解の共形境界の分類: 線形状態方程式の場合
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小笠原康太, 伊形尚久
2. 発表標題 Kerr-Newman時空における光の脱出と分類
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahisa Igata
2. 発表標題 Retrograde periapsis shift due to extended matter distribution
3. 学会等名 The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊形尚久, 原田知広, 斉田浩見, 孝森洋介
2. 発表標題 Periapsis/apoapsis shift in static clouds around a black hole
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田知広, 伊形尚久, 佐藤琢磨, Bernard Carr
2. 発表標題 FLRW解の共形境界の分類: 線形状態方程式の場合 II
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊形尚久、中司桂輔、小笠原康太
2. 発表標題 近臨界Kerrブラックホールの最内安定円軌道の観測可能性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古賀泰敬, 伊形尚久, 中司桂輔
2. 発表標題 非球対称時空におけるphoton surface
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahisa Igata
2. 発表標題 Observability of the innermost stable circular orbit in a near-extremal Kerr black hole
3. 学会等名 online JGRG 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊形尚久, 郡和範, 小笠原康太
2. 発表標題 Photon emission from inside the innermost stable circular orbit
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小笠原康太, 伊形尚久
2. 発表標題 Complete classification of photon escape in the Kerr black hole spacetime
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富沢真也, 伊形尚久
2. 発表標題 ブラックレンズの安定束縛軌道について
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古賀泰敬, 伊形尚久, 中司桂輔
2. 発表標題 Photon surfaces in less symmetric spacetimes
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富沢真也, 伊形尚久
2. 発表標題 ブラックレンズ周りの光の安定束縛軌道
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊形尚久, 石原秀樹, 安西悠
2. 発表標題 Can we observe spherical photon orbits in near-extremal Kerr black holes?
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahisa Igata, Hideki Ishihara, Masaaki Takahashi
2. 発表標題 Polarization distribution on the edge of a black hole shadow
3. 学会等名 The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富沢真也, 伊形尚久
2. 発表標題 ブラックレンズ時空の測地線
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中司桂輔, 伊形尚久
2. 発表標題 第2のコンパクト天体が与える安定周回軌道への影響
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小笠原康太, 伊形尚久, 原田知広, 宮本雲平
2. 発表標題 地平面近傍からの光の脱出確率
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊形尚久, 石原秀樹, 高橋真聡
2. 発表標題 ブラックホールシャドウの外縁部上の偏光パターンと重力ファラデー回転
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊形尚久, 石原秀樹, 高橋真聡
2. 発表標題 Polarization propagation to a photon ring
3. 学会等名 BZ77研究会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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			
英国	Queen Mary University of London			
ポルトガル	Instituto Superior Tecnico			