

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24540282

研究課題名(和文) ブラックホールの観測的検証へ向けた光線および偏光の解析

研究課題名(英文) Analysis of light ray and polarization towards observational verification of black holes

研究代表者

石原 秀樹 (ISHIHARA, Hideki)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80183739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホールの周りに光源が分布するとき、ブラックホールによる光の吸収が「影」として観測されることが予想されている。ブラックホール周りの光の不安定円軌道により、対数的に光度が発散するような「明輪」の存在を示した。

Kerr ブラックホールの回転が最大になるとき、ある種類の光の束縛軌道が地平面に漸近することを明らかにした。このとき、光線束の断面の歪みはゼロになることを明らかにした。

波面がらせん状にねじれている「光渦」に対し、アイコナル近似により軌道の方程式を導いた。回転ブラックホールの周りの光渦は、ブラックホールの角運動量と光渦の間の相互作用により、測地線からずれることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Black hole shadow is expected to be observed if continuous light source is distributed around the black hole. Owing to unstable circular orbits of photon around the black hole, bright ring on the edge of the shadow appears. The radius of the ring is determined by the mass and angular momentum of the black hole.

We clarified that the radius of a class of bound orbits of photon around the Kerr black hole approaches to the event horizon if the rotation of the black hole becomes maximum. The shear of the congruence of the photon orbits vanishes, then we can observe the photon orbit winding the horizon of the maximally rotating black holes.

Optical vortices, the wave front is helicoid, carry orbital angular momentum. Using an improved eikonal approximation, we derived equations that describe the orbits of optical vortex. Optical vortex around a rotating black hole differs from the null geodesic by the interaction between the optical vortex and angular momentum of the black hole.

研究分野：宇宙論

キーワード：相対性理論 宇宙論 ブラックホール 光の測地線

1. 研究開始当初の背景

(1) 天の川銀河の中心の電波源 Sgr A*の周りにはいくつかの恒星が公転運動をしていることが観測され、それらの軌道より、公転の中心には巨大なブラックホールが考えられている。日米欧の共同研究のもと、世界各地の電波望遠鏡が協力して干渉計を構成し、このブラックホールを撮像しようという計画が進んでいる。さらに、天の川銀河だけでなく、ほとんどすべての銀河中心には、巨大なブラックホールが存在すると考えられており、今後、ブラックホールに関連する観測的研究は、ますます盛んになると考えられる。

(2) ブラックホールは、一般相対論においては、そこからの光が無制限に到達できない領域として定義されるので、原理的に直接観測はできない。ブラックホールの時空構造を反映した、ブラックホールの周りで起こる物理現象を観測することによって、ブラックホールの存在を間接的に検証することになるが、どのような現象に着目し、どのような物理量を観測するかが重要な問題となる。

2. 研究の目的

ブラックホールの観測的検証を目指して、ブラックホールの周りの粒子の運動、光の軌道、光の偏光の性質を明らかにする。ブラックホールの特有の幾何学的性質である Killing ベクトルや Killing テンソルの存在と光を通した観測量を結びつけ、観測量からブラックホールの質量や角運動量についての情報を得る。

3. 研究の方法

具体的に次の点に着目する。

(1) ブラックホールの周りの光の束縛軌道

ブラックホールの周りの光の軌道について有効ポテンシャルを用いて解析する。4次元時空においてはブラックホールの周りの光の束縛軌道は不安定であることが知られているが、高次元時空のブラックホールでの光の束縛軌道と比較し、理解を深める。

光に対してヌル測地線を解くことによって、不安定性の程度がブラックホールの角運動量にどのように依存するかを解析する。

(2) 事象の地平面近傍の光

ブラックホールの事象の地平面近傍の光源から来る光や事象の地平面近傍を通過する光を解析するためには、地平面において計量が正則になるような座標系を設定することが重要になる。また、ブラックホール近傍での粒子や光の解析を十分な精度で行うためには、保存量を最大限に用いることが必要になる。Killing ベクトルや Killing テンソルに関するこれまでの研究成果を生かして、状況に応じてどのような保存量があるかを調べ、その保存量を用いて基礎過程を解析する。

(3) 光渦の軌道

光の波面がらせん状をなし、光軸のまわりに軌道角運動量をもった光である光渦の軌道をアイコナル近似を用いて解析する。通常の光線に対してアイコナル近似を用いると、光線の軌道はヌル測地線に従うことが導出されるが、光渦の場合、波面のらせん形状を考慮した取り扱いをする必要がある。そこで、波動性を取り入れたアイコナル近似を考案し、それを用いて光渦の軌道がヌル測地線からずれるかどうかを明らかにする。

4. 研究成果

曲がった時空中で光は測地線にそって進み、重力レンズ効果として観測される。光の測地線は時空の幾何構造を調べるための重要なプローブになっている。本研究の実績として3つのことが挙げられる。

1 つ目は、ブラックホールのまわりの光の周回軌道に関するもので、「ブラックホールの影」の周りに明るいうりリング状の領域「明輪」がみられることを明らかにしたことである。ブラックホールの周りに連続的な光源が分布するときに、ブラックホールによる光の吸収が「ブラックホールの影」として観測されることが理論的に予想されている。ブラックホールの周りに光の不安定円軌道が存在することにより、ブラックホールの質量と角運動量によって決まる半径に近づくにしたがって対数的に光度が発散するような「明輪」の存在を理論的に示した。回転しているブラックホールでは、赤道面上の明輪の光度の差

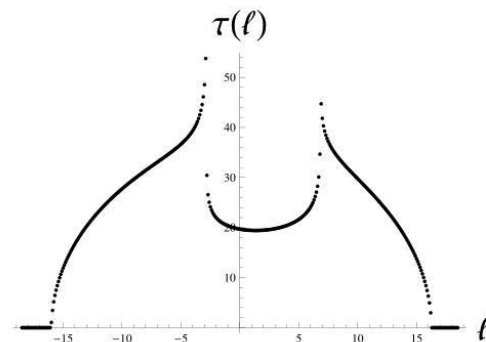


図1: Kerr ブラックホールの周りの明輪の光度

によって回転のパラメータが決定できることを指摘した。

2 つ目は、Kerr ブラックホールの周りの光の束縛軌道についての新しい知見である。

回転するブラックホールを記述する Kerr 時空は、回転の度合いを表すスピンパラメータ a が質量 M より小さいときはブラックホールを表す。今回の研究で、Kerr ブラックホールの場合は2種類の光の束縛軌道があり、第2種の束縛軌道は、 $a \rightarrow M$ の極限で軌道が

地平面に漸近することを明らかにした。

一般に、光の束縛軌道に沿った光線束の断面は歪み、これが断面の面積の増加を誘導するので、ブラックホールの周りを周回する光線の像は周回ごとに指数関数的に暗くなり、実際に観測することは難しい。しかし、第2種の光の束縛軌道に沿った光線束の断面は、 $a \rightarrow M$ の極限ではひずみが生じないことがわかった。このことは、この軌道を周回してから観測者に到達する光が暗くならず、観測が可能になることを示唆する。

3つ目は、光の波面が光軸のまわりでねじれている「光渦」の軌道に関するもので、回

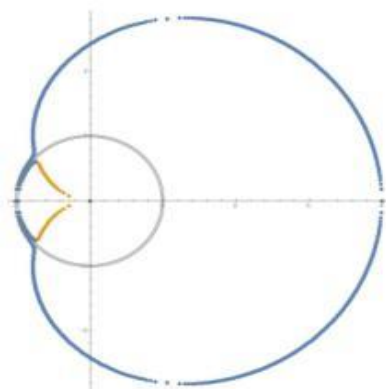


図 最大回転Kerrブラックホールの周りの光の束縛軌道の断面

転するブラックホールの周りの光渦の軌道がヌル測地線からずれることを明らかにしたことである。光はスピン1のベクトル場であり、偏光の自由度がある。円偏光の光はエネルギーとともに、スピン角運動量を運ぶ。一方、円偏光とは別の状態として、光渦も光軸のまわりの軌道角運動量を運ぶことが知られている。波長が短い光に対しては、アイコナル近似を用いると、軌道がヌル測地線に沿うことが導かれるが、アイコナル近似に波動性を取り入れることによって、光渦の軌道が従う方程式を導いた。この方程式は、測地線方程式からずれており、回転するブラックホールの周りの光渦を考えた場合、そのずれは、ブラックホールの角運動量と光渦の角運動量との相互作用によるものであることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① [Hideki Ishihara](#), Masashi Kimura, Ken Matsuno, "Charged black strings in a five-dimensional Kasner universe", Phys. Rev. D, 査読有, 93 (2016) no. 2, 024037.
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.024037

- ② Ken Matsuno, [Hideki Ishihara](#), Masashi Kimura, "A pair of extremal charged black holes on Kerr-Taub-bolt space", Class. Quant. Grav. 査読有, 32 (2015) no. 21, 215008.
DOI: 10.1088/0264-9381/32/21/215008
- ③ Yuki Kanou, [Hideki Ishihara](#), Masashi Kimura, Ken Matsuno, Takamitsu Tatsuoka, "Charged Black Holes in a Five-dimensional Kaluza-Klein Universe" Phys. Rev. D, 査読有, 90 (2014) 8, 084004.
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.084004
- ④ Takahisa Igata, [Hideki Ishihara](#), Yohsuke Takamori. "Stable Bound Orbits of Massless Particles around a Black Ring", Phys. Rev. D, 査読有, 87 (2013) 104005.
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.104005
- ⑤ Takahisa Igata, [Hideki Ishihara](#), Keisuke Nishiwaki, "Stationary Closed Strings in Five-dimensional Flat Spacetime", Phys. Rev. D, 査読有, 86 (2012) 104020.
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.104020
- ⑥ Ken Matsuno, [Hideki Ishihara](#), Masashi Kimura, Takamitsu Tatsuoka, "Kaluza-Klein vacuum multi-black holes in five-dimensions", Phys. Rev. D86 (2012) 044036.
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.044036
- ⑦ Takamitsu Tatsuoka, [Hideki Ishihara](#), Masashi Kimura, Ken Matsuno. "Extremal Charged Black Holes with a Twisted Extra Dimension", Phys. Rev. D, 査読有, 85 (2012) 044006.
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.044006

[学会発表] (計 16 件)

- ① [Hideki Ishihara](#), "Propagation of an optical vortex in a curved space-time", Fourteenth Marcel Grossmann Meeting, July 12-18, 2015, University of Rome (Italy), Rome.
- ② Ken Matsuno, M. Kimura and [Hideki Ishihara](#), "Multi-black holes on Kerr-Taub-bolt space in five-dimensional Einstein-Maxwell theory", The 24th JGRG Workshop, 10-14 Nov. 2014, Kavli IPMU, (Chiba, Kashiwa)
- ③ [Hideki Ishihara](#), M. Kimura and K. Matsuno, "Charged multi-black

strings in a five-dimensional Kaluza-Klein universe”, The 24th JGRG Workshop, 10-14 Nov. 2014, Kavli IPMU, (Chiba, Kashiwa)

- ④ Atsuki Masuda, Shunichiro Kinoshita, Hideki Ishihara, “Propagation of twisted waves in a Kerr space-time”, The 23th JGRG workshop, 2013, Nov. 5-8, Hirosaki University, (Aomori, Hirosaki)
- ⑤ Igata Takahisa, Hideki Ishihara, Y. Takamori, “Stable Null Bound Orbits around a Black Ring”, RESCEU SYMPOSIUM ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION, The 22th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG22), November 12 - 16 2012, The University of Tokyo (Tokyo, Bukyou-ku)
- ⑥ Igata Takahisa, Hideki Ishihara, Y. Takamori, “Stable Bound Orbits around Black Rings”, The 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20) 21-25, Sept. 2010, Yukawa Institute, Kyoto University, (Kyoto, Kyoto)
- ⑦ 石原秀樹, 木村匡志, 松野研 “Kasner 宇宙内の帯電ブラックストリング” 日本物理学会 2015 年 秋季大会, 2015 年 9 月 25 日-28 日, 「大阪市立大 (大阪府, 大阪市)」
- ⑧ 松野研, 石原秀樹, 木村匡志, “Kerr-Taub-bolt 空間上の 5 次元多体ブラックホール”, 日本物理学会 2014 年 秋季大会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日-24 日, 「早稲田大 (東京都, 新宿区)」
- ⑨ 西川隆介, 梶田篤樹, 中尾憲一, 石原秀樹, 南部保貞, “回転ブラックホールと光の軌道角運動量”, 日本物理学会 2014 年 秋季大会, 2014 年 9 月 18 日-21 日, 「佐賀大 (佐賀県, 佐賀市)」
- ⑩ 梶田篤樹, 石原秀樹, 伊形尚久, 中尾憲一, “カー時空での円偏光状態にある光線束の伝播”, 日本物理学会 第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日~30 日「東海大学 (神奈川県, 平塚市)」
- ⑪ 高田真聡, 石原秀樹, 伊形尚久, “ブラックホールシャドウと Kerr パラメータ” 日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 20 日~23 日「高知大学 (高知県, 高知市)」
- ⑫ 松野研, 石原秀樹, 木村匡志, 龍岡聖満, “重力インスタントン上の 5 次元多体ブラ

ックホール”, 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 11 日~14 日「京都産業大学 (京都府, 京都市)」

- ⑬ 孝森洋介, 石原秀樹, “4 次元 Melvin 解から生成される正則な 5 次元 Kaluza-Klein 時空” 日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 11 日~14 日「京都産業大学 (京都府, 京都市)」
- ⑭ 梶田篤樹, 石原秀樹, 中尾憲一, “角運動量をもった波動のカー時空での伝播”, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日 - 29 日「広島大学 (広島県, 西条市)」

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 秀樹 (ISHIHARA, Hideki)
大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号 : 80183739

(2) 研究分担者

古池 達彦 (KOIKE, Tatsuhiko)
慶應義塾大学・理工学部・講師
研究者番号 : 40286646