

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05358

研究課題名(和文) 最大回転ブラックホールのホライズン近傍における対称性と物理現象

研究課題名(英文) Symmetry near maximally rotating black hole horizon and physical phenomena

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：最大の自転角運動量をもったブラックホールは、ホライズン近傍の幾何学的な対称性が高くなる。光やコスミック・ストリングが引き起こすホライズン近傍の物理現象を理論的に予言した。まず、最大回転ブラックホールの周りに束縛される光には、周回軌道がホライズンにいくらかでも近づくものがあり、この光線束は、断面が変形せず広がらないことがわかった。また、光の軌道に沿って偏光ベクトルが回転することを明らかにした。次に、ブラックホールの周りで剛体回転するストリングには、ホライズンと無限遠をつなぐストリング解とホライズン近傍の有界領域に束縛され、配位がカオス性を示すストリング解があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最大回転ブラックホールのホライズンに漸近する束縛軌道の光線束は断面が広がらない。これは、この光線がもたらす像が暗くならないことを意味し、観測可能性を強く示唆している。さらに、偏光ベクトルの光線に沿った回転効果は、回転ブラックホールの幾何学的性質の情報をもたらす。これらは、ブラックホールシャドウの撮像などの観測的研究に対して重要な意味をもつと考えられる。また、コスミック・ストリングの最終状態として、ブラックホールにストリングがピン止めされたり、ブラックホールの周りの有界領域に束縛されたりすることを予言しており、コスミック・ストリングの探索に重要な手掛かりを与える。

研究成果の概要(英文)：Geometrical symmetry is enhanced near horizon region of maximally rotating black holes. New physical phenomena caused by light rays and cosmic strings are proposed in that region.

First, there exist bound orbits of light rays that approach to the event horizon of maximally rotating black holes. The expansion of their congruence vanishes in that case. Furthermore, the polarization vectors rotate along the light orbits.

Secondly, there are two types of solutions that represent rigidly rotating cosmic strings: string connects a black hole horizon and infinity; string confined in a finite region near a black hole. Chaotic behaviors appear in the latter case.

研究分野：相対論的宇宙物理学

キーワード：ブラックホール カー時空 光の測地線 一般相対論 ストリング 重力理論 宇宙物理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 一般相対論で記述されるブラックホール時空中では、時空の対称性を表す Killing ベクトルと Killing テンソルが存在し、これらに対応する保存量によって測地線方程式は積分可能であることが知られている。特に、最大回転ブラックホールのホライズン近傍では、時空の対称性が拡大することがわかっており、これに関係した特徴的な物理現象を見出すことが期待される。

(2) 申請者は、保存量を用いて、回転ブラックホールの周りの光の不安定束縛軌道や、光線に沿った偏光ベクトルの伝播について研究してきた。また、対称性のある時空中の南部 後藤 ストリングに幾何学的対称性を課すことによって、有限自由度の力学系に帰着させる研究を行ってきた。

(3) 最近、重力波干渉計や超長基線電波干渉計を用いてブラックホールに関連した観測的研究が急速に進んでいる。これまでの理論的研究をさらに進めることによって、観測的研究と連携した大きな進展が期待できる。

2. 研究の目的

回転するブラックホールは Kerr 計量で表され、いくつかの幾何学的対称性をもつが、特に、最大回転 Kerr ブラックホールのホライズン近傍では対称性が拡大する。

本研究では、光やコスミック・ストリングがブラックホールの周りに束縛され得るということに着目して、ブラックホールを特徴づけるホライズン近傍の物理現象を、ブラックホール時空の対称性を用いて解明し、観測可能性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) ブラックホールを表す Kerr 計量は、時空の対称性を表す Killing ベクトルと Killing テンソルをもち、これらに対応する保存量によって測地線方程式は積分可能となる。また、Killing-Yano テンソルと共形 Killing-Yano テンソルの存在によって、光の測地線に沿った偏光ベクトルの伝播が決定される。

これらのブラックホールの幾何学的対称性を用いて、回転するブラックホールの周りの光の束縛軌道について解析する。

(2) 幾何学的対称性をもった時空中を運動する南部-後藤ストリングは、その世界面上に対称性を課すことによって、ストリングの運動を記述する偏微分方程式を常微分方程式に帰着することができる。この方法をブラックホール中のコスミック・ストリングに適用し、ブラックホールに束縛されたストリング解を解析する。

4. 研究成果

(1) 回転ブラックホールに束縛される光

ブラックホールの周りに分布する物質が光源になると、ブラックホール時空特有の像、いわゆるブラックホール シャドウが得られることが理論的に予言される。これは、ブラックホールの周りの光の束縛軌道の研究に強く関連している。一般相対論で記述されるブラックホール時空中の光の軌道を表すヌル測地線は、時空の対称性を表す Killing ベクトルと Killing テンソルの存在により積分可能である。特に、最大回転 Kerr ブラックホールの場合、ホライズン近傍では時空の対称性が拡大しているので、そこでの光の測地線に特徴的な性質が現われることが期待できる。

光の束縛軌道

球対称な静的ブラックホールである Schwarzschild 時空中における光の不安定円軌道は 1 種類で、軌道の集合は球面をなす。一方、回転するブラックホールである Kerr 時空中では、光の不安定円軌道は 2 つのクラスの束縛軌道に分類されることを見出した。これらは最大回転ブラックホールの極限において、カージオイド曲線で特徴づけられるクラスと、ホライズンに漸近するクラスであり（図 1 参照）、Killing テンソルに対応する保存量である Carter 定数によって区別される。

束縛軌道の光線束を考えたとき、その断面の形は時空の Weyl 曲率テンソルのためにゆがみ（シアー）が生じ、それが原因となり光線束の断面積の面積は急激に増加する。このことは、光がブラックホールの周りを周回すると、その光線束でもたらされる像が急激に暗くなることを意味する。Schwarzschild 時空の光線束や Kerr 時空のカージオイドクラスの光線束はこの性質をもつ。一方、最大回転ブラックホール時空のホライズンクラスの光線束は断面のゆがみがないことが明らかになった。ゆえに、断面積が変化しない光線束が存在し、これは、光が最大回転ブラックホールの周りを周回しても、それらがもたらす像が暗くならないことを意味する。

偏光ベクトル

直線偏光した光が磁場とプラズマがある領域を通過すると、その偏光面が回転し、Faraday 効果と呼ばれている。一方、直線偏光した光が Kerr 時空中を伝搬すると、時空の幾何学的性質によって、偏光面が回転することがわかっている（重力 Faraday 効果）。

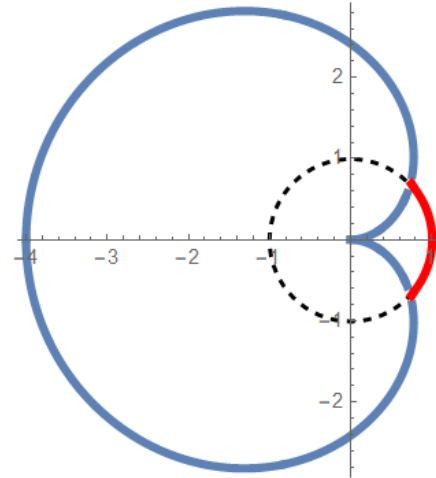


図 1 .カージオイドクラス(青)とホライズンクラス(赤)．点線はホライズン

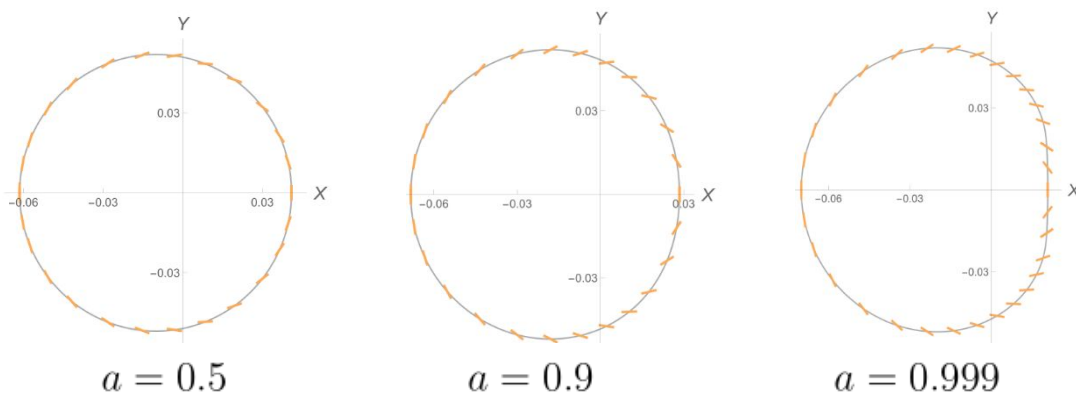


図 2 . 偏光ベクトルの回転 . スピンパラメーター a への依存性

光源における偏光の向きを仮定すると、遠方でどのような偏光の向きを観測するかは、Kerr 時空中に存在する Killing-Yano テンソルと共形 Killing-Yano テンソルによって決定される。こ

れを用いて、偏光ベクトルの回転が、ブラックホールのスピンパラメータへの依存性を解析した（図2参照）。

(2) 回転ブラックホールの周りのコスミック・ストリング

初期宇宙の真空の相転移で形成されると考えられているコスミック・ストリングは、ブラックホールに束縛される可能性があり、ブラックホール時空の幾何学的構造を探る探査子として興味深い。

ブラックホール時空は、一般的に、定常性と軸対称性をもった Kerr 時空で記述される。南部後藤ストリングにこれらの対称性を組み合わせた対称性を課し、ブラックホールの周りで剛体回転すると仮定すると、ストリングの運動を記述する偏微分方程式が常微分方程式に帰着する。

このとき、ストリング解の配位を解析すると、ブラックホールのホライズンに突き刺さり、ブラックホールと無限遠をつなぐようなストリング（図3参照）と、ブラックホールの周りの有界領域に束縛されるストリング（図4参照）の解があることがわかった。

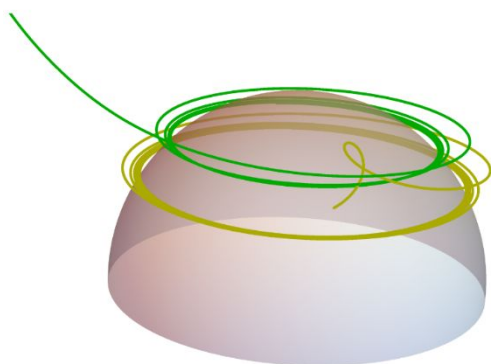


図3 . ホライズンに突き刺さるストリング

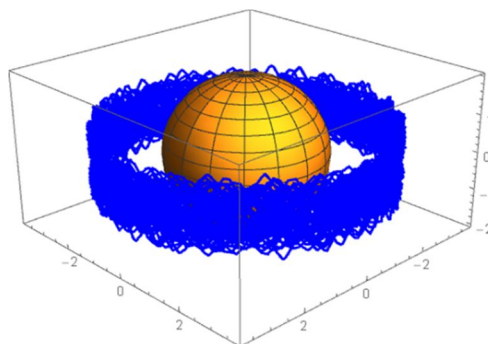


図4 . 有界領域束縛されるストリング

ホライズンに突き刺さるストリングでは、ストリングに沿ってエネルギーと角運動量の流れが生じ、ブラックホールの熱力学第2法則と呼ばれるホライズンの面積増大則を満たすものだけが許されることがわかった。

ストリングがブラックホールの近くの有界な領域に束縛される場合の配位は、解を特徴づけるパラメータの範囲によって、空間的配位がカオス性を示すことを明らかにした。特に、最大回転ブラックホールの場合、解として、ホライズン近傍の薄い球殻内に拘束された配位が存在することがわかった。

これらの配位は、コスミック・ストリングの最終状態として可能なものであり、宇宙においてコスミック・ストリングを探索するうえで、重要な手掛かりになる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 Morisawa Yoshiyuki, Hasegawa Soichi, Koike Tatsuhiko, Ishihara Hideki	4. 巻 36
2. 論文標題 Cohomogeneity-one-string integrability of spacetimes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 155009 -155009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6382/ab2e28	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 Igata Takahisa, Ishihara Hideki, Yasunishi Yu	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 Hideki Ishihara, Tatsuya Ogawa	4. 巻 99
2. 論文標題 Homogeneous Balls in a Spontaneously Broken U(1) Gauge Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 56019
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.056019	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 Hideki Ishihara, Tatsuya Ogawa	4. 巻 2019
2. 論文標題 Charge Screened Nontopological Solitons in a Spontaneously Broken U(1) Gauge Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 021B01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz005	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 Igata Takahisa, Ishihara Hideki, Tsuchiya Masataka, Yoo Chul-Moon	4. 巻 98
2. 論文標題 Rigidly rotating string sticking in a Kerr black hole	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.064021	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 Hideki Ishihara, Ken Matsuno, Masaaki Takahashi, and Syuto Teramae	4. 巻 98
2. 論文標題 Particle acceleration by ion-acoustic solitons in plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.123010	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 Hideki Ishihara, Masashi Kimura, Ken Matsuno	4. 巻 93
2. 論文標題 Charged black strings in a five-dimensional Kasner universe	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.024037	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20件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 H. Ishihara and T. Igata
2. 発表標題 Can we observe spherical photon orbits in near-extremal Kerr black holes?
3. 学会等名 22nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T.Ogawa and H.Ishihara
2 . 発表標題 Charge Screened Boson Stars in a Spontaneous Broken U(1) Gauge Theory
3 . 学会等名 22nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON GENERAL RELATIVITY AND GRAVITATION (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T.Igata, H.Ishihara and M.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 Ken Matsuno, H.Ishihara, M.Takahashi and Y.Masada
2 . 発表標題 Particle acceleration by ion-acoustic solitons in plasma in a magnetic field
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 T.Ogawa and H.Ishihara
2 . 発表標題 Charge Screened Boson Stars In a Spontaneously Broken U(1) Gauge Theory
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 伊形尚久, 石原秀樹, 高橋真聡
2. 発表標題 Can we observe spherical photon orbits in near-extremal Kerr black holes?
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川達也, 石原秀樹
2. 発表標題 Charge Screened Boson Stars
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 槌谷将隆, 柳哲文, 松村央, 石原秀樹, 伊形尚久
2. 発表標題 Chaotic Motion of a Cohomogeneity-One String in Extremal Kerr Spacetime
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideki Ishihara, T.Igata, M.Tsuchiya, and C.M.Yoo
2. 発表標題 Rigidly Rotating Strings in a Kerr Black Hole
3. 学会等名 The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satsuki Matsuno, and Hideki Ishihara
2. 発表標題 Black holes submerged in AdS
3. 学会等名 The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Ogawa, and Hideki Ishihara
2. 発表標題 Charge screened boson stars
3. 学会等名 The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideki Ishihara, and Tatsuya Ogawa
2. 発表標題 Charge screened non-topological solitons
3. 学会等名 The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 槌谷将隆, 柳哲文, 松村央, 石原秀樹, 伊形尚久
2. 発表標題 Chaotic Motion of a Cohomogeneity-One String in Extremal Kerr Spacetime
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S.Matsuno, H. Ishihara
2. 発表標題 Black holes submerged in AdS
3. 学会等名 The 27th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳哲文, 伊形尚久, 石原秀樹, 槌谷将隆
2. 発表標題 Rigidly Rotating Co-homogeneity-1 Strings in the Kerr Spacetime
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石原秀樹
2. 発表標題 重力場中の光渦の軌道
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石原 秀樹
2. 発表標題 Nambu-Goto strings with geometrical symmetry
3. 学会等名 26th General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石原秀樹, 松野阜
2. 発表標題 Black holes submerged in AdS
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松野研, 石原秀樹, 寺前柊斗, 高橋真聡
2. 発表標題 プラズマ中の密度波ソリトンによる荷電粒子加速
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小川達也, 石原秀樹
2. 発表標題 Weak charge shielding effect in a symmetry broken phase in $SU(2) \times U(1)$ gauge theory
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----