

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05356

研究課題名（和文）ブラックホール時空中におけるスピン粒子の軌道変化の研究

研究課題名（英文）Orbital evolution of a spinning particle in black hole spacetime

研究代表者

佐合 紀親（Sago, Norichika）

九州大学・基幹教育院・助教

研究者番号：50540291

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カーブラックホール時空中を運動するスピン粒子から放出される重力波とその軌道への影響を評価した。赤道面円軌道で中心ブラックホールと粒子のスピンの向きが揃っている場合に、重力波によるエネルギー放出量をポストニュートン6次精度まで導出した。その結果をもとに、軌道位相のスピンによる補正を評価した。さらに、重力波の計算を、赤道面に対して軌道面及び粒子スピンが少し傾いている場合に拡張した。重力波振幅とエネルギー放出量に対するポストニュートン公式を4次精度まで導出し、スピン-軌道相互作用が重力波の変調と軌道の永年発展に及ぼす影響について評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、相対論的連星を扱う手法としてブラックホール摂動法を採用しており、相補的な関係にあるポストニュートン法や数値相対論により得られる成果と組み合わせることで、重力波データ解析で使用する理論波形を効率良く計算することが可能になる。

連星ブラックホールの質量やスピンの精密な測定は、一般相対性理論を含む重力理論の検証にもつながる。近年、暗黒エネルギー問題等の重力の諸問題を解決するために様々な修正重力理論が提案されているなか、本研究の成果は重力理論の探求に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：I investigated the gravitational wave from a spinning particle orbiting a Kerr black hole and the effect on the orbital evolution. In the case of a circular, equatorial orbit with aligned spins, we derived 6th post-Newtonian formula of energy flux of the gravitational wave based on black hole perturbation theory. From this result, I estimated the correction to the orbital phase induced by the particle's spin. I extended the calculation to the case of a circular, slightly inclined orbit with slightly misaligned spins. I derived 4th post-Newtonian formulas of the gravitational amplitude and energy flux, and estimated the corrections to the modulation and the orbital evolution induced by the spin-orbital interaction.

研究分野：重力波物理学

キーワード：ブラックホール摂動法 重力波 重力波輻射の反作用 自己力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

一般相対性理論により予言される重力波は、時空の歪みが光速で伝播する現象である。1974年に R.Hulse 氏と J.Taylor 氏が発見した連星パルサー PSR1913+16 の継続的な観測から、その公転周期の減少率が重力波放出を仮定した時の値と良く一致することが示された。これにより、重力波の存在は間接的に証明されたと考えられている。本研究開始直前、2016年2月には、重力波観測器 LIGO により重力波が直接観測されたことが報告され、重力波による天文学の幕が開けた。現在、LIGO に加えて、世界の様々な研究機関が競って重力波観測計画を進めている。我が国においても、岐阜県神岡鉱山に建設された大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の準備が進められており、本格的観測を前にして理論的研究も精力的に行われている。

重力波検出を実現するためには、検出器の感度向上と共に、効率的で信頼性の高いデータ解析法の構築が必要となる。この様な解析法の一つに、理論的に予測した重力波波形と観測データの相関をとる手法がある。「マッチドフィルター法」と呼ばれるこの手法は、主要な重力波源である相対論的連星に対する強力なデータ解析法である。重力波の理論波形はマッチドフィルター法の要であり、精密な理論波形テンプレートの構築が求められている。

### 2. 研究の目的

重力波理論波形の精密な予測のためには、連星の運動を一般相対性理論の枠組みで正しく理解しなければならない。連星の運動の問題、いわゆる二体問題は天体力学において最も基礎的な問題である。ニュートンの重力理論では、二体問題は厳密に解くことができるが、一般相対性理論においては二体問題の厳密解を得ることは難しいことが知られている。これは、重力波放射によるエネルギーや角運動量の損失に伴って、軌道が常に変化し、定常状態が存在しないためである。「重力波放射の反作用問題」として知られるこの問題は、一般相対性理論における重要課題として長らく研究されてきた。

本研究では、相対論的二体問題を「ブラックホール摂動法」を用いて取り扱い、有望な重力波源である相対論的連星の運動とその重力場変動を明らかにしていく。特に、天体の回転(スピン)に注目し、連星の運動や重力波波形に及ぼす影響を評価することを目的とする。

### 3. 研究の方法

ブラックホール摂動法では、ブラックホール時空中を運動する粒子で連星をモデル化する。この際、粒子により引き起こされる重力場摂動が粒子自身の運動に及ぼす影響、いわゆる「重力的反作用力」を考慮する必要がある。重力的反作用力の影響には、重力波放射の散逸効果、重力場摂動の保存力成分による補正、重力場の非線形効果がある。これらの効果を正しく粒子の運動方程式に取り入れることで、連星の運動や放出される重力波波形を精度よく予言することが可能となる。特に、マッチドフィルター法を適用する際に重要な重力波の位相情報は、散逸効果による軌道の永年変化に大きく影響を受けることが分かっている。過去の研究において、重力的反作用力の散逸成分を効率的に計算する手法を開発し、軌道の永年変化に関する解析的公式の導出に成功している。

本研究では、これまでの研究で構築した計算手法を、スピンをもつ粒子の場合に拡張することで、連星の運動や重力波波形へスピンが及ぼす影響を評価する。また、ポストニュートン法や数値相対論との比較を通して、連星の運動や放出される重力波波形を解析的に記述するモデルの構築、改良に取り組む。

### 4. 研究成果

最初のステップとして、赤道面円軌道で中心ブラックホールと粒子のスピンの向きが揃っている場合に注目した。ブラックホール摂動法を用いて重力波を計算し、無限遠方へのエネルギー放出量について6次精度のポストニュートン公式を導出した。得られた結果については、既に知られているポストニュートン3.5次精度の結果と一致していることを確認した。加えて、過去の計算では考慮されていなかったブラックホールに吸収されるエネルギーについても評価した。この結果をもとに、軌道位相のスピンの補正を評価し、ポストニュートン4次以上のスピン補正は宇宙重力波観測器 LISA が想定する観測にあまり影響しないという見込みを得た。

次に、赤道面に対して軌道面及び粒子スピンの向きが少しずれている場合に注目して、スピンの歳差運動の影響を評価することを目指した。そのために、まず、先行研究で赤道面円軌道に対して導出されていた重力波振幅の定式を、より一般の束縛軌道に対して適用できるように再定式化した。重力波の計算に必要なスピン粒子の軌道については、軌道傾斜角及び粒子スピンの大きさを展開パラメータとして、運動方程式を展開し、逐次的に展開係数を求めることで解を求めた。その結果を用いて、重力波振幅とエネルギーフラックスに対するポストニュートン公式を4次精度まで計算し、スピン-軌道相互作用による重力波の変調と軌道の永年発展に及ぼす影響について評価した。

また、当初計画では予定していなかったスピン 2 次精度の計算にも着手した。粒子スピンによって誘発される四重極モーメントの効果を運動方程式に加え、スピン 2 次精度までの展開を考  
えることで、基本振動数のスピン二次補正を計算した。現在、スピン 2 次精度の軌道、重力波の  
計算を引き続き進めている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件(うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件)

1. 著者名 Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, Takahiro Tanaka	4. 巻 2019
2. 論文標題 "Flux-balance formulae" for extreme mass-ratio inspirals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty136	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 Nakano Hiroyuki, Sago Norichika, Tagoshi Hideyuki, Tanaka Takahiro	4. 巻 2017
2. 論文標題 Black hole ringdown echoes and howls	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 071E01 ~ 071E01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx093	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 Fujita Ryuichi, Sago Norichika, Nakano Hiroyuki	4. 巻 35
2. 論文標題 Note on accuracy of the post-Newtonian approximation for extreme-mass ratio inspirals: retrograde orbits	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 027001 ~ 027001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa9ad5	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 3件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Norichika Sago
2. 発表標題 Gravitational radiation from a spinning particle orbiting a Kerr black hole
3. 学会等名 28th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐合 紀親、藤田龍一
2. 発表標題 ブラックホール時空を運動するスピン粒子の重力波放射：スピン2次精度の計算
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Norichika Sago
2. 発表標題 Status of Japanese working group for LISA science
3. 学会等名 Space Gravitational-Wave Detection (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐合 紀親
2. 発表標題 重力波輻射の反作用力について
3. 学会等名 相対論宇宙論 東北研究会 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐合 紀親
2. 発表標題 EMRIからの重力波
3. 学会等名 KEK-Cosmo 2018 Workshop 「宇宙重力波検出への期待」 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐合 紀親
2. 発表標題 ブラックホール時空における粒子の運動と重力波
3. 学会等名 重力・宇宙論研究会 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐合 紀親, 藤田 龍一
2. 発表標題 ブラックホール時空を運動するスピン粒子の重力波放射：歳差運動ありの場合
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 佐合 紀親
2. 発表標題 Gravitational waves from a spinning particle in Kerr spacetime
3. 学会等名 Spanish-Portuguese Relativity Meeting (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐合 紀親
2. 発表標題 Gravitational waves from a spinning particle orbiting a Kerr black hole
3. 学会等名 Compact stars and gravitational waves (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐合 紀親
2. 発表標題 ブラックホール時空を運動するスピン粒子の重力波放射：赤道面円軌道、歳差運動なしの場合
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
--	---------------------------	-----------------------	----