

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01895

研究課題名（和文）原始ブラックホールの質量，角運動量分布に関する理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical study of the mass and angular momentum distribution of primordial black holes

研究代表者

柳 哲文（Yoo, Chulmoon）

名古屋大学・理学研究科・講師

研究者番号：60467404

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：インフレーション中に生成された量子揺らぎを起源とする高密度領域が，宇宙初期に重力崩壊を起こした結果形成されるブラックホールを原始ブラックホール（PBH）と呼ぶ．本研究の目的は「どの程度の質量と角運動量を持つPBHがどのくらい存在するか」という問いに答える手法を確立することであり，原始ブラックホール数の統計的取り扱いについて，ピーク統計を用いた手法を確立した．また，非球対称PBH形成シミュレーション手法の開発に成功し，今後のシミュレーションを用いた研究に道筋をつけた．

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始ブラックホール(PBH:Primordial Black Hole)は重力波によって観測された連星ブラックホールや暗黒物質の候補として学術的にも社会的にも関心を集めている．PBHがこれらの天体を説明する可能性を追求するためにはPBHの統計的取り扱いとその非線形ダイナミクスの数値的解析が必要不可欠である．本研究課題においては，それらについて今後のより詳細な研究につながる道筋をつけたという点で大きな意義を持つ．

研究成果の概要（英文）：Primordial Black Holes are the black holes which formed in the early universe. The purpose of this work is to develop the procedure for the estimation of the abundance of primordial black holes and the typical mass and the angular momentum of them. As for the statistical treatment, we developed the procedure based on the peak theory. We have also developed the numerical simulation of a non-spherical primordial black hole. These achievements give basis of more realistic analysis on the dynamics and the abundance in the future.

研究分野：相対論的宇宙論

キーワード：原始ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

宇宙の非一様性の起源はインフレーション中の量子揺らぎであるとされている。この生成された揺らぎの中で、稀に大きな振幅を持つ物は、成長開始後に重力崩壊を起こし、ブラックホールを形成すると考えられている。このブラックホールは星の重力崩壊などによって形成されるブラックホールと異なり、原理的にどんな質量を取ることでもできるため、それらと区別して原始ブラックホール(PBH)と呼ばれている。

$10^{15}g$ 以下の質量の PBH は現在までにホーキング輻射という量子的輻射機構によって蒸発していると考えられており、その蒸発過程で生じる粒子が元素合成に及ぼす影響から $10^{15}g$ 以下の質量の PBH 量に制限が付けられている。また、質量が $10^{15}g$ 程度の PBH の輻射はガンマ線背景輻射に寄与するため、それによる観測的制限がある。 $10^{15}g$ 以上の PBH は降着円盤からの輻射の制限や重力レンズによるコンパクト天体探査による制限が存在する。形成される PBH の量はインフレーション中に生成される揺らぎの大きさと直接関係しており、揺らぎの大きさはインフレーションを引き起こすスカラー場のポテンシャルに依存している。すなわち、PBH に対する観測的制限はインフレーションモデルに対しての制限につながり、様々な方面からの活発な研究がなされている。特に、CMB や大規模構造の観測では制限をつけようのない、小スケールの揺らぎの振幅にも制限が付けられる点が特徴的であり、非常に重要である。また、PBH が暗黒物質の大きな部分を占める可能性や重力波観測によって存在が明らかとなった BH 連星の起源としても PBH が注目を集めている。

2. 研究の目的

本研究の目的は「どの程度の質量と角運動量を持つ PBH がどのくらい存在するか」という問いに答える手法を確立することである。この PBH の質量、角運動量分布は大きく分けて3つの段階の影響を受ける。一つはインフレーション起源の初期揺らぎの性質であり、次に重力崩壊を起こす時期の物質の構成要素、最後に形成後の物質降着の影響である。本研究では主に初期揺らぎと重力崩壊時の環境に焦点をあて、それらを系統的に扱うことによって、PBH の質量角運動量分布を明らかにする手法を提供することを主な目的とする。またその手法を用いて、初期揺らぎのモデルへの制限や、連星 BH 形成の可能性について検討を行う。

3. 研究の方法

・パワースペクトルと非ガウス性を表すパラメータで特徴づけられる初期揺らぎに対して、ピーク理論、及びその拡張を用いて、振幅や大きさ、非球対称性等を特徴づけるパラメータを持つピークの個数分布を求め、PBH の形成条件と合わせることで PBH 量の計算手法を確立する。これまでに明らかになっていない、非ガウス性と window 関数の適切な導入方法を確立する。

・ピーク統計に従って振られた各パラメータセットに対して、それを初期条件とする重力崩壊過程を計算する数値シミュレーションコードを開発する。これによって PBH 形成の有無、PBH が形成された場合はその質量とスピンパラメータが、初期条件と物質の状態方程式に応じて調べられるようにする。

・ピーク統計と PBH 形成シミュレーションを統合し、解析的なモデルの構築、もしくはモンテカルロシミュレーションによって PBH の変数 M , a に対する分布を得る手法を確立する。特定の初期揺らぎモデルについて得られる PBH 統計を用いて BH 連星の量と統計的性質についての予言を行う。

4. 研究成果

・非ガウス性を考慮した PBH 量の算出方法の確立

PBH の量を見積もる際、曲率揺らぎがガウス分布に従う場合については、ピーク理論を用いた PBH 量の見積もり方法がすでに知られていた。本研究ではこの手法を局所タイプという特定の非ガウス性を持った場合について拡張した[JCAP09(2019)033]。また、非ガウス性が極端に大きい場合については典型的な形状における PBH 形成条件が明らかにならなかったため、数値計算を用いた解析によって、そのダイナミクスと PBH 形成に必要な振幅の期待値を明らかにすることで、非ガウス性の影響をより詳細に明らかにした[JCAP05(2022)012]。また、より現実的なインフレーションモデルから予言される非ガウス性を用いた解析を行い、その影響を詳細に見積もることに成功した[JCAP10(2021)053]。一方で、PBH 形成を引き起こす曲率揺らぎについて、これまでは揺らぎの統計がガウスのか、非ガウスのであっても局所的な非ガウス統計の場合のみが議論されていたが、摂動論の範囲で一般的非ガウス性を取り入れた一般論を展開し、一般的非ガウス性が PBH 形成率に及ぼす影響の解析的公式を初めて導いた[JCAP10(2022)094]。

・Window 関数を用いた任意のパワースペクトルに対する PBH 量の計算方法の確立

それまでのピーク理論を用いた PBH 量の見積もりは、主にパワースペクトルが狭い波数領域に限られている場合にのみ適用可能な物であった。本研究では Window 関数を適切に導入することで、任意のパワースペクトルに対して適用可能な PBH 量の見積もり方法を提案した [PTEP(2021)013E02]。これは狭いパワースペクトルの場合には以前方法による見積もりを再現するため、より広範な拡張された手法を提供する。

・非球対称 PBH 形成シミュレーション

非球対称な PBH 形成シミュレーションに世界で初めて成功した [PRD102(2020)043526]。輻射優勢期の原始ブラックホール形成において、扁平率が PBH 形成に必要な初期振幅の閾値に与える影響を定量的に見積もり、その影響が無視できるほど小さいことを示した。また、格子細分化法を導入することでより精密にブラックホールの地平面を解像することに成功し、非球対称原始ブラックホール形成シミュレーションを用いた、今後のより一般的な PBH 形成ダイナミクスの解析に道筋をつけた。

・等曲率揺らぎを起源とする原始ブラックホール形成

それまでの原始揺らぎを起源とする原始ブラックホール形成では曲率揺らぎが起源として考えられており、異なる物質要素の密度比の揺らぎである、等曲率揺らぎからの原始ブラックホール形成についてはほとんど考えられていなかった。本研究では宇宙初期の等曲率揺らぎによっても、それが曲率揺らぎに成長する段階で PBH 形成が起こりえることを示し、等曲率揺らぎへの観測的制限を始めて与えた [PRD105(2022)103530]。また、無質量スカラー場による等曲率揺らぎがある場合について、球対称シミュレーションを用いて、原始ブラックホール形成が確かに起こることを確認した [PRD105(2022)103538]。これは初めての等曲率揺らぎ起源の原始ブラックホール形成のシミュレーションである。

・輻射優勢期に形成される原始ブラックホールのスピンの見積もり

ピーク統計と線形摂動方程式をもとに、輻射優勢期に形成される原始ブラックホールのスピンの大きさを解析的に見積もった [ApJ908(2021)140]。それまでは重力崩壊を起こす領域がハッブルホライズンよりも小さくなって、成長を開始する時刻において、角運動量の値を見積もる手法が提案されていたが、この時刻を重力崩壊領域が背景時空の膨張から切り離される時刻に修正することで、より信頼性の高い見積もりを与えた。また、臨界重力崩壊現象から予言される質量分布を仮定することで、小さい質量の PBH がより大きなスピンを持ちうることを示した。

・原始ブラックホール連星の有効スピンと質量比の確率分布

輻射優勢期に形成される原始ブラックホールのスピンと質量の分布をもとに、それらがブラックホール連星を形成した場合に期待される、有効スピンと質量比の確率分布を明らかにした [ApJ939(2022)65]。原始ブラックホールは重力波によって観測されている連星ブラックホールの起源としても注目されている。連星ブラックホールからの重力波観測で直接的に観測される量は有効スピンと質量比であり、PBH がブラックホール連星を構成する場合にどのような有効スピンと質量比を取り得るかを明らかにすることは今後観測が進み、統計がたまるにつれて、他の起源説と比べる上で極めて重要となる。本研究では、臨界重力崩壊現象から予言される質量分布と線形摂動を用いた解析から得られるスピンの確率分布をもとに、二つの PBH がまったくランダムに選ばれると仮定して、有効スピンと質量比の分布を求めることに成功した。

・物質優勢期の重力崩壊における速度分散の影響

物質優勢期の原始ブラックホール形成では、圧力が小さいため、輻射優勢期と異なる取り扱いが必要となる。重力崩壊を阻害する主な要因として、3つ考えられる。一つは崩壊領域の非球対称性、もう一つは角運動量輸送に伴うスピンアップと遠心力による影響、最後に流体近似の破れに伴う速度分散の影響である。これまで前の二つの要因については先行研究が存在したが、3つ目の速度分散に影響については考えられてこなかった。本研究では簡単な重力崩壊のモデルと線形摂動から速度分散の影響を見積もり、回転の効果と同等な効果が得られ得ることを示した [JCAP02(2023)038]。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計53件（うち査読付論文 53件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoo Chul-Moon, Naruko Atsushi, Sakurai Yusuke, Takahashi Keitaro, Takamori Yohsuke, Yamauchi Daisuke	4. 巻 74
2. 論文標題 Axion cloud decay due to the axion γ photon conversion with background magnetic fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 64 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab110	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 Asami Hiroki, Yoo Chul-Moon	4. 巻 38
2. 論文標題 Thermal equilibrium states and instability of self-gravitating particles in an asymptotically AdS spacetime	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 165014 ~ 165014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac129e	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 Takamori Yohsuke, Naruko Atsushi, Sakurai Yusuke, Takahashi Keitaro, Yamauchi Daisuke, Yoo Chul-Moon	4. 巻 75
2. 論文標題 Testing the non-circularity of the spacetime around Sagittarius A* with orbiting pulsars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S217 ~ S231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac003	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 Kitajima Naoya, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2021
2. 論文標題 Primordial black holes in peak theory with a non-Gaussian tail	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 053 ~ 053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/10/053	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 Saito Daiki, Yoo Chul-Moon	4. 巻 104
2. 論文標題 False vacuum decay in rotating BTZ spacetimes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.124037	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 Yoo Chul-Moon, Harada Tomohiro, Hirano Shin'ichi, Okawa Hirotada, Sasaki Misao	4. 巻 105
2. 論文標題 Primordial black hole formation from massless scalar isocurvature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.103538	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 Escriba Albert, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2022
2. 論文標題 Simulation of primordial black holes with large negative non-Gaussianity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 012 ~ 012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/05/012	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 該当する

1. 著者名 Asami Hiroki, Yoo Chul-Moon	4. 巻 106
2. 論文標題 Gravothermal catastrophe and critical dimension in a D-dimensional asymptotically AdS spacetime	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.044065	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 Koga Yasutaka, Harada Tomohiro, Tada Yuichiro, Yokoyama Shuichiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 939
2. 論文標題 Effective Inspiral Spin Distribution of Primordial Black Hole Binaries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 65 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac93f1	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 Saito Daiki, Yoo Chul-Moon	4. 巻 107
2. 論文標題 Stationary vacuum bubble in a Kerr-de Sitter spacetime	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.064043	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 Asami Hiroki, Yoo Chul-Moon, Kitaku Ryo, Uemichi Keiya	4. 巻 107
2. 論文標題 Einstein-Vlasov system with equal-angular momenta in AdS5	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 64022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.064022	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 Yoo Chul-Moon	4. 巻 10
2. 論文標題 The Basics of Primordial Black Hole Formation and Abundance Estimation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 112 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies10060112	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 Harada Tomohiro, Kohri Kazunori, Sasaki Misao, Terada Takahiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 2023
2. 論文標題 Threshold of primordial black hole formation against velocity dispersion in matter-dominated era	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 038 ~ 038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/02/038	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 Okawa Hirokata, Fujisawa Kotaro, Yasutake Nobutoshi, Ogata Misa, Yamamoto Yu, Yamada Shoichi	4. 巻 520
2. 論文標題 A novel Lagrangian formulation to construct relativistic rotating stars: towards its application to their evolution calculations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 24 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad075	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 Banerjee A., O Colgain E., Sasaki M., Sheikh-Jabbari M.M., Yang T.	4. 巻 818
2. 論文標題 On problems with cosmography in cosmic dark ages	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136366 ~ 136366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136366	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 Domenech Guillem, Lin Chunshan, Sasaki Misao	4. 巻 2021
2. 論文標題 Gravitational wave constraints on the primordial black hole dominated early universe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 062 ~ 062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/04/062	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 Domenech Guillem, Sasaki Misao	4. 巻 103
2. 論文標題 Approximate gauge independence of the induced gravitational wave spectrum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63531
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.063531	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 Domenech Guillem, Sasaki Misao	4. 巻 2021
2. 論文標題 Cosmology of strongly interacting fermions in the early universe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 030 ~ 030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/06/030	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 Domenech Guillem, Takhistov Volodymyr, Sasaki Misao	4. 巻 823
2. 論文標題 Exploring evaporating primordial black holes with gravitational waves	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136722 ~ 136722
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136722	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 Cai Yi-Fu, Jiang Jie, Sasaki Misao, Vardanyan Valeri, Zhou Zihan	4. 巻 127
2. 論文標題 Beating the Lyth Bound by Parametric Resonance during Inflation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 251301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.251301	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 Passaglia Samuel, Sasaki Misao	4. 巻 105
2. 論文標題 Primordial black holes from CDM isocurvature perturbations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.103530	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 Sasaki Misao, Takhistov Volodymyr, Vardanyan Valeri, Zhang Ying-li	4. 巻 931
2. 論文標題 Establishing the Nonprimordial Origin of Black Hole?Neutron Star Mergers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 2~2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac66da	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 Cai Yi-Fu, Ma Xiao-Han, Sasaki Misao, Wang Dong-Gang, Zhou Zihan	4. 巻 834
2. 論文標題 One small step for an inflaton, one giant leap for inflation: A novel non-Gaussian tail and primordial black holes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137461 ~ 137461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.137461	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 Chen Pisin, Sasaki Misao, Yeom Dong-Han, Yoon Junggi	4. 巻 31
2. 論文標題 Resolving information loss paradox with Euclidean path integral	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 2242001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271822420019	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 Kanno Sugumi, Sasaki Misao	4. 巻 2022
2. 論文標題 Graviton non-gaussianity in ν -vacuum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2022)210	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 Cai Yi-Fu, Ma Xiao-Han, Sasaki Misao, Wang Dong-Gang, Zhou Zihan	4. 巻 2022
2. 論文標題 Highly non-Gaussian tails and primordial black holes from single-field inflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 034 ~ 034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/12/034	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 Matsubara Takahiko, Sasaki Misao	4. 巻 2022
2. 論文標題 Non-Gaussianity effects on the primordial black hole abundance for sharply-peaked primordial spectrum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 094 ~ 094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/10/094	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 Katagiri Takuya, Harada Tomohiro	4. 巻 38
2. 論文標題 Stability of small charged anti-de Sitter black holes in the Robin boundary	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 135026 ~ 135026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/abfed6	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 Kimura Masashi, Harada Tomohiro, Naruko Atsushi, Toma Kenji	4. 巻 2021
2. 論文標題 Backreaction of mass and angular momentum accretion on black holes: General formulation of metric perturbations and application to the Blandford-Znajek process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 93000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab101	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 Okabayashi Kazumasa, Harada Tomohiro, Nakao Ken-ichi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Robustness of particle creation in the formation of a compact object	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 2300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac006	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 Harada Tomohiro, Igata Takahisa, Sato Takuma, Carr Bernard	4. 巻 39
2. 論文標題 Complete classification of Friedmann-Lemaitre-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 -

1. 著者名 Harada Tomohiro, Maeda Hideki, Sato Takuma	4. 巻 833
2. 論文標題 Thakurta metric does not describe a cosmological black hole	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137332 ~ 137332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2022.137332	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 Sato Takuma, Maeda Hideki, Harada Tomohiro	4. 巻 39
2. 論文標題 Conformally Schwarzschild cosmological black holes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 215011 ~ 215011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ac902f	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 Nakao Ken-ichi, Okabayashi Kazumasa, Harada Tomohiro	4. 巻 106
2. 論文標題 Radiative gravastar with Gibbons-Hawking temperature	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 105006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.105006	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 Yoo Chul-Moon, Harada Tomohiro, Okawa Hirotda	4. 巻 102
2. 論文標題 Threshold of primordial black hole formation in nonspherical collapse	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.102.043526	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 Yoo Chul-Moon, Harada Tomohiro, Hirano Shin'ichi, Kohri Kazunori	4. 巻 2021
2. 論文標題 Abundance of primordial black holes in peak theory for an arbitrary power spectrum	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	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) 10.1093/ptep/ptaa155	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 Nakamura Tomohiro, Ikeda Taishi, Saito Ryo, Tanahashi Norihiro, Yoo Chul-Moon	4. 巻 103
2. 論文標題 Dynamical analysis of screening in scalar-tensor theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.103.024009	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 Harada Tomohiro, Yoo Chul-Moon, Kohri Kazunori, Koga Yasutaka, Monobe Takeru	4. 巻 908
2. 論文標題 Spins of Primordial Black Holes Formed in the Radiation-dominated Phase of the Universe: First-order Effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 140 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd9b9	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 Tsuchiya Masataka, Houri Tsuyoshi, Moon Yoo Chul	4. 巻 2021
2. 論文標題 The first-order symmetry operator on gravitational perturbations in the 5D Myers-Perry spacetime with equal angular momenta	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	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) 10.1093/ptep/ptab017	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 Domenech Guillem, Sasaki Misao	4. 巻 103
2. 論文標題 Approximate gauge independence of the induced gravitational wave spectrum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.103.063531	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 Zhou Zihan, Jiang Jie, Cai Yi-Fu, Sasaki Misao, Pi Shi	4. 巻 102
2. 論文標題 Primordial black holes and gravitational waves from resonant amplification during inflation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.102.103527	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 Sugiyama Sunao, Takhistov Volodymyr, Vitagliano Edoardo, Kusenko Alexander, Sasaki Misao, Takada Masahiro	4. 巻 814
2. 論文標題 Testing stochastic gravitational wave signals from primordial black holes with optical telescopes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136097 ~ 136097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136097	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 Domenech Guillem, Pi Shi, Sasaki Misao	4. 巻 2020
2. 論文標題 Induced gravitational waves as a probe of thermal history of the universe	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 017 ~ 017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/08/017	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 Pi Shi, Sasaki Misao	4. 巻 2020
2. 論文標題 Gravitational waves induced by scalar perturbations with a lognormal peak	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 037 ~ 037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/09/037	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 Matsumoto Jiro, Okumura Teppei, Sasaki Misao	4. 巻 2020
2. 論文標題 New measures to test modified gravity cosmologies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 059 ~ 059
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/07/059	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 Chen Pisin, Sasaki Misao, Yeom Dong-han	4. 巻 29
2. 論文標題 A path(-integral) toward non-perturbative effects in Hawking radiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics D	6. 最初と最後の頁 2050086 ~ 2050086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218271820500868	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 Kusenko Alexander, Sasaki Misao, Sugiyama Sunao, Takada Masahiro, Takhistov Volodymyr, Vitagliano Edoardo	4. 巻 125
2. 論文標題 Exploring Primordial Black Holes from the Multiverse with Optical Telescopes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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) 10.1103/PhysRevLett.125.181304	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 Cai Rong-Gen, Pi Shi, Sasaki Misao	4. 巻 102
2. 論文標題 Universal infrared scaling of gravitational wave background spectra	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.102.083528	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 Patil Mandar, Harada Tomohiro	4. 巻 102
2. 論文標題 Extremal Kerr white holes as a source of ultrahigh energy particles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	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) 10.1103/PhysRevD.102.024002	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 Allahverdi Rouzbeh, Amin Mustafa A., Berlin Asher, Bernal Nicholas, Byrnes Christian T., Delos M. Sten, Erickcek Adrienne L., Escudero Miguel, Figueroa Daniel G., Freese Katherine, Harada Tomohiro他	4. 巻 4
2. 論文標題 The First Three Seconds: a Review of Possible Expansion Histories of the Early Universe	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Open Journal of Astrophysics	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) 10.21105/astro.2006.16182	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 Naruko Atsushi, Yoo Chul-Moon, Sasaki Misao	4. 巻 2020
2. 論文標題 Resolving a spacetime singularity with field transformations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa028	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 Yoo Chul-Moon, Gong Jinn-Ouk, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Abundance of primordial black holes with local non-Gaussianity in peak theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 033 ~ 033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/09/033	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 Tsuchiya Masataka, Yoo Chul-Moon, Koga Yasutaka, Harada Tomohiro	4. 巻 102
2. 論文標題 Sonic point and photon surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.044057	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30件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Axion cloud decay due to the axion-photon conversion with background magnetic fields
3. 学会等名 日本物理学会 (秋)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Simulation of PBH formation from iso-curvature perturbations
3. 学会等名 The 30th Workshop on General Relativity and Gravitaion in JAPAN
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 多重極磁場中でのアクシオン光子転換に伴うアクシオン雲の崩壊率の計算
3. 学会等名 第22回 特異点研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Simulation of PBH formation from iso-curvature perturbations
3. 学会等名 2022 NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Simulation of PBH formation from isocurvature perturbations
3. 学会等名 日本物理学会 (春)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 The basics of primordial black hole formation and its application
3. 学会等名 Asia-Pacific School and Workshop on Gravitation and Cosmology 202 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 うまくいかない宇宙ひも研究～石原さんの研究に魅せられて～
3. 学会等名 相対論と重力研究の現在，過去・未来 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Threshold of Primordial Black Hole Formation against Velocity Dispersion in Matter-Dominated Era
3. 学会等名 2022 Summer NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 The basics of primordial black hole formation and its application
3. 学会等名 The 34th Regular Meeting of the New Higgs Working Group online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 物質優勢期の原始ブラックホール形成における速度分散の影響について
3. 学会等名 日本物理学会 (秋)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Threshold of Primordial Black Hole Formation against Velocity Dispersion in Matter-Dominated Era
3. 学会等名 The 31st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Simulation of primordial black hole formation
3. 学会等名 The 4th Workshop on Multi-Messenger Astrophysics and Gravitation (MMAG) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 格子細分化法を用いた非球対称PBH形成シミュレーション
3. 学会等名 第23回特異点研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Spacetime structure of type II PBH formation
3. 学会等名 2023 Winter-II NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Simulation of non-spherical PBH formation with mesh-refinement
3. 学会等名 Dynamics of primordial black hole formation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Numerical simulation of primordial black hole formation
3. 学会等名 68TH WORKSHOP ON GRAVITATIONAL WAVES AND NUMERICAL RELATIVITY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 定常な質量降着のあるブラックホール時空中の天体の運動について
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 柳 哲文
2. 発表標題 Abundance of Primordial Black Holes in Peak Theory for an Arbitrary Power Spectrum
3. 学会等名 online JGRG workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳 哲文
2. 発表標題 Abundance of Primordial Black Holes in Peak Theory for an Arbitrary Power Spectrum
3. 学会等名 Online JGRG Webinar Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳 哲文
2. 発表標題 Axion Cloud Decay due to the Axion-photon Conversion with Background Magnetic Fields
3. 学会等名 2021 NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳 哲文
2. 発表標題 Threshold of PBH formation in non-spherical collapse
3. 学会等名 日本物理学会 (秋)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳 哲文
2. 発表標題 原始ブラックホールの形成と質量分布, 角運動量分布について
3. 学会等名 第9回観測的宇宙論ワークショップonline (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳 哲文
2. 発表標題 Abundance of Primordial Black Holes in Peak Theory for an Arbitrary Power Spectrum
3. 学会等名 日本物理学会 (春)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳 哲文
2. 発表標題 5次元等角運動量Myers-Perry 時空上の重力摂動方程式に対するKilling-Yano 3形式に伴う1階symmetry operator の作用について
3. 学会等名 The 4th workshop on “Mathematics and Physics in General Relativity” (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 On estimation of PBH abundance
3. 学会等名 Future Perspective in Cosmology and Gravity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 On estimation of PBH abundance
3. 学会等名 The third NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Effects of asphericity on PBH formation
3. 学会等名 The 28th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Abundance of primordial black holes with local non-Gaussianity in peak theory
3. 学会等名 Focus Week on Primordial Black Holes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Turn-around time for the single mode lattice universe with pressureless matter
3. 学会等名 30th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳哲文
2. 発表標題 Effects of asphericity on PBH formation
3. 学会等名 KIAS and NRF-JSPS Workshop on Particle, String and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究分担者	大川 博督 (Okawa Hirotada) (40633285)	早稲田大学・高等研究所・准教授(任期付) (32689)	

6. 研究組織（つづき）

	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	原田 知広 (Harada Tomohiro) (60402773)	立教大学・理学部・教授 (32686)	
研究分担者	佐々木 節 (Sasaki Misao) (70162386)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授 (12601)	

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