

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05434

研究課題名(和文)インフレーション宇宙における暗黒物質の生成と進化

研究課題名(英文)Generation and evolution of dark matter in the inflationary universe

研究代表者

川崎 雅裕 (Kawasaki, Masahiro)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：50202031

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：原始ブラックホールを生成するのに必要な大きな密度揺らぎを作る素粒子モデルとして、ダブルインフレーション・モデル、アクシオンカーバトン・モデル、アフレック・ダイン・モデルを構築して、生成された原始ブラックホールが暗黒物質やLIGOで観測されたブラックホール連星合体イベントを説明できることを明らかにした。また、暗黒物質の候補であるアクシオンがノントポロジカル・ソリトンの1つであるオシロンを形成することを明らかにし、暗黒物質や宇宙の構造形成に与える影響を考察した。また、暗黒物質対消滅によって生じる高エネルギー光子や電子が宇宙マイクロ波背景放射に与える影響を調べ対消滅断面積に対する制限を得た。

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は宇宙初期に大きな密度揺らぎから生成されるブラックホールで、その存在が理論的に予言されて50年以上が経つ。近年、重力検出器LIGOで観測されたブラックホール合体イベントが原始ブラックホールではないかと感心が高まっている。本研究は原始ブラックホールを生成するような大きな密度揺らぎを作る具体的な素粒子モデルを構築し、暗黒物質やLIGOで観測されたブラックホール合体イベントを説明できることを明らかにしたものでその学術的意義は非常に高い。

研究成果の概要(英文)：We built particle physics models such as double-inflation model, axion-like curvaton model and Affleck-Dine model, which successfully produce primordial black holes (PBHs) and showed that those PBHs can account for dark matter of the universe and/or black hole binary events observed by LIGO. We also found that axion field forms non-topological solitons called oscillons and studied their effects on dark matter and structure formation of the universe. We investigated injection of high energy photons and electrons produced by annihilation of dark matter particles and its effect on the cosmic microwave background, and obtained the constraint on the annihilation cross section of dark matter.

研究分野：素粒子論的宇宙論

キーワード：原始ブラックホール 暗黒物質 アクシオン ノントポロジカル・ソリトン

1. 研究開始当初の背景

現代宇宙論の新たな標準モデルとしての地位を確立しつつあるインフレーション宇宙では、暗黒物質粒子はインフレーション後の再加熱過程やその後の熱浴から生成されたと考えられる。しかし、暗黒物質に関しては、他の粒子と非常に弱い相互作用しかしない、速度分散が小さい(冷たい)という一般的性質を持つことが分かっているが、具体的な正体に関しては、超対称性粒子やアクシオンといった素粒子の候補はあるものの依存として謎である。また、近年、インフレーションによって大きな揺らぎが生成されれば、再加熱後にその揺らぎによって原始ブラックホールが作られそれが暗黒物質に寄与する可能性が注目されている。

2. 研究の目的

上のような背景の下、インフレーション宇宙の枠組みで、インフレーションから現在に至るまでの暗黒物質の生成と進化を考慮し、宇宙論的に無矛盾なシナリオを構築し、現在あるいは将来計画されている宇宙背景放射や重力波など観測によって暗黒物質の正体を明らかにする可能性を理論的立場から考察することが本研究の目的である。具体的には以下の項目について研究を行う。

(1) 小スケールで大きな揺らぎを生成するインフレーションモデルでは、再加熱後に揺らぎのモードがホライズンに入った時に原始ブラックホールが作られる。作られる原始ブラックホールの質量や存在量は揺らぎのパワースペクトルに依っている。一方、宇宙背景放射や重力レンズを用いた観測によって、原始ブラックホールの存在量は幅広い質量領域で制限されている。そこで、原始ブラックホールを生成するインフレーションモデルを構築し、観測の制限を満たしてどこまで原始ブラックホールが暗黒物質を説明できるかを明らかにし、さらに、原始ブラックホールのシナリオを検証するために密度揺らぎやブラックホール連星からの重力波を定量的に評価しその観測可能性を検討する。

(2) 超重力理論においてはグラビティーノやモジュライ場など他の粒子と重力でしか相互作用せず長寿命の粒子が存在する。これらは安定であればそれ自身が暗黒物質の候補であり、不安定な場合も崩壊によって暗黒物質を生成する。一方、LHC 実験によるヒッグス粒子の質量の値や超対称性粒子の制限から超対称スケールは期待していたより高い可能性がある。したがって、超対称性スケールが高い場合のインフレーションを含めた宇宙論的シナリオを構築し、超重力理論において何が暗黒物質になり得るかを考察する。

(3) 暗黒物質粒子が宇宙の再結合の前後で対消滅を起こし、高エネルギー光子や電子を生成した場合、生成したエネルギーの一部は宇宙の再電離に寄与し、宇宙のイオン化率が変化し宇宙マイクロ波背景放射に影響を与える。この影響を精密に評価するために、宇宙のイオン化率の時間変化を正確に求めることができる計算機コードを開発する。また、それを使って様々な暗黒物質の対消滅断面積や原始ブラックホールのアクリーションに対する制限を求める

3. 研究の方法

(1) 原始ブラックホールは大きな密度揺らぎがインフレーションによって生成されることによって作られる。したがって、まず、大きな密度揺らぎを生成するインフレーションモデルを構築する。研究代表者が先行研究で提案したダブルインフレーション・モデルを発展させ、曲率揺らぎのパワースペクトルを計算し、生成される原始ブラックホールの質量・存在量を定量的に評価し、原始ブラックホールが暗黒物質にどの程度までできるかを明らかにする。ダブルインフレーション・モデルでは複数のスカラー場が揺らぎの生成に関係するので、スカラー場と計量の両方の揺らぎの時間発展を数値的に解いて曲率揺らぎパワースペクトルを正確に計算する。

(2) 小スケールで大きな密度揺らぎを生成するモデルとしてアクシオン型カーバトン・モデルがある。このモデルに基づいた原始ブラックホールの生成を議論し、観測による検証の可能性を検討するとともに新たな原始ブラックホール生成モデルを探求する。

(3) 超重力理論に基づいたインフレーションモデルにおけるグラビティーノの生成とその崩壊によって生成される暗黒物質粒子について解析する。元素合成などの宇宙論的制限を考慮して宇宙論的に問題のない超対称性暗黒物質粒子のシナリオを探求する。

(4) 暗黒物質粒子は宇宙初期において対消滅を起こし、それによって生成される粒子が宇宙初期の元素合成や再結合などの宇宙の熱史に影響を与える。対消滅によって生じた粒子が水素原子・ヘリウム原子を電離し宇宙のイオン化率を変化させ、その結果、宇宙マイクロ波背景放射の

非等方性に影響を与える場合を考え、暗黒物質粒子の対消滅の断面積に対する正確な制限を求める。そのために、対消滅によって生じる高エネルギー光子・電子のスペクトルの時間発展を吸収・散乱などの輻射過程を正確に取り入れた数値計算コードを開発する。

4. 研究成果

(1) インフレーションが2段階で起こるダブルインフレーション・モデルに基づいて、生成される原始ブラックホールの質量関数を求め、最新の重力レンズ効果の観測と比較することによって原始ブラックホールが観測と矛盾することなく暗黒物質になることを明らかにした。また、原始ブラックホール生成に必要な大きな密度揺らぎの2次の効果に起因する重力波の生成量を定量的に見積もり、パルサータイミングの観測と矛盾なくLIGOで発見された重力波イベントが説明できることを示した。さらに、このダブルインフレーション・モデルは2つの質量ピークを持つ質量関数を予言し、暗黒物質とLIGOで発見された重力波イベントの両方を同時に説明できることを明らかにした(図1)。

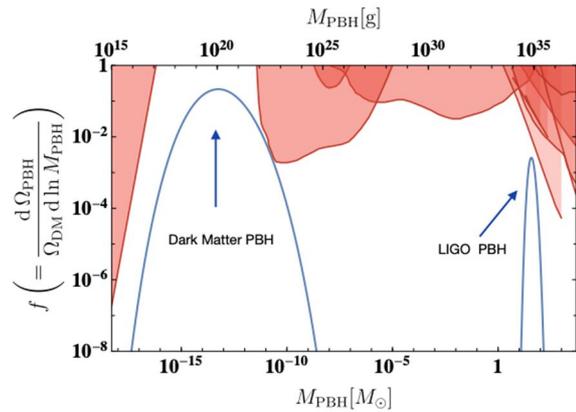


図1 原始ブラックホールの質量スペクトル

(2) 原始ブラックホール生成モデルとして2種類のアクシオンカーバトン・モデル(タイプI、タイプII)を提案し、これらがLIGOで観測された重力波イベントを説明する原始ブラックホールを生成できることを示した。また、タイプIIのアクシオンカーバトン・モデルでは宇宙の暗黒物質となる原始ブラックホールを生成できることを明らかにした。さらに、アクシオンカーバトン・モデルでは生成される密度揺らぎが非ガウス性をもち、密度揺らぎから2次的に生成される重力波の生成が抑制されることを明らかにし、その結果、最近報告されたNANOGravによるパルサータイミング観測から示唆される重力波も説明できることを示した。

(3) 宇宙のバリオン数を説明するアフレックダイン機構を用いて原始ブラックホールを生成する新たなモデルを構築した。このモデルはパルサータイミングの観測や宇宙背景放射の観測の制限を受けずに比較的大きな質量のブラックホールを生成することができ、LIGOによる重力波イベントを説明できることを示した。さらにこのモデルは通常のガウスの揺らぎを作るモデルと異なり、宇宙背景放射の観測と矛盾することなく超巨大質量ブラックホールの種となる10の4乗から10の5乗太陽質量の原始ブラックホールを生成できることを明らかにした。

(4) インフレーションで作られる曲率揺らぎとブラックホールを作る際に重要となる密度揺らぎとの関係が非線形であることに着目し、曲率揺らぎがガウス分布に従うとしても密度揺らぎに非ガウス性が現れることを示し、それによって原始ブラックホールの生成が抑制されることを明らかにした。

(5) 密度揺らぎから原始ブラックホールの存在量を評価する場合、宇宙の地平線内の揺らぎをスムージングすることが必要になる。この際に用いるウィンドウ関数の不定性を調べ、原始ブラックホールの存在量と密度揺らぎの大きさの関係がウィンドウ関数に大きく依存することを明らかにし、その結果、LIGOで観測された重力波イベントを説明する原始ブラックホールの場合、トップハット型のウィンドウ関数を用いた場合パルサータイミングからの制限を受けないことを示した。

(6) 宇宙初期の元素合成時に崩壊する粒子が軽元素の存在比に与える影響を調べるために従来の計算機コードを改良し、最新の観測データを用いて崩壊粒子に対する一般的な制限を求めた。さらに、これを超重力理論で予言されるグラビティーノに応用し、グラビティーノの存在量を求めるインフレーション後の再加熱温度に対する制限をアップデートした。

(7) 近年、1GeV程度以下の比較的軽い暗黒物質が議論されている。そのような比較的軽い暗黒物質モデルでは同時に1GeV程度以下の長寿命を持つ不安定粒子が予言されることから、一般的に1GeV程度以下の質量を持つ粒子が光子や電子に崩壊した場合に生じる高エネルギー光子が元素合成に与える影響を終状態の(陽)電子から放出される光子の効果を検討して調べ、不安定粒子の存在量と寿命に対する新たな制限を得た。

(8) 宇宙初期に大きなバリオン等曲率揺らぎが存在すると揺らぎの2次の効果で宇宙初期の元素合成、特に重水素の存在比に影響を与える。そこで、最近の重水素の存在比に対する精密な観測を用いてそれまで制限が付けられていなかった幅広いスケールでバリオン等曲率揺らぎに対する制限が得られることを明らかにした。

(9) 暗黒物質の有力な候補であるアクシオンに関して、宇宙初期に生成されるアクシオン・ストリングの進化を大規模数値シミュレーションによって調べ、ストリング密度の進化がスケールリング則からずれ、スケールリング・パラメータが時間と共に対数関数的に増加することを明らかにした。この結果は宇宙でのアクシオン密度を評価する上で重要である。

(10) 実スカラー場の理論に現れるノントポロジカル・ソリトンであるオシロンは長寿命であることが知られているがその寿命を解析的に求めることは困難であった。そこで、古典的スカラー場の理論に基づいてオシロンからのスカラー波の放出を評価することによってオシロンの崩壊率に対する定式化を行った。さらに、解析的に求めた崩壊率が格子シミュレーションを用いて求めた崩壊率とよく一致することを示した。

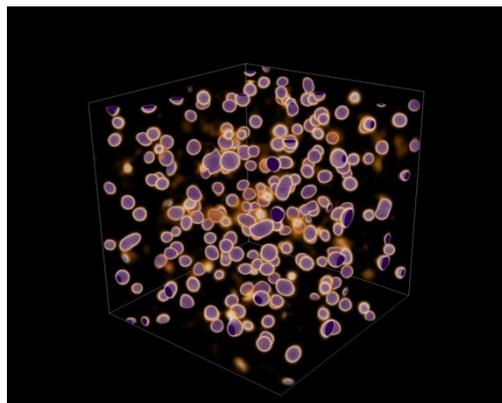


図2 オシロン生成のシミュレーション

(11) 非常に軽い質量を持つアクシオン・モデルにおいて、宇宙初期に存在する僅かなアクシオン場の揺らぎが成長しオシロンが生成されることをシミュレーションによって明らかにした(図2)。さらに、アクシオン場から生成されるオシロンの寿命が宇宙年齢程度になりオシロン自体が暗黒物質になる可能性があることを示した。また、生成されたオシロンが超波長にカットオフを持つポアソン分布に従う等曲率揺らぎを作ることを明らかにし、オシロンの揺らぎによって小質量の暗黒物質ハロー数が増加することから中性水素の21cmの吸収線観測からオシロン形成が検証できる可能性を示した。

(12) 暗黒物質の有力な候補である弱い相互作用しかしない質量を持った粒子(WIMP)は熱浴からの離脱後も対消滅を起こし、それによって生成される高エネルギーの光子や(陽)電子はバックグラウンドのプラズマと相互作用し電磁シャワーを起こしながらエネルギーを失っていく。この過程において水素やヘリウムが電離され再結合前後の電離史が変更を受け、その結果宇宙マイクロ波背景放射の非等方性が影響を受けることから対消滅断面積に対する制限を得ることができる。そこで、以前開発した高エネルギー光子・電子のスペクトルの時間発展を計算するコードを精密化し、新たにヘリウムの電離過程を加えるなどの改良を行い、最新の観測データを用いて暗黒物質 WIMP の対消滅断面積に対する信頼度の高い制限を求めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計33件（うち査読付論文 33件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Kawasaki Masahiro, Nakatsuka Hiromasa	4. 巻 2021
2. 論文標題 Gravitational waves from type II axion-like curvaton model and its implication for NANOGrav result	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 023 ~ 023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/05/023	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 Kawasaki Masahiro, Ueda Shusuke	4. 巻 2021
2. 論文標題 Affleck-Dine inflation in supergravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 049 ~ 049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/04/049	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 Inomata Keisuke, Kawasaki Masahiro, Mukaida Kyohei, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 126
2. 論文標題 NANOGrav Results and LIGO-Virgo Primordial Black Holes in Axionlike Curvaton Models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 131301-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.131301	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 該当する
1. 著者名 Kawasaki Masahiro, Nakano Wakutaka, Nakatsuka Hiromasa, Sonomoto Eisuke	4. 巻 2021
2. 論文標題 Oscillons of axion-like particle: mass distribution and power spectrum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 061 ~ 061
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/01/061	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 Kawasaki Masahiro, Kohri Kazunori, Moroi Takeo, Murai Kai, Murayama Hitoshi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Big-bang nucleosynthesis with sub-GeV massive decaying particles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 048 ~ 048
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/12/048	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 Gelmini Graciela B., Kawasaki Masahiro, Kusenko Alexander, Murai Kai, Takhistov Volodymyr	4. 巻 2020
2. 論文標題 Big bang nucleosynthesis constraints on sterile neutrino and lepton asymmetry 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 051 ~ 051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/09/051	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 Inomata Keisuke, Kawasaki Masahiro, Mukaida Kyohei, Terada Takahiro, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 101
2. 論文標題 Gravitational wave production right after a primordial black hole evaporation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123533-1 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.123533	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 Kasuya Shinta, Kawasaki Masahiro, Otani Francis, Sonomoto Eisuke	4. 巻 102
2. 論文標題 Revisiting oscillon formation in the Kachru-Kalosh-Linde-Trivedi scenario	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43016-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.043016	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 Kawasaki Masahiro, Nakatsuka Hiromasa, Obata Ippei	4. 巻 2020
2. 論文標題 Generation of primordial black holes and gravitational waves from dilaton-gauge field dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 007 ~ 007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/05/007	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 Kawasaki Masahiro, Nakatsuka Hiromasa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Q-ball decay through A-term in the gauge-mediated SUSY breaking scenario	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) 10.1088/1475-7516/2020/04/017	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 Kawasaki Masahiro, Nakano Wakutaka, Sonomoto Eisuke	4. 巻 2020
2. 論文標題 Oscillon of ultra-light axion-like particle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 047-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/01/047	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 Ibe Masahiro, Kawasaki Masahiro, Nakano Wakutaka, Sonomoto Eisuke	4. 巻 100
2. 論文標題 Fragileness of exact l-ball/oscillon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 125021-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.125021	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 Kawasaki Masahiro, Murai Kai	4. 巻 100
2. 論文標題 Formation of supermassive primordial black holes by Affleck-Dine mechanism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103521-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.103521	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 Kawasaki Masahiro, Nakatsuka Hiromasa	4. 巻 99
2. 論文標題 Effect of nonlinearity between density and curvature perturbations on the primordial black hole formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123501-1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.123501	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 Ibe Masahiro, Kawasaki Masahiro, Nakano Wakutaka, Sonomoto Eisuke	4. 巻 2019
2. 論文標題 Decay of l-ball/oscillon in classical field theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 030-1~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2019)030	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 Ibe Masahiro, Kawasaki Masahiro, Nakano Wakutaka, Sonomoto Eisuke	4. 巻 2019
2. 論文標題 Decay of l-ball/oscillon in classical field theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 030-0~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2019)030	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 Kawasaki Masahiro, Takhistov Volodymyr	4. 巻 98
2. 論文標題 Primordial black holes and the string swampland	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123514-1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.123514	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 該当する

1. 著者名 Hasegawa Fuminori, Kawasaki Masahiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Primordial black holes from Affleck-Dine mechanism	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 027-0~24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/01/027	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 Kawasaki Masahiro, Sekiguchi Toyokazu, Yamaguchi Masahide, Yokoyama Jun'ichi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Long-term dynamics of cosmological axion strings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 091E01-1~10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty098	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 Inomata Keisuke, Kawasaki Masahiro, Kusenko Alexander, Yang Louis	4. 巻 2018
2. 論文標題 Big Bang nucleosynthesis constraint on baryonic isocurvature perturbations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 003-0~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/12/003	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 Ando Kenta, Kawasaki Masahiro, Nakatsuka Hiromasa	4. 巻 98
2. 論文標題 Formation of primordial black holes in an axionlike curvaton model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083508-1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.083508	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 Ando Kenta, Inomata Keisuke, Kawasaki Masahiro	4. 巻 97
2. 論文標題 Primordial black holes and uncertainties in the choice of the window function	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103528-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.103528	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 Harigaya Keisuke, Kawasaki Masahiro	4. 巻 782
2. 論文標題 QCD axion dark matter from long-lived domain walls during matter domination	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.04.056	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 該当する

1. 著者名 Kawasaki Masahiro, Sonomoto Eisuke, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 782
2. 論文標題 Cosmologically allowed regions for the axion decay constant F_a	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 181 ~ 184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.05.014	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 Inomata Keisuke, Kawasaki Masahiro, Mukaida Kyohei, Tada Yuichiro, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 95
2. 論文標題 Inflationary primordial black holes for the LIGO gravitational wave events and pulsar timing array experiments	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123510-1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.123510	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 Kawasaki Masahiro, Kusenko Alexander, Pearce Lauren, Yang Louis	4. 巻 95
2. 論文標題 Relaxation leptogenesis, isocurvature perturbations, and the cosmic infrared background	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103006-1 ~ 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.103006	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 Inomata Keisuke, Kawasaki Masahiro, Mukaida Kyohei, Tada Yuichiro, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 96
2. 論文標題 Inflationary primordial black holes as all dark matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 043504-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.043504	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 Hong Jeong-Pyong, Kawasaki Masahiro	4. 巻 95
2. 論文標題 New type of charged Q-ball dark matter in gauge mediated SUSY breaking models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123532-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.123532	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 Hong Jeong-Pyong, Kawasaki Masahiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Gauged Q-ball decay rates into fermions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103526-1~8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.103526	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 Hasegawa Fuminori, Kawasaki Masahiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Oscillating Affleck-Dine condensate and its cosmological implications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 063518-1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.063518	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 Kawasaki Masahiro, Kohri Kazunori, Moroi Takeo, Takaesu Yoshitaro	4. 巻 97
2. 論文標題 Revisiting big-bang nucleosynthesis constraints on long-lived decaying particles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 023502-1~22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.023502	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 Inomata Keisuke, Kawasaki Masahiro, Mukaida Kyohei, Tada Yuichiro, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 96
2. 論文標題 O(10)M primordial black holes and string axion dark matter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123527-1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.123527	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 Inomata Keisuke, Kawasaki Masahiro, Mukaida Kyohei, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 97
2. 論文標題 Double inflation as a single origin of primordial black holes for all dark matter and LIGO observations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 043514-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.043514	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

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Masahiro Kawasaki
2. 発表標題 Particle Physics Models for Primordial Black Hole Formation
3. 学会等名 Focus Week on Primordial Black Holes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎雅裕
2. 発表標題 原始ブラックホールと素粒子論
3. 学会等名 物理学会 宇宙線・宇宙物理領域、素粒子論領域合同一般シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Kawasaki
2. 発表標題 Primordial Black Hole Formation in Affleck-Dine Mechanism
3. 学会等名 Inflation and the dark sector Current challenges and future perspectives (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川崎雅裕
2. 発表標題 Axion Cosmology
3. 学会等名 Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川崎雅裕
2. 発表標題 Primordial black hole formation in inflation models and production of gravitational waves
3. 学会等名 15th Marcel Grossmann Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川崎雅裕
2. 発表標題 Primordial black holes in multi-field inflation models
3. 学会等名 PASCOS 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川崎雅裕
2. 発表標題 Cosmological problems of QCD axion
3. 学会等名 International workshop on "Axion physics and dark matter cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川崎雅裕
2. 発表標題 Formation of primordial black holes in multi-field inflation models
3. 学会等名 14th Interational Conference of Computational Method in Science and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 高原文郎、家正則、小玉英雄、高橋忠幸 編	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 912
3. 書名 宇宙物理学ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

宇宙線研究所理論グループ http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/th/th-j.html

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
---------	---------