

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03609

研究課題名（和文）初期宇宙における再加熱過程を通じた高エネルギー物理の探査

研究課題名（英文）Searching for high energy physics through reheating processes in the early Universe

研究代表者

中山 和則（Nakayama, Kazunori）

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：90596652

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：(1)インフレーション終了後の再加熱時期、特にインフロン振動期での重力的粒子生成の効果を指摘した。これにより重力以外の相互作用を持たない暗黒物質が十分な量生成されることを示した。また、この効果により重力子（グラビトン）が生成さ、これが宇宙背景重力波の高周波成分として残ることを示した。(2)ベクトル暗黒物質のコヒーレント振動について、深刻な不安定性を指摘するとともに、代替モデルを提案した。さらにこのようなモデルが、宇宙背景放射の等曲率ゆらぎおよび断熱揺らぎの統計的非等方性により厳しく制限されることを示した。(3)マグノンを利用した新たな軽い暗黒物質検出方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在の素粒子論・宇宙論の最大の目標の一つである暗黒物質の解明には、初期宇宙での暗黒物質生成過程の理解と、実験での検出方法の提案が必要である。本研究を通して、その両方において大きな進展があった。初期宇宙での再加熱過程における重力的粒子生成を提案し、世界的な潮流を生み出すことに成功した。また、固体物性を利用した軽いアクシオンなどの暗黒物質の新たな観測方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：(1)We found gravitational particle production processes in the reheating phase after inflation when the inflaton oscillates coherently. Due to this process, purely gravitational dark matter can be efficiently produced so that it accounts for the present dark matter abundance. Gravitons are also produced, which constitute high frequency part of the stochastic gravitational wave background. (2) We point out that the well-known vector coherent oscillation dark matter model suffers from serious instability. We proposed an alternative model, which, however, also suffers from severe constraints from isocurvature perturbation and statistical anisotropy in the cosmic microwave background. (3) We proposed a new idea for light bosonic dark matter detection with the use of magnons in ferromagnetic material.

研究分野：素粒子論・宇宙論

キーワード：インフレーション 再加熱 暗黒物質

1. 研究開始当初の背景

現在の素粒子論・宇宙論の最大の目標の一つは暗黒物質の正体の解明である。そのためには、初期宇宙での暗黒物質生成過程の理解と、実験での検出方法の提案が必要である。とりわけ、インフレーション宇宙が熱い宇宙に転化する「再加熱過程」は理論的に未知の部分が多く、ここの理解を推し進める必要があった。

2. 研究の目的

インフレーション後の再加熱過程について統一的な理解を得る。特に重力の効果を取り入れた解析を行い、それによる暗黒物質生成への影響を考察する。また、初期宇宙や暗黒物質の検出方法について新たなアイデアを提案する。これらを通して、究極の謎である暗黒物質の正体や、インフレーションの物理に迫る。

3. 研究の方法

再加熱過程における粒子生成を場の量子論的に解析する。特に曲がった時空の効果(一般相対論的效果)を考慮する。さまざまな固体物理・物性物理の知識や手法を利用し、暗黒物質検出の新たなアイデアを提案する。

4. 研究成果

(1)インフレーション終了後の再加熱時期、特にインフラトン振動期での重力的粒子生成の効果了指摘した。これにより重力以外の相互作用を持たない暗黒物質が生成され、現在の暗黒物質の主成分になり得ることを示した。また、この効果により重力子(グラビトン)が生成され、これが宇宙背景重力波の高周波成分として残ることを示した。

(2)ベクトル場のコヒーレント振動型の暗黒物質がよく知られていたが、この模型が深刻な不安定性を有することを指摘するとともに、そのような不安定性を含まない代替模型を提案した。さらにこのような模型が、宇宙背景放射の等曲率ゆらぎおよび断熱揺らぎの統計的非等方性により厳しく制限されることを示した。

(3)固体物性を利用した、アクシオンやダークフォトンなどの軽い暗黒物質検出方法を提案した。暗黒物質が強磁性体中のマグノンを励起することを量子論的な手法で示し、またその検出感度を見積もった。さらに、固体物理の文脈で知られている、トポロジカル磁性体中のアクシオンの励起モードを利用した新たな軽い暗黒物質検出方法を提案した。

(4)インフラトンなどのスカラー場と結合している重い場を積分することで、一般に曲率高次項との実効的な相互作用が得られることを示した。これにより、スカラー場が重力子に崩壊することを示した。このような過程が高周波背景重力波の観測により、原理的に検証可能であることを指摘した。

(5)離散的フレーバー対称性を有するニュートリノ質量模型において、量子論的アノマリーによる対称性の破れとその宇宙論的ドメインウォール問題への示唆を調べた。また、ドメインウォール問題を回避しつつ、観測されているニュートリノ質量・混合角を説明するような、非常にシンプルな模型の構築に成功した。

(6)スタロピンスキーインフレーション後の再加熱過程における、電弱真空の不安定性について詳細な解析を行なった。真空の崩壊を回避するためには、従来のインフレーション模型に比べ、ヒッグス場との結合定数について厳しい制限が得られることを示した。

(7)最新の宇宙背景放射観測データを用いて、暗黒物質の対消滅断面積に対して上限を与えた。従来の解析に比べてヘリウムの再結合・イオン化の効果を加えることにより、精度を向上させた。さらに、これを用いて小スケールの密度揺らぎの大きさに対して上限を得た。

(8)eVスケールのアクシオン暗黒物質について、2光子崩壊過程が宇宙赤外・可視光背景放射の

非等方性に寄与することを指摘し、ハッブル宇宙望遠鏡の観測データから強い制限が得られることを示した。これは、この質量領域においては現在知られている中で最も強い制限となる。

(9)非常に軽いアクシオンやベクトル場などが存在すると、回転するブラックホールのまわりでそれらの場の「雲」が成長することが知られている (superradiance)。一般にこうした場が非線形相互作用を持つことによる superradiance への影響を調べた。

(10)アクシオンは磁場中で光子に転換することが知られている。EDGES により観測された 21cm 吸収線のシグナルが、アクシオン光子転換により実質的に背景放射温度を少し上昇させることで説明される可能性を指摘した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Chigusa So, Moroi Takeo, Nakayama Kazunori	4. 巻 8
2. 論文標題 Axion/hidden-photon dark matter conversion into condensed matter axion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2021)074	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 Ema Yohei, Jinno Ryusuke, Nakayama Kazunori, van de Vis Jorinde	4. 巻 103
2. 論文標題 Preheating from target space curvature and unitarity violation: Analysis in field space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.103536	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 Kawasaki Masahiro, Nakatsuka Hiromasa, Nakayama Kazunori, Sekiguchi Toyokazu	4. 巻 15
2. 論文標題 Revisiting CMB constraints on dark matter annihilation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/12/015	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 Li Qiang, Moroi Takeo, Nakayama Kazunori, Yin Wen	4. 巻 9
2. 論文標題 Hidden dark matter from Starobinsky inflation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2021)179	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 Nakayama Kazunori、Yin Wen	4. 巻 10
2. 論文標題 Hidden photon and axion dark matter from symmetry breaking	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2021)026	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、Nakayama Kazunori	4. 巻 3
2. 論文標題 Constraints on small-scale primordial density fluctuation from cosmic microwave background through dark matter annihilation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/03/061	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 Chigusa So、Moroi Takeo、Nakayama Kazunori	4. 巻 101
2. 論文標題 Detecting light boson dark matter through conversion into a magnon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 9, 096013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.096013	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 Nakayama Kazunori	4. 巻 2020
2. 論文標題 Constraint on vector coherent oscillation dark matter with kinetic function	5. 発行年 2020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) 10.1088/1475-7516/2020/08/033	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 Ema Yohei, Jinno Ryusuke, Nakayama Kazunori	4. 巻 2020
2. 論文標題 High-frequency graviton from inflaton oscillation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 015 ~ 015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/09/015	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 Nakayama Kazunori, Tang Yong	4. 巻 811
2. 論文標題 Gravitational production of hidden photon dark matter in light of the XENON1T excess	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135977 ~ 135977
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135977	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 Asai Kento, Nakayama Kazunori, Tseng Shih-Yen	4. 巻 814
2. 論文標題 Alternative minimal U(1)B-L	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136106 ~ 136106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136106	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 Nakayama Kazunori	4. 巻 797
2. 論文標題 A note on gravitational particle production in supergravity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 134857 ~ 134857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.134857	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 Chigusa So, Kasuya Shinta, Nakayama Kazunori	4. 巻 100
2. 論文標題 Novel flavon stabilization with trimaximal neutrino mixing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.015030	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 Nakayama Kazunori	4. 巻 2019
2. 論文標題 Vector coherent oscillation dark matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 019 ~ 019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/10/019	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 Fukuda Hajime, Nakayama Kazunori	4. 巻 2020
2. 論文標題 Aspects of nonlinear effect on black hole superradiance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)128	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 Chigusa So, Moroi Takeo, Nakayama Kazunori	4. 巻 803
2. 論文標題 Signals of axion like dark matter in time dependent polarization of light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135288 ~ 135288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135288	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 Ema Yohei, Hagihara Daisuke, Hamaguchi Koichi, Moroi Takeo, Nakayama Kazunori	4. 巻 2018
2. 論文標題 Supersymmetric flaxion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2018)094	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 Ema Yohei, Nakayama Kazunori, Tang Yong	4. 巻 2018
2. 論文標題 Production of purely gravitational dark matter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2018)135	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 Moroi Takeo, Nakayama Kazunori, Tang Yong	4. 巻 783
2. 論文標題 Axion-photon conversion and effects on 21 cm observation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 301 ~ 305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.07.002	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 Chigusa So, Nakayama Kazunori	4. 巻 788
2. 論文標題 Anomalous discrete flavor symmetry and domain wall problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 249 ~ 255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.11.027	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 Nakayama Kazunori, Tang Yong	4. 巻 788
2. 論文標題 Stochastic gravitational waves from particle origin	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 341 ~ 346
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.11.023	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 Chigusa So, Kasuya Shinta, Nakayama Kazunori	4. 巻 788
2. 論文標題 Flavon stabilization in models with discrete flavor symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 494 ~ 499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.11.051	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 Nakayama Kazunori, Takahashi Fuminobu, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 790
2. 論文標題 Revisiting the number-theory dark matter scenario and the weak gravity conjecture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 218 ~ 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.01.013	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 Hagihara Daisuke, Hamaguchi Koichi, Nakayama Kazunori	4. 巻 2019
2. 論文標題 Moduli oscillation induced by reheating	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 024 ~ 024
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/03/024	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kazunori Nakayama
2. 発表標題 New particle search and condensed mater physics
3. 学会等名 KEK IPNS-IMSS-QUP joint workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazunori Nakayama
2. 発表標題 Production of Hidden Photon Dark matter: Recent Developments
3. 学会等名 Dark Matter as a Probe to New Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中山和則
2. 発表標題 Constraint on vector coherent oscillation dark matter
3. 学会等名 日本物理学会 2020年第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中山和則
2. 発表標題 マグノンをを用いた軽い暗黒物質検出
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山和則
2. 発表標題 軽い暗黒物質検出のための固体物理入門
3. 学会等名 素粒子物理学の進展2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazunori Nakayama
2. 発表標題 Gravitational Particle Production at Reheating
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 Kazunori Nakayama
2. 発表標題 Gravitational Particle Production and Dark Matter
3. 学会等名 Johns Hopkins Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunori Nakayama
2. 発表標題 Purely Gravitational Dark Matter
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋期大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunori Nakayama
2. 発表標題 Vector Coherent Oscillation Dark Matter
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunori Nakayama
2. 発表標題 Production of Purely Gravitational Dark Matter
3. 学会等名 COSMO2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山和則
2. 発表標題 Axion-photon conversion and effects on 21cm observation
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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