

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13539

研究課題名（和文）インフレーション宇宙で探る高エネルギー究極理論の粒子スペクトル

研究課題名（英文）Cosmic Inflation as a Probe of High Energy Physics

研究代表者

野海 俊文（Noumi, Toshifumi）

神戸大学・理学研究科・助教

研究者番号：30709308

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：初期宇宙の加速膨張「インフレーション」の膨張エネルギーは典型的に $10^{14}$ 乗GeVにも迫る。これは世界最大の加速器 Large Hadron Collider の衝突エネルギーより10桁も高く、大統一理論や弦理論をも視野に捉える。本研究では、インフレーションを超高エネルギー加速器「Cosmological Collider」とみなし、高エネルギー理論が预言する「新粒子」を探索する手法を理論的に開発した。特に、低エネルギー有効理論の視点を取り入れることで、大統一理論や余剰次元理論が预言する「重い新粒子」を探索する手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフレーションを用いると、地上の加速器では手が届かない「超高エネルギー領域」を探索できると期待される。本研究成果では、インフレーションで探索可能なエネルギー領域を拡大し、余剰次元や力の統一といった「高エネルギー理論のアイデア」を実験的に検証する手法を提案した。今後の宇宙観測実験のデータを合わせることで、素粒子と重力を統一的に記述する「高エネルギー究極理論」の実験的検証が可能になると期待される。

研究成果の概要（英文）：The Hubble scale during cosmic inflation could be as high as  $10^{14}$  GeV, which is 10 orders of magnitude greater than the energy scale of the Large Hadron Collider. In this project, we developed a theoretical framework for probing new particles predicted by high energy theories, within the so-called cosmological collider program. In particular, we proposed a new approach for probing heavy particles, e.g., predicted by grand unified theories and extra dimensional theories, using the effective field theory approach.

研究分野：素粒子論、宇宙論、弦理論

キーワード：インフレーション 弦理論 大統一理論 余剰次元

### 1. 研究開始当初の背景

インフレーション宇宙論は銀河の種となる原始揺らぎを与え、宇宙背景放射の温度揺らぎを再現するなど観測から強く支持されている。今後の宇宙観測では原始揺らぎの高次相関や原始重力波のデータが得られ、インフレーション模型の詳細が解明されると期待される。インフレーションのスケールは  $10^{14}$  GeV にも迫るため、このような模型峻別を通じて高エネルギー理論の手がかりを探ることは宇宙論と素粒子論をまたぐ重要問題である。

実際、野海らのこれまでの研究により、超対称模型などの高エネルギー理論が预言する新粒子を原始相関関数を用いて探索可能なことが明らかになってきた。加速器実験において新粒子の影響が散乱振幅に現れるように、原始相関関数にも新粒子の痕跡が刻まれる。特に、散乱振幅の共鳴シグナルとの類推により、原始密度揺らぎの 3 点関数に現れる振動パターンから新粒子の存在を同定でき、そのスケールから粒子の質量を決定できることを我々は発見した。このようなアプローチは今では Cosmological Collider Physics と呼ばれ、インフレーションを用いた究極理論探索の機運が世界的に高まっている。

### 2. 研究の目的

従来の Cosmological Collider の手法は、超対称模型等で预言されるインフレーションスケール程度の質量の新粒子を探索する際には強力であるが、大統一理論や超弦理論が预言する「インフレーションスケールより重い新粒子」の探索には適さない。本研究の目的は、Cosmological Collider を用いた「重い新粒子」の探索法を確立し、インフレーションを用いて探索可能なエネルギー領域を拡大することである。

### 3. 研究の方法

この目的を達成するため、本研究では「低エネルギー有効理論」の視点を用いた。散乱過程に現れる「重い粒子」の効果は有効相互作用で近似される。特に、その質量やスピンは有効相互作用の「結合定数の大きさ」や「角度依存性」に反映される。このような有効相互作用を対称性などの情報を用いて構成するのが「低エネルギー有効理論」の考え方である。一方で、散乱振幅のユニタリー性を精査することで、この流れを逆解きし、重い粒子の情報の一部を有効相互作用から再構成できることが知られている。本研究では、このアイデアを推し進め、インフレーションに適用する。これによりインフレーションを引き起こす自由度「インフラトン」の有効相互作用と重い粒子のスピンの関係を明らかにする。

### 4. 研究成果

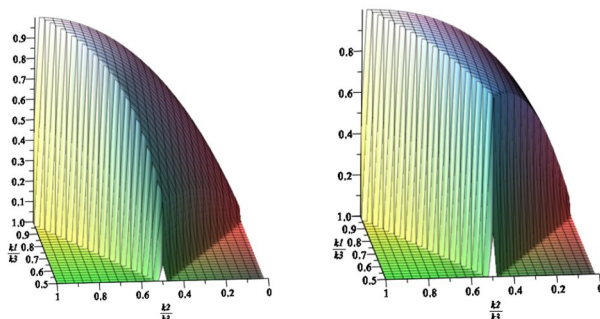
#### (1) 主な研究成果：インフラトンの有効理論の地図作り

上記の方法により得られた主な研究成果が発表論文[1]である。この論文では、散乱振幅のユニタリー性と解析性を用いることで、インフラトンの「4点有効相互作用の符号」と「重い粒子のスピンの関係」を明らかにした。

原始密度揺らぎの 3 点関数を特徴付ける有効相互作用は典型的に 2 種類あるが、そのうちの 1 つはスピンの依らず常に正の結合定数を持ち(下図 )、もう一方は重い粒子のスピンの 2 以上なら負、それ未満なら正の結合定数を持つ(下図 )ことを示した。このように理論のパラメータ空間を「重い粒子のスピンの」で分類することにより、以下のような「有効理論の地図」を作成できる。今後の観測でパラメータ、 が決定されると、この地図を用いて重い粒子のスピンを決定できる。

	： 正	： 負
： 正	スピン 2 未満	スピン 2 以上
： 負	通常の理論では実現不可能な領域	

また、各相互作用が作る「原始密度揺らぎの3点関数の形」も同定した。先の と が作る3点関数は下図の通り（左が 、右が ）。このようなアイデアを用いると、例えば、余剰次元理論が予言する「スピン2の重い粒子」と大統一理論が予言する「重いスカラー」の判別が可能になると期待される。これをもって本研究の当初計画の目標が達成された。この論文の成果はサイエンスと技術の両面で高く評価され、第15回素粒子メダル奨励賞を受賞した。また、この内容について国際学会等で招待講演を多数行った。そのほか、インフレーション宇宙論に関連する論文としては[2,3]を発表した。



## (2) 本研究から派生した新たな方向：スワンプランド条件の解明

また、このような研究を進めていく過程で新たな研究の方向性も見出した。「低エネルギー有効理論」の視点と「散乱振幅のユニタリー性」が量子重力理論と整合的な素粒子論・宇宙論モデルの判別条件「スワンプランド条件」の解明にも有用なことを見出した。論文[4,5,6]では、散乱振幅のユニタリー性を用いることで、量子重力で「荷電粒子の質量電荷比」が満たすべき様々な不等式を導出した。特に、スワンプランド条件の1つ「弱い重力予想」をもっともらしい仮定のもとで証明した[6]は高く評価され、Phys. Rev. Lett. より出版された。また、これらの内容について国際学会等で招待講演を多数行った。

新たに見出したこの方向性で科研費基盤(B)を取得し、現在スワンプランド条件の解明に向けた研究を精力的に行なっている。

### <引用文献>

- [1] Suro Kim, Toshifumi Noumi, Keito Takeuchi, Siyi Zhou, “Heavy Spinning Particles from Signs of Primordial Non-Gaussianities: Beyond the Positivity Bounds,” Jour. High Energy Phys. 12 (2019) 107.
- [2] Masaru Hongo, Suro Kim, Toshifumi Noumi, Atsuhisa Ota, “Effective field theory of time-translational symmetry breaking in nonequilibrium open system,” Jour. High Energy Phys. 02 (2019) 131.
- [3] Makoto Tsuneto, Asuka Ito, Toshifumi Noumi, Jiro Soda, “Searching for Bispectrum of Stochastic Gravitational Waves with Pulsar Timing Arrays,” Jour. Cosmol. Astropart. Phys. 03 (2019) 032.
- [4] Stefano Andriolo, Daniel Junghans, Toshifumi Noumi, Gary Shiu, “A Tower Weak Gravity Conjecture from Infrared Consistency,” Fortsch. Phys. 66 (2018) no.5, 1800020.
- [5] Wei-Ming Chen, Yu-Tin Huang, Toshifumi Noumi, Congkao Wen, “Unitarity bounds on charged/neutral state mass ratios,” Phys. Rev. D 100 (2019) 025016.
- [6] Yuta Hamada, Toshifumi Noumi, Gary Shiu, “Weak Gravity Conjecture from Unitarity and Causality,” Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 051601.

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Isono Hiroshi, Noumi Toshifumi, Shiu Gary	4. 巻 2019
2. 論文標題 Momentum space approach to crossing symmetric CFT correlators. Part II. General spacetime dimension	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP10(2019)183	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 Kim Suro, Noumi Toshifumi, Takeuchi Keito, Zhou Siyi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Heavy spinning particles from signs of primordial non-gaussianities: beyond the positivity bounds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP12(2019)107	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 Isono Hiroshi, Noumi Toshifumi, Takeuchi Toshiaki	4. 巻 2019
2. 論文標題 Momentum space conformal three-point functions of conserved currents and a general spinning operator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP05(2019)057	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 Chen Wei-Ming, Huang Yu-tin, Noumi Toshifumi, Wen Congkao	4. 巻 100
2. 論文標題 Unitarity bounds on charged/neutral state mass ratios	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.100.025016	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 Hamada Yuta, Noumi Toshifumi, Shiu Gary	4. 巻 123
2. 論文標題 Weak Gravity Conjecture from Unitarity and Causality	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.051601	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 Abe Yugo, Inami Takeo, Izumi Keisuke, Kitamura Tomotaka, Noumi Toshifumi	4. 巻 2019
2. 論文標題 S-matrix unitarity and renormalizability in higher-derivative theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz084	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 Hashi Manami, Noumi, Isono Hiroshi, Noumi Toshifumi, Shiu Gary, Soler Pablo	4. 巻 1808
2. 論文標題 Higgs mechanism in nonlocal field theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2018)064	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 Hongo Masaru, Kim Suro, Noumi Toshifumi, Ota Atsuhisa	4. 巻 1902
2. 論文標題 Effective field theory of time-translational symmetry breaking in nonequilibrium open system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2019)131	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 Isono Hiroshi、Noumi Toshifumi、Shiu Gary	4. 巻 1807
2. 論文標題 Momentum space approach to crossing symmetric CFT correlators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2018)136	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 Makoto Tsuneto、Asuka Ito、Toshifumi Noumi、Jiro Soda	4. 巻 1903
2. 論文標題 Searching for bispectrum of stochastic gravitational waves with pulsar timing arrays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/03/032	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

[学会発表] 計8件(うち招待講演 8件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Enlarging the Scope of the Cosmological Collider: Beyond the Positivity Bounds
3. 学会等名 Dutch Theoretical Cosmology Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Cosmic inflation as a very high energy particle detector
3. 学会等名 44th Vietnam Conference on Theoretical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Enlarging the Scope of the Cosmological Collider: Beyond the Positivity Bounds
3. 学会等名 Miyazaki Workshop on Particle Physics and Cosmology 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野海俊文
2. 発表標題 アクシオンと量子重力
3. 学会等名 日韓共同 1 day ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 A Tower Weak Gravity Conjecture from Infrared Consistency
3. 学会等名 Simons Summer Workshop 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野海俊文
2. 発表標題 弱い重力予想と現象論
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshifumi Noumi
2. 発表標題 Primordial non-Gaussianities as a particle collider
3. 学会等名 KEK ph 2018 winter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野海俊文
2. 発表標題 加速膨張宇宙と非平衡系の場の理論
3. 学会等名 基研研究会 非平衡系の物理学 - 階層性と普遍性 - (招待講演) (国際学会)
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			
タイ	Chulalongkorn University			
中国	Hong Kong Univ. of Sci. and Tech.			
その他の国・地域 (台湾)	National Taiwan University	National Tsing Hua University		
米国	University of Wisconsin-Madison			
英国	Queen Mary University			



共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	香港科技大学			
英国	ケンブリッジ大学			
米国	ウィスコンシン大学			
ドイツ	ハイデルベルグ大学			
タイ	チュラロンコン大学			