

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要
〔令和2年度事後評価用〕

令和2年6月30日現在

機関番号：12601

領域設定期間：2015～2019

領域番号：2705

研究領域名（和文）なぜ宇宙は加速するのか? - 徹底的究明と将来への挑戦 -

研究領域名（英文）Why does the Universe accelerate? -Exhaustive study and challenge for the future-

領域代表者

村山 斉 (MURAYAMA, HITOSHI)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授

研究者番号：20222341

交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,165,300,000 円

研究成果の概要：本領域では、宇宙の極初期、また現在の宇宙の加速膨張の物理を解明することを目的とした。以下のものが主な研究成果である。(1) 超弦理論の枠組みで、重力理論を統合的に量子論に組み込むことはできないという「swampland」仮説を提唱し、業界に大きな議論を巻き起こした。(2) すばるイメージングデータの重力レンズ効果の精密測定と宇宙模型を詳細に比較することにより、宇宙論パラメータを正確に測定し、現在の加速膨張を引き起こしているダークエネルギーの性質に関する知見を得た。(3) LIGO 重力波対応天体、ダークマターの候補である原始ブラックホールに関する理論的、観測的研究を進め、新たな研究領域を開拓した。(4) 宇宙背景放射の衛星・地上実験、すばる多天体分光器、30m 級望遠鏡の超高分散分光観測に必須な基礎技術（光周波数コム）の装置開発を行い、国際共同研究を確実に進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義：加速膨張する宇宙の物理機構の解明に向け、すばる望遠鏡搭載の超広視野主焦点カメラ HSC を用いたダークマター分布の戦略的観測の展開、すばる超広視野多天体分光器 PFS 装置による観測の準備、次世代マイクロ波背景放射 CMB 探査計画などの観測的研究の推進を得た。加えて、加速膨張の直接測定の詳細な検討、横断的な物理解析のための手法の提案、原始ブラックホール等に着目した研究も進展した。また、超弦理論のみならず素粒子現象論やモデル・ビルディング、宇宙論に影響を与えた量子重力の swampland 条件等の究極理論の知見を得て、領域研究への展開を得た。物理学・天文学の国際社会における日本の存在感を維持・向上させることができた。

研究成果の概要（英語）：The purpose of this innovative research area is to reveal the physics driving accelerating expansion of the universe that should have occurred at the beginning and is now happening today. Main achievements of our program are as follows. (1) Researchers in this program proposed the so-called “swampland” conjecture claiming that low-energy effective field theories involving gravity and quantum field theory are not compatible with string theory. (2) Using high-precision measurements of gravitational lensing effects from the Subaru imaging data, we constrained cosmological parameters including the nature of dark energy. (3) We carried out theoretical and observational researches on primordial black holes that are candidates of dark matter and LIGO gravitational wave counterparts. (4) We carried out developments of instrumentation and infrastructures on the cosmic microwave background experiments, the Subaru multi-object spectrograph, and the TMT project.

研究分野：素粒子論 天文学 宇宙物理

キーワード：インフレーション ダークエネルギー ダークマター ニュートリノ 宇宙物理
素粒子

1. 研究開始当初の背景

Ia 型超新星の光度と赤方偏移の観測の結果、現在の宇宙は加速膨張していることが報告され、この発見に 2011 年のノーベル賞が与えられた。加速膨張を引き起こす未知のエネルギー源はダークエネルギーと呼ばれるが、その正体は不明である。一方、宇宙の極初期に爆発的な加速膨張があったというインフレーション理論は、宇宙背景放射(CMB)の観測衛星 WMAP 以降のデータで次々と検証され、まだ直接の証拠はないものの、状況証拠が出そろった。つまり、宇宙の極初期と、現在とで宇宙膨張が加速しているという観測的な証拠が確立している。なぜ宇宙膨張は加速するのか?インフレーション、アインシュタインの宇宙定数という「理論」が「説明」に使われているものの、様々な不自然さを抱えており、到底満足できる説明とは言えない。

一方、銀河や銀河団に代表される宇宙の大規模構造は、インフレーション中に生成された量子揺らぎが種となり、宇宙の質量密度の大部分を占めるダークマターの引力の作用で揺らぎが増幅されて形成された。しかし、加速膨張は揺らぎをならす方向に働くため、大規模構造はダークマターとダークエネルギーとの競争によって発展してきた。すなわち、大規模構造と加速膨張の研究は、同じコインの表と裏として深く関わり合う。

宇宙の極初期と、現在の宇宙の加速膨張の物理を究明することを目指し、世界中で宇宙背景放射、広天域銀河サーベイが稼働中あるいは計画中である。本領域発足時は、日本でもすばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC)による大規模銀河イメージングサーベイが始まったところであった。また、日本が主体となって参画している宇宙背景放射の地上、衛星実験の準備研究も進んでいた。

2. 研究の目的

本領域「加速宇宙」では、宇宙の加速膨張の大問題に迫るべく、超弦理論から観測・実験、統計解析に至る総合的なアプローチを提案し、すばる望遠鏡と宇宙マイクロ波背景放射を始めとするこれまでにない画期的な観測データと新たなアイデア、それを結ぶデータ解析によって当該研究領域の飛躍的発展を実現する。

3. 研究の方法

宇宙の加速膨張の物理を究明するために、トップダウン型理論研究 (C01 班) とボトムアップ型理論研究 (A01 班- A03 班) から指針を得て、世界最先端の宇宙観測計画研究 (B01 班 - B03 班) と将来宇宙観測計画 (B01 班、B03 班、B04 班) から確実に研究成果を出す。また、各計画研究のあいだの協奏を促し、特に究極物理解析の D01 班を通して、相乗的に研究を進展させ、結果として融合研究領域を開拓することを目指す。また、公募研究では各研究項目に相補的な研究テーマ、萌芽的研究テーマ、あるいは異なる研究項目を繋ぐ融合研究型の研究テーマを採択し、より包括的な領域研究の展開を目指した。

理論班では、重力理論、相対性理論、素粒子物理学、宇宙構造形成理論に基づき、「インフレーション」(A01)、「揺らぎと構造形成」(A02)、「ダークエネルギー」(A03) の物理を調べる。さらに、究極理論班 (C01) を配置し、トップダウン的にインフレーション、ダークエネルギーの加速膨張を自然に説明できる究極理論を探り、上記のサイエンスの協奏を促進する。

実験班では、世界最高の宇宙論観測データで宇宙の加速膨張の物理に迫る。B01 の宇宙背景放射 (CMB) の地上実験 Simons Array は、高感度検出器を用い、高精度の CMB 偏光の測定を行い、インフレーション宇宙起源の重力波の信号を探る。B02 のすばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) は、すばるの 8.2m の集光力、広視野かつ最高感度の CCD 検出器により、世界最高のサーベイスピードを有し、重力レンズ効果の精密測定からダークマターの地図を得る。B03 は、銀河分光 SDSS のデータの銀河クラスタリング解析から宇宙論距離を測定し、加速膨張のパラメータを制限することを目指す。さらに、B01 の CMB 偏光全天サーベイ計画 LiteBIRD、B03 のすばる次世代超広視野多天体分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS)、B04 の 30m 望遠鏡計画(TMT)の高波長分解能の分光観測のための機器開発、基盤整備を行い、将来計画への発展にも確実に繋げる。

4. 研究の成果

本領域の計画研究、公募研究の研究活動により、5 年間の研究期間内に 800 編を超える査読論文を発表することができた。以下には特筆すべき、主な研究成果を述べる。

「究極理論」の swampland 仮説の提案とそれに関連する研究の進展 - 計画研究 C01「究極理

論」の研究代表者の大栗博司、ハーバード大学の Cumrum Vafa と大学院生らは、(加速膨張の解である) 厳密なドジッター時空は超弦理論のトップダウン解として実現できないという予想を発表した(Obied, Ooguri et al. arXiv:1806.08362; Ooguri et al. Phys. Lett. B, 2019,)。この予想は「swampland (スワンプランド)」仮説と呼ばれている。このスワンプランド仮説は、宇宙初期の加速膨張を引き起こすインフレーションモデルのパラメータに対して制限を与え、また現在の宇宙の加速膨張がアインシュタインの宇宙定数によるものではなく、時間進化するダークエネルギーのためである、という予言を与えた。iNSPIRE によれば、大栗らの論文は 2018 年度に発表された素粒子論の論文のなかで最も被引用件数が高い論文になっている。

スワンプランド仮説は、本領域に属する研究者らにも様々な活発な議論を巻き起こした。例えば、領域代表者の村山齊らは、現在の宇宙・素粒子データから仮説の修正を促し (Murayama et al, JHEP 12, 2018)、さらに計画研究 B01 班が推進する宇宙背景放射偏光の地上実験 Simons Array、Simons Observatory、また衛星実験 LiteBIRD による原始重力波の探査、また計画研究 B02、B03 班が進めるすばる広天域イメージングサーベイおよび分光サーベイによるダークエネルギーの時間進化の探査により、スワンプランド仮説が検証可能であることを示した (Chiang, Leedom & Murayama, Phys. Rev. D 100, 2019)。

原始ブラックホールの研究の新たな展開 – 領域発足当初は想定していなかった研究成果として、本領域の研究者が中心となり、世界中に活発な議論を巻き起こした原始ブラックホールの研究成果がある。原始ブラックホール(PBH)は、インフレーション、あるいは初期宇宙の物理機構を通して生成された可能性があり、ダークマターの有力候補の一つである。本領域が発足した 2015 年度には、米国のレーザー干渉計重力波実験 LIGO がブラックホール連星合体からの重力波を検出した結果が発表され、業界に大きな興奮を巻き起こした (2017 年ノーベル物理学賞)。A01 研究代表者の佐々木節と若手研究者らは、この LIGO 重力波検出の発表に速やかに反応し、LIGO 重力波対応天体が PBH である可能性を調べ、太陽質量の 30 倍程度の PBH がダークマター総量の数%程度だけ存在すれば、LIGO 重力波の観測結果を説明できることを指摘した (Sasaki et al., Phys. Rev. Lett. 117, 2016)。この提案は、世界中の研究者に追随され、研究の大きな流れを作った。

さらに、B03 班の代表研究者高田昌広、当時大学院生だった新倉広子らのリードする研究グループは、PBH の観測的研究も行った。研究グループは、A01, A02, B02 班らの研究者と協力して、すばる HSC の威力に着目し、アンドロメダ銀河の約 9000 万個の星のモニター観測を遂行し、PBH の重力マイクロレンズを探索した (Niikura, Takada et al., Nature Astron. 3, 2019)。重力レンズは電磁波で光らない重力源さえも見ることを可能にする手法であり、PBH の観測的探査を可能にする。M31 の HSC 重力マイクロレンズ探査の場合には、太陽系小天体質量程度の PBH が天の川銀河 (我々の銀河) および M31 に存在するダークマターである場合、HSC 一晩の観測で約 1000 個程度の重力マイクロレンズ天体を発見できるはずであった。しかし、研究チームはたった一個だけの重力マイクロレンズ候補天体を同定した。これは PBH がダークマター総量の約 $1/1000=0.1\%$ 以下しか存在できないことを意味する。図 1 がその結果を示し、すばる HSC により世界で初めて太陽系小天体質量 ($10^{-10}g$ 太陽質量) 程度の PBH の存在量を制限できた。

すばる HSC による精密宇宙論の実現 – すばる HSC の国際共同研究チームは、重力レンズ効果の精密測定と Λ CDM 理論モデルを定量的に比較することにより、宇宙論パラメータを測定した (図 2, Hikage et al. PASJ 71, 2019)。重力レンズ効果は微弱な信号であるため、非常に注意深い、詳細な物理解析が必要になる。HSC チームは、重力レンズ効果の高精度測定の手法の開発、HSC データを再現する end-to-end シミュレーションデータを作成し、系統誤差のテスト・較正手法の開発、数値宇宙論データも用いた正確な理論モデルの構築、など基盤研究の整備を系統的に

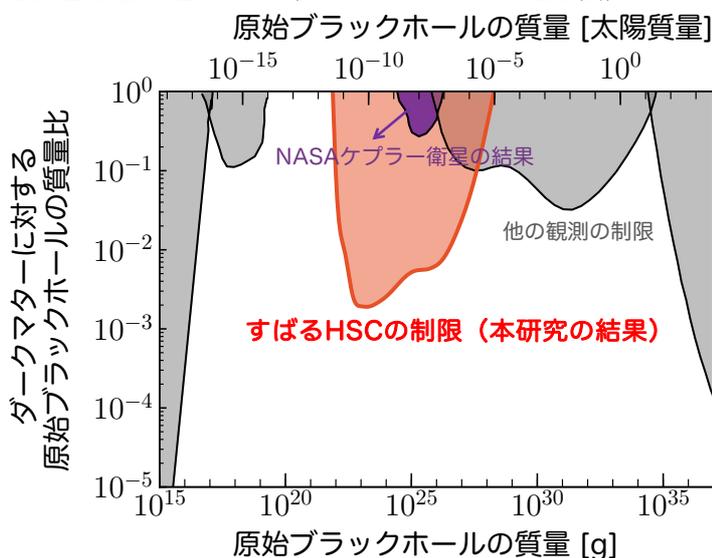


図 1: オレンジ色で塗られた領域は、本研究の HSC データによるアンドロメダ銀河の重力マイクロレンズ探査から得られた、原始ブラックホール(PBH)の存在が 95%CL で許されない領域。横軸は PBH の質量、縦軸はダークマター総量に対する PBH の存在比。グレーの領域は他の観測結果 (Niikura et al. 2019)。

行った。図2は、すばる HSC のデータから宇宙論パラメータを高い精度（68%CL の範囲で S_8 の約 4%の精度）で測定できたこと、また HSC の宇宙論パラメータが他の欧米の重力レンズ効果の測定結果と統計精度の範囲内で良く一致していることを示している。しかし、すばる HSC、他の欧州の S_8 の結果は、宇宙背景放射衛星 Planck の結果と一致しない、つまり 2σ 程度の矛盾を示すことを確認した。HSC、欧米の重力レンズサーベイは、全て異なる天域のデータ、また異なるチームが解析した結果であり、全て独立である。この矛盾は、同定されていないデータの系統誤差による可能性はあるが、物理的には Λ CDM 標準模型の綻び、つまり新しい物理の兆候を見ている可能性がある。さらに、HSC 研究グループは、現宇宙の加速膨張を引き起こしているダークエネルギーの状態方程式パラメータを制限し、HSC データはインシュタインの宇宙定数と矛盾しないことを確認した。さらに宇宙が少なくとも今後 1400 億年は加速膨張しながら存続し続けることも結論づけられる。これらの結果は、現在進行中の HSC サーベイで得られる全データのたった約 10%のデータに基づいた結果であり、今後のさらなる進展が期待できる。

機器開発、基盤研究の整備 -地上 CMB 実験 Simons Array (SA) の受信機をチリに移設し、試験観測に成功した。本領域の研究者らの地上 CMB 実験での実績、経験が評価され、日本主導の CMB 衛星計画 LiteBIRD が宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の次期戦略的中型 2 号機の計画に選定された。これは、本領域の支援、研究活動がなければ、実現し得なかった大きな進展と言える。

次世代の天文学、重力波宇宙論、多波長マルチメッセンジャー天文学の進展を見越し、さらなるすばる望遠鏡の性能向上を目指し、高速読み出し可能な CMOS 撮像素子の開発を行った。従来の CCD とほぼ同寸法の 10000×2560 ピクセル (7.5 ミクロン角ピクセル) のプロトタイプのコモスを作製することに成功した。

すばる PFS は、HSC と組み合わせて、次世代のサーベイ天文学、観測的宇宙論を担う強力な装置である。米国プリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学と協力して赤外線分光器を製作した。特に、赤外線検出器としては、世界最高感度を達成し、また需要過多にある Teledyne 社の検出器 H4RG を購入でき、順調に作製・開発を進めることができた。

宇宙の加速膨張を直接観測することを目指し、超高分散分光観測に必須な基礎技術、光周波数コム装置の開発を行った。産業技術総合研究所の研究者らと協力し、長期稼働に実績のある Er ファイバレーザを基に、精密粗調整可能な光共振器、可視光広帯域光発生法、およびレーザー・光共振器の自動安定化回復機構を新規開発することにより、最終的にモード間隔 30 GHz、可視光波長域の約 60%をカバーする世界で最も広い波長帯域の光コムを開発に成功した。

5. 主な発表論文等（受賞等を含む）

領域全体（計画研究、公募研究）について、5 年間の期間中に約 800 編以上の論文を出版できた。以下には主な論文、学会発表、受賞について挙げる。

発表論文：

1. “What does inflation say about dark energy given the swampland conjectures?”, *C.-I. Chiang, J. M. Leedom, H. Murayama, et al., Phys. Rev. D 100, 043505-1-8 (2019)
2. “Distance and de Sitter Conjectures on the Swampland”, *H. Ooguri, et al., Phys. Lett. B 788, 10, 180-184 (2019)
3. “Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data”, *C. Hikage, M. Oguri, et al. (including M. Takada, S. Miyazaki, H. Murayama, N. Sugiyama), Publ. Astron. Soc. Japan 71, 43 (1-44) (2019)
4. “Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914”, M. Sasaki, *T.

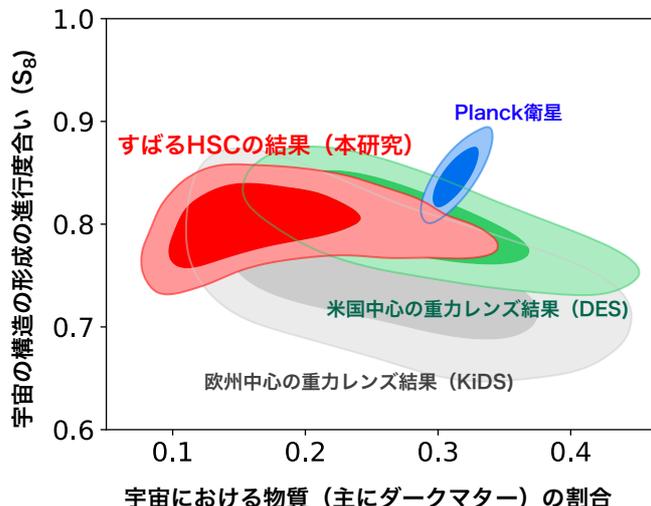


図2：すばる HSC の重力レンズ効果の測定から得られた宇宙論パラメータの測定結果(Hikage et al. 2019)。現宇宙における物質(主にダークマター)のエネルギー密度の割合、宇宙の構造形成の進化の度合い(S_8)の結果を示す。赤の領域は、HSC の結果で 68%, 95%CL の領域。比較のため、宇宙背景放射衛星 Planck の結果、また欧米の重力レンズの結果を示す。

- Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 117, 061101-1-5 (2016)
5. “**LiteBIRD: A Satellite for the Studies of B-Mode Polarization and Inflation from Cosmic Background Radiation Detection**”, *M. Hazumi et al. (including M. Hasegawa, H. Ishino, N. Katayama, K. Mitsuda, Y. Sekimoto), J. Low. Temp. Phys. 194, 443-452 (2019)
 6. “**Microlensing constraints on primordial black holes with Subaru/HSC Andromeda observations**”, *H. Niikura, M. Takada, et al., Nature Astron., 3, 524-534 (2019)

学会発表：

1. “**Dark matter candidates and strategies for future**” (plenary talk), H. Murayama, 国際会議 “16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics”, Sep 2019, Toyama, Japan
2. “**Scalaron as a heavy field and PBH formation**” (plenary talk), M. Sasaki, 国際会議 “String Phenomenology 2018”, July 2018, Warsaw, Poland
3. “**Thirty Meter Telescope (TMT)**” (招待講演), T. Usuda, 国際会議 “Subaru Telescope 20th Anniversary Conference”, Nov 2019, Kona, HI, USA
4. “**Bound on Mellin Amplitudes**” (招待講演), H. Ooguri, 国際会議 Strings 2019, July 2019, Brussels, Belgium
5. “**Non-Gaussian gravitational waves from inflation**” (招待講演、基調講演), E. Komatsu, 国際会議 “COSMO-18”, Aug 2018, Daejeon, South Korea

書籍：

1. 「宇宙の始まりに何が起きたのか」、杉山直、講談社、2020
2. 「宇宙マイクロ波背景放射」、小松英一郎、日本評論社、2019
3. 「素粒子論のランドスケープ2」、大栗博司、数学書房、2018
4. 「宇宙背景放射 「ビッグバン以前」の痕跡を探る」、羽澄昌史、集英社、2015

アウトリーチ活動：積極的にアウトリーチ活動を行った。本領域の研究成果は海外でも多く取り上げられている。下はその一部を掲載する

1. 本領域の主催・共催で、2018年度、2019年度にかけて、東京大学、愛媛大学、弘前大学、広島大学、東北大学、熊本大学で一般講演会を行った。各講演会で幅広い年齢層、多くの参加者があった。
2. NHK 番組「村山斉の宇宙をめぐる大冒険」2017年1月6日（金）午後10時から60分番組で放送。<https://www.nhk.or.jp/docudocu/program/92346/2346076/> 反響が大きく再放送の要望の声が多数寄せられた。その後、大好評につき何度も再放送されている。

受賞：

1. 2019年 計画研究 B03 の密接な共同研究者であるプリンストン大学 James Gunn 名誉教授が**京都賞**（基礎科学部門）を受賞
2. 2019年 C01 研究代表者 大栗博司が**紫綬褒章**受章
3. 2019年 B02 研究分担者 大栗真宗が日本天文学会 **林忠四郎賞**を受賞
4. 2017年 D01 研究代表者 小松英一郎他が**基礎物理学ブレイクスルー賞**を受賞
5. 2017年 領域代表者 村山斉が**独フンボルト研究賞**を受賞
6. 2016年 B02 研究代表者 宮崎聡が日本天文学会 **林忠四郎賞**を受賞
7. 2016年 領域代表者 村山斉他が**基礎物理学ブレイクスルー賞**を受賞

ホームページ等

<http://acceleration.ipmu.jp/>新学術領域研究「なぜ宇宙は加速するのか-徹底的究明と将来への挑戦-

<https://www.ipmu.jp/ja/20190619-symmetry>

<https://www.ipmu.jp/ja/20190402-PrimordialBlackHole>

<https://www.ipmu.jp/ja/20180926-HSC-S8>

<https://www.ipmu.jp/ja/20180227-HSC-FirstResults>