

宇宙と物質の創成を探るチリ・アタカマ高地からのCMB観測 – Simons Observatory および次世代望遠鏡群

① 計画の概要

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 偏光の精密観測により、宇宙を実験場とした物理学の研究から宇宙と物質の創成を探る。量子宇宙を源とする「原始重力波」の検出により宇宙創成のシナリオを明らかにし、重力レンズ効果等の精密測定によってニュートリノの質量和・暗黒放射の有無の精密検証・暗黒エネルギーにつながる宇宙進化の測定を行う。

多数の超伝導検出器を搭載したCMB望遠鏡“群”(複数台の望遠鏡)をチリ・アタカマ高地(海拔5,200m)に建設し、CMBの超精密観測を行う。これを国際共同プロジェクト・Simons Observatory (SO)とそのアップグレード、さらに次世代プロジェクト・CMB-S4によって実現する。SOは大小合わせて7台の望遠鏡、およそ14万個の超伝導検出器を使って広い視野を同時観測する(2021~2030)。その後のCMB-S4では、さらに約3倍規模で観測を行う(2027~2037)。SOは米国・日本・チリ・ヨーロッパ各国の研究者(既に250人以上)から構成される。日本は原始重力波の検出に注力した望遠鏡3台の増設等を主導する。また、CMB-S4は、米国DOEやNFSが強く推進している次世代プロジェクトであり、日本からのより大きな規模の貢献が期待されている。

原始重力波の検出は量子宇宙の検証である。究極の宇宙論、究極の高エネルギー物理、究極の場の理論の研究を同時に成し遂げる実験成果となる。ニュートリノは質量を有するにも関わらず銀河に局在しない唯一の素粒子である。その質量和の測定は、標準模型を超えた物理学を探求する手段となる。また、暗黒放射の有無に対する定量的な制限や暗黒エネルギーの性質を明らかにすることで、宇宙創成のみならず、宇宙の未来を予測する研究にもなる。さらに、本研究のために確立した技術は量子コンピューターの大規模化・実用化に向けた基礎技術にもなる。

② 学術的な意義

2026年までに蓄積したデータで、 $\delta r = 0.002$, $\delta(\Sigma m_\nu) = 0.03$ eV, $\delta N_{\text{eff}} = 0.05$ の達成を目標としている。 r はインフレーション・ポテンシャルエネルギーの指標であり、現在の探索上限値は $r < 0.07$ (95%信頼度)である。 N_{eff} は宇宙背景ニュートリノと暗黒放射の種類の数に相当する宇宙論パラメータである。 δ はそれぞれの測定精度をあらわす。さらに、2030年代には $\delta r = 0.0005$, $\delta(\Sigma m_\nu) = 0.025$ eV, $\delta N_{\text{eff}} = 0.03$ の達成を目指す。

原始重力波を検出した際のインパクトは絶大である。インフレーションを実験的に検証するだけでなく、そのポテンシャルエネルギーが素粒子大統一理論(GUT)スケールに相当することを示し、さらには重力が量子化されていたことの証拠にもなる。謂わば、究極の宇宙論、究極の高エネルギー物理、究極の場の理論の研究を同時に成し遂げる実験成果となる。

ニュートリノ質量の絶対値は、素粒子標準模型における最後の未測定パラメータである。その値を明らかにすることは、素粒子標準模型を超えた物理学を探求する手段としても期待されている。既に、 Σm_ν 測定の上限值($\Sigma m_\nu < 0.12$ eV, 95%信頼度)は、他の素粒子実験より厳しい制限をニュートリノ質量の絶対値に与えている。また、暗黒放射の有無に対する定量的な制限や暗黒エネルギーの性質を明らかにすることで、宇宙創成のみならず、宇宙の未来を予測する研究にもなる。

本プロジェクトの遂行過程で、数十万個もの超伝導検出器をあつかう技術が確立し、様々な応用が期待される。ダークマター探索やニュートリノ実験といった基礎科学実験のみならず、量子コンピューターの大規模化・実用化などに向けた基礎技術にもなる。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

SOは複数の実験が群雄割拠していた2016年に2つの有力チーム(ACTとPOLARBEAR)を統合して発足した。既に100億円規模の予算を確保し、世界最有力のCMB観測計画である。本計画は、日本が中核となりSOの大幅な増強を行う。日本は、この役割を担う十分な実力を有する。2019年1月に初観測を果たしたPOLARBEAR2実験の受信機は日本で組み立てられ、初の純国産CMB偏光観測実験・GroundBIRDも、数ヶ月以内に初観測が見込まれる。これらで培われた技術力、育成された人材により、本計画を遂行するのに十分な準備が整っている。さらに、本計画の推進により、さらなる技術力と人材育成が果たされ、その先に控えるCMB-S4やLiteBIRDにより日本のコミュニティが飛躍的な発展を遂げることに繋がる。

2011年のノーベル物理学賞(暗黒エネルギーの発見)に見られるように、宇宙観測の精密化により、基礎物理を探る動きが活発化している。この中で、本計画、原始重力波のみならず、ニュートリノ質量の絶対値や暗黒放射・暗黒エネルギーなど、幅広いトピックを網羅する最重要研究課題である。



図1 CMB望遠鏡“群”プロジェクト Simons Observatory

④ 実施機関と実施体制

実施の中心となる機関：東京大学カブリ IPMU

- ・機関長と CMB 研究グループが中心となって、合意を得るべく準備中である。
- ・責任を果たせる体制である具体的理由：日本における観測的宇宙論のトップ機関であり、CMB 実験のみならず、すばる望遠鏡による重力レンズ効果や暗黒エネルギーの研究を牽引し、さらにデータに対する理論的解釈の研究において世界的にも最先端を走る。本計画においても、中心機関としての責任を果たし、学術成果を最大化できる体制・設備・人材をもつ。
- ・役割：日本グループの統括、光学特性評価試験、データ解析、すばる望遠鏡等外部データとの統合解析など

参画機関：

- ・東京大学大学院理学系研究科（役割：受信機開発、検出器の評価試験、データ解析）
- ・東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター（役割：データ解析、理論検討）
- ・京都大学大学院理学研究科（役割：受信機開発、読み出し回路の開発、データ解析）
- ・東北大学大学院理学研究科（役割：望遠鏡の較正、およびデータ解析）
- ・理化学研究所（役割：検出器の開発）

⑤ 所要経費

日本主導で行う本計画(S0 アップグレード)の総額は40 億円である。

なお、関連する計画として、米国主導で現在進行中である S0 の総額が120 億円(うち100 億円が確保済み)、S0 アップグレードのさらに次期計画と位置づけられる CMB-S4 が総額700 億円程度(概算)である。

<本計画(S0 アップグレード)40 億円の内訳は以下の通り>

建設：17.7 億円

観測・運用：12.8 億円

人件費・旅費：8 億円

評価試験・研究開発：1.5 億円

⑥ 年次計画

【Simons Observatory (S0) の建設と運用】

2017：Simons 財団の援助の元に、共同実験発足

2017～2018：望遠鏡群の設計・開発

2019～2021：原始重力波の研究に最適な小口径望遠鏡の3 台とニュートリノや暗黒放射、暗黒エネルギーの研究に最適な大口径望遠鏡1 台の建設

2020：試験観測開始

2021～2026：本観測

【日本グループによる S0 アップグレードの建設と運用】

2021～2023：小口径の望遠鏡をさらに3 台建設する。また、大口径の望遠鏡内に搭載する検出器数を1.5 倍化する。

2024～2030：増強した望遠鏡群での観測

【次世代プロジェクト CMB-S4】

2023～2027：望遠鏡群の増設

2027～2034：観測・運用

【データ解析】

2021 年から継続的に行われ、データの蓄積と共にサイエンスに対する感度も向上する。

【雇用・人材育成】

S0 とそのアップグレード望遠鏡群は、さらに大規模なプロジェクトである CMB-S4 の望遠鏡群の一部となる。そのため、制作・設置した望遠鏡は継続的に運用され、育成した人材の雇用、さらなるキャリアパスも見込める。

⑦ 社会的価値

【国民の理解、経済的・産業的価値】 CMB 観測は超微弱な信号の計測である。その技術は、従来技術では見えないものを見ることを可能にする。例えば、気象観測機ではみえない大気中の水蒸気量の局地的分布などをモニターする事が可能になり、ゲリラ豪雨や竜巻等の早期予測に役立つ技術として期待されている。これら天気予測を元にしたビジネスや産業を創出する可能性を有する。国民の生活に直接役立つ技術を提供する事で、国民の高い理解を得られる。

【知的価値、国民の理解】 宇宙と物質の創成を明らかにすることで、人類の宇宙観を左右する潜在性を有する。国民の高い関心と共に高い理解を得られる。

【SDGs への貢献】 当該計画のサイエンスインパクトは絶大であり、宇宙・素粒子に関する興味を老若男女問わず向上する。学術への興味の向上は、SDGs17 の大きな目標のひとつである「質の高い教育をみんなに」への貢献に繋がる。

⑧ 本計画に関する連絡先

田島 治（京都大学 大学院理学研究科）

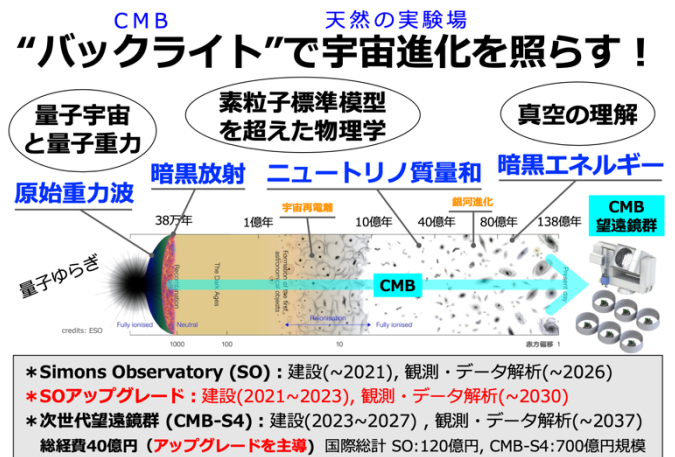


図2 本計画の科学目標と計画概要