

世界最大の超伝導センサー焦点面で解明する熱いビッグバン以前の宇宙

研究代表者	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
	長谷川 雅也 (はせがわ まさや) 研究者番号：60435617
研究課題情報	課題番号：25H00403 研究期間：2025年度～2029年度 キーワード：宇宙背景放射、インフレーション、超伝導センサー、原始重力波

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

「宇宙はどのように誕生したのか？」宇宙創成は人類究極の問いである。宇宙初期は超高温で高密度のビッグバンと呼ばれる状態であったことは、様々な研究から明らかになっている。一方で、ビッグバンだけでは説明できない宇宙の謎も山盛りである。これらの課題を解決する理論が「熱いビッグバン以前」に空間が急激に加速膨張を起こした時期がある、とする「インフレーション仮説」である。非常に有望な理論であるが、その決定的な証拠である「時空の量子ゆらぎに起因する重力波 (原始重力波)」が未発見である。原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) の偏光マップにBモードと呼ばれる渦巻き状の模様を刻印する。本研究では、チリで稼働を開始した「サイモンズオブザーバトリー」実験を本研究独自のアイデアを用いて高感度化し、このBモード偏光を、主要なインフレーションモデルが予想する範囲で探索・検証し、人類究極の「問い」を解き明かす事を目指す (図1)。

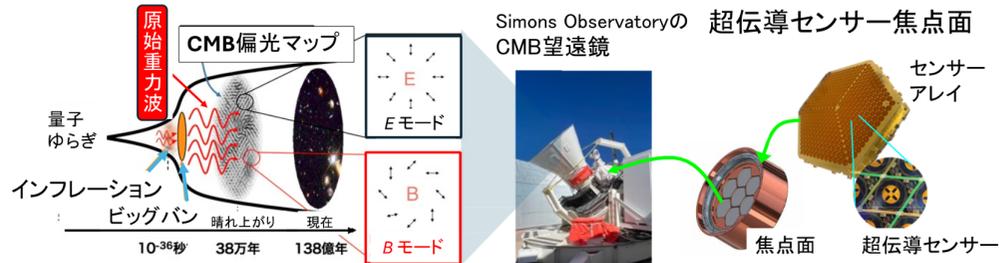


図1 本研究の全体像。インフレーションの決定的な証拠である原始重力波をCMB-Bモード偏光を通して探索する。期待される信号はとて微弱なため、高感度な超伝導センサーを多数搭載したサイモンズオブザーバトリーにて発見を目指す

●世界最大の望遠鏡“群”実験：サイモンズオブザーバトリー

本研究で、CMBの観測は、チリ・アタカマ高地で2024年度から観測を開始したサイモンズオブザーバトリー (略してSO) にて行う。SOは2種類の望遠鏡を使う実験プロジェクトで、原始重力波に特化した小口径望遠鏡 (SAT) と角度分解能の高さを生かして小さな偏光パターンを観測し、ニュートリノ質量や宇宙の進化に重力する大口径望遠鏡 (LAT) を用いる。日本グループは先行研究にてSATの要素開発やチリでの立ち上げ、運用に貢献してきた。新たなSATの建設にも貢献しており、本研究はその新しいSATを高感度化し世界最高感度での原始重力波探索を実現していく。



図2 サイモンズオブザーバトリーの概要と、SATの開発・移設の様子。

●本研究成功の鍵を握る前景放射分離能力の向上

原始重力波発見に向けた最大の挑戦はCMBの信号と前景放射との分離である。図3に示す通りCMBと前景放射の違いは信号強度の周波数依存性の違いであり、様々な周波数帯で測定を行って分離・除去する。サイモンズオブザーバトリー実験では、100 GHzおよび150 GHz帯域での観測に加えて、220 GHzおよび280 GHz帯域での観測を開始し、高周波側で卓越するダスト放射を精密に分離していく。他方、低周波側で卓越するシンクロトロン放射に対応する30 GHzと40 GHz帯域については開発途上である。早急に開発を行って観測を開始する事が強く望まれおり、本研究で実現を目指す。

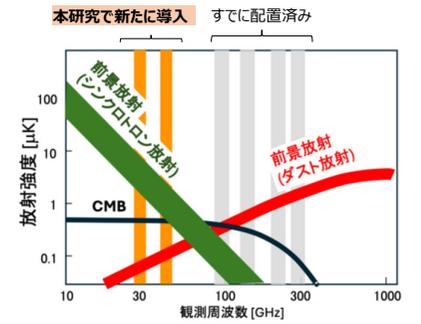


図3 CMBと前景放射の周波数依存性

●スカイエミュレータを用いたセンサー最適化 (高感度を担保するアイデア)

観測に用いるTESセンサーが期待通りの感度を発揮するには、観測サイトにおける大気熱放射環境に合わせたバイアス電圧の調整を行う必要がある。本研究では、図4の「スカイエミュレータ」を用いて実験室での最適化を可能とし、観測サイトでの立ち上げ期間を最小限に抑え、低周波観測データをより短期間で取得出来る。

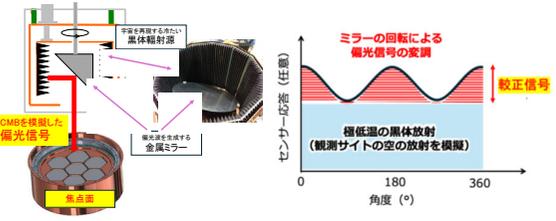


図4 スカイエミュレータの模式図。観測サイトにおける大気放射を模擬した環境下で偏光信号を用いた較正が出来る

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●“世界最大の超伝導センサー焦点面”の実現

CMBは焦点面に敷き詰めたTESセンサーで計測する。たくさんのセンサーがあれば空を広く高精度に観測できる。つまり焦点面が大きければ大きいほど有利である。「世界最大の超伝導センサー焦点面」は世界最良の統計制度を実現する最も着実な方法である。特に、前景放射の分離に重要な役割を果たす低周波の焦点面を実現することで、すでに配置済みのセンサーと合わせて、目標の感度を達成する。波及効果として大型の焦点面による微弱信号の計測技術は、他分野への応用 (暗黒物質探索、単一量子検出を通じた暗黒エネルギーへのアプローチ、量子コンピュータの多ビット化等々) が期待できる。

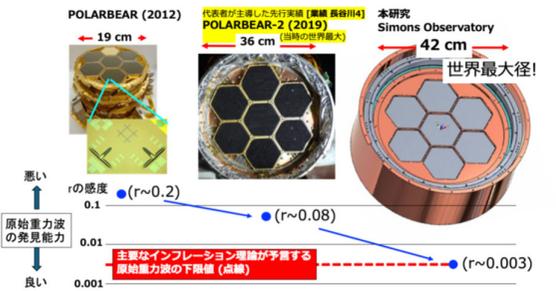


図5 原始重力波の発見能力は超伝導センサー焦点面の大きさとともに向上する

●原始重力波の世界最高感度探索

本研究で開発・導入する低周波用超伝導センサー焦点面にて取得したデータを用いて、前景放射を高精度で分離し、すでに導入済みの帯域のデータと合わせて、原始重力波の世界最高感度探索を実現する。原始重力波の強度を $r \sim 0.003$ まで探索し、主要なインフレーションモデルの検証を行う。原始重力波を検出出来れば、インフレーションのエネルギースケールの定量的評価と量子重力の実験的な手がかりが得られる。検出されなくても主要モデルを棄却することで今後の研究が進むべき方向性を明確に示せる。

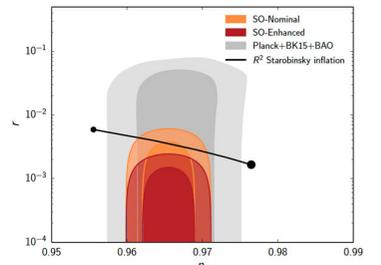


図6 原始重力波探索に関して予想される感度。

ホームページ等

<https://cmb.kek.jp>  
<https://simonsobservatory.org>  
<https://twitter.com/SimonsObs>