

宇宙背景放射

宇宙最古の光から読み解く究極の物理法則

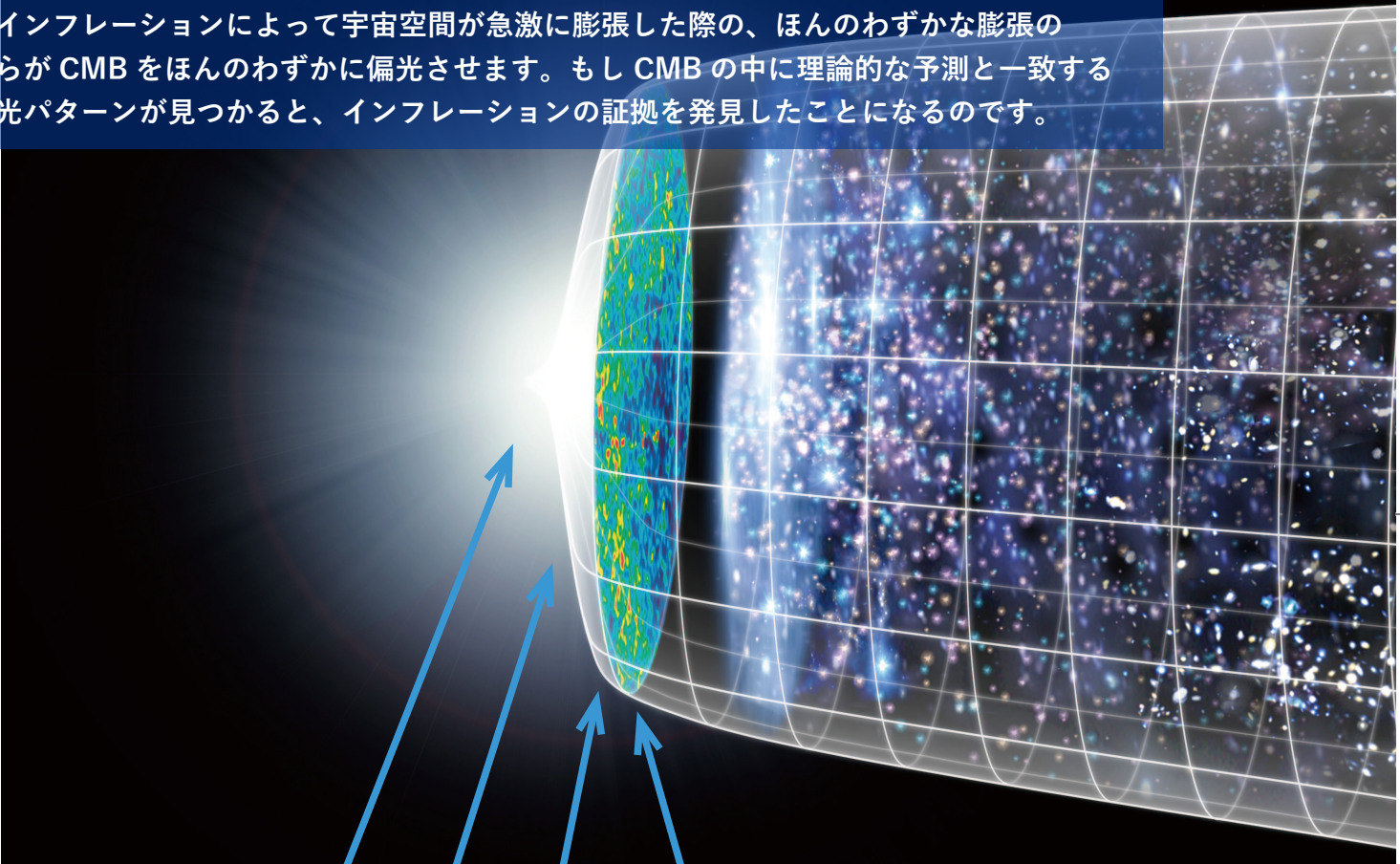
KEK-CMB

Cosmology 宇宙進化の理論

最新の宇宙論では、この宇宙は 138 億年前にインフレーションと呼ばれる急膨張から始まったとされています。宇宙のインフレーションは 10^{-36} 秒の間に 10^{26} 倍になるほどの急激な加速膨張と考えられています。しかしながらこのインフレーション理論にはまだ確実な証拠がありません。

その証拠を探る研究が CMB 観測です。CMB とは Cosmic Microwave Background の略で、日本語では「宇宙マイクロ波背景放射」です。これは宇宙の晴れ上がりのときの最終散乱光で、この光の中にインフレーションの痕跡が刻まれていると予想されています。

インフレーションによって宇宙空間が急激に膨張した際の、ほんのわずかな膨張のむらで CMB をほんのわずかに偏光させます。もし CMB の中に理論的な予測と一致する偏光パターンが見つかり、インフレーションの証拠を発見したことになるのです。

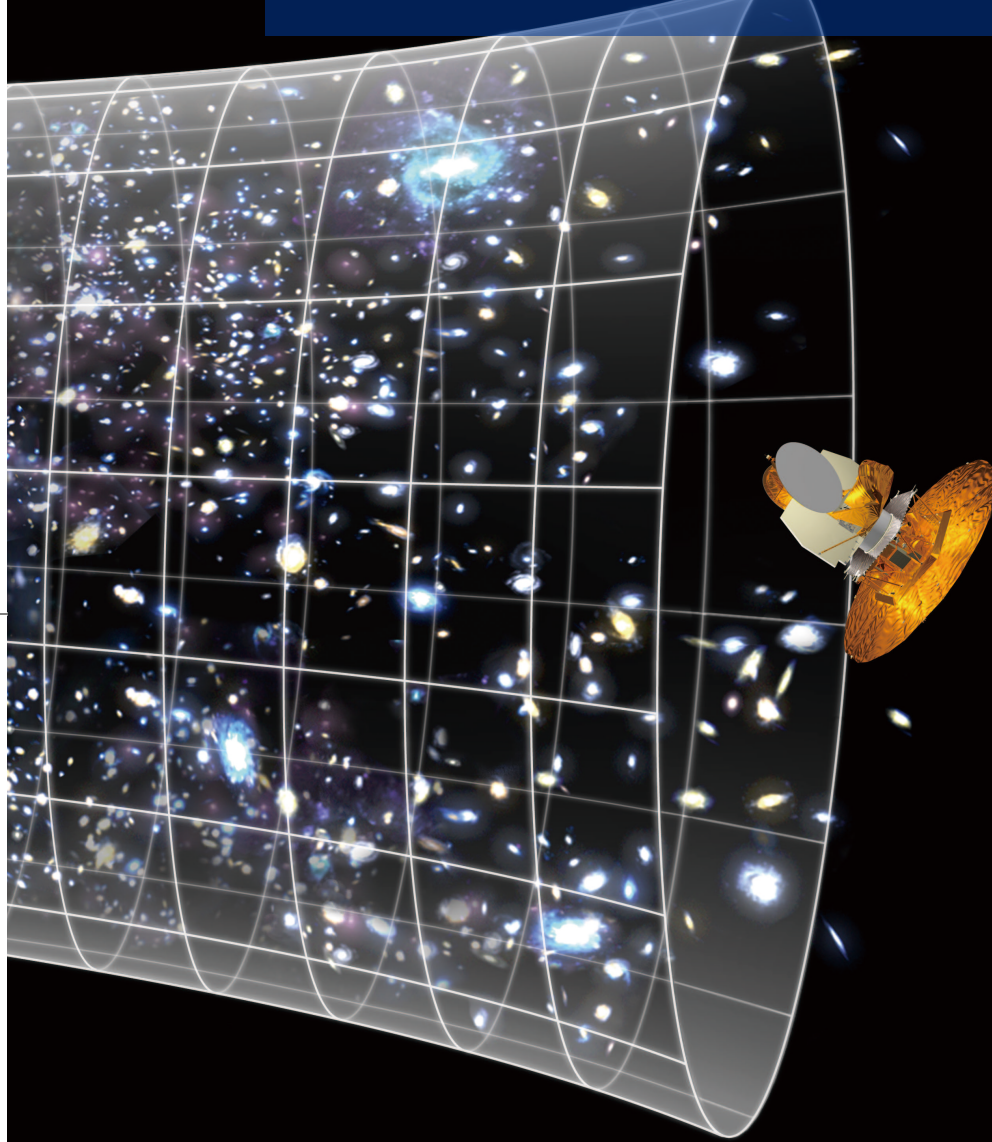


量子ゆらぎ
インフレーション
ビッグバン
宇宙の晴れ上がり

CMB の光の進む道は宇宙空間にある質量によって曲がります。この「重力レンズ効果」によっても特徴ある偏光パターンができます。

CMB の偏光の重力レンズ効果から宇宙空間にある質量を計算することができます。ここから、3種類あるといわれるニュートリノの質量の合計を求められます。ニュートリノの質量が分かれば、反物質の謎に迫ることができ、素粒子理論の集大成である「標準模型」が大きく発展すると期待されています。

大きな宇宙と小さな素粒子、両方の鍵を握っているのが CMB 観測なのです。KEK-CMB グループは、宇宙の誕生という「究極の高エネルギー現象」に、宇宙自身が残したメッセージを手掛かりにして挑みます。



● NASA の宇宙歴史図

左端の一点が宇宙の始まりの量子ゆらぎで、右に向かって時間が流れ、右端が現在です。縦方向の広がりはその時刻での宇宙の大きさを表します。

量子ゆらぎの直後に宇宙が急激に大きくなっている部分がインフレーションです。まだらの緑色に見える部分は宇宙誕生 37.5 万年後の晴れ上がりと呼ばれる時期で、これ以降光は宇宙空間を真っ直ぐに進めるようになります。このときに放たれた光が CMB です。

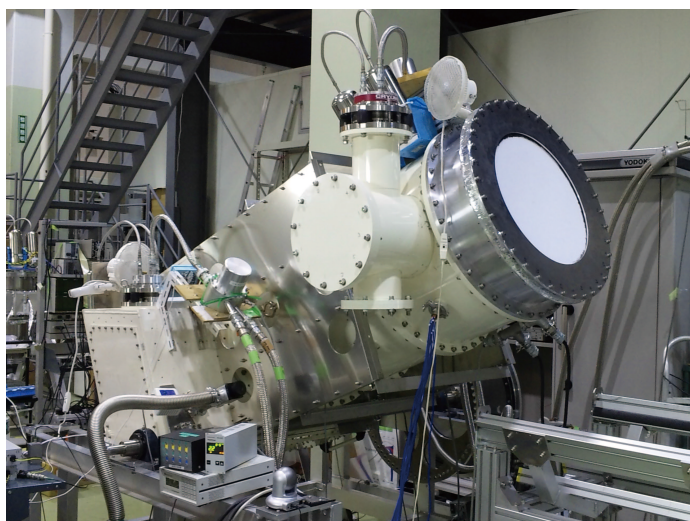
ビッグバンとは、インフレーションの後で宇宙が火の玉のように熱くなり膨張している時期を指します。

Simons Array 地上望遠鏡実験

南米のチリ北部にあるアタカマ砂漠で、3台の望遠鏡を使ってCMBを観測する実験が、Simons Arrayです。合計22,764個の光検出器を搭載し、1個でも多くの光子をとらえてCMBを画像化します。空気や水蒸気の影響を減らすために、標高5,200メートルにあり世界で最も乾燥したこの土地が選ばれました。

大きな円形の反射鏡は、狭い天域のCMBを細かく調べることができ、反射鏡ごと首振り運動をすることで広い天域も撮影します。これによって、インフレーション理論の検証とニュートリノ質量和の絞り込みを同時に狙います。

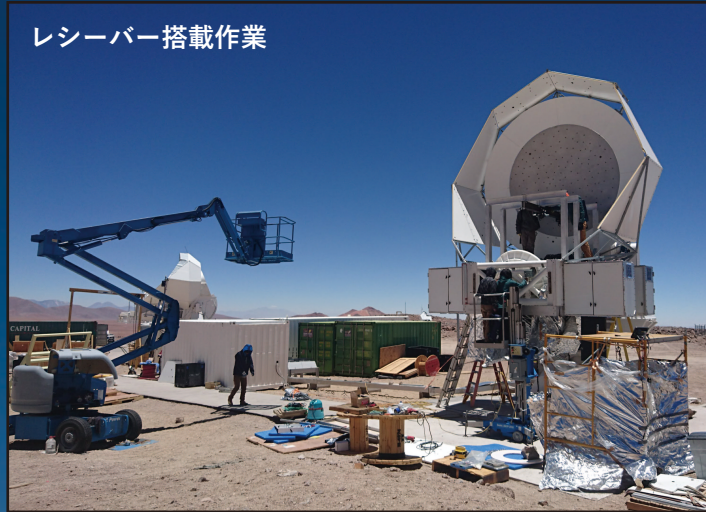
アメリカのカリフォルニア大学、カナダのマギル大学などとの共同研究であり、KEKからも研究者や学生がチリに渡航して運用に参加しています。



● レシーバー

それぞれの望遠鏡の中には、望遠レンズ付きのカメラのような形をした筒が収められています。これはレシーバー（受光器）といい、検出器とレンズが入っています。内部は魔法瓶のような三重構造になっており、検出器を -273°C まで冷却します。KEKでは1台目のレシーバーの設計・動作試験を行い、本番と同じように検出器を使って光をとらえるための性能を実証しました。2018年下旬にチリに輸送し、宇宙の観測を始めています。

レーザー搭載作業

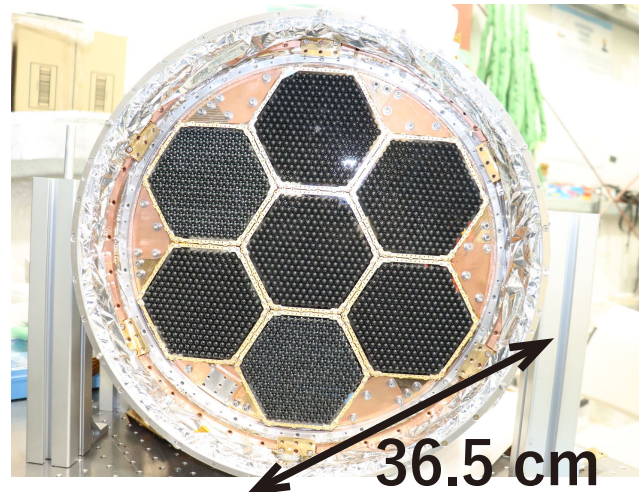


●冷却と超伝導

右の写真は、Simons Array に使われる検出器です。黒い部分は、直径 1 センチメートル以下の小さな検出器が 1,000 個以上集まってできています。

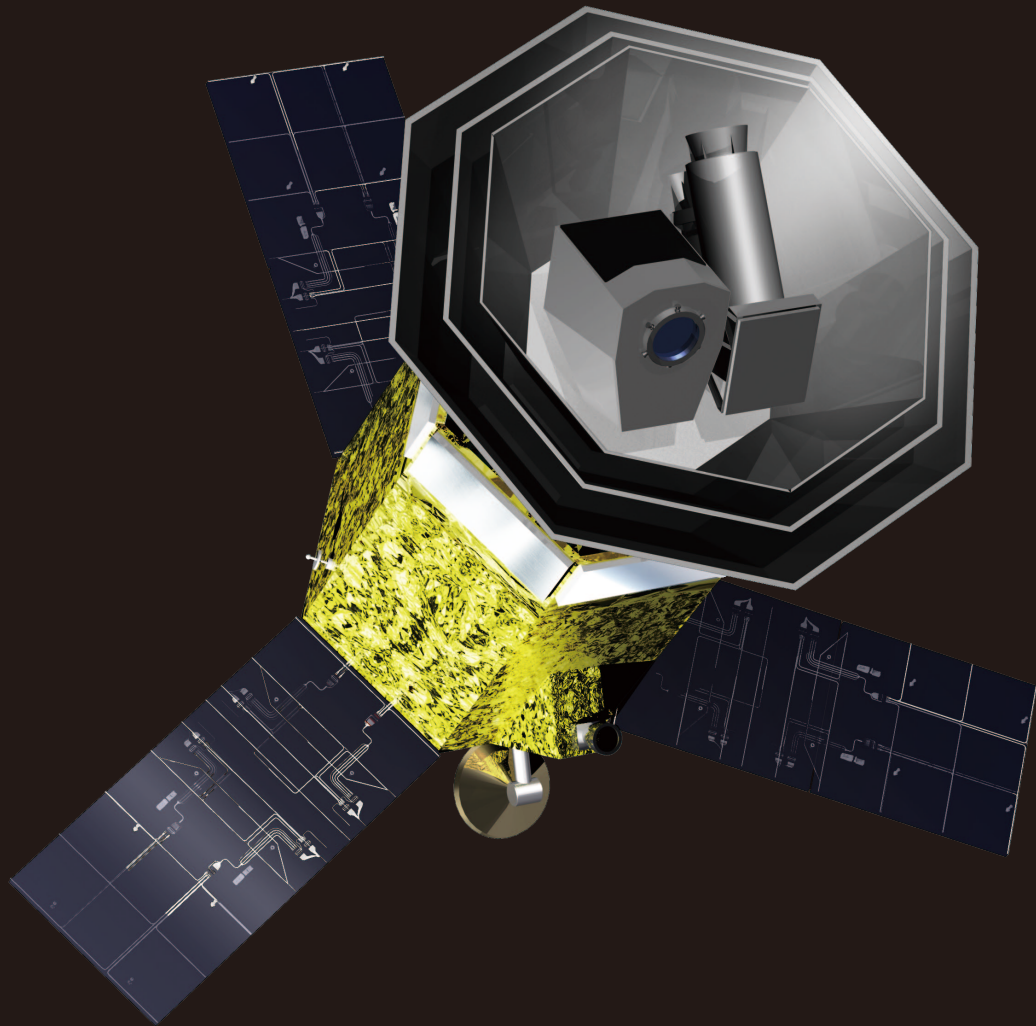
検出器は、冷却すると急激に電気抵抗が小さくなる「超伝導」という現象を利用して、CMB のわずかなエネルギーを測定します。

液体ヘリウムを用いた冷却、超伝導のコントロール、そしてたくさんの検出器から送られる大量のデータの処理は、KEK の加速器実験で長く培われてきた技術です。



LiteBIRD 次世代 CMB 観測衛星

LiteBIRD は JAXA の戦略的中型計画として 2019 年 5 月に選定され、2027 年の打ち上げを計画している CMB 偏光観測衛星です。本衛星の最大の目的はインフレーションモデルの検証を行うことであり、日米欧の多くの研究者が参加して計画を進めています。



●なぜ宇宙から観測するのか

CMB 偏光観測は現在多くの地上実験があり、次世代の観測計画も着実に進行しています。その中にあって、衛星による観測は大きな意味を持ちます。

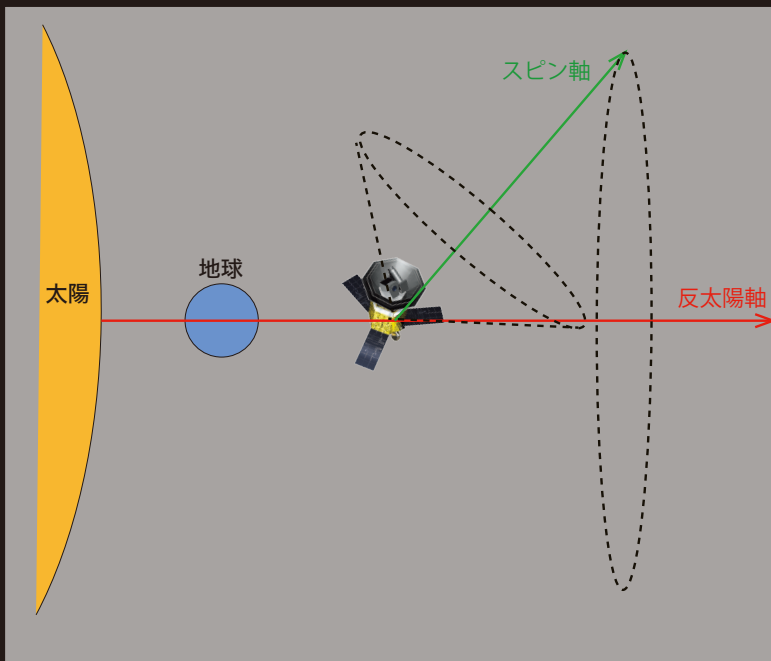
一つは大気の影響がないことです。

雲の中の結晶は地表からの光を反射し偏光を生むことが知られていますが、これは観測にとってノイズとなります。また、特定の周波数の信号は大気に吸収され観測に用いることができません。宇宙での観測ではその制約なく観測周波数を選択することができ、より理想的な観測が可能になります。

別の、そして非常に重要な理由として、大角度スケールの観測が可能なが挙げられます。

地上観測では立地上の制約から全天の観測はできません。実際、現在行われている地上観測は空の特定の領域のみを観測しています。

宇宙からの観測では全天観測が可能であり、この全天観測こそがインフレーションモデルの検証に大きく寄与するのです。



● LiteBIRD の観測戦略

LiteBIRD は、太陽を背にするラグランジュ点2 (L2) のリサージュ軌道と呼ばれる軌道で観測を行います。この軌道では、太陽の強すぎる光が地球で遮られると同時に、推進剤の消費を抑えることができます。望遠鏡の向いている方向は、スピン軸の周りを常に回転します。そのスピン軸の方向も、地球と太陽を結ぶ線を中心に回るようにします。こうすることで、全天から来る CMB を観測するのです。

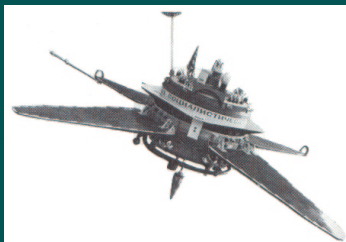
● CMB 衛星実験の沿革

これまでに4機のCMB観測衛星が稼働しました。古い順に「Relikt-1」、「COBE」、「WMAP」、「Planck」です。

CMBの温度について、Relikt-1は宇宙の大スケールの揺らぎ（非等方性）の上限を与えるに留まりましたが、数年後にCOBEによって大スケールの非等方性が報告されました。その後のWMAP、Planckによってその精度が高められ、現代宇宙論の研究に欠かせない情報を提供しています。

CMBの偏光についてはWMAP、Planckが観測しています。これまでにE-mode偏光とそれが重力レンズによって歪められたことによるB-mode偏光が検出されました。しかしながら、インフレーション起源のB-mode偏光は発見されていません。また、与えられている上限値も主要なモデルの検証に十分ではありません。

LiteBIRDは大スケールでのB-modeの観測ができるため、インフレーション起源のB-mode偏光の上限値の更新、あるいは検出が期待されています。



Academy of Sciences of the Soviet Union
(画像は ©NASA)

Relikt-1 (1983-1984)

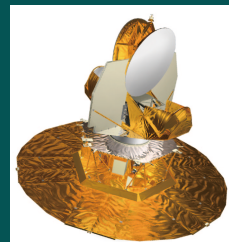
CMBの温度の非等方性に上限を与える。



©NASA/COBE Science Team

COBE (1989-1996)

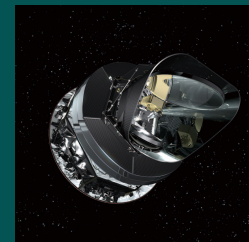
CMBの温度が理論と一致することを実証。さらに、温度の非等方性を直接検出。



©NASA/WMAP Science Team

WMAP (2001-2010)

CMBの偏光も観測。宇宙の年齢や大きさ、宇宙進化の理論を組成などを算出。



©ESA/AOES Medialab

Planck (2009-2013)

より高感度の観測で宇宙の年齢や大きさ、宇宙進化の理論を絞り込む。



実験室前の風景



アタカマ砂漠に住む
ビスカッチャ（ネズミの仲間）

〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

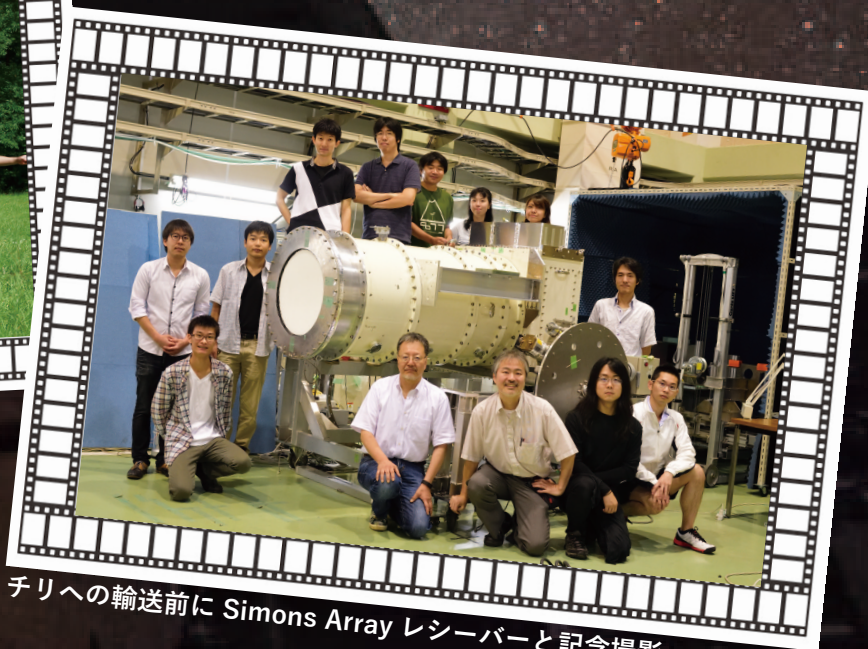
高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所
実験的宇宙物理研究グループ

<http://cmb.kek.jp>

本グループは、本研究機構が培った加速器実験の技術を
宇宙観測実験に応用することにより、新しく独創的な
プロジェクトを立ち上げ推進しています。



バーベキュー大会での一枚



チリへの輸送前に Simons Array レシーバーと記念撮影