

ビッグバン以前の宇宙は見えるか?^{*1}

はじめに

宇宙誕生の瞬間とは? 宇宙創生を支配する物理学の根本法則とは? これらの問いに答えることは科学の大いなる挑戦の一つです。と同時に、科学を超えたセンス・オブ・ワンダー（感動をともなう不思議な感覚）を呼び覚ます研究テーマです。究めようとする、「何もない状態から存在をつくりだす」などといった問題にすら直面してしまうのです。

宇宙はどこまでさかのぼって見ることができるでしょうか? 宇宙の始まりには、熱い火の玉状態でビッグバン（宇宙の膨張）が起きた、と言われます。ビッグバンを、とにかく宇宙の始まりの瞬間のこと、と定義してしまうと、論理的にその前はないことになりそうです。でも、ビッグバンも物理学で記述できる現象に過ぎないと思えば、その準備期間があっても良い気がしてきませんか?

実は、観測技術の進歩のおかげで、今や人類は熱い火の玉状態以前の宇宙（ビッグバン以前の宇宙）を観測できそうなのです。いくつかのやり方が提案されていますが、最も有望な方法が、宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background, 以下CMB）の偏光測定です。現在、世界的な競争状態にあります。

^{*1} JAXA宇宙科学研究所のISASニュース 2016年9月号 (No.426) 宇宙科学最前線「ライトバード (LiteBIRD) でビッグバン以前の宇宙を探る」をもとに加筆。

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) とビッグバン宇宙論

CMBは全天から降り注ぐ宇宙最古の電磁波で、周波数は、およそ160 GHz（波長2ミリ程度）を中心としています。1964年（論文掲載は1965年）にアーノ・ペンジアスとロバート・ウィルソンにより発見されました。2人はその業績で1978年のノーベル物理学賞を受賞しています。

宇宙はビッグバンのあと膨張しながら冷えていきました。誕生から約38万年たった頃の宇宙では、電子と陽子がバラバラに存在していた状態から、お互いがくっついて水素原子になるという大きな変化が起きます。それまで電子としょっちゅう衝突していた電磁波は、以後自由に宇宙空間を伝わることになります。このできごとは「宇宙の晴れ上がり」と呼ばれています。この自由に伝わり宇宙に満ちた電磁波がCMBです。晴れ上がりのCMBの温度は約3000 Kでした（以下、温度はすべて絶対温度(K)で表します）。一方、CMBの現在の温度は約2.7 Kだとわかっています。低くなったのは宇宙膨張とともにCMBの波長が伸びたからです（電磁波の波長が長くなれば、その温度は低くなります）。これ以外にはCMBの存在は説明できないので、CMBの存在そのものが、ビッグバンの重要な証拠とされています。

1989年には米国のCOBE衛星が地球周回軌道での

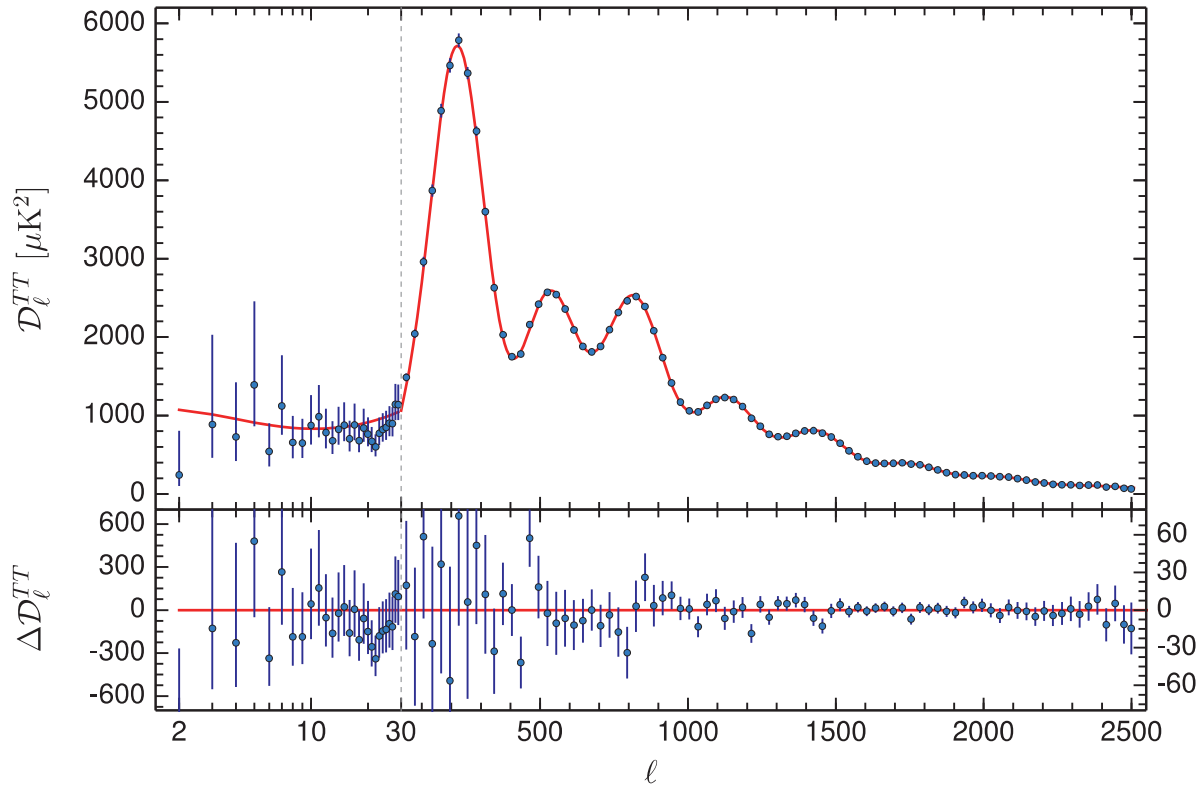


図1 プランク衛星によるCMB温度ゆらぎの観測結果。横軸はパワースペクトルの波数（ゆらぎの模様の「細かさ」に相当）、縦軸はゆらぎの強度をあらわす。実線は、標準宇宙理論によるフィット結果を示す。下図は観測結果とフィット結果の差を示している。

観測を開始しました。CMB精密観測時代の幕開けです。COBE観測の功績により、2006年のノーベル物理学賞はジョン・マザーとジョージ・スムートに与えられました。その後、2001年には角度分解能でCOBEをしのぐWMAP衛星が太陽と地球のラグランジュ点の1つ(L2)^{*2}で観測を開始し、さらに2009年にはヨーロッパが主導して、WMAP衛星の感度と角度分解能を上回るプランク衛星が打ち上げられました。これらの観測によって、宇宙の年齢が約138億年であることや、宇宙はまだ人類が理解できない謎のエネルギーに満ちていることなど、我々の宇宙の驚くべき姿が高い

^{*2} 本誌の裏表紙を参照。

精度でわかってきたのです。

2015年に発表されたプランク衛星の観測結果を図1に示します。実線が理論予想、点が観測結果（棒は誤差）を示します。CMBの温度を全天にわたり精密に観測し、どれほどのムラ（「ゆらぎ」と表現します）があるかを解析（スペクトル解析と言います）した結果で、横軸がゆらぎのサイズ、縦軸がゆらぎの大きさを表します。たとえ図の意味を知らなくとも、理論と観測がとてもよく合っていることがわかりますよね。まさに精密宇宙論と呼ぶにふさわしい結果です。これは驚くべきことだと思います。100億年以上も昔のことが正確にわかってしまうのですから。

電磁波には、波長（色）、強度（明るさ）、偏光（振動の方向）の3要素があります。プランク衛星後のCMB研究のフロンティアはまだ精密に観測されていない偏光の観測に移りつつあります。CMB偏光の観測により熱いビッグバン以前の宇宙を探れるからです。それがどんな宇宙だったか、人類はまだ正解を知りませんが、最も有力な仮説がインフレーション宇宙仮説です。

インフレーション宇宙仮説

インフレーション宇宙仮説は1980年代初頭に提案されました。基本的なアイデアは実に簡単で、宇宙は、熱い火の玉状態になる前に急激な加速膨張を起こした、というのです。このたった一つの仮定で、素朴なビッグバン宇宙論のいくつもの問題を一網打尽に解決してしまうので、*3 現在最有力の仮説なのです。これまでの観測結果も、すべてインフレーション宇宙仮説をサポートしています。

こう書くと、インフレーション宇宙仮説が正解でいいのでは、と思われるかもしれませんが、ことはそう単純ではありません。人類が現在手にしている物理学の標準理論（最も基本的な法則を集めたもの）と矛盾するのです。宇宙の森羅万象は、すべて物理法則どおりに動いています。問題は、標準理論では宇宙の加速膨張は起こせない（減速膨張しかしない）ということなのです。物理学の標準理論にしたがうかぎり、宇宙は、いわばブレーキだけあってアクセルのない車のようなものでしかないはずなのです。

じゃあインフレーション宇宙仮説はダメなの、とい

うと、そうでないのです。ここが面白いところです。物理学研究は、将棋のルールを知らない人が、対局を横で眺めるだけでルールを突きとめるようなものです（このやり方で完全なルールブックを突き止めるのは、骨が折れることでしょう）。現在の標準理論は、未完成なものなのです。私を含む多くの物理学者は、宇宙のルールブックには、私たちがまだ知らない物理学の根本法則が書いてあり、それはインフレーション宇宙も作れるし、現在の標準理論も導けるはずと思っています。すでに物理学根本法則の提案はいくつかあって、観測によるテストを待っています。代表的な例としては超弦理論があり、世界は4次元を超えた高次元でできており、万物の根源は素粒子ではなく、ひも状の何かであるというような、とても大胆な予想をしています。

CMB偏光による原始重力波観測

では、どんな観測をすれば、インフレーション宇宙仮説の決定的な検証ができるのでしょうか？ 答えは「原始重力波」です。*4

インフレーション宇宙仮説の最も重要な予言は、原始重力波の生成です。重力波とは、時空のゆがみが波として伝わる現象です。インフレーションの加速膨張は重力波を生みます。天体の運動で生まれる普通の重力波と区別して、これを原始重力波と呼びます。原始

*3 インフレーション仮説がどんな問題を解決するかについては、たとえば Kavli IPMU News Vol. 10 (June 2010)、デイビッド・スパーゲル「宇宙はどのように始まったか？」を参照。

*4 Kavli IPMU News Vol. 26 (June 2014) p. 72、佐藤勝彦「宇宙のインフレーションと原始重力波」参照。

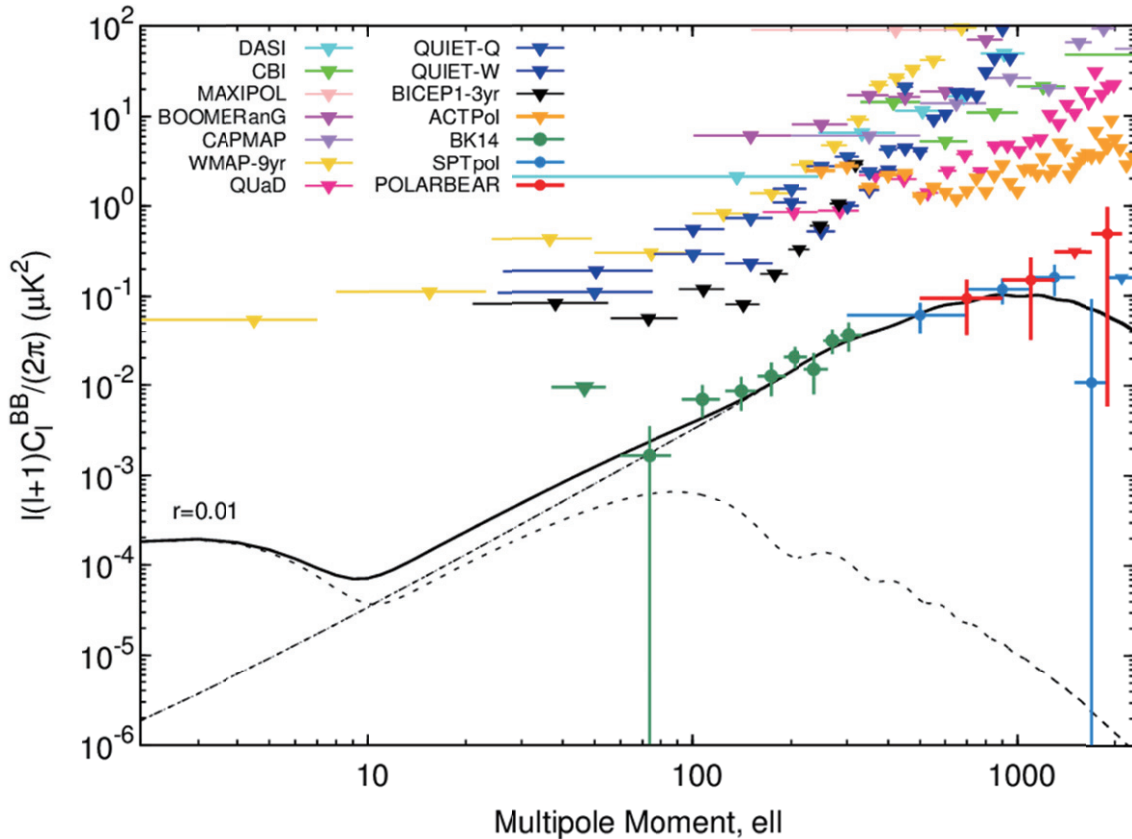


図2 CMB Bモード観測の現状。横軸・縦軸は図1に同じ。丸は中央値、三角は上限値をあらわす。鎖線がまだ観測されていない原始重力波によるBモードの理論予想を示す。一点鎖線はCMBが我々のもとに電磁波として届くまでに天体などにより進路を曲げられるため生まれる見かけのBモードで、すでに観測されている。実線は2つのBモードの合計をあらわす。(作図はKavli IPMU/カリフォルニア大学バークレー校の茅根裕司氏による。)

重力波の検出なくしてインフレーション仮説を証明することはできないので極めて重要です。

CMB偏光を使った原始重力波の検出方法を説明しましょう。原始重力波はインフレーション宇宙で生まれた後、晴れ上がりの時にも宇宙空間を満たしており、CMB偏光の分布に特殊な渦巻きパターン(「Bモード」という名前がついています)を刻印したと予想されています。これを検出すれば、インフレーションの動かぬ証拠です。人の指紋を検出するのと似たような感じです。

現在、原始重力波の発見を目指したCMB偏光観測の世界的競争が行われていて、群雄割拠の状態です。地上の望遠鏡や気球を使ったプロジェクトが進行中も

しくは準備中です。我が国でも高エネルギー加速器研究機構(KEK)やカブリ数物連携宇宙連携機構の研究者を中心に国際共同チームに参加し、チリ・アタカマ高地にCMB望遠鏡を設置して観測を行っています。ポーラーベアプロジェクトと名付けられたこの観測研究についてより詳しく知りたい方は、例えば拙著『宇宙背景放射「ビッグバン以前」の痕跡を探る』(集英社新書)をお読みください。

CMB偏光について、これまで世界中で行われた探索結果のまとめを図2に示します。図1は温度のゆらぎをスペクトル解析した結果でしたが、図2はBモードのゆらぎをスペクトル解析した結果です。たくさん

データがあります（丸は中央値、三角は上限値）が、要するに、横軸の値が小さいところで見えるはずの原始重力波の信号（図中の鎖線がインフレーション宇宙仮説の予想）はまだ見えていない、ということです。上限だけが得られています。原始重力波を発見するには、これまでより少なくとも10倍以上の感度で観測を実行しないとはいけません。地上でより感度の高い観測を行うために、ポーラーヘアプロジェクトでは最終的に望遠鏡を3台設置して同時観測を行うことにより、準備が進んでいます（サイモンズアレイ計画と名付けられています）。

決定的な観測をするには大気の影響を受けず全天をカバーする究極の測定が必要になります。つまり衛星計画です。我が国では2008年ごろにすでにこうした流れを読んで、世界に先駆けて比較的小型の衛星を打ち上げる検討をKEKのCMBグループが中心となって開始しました。これがライトバード（LiteBIRD）計画です。

ライトバード (LiteBIRD) 衛星計画

LiteBIRD計画は、2015年2月にJAXA宇宙科学研究所へ正式提案を行い、初期の審査を通過しました。現在、KEK、東大Kavli IPMU、JAXA、岡山大、国立天文台、カリフォルニア大バークレー校、マックスプランク宇宙物理学研究所などから総勢130名以上の研究者がLiteBIRDワーキンググループに参加し、2020年代半ばの打ち上げを目指して概念設計に従事しています。CMB観測を手掛けている研究者以外にも、X線天文学や赤外線天文学の研究者などが参加しています。

図3にLiteBIRDの概念図を示します。ひとことでは、**「ナノケルビン程度しかないBモードのムラを見る究極の観測装置」**です。以下、メカ好きな読者のためにミッション部観測装置を空側からCMBの進む方向に沿って説明すると、1) 観測の系統誤差を減らすためにCMBを変調する回転半波長板、2) およそ4 Kに冷却した直径約80 cm程度の主鏡と一枚の副鏡を持つ反射光学系、および高周波側の観測に特化した小さな屈折望遠鏡、3) 100 mKの熱浴温度で動作する超伝導検出器アレイ、4) 読み出し回路系、5) ジュール・トムソン冷凍機とスターリング冷凍機で構成される予冷系、および6) 断熱消磁冷凍機からなります。WMAPやプランク衛星と同様、地球から150万km離れた太陽・地球のラグランジュ点の一つ（L2）で3年間の観測を行うことを検討しています。歳差運動するコマのような運動をすることにより、まんべんなく全天をスキャンする方式を考えています。超伝導検出器アレイによって、40 GHzから400 GHzまでを15バンドに分けて観測する予定です。全般に、地上観測で使い込んでいる技術の延長としての検出器システムに、これまでのJAXAの科学ミッションで実績のある冷凍機や衛星バスのコンポーネントを使って、高い実現性をもたせる計画です。

Kavli IPMUは、LiteBIRD計画を進めるにあたり、中心的な役割を担っています。Kavli IPMUといえば、理論物理、数学、コンピュータを使った研究というイメージが強いかもしれませんが、柏の葉キャンパスの建物の1階にはちゃんと実験室もあり、LiteBIRDのための装置の開発研究を行っています。CMBを変調する回転半波長板については、昨年着任した松村准教授

光学系

- 回転半波長板による変調
- 反射型望遠鏡。主鏡と副鏡(ともに直径約80cm)を約4ケルビンに保持

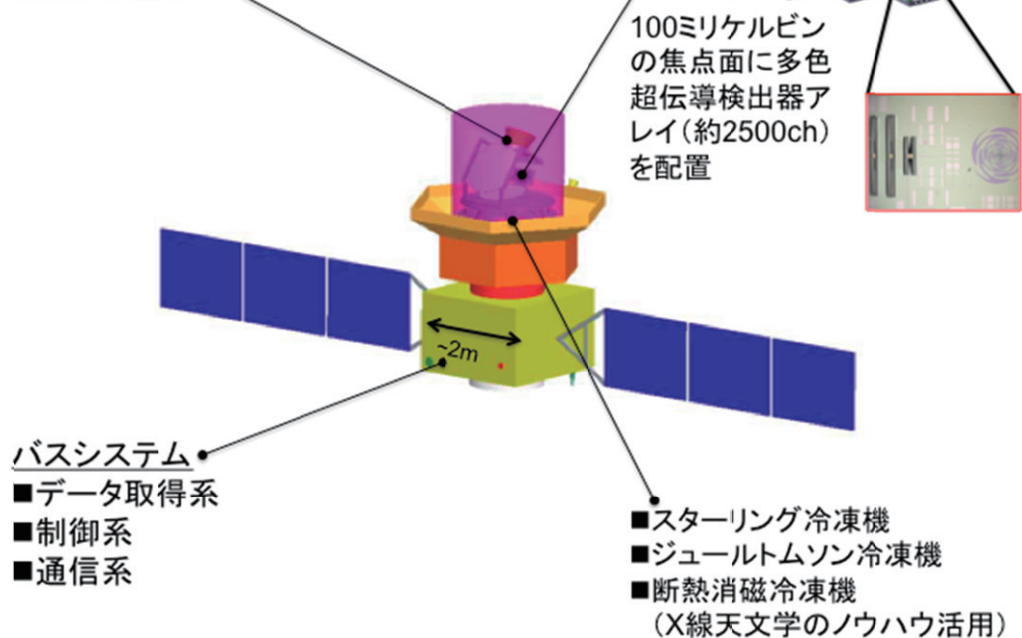


図3 LiteBIRD衛星の概要。

が世界的なエキスパートで開発をリードしており、桜井研究員が実験室で様々な測定をしています。反射光学系については素材や検証計画の検討を菅井准教授が中心になって行っています。さらに片山副機構長の活躍により、実験室の整備や東大の他の研究室との連携も進んでいます。もちろんコンピュータを使った研究も盛んで、特に前景放射をCMBからいかに分離するかが焦点となっています。Kavli IPMUの新しいPI(主任研究員)の一人でもある小松英一郎・マックスプランク宇宙物理学研究所長が国際チームを率いてこの重要課題に取り組んでいます。Kavli IPMUでは、ここまで述べた方々以外にも、数名の研究員と大学院生がLiteBIRD衛星の開発研究に携わっています。

おわりに

CMBの観測はこれまで二度のノーベル物理学賞に輝いていますが、原始重力波の発見は、それを超えた大成果になると言われています。なんといっても、ビッグバン以前の宇宙からの信号です! 衛星による精密観測は、発見だけでなく、超弦理論などの物理学根本法の候補をテストするという役割も担います。決して簡単ではない実験プロジェクトですが、少しでも感度を上げて、ぜひ「全ての始まり」という大いなるセンス・オブ・ワンダーを呼び覚ます問題に迫っていきたいと考えています。ご期待ください!