

# 宇宙のはじまりを見る

東京大学 まつむら ともたけ  
カブリ数物連携宇宙研究機構 松村 知岳

大学共同利用機関法人 はせがわ まさや  
高エネルギー加速器研究機構 長谷川 雅也

## 1. はじめに

我々はどこから来たのか。この素朴にも哲学的な問いは、様々な知的欲求の種となって我々を未知なるものに掻き立てます。時にそれは、歴史や考古学に目を向けたり、種の起源としてDNAなど生物や化学であったり、また地球外に目を向けて「はやぶさ」などのサンプルリターンであったり、はたまた太陽系の外にある惑星である地球系外惑星の探査であったり。こうして起源を突き詰める先は、時間を究極的に遡った宇宙の始まりであることは避けられません。光の速度は有限であることから、遠くを見ることは過去を見ることとなります。従って、我々の起源を問うときに、宇宙の始まりを観測しようと思うことは自然なことです。また面白いのは、宇宙の始まりに目を向けると我々の起源だけではなく物理の起源にも迫ることが分かっています。本稿では、現在世界中で進められている初期宇宙の探索について解説すると同時に、その中で日本が担っている役割を紹介します。

## 2. 初期宇宙と宇宙マイクロ波背景放射

宇宙という壮大な舞台には、私たちの目には見えない謎や秘密が隠されています。しかし、科学の力と観測技術の向上により、その一部が少しずつ明らかになってきました。ここでは、これまで約100年間での宇宙に関する理解の発展を短く紹介します。

1915年にアインシュタインが一般相対論を発見し、宇宙を数学的に記述できる様になったことは、宇宙物理学の大きな転換点でした。この理論は、重力を時空のゆがみとしてとらえ、宇宙という「箱」の「中身」である質量やエネルギーが「箱」である時空間の曲がり具合を決定するものでした。これにより、星や銀河だけでなく、宇宙全体を科学として語れる言語を獲得したことになり、宇宙全体の構造や膨張・収縮などを理論的に予測できるようになりました。

それまで、宇宙は過去も未来も静的であり変化しないと思われていましたが、1920年代後半に宇宙が膨

張している事が観測的に発見されました。エドウィン・ハッブルとジョルジュ・ルメートルによって独立に、遠くの銀河がわたしたちから遠ざかっていて、かつその速さが銀河までの距離に比例している事が示されました<sup>1)</sup>。これは宇宙が膨張しているという事を意味し、ビッグバン理論を支持する重要な証拠となりました。さらにその後、超新星爆発 (Type-Ia) の精密観測から現在の宇宙は加速的な膨張をしていることが明らかになり、その貢献に対して2011年にノーベル賞が受賞されています。

こうして、理論と観測により始まりのある宇宙像が確立されました。その宇宙の始まり、ビッグバンには何があったのか。そこで、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background Radiation=CMB) という微弱な光が登場します。これは、ビッグバンから現在にいたって宇宙全体に広がる光の残骸です。初期宇宙の高温状態から放たれた光が、宇宙の膨張によって波長が伸びてマイクロ波となったものです【図1】。この光には宇宙の初期の情報が刻まれており、微小な温度の揺らぎから宇宙の構造や密度の不均一性を読み取る事ができます。

## 3. 観測で確立する精密標準宇宙論

私たちの宇宙に対する理解は、CMBの性質が明らかになるたびに深まってきました。まさに宇宙の研究はCMB観測の歴史と言えます。ここではCMBの発見から最近の観測結果まで、特に我々の宇宙の理解を一変した結果を中心に紹介します。

### 3.1 CMBの発見

CMBは1964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<sup>2)</sup>。彼らは天体観測のための電波望遠鏡の調整中に謎の電波ノイズを見つけます。最初は人工の雑音と思ってがんばって排除しようとしたのですが全く排除できず、調査の結果、宇宙のあらゆる方向からふりそそいでくる電波である

事を突き止めました。これがCMBの発見です。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150 GHz（波長で2ミリ程度）を中心とした黒体放射の分布に従っています。宇宙が誕生して38万年たったところに、それまでバラバラに存在していた陽子と電子が結合して水素原子になるという大きな変化がおこり、以後光は電子と衝突せずに宇宙空間を伝わる事ができるようになります。これは「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光がCMBです。晴れ上がりのCMBの温度は約3000 Kです（以下、温度はすべて絶対温度ケルビン「K」で表すこととします）。一方ペンジアスとウィルソンが観測したCMBは数Kでした。温度が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。この解釈以外にCMBを説明することができないため、CMBの存在そのものが、ビッグバンの決定的な証拠であるとされています。2人はその業績で1978年ノーベル物理学賞を受賞しました。

### 3.2 COBE衛星による温度揺らぎの発見

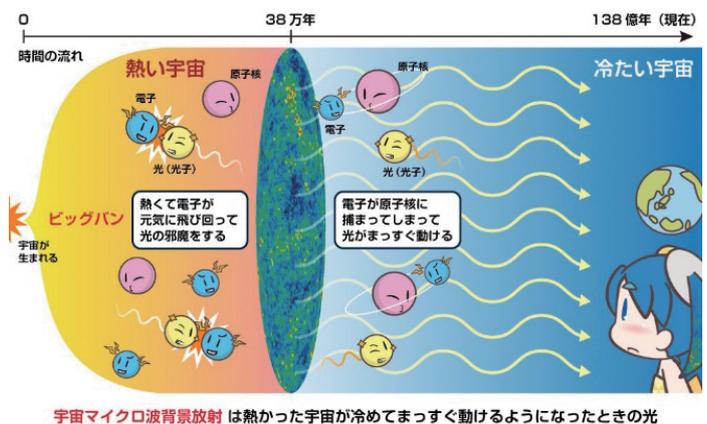
CMBは長らく全天から一様に降り注いでいると考えられてきましたが、降り注ぐ方向によってほんのわずかな強度が違うことがCOBE衛星（Cosmic Background Explorer）の観測で明らかになりました。これはCMBの温度揺らぎの発見、として知られており、実験の代表者であるジョージ・スムートはこの功績によって2006年にノーベル物理学賞を受賞しました。彼らが発見した温度揺らぎは大きさにすると10万分の1という微弱なもの（富士山の山肌に数センチの凸凹を見つけるぐらい小さい）ですが、これが、今私たちが夜空を眺めて見える星や銀河の種である事が分かっています。

### 3.3 温度揺らぎを読み解く

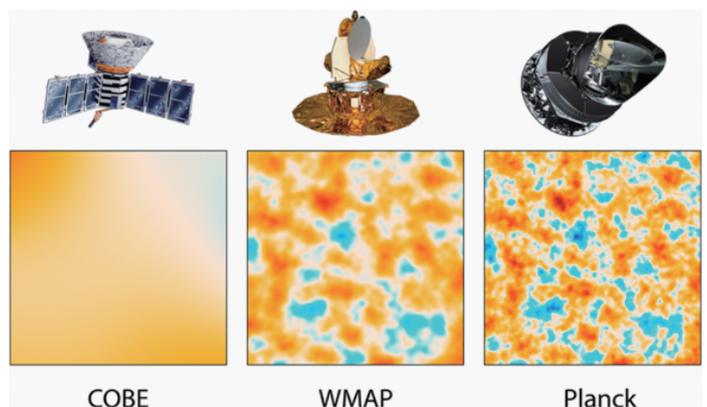
COBE衛星の成功は、その後、地上実験や気球実験によっても裏付けられました。その中でも、南極で行われた気球実験BOOMERanG（Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics）や米国の気球実験MAXIMA（Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array）は、温度揺らぎの典型的な大きさが視直径で $\sim 1^\circ$ である事が示されました<sup>3,4</sup>。実は温度揺らぎの大きさ

については、宇宙の曲率をパラメータとして理論的に予想する事ができます。これらの実験で確認された $1^\circ$ と言う大きさは、ちょうど宇宙が平坦な時の予想値と一致するため、宇宙は曲率が、ほぼゼロ、である事が分かりました。

続いて、2000年代にWMAP衛星（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe）が、2010年代にはPlanck衛星がCMBの温度揺らぎをさらに精密に測定をしました。特にPlanck衛星ではCOBE衛星の実に約100倍細かい温度揺らぎまではっきりととらえています【図2】<sup>5,6</sup>。ここまで細かい温度揺らぎを測定できると、単に典型的な揺らぎの大きさを見るだけではなく、いくつかの特徴的な大きさの揺らぎを観測する事ができます。それらの揺らぎの大きさから、宇宙の年齢や組成を知る事ができます。Planck衛星の結果から、我々の宇宙はみなさんが理科の授業で習う様な原子や分子などの“普通の物質”ではなく、ほとんどがダークマター・ダークエネルギーと言った、最先端の物理でもまだ解明されていない謎の物でできている事が分かっています。



【図1】宇宙マイクロ波背景放射（Credit ひっぐすたん）



【図2】COBE, WMAP, Planck衛星の温度揺らぎ測定（Credit: NASA/JPL-Caltech/ESA）

## 4. CMB研究のこれから

### 4.1 新たなチャレンジ、偏光観測

ここまでは主に CMB の温度（光の強度）について述べてきました。光には波長や強度以外にもう一つ“偏光”と呼ばれる情報があります。光は波打ちながら飛んでいますが、振動方向がある特定の方向に制限されている状態を光が（直線）偏光している、といいます。詳しくは次で述べますが、CMB の偏光の情報を詳細に調べる事で、ビッグバン以前の宇宙、特に宇宙がどのようににはじまったのかが分かると期待されています。

期待される偏光信号の強度は、温度揺らぎと比べて 1/10 程度以下であるため、観測は格段に難しくなります。これまでと同じセンサーを使ってはとても実験にならないため（単純に 100 倍以上の観測時間が必要になってしまうため）、最近の CMB 実験では超伝導センサーと呼ばれる超高感度な（1 秒間の測定で  $10^{-18}$  ワット＝身近にある 100 W 電球の 1 億分の 1 の 1 兆分の 1、の光が検出できる）センサーを使用しています。筆者たちは、CMB 観測をするかたわら、より高感度なセンサーとその性能を最大限発揮するための赤外線フィルターや半波長板などの最先端のミリ波光学素子を日々実験室で開発しています。

### 4.2 偏光観測で分かる事

#### ・インフレーション

CMB の強度がなぜ全天にわたって（10 万分の 1 の温度揺らぎをのぞくと）一様なのか？ なぜ宇宙が平坦なまま 138 億年も存在しているのか？ といった宇宙の精密さを自然に説明する仮説として、1970 年代初頭に佐藤勝彦氏らが、宇宙が誕生直後に指数関数的に膨張したとするインフレーション理論を提唱しました。インフレーションが本当に起こっていたとすると、CMB に B モードと呼ばれる渦巻き状の偏光パターンがあらわれると予想されています【図 3】。したがって逆に B モードを検出する事でインフレーション理論を実証することができます。これまで筆者達が参加していた BICEP 実験・QUIET 実験・POLARBEAR 実験といった地上実験でもインフレーション由来の B モードを探してきましたが、まだ見つかっておらず、現在 B モードの強度に 0.03 という制限がついています<sup>7)</sup>。この後述べる LiteBIRD 計画では B モードを 0.001 まで追いつめる予定です。インフレーション理

論にもいろいろなバリエーションがありますが、有力な理論の一つは B モードの強度を 0.004 程度と予想しているため、LiteBIRD の感度で十分検証が可能と期待されています<sup>8)</sup>。

#### ・ニュートリノ質量

物質を構成している最小の単位である粒子を素粒子と呼びますが、その一つにニュートリノという謎の粒子があります。どんな物でもすり抜けてしまうためなかなか捕まえる事ができず（幽霊粒子と呼ばれる事もあります）性質が完全に解明されていません。2015 年にノーベル物理学賞を受賞した梶田氏らの業績によりニュートリノが質量を持つこと（質量の下限値）は分かりましたが、まだ質量の値そのものは分かっていません。実はニュートリノの質量は、すごく細かい B モード信号強度を減少させるという働きがあるため、逆に減少の具合からニュートリノの質量を測定する事ができます。次世代の CMB 地上偏光観測実験では感度的に質量の下限値まで探索する事ができる（つまり質量の値が決定できる）と期待されています。

#### ・宇宙論的複屈折効果

ダークマターの候補としてアクシオン様粒子 (Axion Like Particles=ALPs) 等の新しい素粒子が提案されています。ALPs が暗黒物質として宇宙に満ちていると、あたかも宇宙が複屈折性をもつ物質（たとえば光学素子の半波長板）の様に働き CMB の偏光方向を変える事が予言されています【図 4】。従って、逆にこの変化をとらえる事で ALPs を検出する事ができると期待されています。ALPs は現在世界中で様々な実験が探索をしていますが、CMB はその中でも特に軽い質量領域での探索ができるためユニークな研究になっています。2020 年には、日本人の研究者（南氏と小松氏）が CMB 観測にて ALPs の兆候を指摘し、その後まだ確認または棄却されるに至っていません<sup>9)</sup>。今後の高い精度による観測によりこの兆候の検証が行われるため、世界中の研究者が注目しています。

### 4.3 将来観測

CMB 観測は、今後も地上・気球・衛星実験がそれぞれの長所を生かして進展していく事が期待されています。筆者達は、POLARBEAR 実験の後継実験であるチリ・アタカマ高地での Simons Observatory 計画を推進しつつ、2030 年頃の打ち上げを目指して LiteBIRD 衛星計画の準備を進めています。

#### Simons Observatory 計画

Simons Observatory は 2016 年から準備を開始している国際大型プロジェクトで、インフレーションの検証に特化した小型の望遠鏡 (SAT) を 3 台とニュートリノ質量等に特化した大型の望遠鏡を 1 台、の望遠鏡“群”によって B モードを 0.003 まで探索する事を目標としています。その中で日本チームは SAT 望遠鏡・観測機器の較正装置・データ解析などを担当しています。現在チリ・アタカマ高地での建設作業が着々と進んでおり、まもなく観測を開始する予定です【図 5】<sup>10)</sup>。

### LiteBIRD 衛星計画

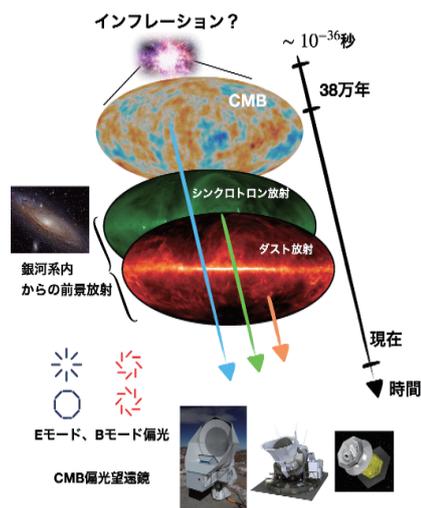
LiteBIRD は 2020 年代後半の打ち上げを目指す世界で唯一の衛星計画です。Simons Observatory などの地上からでは得られない全天観測により、さらに高い感度で観測することを目指しています。JAXA 宇宙科学研究所が進める戦略的中型科学衛星 2 号機として日本を中心に北米や欧州の研究者が結集し、その実現に向けて日々研究を進めています。特に、日本チームは搭載される 3 つの望遠鏡の中の一つである低周波望遠鏡 (LFT) を担当しており、筆者たちも実験の成否の鍵を握る様々な装置 (超伝導センサー・超伝導磁気軸受を用いた偏光変調装置等々) の開発や観測装置の精密較正を担当しています【図 6】。

## 5. おわりに

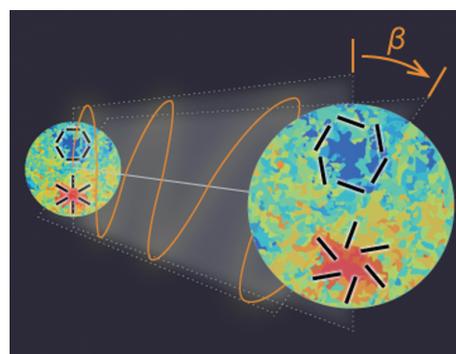
本稿では、CMB 観測を通して明らかになってきた宇宙の姿と、熱いビッグバンの前をのぞいて宇宙の始まりに迫るといふ最新の実験計画について紹介しました。いまや CMB 実験も一つの国では手に余るぐらいの規模となり国際協力による推進が不可欠ですが、日本チームは、その中でも機器の開発からデータ解析まで、まさに実験の最前線で活躍をしています。その中では、様々な大学の物理・天文学科の大学院生や研究員が大活躍しています。自分たちで手がけた装置で宇宙の始まりまで紡ぐそのプロセスは、非常にロマンに溢れています。日本発の世紀の大発見一番乗りを果たしたいと思いますので、どうぞご期待ください。

### 【参考文献】

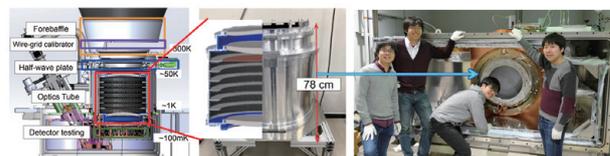
- 1) E. Hubble, PNAS March 15, 1929 15 (3) 168-173
- 2) A. A. Penzias and R. W. Wilson, Vol. 142, pp. 419-421, July 1965.
- 3) P. de Bernardis et al., Nature, Vol. 404, No. 6781, pp. 955-959, Apr 2000.
- 4) S. Hanany et al. ApJ, Vol. 545, No. 1, pp. L5-L9, Dec.
- 5) Bennett, C.L., et al., 2013ApJS...208...20B.



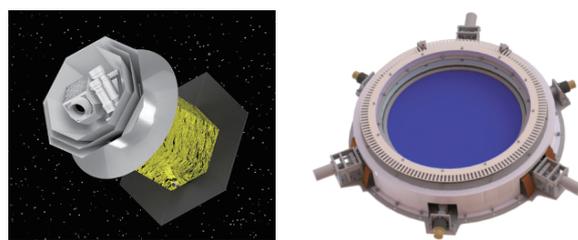
【図 3】インフレーションと CMB 偏光パターン



【図 4】宇宙論的複屈折効果で CMB の偏光方向が変わる様子の模式図 (Credit: Y. Minami/KEK)



【図 5】SAT の模式図 (左) と日本チームが開発した光学筒 (中央) と冷却試験時の様子 (右)



【図 6】LiteBIRD 衛星の外観図 (ISAS/JAXA) (左) と筆者 (松村) が責任者として開発を主導する偏光変調器の模式図 (右)<sup>11,12)</sup>

- 6) Planck collaboration, A&A, Vol. 641, September 2020.
- 7) D. Kaneko et al., Journal of Low Temperature Physics volume 199 pages 1137-1147 (2020).
- 8) LiteBIRD Collaboration, PTEP, Vol. 2023, Is 4, April 2023, 042F01.
- 9) Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 22, 221301.
- 10) P. Ade et al. JCAP Vol. 2019 February 2019. Peter Ade et al. JCAP02 (2019)056
- 11) <https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/future/litebird.html>
- 12) Yuki Sakurai et al., Proc. SPIE 11453, 114534E