

# 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

## 1 はじめに

宇宙には非常に多くの星や銀河が存在して光を放っています。しかしそれに加えて、どの天体から放たれたでもない光が太古の昔から満ちているをご存じでしょうか。これは**宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, 以下略して CMB)** と呼ばれ、発見以来宇宙の起源や性質についての非常に重要な情報源となってきました。現代の宇宙論における豊富な知見はほとんど CMB の観測なしには得られなかったと言っても過言ではありません。このポスターでは CMB のメカニズムやその観測から分かる興味深い事実について紹介していきます。

## 2 CMB とは何か？

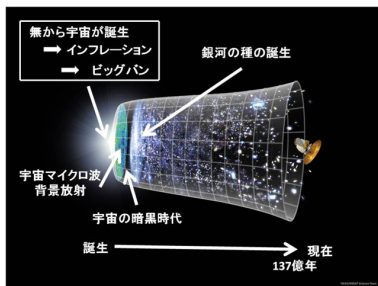


図 1: 宇宙の歴史

CMB は宇宙誕生から 38 万年後に起きた「**宇宙の晴れ上がり**」という現象に伴って放出された光です。それまでの宇宙は高温高密度で、原子は全て原子核と電子に分かれて飛び回っていたため、光は電子と衝突して直進できず、宇宙は不透明な状態でした。ところが宇宙が膨張して冷えていくにつれ、原子核が電子を捕獲し始めたため、

光は衝突から解放されて直進するようになり、宇宙は遠くまで見渡せるようになりました。この現象を宇宙の晴れ上がりといい、この時に解放された光が CMB となって今も私たちの上に降り注いでいるのです。

## 3 CMB 観測の結果

### 3.1 ビッグバンの証拠

CMB には様々なエネルギーを持った光が含まれているのですが、その分布は図 2 のようになっており、**2.725 K<sup>\*1</sup>の黒体放射分布**に見事に一致しています。黒体放射分布とは、ある温度を持った高密度の物質と相互作用している光のエネルギー分布のことです。しかし現在の宇宙は低密度で、CMB は物質とほとんど相互作用しません。にも関わらず図 2 のような分布が見られることは、2 章で紹介したようなかつての宇宙が非常に高密度であったことを示しています。このことは、宇宙がかつて小さな火の玉で、徐々に膨張して今の姿になったという**ビッグバン宇宙説の強力な証拠**となっています。

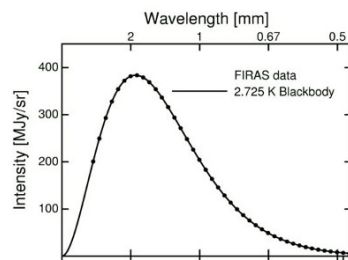


図 2: CMB のエネルギー分布。横軸が光のエネルギー、縦軸が強度を表す。点が観測データで、曲線が 2.725 K の黒体放射分布の理論値。

ちなみに光が物質と相互作用していた時代の最後、つまり晴れ上がり直前

の宇宙の温度は 3000 K ほどでした。なので普通に考えれば CMB は 3000 K の黒体放射分布にしたがうはずです。なのになぜ CMB の現在の温度が 2.725 K なのかというと、宇宙膨張により光の波長が徐々に伸び、エネルギーが低くなって温度が下がっていったためです。

### 3.2 宇宙の一樣等方性

CMB は全方向から地球に向かって降り注いでいるわけですが、その温度はどの方向を向いても約 2.725 K で、驚くほど一樣等方であることが分かっています。図 3 は全天で CMB の温度を観測した結果で、色は 2.725 K からのずれ (これを**温度ゆらぎ**という) を表しており、このずれは 2.725 K の 10 万分の 1 という非常に小さい値です。このことは、宇宙がどの場所でも同じような構造や性質を持っていること、すなわち**宇宙の一樣等方性**の根拠となっています。またこの一樣等方性は、爆発によって宇宙が始まったとする既存のビッグバン宇宙説では説明できないことが知られており (宇宙の地平線問題・平坦性問題)、爆発の前に宇宙が急激に加速膨張した時期 (**インフレーション**) が存在したことを示唆しています。

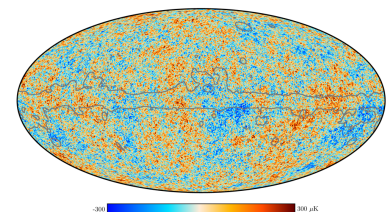


図 3: Planck 衛星による CMB の温度ゆらぎの全天マップ。色の違いは 2.725 K からの温度のずれを表している。

\*1 K[ケルビン] は温度の単位。絶対零度を 0 K とし、日本で一般に使われるセ氏温度とは  $t [K] = (t - 273) [^{\circ}C]$  という変換をする。

しかし温度ゆらぎは完全に0ではありません。この微小なずれは決して無視すべきものではなく、宇宙の性質を解き明かす上で非常に重要な役割を果たしていることを次節で紹介します。

### 3.3 宇宙論パラメーター

そもそも CMB はなぜ微小な温度ゆらぎを持っているのでしょうか？実はこの温度ゆらぎは、宇宙の晴れ上がり時の物質密度のむらを反映しているのです。<sup>\*2</sup>物質密度が高かったところほど CMB の温度は低くなります。<sup>\*3</sup>そしてこの物質密度のむらは時間とともに成長し、高密度領域では星や銀河が次々と誕生することで、現在見られる**宇宙の大規模構造**を形成してきました。したがって CMB の温度ゆらぎを観測することは、すなわち現在の宇宙の多様で複雑な姿を生み出した原因を直接見ていることになるのです。

次に温度ゆらぎの観測から分かることを具体的に見てみましょう。図3の温度ゆらぎを見ると、場所によって模様が粗かったり細かったり、不規則に見えることが分かります。しかしこの温度ゆらぎは実は、さまざまな細かさの規則的なゆらぎ（例えば幅が均一な縞模様など）を重ね合わせることでできているのです。どんな細かさのゆらぎがどれほどの強さで重ね合わされているかを表したのが図4で、これを**CMB 温度ゆらぎのパワースペクトル**

ルといいます。このパワースペクトルの形を見ることで、宇宙のさまざまな性質が分かります。

有名なものを挙げると、**宇宙年齢**（138 億年）や、**宇宙のエネルギー組成比**（通常物質が5%、ダークマターが25%、ダークエネルギーが70%）は CMB 温度ゆらぎの解析から明らかになったものです。<sup>\*4</sup>他にも、現在の宇宙の膨張率を表すハッブル定数  $H_0$ 、物質の粗密のむらの大きさを表すパラメーター  $\sigma_8$  などが得られています。

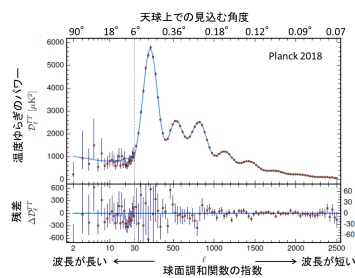


図4: CMB 温度ゆらぎのパワースペクトル。横軸がゆらぎの細かさ、縦軸が強さを表す。

## 4 残された謎

このように数々の重要な情報をもたらしてきた CMB ですが、依然として分からない部分も残されています。例えば先ほど挙げた  $H_0$  や  $\sigma_8$  といったパラメーターは CMB 観測以外の方法<sup>\*5</sup>でも測定されているのですが、それらの値と CMB 観測で得られた値が一致しないことが知られています。これが単に測定方法の不十分さによるも

のでないとするれば、現在の私たちの宇宙進化に関する理解に何らかの欠陥があり、**未知の物理**が存在している可能性があります。現在、この値の不一致については世界中の研究者が精力的に検証を進めている最中です。

また CMB の温度だけでなく、偏光（光の振動方向の偏り）を測定することでさらに多くのことが分かると期待されています。特に **B モード**と呼ばれる種類の偏光を観測できれば、先ほども触れたインフレーションの存在証明になると言われており、世界中で観測の準備が進められています。日本はその最先端を走っており、現在 JAXA が B モード観測のための **LiteBIRD** という観測衛星を 2032 年の打ち上げを目指して開発中です。宇宙の本当の始まりが解き明かされる日は、そう遠くないかもしれません。

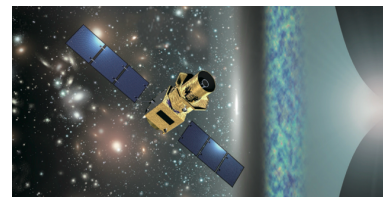


図5: CMB 偏光観測衛星「LiteBIRD」

## 参考文献

- [1] 小松英一郎. 『宇宙マイクロ波背景放射』. 日本評論社 (2019).
- [2] S.Weinberg. 『ワインバーグの宇宙論 (上)』. 日本評論社 (2013).

<sup>\*2</sup> 正確には、晴れ上がり後に重力波などの影響で若干の変更を受けます。

<sup>\*3</sup> 逆じゃないの？と思う方が多いと思いますが、間違いではありません。物質密度が高かったところでは、最初はもちろん CMB の温度も高いのですが、その後 CMB が高密度領域を抜けて外側へと伝播する時に重力ポテンシャルの谷底から抜け出すことになるため、一般相対論の効果により光の波長が伸びてむしろ温度が下がってしまうのです。

<sup>\*4</sup> ダークマターとは、目に見えずその正体がほとんど分かっていない物質のこと。銀河の回転速度の観測などから、その存在自体はほぼ確実となっている。ダークエネルギーとは、同じく正体が明らかになっていないエネルギーのこと。こちらは宇宙の膨張速度などからその存在が示唆されている。

<sup>\*5</sup> ハッブル定数  $H_0$  は遠くの銀河の距離と後退速度を測定することによっても求められます。また  $\sigma_8$  は、地上の望遠鏡によって直接物質の粗密のむらを観測することでも求められます。