

1. 宇宙背景輻射の発見

現在、約 137 億年前の宇宙初期に発せられた光が観測によって捉えられている。現在の観測者からみれば、この光の波長は約 1.1 mm であり、可視光よりも波長の長いマイクロ波である。このマイクロ波は、ペンジャースとウィルソンによって 1964 年に最初に発見された。彼らは、当時所属していたベル研究所において、新型アンテナを用い、人工衛星と宇宙通信の研究に従事していた。その研究中、アンテナにどうしても除去できない雑音が常に感知されることに気付いた。その後、彼らによる詳細な調査により、これは雑音ではなく、約 3K の温度の黒体輻射であることが明らかになった。このパワースペクトルは、マイクロ波が主成分であった。このマイクロ波は宇宙のあらゆる方向から観測され、それらはほぼ同様のパワースペクトル上にあることがわかった。現在では、このマイクロ波は、一般に宇宙背景輻射とよばれている。しかしながら、この宇宙背景輻射がどこから来たのかは、当時、不明であった。さらに、宇宙背景輻射が宇宙のあらゆる方向に対して観測され、かつその温度がほぼ一定（約 3K）であることは、大きな謎であった。

2. ビッグバン仮説にもとづく予言

宇宙背景輻射が発見された当時、実はその存在はガモフによって以前より理論的に予言されていた。ガモフはビッグバン仮説¹⁾にもとづき、宇宙をほぼ一様かつ等方に満たす約 5K の黒体輻射スペクトルをもつマイクロ波の存在を提唱していた。このマイクロ波の特徴は、観測された宇宙背景輻射のものとはほぼ一致していた。そのため、宇宙背景輻射の存在は、ビッグバン仮説の正しさを強く裏付けることとなった。

ビッグバン仮説によれば、宇宙初期は高温状態で、空間は点のように非常に小さなスケールとなっ

ており、その後、爆発的に膨張し続けているとされる。このとき、宇宙背景輻射は宇宙初期において高温の熱平衡状態にあり、膨張し続ける宇宙空間を通過して現在の観測者に届いていると考えられる。ここで、宇宙が膨張している間、宇宙背景輻射の波長は伸び続けるため、観測者は初期の波長よりも長い波長の宇宙背景輻射を捉えることになる。このことは赤方偏移として知られている²⁾。波長が伸びると、それに対応するエネルギーも小さくなる。それゆえ、宇宙背景輻射の温度は、宇宙初期には高温でも現在は十分に冷え、数 K 程度の低温になると考えられる。また、宇宙背景輻射は、宇宙初期の熱平衡状態における同一のパワースペクトルをもって等方的に広がったと考えられる。

以上より、発見当時は大きな謎であった宇宙背景輻射の起源と等方向性が、ビッグバン仮説により矛盾なく説明できることになる。

3. 宇宙背景輻射の温度ゆらぎ

先に、宇宙背景輻射はほぼ等方的であると述べた。しかしながら、宇宙背景輻射の温度は観測方向によってわずかながら変動することが、その後のさまざまな観測によって明らかになっている。このわずかな変動は、一般に温度ゆらぎとよばれている。実は、この温度ゆらぎも、ビッグバン仮説にもとづいた詳細な理論計算によって予測される。そして、その温度ゆらぎにこそ、宇宙の姿に関する重要な痕跡が残っている。

宇宙初期において、空間スケールが非常に小さいとき、量子論の基本原則である不確定性原理によって、エネルギーの大きさは不確定になる。それゆえ、宇宙背景輻射が完全に熱平衡状態にあったとしても、その光のエネルギーは空間のさまざまな場所において変動すると考えられる。それゆえ、宇宙背景輻射の温度には、観測方向が異なれば、わずかな

違いが生じると考えられる。これが温度ゆらぎであり、その変動幅は0.01%程度と理論的に計算されている。つまり、宇宙背景輻射をさまざまな方向に対して観測する場合、温度の平均値が3Kだとすれば、 $\pm 0.0003\text{K}$ を変動幅とする温度ゆらぎをもつことになる。

温度ゆらぎは、宇宙背景輻射が現在の観測者に到達するまで、さまざまな影響を受ける。そして、その時系列変化は、膨張速度、宇宙を構成する物質の組成比などに大きく依存する。そのため、温度ゆらぎを観測することによって、それらの情報の重要な手がかりをつかむことができる。そこで、今までに、温度ゆらぎの観測が世界で盛んに行われてきている。

4. 温度ゆらぎの観測

温度ゆらぎの観測手段としておもなものには、ラジオメーターを搭載した観測衛星を用いるもの、地上に設置された電波干渉計を用いるものがある。特に観測衛星を用いたものは、広範囲の温度ゆらぎを精度よく観測することに成功している。その中で、観測衛星 COBE が1989年にNASAによって打ち上げられ、約4年にわたる観測の後、温度ゆらぎを全天にわたって観測することに初めて成功した。その後、観測衛星 WMAP (NASA) が2001年に打ち上げられ、2009年には観測衛星 PLANCK (ESA) が打ち上げられている。図1に、WMAPで観測された温度ゆらぎを示す。

ビッグバン仮説にもとづく現在の宇宙モデルのもとでは、観測衛星 WMAP からもたらされた温度ゆらぎのデータから、宇宙の年齢は 137 ± 2 億年と算出されている。また、宇宙の膨張速度を示すハッブル定数も算出されている。さらに、宇宙の物質の組成比なども算出されているが、驚くことに、宇宙はダークマターやダークエネルギーといった直接観測

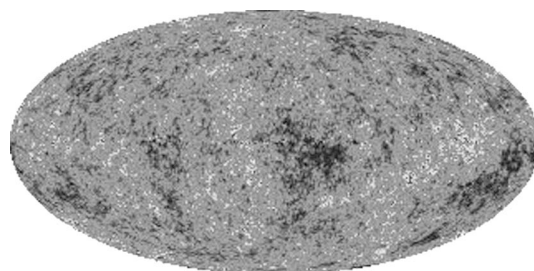


図1 WMAPによって観測された全天の宇宙背景輻射の温度ゆらぎ (Credit NASA/WMAP Science Team). 高温が赤色で、低温が青色である。温度ゆらぎの最大・最小は $\pm 200 \mu\text{K}$ 。(オリジナルのカラー画像はNASAのwebページ <http://map.gsfc.nasa.gov/media/101080/index.html> に公開されている。)

が困難な物質によって約96% (エネルギー比) が占められていることがわかった。

今後、観測精度がより向上し、角度分解能や感度が高くなると、より小さなスケールの構造 (銀河団や銀河など) に対しても、重要な知見を得られると期待される。また、宇宙背景輻射はわずかながら偏光していると考えられている。この偏光には、原始重力波³⁾ や、原始磁場⁴⁾ に関する痕跡が刻まれている可能性が高い。そこで、その偏光を測ることにより、いままで見えなかった宇宙の全体像が明らかになると期待されている。

((株) 東芝 大野博司)

文 献

- 1) G. Lemaitre: "Expansion of the universe, The expanding universe," *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **91** (1931) 490-501.
- 2) P. J. E. Peebles: *The Large-Scale Structure of the Universe*, 1st ed. (Princeton University Press).
- 3) M. Kamionkowski, A. Kosowsky and A. Stebbins: "A probe of primordial gravity waves and vorticity," *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997) 2058-2061.
- 4) K. Ichiki, K. Takahashi, H. Ohno, H. Hanayama and N. Sugiyama: "Cosmological magnetic field: A fossil of density perturbations in the early universe," *Science*, **311** (2006) 827-829.