

宇宙はどのように始まったか?

宇宙を満たすビッグバンの余熱、CMBR

宇宙はどのように始まったのだろうか? 宇宙誕生の時に何がおきたのだろうか? 何もないところからどのようにして銀河や星や惑星のような多様な構造が出現したのだろうか? このような疑問は、人類が何千年にもわたり問い続けてきたものであるが、宇宙誕生の最初の瞬間におきた物理現象を、我々は今や直接観測することができるのである。

光は有限の速度で進むため、我々が遠くの宇宙を観測することは実は宇宙の過去の姿を観測していることになる。太陽から地球に光で8分かかるので、我々は太陽の8分前の姿を観測していることになる。木星なら30分前、近傍の恒星なら5年ないし100年前の姿を見ているのである。すばる望遠鏡が遠方銀河を観測する場合は、120億年前にその銀河から出た光を見ているのである。

宇宙の性質の観測と矛盾しないアインシュタインの一般相対性理論に基づく宇宙模型は、現在の宇宙が137億年前に誕生したことを示している。現在の宇宙は「ビッグバン」の余熱である「宇宙マイクロ波背景放射 (CMBR)」で満たされている。CMBRの現在の温度は絶対温度で僅か3度であるが、宇宙がもっと若かった時代にはCMBRはもっとずっと熱かった。

ビッグバンから38万年後、CMBRの温度は現在の太陽表面の温度のおよそ半分、絶対温度で3,000度であった。この温度ではCMBRは十分熱く、宇宙の水素の大部分を電離することができ、宇宙空間は電子と

陽子の濃密なプラズマで満たされていたことになる。CMBRはこの厚い霧をまっすぐ通り抜けることができないので、この厚い霧から放たれたCMBRは、我々が見ることのできる最も遠い宇宙の過去の姿ということになる。

過去15年間、私はウィルキンソン・マイクロ波異方性探査衛星 (WMAP) によって観測されたCMBRの温度の微小な揺らぎの解釈に焦点を当てて研究を行ってきた。WMAPはNASAの人工衛星であり、地球から見て太陽と反対方向で月までの距離の4倍の位置のところで太陽の周りを(地球と同じ周期で)公転し、CMBRを精密に観測している。

簡単な宇宙模型が宇宙論データを説明できる

我々の観測は、CMBRの温度揺らぎのパターンがたった5個の基本的数値、つまり宇宙の年齢、宇宙の平均原子密度、宇宙の平均物質密度、宇宙の密度の揺らぎの振幅、および揺らぎの振幅の空間スケールに対する依存性、で特徴付けられる非常に簡単な宇宙模型と一致することを見出した(図2参照)。この模型は我々のデータに良く合うだけでなく、同じパラメータでスローン・デジタルスカイサーベイによる銀河分布の大構造、すばる望遠鏡による銀河の重力レンズ効果、ハッブル宇宙望遠鏡による超新星とセファイド型変光星の両方を用いた宇宙の膨張速度などを含む多数の天文観測結果を合わせることができる。

この簡単な宇宙模型は、我々の宇宙が現在の多様な

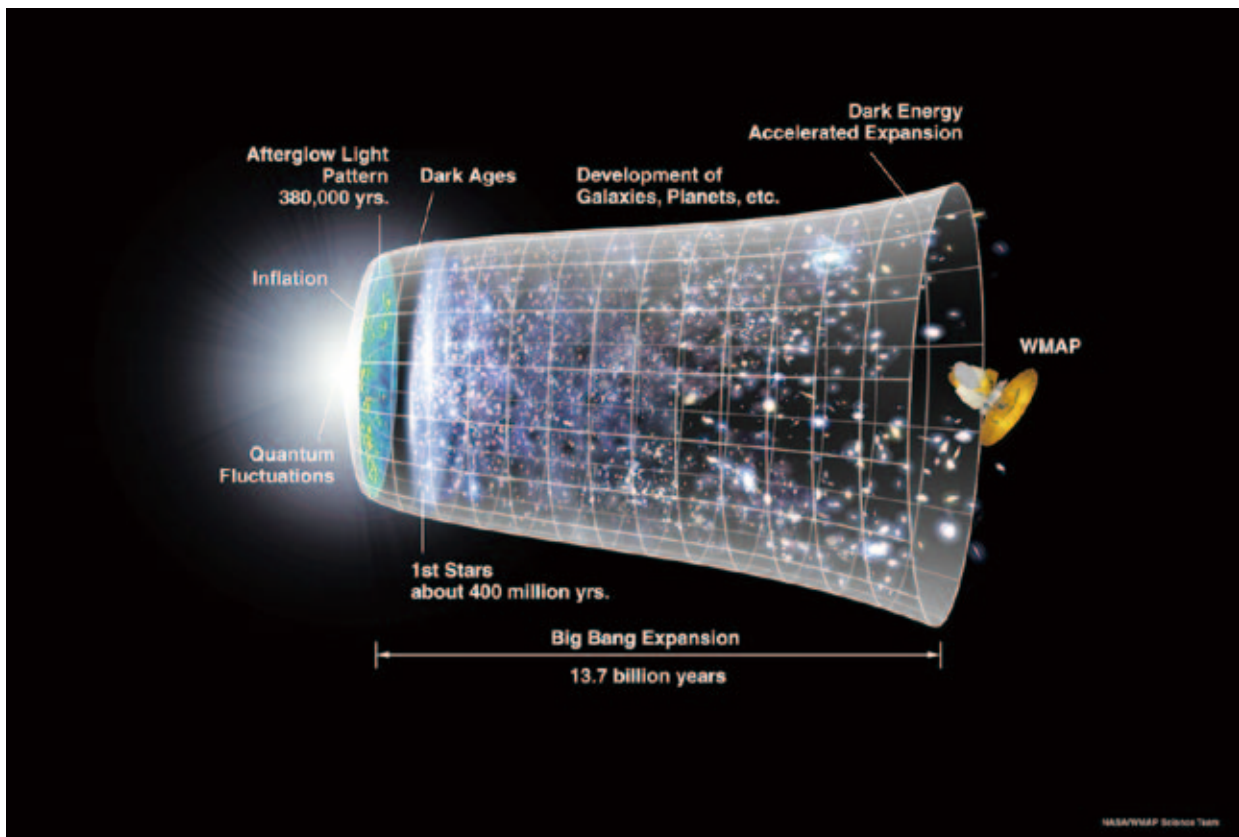


図1 膨張宇宙の歴史を示すイメージ図 (WMAP科学チームによる)

構造を有するに至る進化を定量的に記述するだけでなく、素粒子理論で宇宙の始まりを記述する着想から生じた「インフレーション理論」をテストすることにより、宇宙の誕生時についての知見を与えてくれる。

1980年代初期に強い相互作用と電磁相互作用の統一を研究していた物理学者たちは、どのような統一理論のモデルも衝撃的な宇宙論的予言を与えることを認識していた。非常に高温の初期宇宙は、モノポールと呼ばれる重い粒子を大量に生み出す可能性があることである。これらのモノポールは現在の宇宙を完全に支配する可能性があり、この予言は観測された宇宙の性質とは明らかに食い違っていた。このモノポール問題に対して、佐藤勝彦、アラン・グース、アンドレイ・リンデ、ポール・シュタインハルト、およびアンドリュウ・アルブレヒトがつぎのような解答を見出した。もし初期宇

宙が相転移を起こせば、真空のエネルギーによって引き起こされる「インフレーション」と呼ばれる急激な膨張を宇宙が経験した可能性があるというアイデアである。このインフレーション膨張は宇宙のモノポールの密度を薄め、統一理論を観測結果と一致させることができた。

80年代、インフレーション理論は検証不可能な机上の空論と思われていた

インフレーションモデルは素粒子物理学者のモノポール問題を解決しただけでなく、幾つかの宇宙論的問題をも解決した。この急激な膨張は、なぜ宇宙の異なる領域が良く似た物理的性質を有するのか、また宇宙はなぜこんなに大きいのか、説明できるであろうと考えられる。

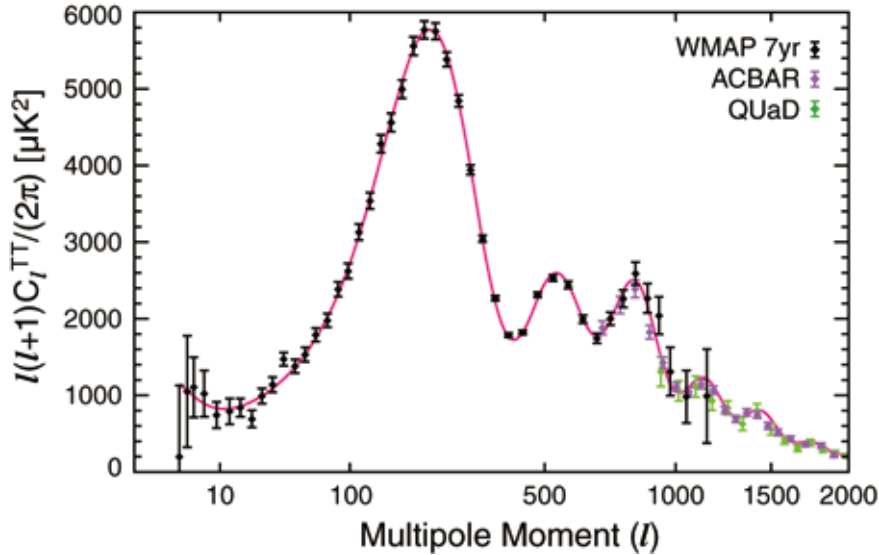


図2 この図 (Komatsu et al. 2010) は温度揺らぎの振幅を角度スケールの関数として示している。赤い線は我々の最も良く合う宇宙模型の計算結果を、データ点はWMAP、QUAD、およびACBAR実験の結果を示す。(訳注：QUAD実験とACBAR実験は、南極点に置かれた観測装置で地表からCMBRを精密に観測する実験。)

インフレーション模型は、普遍的に次のような宇宙の性質を予言する。

- インフレーションは宇宙の大きさを引き延ばしたため、**宇宙の幾何学はほとんど平坦と考えられる。** (つまり、時空の幾何学は誰もが10代の時に習い、よく知っているユークリッド幾何学と考えられる。)
- 宇宙の異なる領域では、インフレーションの程度がほんの少しだけ違っていたため、宇宙の密度に変動(揺らぎ)が生じるであろう。インフレーション模型は、揺らぎはほとんど空間のサイズによらないであろうと予言した。最も簡単なインフレーション模型では、揺らぎの分布は**統計的にランダムなガウス分布**となる。
- 宇宙の全領域がインフレーションを起こしたため、揺らぎは**断熱的**であり、電子と陽子が多く存在する

領域では光子も多く存在するであろう。

- 宇宙の膨張は物質の重力(引力)による減速だけでなく、真空のエネルギーの効果による加速も可能であろう。

1980年代に物理学者がこういった予言を行った時には、その予言は観測された世界とはかけ離れて見えた。

WMAPが検証したインフレーション模型の予言

WMAPの測定は、最も簡単なインフレーション模型によるこれらの本質的な予言を、直接的にテストした。WMAPのデータは、宇宙の幾何学が驚くほど平坦に近いことを意味しており、また、現在の宇宙が再び真空のエネルギーにより引き起こされた加速膨張の時期にあるという(主として超新星観測からの)天文

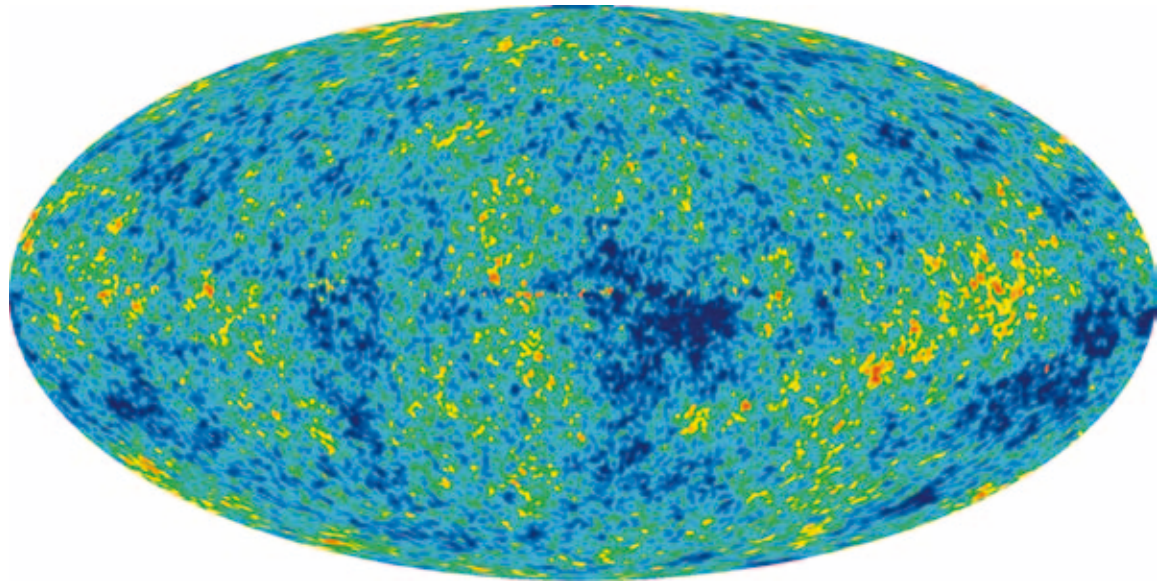


図3 WMAPの観測したCMBRの温度揺らぎの全天マップ。赤い色の箇所では、温度が青い色の領域より1万分の1度高い。

学的証拠を支持している。CMBRの基本的な揺らぎは（シルクハット型の）ガウス分布により驚くほどうまく合わせることができ、統計的にランダムに見える。温度と偏光の揺らぎのパターンも密度の変動が断熱的であったことを示しており、これはインフレーション模型の予言について、もう一つの劇的な確証を与えている。また、WMAPのデータは宇宙の膨張率が現在加速していることも確認した。

インフレーションについて、何をさらに調べることができるだろうか？ インフレーション模型は、重力波の生成によりマイクロ波の偏光の揺らぎのパターンに特徴的な信号が生じることも予言する。現在、プランク衛星および幾つかの地上実験と気球実験がこの信号を捕らえようとしている。

インフレーションは、他にも特徴的な信号を予言

するであろうか？我々がWMAPで観測したCMBRの全天マップ（図3）に、もっと情報が隠れていないだろうか？ 弦理論に基づく模型の多くを含むインフレーション模型の幾つかは、CMBRのマップに微妙な相関が存在することを予言する。10年以上前、小松英一郎さんが日本学術振興会の特別研究員としてプリンストン大学の私のもとに来て以来、私はCMBRの「非ガウス」成分を探することに興味を持ち続けてきた。IPMUにおける私の研究の一部として、この信号を観測する新しい方法を見つけ出すための努力を行っている。多くの物理学者、天文学者、数学者を擁するIPMUは、初期宇宙の物理に起源をもつ新たな信号を熟考し、見いだすための、さらには宇宙最初の瞬間を研究する我々の探求を続けるための理想的な研究所である。