ビッグバン以前を探る
——宇宙マイクロ波背景放射観測プロジェクトの立ち上げ

羽澄昌史
総合研究大学院大学教授 素粒子原子核専攻／高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所教授

**宇宙マイクロ波背景放射は原初宇宙の姿を伝えてくれる。
その発見から半世紀、より高精度な観測によって、ビッグバン以前の情報を捉えようと、
総研大で生まれたプロジェクトが、
素粒子物理学、天文学、デバイス工学、計算機科学などの多分野の協力を得て、
国際プロジェクトへと発展していった。**

はじめに

夜空にまたたく星々。なじみ深い可視光で見る宇宙。実はそれは、宇宙の姿のほんの一面にすぎない。可視光は人間の目で直接感じられる光（＝電磁波）だが、それは電磁波のほんの一部にすぎないからである。

可視光よりずっと波長が長いマイクロ波で宇宙を見ることにより、宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background：CMB）と呼ばれる「ビッグバンの残光」が発見され、人類がもつ宇宙像は一変した。本稿では、われわれが挑戦する CMB 精密観測の新しい取り組みについて述べる。

CMBを通して見る宇宙の始まり

宇宙の始まりは熱い火の玉の状態にあり、それがビッグバンとよばれる大爆発を起こした。これがいわゆるビッグバン宇宙理論である。専門家（つまり非常に疑り深いいじわるな人たち）の目から見ても、これまでのさまざまな観測結果を定量的に説明できるため、今日この理論を疑うことは難しい。遠方の銀河が遠ざかる速度（ハッブル定数）、宇宙に存在する種々の軽い元素の量、そして本稿のメインテーマである CMB は、すべて定量的にビッグバンを支持している。

ビッグバン宇宙理論を支える物理学の基礎法則は、はがき数枚程度に書けてしまうほどシンプルだ。それは、20 世紀科学の大輪の花であるアインシュタインの一般相対性理論（時空と重力の基礎法則）と、素粒子標準理論（量子論にもとづいた素粒子の種類と相互作用に関する基礎法則）である。

宇宙の始まりは、われわれ人類もふくめた森羅万象の始まりである。それがはがき数枚程度の「宇宙のルールブック」に基づいている。この真理に人類が到達したのは、20 世紀後半から末にかけてである。素粒子物理学と宇宙物理学が手をたずさえ、かつ、実験・観測・理論が三位一体となって成しとげた知的フロンティアにおける大事件だった。これに関連して、素粒子物理では優に 10 を超えるノーベル物理学賞が与えられ、宇宙物理では CMB 研究だけをとっても 2 つのノーベル物理学賞が与えられている。

ところが、宇宙の始まりについてすべてわかってしまったのかと問われたら、答えはノーである。ビッグバンの前がわからないのだ。熱い火の玉状態を作る仕組み、たとえば風船がパンと割れるのがビッグバンだとすると、その前に、風船に「息を吹き込む人」がどうしても必要なのである。

これまでの宇宙観測で、「風船のふくらみ方」が見えたわけではない。しかし、間接的な情報は得られている。その結果、宇宙観測と折り合う現時点の最有力仮説は衝撃的である。宇宙は、誕生後およそ 0.0000000000000000000000000000000001 秒（10^{-36} 秒）のころ、一瞬にして 1000000000000000000000000000000 倍（10^{28} 倍）にふくらんだとする。ふくらむ前と後では、たとえるならアメーバと銀河ほども違うのである。この仮説を「宇宙のインフレーション」と呼ぶ。

「風船のふくらみ方」について間接的な情報がある以上、これを「宇宙のルールブック」で説明しようという努力が傾けられるのは当然であろう。ところが、どうやってもこれができそうにない。それはとりもなおさず、20 世紀の叡智の結晶である「一般相対論＋素粒子標準理論」が宇宙の真のルールブックではないことを示唆しているのではないだろうか。

未知なる「宇宙のルールブック」を探り当てる理論的研究はまことに精力的である。研究の方向としては、「一般相対論＋素粒子標準理論」を導出できる究極の理論を探りあて、それを使って「風船をふくらませる」ことに成功すればよい。ミクロの極である素粒子とマクロの極である宇宙が出会う、まことに魅力的な研究領域が存在するのである。

究極の理論を探る旅は、素粒子物理学の本道である。素粒子物理学から生まれた最有力の究極理論に「スーパーストリング理論」がある。この世は、実は 10 次元時空からなるという一見「非常識」な理論であり、当然、検証不可能といわれていた。ところが驚くべきことに、「風船のふくらみ方」のより直接的な観

宇宙マイクロ波背景放射

羽澄昌史
総合研究大学院大学教授 素粒子原子核専攻／高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所教授

宇宙マイクロ波背景放射（CMB）は、1964 年（論文掲載は 1965 年）に米国ベル電話研究所のペンジャス（Arno Allan Penzias）とウィルソン（Robert Woodrow Wilson）によって偶然発見された。2 人はその業績で 1978 年ノーベル物理学賞を受賞した。その現代的解釈は以下のとおりである。

宇宙は、ビッグバンのあと膨張とともに徐々に冷えていった。ビッグバンから約 38 万年たったころ、宇宙は十分に冷えて、それまでプラズマ状態で存在していた電子と陽子が結合し、水素原子となった。光子はそれまで、電子などの荷電粒子と高い頻度で散乱（衝突）していた。しかし散乱する相手が消えたため、光（電磁波）は自由に宇宙空間を伝わることになった。これが「宇宙の晴れ上がり」である。

この自由に伝わり宇宙に満ちている電磁波の名残りが CMB である。38 万歳の宇宙の温度は約 3000K であり、その時点での CMB の温度も同じであった。ところが現在の観測では約 2.7K である。これは宇宙膨張により CMB の波長が長くなった（赤方偏移した）ためである。

1989 年に COBE（Cosmic Background Explorer）衛星が打ち上がり、地球周回軌道での観測が開始された。大気の影響がなく全天を観測できるという利点を生かし、2 つの驚くべき結果を得た。1 つは、CMB の周波数スペクトルが黒体放射の分布に従うことを示し、CMB の温度をすばらしい精度で決定（2.725 ± 0.002K）したことである。ビッグバンの決定的な証拠といってよい。

もう 1 つは、CMB の温度分布を全天にわたって測定し、約 30 μ K の温度ゆらぎ（2.7K の約 10 万分の 1 のゆらぎ）を発見したことである。これらの成果により、2006 年ノーベル物理学賞はマザー（John Cromwell Mather、NASA）とスムート（George Fitzgerald Smoot III、カリフォルニア大バークレー校）に与えられた。

2001 年には、位置分解能で COBE をはるかに凌ぐ WMAP 衛星が打ち上がり、太陽 - 地球のラグランジュ点の 1 つで観測を開始した（図）。図の右のパワースペクトルは、宇宙誕生に関する情報の宝庫である。宇宙年齢が 137 億年（誤差 2 億年以下）、宇宙のエネルギー密度の中に物質の占める割合がわずか 4% であること、残りは謎のダークマター（23%）とダークエネルギー（73%）であることなどが、ここから得られている。

光（電磁波）には、波長（色）、強度（明るさ）、偏光（振動の方向）の 3 要素がある。現在、CMB 研究のフロンティアは偏光に移りつつある。原始重力波という、ビッグバンの前に放たれた波をとらえることが期待されているからだ。CMB による宇宙誕生の研究は、濁った川面を観察して、川底がどうなっているかを理解するようなものである。川面の色や水かさを見るだけでは、川底の様子はわかりにくい。よどみや渦を含めた流れの方向を知ることで、どこに石があって流れを変えているかなど、直接見えない川底の様子がわかってくるのである。

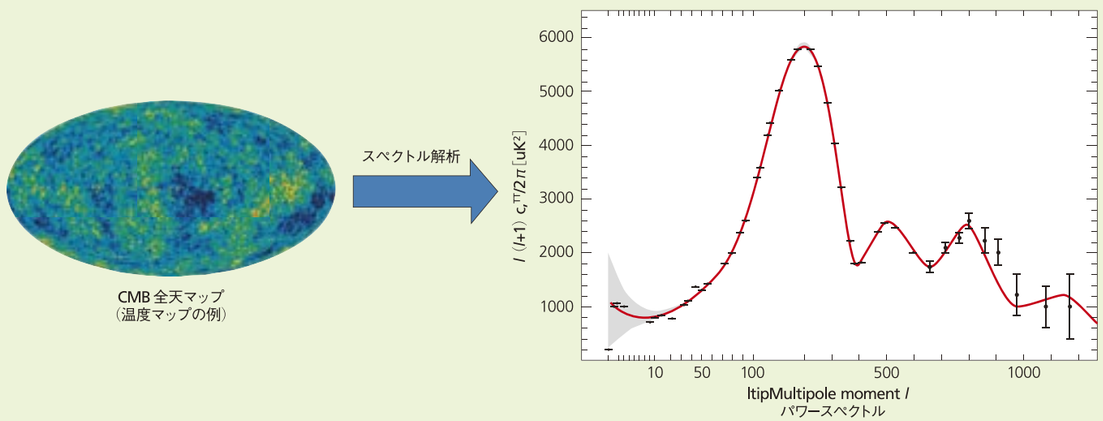

図　7 年間のデータを蓄積した WMAP の CMB 全天温度マップ（左）とパワースペクトル（右）。
パワースペクトルのデータ点と理論曲線が驚くべき一致を示している。