



# じつきょう 理科資料

NO. 62

サイエンス・プラザ

## 宇宙交響楽で明かす宇宙の謎

名古屋大学大学院理学研究科教授 杉山 直

### 1. 2つのノーベル賞

ベル研究所の天文学者、アロンゾ・ペンジラスとロバート・ウィルソンが、空のありとあらゆる方向から正体不明の電波がやってくることに気づいたのは、今から40年以上も前、1964年のことである。電波望遠鏡の性能のテストのために、あえてなんの信号も来ていないと思われる波長で空からの電波を測定したところ、どうしても消すことのできない「雑音」の存在に悩まされたのだった。隣接するニューヨーク市からのラジオの電波ではないか、あるいは当時行われていた大気圏核実験からの放射ではないか、はたまた、電波望遠鏡のアンテナに巣をつくっていたつがいの鳩のフンが原因ではないか、など1つ1つ雑音源の可能性を検討していったにもかかわらず、どうしてもその正体がつかめなかったのである。

折から、プリンストン大学のロバート・ディッケ教授率いるグループが、熱い宇宙の始まりに存在していた光を見つけようと望遠鏡を製作し観測

を始めようとしているところだった。ディッケ教授らはペンジラスとウィルソンの発見を聞いて、その正体をすぐに見破ったのである。この電波こそ、ビッグバンと後に呼ばれることになった熱い宇宙の始まりの化石である宇宙マイクロ波背景放射だったのだ。ペンジラスとウィルソンはその功績により、1978年のノーベル物理学賞を受賞した。この発見によって、宇宙の始まりにビッグバンがあったことがほぼ確定的になった。このときまで主流であった、宇宙には始まりがないという定常宇宙論は敗北したのである。

ペンジラスとウィルソンの発見は、しかしビッグバンの存在を完全に証明するものではなかった。彼らは、波長7cmというたった1つのチャンネルでの電波観測を行ったのみであったからである。

ビッグバンと呼ばれる熱くよく混じり合った状態の宇宙では、そこでの温度に対応した特有の光が存在していたことが予想される。高温なためにとても青い（波長の短い）光がそこには存在して

### ◆ も く じ ◆

サイエンス・プラザ

宇宙交響楽で明かす宇宙の謎…………… 1

トピックス

イオン液体…………… 8

ロケットとの関わり方…………… 11

授業実践

化石浪漫 クビナガリュウ発掘…………… 14

高校生へ私が選んだ1冊の本

人類進化の700万年

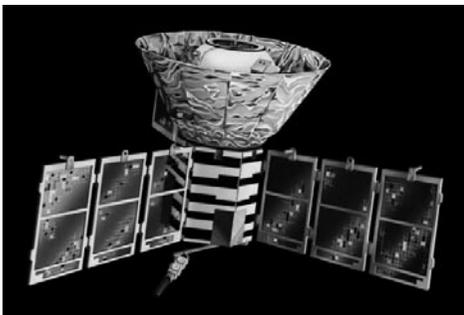
書き換えられる「ヒトの起源」…………… 16

いたと考えられる。宇宙がよく混ざり合った状態にあれば、光の波長と強度の間に特別な関係が成り立つことが知られている。そのときの宇宙の温度で決まる波長で強度が最大になり、その波長よりも短い波長では急激な減衰、長い波長では比較的緩やかな減衰が見られるはずなのである。これをプランク分布と呼び、このような温度だけで決まる放射を出す物体のことを黒体と呼ぶ。室温では放射の強度の最大が赤外線に対応することになるために、人間の目には輝かず真っ黒に見えるからである。

ビッグバンの存在は、宇宙マイクロ波背景放射が、たしかにプランク分布をしていること、つまり黒体放射であることを示すことによって証明されるのである。ペンジアスとウィルソン以後、プランク分布を証明するための観測が行われた。宇宙マイクロ波背景放射強度が最大になるのはおよそ2mmの波長である。問題は、これよりも短い波長の電波は、大気中の水蒸気にじゃまをされて、地表まで届かないことだ。そこで気球による観測などが企てられたが、観測時間が短すぎるなどから、なかなかプランク分布であることの決定的な測定結果は得られなかった。

大気の影響をなくし、また長時間観測を行うためには、人工衛星での測定が最適である。そこで、1970年代に計画されたのが、COBE衛星だ(図1)。15年以上もの年月を準備期間に費やした後、ついにCOBE衛星が打ち上げられたのは1989年のことであった。

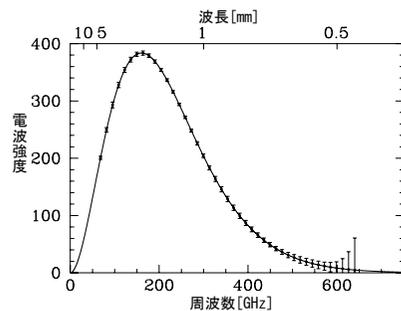
COBE衛星に搭載された検出器のうち、遠赤外線絶対分光測光計(FIRAS)は、広い波長帯



(図1) COBE衛星 (NASA/COBE チーム提供)

に渡って、宇宙マイクロ波背景放射の強度を測り、それがプランク分布をしているのかどうかを調べる装置である。打ち上げからわずか半年のデータで、FIRAS検出器は宇宙マイクロ波背景放射がほとんど完璧なプランク分布をしていること、そこからのずれがもし存在するとしても10万分の1以下であることを証明した(図2)。宇宙の初期は、熱くてよく混ざり合った状態、すなわちビッグバンだったのである。また、その温度は、絶対温度2.725Kであった。

COBE衛星が搭載していた2つ目の検出器が、差分マイクロ波放射計(DMR)である。この検出器は、宇宙マイクロ波背景放射の絶対強度を測る代わりに、空の60度離れた2点の温度の差を非常に正確に求めることのできる装置だ。この検出器によって、COBEは史上初めて空の方向によって、温度がごくわずかに異なっているということを見出したのである。そして、全天の温度分布の違い、すなわち「温度揺らぎ」の地図を作成することに成功したのだ。わずか10万分の1程度の揺らぎの発見は、スティーヴン・ホーキングがいみじくも述べたように、20世紀宇宙論の最大の発見と目されるに至った。それは、この揺らぎが、現在の宇宙の構造の過去の姿、つまり構造の種とも呼べるものであること、ビッグバンの直前にあったインフレーションと呼ばれる莫大な膨張の情報を伝えるものであること、さらには宇宙に関する豊富な情報を内在していることが明らかになってきたからである。詳しくは、次章以下で解



(図2) FIRAS検出器による宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル。黒丸が測定値で、測定誤差は200倍に拡大してある。実線は2.725Kのプランク分布で、測定値と非常によく一致を示している。

説していく。

ビッグバンの決定的証拠を得たこと、また構造の種を見つけ出したことによって、COBE 衛星プロジェクトの2人の研究者、ジョン・マザーとジョージ・スムートは2006年のノーベル物理学賞を受賞した。マザーは計画全体の責任者であるとともに、FIRAS 検出器の責任者でもあった。スムートは DMR 検出器の責任者だった。

ノーベル賞には天文学賞はない。これまでのノーベル賞で、天文学と関連したものは、星のエネルギー源の解明、レーザーの発見、パルサーの発見、宇宙での元素合成、パルサーからの重力波の観測検出、そして最近の小柴昌俊らの宇宙ニュートリノの検出など、数少ない。その中で、宇宙マイクロ波背景放射関係で2つ目のノーベル賞が出たことは、関連する研究を行っているものとして非常に喜ばしいことである。

## 2. 宇宙の多様な構造

宇宙マイクロ波背景放射のごくわずかな温度揺らぎの発見が、ではなぜノーベル賞受賞にふさわしく、また20世紀宇宙論の最大の発見といえるのであろうか。その第一の理由は、この揺らぎが現在の宇宙の多様な構造の過去の姿であり、その揺らぎがビッグバンの始まりの時期に作られたときの情報を保っているからである。

現在の宇宙には、非常に多様な構造を見つけることができる。すばる望遠鏡をはじめとする巨大望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などの宇宙からの観測などによって、遠方の巨大な構造まで浮かび上がってきた。宇宙には、階層的な構造が存在しているのである。

身近なものは、恒星を中心とした惑星系だ。最近では、太陽系以外にも、200個以上の惑星が見つかっている。また太陽系自身の姿も冥王星よりも遠くに、冥王星と似た多くの小天体が存在していることが明らかになってきて、書き換えを迫られてきた。その結果、冥王星をその代表格として準惑星という概念が新たに導入されたのである。

恒星はまた、集団化し星団を構成することがある。生まれてから間もない若い星の集団である散

開星団と、年老いた星の集団である球状星団は、全く異なった姿をしている。すばる（プレアデス星団）に代表される散開星団は、数十から百個程度の星が比較的拡がって集団化している。一方、球状星団は数万から大きなものでは百万にもなる星の大集団で、全体としては球形に集団化している。

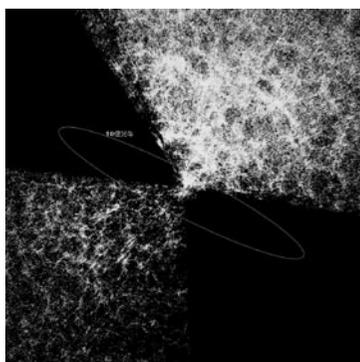
恒星、さらには星団が集団化したものが、銀河である。中でも我々の太陽系が所属しているものを、銀河系（天の川銀河）と呼ぶ。銀河は、球状に星が集団化している楕円銀河と、渦巻状の腕を持っている渦巻銀河に大きく分けることができる。銀河系は典型的な渦巻銀河で、星の数はおよそ2,000億個である。銀河系には、大マゼラン星雲、小マゼラン星雲という小さな銀河が付随している。銀河系に一番近い大きな銀河が、アンドロメダ銀河である。銀河系からの距離は250万光年ほどで、この距離はおよそ宇宙での銀河同士の平均的な距離でもある。

銀河が集団化しているものが、銀河群や銀河団である。前者は50個未満、後者は50個以上の銀河の集団と定義されている。我々の銀河系とアンドロメダ銀河も、大小30個ほどの銀河群を構成している。これを局所銀河群と呼ぶ。銀河団は宇宙の巨大な質量集中であり、かみのけ座銀河団には1,000個以上の銀河が所属している。そこには、銀河が集中しているだけでなく、可視光では見えないが大量の高温のガスと、さらにダークマターという通常の元素ではない物質が存在していることがわかってきている。X線で銀河団を見ると、非常に明るく輝いていることから、1,000万度にもなる高温のガスが大量に存在していることがわかるのである。銀河団では、ガスは、銀河の質量の10倍ほども存在している。一方、銀河団にはあまりに大量の質量が集中しているために、そこでの重力によって、背後の銀河の像がゆがむという重力レンズ効果が生じる。この重力レンズ効果によって、銀河団にどれだけの質量が存在しているのかを見積もることが可能である。ハッブル宇宙望遠鏡が運用されて以来、大気の揺らぎに影響

されずに鮮明な画像を得られるようになったことから、重力レンズによる質量の見積もりが現実のものとなった。その結果、銀河団には、ガスの10倍ほどにもなる大量の見えない質量、すなわちダークマターが存在していることが明らかになってきたのである。最近では、ダークマターとガスの分布の違いから、比較的最近に2つの銀河団が衝突を起こし合体したと考えられる銀河団も見つかっている。ガスは圧力・粘性により衝突するとその現場に取り残されるのだが、ダークマターはすり抜けていくことが期待され、まさにそのような分布が得られているのである。

銀河、銀河団は、また宇宙大規模構造と呼ばれる巨大な銀河のネットワークの一部であることが明らかになってきた(図3)。1億光年以上にもまたがった巨大な銀河の連なりや、数千万光年というサイズのヴォイドと呼ばれる銀河が少ない領域などが見られ、宇宙の蜘蛛の巣(コズミック・ウェブ)と呼ばれている。ネットワークの結び目の所には銀河の集団、つまり銀河団が存在しているのである。

なお、以上のような宇宙の多様な構造を最新の天文学データに基づいて可視化するPCソフトが国立天文台4D2Uプロジェクトから無償で提供されている。MITAKAという名のソフトであり、<http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/> からダウンロードできる。教材としても是非ご利用



(図3) 宇宙大規模構造。銀河のつくるネットワーク構造。スローン・デジタル・スカイ・サーベイ計画が測定した銀河までの距離を国立天文台の4D2Uプロジェクトが可視化した。中心が我々観測者の位置で、点一つ一つが銀河。まだ観測していない部分も多く残されている。

されることをおすすめする。

さて、このような多様な構造、とくに宇宙大規模構造や銀河団、銀河などといった巨大な構造がどのように宇宙で作られていったのかは、過去数十年間、研究者を魅了する問題だった。これまで、巨大な星の爆発モデル、宇宙紐モデル、乱流モデルなどさまざまなアイデアが考え出されては、否定されてきた。しかし、どうやらその問題にも決着がついてきたようである。

宇宙初期に作られた密度のごく微小な揺らぎが重力によって成長していった、最終的には銀河や大規模構造に育つという考えが、最もうまく現実の宇宙の構造を説明できることがわかってきたのである。ごくわずかに物質の密度が他の場所よりも高いところは、重力が強く、周囲の物質を引き寄せる。その結果、ますます密度が高くなり、さらに重力が強くなって物質をより多く集めるようになる、という重力の持つ不安定性が密度揺らぎの成長の鍵である。

現在では、コンピュータの中にダークマターの粒子をばらまき、その粒子間の引力を計算するという数値シミュレーションによって、宇宙の大規模構造とそっくりの構造を再現することができるようになっている。ダークマターの重力によって構造が作られるのである。

重力不安定性による構造の形成には、1つ明らかにしなければならない問題がある。それは、最初のごくわずかな揺らぎがどのように、いつできたのかという問題である。そして、その問いに答えたのが、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎなのである。

### 3. 宇宙のミッシングリンク

現代宇宙論は、宇宙の大規模構造となった揺らぎの起源を、宇宙のごく初期での大膨張期、インフレーションに求める。インフレーションとは、宇宙が始まってから $10^{-36}$ 秒の頃に、宇宙が突如として30桁以上にもなる膨張を起こした、という考えである。1980年代初頭に、アラン・グースや佐藤勝彦らによって提案された。30桁の膨張というと、例えば、インフレーション直前に原

子程度の大きさ（1 Å）であった空間領域は、インフレーションの終わりには銀河系にも匹敵するほどの大きさに拡張されたということになる。

このような莫大な膨張を引き起こしたものは、真空のエネルギーであると考えられている。真空がエネルギーを持つ、ということは考えにくいかもしれない。量子力学の完成に大きな貢献をしたポール・ディラックは、20世紀前半には、真空は豊かな海のようなもので、そこには負のエネルギーの電子が詰まっていて、ごく短い時間では、正のエネルギーを獲得し、実存となり、電子が抜けたあと（ホール）は、電子の反粒子である陽電子となる、という考えを示した。このとき以後、人類は真空が単なる空っぽの空間ではない、ということに気づいたのである。

インフレーションが起こる直前まで、エネルギーが全体としては0の真空の状態が、相転移という現象によって、エネルギーを獲得し、宇宙を急膨張させた、というのが通常考えられているインフレーションの機構だ。相転移とは、水と水というように、同じ物質なのに違った状態（相）が存在する場合に、温度を下げていくと水から氷に相が変わる、という現象である。このとき、水に相当する真空が最初はエネルギー0だったのに、氷に変わり始めると氷の状態がエネルギー0にかわり、水のままでいる場所はエネルギーを獲得することになる。このエネルギーがインフレーションを引き起こしたのである。

インフレーションを引き起こした真空のエネルギーはではどうなったかという、やがて熱に変わったと考えられている。莫大なエネルギーであるから、温度の上昇もすさまじいものがあり、およそ絶対温度  $10^{23}$  K から  $10^{25}$  K ほどにもなった。これこそが、ビッグバンである。インフレーションの真空のエネルギーは、ビッグバンをも引き起こしたのである。

さて、インフレーションの最中であるが、真空がエネルギーを持った状態になっている。このエネルギーは、しかしよくよく見ると一定の値ではなく、微小な違いながら空間の各点で異なった値

を示す。量子効果と呼ばれるものである。この微小な揺らぎこそが、宇宙の大規模構造を作り出した原因であると考えられているのだ。微小な真空の揺らぎが、膨張の速度の違いとして現れ、結果としてそこに存在する物質密度の値を変えることになるのである。

宇宙が誕生してから  $10^{-35}$  秒の時期に起こったインフレーションで生成された密度揺らぎと、それから137億年を経た現在の宇宙の大規模構造、その両者を結ぶものこそ、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎである。

宇宙マイクロ波背景放射で見ている宇宙は、宇宙誕生後38万年の時代である。高温、高密度な状態から始まったビッグバン宇宙では、電子と陽子といった物質の基本構成要素も互いに結びつくことができずバラバラに存在していた。しかしビッグバン宇宙は、膨張にともなって温度と密度が低下していく。やがて温度が十分に下がり、そこに存在している光が、もはや電子と陽子を引きはがすだけのエネルギーを持たなくなる時がやってくる。すると、急激に電子は陽子に捕らえられ、水素原子を形成するのである。温度がおおよそ3000K、宇宙誕生後38万年の時である。この時まで、宇宙空間には大量の自由電子が存在していた。光は自由電子と大変よく衝突するために、光にとって宇宙は不透明であった。しかし、水素原子が形成された後には、自由電子がほとんど残らない。この時以降、光は直進できるようになる。宇宙が晴れ上がったのだ。宇宙マイクロ波背景放射を通して見る宇宙、それは宇宙の晴れ上がりの時期、誕生後38万年の時代なのである。

宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎは、宇宙誕生後38万年の時代の構造である。つまり、インフレーションの時代と現在をつなぐミッシングリンクの役割を果たしているのだ。

38万年の宇宙の大きさ、つまり光が到達できる限界は38万光年である（厳密にいうと、光が伝播する間にも空間が膨張によって伸びるので、これよりは長くはなる）。それを超えた距離では、光さえも到達できないのだから、情報の伝達が一

切行われぬ。結果として、インフレーションの時代に作られた揺らぎのパターンがそのまま凍結して残っていることとなる。38万年の時代の宇宙の大きさは、我々が観測する空の領域のわずかに2度程度を占めるにすぎない。月や太陽の視直径が0.5度であるから、月を4個並べた見かけのサイズ以上は、光さえも到達できていなかった領域なのである。つまり2度を超えるスケールの大きな温度揺らぎの空間パターンを見つければ、それこそがインフレーションのときに仕込まれた揺らぎということになる。

COBE衛星が見つけた温度揺らぎには、10度を超えるような大きなパターンが存在していた。これを解析したところ、インフレーションによって量子的に生成された揺らぎから推定される空間パターンとピタリと一致したのである。具体的には、特別なスケールを持たず、すべてのサイズの揺らぎが同じ振幅で生成されるというものであった。

COBE衛星は、ビッグバンの存在を完全に証明しただけでなく、インフレーションの存在さえも、間接的かもしれないけれども証明したのである。

#### 4. 宇宙交響楽

COBE衛星の大きな成果を受けて、米欧では次の世代の宇宙マイクロ波背景放射探査衛星の計画が相次いで立案された。1990年代前半のことである。その機運を高めた1つの大きな理由は、理論研究がその時期進み、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎのパターンを詳細に解析すれば、宇宙の進化を司る重要な量を精密に決定できることがわかってきたからである。それは、宇宙に存在している物質の量や、空間の曲がり、膨張の速度、さらには元素の存在量などである。

この理論研究には、筆者も大きく関わってきた。ここで、温度揺らぎのパターンからなぜそのようなことがわかるのか、解説しよう。

38万年までの時代の宇宙には、大量の陽子、電子、そして光が存在していた。それらは混じり合いプラズマ状態として存在していた。プラズマ

は気体と同様な圧縮することができる流体である。気体の中に密度や圧力の粗密が存在して伝播すれば、それは音である。インフレーションを起源とする密度揺らぎや温度揺らぎは、プラズマに存在していた音として考えることができるのだ。ただし、この音は、とてつもなく低い音であった。なにしろ宇宙全体が楽器なのだから、その一番低い基準振動は、38万年に1回ほど振動するというものなのである。国際基準では、ピアノの真ん中あたりのラ音が440ヘルツに設定されている。つまり1秒間に440回振動するのである。比較の対象にもならない。宇宙には、38万年の時代まで、非常に低い音程の交響楽が鳴り響いていたのである。一番低い基準振動の上では、オクターブ高い2倍振動が響き、さらに3倍、4倍と和音が共鳴していたのだ。

この低音の響きは、宇宙という楽器の大きさによって、その音程を微妙に変える。音程は、そのまま宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの空間パターンに対応する。光の密度の粗密は、温度揺らぎそのものであり、それは音なのだから。つまり温度揺らぎの空間パターンを詳細に測定すれば、38万年の時代の宇宙の大きさがわかることになる。宇宙の大きさは空間の膨張の速さで決まっている。膨張は宇宙の物質が及ぼす重力によって決まる。つまり物質の存在量によるのである。このことから、温度揺らぎの測定から物質の量や、膨張の速度が求められることがわかるであろう。

また音は、空間を満たしている物質の組成によっても変わってくる。ヘリウムガスを吸い込むと声が高く変わるというパーティグッズと同じ理屈である。このことから、温度揺らぎの空間パターンを測定すると、音を媒介する物質、すなわち元素の量や組成比が求められることになる。実際には宇宙で一番多い元素である水素元素（つまり陽子）の存在量が推定できるのである。

我々は温度揺らぎを137億年たって137億光年離れた所で観測している（厳密には先にも述べたように空間も伸びるので470億光年ぐらい離れている）。もしも、38万年の時代から現在に至るま

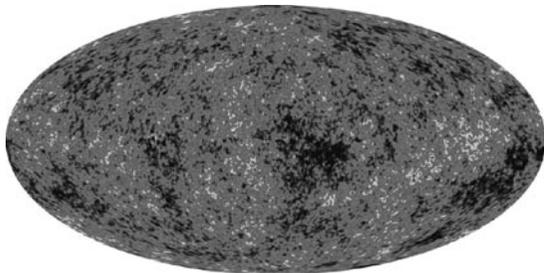
で、宇宙マイクロ波背景放射が伝播してくる空間の構造が、曲がっていたらどうだろうか。空間そのものが、レンズとして働き、温度揺らぎの空間パターンを拡大したり縮小したりすることが予想される。実際に理論計算によって、空間の曲がり方が正で空間が凸レンズとして働く場合にどれだけ空間パターンが拡大するのか、また曲がり方が負で凹レンズとして働く場合にどれだけ縮小するのかを予想することが可能である。観測で得られた温度揺らぎの空間パターンのサイズと理論計算を詳細に比較すれば、空間の曲がりもわかるのである。

物質の量や空間の曲がり、膨張の速度が得られれば、宇宙の膨張の式を解くことが可能になる。宇宙が現在までどれだけの時間をかけて、どのように進化し、そして将来どうなっていくのかが、わかることになるのである。宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎで、宇宙の過去、現在、そして未来を解き明かすことが可能になるのだ。

## 5. WMAP 衛星の大きな成果

COBE 衛星は、非常にすばらしい成果をあげたが、残念ながら少々ピンぼけ望遠鏡であった。インフレーションで凍結した揺らぎを見るにはそれでいっこうにかまわなかった。しかし、宇宙交響楽は、38 万光年以下の構造の揺らぎである。COBE 衛星の角度分解能ではとうてい解像できないパターンであった。

そこで前述のように米欧で次世代の衛星計画が立案されたのである。なかでも、アメリカの WMAP 衛星は、COBE 衛星のグループの人たちを含む計画で、計画立案から 10 年もたたずに、早くも 2001 年には打ち上げという早業であっ



(図4) WMAP 衛星による全天の温度分布。全天の天球図で、温度差は最大でも 1 万分の 1 以下。典型的には 10 万分の 1 である。(NASA/WMAP チーム提供)

た。COBE 衛星の数十倍の感度や角度分解能を持つ最新鋭の装置によって、非常に詳細な温度分布の写真を得ることに成功し(図4)、その結果得られた宇宙を司る量の値が発表されたのは、2003 年のことであった。

まず、空間の曲がりとはほとんどないことが明らかになった。我々の宇宙の空間は平坦だったのである。また、宇宙に存在する全物質・エネルギーのうち、物質は 26%、そのうち水素やヘリウムといった元素はわずか 4% であった。22% は正体不明のダークマターであることが明らかになったのである。残りの 74% はさらに大きな謎を生むことになった。他の観測からもその存在が示唆されていたのだが、ダークエネルギーという宇宙全体に拡がって存在していて、宇宙の膨張を加速させる謎の成分だったのだ。これは宇宙の始めにインフレーションを引き起こした真空のエネルギーととてもよく似たものであると考えられる。ただし、エネルギーは、宇宙初期のインフレーションのものよりは 100 桁ほど小さいこともまたわかっている。このエネルギーによって、現在の宇宙は再び急激な膨張、つまりインフレーションに向かっているらしいのである。

以上の宇宙の組成から、宇宙の進化を計算すると、現在の宇宙の年齢は 137 億歳とはじきだされる。また、宇宙の運命は、このままダークエネルギーが残っていればという条件付きであるが、急激に、だが永遠に膨張を続け、空っぽになっていくことになる。

WMAP 衛星によって、宇宙交響楽を聴くことで、宇宙の現在、過去、未来について明らかにすることが現実のものとなったのである。WMAP 衛星をさらにスケールアップしたような PLANCK 衛星プロジェクトがヨーロッパ宇宙機関 (ESA) を中心に進められている。PLANCK 衛星はいよいよ来年の夏には打ち上げ予定である。宇宙マイクロ波背景放射に潜む宇宙のさらなる秘密を解き明かすことが期待される。