

**連載****天文学最前線【12】****宇宙マイクロ波背景放射と宇宙の進化**

杉山 直（国立天文台理論天文学研究系）

**1. 膨張宇宙の仕組み**

現代宇宙論は、1915年のアインシュタインによる一般相対性理論の発表を契機としてその産声をあげた。時間と空間（時空）自身がその内部の物質の作り出す重力によって変えられる、というこれまでにないまったく新しい理論が、宇宙の進化、発展を解き明かすには必要不可欠であったのである。このことは、ニュートンによって完成をみた、古典力学が、あらかじめ定まった時間、空間の中での物体の運動を記述するものであったことと対照されたい。宇宙という入れ物自体の進化を記述するには、古典力学はまったく不適であったのである。

さて、一般相対性理論に基づいて、宇宙をモデル化することに成功したのは、フリードマンであった。1922年のことである。彼は、一様（特別な場所がない）、及び等方（特別な方向がない）という仮定を導入することで、アインシュタインの方程式を単純化し、解くことに成功したのである。一様・等方という仮定は実際の宇宙を平均的に見たときには、実に当を得たものであるといえよう。宇宙に

は、特別な「臍」とでもいった場所はないのである。もっとも、より詳しく宇宙の構造を見てみると、必ずしもこの仮定が成り立っているとは限らないこともまた明らかである。宇宙には、銀河のある場所、ない場所、というのが存在するのであるから。しかしながら、このような構造は、一様・等方からの揺らぎとして扱うことが可能である。

フリードマンの一様・等方な宇宙モデルでは、空間の幾何学構造として、曲率正、0、負の三通りが考えられる（図1）。いずれの場合も一様・等方であるので、我々の宇宙が、このどの場合かは、理論的にはわからず、観測することによって初めて明らかになる。3次元空間をイメージするのは難しいので、2次元に落として考えると、曲率正は球の表面、0は平らな面、負は馬の鞍のようなそった面に対応する。それぞれ、そこで三角形の内角の和は180度より大きい、180度、180度未満となる。

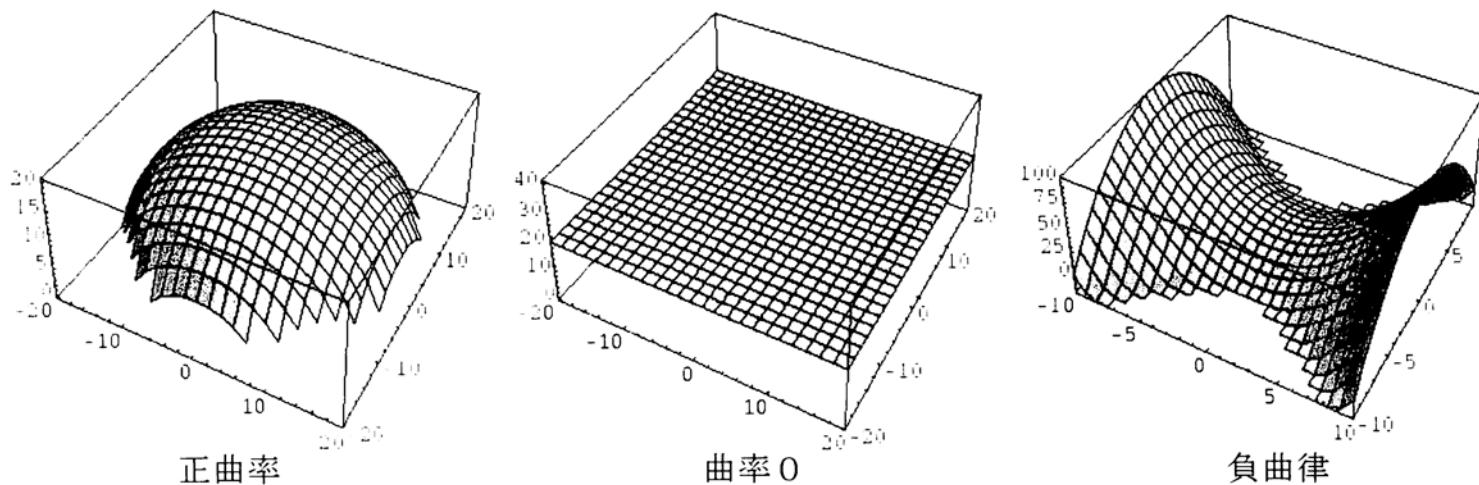


図1 2次元の曲がった空間の曲率

フリードマンの得た宇宙を表す方程式は、左辺が宇宙の大きさの時間変化と曲率、右辺が宇宙に存在する物質の作り出す重力、という形である。右辺は重力なので、引力しか持ち得ない。そのため、宇宙は、つねに収縮する方向に力を受ける。もし、膨張しているなら、重力によってその膨張は減速され、収縮しているなら、その収縮は加速されるのである。すなわち、宇宙は止めておくことができない。

aigneauは、重力の働きによって、宇宙を止めておくことが不可能であることに気づいたとき、その考えを受け入れることができなかつた。そのため、彼の方程式に、斥力として働く反重力とでも呼べる項、「宇宙項」を導入したのである。後に彼はこれを「生涯最大の失敗」と、後悔したといふ。実際にハッブルが 1929 年に、宇宙が膨張していることを見つけ出したからである。宇宙は、静的なものではなく、フリードマンの得たような、動的なものであったのである。

宇宙の進化、そして運命は、宇宙の曲率、物質の量、そして宇宙項によって大きく異なつるものになる。宇宙項がなければ、曲率が負ならば、減速しながら永遠に膨張する。無限の未来では、その膨張の速度は一定となる。曲率が 0 ならば、永遠の膨張が、無限の未来に止まることになる。曲率が正であれば、いずれ宇宙の膨張は停止し、収縮に向かい、つぶれてしまう。これをビッグクランチと呼ぶ。

これは、あたかもボールやロケットを地表から投げ出すことにたとえられる。ロケットの初速度が脱出速度 (11km/s) を越えていれば、ロケットは速度を減じながら無限遠まで到達できる。そのとき漸近的に一定の速度に到達する。これが、曲率が負の場合である。また、ちょうど脱出速度で投げ出すと無限遠で速度 0 となる。曲率 0 に対応する。脱出速度以下の投げ出しであれば、最高点に到達後、

地表に再び落ちてきてしまう。曲率が正の場合である。宇宙では、その脱出速度は宇宙に存在する物質の密度によって決まる。

一方、宇宙項が存在していると、それが加速源として働くために、宇宙の未来は、膨張を加速しながら、永遠に膨張を続ける、というものになる。ロケットのアナロジーでは、ロケットが発射された後から噴射をする、ということになる。重力に抗して、加速することが可能になるのである。

このように、曲率、物質の密度、宇宙項の値によって、宇宙はその発展の様子を大きく変える。これらの宇宙の発展を支配する量を、宇宙論パラメーターと呼ぶ。

結局、宇宙論パラメーターとしては次のものが考えられる。まず、物質の密度を表す $\Omega_M$ 、曲率を表す $\Omega_K$ （ただしこの値が負の場合が曲率は正と定義される）、宇宙項を表す $\Omega_\Lambda$ 、最後に現在の宇宙の膨張速度を表すハッブル定数 H（を無次元に規格化した h）があげられる。ここで、フリードマンの得た方程式から、 $\Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda = 1$  という関係が得られる。

これらの宇宙論パラメーターの値が明らかになれば、宇宙膨張の時間進化を完全に数値的に追うことが可能になる。宇宙の過去、未来が明らかになるのである。

これまで述べてきたことを、 $\Omega$ を用いて言い直してみる（図 2）。 $\Omega_\Lambda$ が 0 であり（宇宙項なし）、 $\Omega_K$ が負（曲率正）、または $\Omega_M$ が 1 よりも大きければ、宇宙はいつかは膨張から収縮に転じ、最後にはつぶれる。一方、 $\Omega_\Lambda$ が 0 であり（宇宙項なし）、 $\Omega_K$ が正（曲率負）、または $\Omega_M$ が 1 よりも小さければ、宇宙は減速しつつ永遠に膨張を続ける。また、 $\Omega_\Lambda$ が正であれば、宇宙はその膨張を永遠に加速し続けることになる。大した時間も経たないうちに、ものすごい急膨張になるのである。

このように、宇宙の進化、運命を司ることから、宇宙論パラメーターの決定は、過去数十

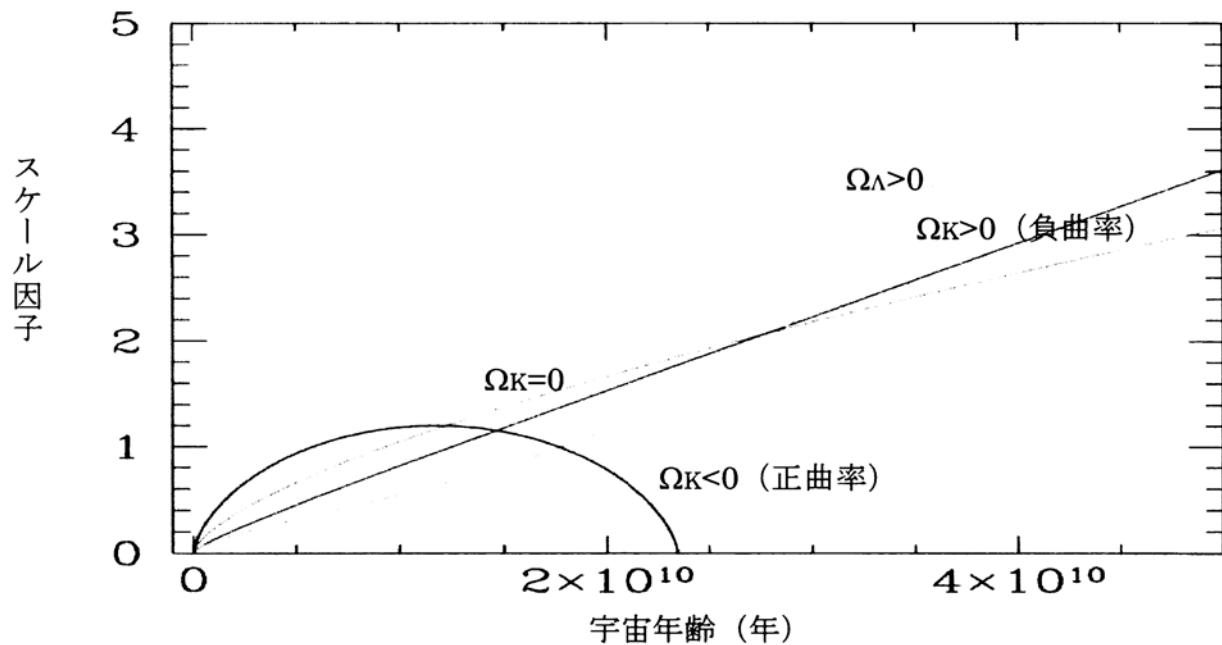


図2 宇宙の進化（年齢と宇宙の大きさを表すスケール因子の関係）

年の間、観測的にも、理論的にも、宇宙論研究の中心テーマであった。それが、今回、WMAP衛星によって決定されたのである。

## 2. 宇宙マイクロ波背景放射とビッグバン

宇宙がビッグバンと呼ばれる、高温高密度の状態から始まったのではないか、と最初に考えたのはガモフである。ガモフ以前にも、ルメートルによって高密度の宇宙の始まりが提案されたが、1940年代になってガモフが初めて高温の熱平衡状態にあった宇宙の始まりを言い出したのだ。ガモフは高温であった宇宙の名残として、電波が宇宙に充ち満ちているはずであること、またそれは黒体放射であるに違いないことを見抜いていた。

黒体放射とは、熱平衡状態にある時に実現する放射のことである。熱平衡とは、吸収と放射が完全に釣り合っている状態を指す。熱平衡状態にあると、その温度に対応する波長の周辺の光が放出される。温度によって、完全に強度の波長分布が決定されるのである。この黒体放射を巡って、プランクによって量子力学が生み出されたことは歴史上有名であるが、ここでは詳しく立ち入らないこととす

る。ともあれ、熱平衡状態にあれば、温度が高ければ高いほど、波長の短い、つまり青い光が放射され、低くなると波長の短い赤い光が放射される。これが黒体放射である。黒体と呼ばれる理由は、室温程度の黒体は、温度が低いために赤外線を放出し可視光を放しれないために、黒く見えることからつけられている。恒星は黒体放射に近い光を放射しており、青い星は高温、赤い星は低温であることはよく知られている。太陽の温度は絶対温度5800度ほどであり、可視光で輝いている。もちろん、太陽の光の下で地球上の生命は進化してきたのであるから、「可視」光が太陽の放射する光であることにはなんの偶然もないものであるが。

高温の初期状態から始まった宇宙も、膨張によって温度が下がってくる。ガモフは現在の宇宙の温度として、絶対温度5度と予想した。現在はとてもなく冷えているのである。

高温の宇宙初期、ビッグバンを証明する契機となったのは、他ならぬ黒体放射の発見である。1965年のことであった。ベル研究所の二人の電波天文学者、ベンジャスとウイルソンが、銀河面に存在する中性水素からの放射

を測定しようとしたときに、偶然発見したのである（図3）。彼らは、21cmという中性水素の出す波長よりも短い波長、7cmで、機器の出す雑音を調べようとした。その波長ではなんの信号も来ていないはずなので、受信機にかかるのはすべて不要な雑音であると考えたのである。しかし、その時思いがけない発見をしたのだ。いくらがんばっても、決して落とすことのできない正体不明の雑音が残ってしまったのである。これこそ、高温だった宇宙を証明する宇宙マイクロ波背景放射（CMB）であった。こうしてビッグバンは証明され、ペンジャスとウイルソンは後になってノーベル賞を受賞したのである。残念ながら、ガモフはそのときにはすでに世を去っていた。



図3 ペンジャス（右）とウイルソン。後ろに見えるのが彼らが宇宙マイクロ波背景放射を測定するのに用いたアンテナ。

しかし、この7cmの波長の電波が、宇宙の原初の光であることを疑う余地なしに明らかにするには、多くの波長で測定し、それが黒体放射であること示す必要があった。特に波長が短い部分は、大気に邪魔され地上まで届かないために、その測定は困難を極めた。結局、1989年に打ち上げられたCOBE衛星によって、完璧といってよい黒体放射であることが、証明されたのである。その温度は、絶対温度  $2.725 \pm 0.001\text{K}$  であった。

さて、我々はCMBによっていったいいつの時代の宇宙を見ているのであろうか。遠方の天体を見れば見るほど、過去を見ることに注意されたい。例えば、現在見ている太陽は

8分19秒前の姿だし、大マゼラン星雲は16万年前、アンドロメダ星雲はおよそ250万年前の姿を見ている。ここで見えている、といつても、太陽の場合であれば、その中心ではなく、光球と呼ばれる表面近くである。それより内側では光は何度も周囲の電子と衝突を繰り返し、最後にもう衝突しなくなり外へ出て行く、そこが光球である。もし、太陽を曇った日に見ると、今度は、雲の中で散乱するために、その姿を直接見ることはできなくなる。我々の受ける光は、この場合は（元々は太陽から放たれているのだが）雲の表面から来ているといえよう。このように最後に散乱する場所が見えるのである。CMBの場合も状況は全く同じである。宇宙で最後に散乱した、その時代が見えていることになる。

宇宙では、誕生後およそ40万年経ったときに、非常に劇的なことが起きることが、理論計算によって知られている。それ以前は、高温、高密度であったために、物質の根元的な要素である陽子と電子が結びつくことができず、バラバラに存在していたのである。陽子や電子が大量に分かれて存在していたために、その当時の宇宙空間は、電荷を帯びていた。光は電荷（電子）とよく衝突を起こす。そのため、当時の宇宙は非常に不透明、いわば深い霧が立ちこめていたのである。ところが40万年が経過すると、膨張により温度が下がってきた宇宙で、陽子と電子が結びつき、水素原子が急激に形成される。あつという間に宇宙には自由に漂う陽子、電子がいなくなり、宇宙空間は中性になった。つまり宇宙は透明になったのである。これを宇宙の晴れ上がりと呼び、以後、光はなにものにも遮られず、我々までやってくる。ちなみに、その間に宇宙は1000倍程膨張したと考えられている。

すなわち、CMBで見る宇宙とは、誕生後40万年の姿なのである。50歳の人間に宇宙

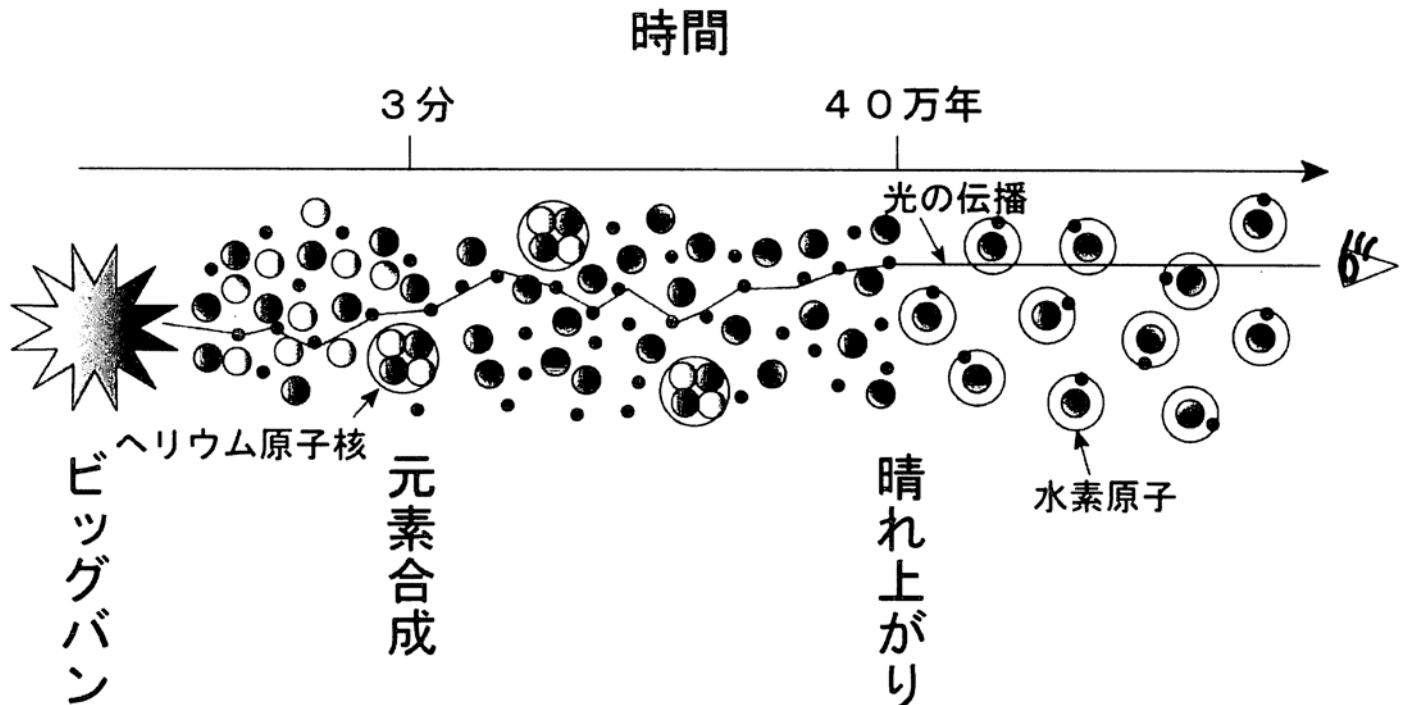


図4 ビックバンの歴史と宇宙マイクロ波背景放射

を例えれば、それは誕生してわずか半日、まだ生まれて間もない姿に他ならない。これは観測されている宇宙最古の化石である(図4)。

### 3. 宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎと宇宙論パラメター

CMBの存在によって、ビッグバンの存在が証明された。しかし、近年になって、CMBにはそれ以外にも豊富な情報が含まれていることが明らかになってきたのである。その情報とは、温度の揺らぎにあった。

ペンジャスとウイルソンの発見したCMBは、どこの方向からもほとんど同じ強度でやってきていた。ある波長で同じ強度、ということは、黒体放射であれば、同じ温度であることを意味する。温度によって波長ごとの強度が決定されるからである。しかし、その温度(強度)も、非常に精密に調べてみると、ごくわずかではあるが、測定する方向によって異なることがわかつてきた。

最初に明らかにされたのは、双極子成分の揺らぎであった。70年代には、スムート等によって、測定されている。双極子成分とは、ある特定の方向が他に比べて高温で、その180度逆側が、(その高温分と同じ絶対値で)低温になっている揺らぎのことである。その大きさは絶対温度 0.003K、揺らぎにして(2.725Kで割れば) 1/1000 の大きさであった。

このような成分は、ドップラー効果によって引き起こされることはわかっていた。太陽系がCMB静止系に対して運動をしていれば、その運動の前方が高温に、後方が低温になる。ちょうど観測者が音源に向かって運動すると音程が高く、音源から遠ざかると音程が低くなるという音の場合のドップラー効果と同じである。太陽系は銀河系の中を回転運動し、銀河系自身も周辺の銀河たち(局所銀河群)と共に、おとめ座銀河団に引き寄せられていることが知られている。この運動を反映しているのである。一方で、CMBによって、宇

宙の「絶対静止系」というようなものが定義できることは興味深い。さらに、このドップラー効果をCOBEによって詳細に測定してみると、地球の太陽系に対する運動もちゃんと測定できた。一年でもとにもどる変動が見つけられたのである。これこそ、地動説の証明ではないだろうか（図5）。

非常によく説明できることが、数値シミュレーションによって示されたのである。

また、理論研究の進展により、この宇宙初期に作られた揺らぎにこそ、宇宙を解く鍵が隠されていることもわかった。まさに宇宙論にとって「金鉱」とでも呼べる10万分の1の温度揺らぎであったのだ。



図5 COBEによる温度揺らぎの全天マップ（上が双極子成分、下がそれを除いたもの）  
(NASA 提供)

ドップラー効果は、予想されたものである。ところが、COBEによって高精度、かつ全天の温度分布の差の測定が行われた結果、1992年に、ドップラー効果を取り除いてもなお、10万分の1の温度揺らぎが発見されたのである。これは、理論的にはその存在が予想されていた、宇宙の最初期（誕生後  $10^{-35}$  秒のころ）に量子的に生成された揺らぎであると考えられる。また、その揺らぎこそが、銀河、銀河団、大規模構造といった宇宙の多様な構造を作り出した種であることもまた、明らかになった。ちょうどそのサイズの揺らぎが重力的に成長することで、現在の宇宙の構造を

しかし、COBEの結果はまた、不十分なものでもあった。COBEは1989年打ち上げにもかかわらず、実は1970年代の技術によって開発された観測装置しか積んでいなかったのである。それはスペースシャトルの打ち上げ失敗などによる、計画の遅れが原因であった。そのために、搭載していたのが非常なピンぼけ望遠鏡であった。角度分解能が7°というから、ものすごく悪い解像度である。これは40万年の時代の宇宙を見るのに、大きな問題をもたらした。

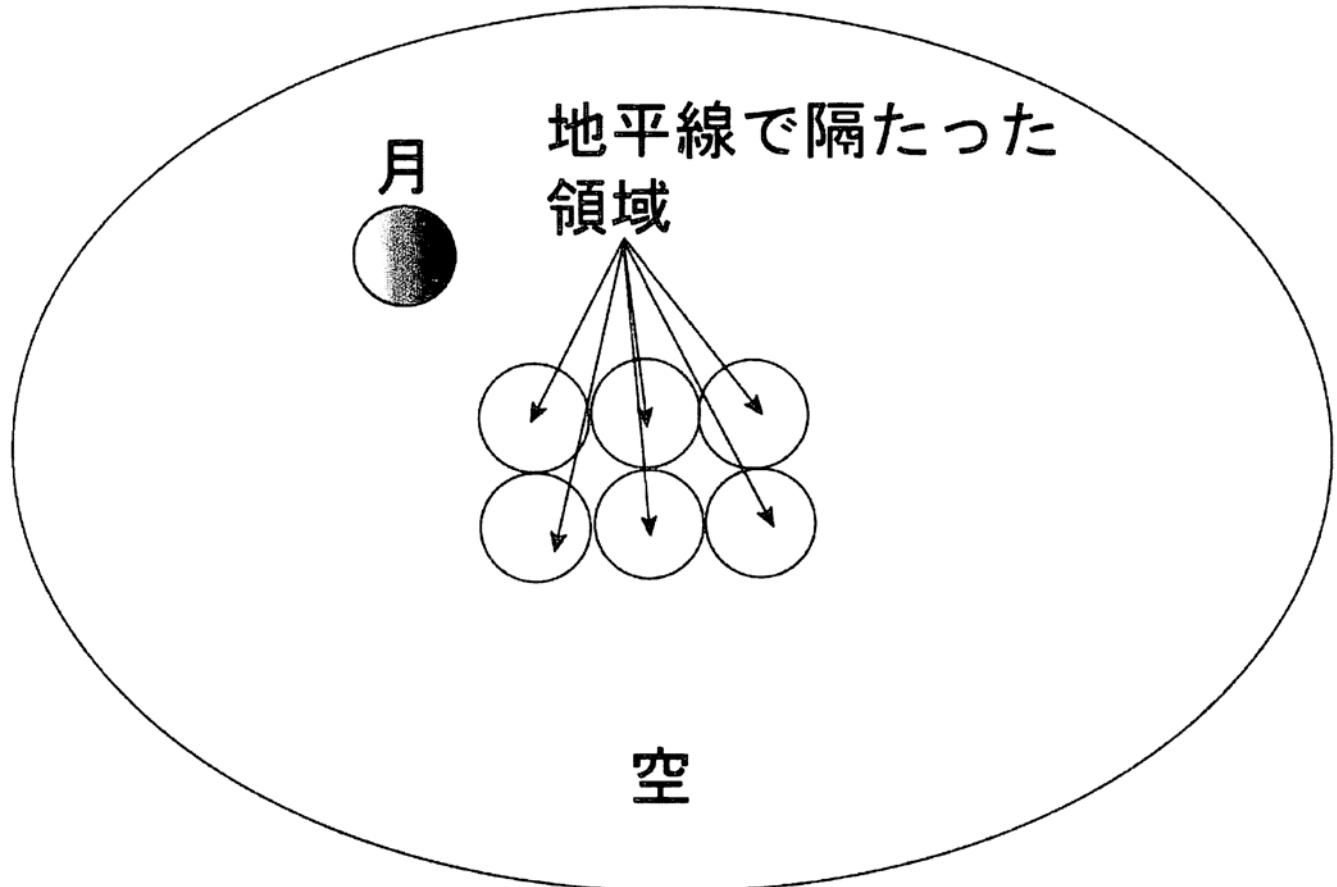


図6 40万年の時代の地平線を140億光年はなれて観測したときの空で占める領域

宇宙は、その始まりから光が到達できる距離の範囲内しか、互いに因果的に影響を及ぼすことはできない。その範囲を地平線と呼ぶ。地平線は時々刻々と大きくなっていく。40万年の時代であれば、その大きさは40万光年ということになる。この40万光年よりも外側は、その時代では、光をもってしても届くことができなかつたのであるから、宇宙の外とでも呼べる場所である。地平線はその後もどんどんと大きくなってきて、現在では140億光年にもなろうとしている。その間、先にも述べたように宇宙は1000倍ほど膨張した。膨張の結果として40万光年は、現在では4億光年に引き伸ばされている。しかし、これは140億光年に比べればごくわずかである。結果として、我々は4億光年の当時の地平線を140億光年離れた所から観測していることになる。これは見込む角度にして、

4億/140億[ラジアン]、つまり、 $1.6^\circ$  程（1ラジアンは  $180^\circ/\pi$ ）になる。月や太陽の視直径は、 $0.5^\circ$  であるから、月を3つ程も並べれば、宇宙誕生40万年、晴れ上がりの時代の宇宙の地平線になってしまうのである（図6）。

この $1.6^\circ$  をCOBEの角度分解である $7^\circ$ と比較すると、COBEは当時の地平線の中を解像して見ることができないことが明らかである。COBEの見た温度揺らぎは、宇宙が始まって以来、その時期まで一度も因果的に結びついたことのなかった領域の間に存在している揺らぎであったのである。

その意味で、COBEが見たのは、宇宙の始まりに仕込まれた揺らぎをそのまま凍結したものであったといえよう。宇宙の始まりに地平線を越えた揺らぎをつくる働きを担ったのはインフレーションと呼ばれる急膨張期であ

ると考えられている。揺らぎ自身は、因果的に結びついた領域の中で生じた量子的なものにその起源がある。しかし、その因果的な領域を、光速を越えるような急激な膨張によって、あっという間に、莫大な大きさに引き伸ばしたのがインフレーションなのである。それは宇宙が誕生後  $10^{-35}$  秒から始まり、 $10^{-33}$  秒まで続いたと考えられている。その間に宇宙はなんと  $10^{43}$  倍程も膨張したのである。40万光年などという大きさを凌ぐのはわけがない。 $10^{-35}$  秒の時代の宇宙の大きさが  $10^{43}$  倍にもなれば、それは、 $10^{18}$  光秒、つまり  $10^{10}$  (100億) から  $10^{11}$  光年にもなるのである。

COBE はインフレーション起源の揺らぎを直接見る、という大きな成果をあげた。しかし、繰り返しになるが、その温度揺らぎは、インフレーションの後 40 万年を経ても一度も互いに因果的に結びつくことのなかった構造、最初に作られたままのものを見ていたのである。実は、宇宙を解く鍵ともいえる豊富な情報は、それよりも細かい構造に潜んでいた。40万年の時代まで、宇宙の進化の影響を受けながら成長してきた温度揺らぎは、宇宙の進化、運命を決定する宇宙論パラメーターによってその揺らぎのサイズや振幅、つまりパターンを変えることが理論計算によって明らかにされたのだ。逆に、温度揺らぎを詳細に測定してやれば、宇宙論パラメーターを決定できることになる。

ここで簡単に、なぜ温度揺らぎのパターンが宇宙論パラメーターによって影響を受けるのか説明しよう（詳しくは拙著「ビッグバンと膨張宇宙の物理」参照）。それには、まずどのような物理過程が働いて温度揺らぎのパターンを作り出していったかを知る必要がある。

晴れ上がりの時期までは、陽子と電子はバラバラの状態で存在していた。プラズマ状態にあったのである。そこでは光もまた、電子と繰り返し衝突することで、プラズマの中に

共存していた。プラズマは流体であり、空気と同様、圧縮性の流体である。ここで空気の中に生じる密度の疎密が音波であることを思い出して頂きたい。プラズマにも同様に、音波が密度の疎密として伝播する。宇宙には、その誕生 40 万年まで、音が満ちあふれていたのである。

宇宙の始まりに存在していた音は、ではいったいどのくらいの音程であったのであろうか。ここで楽器を思い浮かべて欲しい。大きい楽器は低い音程を作り出す。もちろん、これは定在波の一番低い波長が、その楽器の大きさによって決まるところからきている。宇宙では、楽器が宇宙そのものである。宇宙に立つ定在波は、宇宙の大きさ、つまり地平線をおよそその最低の波長とする波になるのだ。振動数に直すと、40 万年に一度振動する、という超重低音である。その倍音成分も当然そこには存在していた。倍音成分は、波長が最も低い者の半分、3 分の 1 などによって構成される。この倍音がどれだけ含まれるかで音色が決定されるのである。

もう少し詳しく音の性質を見ていく。ヘリウムガスを吸い込むと声が変わる、というおもちゃをご存知だろうか。これは、ヘリウムの音速と、通常の空気（窒素と酸素の混合物）がことなるために生じる現象である。音速が異なれば、音程が変わる。宇宙の場合でも、宇宙のプラズマの構成要素の比率によって、その音程が変化する。具体的には、光（現在の宇宙マイクロ波背景放射）のエネルギー密度と、陽子、電子の密度の比が音速を決める。

また、宇宙の膨張速度、さらには、全物質密度などによっても音は変化する。宇宙という楽器が時間と共に進化していくその様子が異なるためである。この影響は、最も低い音だけではなく、倍音成分にも及ぶ。40 万年より以前の時代、つまり宇宙がまだ小さかった時代の宇宙の進化が異なれば、より短い波長

が変化するからである。そのため、音程だけでなく、音色が異なってくる。

この 40 万年の時代の音、すなわち密度分布の疎密こそ、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎ（温度違いの空間分布）として、測定されるものである。すなわち、温度揺らぎを詳細に測定することで、宇宙の物質密度（先に述べた $\Omega_M$ ）、膨張速度（H）、さらには、陽子によって構成される通常の物質であるバリオンの密度（ $\Omega_B$  と呼ぶ）などの宇宙論パラメーターが明らかになるのである。

次に、この 40 万年の音を私たちは 140 億光年彼方から観測していることに注目しよう。はるばる 140 億光年旅する間に、途中の空間の構造の影響が温度揺らぎには及ぶことになる。空間の曲率によって、拡大、ないしは縮小して見えるのである。もし実際の宇宙の空間の曲率が正であったとすると、曲率が 0 の場合に比べ、温度揺らぎのパターンが拡大される。温度揺らぎの典型的なサイズが本来 40 万光年程度であるのに、見かけもっと大きく見えてしまうのである。一方曲率が負であれば、逆に小さく見えるはずである。このように、温度揺らぎの測定によって宇宙の曲率（ $\Omega_K$ ）も明らかにされるのである。

40 万年の時代の音を「聴く」ことで、宇宙を解く鍵を我々は手にできるのだ。しかし、この音の波長は倍音成分も含めて 40 万光年以下である。そのため COBE の観測した温度揺らぎでは完全に均されてしまっていて、見

ることができない。より、角度分解能のよい観測が切望されたのである。

#### 4. WMAP

COBE の角度分解能を凌ぐ観測は、実は地上、または気球を用いることでも可能である。実際に、COBE による温度揺らぎの発見の後、数多くの観測が実行され、温度揺らぎの測定に成功した。とりわけ、2000 年に報告された Boomerang グループによる測定は、大きな反響を呼んだ。これまでにない、10 日にも及ぶ南極上空での周回軌道を利用した気球の観測であり、空の大きな領域（5 % 程度）を観測することに成功したのである。角度分解能は COBE の 30 倍ほどにも達し、40 万年の時代の音を詳細に測定することに成功した。その結果、宇宙の曲率は、ほぼ 0 であることを示すなど大きな成果を挙げたのである。

しかし、Boomerang といえども空の 5 % 程度しかカバーすることができなかつた。やはり、全天を測定することの可能な人工衛星に勝るものはないのである。

COBE の成果を受けて、米欧ではいくつかの人工衛星計画が提案された。そのなかで、NASA ゴダード航空宇宙センターとプリンストン大学を中心としたグループによって推進されたのが、WMAP 衛星である。当初は MAP と呼んでいたこの衛星計画が、予算獲得したのは 1994 年頃、2000 年 6 月には早くも打ち上げられた（図 7）。

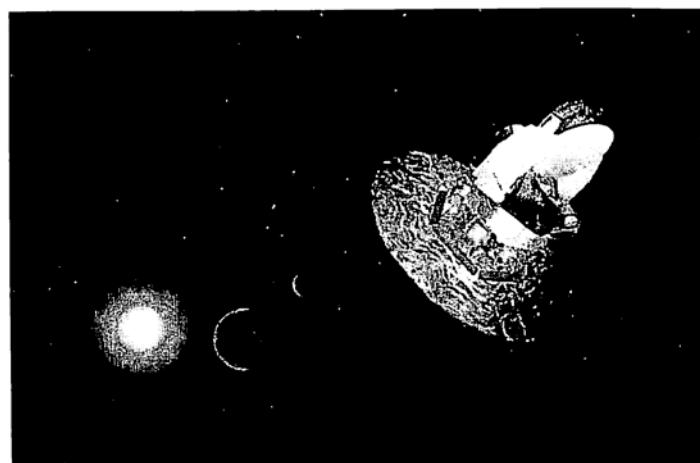
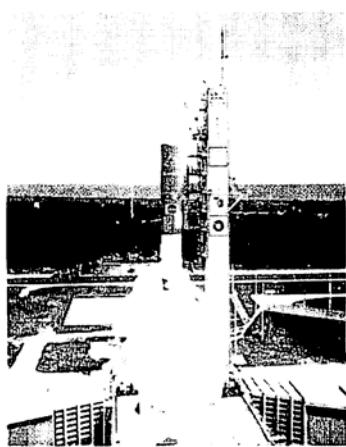


図 7 WMAP 衛星と  
その打ち上げ  
(NASA 提供  
<http://map.gsfc.nasa.gov/>)

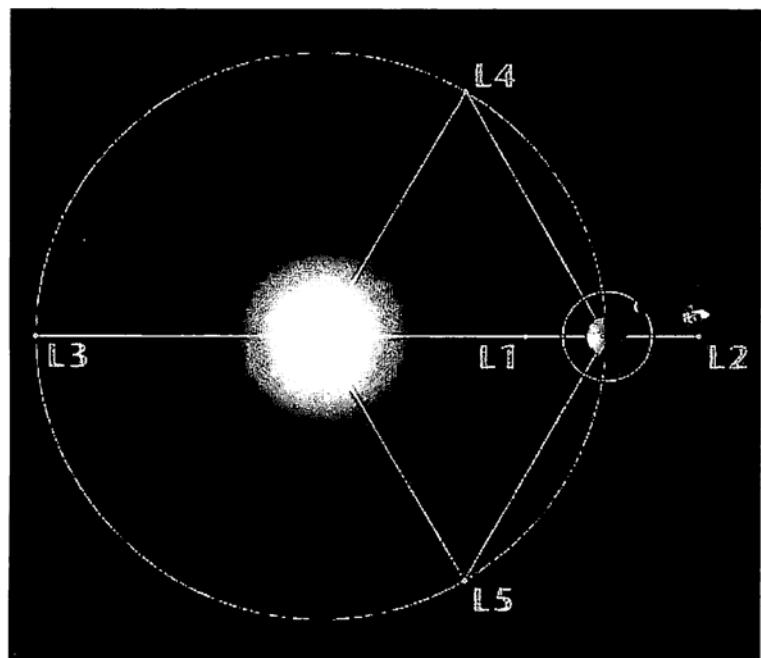


図8 様々なラグランジュ点(L)。太陽と逆側のL2がWMAPの軌道である。

(NASA提供 <http://map.gsfc.nasa.gov/>)

WMAP衛星の軌道は通常の人工衛星の周回軌道ではなく、L2という地球から1億5千万キロ離れた点におかれ、地球とともに、一年をかけて太陽の周りを一周するというものである(図8)。この点は太陽、地球の作る

重力がうまい釣り合いをしている場所で、ごくわずかな燃料の消費によってとどまっていることが可能である。周回軌道に比べての利点は、電波の雑音源である地球から遠く離れていること(ハッブル宇宙望遠鏡は、高度4百キロである)、常に太陽の方向に太陽電池パネルを向かれて、検出器は太陽光を直接受けずにつむことなどである。天体観測にとっては理想的な環境であると考えられていて、今後の宇宙望遠鏡計画などでしばしばこの場所が候補に挙げられている。

月を用いたスイングバイ航法によって、2000年8月にはL2に到達したMAP衛星は、全天測定を二度行った一年分のデータを2000年2月に公開し、あわせて解析結果を発表した。その際に、前年に惜しくも亡くなられたチームの精神的支柱であったD.Wilkinsonを記念して、WMAPと名前を変えたのである。

WMAPが得た詳細な温度分布は、図に見られるとおりである(図9)。先のCOBEと比べてみると、その分解能のよさが一目瞭然であろう。しかしそれはまたCOBEの結果を完全に再現するものでもあった。

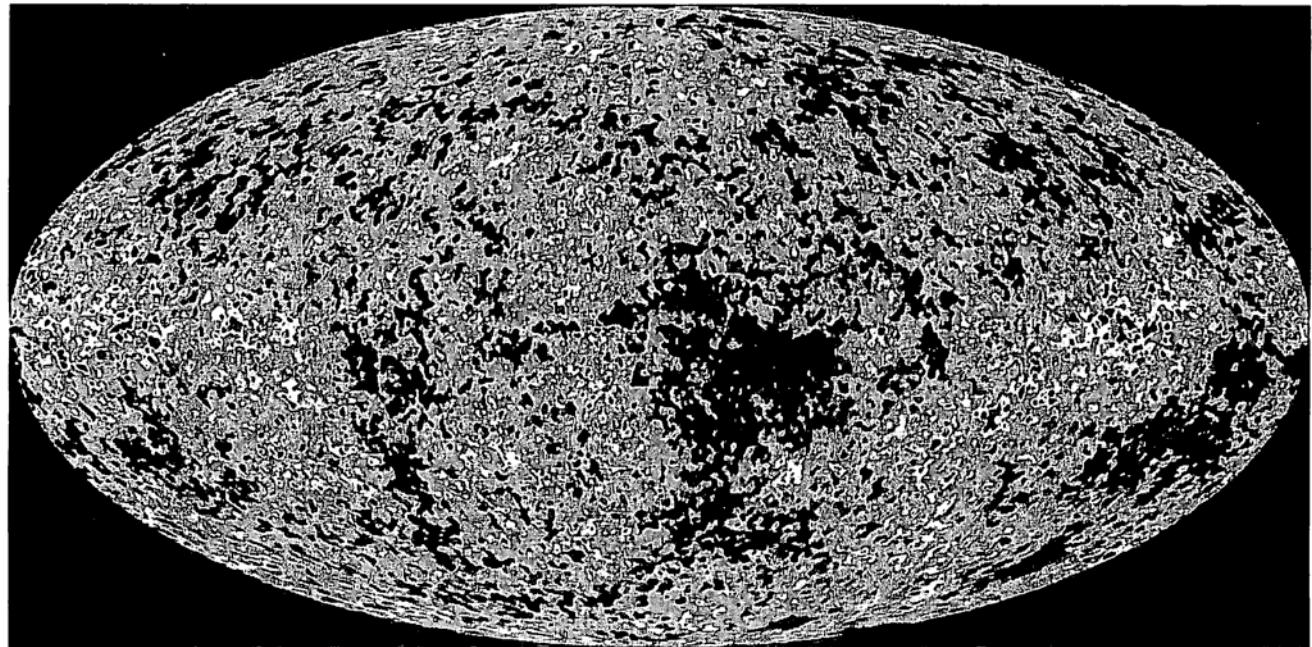


図9 WMAPの測定した全天の温度揺らぎのマップ (NASA提供 <http://map.gsfc.nasa.gov/>)

それでは、いよいよここで WMAP の温度揺らぎの解析によって明らかになった宇宙の姿を紹介しよう。まず、宇宙の空間は平坦であった。すなわち  $\Omega_K$  はほぼ 0 であった。次に、宇宙の物質の量は全エネルギー密度の 27%、すなわち  $\Omega_M$  は 0.27、その物質に含まれる水素などの通常の物質は 4% ( $\Omega_B = 0.04$ )、これは物質全体の 20%にも満たない量である。すなわち、宇宙には正体不明の暗黒物質（ダークマター）が大量に存在しているのである。さらに、第一章で述べた、 $\Omega_M + \Omega_K + \Omega_\Lambda = 1$  という関係から、宇宙に存在している宇宙項は、全エネルギー密度の実に 73%にもなることがわかる。ダークマターに対比して、この宇宙項のことを最近ではダークエネルギーと呼ぶことが多い。また、ハッブル定数も非常に精度良く決定された。

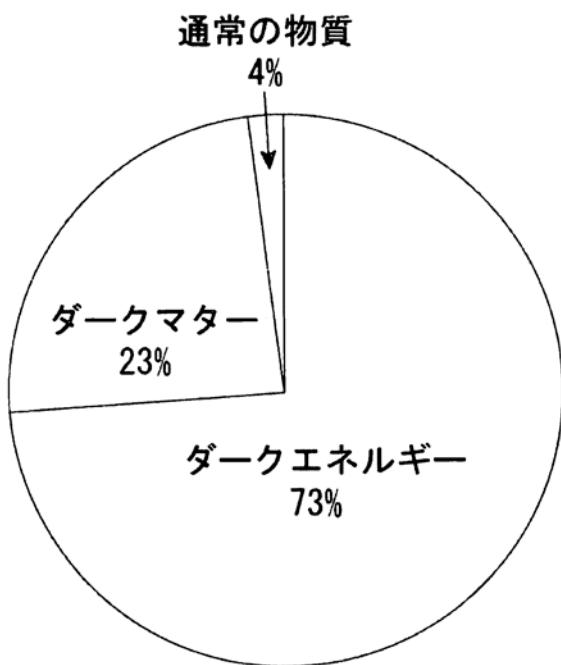


図 10 WMAP によって明らかにされた、宇宙の構成要素の割合

宇宙論パラメーター以外では、宇宙最初期の急膨張、インフレーションの存在をほぼ決定的に証明したことが特筆される。インフレーションが生み出す揺らぎの性質と、観測された温度揺らぎが完璧に合致したからである。

さらに、宇宙の初期天体形成が、これまで考えられていた時期よりも早く、赤方偏移 17、宇宙誕生から 2 億年の頃に起きたことも明らかになった。これは、銀河間ガスが、最初期の星からでる紫外線により再電離された証拠が見つかったからである。宇宙は 40 万年の時期にいったん晴れ上がったのであるが、その後雲が出てきて、うす曇り状態であったのである。

ここで測定された宇宙論パラメーターによって決定される宇宙の進化を計算することで、現在の宇宙の年齢や運命を明らかにすることが可能になる。その結果は、現在の宇宙の年齢は 137 億歳（誤差は数%）、将来は永遠に膨張を続け、現在の膨張速度をどんどんと加速させていく、というものである。宇宙の未来をごく簡単に述べると、50 億年程後には、アンドロメダ銀河と銀河系が衝突をする。その際には、両方の銀河にある分子雲が衝突することで、爆発的な星形成が引き起こされることであろう。太陽の寿命もこのころである。1000 億年たてば、宇宙は現在の 500 倍にも引き伸ばされる。例えば、現在 3 億光年の距離にあるかみのけ座銀河団は、1500 億光年かなたへと去っていってしまうのである。100 兆年もすれば、すべての星が燃え尽き、残されたブラックホールも質量の軽いものから蒸発していくことであろう。しかし、それには膨大な時間がかかる。銀河質量のブラックホールが蒸発するのには、 $10^{100}$  年もかかるのである。その頃までには物質を構成している陽子、中性子も壊れ、電子、陽電子のみが残され、宇宙には水素原子の代わりに、ポジトロニウムと呼ばれる電子・陽電子が対になつた「原子」が構成されるが、やがてこれも壊れて、猛烈に赤くなった光だけが残された宇宙が永遠に膨張を続ける、ということになるのではないかと考えられる。

## 5. まとめ

WMAP によって、宇宙はその始まりから終わりまでが、科学的かつ統一的に理解できるようになってきた。宇宙論は S F (空想科学) から科学へと発展をとげ、精密宇宙論の時代を今まさに迎えようとしているのである。

しかし、一方で WMAP が明らかにした宇宙とは、ダークエネルギー、ダークマターに支配された奇怪なものであった。この姿は、実は他の観測によても、近年予想されてきたものである。今後、今回の WMAP の観測結果を軸に宇宙論が展開されていくことは、疑いの余地はない。その中でも、ダークエネルギー、ダークマターの正体に迫る試みこそが、最大のチャレンジではないだろうか。

21世紀の宇宙論は、見えないけれども宇宙の大部分を支配している成分を明らかにするべく展開されていくのである。そのために、NASA の Dark Energy Probe(SNAP とも呼ばれる)という名の、専用衛星を打ち上げて遠方の超新星を探査することでダークエネルギーの正体に迫るプロジェクトや、アメリカの次世代宇宙望遠鏡計画 (James Webb Space Telescope: SWST)、アメリカ、ヨーロッパ、そして日本で次世代の巨大望遠鏡 (25m から 50m、100m クラスのものまで) 計画提案、など巨大プロジェクトが目白押しである。今後の展開に期待したい。

## 参考文献

一般向けの最新の著作として、拙著、「宇宙その始まりから終わりへ」(朝日選書 2003 年) をあげておく。ここで使った図は、特に断っていないものは、この本から転載した。

\* 本原稿は、年会の特別講演として、集録に掲載予定だったものです。