宇宙の構造と宇宙論

名古屋大学大学院理学研究科　松原隆彦

宇宙とは、もともと時間と空間の広がりという意味をもっています。つまり、宇宙論とは、時間や空間がなぜ、どのように存在するのかを考えるという、雲をつかむような話なのです。ところが、とくに最近宇宙の観測が飛躍的に進み、科学的に宇宙の成り立ちを調べることができるようになってきました。今回は空間的なスケールをどんどん大きくしていったとき宇宙はどのような姿をしているのか、また時間をどんどんさかのぼっていったとき宇宙はどのような状態になっているのかを、最新の宇宙論の成果に基づいて解説します。また、宇宙のダークマター、ダークエネルギーという正体不明の物質などが宇宙の中で重要な役割を担っていることを説明します。さらに、宇宙の最大構造である宇宙大規模構造の世界を見ます。どのようにして宇宙の大規模構造が見つかってきたのか、宇宙の進化の中でどのようにしてその構造がつくられてきたのかについて考えます。つい最近、宇宙の大規模構造を作り出すもとになった初期宇宙のゆらぎが詳細に観測されました。最新の宇宙論の成果を取り入れて解説します。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

宇宙には小さいものから大きなものまで、いろいろな構造があります。太陽のような星が集まった星団、さらに多くの星があつまった銀河、銀河が集まってできる銀河団、さらに大きな超銀河団、そして、宇宙の最大構造をなす宇宙大規模構造まで、宇宙には実にさまざまな構造が階層的に連なっています。我々が見ることのできる宇宙の大きさは、実に１３７億光年という想像を絶する巨大さで、実際の宇宙の大きさはさらにそれよりもずっと大きいと考えられています。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

一方、時間には始まりがあり、１３７億年前にビッグバンとともに宇宙が始まりました。始まりの宇宙は今よりずっと小さく、その後宇宙はどんどん膨張しています。我々は昔の宇宙を見ることができます。光のス

ピードは有限なので、遠くからやってきた光は大昔の天体を出発した光だからです。こうして大昔の宇宙の姿をみるといまとはだいぶ違っています。銀河などはまだ生まれて間もない姿をしています。さらに時間をさかのぼっていくと、天体がまだ生まれていない時代になります。この時代を光で見ることはできないのですが、なにが起きていたのかを理論的に知ることができます。宇宙の年齢が３８万年の宇宙だけは例外的に見ることができます (図 1)。このとき宇宙は曇った宇宙から晴れ上った宇

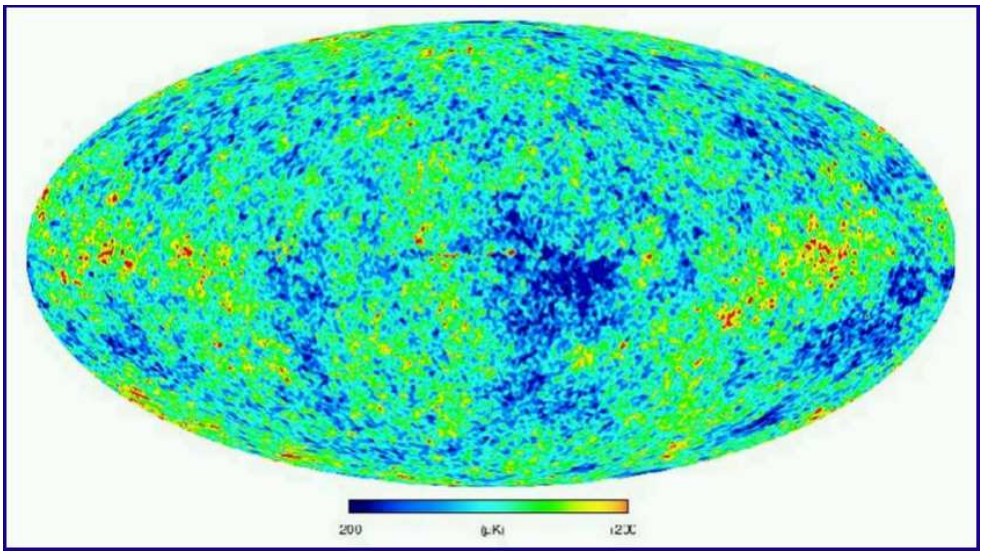

図 1: WMAP による 3K 背景放射の温度ゆらぎ地図。宇宙が始まってから３８万年たった時の宇宙の姿を表す。

宙になったのです。その前には宇宙は超高温、高密度のたいへんな宇宙になっていて、そのなかで我々の体をつくっている物質などが生まれてきました。さらにその前の宇宙は理論的な推測の世界になります。有力な説として、宇宙が現在とは比べ物にならないくらいものすごい膨張をするインフレーション期があったのではないかと言われています。さらにその前に宇宙が始まったと考えられますが、詳しいことは何もわかっていません。一つの説として、宇宙も何もない ”無 ”から偶然のゆらぎによって宇宙が生まれたと考える人もいます。図 2 に宇宙の進化の模式図を示しておきます。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

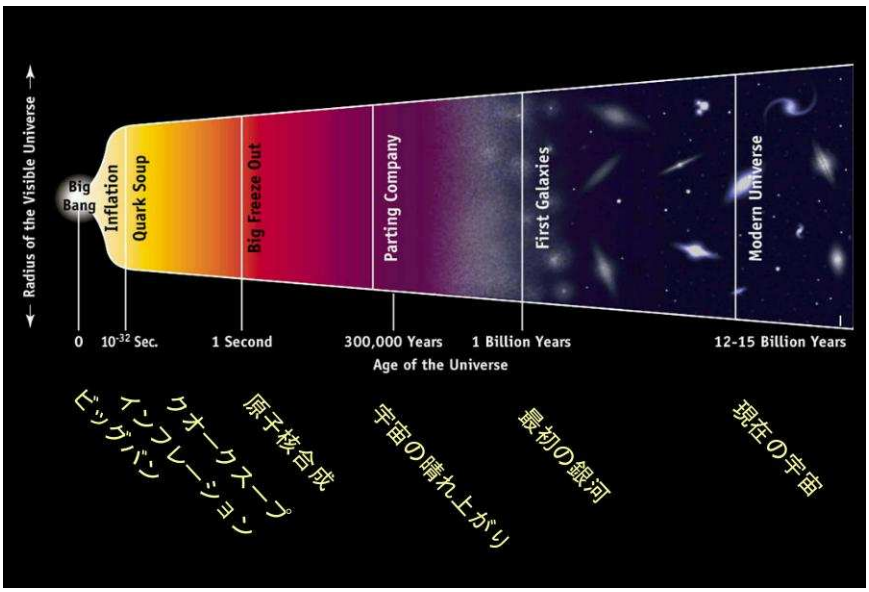

図 2: 宇宙の進化の模式図。ビッグバンにより始まった宇宙がインフレーションを起こしたあと、高温の火の玉宇宙となり、クォークなどの粒子で満ちた宇宙になる。その後だんだん温度が下がっていくと、クォークが結び付いて陽子や中性子などができて、さらに原子核が合成される。原子核はさらに電子と結び付いて原子ができる。このとき宇宙が晴れ上って遠くまで見通せるようになる。このとき出た光が宇宙の背景放射として観測される。さらに時間が進むと物質同士が重力でまとまりはじめ、無数の星になり、銀河となる。その中の一つの星が太陽となり、そして地球が生まれ、人間が生まれる。その人間が宇宙とはなんだろうかと考えている、、、

最近の観測の進歩によって宇宙の構造がだいぶ明らかになってきました。これまで宇宙は、球の表面に似て有限に閉じたものなのか、あるいは平面に似て無限に広がっているものなのかよくわかっていませんでした。ところが、最新の観測によると宇宙はどうやら無限に広がっているようです。実は、このような宇宙の形は宇宙の中にある物質などの成分と密接に関係しています。その関係を調べると、宇宙にはダークマターやダークエネルギーという、地球上ではまだ誰も見つけたことのない物質あるいはエネルギーが大量に存在することがわかってきました。これら未知の物質あるいはエネルギーの存在は宇宙を調べることによりはじ

めて明らかになってきたものですが、その研究はまだまだ始まったばかりで、現在のところ宇宙論の大きな謎になっています。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

宇宙論の研究は近年飛躍的に進歩していますが、調べれば調べるほど宇宙の謎は深まっていきます。宇宙の本当のはじまりはどのようなものだったのか、ダークマターやダークエネルギーの本当の正体、起源は何なのか、生命と宇宙の関係など、大きな問題が我々の前に立ちふさがっています。その問いに対し、実証的な科学的方法によって答えを探すべく、宇宙をさらに詳しく調べる計画が次々と進んでいます。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

次に宇宙の大規模構造について見ていきましょう。宇宙の大規模構造とは、この世界の最大規模の構造のことです。宇宙の観測は私たちの近くから始まりましたが、そこからだんだん遠くへ遠くへとより広い宇宙の姿を見ることができるようになってきました。その結果、銀河の集まりである銀河団よりもさらに大きな構造である「超銀河団」、さらに数億光年という大きな範囲にわたって銀河が全くない「宇宙の空洞」、これらの構造が複雑に織り成す「宇宙のバブル構造」など、信じられないような大きな構造がこの宇宙にあることがわかってきました。いったい、このような構造がどのようにしてできたのでしょうか？宇宙の大規模構造がどのようであるかは宇宙自体の起源や歴史を色濃く反映しています。つまり、宇宙の大規模構造の研究は宇宙そのものの研究であるといってもよいでしょう。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

宇宙の大規模構造を調べるためのもっとも基本的な方法は銀河のある場所をかたっぱしから調べていくというものです。望遠鏡を使って地球から宇宙を見ると銀河のある方向はすぐにわかります。しかし、宇宙の構造をきちんと調べるためには、その銀河までの距離を測らなければなりません。大規模構造においては、宇宙の膨張を使って距離を求めることができます。遠くの銀河ほど長い距離を光が進んでこなければならな

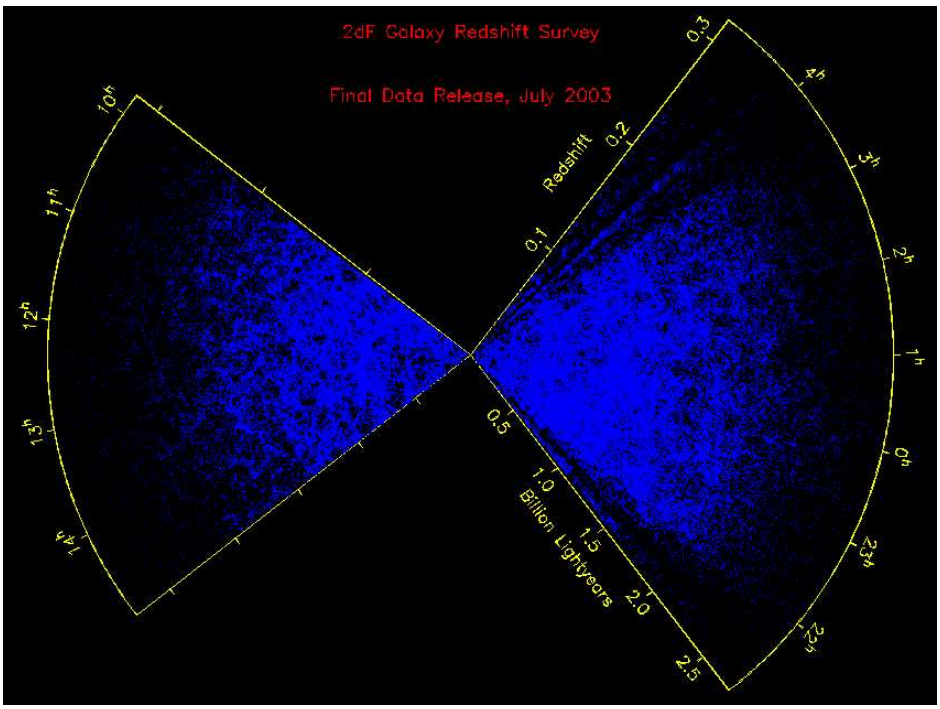

図 3: 2dF サーベイによる銀河分布の図。現在の宇宙の大規模構造を表す。

いので、その間の宇宙の膨張によって光の波長が伸びます。銀河の光を波長で分解したスペクトルをとってみるとこの波長の伸びがわかるのです。こうして、今日では数十万個の銀河の距離が測られています (図 3)。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

宇宙の初期には現在見られるような大きな構造はできていませんでした。はじめはほんのわずかなゆらぎが宇宙にあっただけです。そのはじめのゆらぎを「種」にして、万有引力により物質が引き合い、最終的に宇宙の大規模構造ができてきたと考えられます。これがどのようにしてできたのかを調べるには理論的な計算とともに、大きなコンピュータを必要とします。一辺が１０億光年ほどの宇宙の一部をコンピュータの上に仮想的に作り、シミュレーションをするのです。すると、現在の大規模構造を再現するためにはどのような宇宙でなければならないかを調べることができます (図 4)。こうして、宇宙には「コールドダークマター」という地球上では見つかっていない物質が大量に存在すること、また宇宙

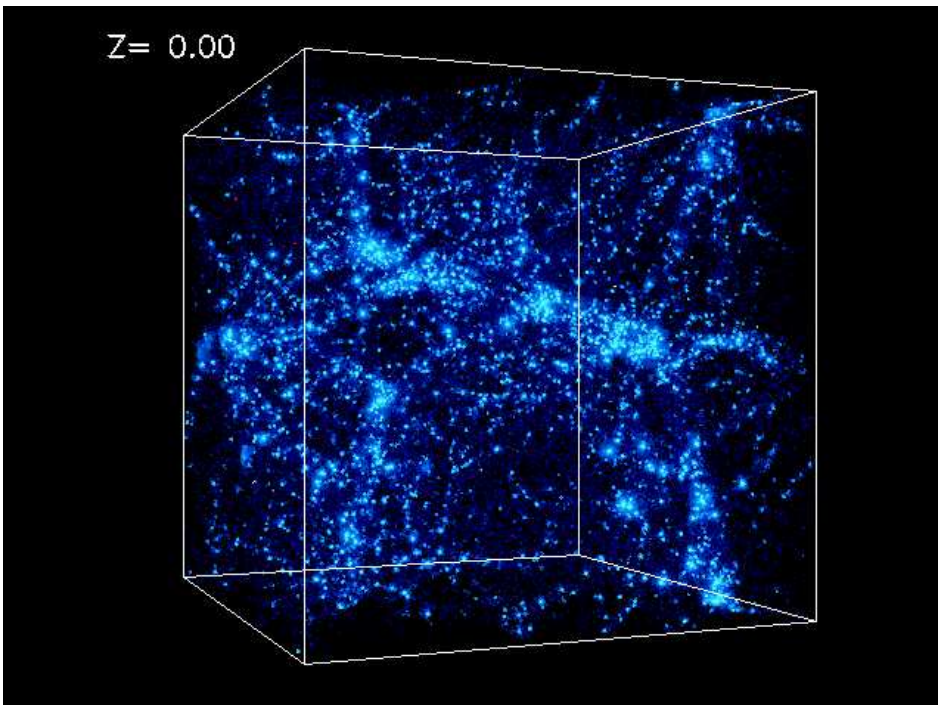

図 4: コンピュータシミュレーションにより作り出された宇宙の大規模構造 (The Center for Cosmological Physics, A. Kravtsov による)。

にはダークエネルギーという奇妙なエネルギーがあるらしいこと、などがわかってきました。また、ニュートリノ（中性微子）という粒子は、しばらく前までダークマターの正体ではないかといわれていましたが、大規模構造の詳しい研究によって、現在ではそうではないことがわかっています。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

また、宇宙初期にあったはずの構造の「種」は１０年ほど前に初めて見つかりました。「宇宙背景放射」という宇宙のビッグバン直後からやってくる光を見てやると、方向によってわずかにゆらぎが含まれているのですが、これが現在の構造をつくるもとになっているのです。つい最近、この構造の「種」がこれまでになく正確に測られ、今年に入ってその観測が発表されました。その結果を現在の大規模構造のデータ等と付き合わせてみると、驚くほど正確に宇宙のことがわかります。たとえば宇宙

の年齢は１３７億年、宇宙の成分はダークマター２７％、ダークエネルギー７３％、というぐあいです。原子など地球上にある私たちのよく知っている物質は宇宙全体では４％にしかなりません。また、宇宙は一般に曲がっている可能性がありましたが、非常によい精度で平らであることもわかりました。

＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊＊

今日、我々は大規模構造の観測結果をよく再現する宇宙モデルを持っています。宇宙はどこも同じようにできていてどこにも特別な場所はなく、また特別な方向もありません。また私たちの体をつくっている原子などの物質は私たちには重要ですが、宇宙全体でみると主要な物質ではなく、大部分は目に見えないダークマター、ダークエネルギーでできています。いったい、このような宇宙がなぜ、なんのために存在するのでしょうか？いろいろと思いを巡らせてみるのも楽しいでしょう。