

まえがき

この本では、空間やエネルギー、時間を最も大きなスケールで扱う「現代宇宙論」を簡潔に紹介したいと思っています。私たちは宇宙——その構成要素、形状、進化、そして記述するための物理法則など——について、何を知っており、いかにしてそれが分かったかと言った、本質的なものの方をお伝えしたいと思っています。宇宙は大胆な理論や考察にうってつけのテーマですが、観測事実によって、宇宙の最も大きなスケールをパーセントレベルの正確さで理解することができるという驚くべき側面も隠し持っています。

これから見ていくように、最も大きなスケールの宇宙とその初期の様子は、驚くほど単純で、わずかなパラメータで特徴づけることができます。例えば、大気、海、大陸、磁場などの複雑な要素を持つ地球と比べても、はるかに理解しやすいものです。この本では、現在の観測や測定そのものだけでなく、こうした観測が物理的な解釈によってどのように宇宙の統一的な姿として理解されていくのかを説明したいと思います。これから提示する宇宙像は、唯一可能なものではありませんが、最小限の仮説でデータを説明するものです。この宇宙像が正しいかどうかは、観測を続けることによって明らかにされていくでしょう。

宇宙に関する私たちの知識は、「宇宙論の標準モデル」に要約されており、これは観測結果と驚くほど良く一致しています。そして、必要であれば容易に反証したり補ったりすることができる、予測可能かつ検証可能なモデルです。このモデルによると、現在の宇宙は、約5%の原子（普通

の物質)、約25%のダークマター、そして約70%のダークエネルギーで構成されていることになってます。そして、アインシュタインの重力理論に基づいて、宇宙を構成するさまざまな要素が、極初期の宇宙から現在に至るまでどのように進化してきたかを説明しています。つまり、このモデルは、私たちが一般相対性理論を使って空間について考え、宇宙の構成要素である放射、原子、ダークマターやダークエネルギーがどのように組み合わせさせて私たちが観測する宇宙をつくっているのかを説明する土台となっています。このように、「標準モデル」は非常に優れたモデルですが、その主要な構成要素についてはまだ基本的な理解には至っていません。宇宙論には、世界中の科学者たちが研究し続けているエキサイティングな未解決問題があり、本書の最後でそのいくつかを取り上げます。

この本では、私自身が宇宙論を学んできた道に沿って、宇宙誕生時の熱の微弱な名残りである宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測を通じて、宇宙を理解していきたいと思います。非常に多くの観測的証拠が、この考えを支持しています。CMBは太陽からの放射熱や電気ストーブの熱に似ていますが、その温度はもっとずっと低いものです。その古い起源から示唆されるように、CMBは絶対零度からわずかに2.725度高いだけ、つまり2.725K¹ (ケルビン) です。しかし、CMBにはその示す温度以上のものが含まれています。実際、CMBから得られる知見のほとんどは、天空上の位置による温度のわずかな違いから得られています。CMBは天球上の任意の2方向、例えば北極と南極で、わずかに温度が異なります。CMBは非常に精密に測定できるため、この温度ゆらぎの理解は宇宙論モデルの基礎となります。しかし、CMBのさまざまな性質と、それが教えてくれる

ことを掘り下げる前に、宇宙を総体としてどのように捉えるかという基本的な考え方を、まず身につける必要があります。

第1章では、「光速は有限である」「宇宙は膨張している」という2つの観測事実をもとに、宇宙の基礎知識を作り上げます。この2つの事実の組み合わせが、後の章で使用するフレームワークとなります。第2章では、宇宙の成り立ちについて詳しく説明するのではなく、宇宙の歴史の中のさまざまな時代において、どのような構成要素が支配的であったのかに焦点を当てます。宇宙の進化の様子は、その組成によって決まります。また、これらの構成要素がどのように組み合わせ、星や銀河、銀河団——宇宙論では、これらを単に構造と呼びますが——を形成しているのかについても見ていきます。構造形成の全過程はビッグバンに基づいており、最終的に地球や私たちを生み出しているのです。第3章では、プレート1に示されたCMBのわずかな温度ゆらぎについて説明します。この画像の理解を通じ、私たちは宇宙について非常に多くのことを学ぶでしょう。第4章では、構成要素を持ち寄って「宇宙論の標準モデル」を紹介します。標準モデルは理論的に様々な予測や予言をしていますが、まだ多くが謎のままに残されています。最後に第5章では、宇宙論の理論的・実験的な研究の最前線をご紹介します。

宇宙論は活気に満ちたエキサイティングな分野です。理論と実験の両面で、より深い知識を得るための探求が続けられています。私を含め宇宙を観測する者にとって、CMBは常に宇宙に対する深い理解を与えてくれます。そして、継続的な観測は、標準モデルの要素に新しい光を当て、新しい発見へと導いてくれるでしょう。

本書を始める前に、レベルについて簡単に触れておきます。最新の科学を紹介する際の難しさの一つは、読者にとって適切なレベルで投げかけられるかということです。本書では、様々な用語や概念を科学的な特性に合わせて定義する際に、読者の背景知識や興味の度合いをある程度想定しています。そのため、特定のトピックについては、もう少し詳しい、いくつ

¹ CMBは、2.725Kがほぼ3Kであることから、しばしば「3K背景放射」と呼ばれます。絶対零度より高い℃の数値は、ケルビン温度スケールと同等です。つまり、絶対零度から1℃上は1Kです。(絶対温度を表すケルビンKには「°」記号はつけません。)例えば0.01℃の変化は0.01Kの変化と同じです。これから使うこの体系では、絶対零度は-273.14℃で、水は0℃または273.14Kで凍り、100℃または373.14Kで沸騰します。太陽の温度は約5500℃または5773Kですが、本書では6000Kと近似することにします。

かの付録を載せました。例えば、光がある波長の波であることを読者が知っている²と仮定していますが、付録 A.1 の「電磁スペクトル」では、さまざまな放射源とその波長について短い解説を加えています。また、光速が有限であり、自然界の基本定数であることは、ほとんどの読者が良くご存じと思いますが、宇宙のどこにしようと、自分がどれだけ速く移動してようと、真空中の光速は秒速 30 万 km であることはあまり知られていないと思います。これは、アインシュタインの特殊相対性理論の基礎のひとつです。この本を簡潔に保つために、相対性理論やその他のトピックなど、他に良い入門書がある事柄はあまり深く掘り下げていません。宇宙の理解に関わる物理的な概念については、これまで聞いたことがある説明より、さらに詳しく述べたいと思います。やむなく数字を扱う場合もありますが、計算も距離 = 速度 × 時間程度のことで、ほとんどの場合は概算で説明しますので、大丈夫です。

宇宙論特有の難しさに、距離や時間のスケールが大きすぎて想像しにくいことが挙げられます。そこで、わかりやすくするために、「億」の単位を使います。例えば、地球上の人口は 70 億人強、小指の先には約 10 億個の細胞、一辺が約 6m の立方体の箱には M&M のチョコが 10 億個入るといった具合です。この本は一般科学書なので参考文献の一覧は付けていませんし、特別なアイデアや発見の出典などの帰属関係も最小限にしてあります。

この短い本で宇宙全体をカバーしますので、話すべきことはたくさんあります。

さあ始めましょう！

謝辞

私は、多くの理論の先達たちから宇宙論を学ぶ幸運に恵まれました。デービッド・スパークルは 20 年以上にわたる親しい共同研究者です。ジム・ピーブルスとポール・スタインハートは多くの質問に答えてくれ、二人はこの本のために重要な示唆を与えてくれました。ディック・ボンドは私がポスドクであった頃から指導してくれました。そしてスラバ・ムハノフは初期宇宙について教えてくれました。もちろん、本書のすべての誤りは私の責任ですが、スティーブ・ボウンとシャム・カンナは初期の原稿を丁寧に読み、本稿に採用しているような多くの示唆を与えてくれました。ジェフ・オーミュラーは、ケビン・クローリー、オリエル・ファラジュン、ブライアント・ホール、ネハ・アニル・クマール、ロキ・リン、クリスチャン・ロブレス、アラン・シェン、モナ・イエ、そしてケイシー・ワゴナーと同様に、どうすれば理解しやすくなるか助言をしてくれました。編集者のイングリッド・グナーリッヒは、この本を現在の形に仕上げると同時に、書ききれないほどの提案をしてくれ、一緒に仕事をするのが楽しみでした。私の同僚であるスティーブ・ガブサーには、特別な謝意を表します。彼はフランツ・プレトリウスと一緒に超ひも理論やブラックホールに関する物理学の「リトルブック」シリーズを始め、本書が後についていく道筋を示してくれました。スティーブは 2019 年、ロッククライミングの最中に痛ましくも亡くなってしまいました。本書は、彼を偲ぶ思い出のひとつでもあります。

² 本書では、「光」と「放射」を同義的に使うことにします。

目次

まえがき..... v

謝辞..... ix

第1章 宇宙論の基礎 1

1.1 宇宙の大きさ 1

1.2 膨張する宇宙 9

1.3 宇宙の年齢 15

1.4 観測可能な宇宙 20

1.5 宇宙は無限か? 21

1.6 時間を振り返る方法 22

第2章 宇宙の構成と進化 25

2.1 宇宙マイクロ波背景放射(CMB) 26

2.2 物質とダークマター 34

2.3 宇宙定数 41

2.4 構造形成と宇宙の歴史 45

第3章 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のマッピング ... 51

3.1 CMBを測定する 54

3.2 CMBの異方性 60

3.3 CMBの定量化 64

第4章 宇宙論の標準モデル 71

4.1 宇宙の幾何学形状 71

4.2 構造形成のタネ 74

4.3 すべてを統合する 78

第5章 宇宙論のフロンティア 87

5.1 ニュートリノ 89

5.2 重力波 90

5.3 構造形成と基礎物理学 92

5.4 スニャエフ・ゼルドビッチ(SZ)効果と銀河団 93

5.5 温度スペクトル 95

5.6 まとめと結論 95

付録..... 99

訳者注..... 106

いま宇宙論が面白い! 107

索引..... 111

第 1 章

宇宙論の基礎

1.1 宇宙の大きさ

宇宙はどれくらいの大きさだろうか？ などと問われると、「とてつもなく大きい」とつい答えてしまう。でも真剣に考えてみると、これはとても奥の深い質問だ。この問題に取り組むことは、宇宙論の核心に触れることにもなる。しかし、この問いが何を意味するのかを理解する前に、まず典型的な「距離」について考えてみよう。宇宙論では、距離は実に茫洋としたものだ。その尺度を合わせるために、近くから始めて、徐々に遠くへ行くことにしよう。まず月は約 38 万 km 離れており、宇宙ではすぐお隣の天体である。その距離は、自動車が壊れるまで走れる距離と同じぐらいである。良い車に乗れば、月まで行って帰ってこられるかもしれない。しかし、月より先に行くと、距離を km で測り続けるのは面倒になる。宇宙はとても広いので、距離を測るには別の方法、つまり光で測るのが一般的となる。ある天体から私たちまで、光の速さでどれくらい時間がかかるの

かと考えるのだ。光の速度は自然界の定数であり、便利な基準でもある。光は1秒間に約30万km進む。つまり、1光秒とは、光が1秒間に進む距離(30万km)を表す。同様に、1.3秒間に光が進む距離は38万kmで、月までの距離をkmを使わずに、1.3光秒とすることができる。このように、時間的な用語(光秒)を使って距離の話をするのを覚えておいてほしい。

太陽は地球から平均で約1億5千万km離れており、これは8.3光分の距離となる¹。情報の伝達速度が光速であることから、太陽の表面で何かが起こっても、その光が私たちの目に届くまで約8分待たなければならない。この概念は、宇宙規模になったときに改めて考えることにしたい。ここでは距離に注目し、その距離の移動にかかる時間には注目しないことにしよう。

次に月の出ていない夜、街明かりから離れて夜空を見上げると、星空の他のどこよりも明るい帯状の光が見えるはずだ。この光は、私たちが所属する銀河である「天の川銀河」を構成する無数の星によるもので、その中で太陽はかなり典型的な星である。典型的な銀河には、およそ1,000億個の星がある。この数は、私たちの脳にある約1,000億個の神経細胞とほぼ同じだ。私たちの銀河の星1つに対して、私たちの脳にある神経細胞1個が対応していることになる。

天の川銀河の星々は、中央が膨らんでいる円盤状に集まっており、直径は10万年ほど。図1.1は、天の川銀河を遠くから眺めたときに見られるであろうイメージだ。銀河面は、円盤を半分に切ったような仮想の面で、まるで穴のないベーグルをスライスしたようだ。太陽系は円盤の中心から全体の約半分の位置にある。そこから円盤の中心を見ると、横方向を見たときよりもたくさんの星が見えるはずだ。これは、都市の郊外に住んでいるようなもので、自分は都市の一部にしながら、一方向にすべての高いビル群を見るのと同じである。

¹ 太陽と地球の距離1億5千万kmを光速の30万km/秒で割ると、500秒。即ち8分少々(8.3分)となる。

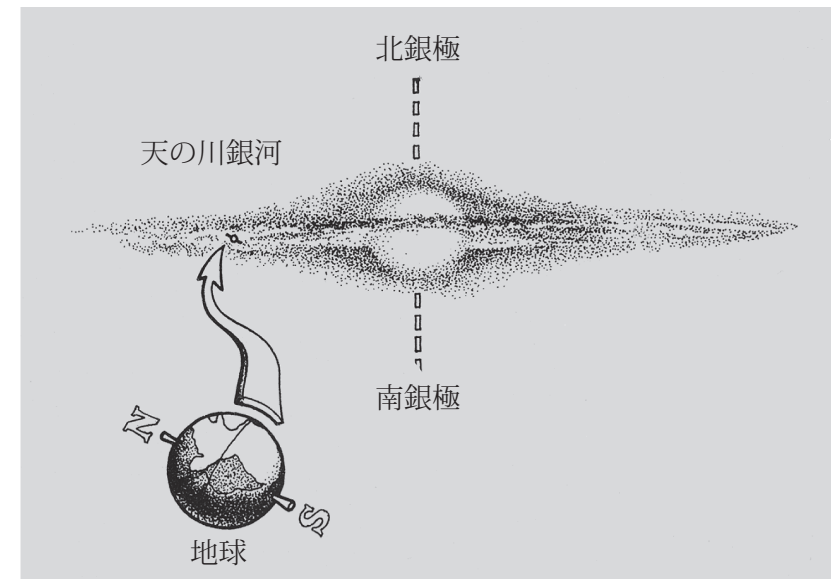


図1.1. 遠方にいる人が見るであろう天の川銀河の想像図。全体的な形は、真ん中に膨らみのある円盤に似ている。銀河の中心は膨らみの中央部にあたる。銀河に対する地球のおおよその位置や軸の傾きも示してある。

プレート2は、CCDカメラで撮影した可視光による天の川の画像²。もし私たちの目がもっと大きくて感度が良かったら、このように私たちの銀河を見ることができるだろう。この画像の暗い筋状の部分は、私たちの銀河内のダストが星の光を遮っているため、火が上がった場面で煙が炎を遮っているようなものだ。宇宙論では、炭素、酸素、シリコンなどのさまざまな物質で出来た微小な粒子を「ダスト」と呼ぶ。プレート3は、COBE (COsmic Background Explorer) 衛星の3つの観測装置のうちの1

² 私たちの目は、可視光と呼ばれる電磁波のスペクトルの一部を感知しており、それぞれの色は異なる波長に対応している。典型的な可視光の波長は、およそ0.5ミクロン(μm)。これは髪の毛の約100分の1の太さで、1 μm は1000分の1mm。光(電磁波)の波長は私たちの目に見えない領域にも広がっており、それらをまとめて「電磁波のスペクトル」と呼ぶ。付録A.1を参照。