

# 宇宙の果てに迫る天文観測

杉山 直

名古屋大学大学院理学研究科教授

遠方の宇宙を見ることは、過去の宇宙を見ることにほかならない。21世紀に入って、宇宙のさいはて、つまり宇宙の始まりに迫る観測が次々と進められている。さらに、暗黒に支配されている宇宙の姿もそこに浮かび上がってきた。

## 宇宙の果てに迫る

この100年でわれわれ人類の宇宙観は大きく変わった。そこで明らかになったのは、宇宙は決して静的、定常的なものではないということだ。宇宙はビッグバンと呼ばれる非常に熱い状態から始まり、膨張とともにその温度が低下していった。その過程で、星が誕生し、星の集団である銀河、銀河の集団である銀河団、さらに数億光年にもまたがった巨大な銀河のネットワーク「宇宙の大規模構造」が形成されていった、と最新の宇宙論研究では考えている。このような宇宙の進化は、理論と観測の両輪によって明

らかにされてきた。

宇宙に始まりがあることはまた、宇宙には時間の果てが存在していることを意味している。宇宙では、遠方の天体を見ることは、そのまま過去の天体を見ることに相当する。光が到達するのに時間がかかるからだ。100億光年かなたの天体をとらえれば、100億年前の宇宙の姿を見ることができる。宇宙の年齢が後述するように137億歳だとすれば、137億光年より遠くを見ることはできない。宇宙が始まって以来、光が届く限界がこの距離であり、観測可能な果てということにな

る。これが時間の果てだ。

遠方の天体を観測することで、この宇宙の果て、つまり宇宙の始まりに迫ることができる。遠方の天体からの光は非常に微弱なものとなり、またその像も距離に応じて小さくなっていく。微弱な光を巨大な鏡で集めるべく、すばる望遠鏡などの巨大望遠鏡が建設され、細かな構造を見るために、ハッブル宇宙望遠鏡など宇宙空間での観測が展開されるようになってきた。

また、X線や赤外線の一部など、波長によっては地球大気を透過してこないものもある。このような波長で観測するためには、宇宙空間へ出て行くことが必須となる。その目的で打ち上げられたのが、日本のX線天文衛星「すざく」や「ひので」、さらに赤外線天文衛星「あかり」だ。「すざく」は、X線で超新星残骸や銀河団など宇宙のさまざまな天体現象を見ることを目的としている。また「ひので」は、太陽を可視光やX線などで観測する。

宇宙の始まりに迫る成果を出すことが期待されているのが「あかり」だ。赤外線で輝いている宇宙初期の天体の光がとらえられる可能性がある。さまざまな地上巨大望遠鏡や宇宙望遠鏡によって、今

まさに人類が宇宙の始まりの姿を見ることのできるようになってきた。

## ビッグバン宇宙の証拠

現時点で、われわれが測定可能な最も遠方、すなわち宇宙の始まりに近い時期に放たれた光（電磁波）は、宇宙マイクロ波背景放射だ。この電磁波は、熱かった宇宙の始まり、つまりビッグバンの直

接的な証拠と考えられている。宇宙がかつて非常に熱い状態であれば、その温度に対応した電磁波が存在していたはずだ。温度が高ければ電磁波の波長は短く、

## われわれの見ている宇宙

太陽系外惑星探査計画 TPF-Cの観測ターゲット →P.9



重力波干渉計 LCGTの観測ターゲット →P.23



X線天文衛星 「すざく」の観測ターゲット →P.18



距離 100光年

近隣の星



銀河系

1万光年

近隣の銀河



銀河団

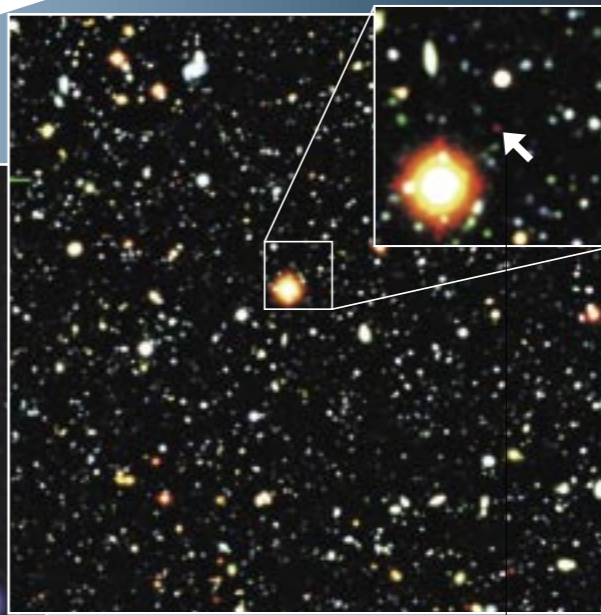
1000万光年

1億光年

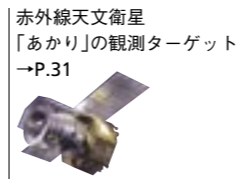
遠方の銀河 (すばるディープフィールド)



100億光年



すばる望遠鏡が2006年に観測した最古(最遠)の天体



最初期の宇宙の天体形成 暗黒時代

7億8000万年

1億年

38万年 宇宙の晴れ上がり

1秒 ビッグバン 宇宙の始まり

★宇宙年齢 137億年



宇宙マイクロ波背景放射観測衛星 WMAP



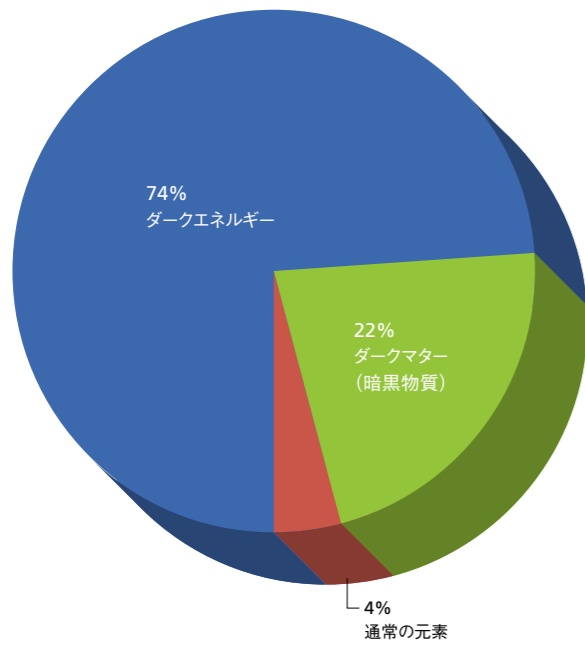
宇宙マイクロ波背景放射観測衛星 COBE

スペース重力波アンテナ LISA計画の観測ターゲット →P.23



巨大電波望遠鏡システム「アルマ」の観測ターゲット →P.28





宇宙のエネルギー密度組成比

低ければ長くなる。また、ビッグバンの状態ではあまりに熱くまた密度も高かったために、すべての物質が非常によく混ざり合っていたと考えられる。このような状態では、電磁波は波長に対する強度がその温度だけで決まる特別な形（プランク分布）をとることが知られている。このような電磁波を見つけ出し、その波長の強度分布を測定できれば、ビッグバンという熱い宇宙の始まりを証明できる。

宇宙マイクロ波背景放射は、1964年にペンジャースとウィルソンによって電波望遠鏡を用いて偶然発見された。しかし、波長の強度分布を詳細に求めるには、それから20年以上の年月が必要だった。一部の波長が地上まで透過してこないため、観測が困難を極めたからだ。そして、1989年に打ち上げられたCOBE衛星によって、ビッグバン理論の予想する強度分布とびたり一致することがついに示された。この功績によって、計画の責任者ジョン・C・マザーが2006年のノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。

強度分布が求まれば、宇宙マイクロ波背景放射の温度を決めることができる。それは絶対温度2.725Kという非常に低いものであった。このような低温の光が熱

い宇宙の証拠、というのは奇妙に思われるかもしれない。

じつはこの電磁波が宇宙で放たれたのは、宇宙誕生38万年後の時代であり、その時期は今よりはるかに高温であったのだ。宇宙が始まってからその時期に至るまでは、宇宙はあまりに高温であったため、基本構成要素である陽子と電子はばらばらに存在していた。そこには大量の光も存在していた。光には、電子とよく衝突するという性質がある。一方、電子は陽子と絶えず衝突を繰り返していた。高温、高密度であり、そこに存在していた物質や光が互いの衝突を通じてよく混じり合っていたこの状態こそ、ビッグバンだ。

ビッグバンの状態にあった宇宙は、しかし膨張にともなってその温度を低下させていった。ほかからエネルギーの供給がないために、膨張するための仕事を内部の熱が供給して低温になっていくのだ。宇宙が誕生してから38万年が経過したころには、温度は約3000Kまで下がった。そこまで温度が下がると、陽子が電子をとらえても再び引き離すだけのエネルギーが宇宙には存在しなくなる。結果として、このときまで宇宙空間を自由に

飛び回っていた電子や陽子はなくなり、陽子と電子の結合した原子、つまり水素原子が形成された。

ビッグバンの状態では、光は絶えず電子と衝突していたため、宇宙空間を直進することができなかった。しかし、自由に飛び回る電子がなくなったこの時期以降、光はなにものにも遮られることなく進めるようになったのだ。このことから、宇宙誕生38万年後の原子形成期を「宇宙の晴れ上がり」と呼ぶことがある。宇宙の晴れ上がりから約137億年かけ、光はわれわれに到達する。その間に宇宙は1000倍も膨張し、光の温度は3000Kから2.725Kまで低下したのだ。

### 宇宙のミッシングリンク

ビッグバンの証拠である宇宙マイクロ波背景放射には、ごくわずか10万分の1程度だが、到来方向による強度の違い、すなわち温度揺らぎが見られた。COBE衛星による発見だ。これは、宇宙のごく初期、 $10^{-35}$ 秒のときに生じたと考えられている莫大な膨張「インフレーション」の時代に作り出された密度分布の揺らぎを、温度揺らぎとして見ていると考えられている。理論的にインフレーションが作り出すと予想されていた揺らぎの空間パターンと、COBE衛星の観測が見事に一致したのだ。

この揺らぎが重力の働きで発展することで、宇宙の多様な構造を形成していった。COBE衛星は宇宙の始まりと現在を結ぶミッシングリンクを宇宙誕生38万年の時代に見つけ出したのだ。この功績により、揺らぎを測定する観測装置の責任者ジョージ・F・スムートも、先のマザーとともにノーベル賞を受賞した。

COBEの成果に触発され進められた理論研究によって、温度揺らぎ生成の物理過程の詳細が明らかにされた。晴れ上がりの時期までは先に述べたように、宇宙には電子、陽子、光が混じり合った状態で大量に存在していた。それはあたかも気体のような状態であり、そこに生じている密度の粗密の伝播は、“音”ということになる。この音の音程や音色は、当

時の宇宙の元素量や、ダークマター（暗黒物質）という正体不明の物質の量、膨張の速さなどによって決定される。宇宙という楽器の奏でる音は、その大きさや形によって決まるというわけだ。COBE衛星は、宇宙の“音”を137億光年ほど隔てて温度揺らぎとして測定したのだ。つまり、温度揺らぎを詳しく解析すれば、元素の量や暗黒物質の量などを決定できることになる。

しかし、残念ながらCOBEはピンぼけ望遠鏡であり、音の詳細な分析を行うことができなかった。温度揺らぎのさらなる詳細な測定は、2001年に打ち上げられた後継のWMAP衛星によって果たされたのだ。その結果得られた宇宙の構成要素は、宇宙の膨張を加速させる正体不明のエネルギーであるダークエネルギーが74%、正体不明の暗黒物質が22%、通常の元素はわずかに4%というショッキングなものであった(6ページ上の図)。また、宇宙の膨張速度も得られた。これらの値から宇宙の発展を計算によって解くことが可能になり、現在の年齢がおよそ137億(137億±2億)歳と見積もられたのだ。

宇宙マイクロ波背景放射を超えて、さらに宇宙の初期に迫るには、光よりも透過力の強い粒子を用いなければならぬ。ニュートリノと重力波がその候補として考えられている。ニュートリノであれば、宇宙始まりの1秒を見ることができ。さらに透過力の強い時空のさざ波、重力波であれば、インフレーションを直接見ることができかもしれない。宇宙背景ニュートリノの検出は現時点の技術では非常に難しいが、重力波については、人工衛星を用いた計画が真剣に検討されている。

### 最初期天体形成をとらえる

宇宙マイクロ波背景放射が見せる38万年の時代から天体が形成されるまでの間は、宇宙に輝くものがなにもない。「宇宙の暗黒時代」と呼ばれ、観測することはほとんど不可能と考えられている。

しかし、やがて暗黒時代は終わりを告げ、天体の形成が始まる。宇宙での最

初の天体はおそらく星であり、最初の星が宇宙で輝いたのは、宇宙誕生から数億年たった時期ではないかと考えられている。星がいったん誕生すると、強い紫外線が放射され、周りの水素から電子をはぎ取る。そこを通過する宇宙マイクロ波背景放射のうちのいくらかがこの電子と衝突し、その影響が観測に現れる。WMAP衛星がこの影響を直接測定することに成功し、水素などのガスのイオン化の時期を4億年ごろと見積もった。

残念ながら、まだこの最初期の天体を直接とらえることには誰も成功していない。星からの光そのものは、周囲が厚いガスに覆われているために、ほとんど検出不可能ではないかと考えられている。しかし、星が形成される過程でガスが重力によって収縮する際に、収縮のエネルギーを特定の分子の輝線として放射する。この輝線は遠方にあることもあって非常に微弱だが、チリに建設中の巨大電波望遠鏡システム「アルマ」によって検出可能かもしれない。観測結果を楽しみに待ちたい。

直接観測可能な最初期の天体は、銀河やクエーサーである。銀河は星の集団であり、クエーサーはその中心に存在している巨大ブラックホールをエンジンとして輝いている。最初期の天体探しについては現在のところ、すばる望遠鏡の独壇場である。最近もこれまでの記録を大幅に破る、宇宙誕生7億8000万年後の銀河を発見したことが話題になった。これは、暗黒時代が終わってまだ間もないほぼ最初期の銀河といってよい。今後は、さらに古い銀河を探すだけでなく、その数など統計的性質を知ることが暗黒時代の終焉を解き明かす重要な鍵となる。

クエーサーについては、まず星が誕生しなければ中心に存在するブラックホールは形成困難であるため、星や銀河の後に誕生したと考えられる。しかし太陽の数倍から数十倍という通常のサイズのブラックホールから、クエーサー中心にある太陽の数億、数十億倍といったブラックホールへどのように育っていったのかはいまだ大きな謎である。ブラックホー

ルや中性子星の合体から放出される重力波を検出することで、その謎に迫ることができるかもしれない。日本のLCGTも含めた重力波観測に期待したい。

個別の初期天体は直接観測できないが、それらが放つ光の総和を背景光として測定できるのが、最近打ち上げられた「あかり」衛星だ。最初期の銀河の数や明るさの進化といった統計的性質を明らかにし、それがどのように成長して現在の宇宙にある銀河へ進化していったかについての重要な情報を与えてくれるものと期待される。

これまでは、宇宙の果て、宇宙初期に迫る宇宙論研究は欧米主導であった。しかし、「すばる」、「あかり」さらには国際協力ではあるが「アルマ」といった日本が主導し、総研大がかかわっている大型プロジェクトによって、今後、初期宇宙の姿に迫っていける期待が高まっている。既存の考えに囚われない柔軟なアイデアをもった若い研究者の活躍が望まれる。



杉山直(すぎやま・なおし)  
最初は素粒子物理学の理論研究を志したのですが、大学院の途中で宇宙論に転向しました。宇宙と素粒子は、極大と極小の世界という対極にあるようですが、宇宙を作り上げているのは素粒子ですから、じつは密接にかかわりがあるのです。宇宙論の中でも、宇宙でどのように構造ができてきたのかについて興味をもって理論研究を進めています。具体的には、ビッグバンの化石、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎや、最初期の星形成などが研究テーマです。