

宇宙論の大展開

杉山 直 (名古屋大学大学院理学研究科 naoshi@nagoya-u.jp)

はじめに

平成の30年間は、宇宙論研究の大転換期であった。平成が始まった頃までには、冷たいダークマターの存在はすでに受け入れられていた。銀河赤方偏移の大規模探査はようやく緒につき、泡構造が見え始めてきたところだった。宇宙の空間曲率がゼロか負かは論争的で、宇宙初期の大膨張であるインフレーションも未だ仮説の域を出ていなかった。宇宙の膨張速度を決めるハッブル定数も2倍異なった値を主張する陣営に分かれ、いわんや、膨張が減速か加速かは不明なままであった。ひるがえって、平成の30年間で観測が爆発的に進み、現在では宇宙論の標準モデルが確立され、それに基づいた精密宇宙論が展開されるに至った。

COBE 衛星

平成元年、1989年に打ち上げられたのがCOBE衛星である。翌年には早くも、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のエネルギースペクトルが 10^{-4} の誤差内でプランク分布と一致することを示した。地上からは測定困難な短波長側(ウィーン領域)でも、ほぼ完璧に黒体放射であることを明らかにしたのだ。このことはかつて宇宙が熱平衡状態にあったことを意味し、ビッグバンの存在が確定された瞬間となった。次に、1992年には、温度の空間分布に揺らぎを発見した。これこそ待ち望まれていた発見であった。標準的な構造形成理論では、インフレーション期の量子揺らぎが起源となって密度揺らぎが生成され、膨張宇宙の中で成長し構造へと育てていったものと考えられていたからである。COBEが発見した揺らぎは、まさに構造の種として期待される大きさ、パターンと一致した。以上の業績により、ジョン・マザーとジョージ・スムートに2006年ノーベル物理学賞が授与された。

ハッブル宇宙望遠鏡キー・プロジェクト

ハッブル宇宙望遠鏡(HST)が打ち上げられたのは、平成2年であった。HSTは汎用であるが、3つのキー・プロジェクトを設定し、観測時間をそこに割いた。その1つが宇宙の膨張速度を決めるハッブル定数を10%精度で決定するプロジェクトである。空間が膨張していると、膨張による後退速度が距離に比例して大きくなるという関係、すなわちハッブル-ルメートルの法則^{*1}が成り立つ。その比例係数がハッブル定数である。ハッブル定数を精度よく決めるには、遠方天体までの距離を正確に測定する必要がある。

HST キー・プロジェクトでは、距離決定方法の較正を

高い精度で実現し、遠方天体までの距離の精密測定を行った。距離決定方法には例えばケフェウス型変光星(セフェイド)を用いるものがある。この変光星は変光の周期と絶対光度の間に良い相関があることが知られている。周期の測定から絶対光度が決定できることから、見かけの光度との比較から距離が決定できる。HSTは最も信頼できるケフェウス型変光星の距離決定をかつてない遠方まで可能とすることで、さらに遠方での他の距離測定方法の精密な較正を行った。このことから、ほぼ誤差10%でハッブル定数を決定することに成功した。なお、その値は、それ以前に2つのグループが主張していた値のほぼ中間であった。

宇宙膨張の加速

一般相対性理論に基づく宇宙論では、等速膨張を表すハッブル-ルメートルの法則は遠方では成り立たない。膨張は重力の及ぼす引力によって減速していくからである。減速膨張であるかを確認するには、過去、つまり遠方での膨張速度を測定すればよい。先のハッブル定数決定よりもさらに遠方まで「距離」を測定し、赤方偏移と比較することで、宇宙膨張が減速しているのかを知ることができる。

遠方までの距離を測定するために考案されたのが、Ia型超新星を用いる方法である。Ia型は、物理的な理由から、爆発の規模、すなわち絶対的な明るさがほぼ揃う。絶対的明るさを見かけの明るさと比較することで距離を決定できるのだ。90年代前半には、超新星の減光の速さと絶対光度の相関が明らかになり、距離決定精度が格段に向上した。Ia型は、極めて遠方まで観測することが可能であり、探査を行うことで宇宙膨張の時間変化を得ることができる。

1990年代の終わりに、2つのグループが相次いで遠方の超新星探査の結果を発表した。それは、宇宙膨張の加速を示す衝撃的なものであった。減速ではなく、加速であったのだ。加速膨張は、重力とは符号が異なる斥力が宇宙を支配していることを意味する。また、エネルギー保存則を考えると、膨張を加速させるエネルギーがどこからか供給されていることになる。この極めて奇妙なエネルギーを、ダークエネルギーと呼ぶ。宇宙はダークエネルギーに支配されていたのである。宇宙の加速を発見した功績で、ソール・パールムッターとマーティン・シュミット、アダム・リースの3名に2011年ノーベル物理学賞が与えられた。

大規模構造

多数の銀河の赤方偏移を測定し、銀河分布の地図を作る

試みは1970年代には始まっていた。しかし、大規模にサーベイが行われたのは1990年代になってからである。代表的なものが2dF銀河赤方偏移サーベイとスローン・デジタル・スカイ・サーベイである。前者は豪州と英国を中心とした計画で、1997年から2002年にかけて23万個ほどの銀河の赤方偏移を測定した。後者は2000年から始まり現在も続いている米国を中心とした国際プロジェクトで、日本のチームも参加している。全天の1/3をカバーする計画は、すでに400万個の銀河のスペクトルを測定し、未だ継続中である。これらの結果から得られたのは、蜘蛛の巣のように張り巡らされた銀河のネットワーク構造、Cosmic Webである。ヴォイドと呼ばれる銀河の少ない領域、銀河集団である銀河団や銀河群、銀河の連なりであるフィラメント構造で構成され、グレートウォールと呼ばれる10億光年にもまたがる巨大な板状の構造も見つかっている。これらを総称して宇宙の大規模構造と呼ぶ。大規模構造の形成を数値シミュレーションで再現する研究によって、ダークマターは運動エネルギーをほとんど持っていない冷たいダークマターであることがほぼ明らかにされている。しかし、その正体については未だ解明されていない。

さて、銀河の作る構造は、重力を支配しているダークマターの分布とは厳密には一致していない。問題となるのは、光っていないダークマターの分布をどのように測定するかだ。ダークマター分布の測定について大きな進展があったのもまた平成になってからである。ダークマターの作る重力場そのものを、背景に存在する銀河の像の歪み、すなわち重力レンズ効果として測定することが可能となったのである。例えば、銀河団でも特に質量が大きいものは強い重力場を生じ、背景の銀河が複数の像に分かれアーク状に歪められる。強いレンズ効果と呼ぶ。HSTによって、鮮明な重力レンズ画像が続々と得られるようになった。一方、宇宙大規模構造全体では、強い重力レンズ効果を及ぼすような重力場を作らない。しかし、それでも重力場によって、背景の銀河像は引き伸ばされ歪められる。弱い重力レンズ効果と呼ぶ。個々の銀河像については、形状とレンズ効果による歪みは区別できない。しかし、隣り合う銀河で同様の効果が生じるため、統計的に相関を取ることで、効果を取り出すことが可能となる。1990年に最初の測定の報告があって以降、解析手法も改善され、ダークマターの分布を得ることができるようになった。その嚆矢が、HSTやすばる望遠鏡が共同して行った、ダークマターによる3次元の地図作りである。最近では、すばる望遠鏡の超広視野カメラHSCによる銀河探査からの弱い重力レンズ効果の結果も発表された。今後、重力レンズによる物質分布測定はますます大規模に、そして精密になっていくことだろう。

宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎと精密宇宙論

COBE衛星以後、米欧で相次いで温度揺らぎ測定計画が

立案された。理論的研究の進展によって、COBE衛星では分解できない細かい温度揺らぎの構造を測定すると、宇宙の発展を決定づけるパラメータ、いわゆる宇宙論パラメータを精密に計測できることが明らかになったからである。

温度揺らぎは宇宙が電離した状態から中性になる晴れ上がり期(38万年)の音波である。音波の波長は、音速と晴れ上がり時刻の積によって決まる。音速はバリオンと光子の密度比で、時刻は物質の総量とハッブル定数で決定される。温度揺らぎの典型的サイズは、これらの量で決まるのだ。さらに、空間の曲率によってそのサイズが変化する。曲率が正であれば拡大、負なら縮小されて見えるのだ。

21世紀に入って、WMAP衛星、Planck衛星が相次いで打ち上げられ、物質量、バリオン量、ダークエネルギー量、ハッブル定数、空間曲率などの宇宙論パラメータが精密に測定されるに至った。最新のPlanck衛星の結果は、ダークエネルギー68%、物質32%、曲率は0という値であり、バリオンは4.9%にすぎない。物質の残りである全体の27%ほどは、(非バリオン)ダークマターということになる。

CMB温度揺らぎが38万年の時代の物差しを与えるのと同様に、宇宙大規模構造にも物差しが存在している。バリオン音響振動である。その起源は温度揺らぎと同じ音波で、銀河の分布に潜んでいるのだ。この測定も可能となり、宇宙論パラメータのさらなる精密測定に利用されている。

宇宙論のこれから

平成の30年の間に、宇宙論は観測に導かれて標準モデルを確立した。それは、宇宙最初期のインフレーションから、ビッグバンを経て現在に至る歴史であり、ダークエネルギーに支配され、物質の大半は冷たいダークマターによって担われる宇宙の姿である。しかしこれは表層的な理解にすぎない。インフレーションの機構は未だ不明である。その解明には、密度揺らぎとともに生成されたであろう重力波成分の検出が鍵となる。CMBの偏光のパリティ奇成分は重力波から生成されることから、その測定を目指し競争が繰り広げられている。ダークマターの正体は未だ不明であるが、素粒子であれば、直接検出実験や加速器実験から発見の報がもたらされるかもしれない。ダークエネルギーは非常に奇妙な存在であり、まずはその時間発展を詳細に調べる必要がある。宇宙膨張の時間発展の精密測定のためには、バリオン音響振動や重力レンズが使われる。分光測定を含むさらなる大規模銀河探査が待たれる。ダークエネルギーについては、理論的な理解も進められなければならない。令和の時代の宇宙論は、標準モデルの理解を、観測・理論両面で進めていくことが主要なテーマとなるだろう。

(2018年12月23日原稿受付)

*1 国際連合2018年総会において、ハッブルの法則をハッブル-ルメートルの法則と名称変更する提案がなされた。その後、会員全体の投票で名称変更が認められた。