

## 宇宙観のパラダイムシフト

トーマス・クーンが提唱したパラダイムシフトとは、科学の発展段階において、それまでの規範・原則が突如としてくずれて劇的に変革を遂げる、というものだ。その最もわかりやすい例が、天動説から地動説への移行だろう。地球が宇宙の中心という考え方から、太陽が中心である、という全くこれまでと異なった考え、新たなパラダイムへの変革が、17世紀、ガリレオ・ガリレイの時代に突如として起こったことはよく知られている。

人類の宇宙観を根本から変えたこのようなパラダイムシフトが、20世紀以降にも、繰り返し起こってきた。また、現在も進行中である。宇宙論と呼ばれる研究分野の進展が、人類の宇宙観を再び大きく揺さぶっているのだ。

### 天の川は唯一の銀河ではなかった

20世紀初頭には、まだ星雲 (Nebula) と呼ばれるものが天の川に所属しているのか、それとも、天の川と同じような独立した星の集団=島宇宙なのかわかっていなかった。世に名高いシャプレー (H.Shapley) とカーティス (H.Curtis) の二人の討論が国立自然史博物館 (National Museum of Natural History) で行

われたのは、1920年のことである。「世紀の討論 (The Great Debate)」と呼ばれている。そこでは、シャプレーは星雲がすべからく天の川の内部にあるという立場で、一方のカーティスはアンドロメダなどの渦巻星雲 (Spiral Nebula) は天の川の外にあるという立場で討論を行ったのである。

この論争は、1922年にハッブル (E.Hubble) がアンドロメダ星雲までの距離を確定したことで決着を見た。天の川銀河の差し渡しよりもはるかに大きな距離であったことから、アンドロメダ星雲は天の川の外側にあり、独立した星の集団、つまり銀河であるということが明らかになったのだ。討論に破れた側のシャプレーこそ、天の川銀河の大きさを最初に測定した人物であったことは、歴史の皮肉といえよう。

太陽の属する天の川が、宇宙にある多数の銀河の一つに過ぎないことが明らかになったことは、人類の宇宙観のパラダイムシフトと呼べよう。それを導いたハッブルの測定の契機となったのが、リーヴィット (H.Leavitt) による宇宙での距離測定方法の発見だ。ケフェウス型変光星 (Cepheid variables) は、その変光の周期が長いと本当の明るさも明るい、という相関を持つことに気づいたのである。つまり、周期を測定すれば真の明るさがわかるのだ。見かけの明るさの

測定値と真の明るさを比較することで、暗くなり方の程度から距離を決定できる。彼女の発見こそ、科学的研究としての宇宙論の扉を開くものであった。太陽系を超えて、天の川、そして銀河までの距離を測定する方法を人類はついに手に入れたのである。実際にハッブルは、この方法を用いて、アンドロメダ星雲までの距離を測定したのだ。

## 膨張する宇宙

天の川以外の島宇宙の認識と、ほぼ時を同じくして見出されたのが、膨張をするダイナミックな宇宙像である。ここで登場するのが、スライファー (V. Slipher) だ。彼は、1910年代から20年代にかけて、渦巻星雲 (Spiral Nebula) (渦巻銀河) の分光観測を行い、ほとんどの星雲のスペクトルが赤い側にずれていることを見出した。赤方偏移として知られる現象である。スライファーは、この現象を星雲 (銀河) が我々から高速で遠ざかっていることで生じるドップラー効果によって引き起こされていると考えたが、空間の膨張と結びつけることまではしなかった。

空間が膨張するような宇宙は、1915年にアインシュタインによって発表された一般相対性理論によって初めて可能となる。それまでは絶対的と考えられていた時間・空間の構造が、重力の働きによって変わりうることを示す理論だからである。

一般相対性理論に基づく宇宙論はアインシュタイン自身によって1917年に発表された。しかし、空間は静止しているもの、という先入観に囚われていたアインシュタインは、重力によって空間が時間進化するのを防ぐために、重力と釣り合う斥力の項を自身の基礎方程式に導入した。これが宇宙項である。宇宙項は、反重力として空間を引き延ばす働きをする。空間がダイナミックなものであることが後に明らかになると、アインシュタインはこの宇宙項の導入を後悔し「生涯最大の失敗」(Biggest Blunder of My Life) と述べたと伝えられている。

空間が膨張したり収縮したりする宇宙モデルは、フリードマン (A. Friedmann) によって1922年に提案された。膨張する宇宙モデルでは、スライファーの結果は自然に説明できる。膨らむ風船の表面を我々の宇宙の空間と見立てると、風船が膨らむ、すなわち空間が時々刻々と広がっていれば、どの銀河も互いに遠ざかっていくことが容易に想像されるだろう。また、一般相対性理論では、光が銀河から我々まで伝播する間に、空間とともに光の波長も伸びる、と考えることで、赤方偏移について説明することもできる。

しかし、単に銀河が遠ざかっている、というだけでは、空間の膨張の決定的な証拠にはならない。きちんとした法則に基づいて証明する必要がある。その法則こそ、膨張の速度が距離に比例する、というハッブルの法則である。空間全体が場所や方向によらずに一樣

17世紀

17-18世紀

20世紀



ガリレオ・ガリレイ



エドウィン・ハッブル

静的な宇宙



アルベルト・アインシュタイン

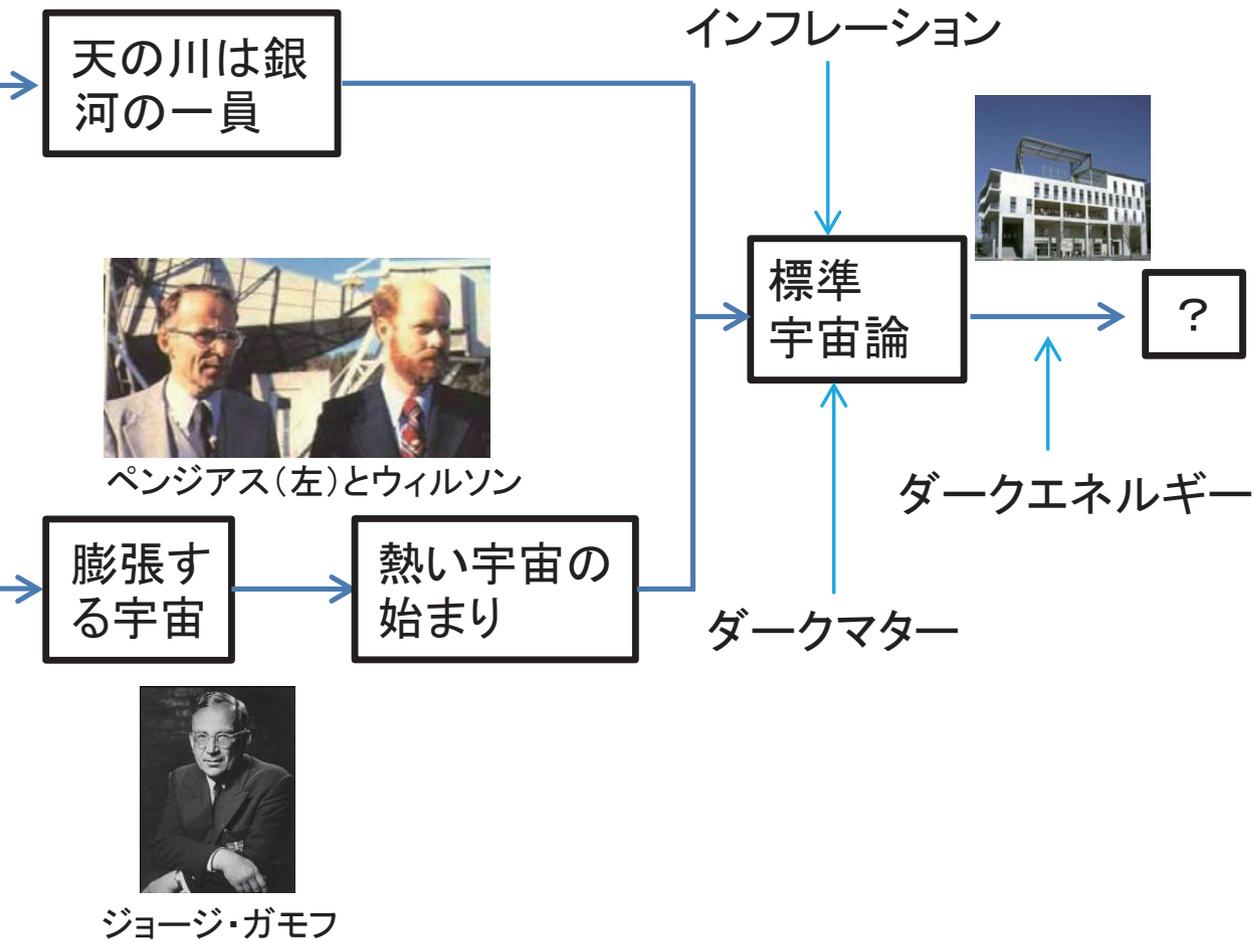
に膨張するものと仮定する。すると、すべての天体の間の距離が等倍されることになる。結果として、距離が大きければ、それに比例して距離の増加分も大きいことになり、距離の増加分に比例する膨張の速度も大きくなるのがわかる。

ハッブルは、リーヴィットの距離決定の方法を用いて銀河までの距離を求め、スライファアのデータと比較することで、膨張の速度が距離に比例することを見出した。1929年のことである。宇宙の空間は、静的なものではなく、ダイナミックに変化するものだった

のだ。

### ビッグバン

宇宙には始まりがあり、それは熱く、密度の高い状態であったことが明らかになったのは、1965年のことである。1940年代後半には、ガモフ (G. Gamow) と彼の共同研究者が、元素の起源を説明するために、熱い宇宙の始まりを提唱した。元素の起源、そして宇宙の起源については、この後、ガモフらと、ホイール (F.



Hoyle) らの間で激しい論争が繰り広げられることになる。ホイルは、元素は星の中での核融合反応によって生じたと考えた。また、宇宙については、始まりも終わりもなく、ただ膨張を続けている、という定常宇宙論仮説 (Steady State Cosmology Hypothesis) を提唱したのである。

この論争に決着をつけたのが、ペンジアス (A.Penzias) とウィルソン (R.Wilson) による宇宙マイクロ波背景放射の発見である。熱い宇宙には、温度に応じた光が充ち満ちていたと考えられる。その光は、

膨張にともなって宇宙の温度が低下していても、消え去ることなく残っている。それが宇宙マイクロ波背景放射である。ペンジアスとウィルソンが偶然に発見した電波を温度に換算すると、絶対温度約3Kであった。論争に破れたホイルは、しかし、ビッグバンの名付け親ということで、一般に記憶されることとなったのは、これもまた歴史の皮肉であろう。ラジオ番組で、ガモフの理論をからかって、「大爆発=ビッグバン」と呼んだのこそ誰であろうホイルであったのだ。一方で、元素の起源については、水素、ヘリウムはビッグバン

で作られ、一方、重い元素は星で作られる、ということがわかり、ガモフもホイルも正しかったことが後に明らかになった。

## 標準宇宙論パラダイムのほころび

20世紀に確立した新たな宇宙論のパラダイム、膨張する宇宙、熱い宇宙の始まり、そして、宇宙に満ちあふれる銀河という描像が、標準宇宙論を導いた。しかし、20世紀も後半になってくると、標準宇宙論にもまたほころびが目立ち始める。

ビッグバンの困難を解決し、現在宇宙に見られる多様な構造の種を生み出す機構として提案されたのが、宇宙初期の急膨張、インフレーションである。真空が莫大なエネルギーを持ち、空間を急膨張させ、真空の量子的な揺らぎを物質密度の揺らぎに転換させたのがインフレーションだ。膨張によって、宇宙はいったんほぼ空っぽになり、その後、真空のエネルギーが熱や粒子に転化してビッグバンが開始された。1992年、COBE衛星による宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎが発見され、その揺らぎの空間パターンがインフレーションの予想するものとほとんどぴったりと一致したことから、現在ではインフレーションは、標準宇宙論に組み込まれた一つのピースとなっているといっても過言ではない。

ダークマターもまた、標準宇宙論に組み込まれた

ピースである。ダークマターは、1930年代にツビッキーによって「発見」された。彼は、銀河団に所属する銀河の固有運動を調べ、見えている物質の作る重力では、銀河を銀河団にとどめておくことができないことを見出したのである。とどめておくためには、大量の見えない物質＝ダークマターの存在が必要となるのだ。その後、銀河の回転曲線や重力レンズといった方法によって、ダークマターの存在はほとんど揺るぎないものとなっている。未だ、正体は不明であり、現在、ダークマターの候補となる未知の素粒子の探査が盛んに行われている。例えば、IPMUも、神岡鉱山でXmassという直接探査実験を推進している。また、スイス・フランス国境で稼働しているLHCでは、ダークマター候補となる素粒子を作り出そうとしている。

標準宇宙論パラダイムを、ことによると瓦解させてしまうかもしれない最も危険なほころびこそ、ダークエネルギーである。ダークエネルギーは遠方の超新星の探査によって、1998年に「発見」された。超新星（とくにIa型と呼ばれるタイプ）は、その減光の時間変化から、真の明るさを知ることができる。これを見かけの明るさと比較することで、遠方の宇宙までの距離を測定できるのだ。距離が求めれば、赤方偏移と距離の関係から、遠方での宇宙の膨張速度を決定できる。調べてみると、遠方、すなわち過去の宇宙では、現在よりも膨張の速度が遅かったのである。これは膨張が加速していることを意味する。

膨張の加速は、とてつもなく奇妙な現象である。通常の重力は引力しか及ぼさないために、膨張速度を遅くする働きのみをするからである。加速するためには、何らかの斥力、つまり反重力を及ぼす存在が必要となる。すぐに思いつくのが、アインシュタインの宇宙項だ。また、インフレーションを引き起こした真空のエネルギーも、有力な候補である。そこで、宇宙を加速させる未知のエネルギーのことをダークエネルギーと呼ぶようになった。しかし、これは名前をつけただけのことであって、実際の正体は全く持って不明である。ダークマターと違って、ダークエネルギーは非常に希薄に宇宙全体に拡がっているために、直接検出はほぼ不可能である。現在のところ、ダークエネルギーに迫る唯一の可能性は、宇宙の膨張速度の詳細測定だ。赤方偏移の関数として、膨張速度がどのように時間変化しているのかを決定できれば、ダークエネルギーの時間進化や物理的性質の一端を知ることができる。そのために、超新星や銀河などの大規模な探査計画が立案、実行されている。

銀河を用いてダークエネルギーを測定するには二つの方法がある。まず、遠方の銀河が被る重力レンズ効果を用いる方法である。この重力レンズ効果は、途中のダークマターが作る構造によって引き起こされる。構造がどれだけ育っているかによって、効果の大きさが異なる。一方で、ダークエネルギーは空間を加速させる斥力として働くため、その量が多くなると、

構造が重力によって集まってくるのを阻害する。構造が育ちにくくなるのである。構造の育ち方で、ダークエネルギーの時間進化を求めることが可能となるのだ。もう一つの方法が、バリオン音響振動 (Baryon Acoustic Oscillation) という効果を用いる方法である。銀河の分布には、初期宇宙での音響振動に起因する特別なサイズの構造が存在している。このサイズの物理的な長さは、理論的に予想できる。一方、観測される見かけの長さは、途中の空間を支配しているダークエネルギーの量によって変化する。つまり、遠方にあるこの構造を測定することで、ダークエネルギーの量が決定できる、というわけである。

IPMUでも、すばる望遠鏡と組んでダークエネルギーの探査をすすめている。まず、2011年度中には稼働をはじめる超広視野カメラHSCを用いて、遠方の銀河が被る重力レンズ効果の測定を行う。次に、次世代多天体分光器PFSによって、バリオン音響振動を測定し、さらに詳細にダークエネルギーの情報を得るための計画を立案中である。

果たして、ダークエネルギーは標準宇宙論にはめ込むことのできる一つのピースに過ぎないのだろうか。それとも、ここまで100年をかけて培ってきた標準宇宙論を覆し、全く新たなパラダイムへのシフトを促す先兵なのだろうか。その答えを探し求めることごと、IPMUの大きな使命といえよう。