

地平線

ヤン・ヘンドリック・オールト

誰でも若いころに、船がどんどん沖へ遠ざかり、ついには消えて見えなくなってしまう様子を見たことがあると思います。最初に船体が見えなくなり、マストだけが残って見えます。さらに船が遠のくと、最後にはマストの先まで「地平線」のかなたに沈んでしまいます。子供のころはみな、この地平線に好奇心をそそられ、あの向こうにはいったい何があるのだろうかと考えたものです。大人にも同じような好奇心があります。大人は地平線へ向かって船をくり出し、新たな地平線がさらに広がっていることを見つけ、行けども行けどもその繰り返しであることを発見します。そして、ついには地球を一周し、世界を発見したのです。

しかし、まだわれわれの頭上に広がる宇宙、太陽や月、それに星の世界があります。古い文書の伝えるところによれば、太古の昔から人は、天空をわれわれの世界の外縁だと考えていたようです。昔は宇宙船がありませんから、天空まで行くことはできませんし、誰も天空までどれほどの距離があるのか知りませんでした。

しかし、ギリシャの思想家たちは、天をも含めた世界のモデルを考え出しました。その中には、他にも多くのアイデアがありましたが、中でも彼らは、月食は月が地球の陰に入るために起こることを明らかにし、その影が丸いことから、地球は球体に違いないと推論しました。また、この月食の影を観察することにより月までの距離を測ろうとしました。月の動きはたいへん速く、天空をほんの1か月で回るのに対し、太陽は1年かかることから、太陽への距離は、月までの距離より相当大きいはずだという、正しい推測をしていました。したがって、地球が月へ落とす影は筒状で、影の半径は地球の半径と一致すると考えられました。地球の半径がわかれば、月の影の角半径を測ることにより、月までの距離がわかります。地球の半径は、エラトステネスが、エジプトのシエネとアレキサンドリアの直線距離と、両市の天頂を通過する星の角距離とを使って求めました。こうして計算された月までの距離は、地球の半径の60倍、すなわち40万キロメートルということでした。これが宇宙における距離を測定し

た最初で、たいへん飛躍的な進歩だったのです。

次の飛躍、つまり惑星や太陽までの距離が求められるようになるまで、ほぼ2000年かかりました。

ギリシャの天文学者たちが考え出した宇宙のモデルは、すべての天体が回転球殻に固定されているというものでした。一番外側の球殻、すなわち「第十天」には恒星が含まれ、その内側には土星のある球殻があります。この球殻は外側の球殻につながる独自の回転軸を持ち、この回転軸の周りを回転します。次に木星の球殻があり、これも、土星の回転球殻につながる回転軸の周りを独自に回転しています。同様に、火星の回転球殻、金星の回転球殻、水星の回転球殻、そして月の回転球殻があります。それらの中心に地球があり、これは動きません。回転殻自体は水晶のように透明で、内側の球殻が外側の惑星に向かう視野をじゃますることはありません。このモデルはプトレマイオスの有名な著作『アルmagest』に詳しく説明され、またこの著書はその後、何世紀ものあいだ、天文学の教科書として使われたため、後世に伝えられることになりました。

16世紀になって、ようやくこのプトレマイオスの理論は、コペルニクスによって重大な挑戦を受けることとなります。コペルニクスは、星の日周運動は見かけ上は星が動いているように見えるが、実際に動いているのは地球で、星は静止していると考えたほうが理屈が通ると指摘したのです。それだけでなく、コペルニクスは、太陽がわれわれの周りを軌道を描いて回っているのではなく、われわれのほうが太陽の周りの軌道を回っているのだとも指摘しました。こうして、まったく新しい惑星システムのモデルが、コペルニクスとその一派であるティコ・ブラーエ、ケプラー、そしてガリレオによって打ち立てられました。この時代は、機器の技術的改良と、ティコやケプラーといった科学者たちの熱意によって、宇宙における距離の計測に関して、第二の大きな飛躍が見られたときでした。この計測は、惑星への方向を2か所から測定することによって行われました。地球の自転のため、天文台は地球をぐるっと回ることになり、それによって惑星をほんの少し違った方向から観測することができます。地球の半径がわかっていますから、観測者は、二つの観測地点A、B間の距離もわかっています。二つの方向APとBPとのなす角を正確に測定することにより、APBという三角形が考えられ、AP、BPの距離が求められます。距離を求めるのに最も重要なAP、BPのなす角は1分(60分の1度)以下ですから、この計測はたいへんな作業だったはずです。このようにして惑星システムの規模が測定され、ニ

ニュートンがそれによって最終的に太陽系を解明することになる、素晴らしい「万有引力の法則」の基礎ができあがったわけです。

ところで、恒星のほうはどうでしょうか。恒星は動かないことから考えて、惑星よりずっと遠くにあるにちがいありません。しかし、どれくらい遠いのでしょうか。初期のころの科学者たちはすでに、恒星は太陽と同じような性質のものだろうと推測していました。そうだとすると、恒星の距離は、太陽までの距離の100万倍ぐらいあることになり、それはケプラーの時代では、他のものをはるかに超える距離でした。この場合も、3世紀前のティコ・ブラーエの時代同様、技術の進歩、特に大型の望遠鏡、つまり当時のいわば「宇宙船」の建造により、恒星への距離の計測が可能となりました。惑星の距離を測ったときと同様、この場合の計測も三角法が用いられました。ただし、今回は、三角形の基本となったのは地球の直径ではなく、地球の軌道の直径（地球の直径の25000倍）でした。それでも、この測定にはギリギリの距離で、APとBPのなす角度は1秒以下、すなわち、2キロメートル離れて1ダイム硬貨を見るときにできる角度だったのです。

観測により、恒星の光度は太陽に匹敵することが確認されました。

また、計測によって恒星は静止しているのではなく、かなりの動きがあることがわかりました。グロニンゲン大学の若いオランダ人天文学者、J・C・カプタインは、多くの星の動きに、ある規則的な傾向があることを発見し、これが星流として知られるようになりました。これが「恒星運動学」の最初の発見でした。

巨大な新しい世界の探検が始まりました。いくつかの研究所が意欲的に取りかかり始め、グロニンゲン大学もその一つでした。

星の世界が無限に広がっているものでないことは、かなり以前からわかっていました。しかし、どの程度の広がりがあるのか、またどんな形をしているのか等については、まったくわかっておりませんでした。カプタインは、それを解明することを自らの課題とし、また、星の動きと、星々をまとめている力についても取り組もうとしました。

この星群は、天の川、または銀河と称されていますが、その研究がまだ初期の段階にあったころ、私は大学に入ったのでした。カプタインの名前に引かれてグロニンゲン大学に入った私は、すぐに彼が講義で発する魅力に取りつかれてしまいました。私は心酔のあまり、最初の年には、法学や医学を専攻する友

人たちにまで、この講義を受けさせようとしたほどでした。科学者たちの努力と熱意とによって、新しい世界が今、まさに解明されんとしている、そんな環境の中で学生として学ぶことができたことは、何よりも幸運だったと思います。

この世界には、相当数の星の成因が含まれており(1,000億ともいわれていますが)、すべてを研究することは不可能でした。そのためカプタインは、天空に広がる200ほどの狭い領域に限って観測をし、その限られた領域内では、どんなに光の弱い星も見落とさず観測するという方法を提唱しました。彼は、仲間を熱心に説得し、世界各地のいくつかの天文台に、彼の「選択領域計画」に加わるよう説得しました。グロニンゲン大学には望遠鏡がありませんでしたので、もっぱら他の天文台で得られたプレートの計測に努めました。しかし、膨大な数の計測を行うには、スタッフの数はあまりにも少なすぎました。そこでカプタインはひるまず、囚人をこの作業に借り出す許可を得て、人手不足の問題を解決しました。

私がまだ学生でいるあいだに、この壮大なプロジェクトの暫定的な結論が出ました。いわゆるカプタイン・システムとよばれるこの大胆な最初の銀河系モデルでは、太陽は直径が約1万5000光年、厚みはその5分の1程度の回転楕円体状の星群の中心近くに位置しておりました。星群の赤道面が天の川の面に一致し、銀河という名前がつけられたのです。もちろんはっきりした境界があるわけではなく、星の密度が徐々に外へ向かって薄れてゆくといったものです。外側は中心近くの密度の約10分の1になっています。

私自身がグロニンゲン大学で行っていた研究は、星の動きに関するものでした。私の学生仲間の一人が、すべての星の運行速度の平均に比べてずっと速い星の独特な動きについてふれた論文を見せてくれました。私はこの現象をおもしろいものだと思います。その研究の成果は、私の文章で天文学誌に載った初めてのものとなり、のちの私の博士論文の基礎にもなりました。

もちろん私は、カプタイン・システムとその宇宙における位置、といった研究にも加わっていました。「カプタイン派」の中では、われわれの周りにある大きな星群こそが宇宙であり、それは星群の表面で集結していると考えられていました。

ちょうど同じころ、カリフォルニアのウィルソン山頂天文台で若い天文学者、ハロー・シャープレーにより、まったく違う方法で宇宙の研究がなされていました。シャープレーはいわゆる球状星団を集中的に調べました。球状星団は、

数十万単位の恒星が球状に集まったものです。シャープレーは、様々な方法を使ってこの球状星団内の特殊な変光星を調べることにより、球状星団までの距離を計測することに成功しました。その結果、数万光年というずいぶん大きな距離であることがわかりました。もしこれが正しければ、球状星団はカプタインの宇宙の境界をずっと越えた所に存在することにもなります。約 100 個の星団が一つの群れを形成しています。それが、カプタイン・システムのずっと外側、約 2 万光年の所にある点を中心として集中しています。そして、特に興味深いのは、その中心点が、カプタインのディスクと同じ平面上、つまり天の川と同じ平面上に位置するということです。

シャープレーは、実際の銀河系は彼のいう球状星団の分布に描かれているようなものであり、カプタインの「宇宙」は、この大きな球状星団の群れのあちこちにある「島」の大きなグループの一つにすぎないと考えました。しかし、その当時はこの見方では、まったく説明不十分だと思われていました。なぜ、他の島はみえないのか、なぜ大きなシステムの中心が、われわれの島のあちこちにあるのか等、いくつかの疑問が提出されました。

最終的な解答は、カプタインの一派やシャープレーが考えていたのとはまったく違うということが明らかになって、初めて出てきました。実際の世界は、たしかに星団の群れの広がりではあるのですが、形状は似ていません。球状星団はほとんど球に近いシステムをつくって分布しているのに対し、実際の星群は薄い円盤状で、厚みは直径の 100 分の 1 以下です。このモデルは、グロニンゲン大学での調査結果と一見、矛盾するようにみえるかもしれませんが、実際は矛盾しないのです。グロニンゲンの天文学者たちは、主として天空上に一様に広がっている 206 の地域を観測しました。しかし、これらの領域のみを集中的に観測したため、円盤状のシステムの薄い帯を見落としてしまったのです。もう一つ重要な要素は、この円盤状のシステムの大部分が星間雲に吸収され、隠されていたことです。当時は、それらがすべて薄いディスクの中に完全に入り込んでいたため、その重要性が見過ごされていたのです。実際、ある円より外側の銀河ディスクはすべて見えなかったのです。

複雑な構造の銀河系の真の姿は、徐々に、部分的にしか解明されませんでした。銀河系の成因がすべてディスクの中に存在しているわけではなかったことも、なかなか解明されなかった理由の一つです。銀河系は、ディスクへの集中の度合いが異なる様々な成因が混合したものです。極端な場合には、ディスク

にほとんど何の関連も示さない球状星団などもあります。

成因の違いは、それらの動きに強く現れます。ここで、私がグロニンゲン時代に研究した高速の星の特徴があてはまってくるのです。しかし、私の頭にはあまりにカプタイン・システムがこびりついていて、われわれを取りまく星が実際はずっと大きく、連続的なディスク・システムの一部であるというようなモデルを考えつくには至りませんでした。このモデルは、1925年にスウェーデンの天文学者、バータイル・リンドブラッドによって取り上げられ、われわれの周りをゆっくり動いている星は、球状星団のシステムを中心周辺の速い回転運動を共有するものであると唱えました。リンドブラッドは剛体回転を考えていました。しかし、私は、銀河系の大部分が中心に向かって集中しているのだから、回転角速度は、ちょうど太陽系の惑星の運動のように、中心に向かって速くなっているはずだと悟りました。それ以前に私は、天の川にある遠くの星が規則的な、説明のつかない動きをすることに気がついていました。そして、これらの動きは、内側が外側より速く動く星の回転運動にみられる独特の動きである、とひらめいたのです。このことが、1927年の銀河差動回転運動の発見につながるのです。この動きは、銀河系が回転している中心は射手座のあたりにあり、球状星団のシステムともピッタリ一致することを確認することになりました。これは、素晴らしい発見でした。太陽系の惑星の動きをうまく解説できた引力の法則が、太陽系の数百万倍もの大きさの銀河系にもあてはめることができ、また太陽系と銀河系の間には類似性が強くみられるのです。

それ以降、数年のあいだに銀河系の構造と内部の運動のほとんどの特徴が解明されていきました。しかし、一つ重要な未解決の問題がありました。ディスク内の掩蔽により、重要な部分は星間雲に吸収され、見えないままだったからです。中心部は観測できませんでしたが、この中心部こそ、のちになってたいへん興味深い現象の生じている場所であることがわかるのです。また、ディスク内に渦状の星雲のような大型の構造があるかどうかも観測できませんでした。約20年後、電波天文学の発展により、ようやくこの領域での謎が解明されました。

しかし、それよりも何年も前、銀河の探求の初期のころ、もっとずっとスケールの大きな問題が生じていました。すなわち渦状星雲の正体は何であるのかという問題です。ウィリアムとジョンのハーシェル親子が大型望遠鏡を使って、あの有名な空の観測を行っていた際、星や星団の他に、数多くの星雲状のもの

があることを発見しました。それらの多くが明らかな渦巻状の構造をしていたため、通称、渦状星雲とよばれました。これら星雲の正体については、多くの問題がありました。シャープレーを含めた、幾人かの天文学者は、これを銀河系の内部にあるものと考えました。一方、これらの星雲はもっとずっと遠い所にあるものと考え、われわれの銀河系のような独立した星の系、いわば島宇宙であると考えた天文学者もあり、のちにこの説が正しいことが証明されました。この星雲はあまりにも遠くにあるため、最大の望遠鏡を使っても、個々の星を識別することはできず、したがって渦巻状の構造をしているように見えるのです。

私はすでに学生時代、これが真実であることを確信し、渦状星雲がわれわれの目を新しい宇宙へと向けました。私の講演の後半は、この不思議な世界についてです。

しかし、それに入る前に、われわれの銀河系の話をもとめておかなければなりません。電波天文学の発展により、今まで考えられもしなかったような新しい研究方法が出てまいりました。ベル電話会社のエンジニア、ジャンスキーは、電波受信機に入る雑音の原因を調べてゆくうちに、それが太陽の方向と関係があることを発見しました。また、天の川の位置、特に銀河の中心の位置にも関係していました。ところが驚くべきことに、光学天文学者が無関心であったために、ジャンスキーの発見が宇宙の研究にとって重要であることがわかったのは、それから20年もたってからでした。そこで、ベル社の別のエンジニアが調査活動を始めました。1945年ごろ、グルート・レーバーが自宅の庭に、銀河を観測するための電波望遠鏡第1号をつくりました。銀河系の構造を調べるにあたって電波を利用する利点は、はっきりしています。つまり、メートル、あるいはデシメートル単位の波長を持つ電波は、われわれが銀河系ディスクを観測する際、視野をさえぎってきた塵雲の中をじゃまされずに通過することができるのです。しかし、波長が長いと、必要な解像力を得るには口径の大きな望遠鏡が必要です。ルーバーの観測の結果がたいへん有望なものだったため、銀河の調査に最初から深くかかわってきたオランダ人天文学者たちは、銀河の構造の調査をするに足るだけの大きな口径を持った電波望遠鏡をつくる計画を立てました。そこで、銀河の最も遠い区域の構造まで観察することができる、波長21センチメートル、口径25メートルの電波望遠鏡をつくることを提案しました。この波長が選ばれたのには特別の理由があります。オランダ人天文学者、

ヴァン・デ・フルストが、ヘリウムと共に星々のあいだの空間を埋めている水素原子がこの波長で電波を出していることを明らかにしていたからです。この波長で星間にある水素雲の正確な観測を行えば、水素雲の密度だけでなく、速度もわかることとなります。また、電波望遠鏡は、隠れている区域を中心近くまではっきりさせ、この区域での回転速度を計測することができます。

大型の電波望遠鏡が完成したのは、やっと 1958 年になってからでした。ただ幸運なことに、ドイツ軍が撤退するとき砂丘に残っていた 7.5 メートルのレーダー望遠鏡の一つを、郵政局がわれわれに提供してくれました。観測は 1952 年に始められ、1954 年には、オランダから見える範囲の銀河系全体の水素密度と速度の地図ができあがっていました。これは銀河系ディスクの初めての地図であり、たいへんな成果でした。熱心な学生たちがお互いに励ましあい、昼夜を問わず働いて、その作業の大きな部分を担いました。ほんとうに良き時代だったと思います。

できあがった地図では、銀河系は明らかな渦状の構造をしており、ここでも銀河系と渦状彗星雲との類似性を確認することになりました。

また、水素の 21 センチ波はたいへん興味深いものでしたが、銀河系の発する別の電波も、またまったく新しい、隠されていた事実をわれわれに教えてくれました。電波の大部分は、われわれがよく知っている光線のように原子の小さな振動からくるのではなく、銀河系内の磁場で何光年もの半径の軌道を描きながら回っている超高速の電子からきているのです。この種の放射線は、原子核の構造を調べるために用いられる大型の粒子加速器で見られることが知られていました。したがって、これはシンクロトロン放射とよばれ、その特徴の一つは偏光しているということです。通常の光のように光が勝手な方向に振動するのではなく、光の振動が一つの方向に限られるのです。シンクロトロン放射が、それまで自然界で観察されたことはありませんでした。

いろいろな成り行き上、私はこの放射の発見の初期の段階にかかわることになりました。きっかけは、空でおそらく最も目立っている星雲の一つ、かに星雲の観測でした。かに星雲は、1054 年 7 月 4 日、牡牛座の中の名もない、光の弱い星が爆発してできました。爆発後、1 年間はいへん明るく、昼間でも見えたほどでした。この星は、ほとんど完全に分裂し、その破片は猛烈なスピードで飛び出してゆき、数世紀たって、それが星雲として観測できるくらいにまで成長したのです。1954 年に私は、ライデン大学のバアルラベン博士に、膨張に

よってどれぐらい光度が落ちたかを調べてもらいました。バアルラベン博士は観測に天才的に優れた方ですが、さらにもう一步進めて、光度だけでなく、偏光も調べました。ソ連の科学者がかに星雲の光には偏光が見られることを発見したという話を聞いていたので、これが正しいかどうかを調べようとしたのです。結果、偏光があるのはもちろんのこと、偏光の程度があまりにも高いため、偏光は星間の塵による解析によって生じるという従来の偏光発生メカニズムでは説明がつかないことがわかりました。したがって、この偏光はかに星雲が発する光の固有のものであり、よってこの光はシンクロトロンに類しないと確認されたわけです。これは、何とも刺激的な発見でした。寒い2月の夜、バアルラベン博士と望遠鏡の横で、世界初のシンクロトロン地図をつくりあげてゆくのを見守っていたときは、われわれ二人の人生において最良の時だったと思います。

小さな望遠鏡を使って、しかも明かりがこうとうともった都会の真ん中で観測するという悪条件にもかかわらず、このように革新的な結果が得られたのは、バアルラベン博士の才能のおかげに他なりません。

では、もっと大きな宇宙の探検の話に戻しましょう。

われわれは、自分たちの生きている巨大な星群の限界を探求し、カプタインの「宇宙」も、シャープレーの球状星団のシステムも、完全な宇宙ではないことを発見しました。これらは、はるかに広がる大洋に浮かぶ島でしかなく、大洋にはまだいくつもの島があるのです。渦状星雲もこのような島の一つであり、その数は膨大です。ウィリアム・ハーシェルと息子ジョンは、過去2世紀にわたる観測の結果を調べ、数千にもものぼる星雲をすでにリストアップしていました。星雲、あるいはこれは銀河とよぶべきかもしれませんが、われわれの銀河系にある星の数ほど膨大なものが存在するのです。南カルフォルニアのパロマ山頂にあるヘール天文台の5メートルの望遠鏡で露光時間を長くしてとったプレートを見ると、その中に2種類の像が見られます。境界線のはっきりしているものと、不明瞭なものです。最初の像は太陽のような恒星の像ですが、この恒星は数千光年離れています。境界のはっきりしないほうの像は銀河で、それぞれに少なくとも、1,000億個の太陽が集まっており、境界のはっきりした像を示す星の約100万倍遠くに位置しています。

探せば探すほど、銀河は見つかります。これに終わりはあるのでしょうか。われわれの銀河系の中の星が銀河をつくっているように、銀河が集まってさら

に大きな群れをつくっているのでしょうか。そうだという証拠は何もありませんが、この銀河の世界には終わりが無いように思えます。

これらの群れの配置を見ていると、とうてい無秩序とはいえません。群れは集まってゆく傾向があります。2倍、3倍と規模の様々に異なった群れのグループから、数千もの群れの集まったグループまでいろいろです。複雑な構造になっていることがわかります。大きな星雲団である乙女座星雲がありますが、正確に示すにはあまりにも規模が大きすぎてできません。

一般には、大きな銀河団はやや円に近い形になっており、直径は1億光年単位のものです。さらに、それより直径が100倍も大きなものもあり、超銀河団とよばれています。この超銀河団の形状は円形とはほど遠く、ひも状のものさえあるほどで、ふつうは不規則な形をしています。超銀河団が非対称な形をしているということは、誕生以来、大きな混合が起きたことはないことを示していると思われまゝ。つまり、今、われわれが見ているのは、その形成過程にあるものなのです。これは、たいへんおもしろいことです。超銀河団を研究することにより、銀河がどのように発生したかがわかるかもしれないからです。ここ5年ほど、私はこの研究に深くかかわってきております。

一方、われわれの宇宙に関する認識は、大幅に変わってまいりました。今世紀の初頭に、望遠鏡やスペクトログラフをつくる技術が進歩して、たいへん質の良い銀河のスペクトラムがとれるようになりました。その結果、銀河のスペクトル線のドプラー・シフトを測り、その速度を出すこともできるようになりました。銀河の半径方向速度からおもしろいことがわかってきました。銀河はすべて高速で遠ざかっており、それはわれわれの銀河系では見られない速さです。銀河が遠くなればなるほど速度も増していました。ハッブルは、この銀河の動きが距離に比例することを証明するのに成功しました。これは、銀河がわれわれから遠ざかっているだけでなく、銀河相互も遠ざかっていることを示しております。つまり、宇宙は「膨張している」のです。この驚くべき現象は、その後の観測結果によっても確認されました。そして、この現象はハッブルの膨張とよばれ、膨張率はハッブル定数といわれます。

したがって、初期の時代、銀河は互いにもっと近い場所にあったはずですし、すべてが一つの場所からスタートした時点があったに違いありません。もし膨張率が一定であったとしたら、この時点（いわゆるハッブル時間）は約200億年前であったこととなります。実際は、膨張率が一定であったとは考えられま

せん。銀河間の引力や相互作用によって減速されていたはずですが、したがって膨張は昔のほうが速かったでしょうし、そうなるとスタートから今日までの時間も、先ほどの見積もりより短くなります。現在では、スタートから今日までの年数は130億年と考えられており、これが「宇宙の年齢」なのです。

銀河は、遠くなればなるほど、光が弱くなります。原則的には、見かけの明るさから距離を計算することができます。

宇宙という「空間」のはるか彼方にあるものを見るということは、過去の「時間」を振り返ることでもあります。しかし、時間を見てゆくことにも限界があります。この限界が、宇宙の年齢であり、現時点では、130億光年に相当します。ここに、船が岸から遠ざかってゆくときに見えた地平線とはまた別の「新しい地平線」があります。この地平線を越えるためには、忍耐強く待つしかありません。今から10億年たてば、今観察できる最も遠い銀河より10億光年かなたにある銀河を見ることができます。このように、観察できる銀河の数は増え続けているのです。

では少し見方を変えて、宇宙が過去にどうであったかを見てみましょう。できるだけ昔にさかのぼるためには、最も明るい天体を選ばなければなりません。このような天体はよく、たいへん強い電波を発しているのわかります。特に、宇宙の進化を調べるのに有効なのは準星とよばれる銀河で、たいへん明るい核を持っているのが特徴です。これらはたいへん明るいのですが、同時にずいぶん遠くの天体で、現在、われわれの所に到達する光は、宇宙が今より5~10倍若かったころに発せられた光です。

宇宙と共に膨張してきた体積をとって、これらの時代の準星の数を数えると、その体積あたりの準星の数の密度は、今までに相当進化してきたことがわかります。初期の時代の密度は現在の数百倍であり、おそらく誕生率も同じように大きかっただろうと思われれます。同様に、相当数の増加が、たいへん強い電波銀河にも見られます。なぜこのような爆発的な誕生率となっているのかということは、まだ解明されておられませんし、これら初期の時代に、新しく銀河がつくられたという徴候は何も見つかっていません。この問題については、現在、熱心な研究が進められている最中です。

宇宙は必ずしも、初期のころから、星や銀河によって構成されていたとは考えられません。初期のころは、ほとんど放射線と粒子で満たされていたに違いありません。かなりの高温、高密度だったはずなので、凝集して星を形成する

ことは不可能です。それが、膨張するにしたがって温度が徐々に下がり、数千度にまで下がったとき、銀河や星の形成が可能になったのです。われわれは、今、高温状態にある宇宙を直接観察することはできませんが、一つ、初期の宇宙の特性に関して貴重な情報があります。つまり、水素に対するヘリウムの量です。一般に、大量のヘリウムが星から生成される可能性はないと考えられており、したがって現在見られる全質量の 25% のヘリウムは、宇宙のごく初期の段階でつくられたものに違いありません。ビッグバンとよばれる宇宙の始まりの 3 分後、膨張によって温度が 10 億度程度にまで下がり、ヘリウム核が形成できるような温度と圧力の条件が整いました。しかし、膨張が速かったため、適切な条件が整っていた時間は短く、ヘリウム核の数は、この条件が満たされていた時間の長さ、温度、そして密度によって決まることになりました。温度と放射密度は膨張とともに下がり続け、ビッグバン後、約 130 億年経た現在では、温度は 3K にまで下がりました。

天文学者たちがこの温度を測定できたのは、科学の偉大なる勝利の一つといってもよいでしょう。1964 年にベル電話会社のベンジャスとウィルソンが、宇宙が温度 3K の放射線で満たされていることを証明することに成功し、したがって宇宙誕生 3 分後の温度は 10 億 K で、ヘリウム形成に最も適した温度であったこととなります。

これは、宇宙論における素晴らしい成果であり、最大の発見の一つであるといえるでしょう。しかし、だからといって、まだ未解決の大きな謎があることも忘れてはなりません。例えば、現在の宇宙に見られる大きな構造は何から生じたものなのか、また、もし膨張によって二つの領域が決して接することがなかったとすれば、逆方向からくる 3K の宇宙背景放射がなぜほとんど等しいのか、そして、何がビッグバンを引き起こしたのか、等の問題がまだ残っているのです。

また、宇宙論がどれほど素粒子物理学の中に組み込まれているのか、よく考えると、興味深いことだと思います。宇宙が生まれた直後の数秒間に起きた出来事を解明してゆくうえで、われわれは物理学者から多くのことを学びました。また逆に、宇宙の膨張は、大型の加速器の中でもとらえられないエネルギーの領域に突入しており、物理学上のいくつかのたいへん深遠な問題を解決するのに役立つのです。

宇宙は、ごく初期のころは、全体でも極めて小さなものでした。一滴の露よ

り小さなものであったかもしれません。しかし、その小さな宇宙の中に、今の宇宙の謎のすべてを解く鍵が含まれているでしょう。一茶の句にも、「露の世は露の世ながら さりながら」とあります。

実際の宇宙は、一滴の露のさらに何十分の一のものであったかもしれませんが、その中にその後大きくなっていった宇宙の様々な現象の元となる種が入っていたのです。