

A. 自然

5. 宇宙の大規模構造

(銀河系・銀河団・超銀河団)

はじめに

本日は、JWTC 春の特別セミナー(2)にお招きをいただき、大変光栄に思っている。

この講演は、「被造物管理の神学」に基づき、シリーズでお話をさせていただいている。「自然篇」の5回目の講演である。先週は、JWTC 春の特別セミナー(1)として、我々が住む太陽系について講演した。今日は、その続きで、現代科学が明らかにした銀河系、さらにその奥に広がる銀河群、銀河団、超銀河団などについて解説したいと思う。

もう50年近くも前のことである。丹沢の山奥、その川べりで小学生の子どもたちと夏のキャンプをしていた。楽しいバーベキューも終わり、キャンプファイヤーの火も消え、あたり一面が真っ暗闇になった。その時突然、満天の星が現れた。手が届きそうなすぐ近くまで星が下りてきた。そこはまさに、自然だけの世界、神秘の世界、神の世界のようだった。私にとって、あの時ほど強烈に、夜空に輝く星に感動した経験はなかった。

この講演をお聞きの皆さんも、きっと同じような経験をおもちではないかと思う。そして、北極星はどれだろう。北斗七星は？ あの星はどれくらい離れているのだろうか。この宇宙はどんな風に行き来しているのだろうか。宇宙の果てはあるのだろうか。そんな思いに駆られたことがきっとあったことと思う。

I. 太陽系外惑星

これまで太陽系内の天体について考察してきた。そのほとんどは人間の肉眼で見える範囲である。しかし宇宙は広い。太陽系は、宇宙全体から見れば、2,000億(銀河系の恒星の数)×1,000億(銀河の数)分の1の世界である。太陽系を超えた世界は、大きく、大きく広がっている。太陽系から始まって、銀河系、銀河群、銀河団、超銀河団の世界が展開している。

いったい、この宇宙には、恒星と惑星を合わせ、どのくらいの数の星があるのだろうか。ごく最近までは、観測可能な星の数は、10の23乗(1兆の1000億倍)と言われてきた(これは1,000垓にあたる)。しかし、2011年にアメリカの天文学者たちは、実際にはこの3倍の星がこの宇宙に存在していると計算している。まさに天文学的な数字である。このような数は、我々人間が通常感覚で理解できる範囲をはるかに超えている。それにしても、そのような測定法を考え出した人間の知恵の見事さにもまた驚く。自然と自然を把握する人間の叡知は驚嘆以外の何ものでもない。

ではまず、系外惑星の世界を眺めることにしよう。

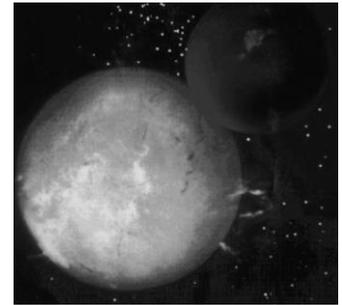
1. 系外惑星の発見に至るまで

系外惑星の発見は、20世紀半ばから多くの天文学者によって試みられてきた。にもかかわらず、長い間発見できなかった。系外惑星は、恒星の近くにある。しかも自らは光らない。そのため、恒星に隠れてしまう。では、どうす

れば発見できるのか。惑星をもっている恒星は、惑星の重力に引っ張られて、ふらふらする。その時、恒星からの光はわずかに変化する。また、惑星が恒星と地球との間に入ると、恒星からの光がわずかにさえぎられる。このような光の微妙な変化を観測しながら、系外惑星の存在を探求していくのである。

20世紀の後半になると、天体望遠鏡あるいは宇宙探査機が驚くほど発達した。それにより、冥王星以遠の太陽部ではあるが、太陽以外の恒星の惑星なので「系外惑星」と呼ばれている。それは太陽系内の惑星とはかなり様相が違っている。従って、「異形の惑星」と呼ばれることもある。様相の違いは、その形成過程の違いに起因する。といっても、太陽系の外側近くにあるわけだから、太陽系形成の初期の名残をとどめている点もあるはずである。太陽系の諸惑星との共通点もたくさんある。今後の系外惑星の調査データが、太陽や太陽系の惑星の起源や形成過程について、多くの重要な情報を提供してくれる可能性がある。

系外惑星が発見され、その研究が本格的に進んだのは1995年以降である。その年の10月、スイスの連星観測のエキスパートだったミッシェル・マイヨールと大学院生ディディエ・ケロスが、恒星「ペガサス座 51 番星」を周回している惑星を発見した。この恒星は、太陽にそっくりで、地球からは 47.9 光年離れている。惑星は、ペガサス座 51 番星から軌道半径がわずか 0.051 天文学単位(約 750 万kmの距離にある)の近距離だった。公転周期もわずか 4.2 日、木星の半分ほどの質量の巨大ガス惑星だった。このような惑星の存在は太陽系では考えられないものだった。太陽と木星(巨大ガス惑星)の距離は 5.2 天文単位なので 100 倍になる。太陽から一番近い水星でも 10 倍近い 0.39 天文単位である。太陽系の惑星は円軌道に近いが、系外惑星のそれは大きくずれた楕円軌道である。



ペガサス座 51 番星

観測者たちはそれまで、太陽系の惑星しか知らなかったもので、太陽系の惑星を念頭に置いて系外惑星を探していた。つまり惑星は、恒星からかなり離れたところにあると思ひ込み、恒星から離れた地点を探していたのである。このような思ひ込みが、長い期間系外惑星の発見を遅らせてしまった。

このような系外惑星に関する情報が分かり始めた途端、系外惑星はどんどん発見されるようになった。アメリカのマーシーとポール・バトラーのグループがよい例である。彼らは 1988 年から系外惑星を探していた。しかし、木星のような長い周期の惑星を想定していたため、軌道の近いデータを解析していなかった。1995 年のマイヨール達の発見を知るにおよび、彼らはそれまで貯めていたデータを急いで解析してみた。すると、「おおぐま座 47 番星」や「おとめ座 70 番星」などに、既に惑星が検出されていた。



ジェフリー・マーシー

さらに彼らは、別の恒星「アンドロメダ座 υ (ユブシロン)」に関するデータを分析した。その結果、3 個の惑星をもっている多重惑星系であることを確認した。一番内側の惑星は、木星質量の 3 分の 2、円軌道の距離は 0.06 天文単位、公転周期は 4.6 日だった。2 番目の惑星は、木星質量の 2 倍、0.8 天文単位の楕円軌道、242 日の公転周期。3 番目の惑星は、木星の質量の 4 倍、2.5 天文単位の楕円軌道、約 4 年の周期で公転していた。

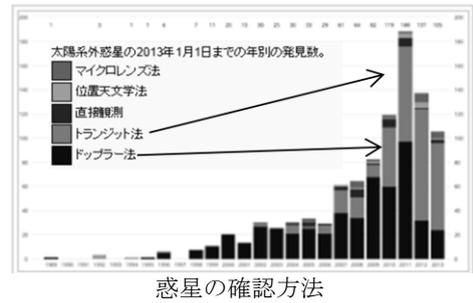
多重惑星系のもう一つの例は、地球から 44 億光年の距離にある「かに座 55 番星」である。この星は 4 つの惑星をもっているが、それぞれの距離は、0.04、0.1、0.2、5 天文単位だった。質量は木星に比べると 0.05 倍、0.8 倍、0.2 倍、3.9 倍、公転周期は短いものが 3 日、長いものは 12 年だった。このような多重惑星系の恒星は、2008 年 1 月までに 25 個発見されている。

多くの科学者たちが太陽系外惑星の調査を進めた結果、現在までに 1,000 個以上を発見している。今後観測が進むにつれ、その数は一層増えていくであろう。銀河系だけでも、2,000 億個の 10%、およそ 200 億個の恒星に惑星があると推測する学者もいる。むろん、系外惑星を画像に収めるような直接的な観測には、未だ一つも成功していない。

2. 系外惑星の発見方法

現時点では、系外惑星を中心星から切り離し、その惑星自体を観測できているわけではない。その惑星が回っている中心星を観察することによって、惑星の存在を確認しているだけである。

間接的に惑星の存在を確認する方法が二つある。一つは「ドップラーシフト法」で、惑星の重力が中心星に及ぼすふらつきを測定する方法である。ハンマー投げの選手を恒星、ハンマーを惑星に例えると分かりやすい。ハンマーを振り回すと、それに引きずられて選手自身もふれ、小さな円を描く。天体観測者は恒星そのものを見ることはできない。しかし、恒星のスペクトルの周期的変化をとらえることで、惑星の存在を確認できる。恒星が観測者から遠ざかっているときは光の波長が長くなり、近づいているときは波長が短くなる。その周期は惑星の公転周期と一致する。このように恒星が周期的に観測者に近づいたり遠ざかったりするのを、恒星が放出する光の周期的な長短を観測することにより、惑星を見つけ出すわけである。



このようなドップラーシフト法を用いての惑星検出方法の理論は、1952年にオット・スツルーベによって提案されていた。しかし、1970年代までの観測機の観測精度は低く、惑星を検出するには不十分だった。この方法による観測は、南フランスにあるオート・プロバンス天文台の1.9メートル望遠鏡によって始めて可能になった。1995年のマイヨールとケロスの系外惑星は、この望遠鏡によって発見された。

ところで、1952年にドップラーシフト法を用いて惑星検出の可能性を提唱していたオット・スツルーベは、もう一つの惑星検出方法を提案していた。それは、惑星が中心星(恒星)の前を通り過ぎるときに星の光が遮られ、一時的に弱まる現象が起こる。もしこの現象をとらえることができれば惑星の存在が分かるはずだと考えた。これは、「トランジット法」といわれる。このトランジット法による明るさの変化率は中心星と惑星の大きさの比で決まる(例えば、地球による太陽の変化は0.1%、木星による変化は1%である)。



オートプロバンス天文台

このように系外惑星が中心星の前を通過(トランジット)することは、「天体の食現象」と言われる。「食」とは、観測者から見て、ある天体が別の天体の一部または全部を隠す現象を言う。それは観測者と食を起こす天体とが一直線に並んだ時に起こる。地球-月-太陽が一直線に並ぶと「日食」となり、月-地球-太陽の順番に並ぶと「月食」となる。月が恒星や惑星を隠すのは「星食」とか「惑星食」と呼ばれる。お互いがお互いを隠し合う連星は「食連星」と呼ばれる。

ドップラーシフト法は、高分散分光観測といって、巨大な望遠鏡と超高性能の分光器が必要である。しかし、トランジット観測の方は、恒星の明るさを測るというシンプルな測光観測である。前者による系外惑星の発見は専門家に頼らざるを得ないが、後者はアマチュアにも可能である。ドップラーシフト法で見つかった惑星がトランジットを起こすかどうかを調べることは、アマチュアにもできる。実際、このようなアマチュアによる系外惑星のトランジット観測ネットワークが世界各地でつくられている。日本にもある。

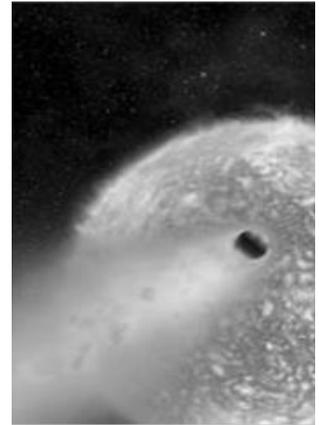
ドップラーシフト法やトランジット法は、系外惑星を発見するための「間接的な方法」である。しかし、このような間接方法では、惑星からの光を直接検出していない。不安定性が残るので、「直接撮影・分光観測」が望ましい。しかし、そのためには、①暗い惑星を検出するための高感度、②中心星と惑星を見分けるための高解像度、③惑星の近くにある恒星からの明るい光の影響を抑えるための高コントラスト、の3点を同時に実現しなければならない。これらは、極めて高度な技術を要する。

現在、すばる望遠鏡とコロナグラフ装置を用いて、若くて巨大な系外惑星を直接観測するためのさまざまな試みがなされている。これまでユニークな観測成果を数多く上げているので、「巨大惑星」を直接撮像できる時がくるかもしれない。特に、すばる望遠鏡用の新しいコロナグラフと、大気のゆらぎをリアルタイムで補正する新しい補償光学とを組み合わせた観測に、大きな期待が寄せられている。

3. 太陽系惑星と系外惑星の違い

系外惑星は、太陽系の惑星に比較すると三つの大きな違いがある。まず、系外惑星には「ホット・ジュピター(熱い木星)」がある、ということである。太陽系では、木星のような巨大ガス惑星は、太陽から遠く離れて氷が凝縮する温度の低い場所で作られた。ところが、系外惑星では、0.05 天文単位という中心星からごく近いところに、木星のような巨大ガス惑星が誕生した。これを「ホット・ジュピター」と呼んでいるが、このような違いがどうして起こったのかはいまだ分からない。

二番目は、系外惑星は「エキセントリック・プラネット(中心がずれている惑星)」である、ということである。これは、軌道離心率が大きいことをいう。太陽系の惑星は水星を除いてその公転軌道の離心率は0.1にも満たず、ほぼ真円に近い。ところが、系外惑星の多くは、離心率 0.2 以上の楕円軌道を描いている。このように大きな楕円軌道を描くのは、その形成過程に起因している。そのプロセスは、「ジ



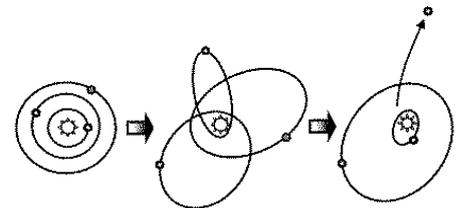
ホットジュピター

ャンピング・ジュピターモデル」と呼ばれている。この説明は、現在一番有力視されている仮説であるが、次のようなものである。

円軌道に近い軌道の惑星がいくつかあると、長い時間の間にお互いの引力で軌道がだんだん歪み、それぞれの軌道が交差するようになる。惑星が2個の場合は、ある軌道間隔より狭くなると軌道が不安定になる。それより広い場合には安定する。ところが3個以上の場合には、軌道間隔が広くても、ある一定時間は安定状態にある。しかし、その後急に不安定な状態が始まって、お互いの引力の影響がだんだん積み重なり、あるところまで行くと抑えきれなくなる。その結果、一つの巨大ガス惑星が惑星系外に弾き飛ばされる。その巨大ガス惑星を系外に弾き飛ばしたのは巨大ガス惑星なので、その軌道も反動で大きく歪む。しかし、残った巨大惑星の軌道間隔は大きくなり、軌道がゆがんでいても、それ以上の軌道交差はしないで、安定する。このようなプロセスで軌道が大きくゆがんだものが、これまでに発見されている「エキセントリック・プラネット」と考えられている。



エキセントリック・プラネット



重力散乱によるエキセントリック・ジュピターの形成モデルの模式図

ガス円盤の質量が太陽系の場合と同じ程度(太陽の100分の1ぐらいの質量)であれば、氷の多い外側領域では巨大ガス惑星が1個か2個できた時点で、円盤ガスが枯渇してしまう。その結果、ガス惑星はホット・ジュピターやエキセントリック・プラネットにならず、そのまま安定する。そして内側の地球型惑星も無事に存続し、結果的に現在の太陽系と同じような惑星系ができていく。このような太陽系に似た惑星は、系外惑星においても数十%以上存在すると考えられている。



星の光度に応じたハビタブルゾーン

第三番目は、「ハビタブル・ゾーン(生命居住可能領域)」の違いである。生命が誕生・生存するのに適した環境をもつ天体が存在する領域は、宇宙の中で他にあるだろうか。天文学者は、太陽系に見られるような「ハビタブル・ゾーン」が系外惑星や銀河系の他の天体のどこかに存在するのではないかと、一生懸命探している。今までのところ見つからない。といっても、絶対にないと言えるほど、調査が進んでいるわけではない。

4. 地球外生命は存在するのか

太陽系は決して特別な惑星系ではない。どちらかというと、よくあるタイプの惑星系である。では、地球のように生命の存在する惑星が太陽系以外の惑星にあるのか。その可能性は、現時点でははっきりしない。生命に必要な水や海が過去にあったという痕跡は見つかっている。あるいは、現在もあるのではないかと推測できるケースも見られ始めている。しかし、生命の起源やその進化には、我々が未だ十分理解しているとは言えない微妙な条件

がいろいろある。従って、地球外惑星に生命はあるはずだと簡単には言い切れない。絶対にないとも言えない。今のところ、見つかっていない。だが、多くの科学者はあると信じて熱心に探索している。

現代の天文学者たちにとって、地球外に生命を発見することは夢である。系外惑星を研究する最終ゴールの一つにさえなっている。もし太陽系内なら、実際に探査機を送り、直接撮影したデータを解析できる。表面や地下からのサンプルを直接収集することも可能である。ところが、太陽系の外となると、そのような調査は現実的ではない。地球から精密なスペクトル観測を行い、生命の痕跡をたどる以外にない。地球の場合には、「生命の痕跡(バイオマーカー)」として、植物に由来する「酸素」および「オゾン」と、生命誕生の場としての「水の存在」があげられる。系外惑星にこれらが検出されれば、「地球に生存するような生命」が存在する可能性がある。

むしろ、このような地球の生物とは全く異なる種類の生物の存在も理論上はあり得る。しかし、そのような別種の生物の存在については、現時点では想定しにくい。まずは、地球上の生物と同一の生物種が系外惑星にも存在するかどうかを調べることから始めるのが穏当だろう。

人間の現時点での調査、観測の技術や能力は、生命の起源の結論を出すレベルにまでは至っていない。ただ、現在の多くの科学者は「有機物の化学進化モデル」を有力な仮説として考えている。それは、有機物が結合を繰り返し、タンパク質や核酸のような高分子をつくり、生命の機能を獲得していったという考えである。このような進化が進むには、地球の水の海のような状態が一番適している。それゆえ科学者たちは、惑星表面に海が安定的に存在している場所はないかと必死に探索している。

これまで見つかっている系外惑星の多くは、木星のような巨大ガス惑星であり、太陽系の惑星とはかなり異なっている。このように巨大ガス惑星しか見つからない理由は、恒星の光の変化によって系外惑星を探すという方法に起因している。この方法では、質量の大きな巨大ガス惑星の方が見つけやすい。地球型のように質量が小さく冷えている惑星は、たとえ存在していても、見つけにくい。科学者たちは、より小さな系外惑星を捉えようと、日々研究を重ねている。

2005年6月には、アメリカのグループが、地球の質量の5.9倍から7.5倍程度の系外惑星を発見している。また、2006年1月には名古屋大学を中心としたグループが地球の質量の5.5倍程度の系外惑星を見つけている。どちらも重さから、岩石を主成分とする地球型惑星(固体であり、その表面温度が海が存在を可能にするような、地球とよく似た惑星のこと)である可能性が高い。

2007年4月、てんびん座の方向20.5光年の距離にある「グリーゼ581」という星が発見された。この星の質量は、太陽の0.31倍、明るさは太陽の0.013倍で、「赤色矮星」と呼ばれている。赤色矮星は、太陽に比べ質量が10%から40%と小さく、大変暗い。中心温度は核融合が何とか維持できる程度のため、水素燃料の消費は遅い。宇宙が暗くなってしまうときに、最後まで輝いているのはこの赤色矮星だと考えられている。

この恒星には、3つの惑星があり、それぞれ、「グリーゼ581b」、「グリーゼ581c」、「グリーゼ581d」と名づけられている。中でも「グリーゼ581c」は、半径が地球の約1.5倍、質量が約5倍、平均密度は地球の1.5倍と地球より少し大きい。内部はその重さのためより大きく潰れている。中心には金属鉄からなる「コア」があると推定され、地球型惑星である。軌道半径は中心星からすぐ近くで0.073天文単位、約13日かけて一周している。中心の星近くに回っているにもかかわらず、中心の星が暗いので、表面温度はマイナス3度から40度Cと推定される。これは1気圧下で液体の水が存在できる条件を満たしている。現在、海が存在するかどうか、大気の有無とその成分はどうか、生命の存在する痕跡があるかなど、地表環境について多くの研究がなされている。



グリーゼ581

2013年4月22日の朝日新聞の夕刊に、「生命いる？惑星発見—1200光年かなた 地球に近い大きさ」という見出しが躍っていた。米航空宇宙局(NASA)によって2009年に打ち上げた「ケプラー宇宙望遠鏡」が、1200光年かなたにある惑星を発見した。こと座の恒星「ケプラー62」を公転している「ケプラー62f」という惑星である。直径は地球の1.4倍、岩石でできた地球型の惑星である。恒星からの距離が程よく、表面に液体の水が存在し得るので、生命の存在の可能性はある。

なお NASA は、この惑星以外にも、地球に似た惑星について発表している。例えば、「ケプラー62f」のすぐ内側を公転する、地球の 1.6 倍の大きさの惑星、あるいは、地球から 2,700 光年離れたはくちょう座の恒星「ケプラー69」の惑星などである。後者は、地球の 1.7 倍の大きさである。

これらはいずれも、地球に類似した条件をもつ惑星である。生命誕生に必要な海が存在し得る。といっても、「バイオマーカー」が発見されたというわけではない。たとえ「バイオマーカー」が発見されたとしても、それでもそれは状況証拠に過ぎない。生命そのものの実在を確証したことにはならない。今のところ、生命そのものどころか、その痕跡も見つかっていない。地球外生命探しという観点から、地球型系外惑星がいくつか見つかり始めている、という程度の話である。

では、もっと直接的に生命、あるいは生物の存在を明らかにする方法はないのか。昔から、地球外に高度の文明をもつ生命が存在し、何らかの人工的な電波を発信しているのではないかと考え、そのような電波をとらえようと試みている人々がいる。このような研究をSETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence)と呼んでいる。

1972年に打ち上げられた惑星探査機パイオニア10号および1973年のパイオニア11号には、機体に金属板が取り付けられた。この金属板には、地球外生命に向け、人類の存在を伝えようと男女の人間の絵や太陽系の位置などが刻み込まれた。

さらに1977年に打ち上げられたボイジャー1号とボイジャー2号にも、地球外生命に向けてのメッセージが積み込まれた。ボイジャーの場合は、その中に地球上の様々な音や世界の音楽、あいさつなどを収録した銅板に金メッキを施したレコードである。

4つの探査機は、太陽系惑星の軌道を抜けている。パイオニア10号と11号とは交信が途絶えているが、ボイジャー1号と2号とは2006年8月には、太陽系の果てであるヘリオシースに到着した。地球から約150億kmも離れており、人工物としては最も遠い場所にいる。

むろん、このような方法は、通常の科学的な方法とは言えない。存在するかどうかとも分からず、たとえ存在しても実態を想定することもできず、コミュニケーションの手段など全く不明であるのに、ただ一方的にやみくもにこちら側から情報を発信しているだけである。4つの探査機が地球外生命に出会う可能性は限りなくゼロに近い。むろん、全くあり得ないと断定できるわけではないが。

5. 宇宙の距離はしご

人類は、太陽系から太陽系の外へ、そして銀河系へ、銀河系からさらにその外へと、宇宙の階層構造の存在を知るようになった。天文観測の進歩により、より遠くの天体までの距離を測定できるようになったからである。人類は、ある星や銀河の存在する方向は分かっていた。しかし、そこまでの奥行、つまり距離を測る手段を長い間見つけることはできなかった。太陽系のサイズから宇宙の大構造のサイズまでは、11桁以上の差がある。それほど広大な範囲を一つの方法で測定することは、不可能である。そこで、近いところから測定可能な方法を見出す。そして、異なった方法を順次組み合わせながら、次第に「宇宙の距離はしご」を登っていく。天文学者たちは、試行錯誤を繰り返しながら、さまざまな観測技術を組み合わせ、近くの星から遠方の銀河に至るまでの距離を測る方法を見つけ出した。

まず、地球から太陽や惑星までの距離である。それは「ケプラーの法則」と、惑星探査機やレーダー法による惑星までの「**直接測定**」によって、現在ではかなり正確に測定できるようになった。

次に、比較的近くの恒星までの距離測定である。それには「**三角測量の原理**」を用いる。地球は1年かけて太



ケプラー宇宙望遠鏡



パイオニア10号



ボイジャー

陽の周りを公転している。その結果、地球の位置は春と秋では約 3 億キロメートルも離れた場所に移動する。この移動距離を利用して春と秋に同じ星を観測し、見込む角度の差を測る。この角度が小さければ小さいほど星はより遠くにあることになる。このような、地球の公転を利用して測定した視差角を「年周視差」と呼ぶ。天文学では、「年周視差が 1 秒角(1 度角の 3,600 分の 1 の大きさの角度)になる星までの距離を 1 パーセクと定めた。それは約 31 兆 km で、3.26 光年になる。もし年周視差が 0.1 秒角であれば、その星までの距離は年周視差に反比例するので 10 パーセク(32.6 光年)となる。およそ 300 光年以内の恒星であれば、可視光を用いたこの方法によってほぼ正確に測定できる。しかし、現在のところそこまでが限界である。

この年周視差による測定法は、1838 年フリードリッヒ・ベッセルによって考案された。彼は「はくちょう座 61 番星」を 18 か月観測し続け、年周視差が 0.31 秒角であると検出した。現在の正確な測定値は 0.286 秒角なので、かなり精度のよい測定であったと言ってよい。

年周視差によっては測定できない、それよりさらに遠い星までの距離は、この「年周視差」によって「**距離が分かった星のある特徴**」を基に推測していく。

例えば、星の明るさが周期的に変化する A という「変光星」の距離が年周視差によって分かったとする。すると、その A の「本当の明るさ(絶対等級)」が分かる。同じように周期的に変化する B という別の「変光星」があるとする。「同じように周期的に変化する」とは「本当の明るさ」は同じであるという意味である。この A と B の「見かけ上の明るさ」の違いは、観測によって分かる。すると、「明るさは距離の二乗に反比例する」という法則から、B の距離を割り出すことができる。このようにして、そのような「変光星」を含む銀河であれば、現在 6,000 万光年先までの距離の銀河を測定できる。

変光星以外にも距離を推定するための「ある特徴」を利用できる星がある。星の中心で水素が燃えて核融合反応を起こしている「主系列星」である。この星もまた、星の色が分かると絶対等級を知ることができ、見かけ上の等級と比べてその星までの距離を推定することができる。ただし、以上のような変光星や主系列星に基づく推定は、モデルや仮定を介入させているので、直接的な年周視差のような方法に比べると、その正確さは劣る。

6,000 万光年よりさらに遠い距離を測る時には、違った方法を用いる。「超新星」などの大変明るい天体には、最も明るい時の絶対等級はどの超新星においてもほぼ同じであるという特徴がある。さらに銀河自体にもいろいろな特徴がある。その特徴を用いて距離を測ることができる。

例えば、渦巻き銀河は中心の周りを回転しているが、「その回転速度が速いほど銀河全体の本当の明るさは明るい」という規則が分かっている。変光星や主系列星を用いて距離が分かった銀河がある場合には、その銀河の絶対等級が分かる。その結果、変光星などでは距離が分からない銀河に対しては、もし回転速度を観測できれば絶対等級が推測でき、それと見かけ上の等級を比較するなら距離を推測できることになる。

渦巻き回転をしていない「楕円銀河」の場合であっても、その中の星々の速度のばらつき大きさから楕円銀河の絶対等級が推測できるという経験則を用いて、距離を推定できる。なお、この銀河の回転速度や星の速度は、「ドップラー効果」を利用して推定する。

では、銀河がほとんど点にしか見えず、さらに遠くにあつて速度も測れない銀河や星の距離はどのように推定するのか。宇宙空間は膨張しており、遠くの銀河はその距離に比例して速い速度で我々から遠ざかっている(ハッブルの法則)。その場合、その銀河にある元素から出ている特徴的な波長の「光」は、銀河の遠ざかる速度に応じて波長の長さが変化する。その変化を観測することによって速度が分かる。その銀河の遠ざかる速度が分かれば、その銀河までの距離を推定できる。そのようにして、非常に遠い銀河までの距離が測定できる。

ただし、この膨張則による距離推定法は近くの銀河では使えない。近くの銀河においては、膨張によって遠ざかる速度は小さい。従って、その銀河が周囲の銀河の重力の影響で独自に動いている速度なのか、それとも膨張速度によるものなのかを区別できない。その結果、純粋な膨張による速度を正確に把握できない。

以上のように、星や銀河の距離を測るには、梯子を上るように、いろいろな方法を組み合わせて行う。いくつかの方法で相互に補完し合いながら、矛盾なく説明できるところまで究明していく。このようにして、これまでの距離測定の科学的な方法論は確立されてきた。今後は、さらにより正確に距離を確定するための、新しい画期的な測定法が発見されるかもしれない。

II. 銀河系

我々の住む太陽系は、一つの銀河に属している。澄み渡る夜空に、川のように細長く美しく輝く星の集団を見たことがあるだろう。「天の川」と呼ばれる星のグループである。その星の集団は、我々の「銀河」の中心に位置している。そこから、我々の銀河は「天の川銀河」と呼ばれている。英語では銀河を「galaxy」と言い、我々が住む銀河を「the Galaxy」と言う。そこで、「天の川銀河」は「銀河系(the Galaxy の訳語)」とも呼ばれる。最近はこの「銀河系」の方が普及しているようだ。そこで、本講演においても「銀河系」に統一して話を進めよう。

1. 銀河系のようす

この「銀河系」には、星(恒星)が少なくとも2,000億個(4,000億個という推定もある)存在している。ということは、我々の住む太陽系は、銀河系の2,000億分の1の存在ということになる。しかも、その太陽系のごく一部の地球に住んでいる。最近「グローバル(全地球的)」という言葉が流行している。大きな世界を指しているように感じるが、銀河のレベルから見ると、点にもならない。贖われたキリスト者がキリストと共に「被造物管理権」を委ねられたというとき、その「被造物」とは太陽系や銀河系どころか、全宇宙を含んだものである。もしこの使命を真剣に受けとめるなら、世界観も、価値観も、人生観も全く変わってしまう。神理解や祈りの意味、教会や神の国理解は根底からひっくり返される。新しい神学は、まさに劇薬である。

銀河系は、とてつもなく重い。質量は太陽1兆個分以上ある。巨大な重力を周囲に及ぼして、近くをふらふらと通りかかった小さな銀河などは呑み込んでしまう。この「銀河系」は円盤の形をしている。直径はおおよそ10万光年。その真ん中には「バルジ」という膨らんだ領域があり、たくさんの星がそこに集中している。典型的なものは50万~100万の恒星が直径わずか30光年ほどの空間に収まっており、「球状星団」と呼ばれている。この銀河系には150以上の球状星団がある。中には1,000万もの恒星が密集しているものもある。ちなみに、太陽から30光年以内にある恒星は、おそらく500ぐらいであろう。このような混雑した環境では、星が変わった複雑な動きを見せ、通常では起こりえないような星の相互作用が見られる。



銀河系の想像図

球状星団内にある100万ほどの星は、同じ時期に、同じ恒星間ガスの雲を基にしてできた。従って、年齢も、化学組成も、そして、地球からの距離もほとんど同じである。同じ球状星団の二つの星の明るさや色や温度が違って見える場合には、一方が他方より重いことになる。このようにして球状星団は、星の特性が質量にどう左右されるかを理解する土台になる必須の道具となり、星の仕組みに関する私たちの知識に欠かせない。

なお、銀河系の円盤内には若い星も多い。ところが、「バルジ」部分には古い星が多い。円盤部分は、おおよそ毎秒200kmという速さで回転しているが、その回転による遠心力は、重力にちょうど釣り合っている。銀河系の重心は中心にある。その銀河の中心に星々が引っ張られて回転運動をするため、現在のような形が保たれている。

これは、地球が太陽の周囲を回っている原理と同じである。地球は、太陽によって引かれる力(重力)に対し釣り合いを保つ速さで回っている。そのため、太陽系を飛び出さず、安定した公転運動をしている。同じことが、太陽系レベルにおいても起きている。太陽系も全体として見れば円盤状をしている。回転しているものは、回転する物体に働く遠心力のため、回転軸に対して垂直に広がろうとする性質をもつからである。全く同じことが銀河レベルにおいても起こっている。これは、宇宙全体に見られる基本構造といってよい。

太陽系は、「銀河系」の中心部からはおおよそ27,000光年離れている。今から100年ほど前には、我々が銀河系に住み、その銀河系は直径が厚みよりずっと大きい平らな巨大円盤であることが分かっていた。しかし、太陽や太陽系は、この巨大円盤の中心近くにあると考えられ、この円盤の直径はどの方向についても2万光年と見積もられていた。ところが、この構図は、1918年アメリカの天文学者ハーロー・シャプリーによる球状星団の研究によって崩れた。彼は、当時既に知られていた70の球状星団の分布は、地球から見て等しい割合で分布しているのではなく、一方的に偏っていることを明らかにした。こうして、太陽系が中心からの半径の真ん中あたりに位置していることが分かったのである。この太陽系は、2億年程度かけて銀河系を一回転している。この回転の起源は、「銀河

系」の形成プロセスに関係している。

ところで、銀河系はいつ頃からでき上ってきたのか。宇宙にある通常の物質は、水素とヘリウム、それとこの二つを除いた「他のものをすべて含んだ金属」と三つに大別できる。宇宙に生まれた最初の星は、水素が 75%、ヘリウムが 25%、リチウムとベリウムが 0.00000001%で、それより重い元素はなかった。この星では水素をヘリウムに変えていたが、金属はできなかったため、そのリチウムとヘリウム(これらを一応「金属」と呼んでおこう)は最初のままだった。その星が死に、次の世代の星は、先の金属で汚染されたガス雲からできることになり、小さな金属度をもつことになる。その後、この星はこの金属によって、独自に炭素や酸素などの重い元素をつくる。従って、前より高い金属度になる。このようにして星が生死を繰り返すと、後にできる星ほど何世代か分の残骸でできることになり、金属度は高くなる。言い換えれば、古ければ古いほど金属度は低い。

現代の天文学は、この金属度を調べる「分光分析」と言われる手法を発見した。これは次のようなものである。すべての星はある幅の光を出す。それを丁寧に調べると、特定のところに影ができ、暗くなったり、欠けたりしている。これは星の大気にある金属が特定の色の光を遮断するからである。欠けている色の正確なパターンは、それぞれの星に固有のものである。そのことから、ある星が含んでいる金属の比率を正確に計算できる。

現在、銀河系で一番金属度の低い星は、「HE1327-2326」と言われる星である。これは、地球からウミヘビ座の方向に 4,000 光年ほど離れたところにある。2004 年、オーストラリア在住の天文学者アンナ・フレベルたちのチームは、この星の金属度を 0.00000005%と計算した。これは、太陽の金属度に比べると 25 万分の 1 ほどである。この金属度を基にこの星の誕生した時を計算すると、120 億年～130 億年と出た。天文学者たちは、さらに金属度の低い星がこの銀河系に存在するかもしれないと、現在も探索し続けている。

120 億年以上前の太古の宇宙には、今の銀河の 30 分の 1 ぐらいの数の小型銀河しか存在していなかった。当時の宇宙は、今よりはるかに銀河の密度が高く、小型銀河同士がたびたび衝突していた。この衝突によって銀河は分裂・合体を繰り返し、次第に大きな銀河に成長していった。現在の銀河の回転運動は、この小型銀河の運動の総和と考えてよい。「銀河系」もまた、このようなプロセスを経ながら、次第に形成されていった。現代の天文年代学は、銀河系の円盤の形成の年代を 83 ± 18 億年前と推定している。これは、銀河系の最初の星の誕生から 20 億年ぐらい経った頃ということになる。すると、太陽系の元になる星々は 50 回近く銀河系を回転してきたことになる。そういう回転の中で 46 億年程前に太陽が生まれ、その後太陽系の惑星が次々と誕生したのである。

2. 星の誕生

では、銀河系に分布している 2,000 億(から 4,000 億)個の星の一つ一つは、どのように生まれてきたのか。「星」は、宇宙空間に渦巻き状に動いているガス雲から誕生する。ガス雲の中身は、大部分が水素分子である。このガス雲は、密度の低いところと濃く漂っているところとがある。その濃いところを中心に、星は生まれる。濃いところが種になり、自分自身の万有引力によって、およそ 100 万年かけ周囲のガスを集める。すると、濃くなった中心部分のガスの密度はさらに上がり、ガスの粒子の速度が速くなり、中心部の温度が高くなる。そうなるさらさらにガスが降り積もって、中心部分の密度と温度は増々上昇し続ける。このようにして、「星の卵」ができ、やがてその中心に「赤ちゃん星」つまり「原始星」が誕生する。

「原始星」は少しずつ収縮し、中心部の温度はさらに上がる。原始星は、重力によって集めた濃いガスに取り囲まれているので、直接観測することはできない。しかし、原始星はこれらのガスを上下方向に噴出するので、ガスは原始星の周りを円盤状に取り巻くようになり、このようなガス円盤から地球のような惑星がつくられる。このガス円盤は「原始惑星系円盤」と呼ばれ、その円盤の半径は、太陽と地球の距離の 100 倍ぐらいの大きさだったと推定される。

原始星がさらに収縮していくと、「T タウリ星」と言われる段階になる。「タウリ」とは「おうし座」のことで、この種の星がおうし座において初めて観測されたことから、その名前がつけられた。T タウリ星は、他の星に比べリチウムが大量に含まれている。このリチウムは、宇宙が誕生した時の名残だと考えられている。星の内部では、リチウムは壊されて水素に代わる。T タウリ星は強力な恒星風を放出し、周囲のガスをさらに吹き飛ばす。

T タウリ星が約 1 億年経過すると、この間にさらに星の中心部に向かってガスが収縮し、中心部の温度が 1,000

万Kほどになる。すると、いよいよ核融合が始まる。そこでは水素原子核の陽子が 4 個結合して、ヘリウムの原子核を生じさせる。4 個の水素原子核の質量は 1 個のヘリウム原子核より少し大きいので、この核融合反応の結果、減少した質量の分だけエネルギーが中心部から外側に向かって放たれる。この現象は、アインシュタインの「質量とエネルギーは等価である」という特殊相対性理論どおりである。

T タウリ星に核融合が起こると、「主系列星」と呼ばれる段階に達し、一般に「星」と呼ばれる天体になる。星の内部にはエネルギー源となる水素が大量に存在するので、安定的に反応が起こる。その結果、星はその一生をほとんど主系列星として過ごす。以上が、星の誕生のプロセスである。

ところで星は、太陽ぐらいの重量の星と、太陽より 10 倍ぐらいの重量の星の二つに大きく分けられる。前者は「軽い星」とか「小質量星」と呼ばれ、後者は「重い星」とか「大質量星」と呼ばれる。星の絶対的な明るさを「光度」という。その「光度」は星の重さによって決まる。重さもサイズも大きい星は、温度が高くなり、光度も大きくなる。例えば、太陽の 10 倍の重さの星の光度は、太陽の 10 万倍にもなる。なお、軽い星は重い星より多く、その数は 100 倍ぐらいと思われる。

星の色の違いは、表面温度の違いに基づく。温度が 30 万 K もあると青く、3,000K ぐらいに低くなると赤く見える。表面温度は内部の温度に比例する。つまり、「青い星」は中心温度も高く、「赤い星」は中心温度も低い。中心温度が高い星とは、質量が大きいということである。大きな質量を支えるためには、星は中心の圧力を高めなければならない。その圧力を高めるためには、ガスの粒子運動の速度を速めねばならない。そうすると中心の温度が高まり、表面の温度も影響される。逆に質量の小さな星は中心の圧力が低く、温度も低いことになる。

ところで、銀河系には今も星が誕生している。銀河系の星の密集しているところをよく観察すると、何か所もの「黒いしみ」のようなものが見える。実はそこには、チリ(星間チリ)とガス(星間ガス)が存在する。このチリやガスが濃くなると、背後にある星の光が吸収される。このような黒いしみを「暗黒星雲」と呼んでいるが、それは星の集まりではない。吸収の少ない近赤外線で見ると、背後の星が透けて見える。

暗黒星雲は、宇宙で複合分子ができる数少ない場所の一つで、極めて重要な「るつぼ」である。それは、分子をつくるのに不可欠な場所である。と同時に、分子を構成する元の原子に戻ってしまわないようにするうえでも、不可欠な場所である。宇宙空間の過酷な状況では、分子は壊れやすく、あまり長くは生き残れない。遠くの星のかすかな光さえ、たいていの分子を個々の原子にばらばらにして、元の原子に戻してしまうエネルギーがある。暗黒星雲は、このような働きを妨げる役目も果たしている。

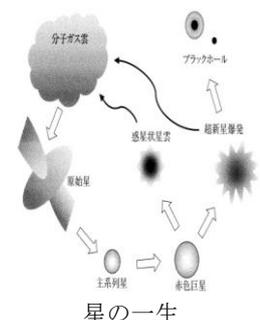
暗黒星雲の物質は「ガスとチリの混合体」でできており、マイナス 260 度 C という低温である。ガスはほとんど水素とヘリウムでできている。チリの方は炭素や酸素のような重い元素を多く含んでおり、外からやってくる光のほとんどをその奥深くには入り込めないようガードしている。この暗いチリだらけの星雲がなかったら、星が誕生することも、地球の生命が誕生することもなかった。

このチリ全体の重さはガス全体の重さの 100 分の 1 程度である。こうして漂う星間ガスの中で、銀河系全体で年間 3 個ぐらいの「太陽程度の星」が誕生する。宇宙の年齢を 137 億年とすると、この間に約 400 億個の星が生まれてくる計算になる。この数は、実際の銀河系の星の数 2,000 億個(から 4,000 億個)よりかなり少ない。ということは、昔の銀河系の方が、今よりもっと活発に星を誕生させていたことを意味する。

3. 星の死と超新星爆発

星の大部分を占める「軽い星」は、エネルギーをじわじわと出しながら、細く長く輝き続ける。このような恒星は、誕生から死に至るまで、核融合反応を繰り返し続ける。核融合反応とは、1,000 万 K を超える温度で、水素を燃やしてヘリウムに変えることである。その時は、星自身の重力エネルギーと核反応によって放出される熱エネルギーとが釣りあっているため、安定した球形を保っている。

しかし、たとえ「主系列星」であっても、長期間にわたり水素を核融合すれば、やがて燃料の水素はなくなる。すると、星の中心部には燃えかすのヘリウムがたまる。水素とヘリウムでは水素の方が軽い。そのため、水素は中心部より外側



に移動する。中心部の水素を使い果たした「主系列星」は、その外側にある水素を使って核融合を始める。中心部に残されたヘリウムは核融合反応が起こるほど高温ではないため、外向きの圧力を失い、中心部に向かって収縮していく。こうなると、星は外側の水素の層を膨張させて、星全体のバランスを取ろうとする。つまり星の半径が大きくなり、表面の温度が下がってくる。この段階を「赤色巨星」と呼ぶ。星の最後の始まりである。

この後の歩みは、「軽い星」と「重い星」では違ってくる。軽い星の場合は、中心部の水素を使い果たすと、外側の水素の核融合が始まる。そして、その水素を使い果たす前に、中心部が高温になり、残されたヘリウムが核融合を始める。核融合によってヘリウムは炭素や酸素などの原子を生成するが、それ以上の核融合を進めるほどの高温にはならない。大きく膨らんだ星の外層を宇宙空間に放出しながら、静かに最後を迎える。中心部は炭素や酸素が残り、これらはやがて「白色矮星」になる。

星が白色矮星になる前は、普通のガスでできている。それは、主に自由に漂っている水素原子であるが、ヘリウムなどの不純物が(それほど量は多くはないけれど)混じっている。しかし、死にかけた星の中心部を重力が押しつぶすと奇妙な変形が生じる。星の密度が高くなり、一つ一つの原子は動くことができなくなり、規則正しい三次元の格子に収まってしまう。つまり白色矮星とは、重力が及ぼす巨大な圧力下で生じた、一個の「超高密度の巨大結晶」ということになる。実際、白色矮星は地球ぐらいの大きさなのに、質量は30万倍、密度は1立方センチあたり何と2,000キロにもなる。

一方、太陽の10倍の重さを持つ重い星の場合はどうなるのか。その中心部は圧力が高くなるため、温度は1億Kぐらいにまで上がる。核融合反応は、温度が少し上がるだけで急激に反応のスピードが速まる。太陽の10倍の重さの星は、太陽の1万倍の明るさで輝く。この星の燃料である水素は、もともと太陽の10倍あるはずなので、もし太陽と同じ明るさで輝くなら太陽の10倍生きることになる。ところが、実際には1万倍の明るさで輝くので、太陽の1,000分の1の寿命になる。つまり、太陽の寿命100億年の1,000分の1で、1,000万年がこの重い星の寿命ということになる。

重い星の中心では、核融合の結果、水素がヘリウムになり、炭素になり、シリコンになり、最後に鉄となる。鉄までは原子核の種類が変わることでエネルギーを吐き出し、圧力は大きくなって釣り合いがとれる。ところが、鉄がコバルトになるときは、熱を吸収する。つまり鉄が次の原子核をつくろうとすると、周りの熱を奪い取り、圧力が下がる。それまで、自分自身の重力(中心に向かう力)と内部のガスの圧力(外に向かう力)のバランスが取れ、丸い形が保たれていた。ところが、圧力が下がると星の大部分が中心めがけて落ちていく。この落下のエネルギーは膨大で、その星が100億年で放出する熱量であっても、一秒よりはるかに短い時間で放つことになる。この激しい熱量の解放は、急激に星の明るさを増加させ、まるで新しい星が輝き出したかのように見える。これが、「超新星爆発」と呼ばれるものである。星を構成していたガスは、大爆発によって宇宙空間にまき散らされ、その後は、規則正しい間隔で電波やエックス線を放つ天体「パルサー」や「ブラックホール」になる。

「超新星爆発」によって宇宙空間に拡散されたガスは、初めは1万K以上の高温である。このような熱いガスは、内部の圧力が高く、重力もあまり効かない。しかし、やがて温度が下がるにつれ、ガスの圧力も下がり、重力が効いてくる。物質にはすべてに引きあう「万有引力」があるので、自分自身の重力でガスは再び集まるようになる。

最初のうちは温度が下がっても、乱流や磁場などの重力に対抗する力が存在するので、ガスはすぐには集まってこない。濃い部分が生まれては消える、という状況が繰り返される。ある密度に達すると、濃いガスは加速的に周りのガスを集め始める。その結果、密度の高いガスの塊が生まれてくる。これは、万有引力が密度の2乗に比例して大きくなるためである。かくして非常に密度の高いガスの塊がつけられ、その中で新しい星が誕生する。それが数千万年かかり、星として成長していく。

「超新星爆発」は、単に新しい星の原料を供給するだけではない。生命誕生に必要な重元素をも生み出す。宇宙誕生後間もない頃の最初の世代の星は、水素とヘリウムという軽い元素だけでできていた。この水素とヘリウムは、ビッグバン直後の宇宙空間で、星の生まれる前に合成されたものである。しかし、比較的最近誕生した星は、宇宙の初めにはなかった鉄などの重元素も含んでいる。これらの鉄、炭素、酸素をはじめ、金、スズ、ヨウ素、ウランなど我々の周囲や胎内にある重元素はすべて、超新星の爆発によって宇宙空間に放出された物質である。

今も超新星爆発が起こる度に、これらの重元素量は宇宙に増え続けている。我々動物は、このような重元素を

食物などから取り込むことはできても、体内で作り出すことはできない。超新星爆発によって宇宙空間に拡散した重元素が、46億年前に原始太陽系に取り込まれ、生命誕生の基礎をつくったのである。

現在の銀河系には、重い星は軽い星の10万分の1ぐらいしかない。誕生の比率は100分の1ほどであるが、寿命が1,000分の1なので、それぞれが生存する割合は10万分の1ぐらいになる。重い星はますます少なくなっていくことになる。重い星から放出されるガスは、我々人間の生命にとって大変重要である。

普通の銀河で超新星爆発が起こるのは、平均すると50年に一度ぐらいである。ということは、継続的に50個の銀河を監視していれば、1年の間に、どこかで超新星爆発を見ることが期待できる。天文学者たちは、毎晩望遠鏡によって観察して撮った写真を、同じ場所で何週間か前に得られた写真と比べ続ける。こうして、星の死を伝える新しい光の斑点がないかを探している。長い時間をかけ、何万もの銀河を観察して、大きな成果を得ている。

このようにして2010年には、全天で337個の超新星を発見している。超新星を発見しようと肉眼で天空を見回すだけであれば、何世紀かに一度ぐらいしか出くわせない。しかし、このような現代的な観測方法を用いれば、宇宙全体では、超新星爆発がポップコーンのように毎日ほじけていることを発見できる。

4. 赤色矮星と褐色矮星

銀河系の星の85%は、太陽質量の10%から40%ぐらいである。それらの星は、暗くて見えにくく、「赤色矮性」と呼ばれている。このような赤色矮星は、太陽と同じく核融合反応をしている。水素をヘリウムに変換し、その副産物として熱と光を放出している。その違いは主として星の内部温度にある。太陽の中心では1,500万度に達する。しかし、赤色矮星では質量は小さく、中心部分の圧力は低いので、温度は半分にも満たない。星内部の核融合の進展具合は、温度に極めて敏感である。低温の場合は非常に遅く、赤く暗い星になる。どれほど高エネルギーの赤色矮星であっても、太陽エネルギーの10分の1ぐらいしか生み出していない。

赤色矮星は、軽いものではあるが、あくまでも恒星である。軽い赤色矮星ほど温度は低く、暗い。その内部における核反応は、ゆっくり進む。しかし、それが恒星と呼ばれる限り、質量をいくらでも小さくするわけにはいかない。中心部分の温度が500万度あたりを下回ると、核反応が進行しなくなる。そのような星を恒星と呼ぶわけにはいかない。天文学者たちは、赤色矮星にまで至らない星に対しては、「褐色矮星(かっしょくわいせい)」と名づけている。褐色矮星は「星」と呼ばれているが、恒星のように燃料を燃やしたり、光を発したりすることはない。

赤色矮星と褐色矮星の境目はどのへんになるのか。この点に関し、天文学者たちは現在議論を繰り返している。それは、その星の構成要素がほとんど純粋な水素なのか、それともヘリウムなどの他のガスによる相当量の不純物が含まれているのか、などによって異なってくる。それでも、赤色矮星として見られる最小限の重さは、太陽質量の7%ぐらいだと、コンセンサスが得られつつある。これは、地球の2万3千倍の重さになる。このようなやせっぽちの暗い赤色矮星は、太陽のような重い星に比べ、その数は10倍以上存在する。またそれは、燃料のもやし方も少ないため、1兆年も輝き続ける。太陽の百倍である。このように目だない星が、宇宙のどの星よりも長生きするであろうと予測されるのは、極めて興味深い。

褐色矮星とは、赤色矮星にまで至らない質量の小さな星のことである。ではこれを、惑星の方から考えるとどうなるのか。恒星(赤色矮星)は、その最も軽いものであっても(惑星の中で最大の)木星質量の80倍はある。つまり、恒星と惑星の間には、質量の点で大きな違いがある。ところが宇宙には、木星質量より大きい星が、恒星にまでは至らないという中間質量の天体がたくさんある。これらの天体は、もうちょっと重ければ、もっと収縮して中心部の温度は高くなり、核融合が始まるはずだった。しかし、結局はそこにまでは至らず、それでもエネルギーを放出し続け、低温の暗い天体として存在し続けている。いわば星になりそこねた星ということである。天文学の世界では、このような天体を「褐色矮星」と呼んでいる。

このような褐色矮星の存在については、理論的には1960年代から予測されていた。しかし実際に観測されたのは1980年代以降である。特に、1988年にアメリカのエリック・ベックリンとベン・ザッカーマンが発見した「GD165b」、あるいは1995年に同じアメリカのシュリ・カカーニのチームが発見した「グリーゼ229b」などが有名である。このような褐色矮星は、いずれも質量が小さいため星になり損ねたわけだが、薄暗いため比較的容易に直接撮影が可能だった。画像が初めて公開されたのは2004年のことである。

III. 銀河群、銀河団、超銀河団

宇宙生成の基盤になったのは、「銀河」である。我々は、自分の身の回りから宇宙を見ている。そこで、まずは太陽、地球、そして月、それから太陽の周りを回る惑星、さらにその惑星以外の天体へと、論を進めてきた。むしろ、このような流れは、我々の日常の感覚からいうとごく自然なものである。ところが、宇宙の成り立ちから言うと、違った考えを必要とする。もしビッグバンが 137 億年前に起こったとすれば、そこから出発し、宇宙の形成過程をたどる方が自然になる。その際ベースになるのは、銀河である。

その辺のところをもう少し詳しくたどっておこう。

1. 銀河誕生

今から 60 年ほど前までは、まず巨大なガス雲ができ、それが分裂して銀河ができた、と考えられていた。しかし、現在そのように考える学者はいない。今は、ほとんどの学者が、この宇宙は 137 億年ほど前「ビッグバン」と呼ばれる急激な爆発的膨張が起こって誕生した、と考えている。

宇宙が始まった頃は、そのどこをとっても、密度と温度は同じ状態にあり、天体と呼べるものはなかった。しかし、宇宙ができてから 38 万年ほどたった頃、わずかながら放出された物質に濃薄があり、その濃い部分は重力も他よりわずかに強く、物質を引きつけ、次第に大きくなった。普通、物質が膨張すると、それは単に薄くなってしまっただけである。ところが、その中の物質同士に重力が働き、膨張する運動に打ち勝ったものがさらに大きくなるという現象が生じた。このようにして、たくさんの銀河のもとになる塊が誕生した。

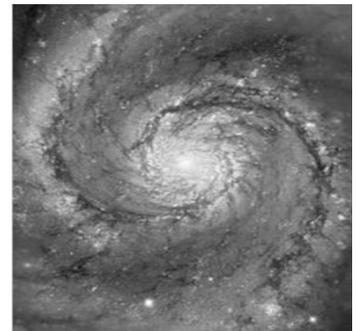
宇宙の初期にこのような塊がいくつぐらいできたのか、それは分からない。とにかく時間が経つにつれ、最初はほとんど一様に分布していた物質の中で、わずかに密度の高い部分が重力によってそばの物質を引き寄せ、より高い密度に成長した。そして、原始星、銀河、銀河群、銀河団、超銀河団へと分裂・合体を繰り返して、今日見られるような天文学的な構造を形造った。最終的には、1,000 億個、あるいはそれ以上の銀河のもとができ上がった。

この 1,000 億の銀河の一つ一つに、平均して 2,000 億個ほどの星が誕生した。すると、2,000 億×1,000 億の星がこの宇宙に存在することになる。ここで「星」というのは、自ら光を放っている太陽のような恒星を指す。その一つ一つの恒星の周りには、太陽系のような一連の天体(惑星、準惑星、小天体など)が取り囲んでいる。

一つの銀河に 2,000 億個の星があると述べたが、星の数を一つ一つ数えたわけではない。そうではなく、まず、それぞれの星が銀河を回る速度から銀河の重力を求める。そして、その重力を生み出すのに必要な星の数を計算する。その結果 2,000 億個ぐらいになる、ということである。

一口に銀河といっても、大きさは相当違い、ばらつきがある。今知られている最大の銀河「IC 1101」は、我々の銀河系 100 個分以上に重い。また、銀河にはさまざまな形のものがある。ある銀河は円盤をもち、ある銀河はもたない。前者は「円盤銀河」あるいは「渦巻き銀河」と呼ばれ、後者は「楕円銀河」と呼ばれる。円盤銀河には大量の星間ガスがあり、回転速度は速い。円盤銀河には、円盤部に棒状構造をもつ「棒渦巻き銀河」と、もたない「渦巻き銀河」とがある。割合はほぼ同数とみられる。遠方の宇宙に行くほど、棒渦巻き銀河の割合は少なくなる。

一方、楕円銀河は、黄色や赤色の星でできており、星間ガスはほとんど含まれていない。ガスを含んでいないということは、この種の星では新しい星が生まれてこないということである。楕円銀河は、見かけ上楕円に見える銀河の総称であって、実際には球に近いもの、平べったいアンパン形をしたもの、あるいはラグビーボールに似たようなものなどいろいろある。我々の銀河系に比較的近い宇宙では、円盤銀河と楕円銀河の割合は 4 対 1 である。このような割合になっている理由は、はっきりしない。多くの学者は、次のように考えている。銀河は合体を繰り返しながら成長していく。その場合、渦巻き銀河が合体しながら、次第に楕円銀河になっていく。そう考えると、今は、その成長過



渦巻銀河



楕円銀河

程が4分の1ほど進んでいる、ということになる。

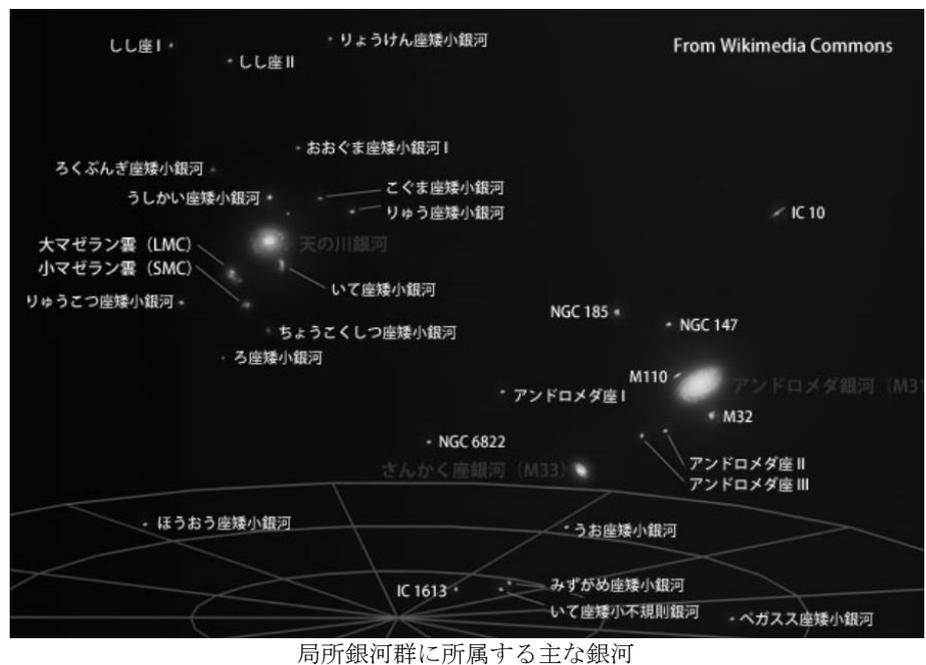
なお、円盤銀河でも楕円銀河でもない、特に明確な形をしていない銀河もある。これは「不規則銀河」と呼ばれる。この銀河は多量の星間ガスとチリとを含んでいて、盛んに星を誕生させている。

2. 銀河群

今から百数十年前までは、銀河といえば、我々の住む銀河系だけだと考えられていた。当時の観測技術が及んだのは、その辺までだったからである。しかし20世紀に入ると、観測技術は格段の進歩を遂げた。宇宙は470億光年のかたにまで拡大している(宇宙誕生は137億年前だったが、その間に宇宙は膨張し続け、広がりとしては470億光年になっている)。そして、1,000億個以上の銀河の存在が明らかになった。

銀河は孤立しているものもたくさんある。しかし、その多くはある程度まとまって存在し、互いに影響し合っている。そのグループを「銀河群」と呼んでいる。銀河群は、「明るい銀河」が2個以上、50個ぐらいまでの銀河集団を指す。「明るい銀河」とわざわざ断ったのは、銀河の中には「暗い銀河」もあるということである。暗い銀河とは、軽い銀河ということである。それは観測が難しいので、数に入れないのが普通である。銀河群の大きさは、直径300万光年ぐらいが平均である。

銀河群の銀河同士は、宇宙の膨張により互いに遠ざかっている。しかし、重力によって強く結びついているので、バラバラになることはない。銀河群の銀河は、銀河群自身の重力に対抗するため、動き回らなければならない。この動きを観測することによって個々の銀河の質量を求めることができる。ところが、ここに大きな問題が生じた。これらの銀河の質量と銀河群を満たしている高温のプラズマガスや、星をつくる材料になる低温のガスなどを合算しても、銀河群全体の質量に満たないのである。銀河においても、銀河群においても、質量の大部分を担っているものが他に存在しなければならない。科学者たちはこの物質を「暗黒物質」と呼んだ。そして彼らは、その正体解明に必死になっている(この点は次の講演で扱う)。



我々の銀河系から一番近い銀河は、212万光年離れたところにある。それは「アンドロメダ銀河(M31)」と呼ばれている。その直径は22万光年から26万光年あり、銀河系の2倍以上の大きさである。この二つ銀河の間には、銀河とまでは言えないもう少し小さな「小銀河」と言われるさまざまな星の群れがある。この群れには50個ほどの銀河が見つかったが、その多くは暗い銀河である。これらのすべての天体を含め、「局所銀河群」と呼ばれている。「局所」というのは英語の「local」の訳語で、「地元の」というほどの意味である。この語は、我々の住む地球、あるいは太陽系を「地元」と考えてつくられた表現である。なお、「局所銀河団」というのはない。ところが、「局所超銀河団」はある。

この「局所銀河群」は、およそ650万光年の広がりがある。この銀河の中では銀河系とアンドロメダ銀河とが際立って明るい。局所銀河群の質量の大部分はこの二つの銀河が担っている。この二つの銀河は、周囲の暗い銀河を飲み込みながら大きく成長してきた。現在、銀河系の円盤に突入しつつある銀河も見つかっている。

銀河系とアンドロメダ銀河は、既に互いの重力圏に入っている。両者は、時速 43 万kmで相手に向かって疾走している。ただ現時点では、両者の間には 250 万光年ほどの距離がある。両者の衝突はまだ 20 億年ほど先である。この衝突は、これまで銀河系が経験してきた小さな銀河との衝突とは違う。両者の大きさはほぼ同じなので、明確な勝敗はつかない。何十億年も複雑なダンスをしているような状態が続き、それぞれの銀河の内の星の残骸やガスなどが引き出され合う。やがて巨大な球になり、楕円銀河と呼ばれるような銀河になるだろう。この新しくできた楕円銀河は、質量も重力も、もとの銀河のいずれよりも大きいはずである。そしてさらに、近隣との接触が続き、吸収してさらに大きな銀河に変わっていくであろう。

局所銀河群のその他の主な銀河を、銀河系から近いものからあげると、おおいぬ座矮小銀河(4.2 万光年)、いて座矮小楕円銀河(7 万光年)、大マゼラン雲(16 万光年)、小マゼラン雲(20 万光年)、りゅう座矮小銀河(25 万光年)、こぐま座矮小銀河(25 万光年)、ちょうこくしつ座矮小銀河(30 万光年)、りゅうこつ座矮小銀河(40 万光年)、ろ座矮小銀河(60 万光年)、Leo I (60 万光年)、Leo II (60 万光年)、NGC6822(170 万光年)、IC1613(220 万光年)、アンドロメダ銀河 M31(212 万光年)、アンドロメダ銀河伴銀河(230 万光年)、NGC147(230 万光年)、NGC185(230 万光年)、NGC205(230 万光年)、さんかく座銀河 M33(235 万光年)などである。

このうち、銀河系に一番近い「おおいぬ座矮小銀河」は、2003 年に発見された。そのうち銀河系に吸収されるであろうと予測されている。

3. 銀河団

銀河がある程度集まったグループを「銀河群」と呼んだ。それよりさらに大規模に集まった銀河の集団を「銀河団」という。明るい銀河の数が 50 個以上 1,000 個ぐらいまでのグループである。銀河団の大きさは 600 万光年以上、平均すると 1,500 万光年ぐらい。銀河群の大きさに比べると、およそ 5 倍の距離になる。しかし、占める体積は大きさの 3 乗になるので、125 倍と相当大きなものになる。形としては、ラグビーのボールを想定すればよい。

一般に銀河団は、中心部に近いほど銀河が密集している。銀河団内部の平均密度は宇宙の平均の 100 倍以上高い。銀河群と銀河団は大きさが違う。両者とも自己重力系で、同種の天体である。両者にははっきりとした境界はない。従って、大きな銀河群と小さな銀河団とは区別できない。銀河系が属する局所銀河群は、大きさとしては銀河団に近い。従って、局所銀河団と呼んでもよいのだが、局所銀河群と呼ぶ慣習になっている。

銀河団の銀河も、銀河群の銀河と同じく動き回っている。むしろその速度は銀河群のそれよりはるかに大きく、秒速で数百キロから 1,000 km に及ぶ。集まっている銀河は、互いの重力によって引き合っているからである。

銀河団におけるそれぞれの銀河の運動を観察すると、光で見える銀河から推測される物質の質量だけでは説明できない。もっと質量が多くなければ銀河団全体を束ねることはできない。典型的な銀河団の質量は、銀河の質量が数%、星間ガスの質量は 20%、残りの大多数の質量は未だ分かっていない。これを「暗黒物質」と呼んでいる。銀河団もまた、重力的には暗黒物質に支配されている。なお、ここに出てくる「星間ガス」というのは、1 億K 近い高温のプラズマガス(銀河団ガスと呼ばれる)である。X線望遠鏡が打ち上げられ、初めて判明した。

銀河系から最も近い銀河団は「おとめ座銀河団」である。この銀河団については、かなり詳しく分かっている。おとめ座銀河団は、銀河系から 6,000 万光年しか離れていない。銀河の数としては、暗いものまでも含めると 2,000 個以上が見つかっている。それらの銀河の公転の標準的な速さから推定すると、銀河、ガス、その他暗黒物質などすべてを合わせた合計は、太陽質量の 1,000 兆倍以上になる。



おとめ座銀河団

なお、このような銀河団の名前は、その銀河団が地球から見てどの星座の位置にあるかによってつけられている。「かみのけ座銀河団」や「うみへび座銀河団」などの銀河については、さまざまな角度から調査が続けられている。現在知られている銀河団の中で一番重いのは、「アベル 2163」と呼ばれる銀河団で、へびつかい座の方向に 20 億年以上離れたところにある。そこには 500 以上の銀河がある。1,500 万光年にわたって広がっており、どれも 1 億 5,000 万度ほどの超高温になったガスの中にある。その総重量は、フランスの天文学者ソフィ・モロゴルダードらのチームが測定したところでは、太陽質量の 4,000 兆倍になった。

現在、1 万個以上の銀河団の存在が確認されている。銀河団の中で最も大きな質量を持っている銀河は、銀河団のほぼ中心に位置している。そのほとんどは楕円銀河で年齢は古い。渦巻き銀河の多くは、銀河団の周辺領域にある。これらの現象から、銀河団の中心は宇宙形成当初は密度が大きかったことが、推測される。

4. 超銀河団

いくつかの「銀河団」や「銀河群」がゆるく集まった集団を「超銀河団」という。このグループになると、その直径の大きさは1 億光年ほどになる。超銀河団は宇宙で最も大きな構造で、中には2 億光年もの大きさのものもある。

しかし、周囲との境界がはっきりしていないものも多い。超銀河団は集団としてそれなりに独立して見えるが、銀河フィラメントの一部とよく、あえて「超銀河団」だけを切り離して研究する意義はあまりない。

銀河系から約 1 億光年以内にある銀河は、「おとめ座銀河団」を中心に「局所超銀河団」を形成している。このグループは比較的平坦な構造をしており、銀河系はその端の方に位置している。他によく知られている超銀河団としては、「かみのけ-A1367 超銀河団」、「ヘルクレス超銀河団」、「うお-ベルセウス超銀河団」、「うみへび-ケンタウルス超銀河団」などがある。

天体あるいは天体の集合体は、そのほとんどが球、円盤、楕円体などの形をしている。それは、天体の力学的な平衡状態を反映しているからである。力学的平衡とは、回転運動をしている物体の遠心力と、その物体が中心に引きつけられる重力とが釣り合っていることである。銀河団ぐらいまではこの平衡状態が見られる。ところが、「超銀河団」になると、力学的平衡であることを示す形にはなっていない。重力的な結びつきが弱いので、形のいびつなものが多い。

「超銀河団」が力学的に平衡状態に達するまでの時間を求めると、「約 380 億年」と計算される。現在、超銀河団が平衡状態にないということは、宇宙ができてから 380 億年は経過していない、ということである。むしろ、宇宙誕生は 137 億年前なのだから、このことは当然と言えば当然である。

5. 宇宙の大規模構造

最後に、「宇宙の大規模構造」についてふれておこう。

1970 年代までは、銀河は宇宙全体に同じぐらいの密度で分布している、と考えられていた。ところが、1978 年、スティーブン・グレゴリーとレアー・トンプソンは、銀河系を要にして赤経 11 度 5 分から 13 度 3 分まで、赤緯+19 度から+32 度までの領域を調べ、銀河の分布図を明らかにした。そこには、238 個の銀河が見つかったが、銀河が集中している領域と銀河がほとんど見つからない領域のあることが分かった。特に、100 万パーセク(1パーセクは 3.26 光年)付近を東西に横切る帯のような領域に銀河が多数存在し、フィラメント状に分布していた。

1986 年アメリカの女性天文学者マーガレット・ゲラーはハックラとともに 1,786 個の銀河の位置を調べ、赤方偏移掃天観測を行った。その結果、多くの銀河が大きさ約 1 億光年の「泡構造」の表面に並んでいることが分かった。超銀河団の連なりは、ちょうどシャボン玉がぶつかりあっているような泡の膜の形をしている。その内部には広大な 1 億光年以上のサイズの「空洞(ボイド)」があり、そこには星や銀河は全く存在せず、暗い空間が広がるだけである。その後、ゲラーは観測する銀河の数をさらに増やし、気の遠くなるような銀河観測を丁寧に行った。

その結果、長さが 6 億光年以上もある「かべ構造」も発見した。それは、数千個もの銀河が集まって細長い壁をつくり、宇宙空間を大きく切り分けている。この巨大な壁は、「グレート・ウォール」と呼ばれているが、現在十数個が発見されている。宇宙は、銀河がまんべんなく集まっているようなものではなく、このような泡構造やグレート・ウォールという壁、さらに大きな空洞の空間(ボイド)によって「大規模構造」を形成していることが分かってきた。

この宇宙の大構造が明らかになって以来、より遠くの銀河をより広範囲に観測し、さらに詳細な分布状況を明らかにする宇宙の地図づくりが進められている。

宇宙の三次元の構造は、夜空を写真に撮れば簡単に得られる、というようなものではない。前後にはたくさんの無関係な銀河が無数にあり、一つ一つの奥行きを探索しなければならぬ。天文学者たちは、このため長い時間をかけ、銀河の光を波長によって並べたスペクトルに分解し、銀河の色を精密に求めて三次元画像を作り続けて

きた。これは、銀河の「赤方偏移」による測定方法で、普通の銀河であるなら、現代の望遠鏡を使って 1 時間ほどの露光で可能である。1980 年代は、このような作業を銀河の一つ一つについて繰り返し、調べ上げていった。

しかし宇宙に広がる無数の銀河をこのような方法によって明らかにするには数百年はかかってしまう。1990 年代になると、空のそれなりの領域をカバーするため、何百本もの光ファイバーを使って一度にたくさんの銀河の色を測定できる新型カメラが開発された。この光ファイバー方式の望遠鏡は、1 台で 100 台の別々の望遠鏡の能力をもつので、いろいろな銀河の距離の測定時間は 100 倍の速さになった。

この新しい多重ファイバー探査によって、今では全天の 30%ほどがカバーされるまでに至った。とはいえ、未だ 70%は手つかずの状態にある。その領域に、どのような構造が見られるのか、楽しみである。

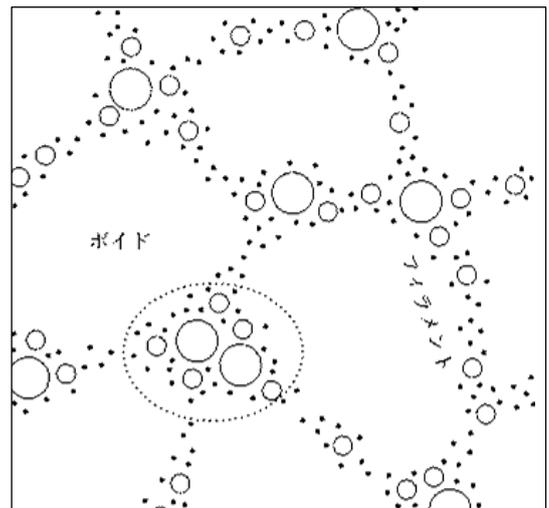
このような新技術によって明らかにされたものの一つは、「スローン・グレート・ウォール」と言われる構造である。これは、2003 年にアメリカの天文学者 J・リチャード・ゴットのグループが明らかにしたものである。「スローン・グレート・ウォール」は現在宇宙で知られている最大の構造で、長さはおよそ 14 億光年、うみへび座、ろくぶんぎ座、しし座、おとめ座の向こう側、夜空のほぼ 4 分の 1 にわたる範囲に広がっている。一本の直線的な糸ではなく、くねくねとよじれ、何億光年かにわたって 2 本の巻きひげに分かれたかと思うと、それがはるかかなたで再び 1 本になるというような構造になっている。

最後に、この宇宙の大規模構造に関係するいくつかのことに触れて話を終わることにしよう。

まず、右の図をご覧ください。この図において、点は銀河、小さい円は銀河群、大きい円は銀河団を表わす。点線の楕円で囲まれた領域は超銀河団、フィラメントとボイドがつくる網の目のような構造が「大規模構造」である。大規模構造は宇宙で最も大きな構造であり、宇宙の骨格を成している。

なお、銀河群や銀河団は自己重力系で、自分自身の重力で形を保っている。しかし、超銀河団とこの大規模構造は、重力的な結びつきが弱いため、自己重力系ではなく、宇宙膨張の影響で拡大し続けている。従って、大規模構造は、今後さらに大規模になっていく運命にある。むしろ、それと引き換えに中身は薄くなっていく。

既に、銀河は、銀河群や銀河団の中で動き回っていることを述べた。ところが実は、銀河は大規模構造の中でも運動している。例えば、銀河団の周囲の銀河は、ハッブルの法則から計算された後退速度よりもゆっくりと銀河団から遠ざかっている。銀河団の重力によって、後退にブレーキがかかっているからである。銀河団の近くにある銀河は遠ざかることすらできず、銀河団に飲み込まれる運命にある。一様な宇宙膨張からずれたこのような運動を、「銀河の特異運動」と呼ぶ。



宇宙の質量分布は滑らかではない。宇宙空間の重力場もでこぼこしている。従って、実質的にはすべての銀河は特異運動をしている。我々の銀河系も例外ではない。銀河団のような非常に重い系も特異運動をすることがあり、場合によっては銀河団同士が合体してしまうこともある。

銀河とその集団の起源は、宇宙誕生直後にまでさかのぼる。誕生直後の宇宙には、「原始密度ゆらぎ」と呼ばれるかすかな密度の濃淡が存在した。宇宙空間に密度の高い領域と低い領域がモザイクのように混在していたのである。密度の高い領域はそれだけ重力が強いので、時間と共にさらに密度が上がり、やがて銀河や銀河集団になった。この過程を「ゆらぎの成長」という。ゆらぎは実質的には暗黒物質の重力によって成長する。もし宇宙の密度が完全に一様だったとしたら、銀河はおろか、いかなる天体も、我々自身も、生まれてこなかっただろう。

そして、原始密度の揺らぎ自身の起源が宇宙誕生時の量子ゆらぎにあったとすれば、宇宙最大の構造は最小の素粒子の世界につながっていることになる。

おわりに

晴れた夜空には、星が満天にちらばっている。人間の目には、星は一枚のキャンバス上に配置されているように見える。だが、実際はそうではない。一つ一つの星は奥行深くにあり、想像できないほど遠い場所で輝いている。人の肉眼は、地球の近くにあるわずかの星しか見えない。北半球では、地球の北方向にある星しか見えない。南半球では、南方向の星が見えるだけである。たとえ見えても、その星に何かができるわけではない。星の世界に近づけば近づくほど、人は自らの小ささや弱さを知らされるだけである。その歩みや法則に手を出すことなど、全くできない。

あなたはすばる座の鎖を結びつけることができるか。オリオン座の綱を解くことができるか。あなたは十二宮をその時々にしたがって引き出すことができるか。牡牛座をその子の星とともに導くことができるか。あなたは天の法令を知っているか。地にその法則を立てることができるか。(ヨブ 38:31-33)

この星空の位置を見定めるため、人類は天空の地図をつくる方法を思いついた。星座である。最古の星座は、今から5,000年ほど前、メソポタミア地方でつくられた。農耕民族の彼らにとって、季節の移り変わりは重要であり、それを知るには星座がとても便利だった。

以降、古代エジプトやギリシャなどにおいても、いろいろな星座が形づくられた。このような動きは近代になっても止まらない。16世紀半ばからの300年間に、最大時には130個もの新しい星座ができあがった。そこまでいくとさすがに、いろいろな混乱も生じてきた。誰かが統制を取る必要があり、国際天文学連合が動いた。第三回総会が1928年に開かれ、88個の星座が定義され、境界線も明確にされた。それが今日の天文学世界のコンセンサスになっている。

星座の名前は、旧約聖書のヨブ記、イザヤ書、アモス書などに登場する。古の神の民もまた、星座を眺めながら、創造主に思いを寄せていたのである。

神は牡牛座、オリオン座、すばる座、それに、南の天の室を造られた。(ヨブ 9:9)

天の星、天のオリオン座は光を放たず、太陽は日の出から暗く、月も光を放たない。(イザヤ 13:10)

すばる座やオリオン座を造り、暗黒を朝に変え、昼を暗い夜にし、海の水を呼んで、それを地の面に注ぐ方、その名は主。(アモス 5:8)

旧約聖書を開き、預言者イザヤの言葉に耳を傾けよう。その時代のイスラエルの民は、祖国を追われ、遠い外国の地で捕囚民として生きることを余儀なくされていた。屈辱の歩みを強いられていた彼らは、「私の道は主に隠れ、私の正しい訴えは、私の神に見過ごしにされている」(イザヤ 40:27)とつぶやいていた。そんな民に向かい、預言者は強く語りかけている。

目を高く上げて、だれがこれらを創造したかを見よ。

この方は、その万象を数えて呼び出し、一つ一つ、その名をもって、呼ばれる。

この方は精力に満ち、その力は強い。一つももれるものはない。

...

あなたは知らないのか。聞いていないのか。

主は永遠の神、地の果てまで創造された方。

疲れることなく、たゆむことなく、その英知は測り知れない。

疲れた者には力を与え、精力のない者には活気をつける。

...

主を待ち望む者は新しく力を得、鷲のように翼をかって上ることができる。

走ってもたゆまず、歩いても疲れぬ。(イザヤ 40:25-31)

キリスト者であっても、ときどき、「私の道は主に隠れ、私の正しい訴えは、私の神に見過ごしにされている」(イザヤ 40:27)とつぶやきたくなることもある。いわゆる「神の沈黙」という経験である。それは信仰の危機であり、自己存在の危機である。そんな時、宇宙を見上げ、創造者について思いを寄せよ、と預言者は語りかけている。そうするなら、神の本来のお姿を知ることができる。失望、落胆、疲れから解放され、新しい勇気と力が注がれる。

宇宙を知ることは、宇宙の創造者を知ることに通じる。すると生きる力に溢れてくる。この講演では、現代科学が

明らかにした宇宙像について考えた。しかしその目的は、最新の宇宙学の知識を身に着けることではない。聖書の神をより深く知り、豊かな人生へと羽ばたくことにある。

参考文献

<宇宙に関する参考文献>

マーティン・リース著、林一訳『宇宙を支配する6つの数』(草思社、2002年)
マーティン・リース著、青木薫訳『宇宙の素顔』(講談社、2005年)
荒船良孝著『宇宙の新常識 100』(2008年、ソフトバンク)67-92頁
杉山直、他著『宇宙のしくみ』(学研教育出版、2010年)
村山斉著『宇宙に終わりはあるのか?』(近代科学社、2010年)
村山斉著『宇宙は本当に一つなのか』(講談社、2011年)
ブライアン・ゲンスラー著、松浦俊輔訳『とてつもない宇宙』(河出書房新社、2012年)
村山斉著『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』(集英社、2012年)
村山斉著『宇宙になぜ我々が存在するのか』(講談社、2013年)

<銀河、銀河系に関する参考文献>

鍛冶澤賢著『新天文学事典—銀河』(講談社、2013年)155-212頁
和田桂一著『新天文学事典—銀河系』(講談社、2013年)213-40頁

<星の誕生に関する参考文献>

デニス・オーヴァバイ著、鳥居祥二訳『宇宙はこうして始まり、こう終わりを告げる』(白揚社、2000年)230-58頁
福井康雄著『私たちは暗黒宇宙から生まれた』(日本評論社、2004年)28-80頁
福井康雄著『大宇宙の誕生』(光文社、2006年)75-124頁
野本陽代著『宇宙はきらめく』(岩波書店、2007年)
野本陽代著『ハッブル望遠鏡宇宙の謎に挑む』(講談社、2009年)
京極一樹著『こんなにわかってきた宇宙の姿』(技術評論社、2009年)、196-241頁
野本陽代著『ベテルギウスの超新星爆発』(幻冬舎、2011年)
吉田直樹著『宇宙で最初の星はどうやって生まれたのか』(宝島社、2011年)
福井康雄著『宇宙 100 の謎』(角川学芸出版、2011年)126-49頁

<宇宙の大規模構造に関連する参考文献>

松原降彦著『宇宙に外側はあるか』(光文社新書、2012年)107-140頁
佐藤勝彦著『宇宙「96%の謎」』(角川書店、2008年)61-90頁
嶋作一大著『新天文学事典—宇宙の大規模構造』(講談社、2013年)129-54頁