

107 D 広域の大気汚染と酸性雨

杉の立ち枯れや石像への影響(→教科書 口絵 p.7)などで、大気汚染や酸性雨は話題になっている。日本でも本来工場地帯から離れた山陰地方で被害が出ていることからわかるように、国境を越えた地球規模の公害としてとらえられている。ここでは身近な材料である雨の分析など自分たちのまわりで起こっていることを確認させるのもよい。

108 E 地球環境の保全と持続性のある発展

地球環境の保全は、1997年京都會議も開かれるなど、今国際的にも急務となっている。それらの時事問題にも関心を示させるとともに、自分たちがどのようにかわれるのかを討論させてもよい。

第4編

宇宙の構造

【指導目標】

- (1) われわれの銀河系の研究の歴史的エピソードを軸に、恒星の距離の測定、恒星の分布にふれ、銀河系の大きさや形を理解させる。
- (2) 恒星の運動の観測と銀河系の回転について理解させ、天体の種族、銀河系の形成と進化にふれ、ダイナミックな銀河系の姿を理解させる。
- (3) われわれの銀河系のほかにも多数の銀河が存在し、宇宙を構成していることを理解させる。さらに銀河の分類や分布、クエーサーなどの活動銀河についてふれる。
- (4) ハッブルの法則について取りあげ、宇宙の膨張と進化について理解させる。
- (5) 太陽系の起源、元素の起源についてふれ、宇宙の中での地球や生命の起源と意義について理解させる。

I われわれの銀河系

【章の内容と指導上の留意点】

ここではまず恒星の分布について学習する。天の川が銀河系の構造と、どう関係しているかという点に注意してほしい。かつてハーシェルは恒星の空間分布が一様であるとして、各方向の恒星数の実測より教科書p.112図3のような恒星分布=銀河系の姿を求めようとした。しかし星間塵により光がさえぎられるため遠くまでは見とおせない。オルバースのパラドックスについても解説し、内部にいるわれわれにはわかりにくい銀河系の姿が、さまざまな観測によって明らかにされてきたことを説明する。

天球上でその位置を変えないと考えられていた恒星が、固有運動をすることを説明し、さらに銀河系の円盤部の星々は銀河中心のまわりを公転していることを説明する。銀河系の回転や恒星の運動のようすから求められる銀河系の質量分布から、ダークマターの存在の可能性についても解説してほしい。

【地学IBとの関係】

中学理科第2分野では、地球と太陽系について学習している。地学IBでは、宇宙の中の地球、太陽と恒星で、恒星からもたらされる光の情報を基に、恒星の明るさ、スペクトル型、HR図、恒星の分類などを学習し、さらに、HR図を中心にして、散開星団と球状星団の違い、星間ガスと星の誕生、質量による進化や寿命の違いについて平易に学習している。

この章では、銀河系を構成する天体、銀河系の形と大きさ、恒星や星間ガスの空間分布について扱っている。

1. 銀河系の構造

教科書 p.110~118

110 ■A 天の川の正体

この項は銀河系の構造についての導入として扱う。広角カメラによる天の川の写真を観察すると、

- ①天の川は空をひとまわりし全天を二分している。
- ②天の川はいて座のあたりがとくに膨らんだように広い。
- ③天の川の中にはほぼ中心にそって黒い星間吸収帯が見られる。

の3点が気がつく。教科書の図1や他に天の川の写真が入手できれば、それらを生徒に見せながら、これらの点をここで指摘しておきたい。これらの特徴をふまえて、他の銀河の写真と比較して類推させ、われわれの銀河系が円盤状の渦巻銀河と考えられることを理解させたい。

解説 オルバースのパラドックス なぜ、太陽に照らされている昼間は明るくて、太陽が見えなくなる夜になると暗くなるのだろうか。そんなことは当たり前だというのが一般的反応であろう。だが、太陽が宇宙にある無数の恒星の一つに過ぎないとしたら、宇宙のすべての星の光を合わせて考えてみると話はそう単純ではないかもしれない。18世紀のはじめには、そのような認識が一部の哲学者の間で生まれた。実際、すい星で有名なエドモンド・ハレー(Edmond Halley: 1656~1743 イギリス)は夜空が暗いからには宇宙は有限でなければならないと述べている。別の学者は遠くの星からの光は途中で弱められるから多数あっても明るくはならないのだと考えた。

1823年、オルバース(Heinrich Wilhelm Matthaus Olbers: 1758~1840 ドイツ)は、「宇宙で恒星が無限のかなたまで一様に分布していれば、夜空のどの方向を見ても必ず星に行き当たる。だとすると、夜空は太陽と同じような星々で埋めつくされ、太陽と同じまばゆい明る

さになるはずではないか。」と疑問に思った。結局、オルバースは、夜空が暗いのは星間空間に吸収物質があるためだと考えた。

ところが、球状星団の研究をしていたハーロー・シャプレー(Harlow Shapley: 1885~1972 アメリカ)は銀河系内の吸収がほとんどないことを1917年に示し、宇宙は有限でなければならないと論じた。20世紀になって復活したこの問題はオルバースのパラドックスとして知られている。さきの考えは、宇宙が無限に大きく、無限の時間存在し、無限のかなたまで同じように見えると仮定している。だが、実際には、宇宙は膨張していて光が赤方偏移するため、観測される遠くの恒星ほど、本来の波長が短い紫外線を見ていることにある。平均的な恒星のスペクトルはほぼ可視光で最大になるため、観測される遠くの天体からの赤方偏移した光は弱く、無限の彼方まで同じようには見えない。このため、夜空は暗いのである。

解説 ハーシェル ウィリアム・ハーシ

エル(Frederick William Herschel: 1738~1822)。ドイツに生まれ、七年戦争(1756~1763)のさなか軍楽隊の楽手だったウィリアムは1757年に脱走して英国に渡り、オルガン奏者として働き、有名になった。妹のカロライン(Caroline Lucretia Herschel: 1750~1848)と弟のアレクサンダーも兄と一緒に暮らすようになり、やがてハーシェル兄妹は次々と望遠鏡をつくり、天文学に没頭するようになった。2500個の星雲を発見し、1781年には天王星を発見して天文学者としても一躍有名となった。ハーシエルの作った望遠鏡は次第に大きなものとなり、1788年には鏡の直径が122cm、焦点距離が12mの大望遠鏡を完成した。ハーシェルは恒星系が有限であると仮定し、いろいろな方向の恒星の数を等級ごとに数えた。そして、星の本来の光度が

同じだと仮定して、銀河系の星々がほぼ円盤状に分布することを1785年に確かめた。われわれがほぼこの円盤の中央面にいることは、天の川が天球上でほぼ大円を描くことからわかる。ハーシェルは銀河系宇宙の構造を観測により実証的に調べた最初の天文学者であった。

20世紀初めになるとヤコブス・カプタイン(Jacobus Cornelius Kapteyn: 1851~1922 オランダ)が、写真観測を用いてハーシエルの研究を復活させた。カプタインも銀河系宇宙が天の川の方向にのびた円盤形で、太陽がほぼその中心にあるというハーシェルとほぼ同じ結論に達した。銀河系全体の大きさとその中で太陽の位置を正しく認識するきっかけとなったのは、後のシャプレーの球状星団の分布の研究による。

112 B 恒星の分布

恒星までの距離の測定法については、年周視差から直接求める方法と、絶対等級と見かけの等級との差から求める方法があることを地学IBで学んでいる。年周視差によって距離が測定できるのは近い恒星に限られるので、銀河系の構造を調べるときには使えないことを思い出させる必要がある。

セファイド型変光星は他の銀河までの距離の測定にも使われるので、ここですっきり理解させておきたい。

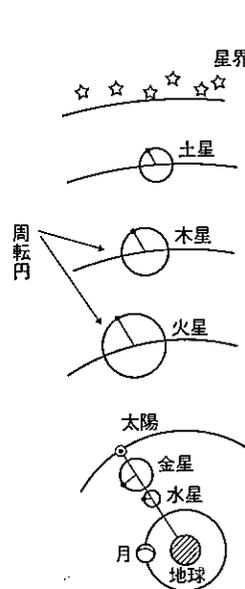
解説 年周視差の測定 プトレマイオス(Claudios Ptolemaios: A.D.100ころ~A.D.170ころ ギリシア)の天動説では、惑星は静止した地球のまわりを円運動する周転円軌道上を動くものとされていた。コペルニクス(Nicholaus Copernicus: 1473~1543 ポーランド)は、それまでの常識であった天動説をくつがえす地動説を唱えた。だが、コペルニクスの地動説が本当ならば、近くの恒星は遠くの恒

星に対して地球の公転運動を反映した視差だ円運動を示すはずである。

ティコ・ブラーエ(Tycho Brahe: 1546~1601 デンマーク)は、恒星の年周視差を測ることで地動説を確認するため、観測所と精密な位置測定装置をつかって、長年にわたる観測を行った。だが、年周視差の存在を確認できなかった。ブラーエの観測は、測定誤差20秒角という、当時としては驚異的な精度だったが、

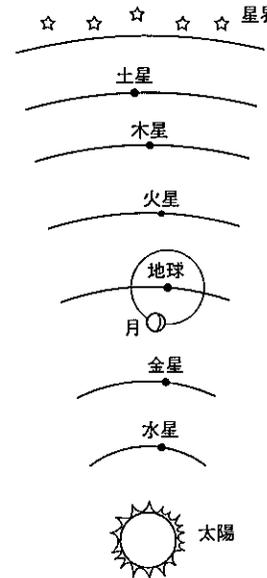
実際の年周視差は近い恒星でも1秒角以下しかないため、確認できなかったのである。

年周視差の測定が成功したのは、それから200年以上も後のことであった。ベッセル(Friedrich Wilhelm Bessel: 1784~1846 ドイツ)は、固有運動の大きい星は近距離にある星であろうと考え、固有運動の大きいはくちょう座61番星に目をつけた。1838年、彼はその年周視差を



プトレマイオスの宇宙体系

<プトレマイオスの天動説とコペルニクスの地動説>



コペルニクスの宇宙体系

測定することに初めて成功し、その距離を三角測量法で約11光年と求めた。太陽系に最も近い位置にある恒星ケンタウルス座α星(距離4.3光年)でも、年周視差はわずか0.75秒角でしかない。

地上からの観測で年周視差により距離の測定ができるのは、せいぜい300光年までだが、位置天文衛星ヒッパルコスで測定した全天12万個の星表が1997年に発表された。これには1ミリ秒角(0.001秒角)の精度での星の位置と、1ミリ秒角の精度での星の年周視差、それに1ミリ秒/年の精度での固有運動の値が掲載されている。

解説 周期光度関係 セファイド型変光星は、膨張と収縮を繰り返して明るさが周期的に変化する、明るい超巨星で、最初に発見されたケフェウス座δ星にちなんで名づけられた。変光周期が1日から

100日で、変光幅が2等以下のI型のセファイド(古典的セファイド)は種族Iの天体である。変光周期が30日以下、変光幅が1等程度で、主として球状星団に見られるII型のセファイド(おとめ座W星型星)は、種族IIの天体である。

種族Iのセファイドは種族IIのセファイドより約1.5等級ほど明るい。セファイドの変光周期と光度とは一定の比例関係があるが、その関係は種族ごとに違う。このことに気づいたバーデはアンドロメダ銀河の距離をハッブルが求めた値より2倍大きくする必要があることを指摘した。

一番近いセファイドは北極星(距離約400光年)である。年周視差法で直接距離を測定できる距離にはセファイドがないが、さまざまな天体を用いて距離測定物の差しを伸ばす上で、セファイドは最

も重要なものさしとなっている。

恒星は自らの重力でつぶれようとする力と内部の圧力で広がろうとする力がつりあった状態にある。このような星を少し押し縮めると圧力の増大が重力の増大を上回るため、恒星は元の大きさに戻ろうとして膨らむが、こんどは少し膨らみ過ぎることになる。こうして恒星は正しい大きさに戻るまで脈動することになる。

ふつうの恒星は外乱がなければ脈動は起こさないが、セファイドはその表面近くにあるヘリウムと水素の部分電離層が熱エネルギーを脈動のエネルギーに変える「エンジン」としてはたらくため、脈動が持続する恒星である。セファイドが実際に脈動していることはその表面大気の視線速度が周期的に変化していることから確かめられている。セファイドが脈動する周期 P は固有振動数とよばれ、星の平均密度 ρ の平方根に逆比例する。セファイドの光度周期関係はこの密度周期関係を観測しやすい光度を使って表現したものである。

解説 リービット ハーバード天文台長ピカリングの指示で多数の写真乾板を測定して、銀河系の伴銀河である大小マゼラン星雲中に発見された2000個ほどの変光星の明るさを調べていたリービット(Henrietta Swan Livitt: 1868~1921 アメリカ)は、その中のある種の変光星についてその変光周期の長いものほど見かけの明るさが明るいことを1908年に発見した。翌年ヘルツシュプルングはリービットが調べた小マゼラン星雲中の25個の変光星がセファイド型変光星であることに気づいた。

小マゼラン星雲の中にあるこれらの星の地球からの距離は同じと考えてよいの

で、彼女の発見はセファイド型変光星の変光周期と絶対光度が物理的に関係していることを示す。セファイド型変光星やこと座RR星型変光星は、膨らんだり縮んだりして明るさが周期的に変化することが、理論的にも確かめられた。変光周期が分かれば絶対等級を求めることができ、それを見かけの等級と比べると、その距離を計算できる。これらの変光星は球状星団や近くの銀河の距離の測定に用いられている。

解説 太陽近傍の構造 太陽から10光年以内の距離には8個、13光年以内に25個の恒星がある。このうち10星には伴星があることが知られている。これらの星のほとんどは、太陽より質量が小さく暗い主系列星だが、白色わい星が2個確認されている。

太陽のまわりの恒星のスペクトルに見られる星間吸収線のようなことから、太陽のまわりには密度が低く直径15~30光年の電離したガス雲があり、太陽はそのガス雲の縁に位置しているらしいといわれている。このガス雲の周囲は、より高温でより密度の低いプラズマで満たされていると考えられている。

問 1. [指導] 地学IBで学んだ、恒星までの距離と恒星の等級との関係式

$$M - m = 5 - 5 \log_{10} d$$

をきちんと理解させたい。この方法により数万光年も遠い恒星の距離が求められるので、恒星の分布状態や、銀河系の構造が調べられる。

[解答] 求める球状星団までの距離を d [pc] とする。

$$M = 0.5, m = 12.0 \text{ を}$$

$$M - m = 5 - 5 \log_{10} d$$

に代入すると

$$0.5 - 12.0 = 5 - 5 \log_{10} d \\ 5 \log_{10} d = 16.5 \quad \therefore \log_{10} d = 3.3$$

$$\log_{10} 2 = 0.3 \quad \text{であるから} \\ d = 2.0 \times 10^3 \text{ (pc)}$$

115 C 銀河系の大きさや形

太陽系は銀河系の中にあり星間塵による光の吸収があるために、銀河系全体を見通すことは難しい。球状星団の分布から太陽系が銀河系の中心にないことがわかったこと、中性水素の出す電波を観測できるようになって銀河系全体が見渡せるようになったことはしっかり押さえておきたい。

また、遠くの景色がかすんで見えるときでも、赤外線透過フィルターを使って撮影するとはっきり写ることなどを例にとり、波長の長い電磁波は吸収されにくいことを説明するとよい。

解説 球状星団の分布 1921~1952年の間ハーバード大学天文台長を務めたシャプレー(Harlow Sharpley: 1885~1972 アメリカ)は、こと座RR星型変光星をつかって球状星団の距離を測り、球状星団の分布も球状であること、太陽はその分布中心からはずれた位置にあることを、1918年ごろに発見した。銀河面には星間塵があり、可視光で見える範囲は太陽系からせいぜい1万光年程度に限られている。このため、ハーシェルやカプティンが行った恒星の分布の観測からは、われわれが銀河系の中心からはずれたところにいることが、よくわからなかったのである。球状星団は銀河面から離れた方向にあるものが多く、星間吸収の影響が少ないため、遠くのものまで見通せる。シャプレーの研究で、太陽系が銀河中心からはずれた位置にあると考えれば、球状星団がいて座の方向に集中して分布することを合理的に説明できることが明らかとなった。その後、1927年にはオールト(Jan Oort: 1900~1992 オランダ)らが球状星団の速度分布から銀河系の自転を確認した。

球状星団は1万個から100万個の古い

種族IIの恒星からなるが、直径100光年以内にこれらの星々が球状に分布したものである。そのスペクトルからは重元素が少ないことが知られている。銀河系の球状のハロー領域に分布し、軌道は扁平な円軌道、運動方向もばらばらである。銀河系でも最も古い天体であり、銀河系形成初期につくられたものとされている。球状星団のHR図を観測からつくり、星の進化モデルから計算した主系列の転向点を観測と比べることにより、球状星団の年齢を推定すると古いものでは約160億年という値が得られる。

解説 銀河系の渦巻構造 太陽系はわれわれの銀河系の円盤の中にあるため、銀河系の渦巻構造の全体を再現することは大変難しい。大きな森の中にいる者にとっては、木々が重なって視野をさえぎるため、その森のどこに何が生えているのかを言い当てられないのと同じである。それでも、太陽系のまわりの明るいO型星やB型星などまだ生まれてから年齢をあまり経ていない星々について、スペクトル型から絶対光度を求め、見かけの光度と比べて距離を算定して、その分布を調べると、いくつかの帯状の領域に分

銀河系の中心に何があるか

暗黒星雲中の塵が光を吸収するため、銀河系の中心は可視光では見通せない。だが、電波で観測すると、いて座A*と名づけられた強い電波源が見える。これは銀河中心にあるブラックホールに落ち込むガスから放射されるシンクロトロン放射と考えられている。

最近、星間吸収の影響が少ない赤外線補償光学を用いて空間解像力の高い撮像観測が行われ、いて座A*そのものは見えないものの、そのまわりにある星が多数観測された。それらの星の固有運動や視線速度は数百 km/s の速度で、いて座A*のまわりを回っていることが確認された。このように大きな回転運動を引き起こすには、太陽質量の100万倍以上の質量がその内側にある必要があり、この観測は、いて座A*に巨大ブラックホールがひそんでいる可能性を強く示唆している。

布するようすが浮かび上がってくる。これはO・B型星が渦巻腕で生まれて、まだその生まれたところからあまり散らばっていないためと考えられる。

波長21cmの電波は水素原子の陽子と電子のスピンの平行で同じ向きにそろっている状態から逆向きにそろった状態に変化するときに放射される。そのような現象は1個の水素原子については星間空間では400年に一度程度の割合でしか起きないが、広大な銀河系には無数の水素原子があるため、中性水素の21cm線を電波望遠鏡で測定することができる。波長

21cmの電波は光よりも吸収を受けにくく遠くまでも観測できるので、電波を放っている水素ガスが銀河系のまわりを円運動していると仮定すると、その視線速度に応じてそのガスが太陽系からどれくらいの距離の領域で発せられたものかを推定することができる。このような解析から、銀河系の中の星間水素ガスが渦巻状に分布する傾向があることが確かめられているが、ガスの渦巻腕の位置が正確に求められているわけではない。教科書p.116の図9は銀河系の渦巻構造のモデルのひとつと考えるべきである。

117 実習 球状星団の分布を調べる

球状星団は銀河系全体を球状に包むように分布する。この実習では、球状星団の位置を一つ一つ記入し、太陽系がその分布の中心からははずれたところに位置することを確認する。

最初に銀河中心方向を横から見たときの分布を調べさせ、余裕があれば、他の方向から見たときの分布を調べさせるとよい。3方向からの分布を調べることで、立体的な分布がつかめると思う。

なお、コンピューターを使える環境があれば、p.118の表Iのデータを表計算ソフトに入力しておく、y座標の計算や作図も簡単にできる。

●実習●

銀河座標の説明

- 太陽の位置を原点にとり、 x 軸、 z 軸を決める
- 球状星団の位置をプロットする

【注意】① 実習に入る前に、予備知識としてp.117の銀河座標と銀河座標から直角座標へ変換する方法について学習しておく必要がある。実際には、計算して求めた x と z の値を実習では使うので、基本的な説明で十分である。

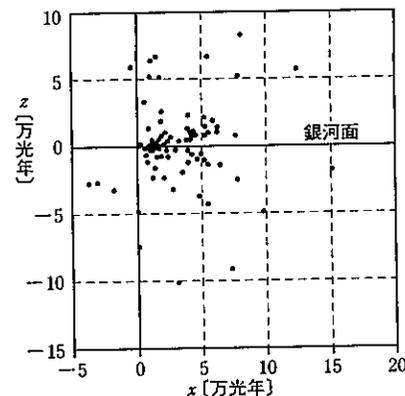
② 太陽の位置は用紙の中ほどにとればよいが、球状星団の分布を考えるとやや左よった位置にとると用紙にきれいにおさまる。

③ xy 面や yz 面で作図させる場合、計算に時間をとられるようなら、あらかじめ分担させて作業をし、互いに比較させるとよい。

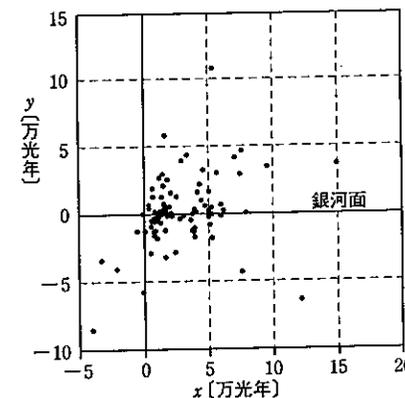
表計算ソフトを使うと、データの入力に多少時間がかかるものの、グラフの作成は短時間でできる。

【結果と考察】 xz 面、 xy 面、 yz 面それぞれにおける球状星団の分布は、右の図のようになる。

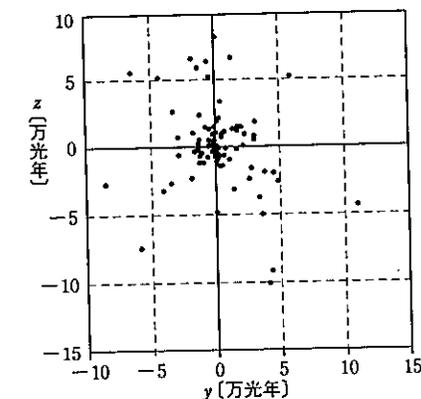
- ① これらの図から、球状星団は直径10数万光年の球状の領域に分布していることがわかる。
- ② 太陽は球状星団の分布の中心から、およそ3万光年ほど離れていることがわかる。



< xz 面の球状星団の分布 >



< xy 面の球状星団の分布 >



< yz 面の球状星団の分布 >

2. ダイナミックな銀河系

教科書 p.119~124

119 A 恒星の運動

ハレーは1718年に、ヒッパルコス星図とフラムスチード星図とを比べ、約2000年間にアークトゥルスとシリウスの位置がそれぞれ変わっていることに気づいた。現在ではすべての恒星が程度の差こそあれ固有運動をもつと考えられている。恒星の固有運動から、次項の銀河系の回転につなげたい。なお、ドップラー効果は地学IBでも扱われるが、生徒にとってなかなか理解しづらい内容なので、ここでも図13で図解して説明を入れた。

解説 固有運動 紀元前2世紀につくられたヒッパルコス(Hipparchos: B.C.190~B.C.127 ギリシア)の星図を当時最新の星図と比べていたハレー(Edmond Halley: 1656~1743 イギリス)は、1718年にいくつかの星の位置がずれていることに気がついた。これは恒星が実際に空間を動いているためである。天球上での星の位置の変化率 μ を固有運動という。固有運動の最も大きな恒星は距離6.0光年のバーナード星で1年間に角度にして10.3秒角移動する。最も近距離にあるケンタウルス座 α 星(4.3光年)の固有運動は3.7秒角/年である。1年間に1秒角以上の固有運動を示す恒星が200個程度確認されている。

近傍の恒星の実際の動きは、年周視差によるだ円運動と固有運動による直線運動が重なるため、引き延ばしたコイルのような軌跡を描く。また、連星の場合は連星の公転によるだ円運動がさらに重なる。天体の位置を極めて精密に測定する望遠鏡を搭載した衛星(ヒッパルコス衛星と名づけられた)により、これまでより遠い恒星の視差や固有運動の測定が可能になってきた。

固有運動と星の距離がわかれば、視線

に垂直な方向の速度成分 v_r が計算できる。見かけ上は特に密集した星団のように見えなくても、固有運動や視線速度が共通な恒星の集団が認められることがあり、このような集団を運動星団とよぶ。ヒアデス星団のような運動星団については、固有運動と視線速度の測定から、その距離を求めることができる。

走る列車から眺める景色が流れて見えるように、太陽系が銀河系の中を運動することによる固有運動成分もある。さまざまな方向の恒星の運動のようすから太陽系の運動を統計的に分離して求めることができるが、それによると太陽系は周囲の恒星の平均的運動に対し、赤経 271° 、赤緯 29° の方向に約19.5 km/sで運動している。

解説 赤方偏移 スペクトル線の波長が実験室での値より長波長側にずれる割合を赤方偏移とよぶ。天体のスペクトルの赤方偏移は、天体の運動によるドップラー効果または強い重力場によるアインシュタイン効果(重力赤方偏移)により生じる。ドップラー効果によるスペクトル線の赤方偏移 z は視線方向の運動速度を v_r

$$\text{とすると } z = \frac{v_r}{c}$$

となる。重力赤方偏移は $z = \frac{GM}{rc^2}$

と表せる。ここで c は光の速さ、 G は万有引力定数、 M は天体の質量である。静止している光源のスペクトル線の波長を λ_0 、視線速度 v_r で遠ざかる天体のスペクトル線の波長を λ とすると、赤方偏移 z は次の式で定義される。

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

相対論的には視線速度と赤方偏移の関係

$$\text{は } \frac{v_r}{c} = \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$

で与えられる。この式を用いると、 $z=2$ なら $v_r=0.8c$ 、 $z=5$ なら $v_r=0.946c$ という速度に相当することがわかる。赤方偏移 z が小さく、 $z \ll 1$ の非相対論的な

120 B 銀河系の回転

銀河系は円盤状の構造をしていることが天の川の存在からわかるが、このように平たい形になるのは回転運動のためである。

銀河系を構成する恒星や星間ガスの重力によって収縮しようとする力と、回転運動による遠心力とのつりあった状態が銀河系の形を保っていることに気づかせたい。

ダークマター・重力レンズ効果・密度波などの新しい研究内容についてはあまり深入りする必要はない。場合によっては省いてもよい。

解説 銀河回転曲線と銀河の質量 ローウェル(Lowell)天文台のスライファー(Vesto Melvin Slipher: 1875~1969 アメリカ)は1912年からアンドロメダ大星雲などの渦巻星雲のスペクトルを撮影し、渦巻星雲がかなりの速度で自転していること、渦巻星雲の視線速度が恒星の速度に比べて大きいことを発見し、渦巻星雲が銀河系外の天体であるとの考えが芽生えるきっかけをつくった。

渦巻銀河の星間ガスが発する水素原子

場合、この式は $v_r = cz$ となる。

現在観測されている赤方偏移最大の天体は、 $z \approx 5$ のいくつかのクェーサーと銀河である。赤方偏移の大きい天体はそれだけ昔の姿を見ていることになる。

問 2. [指導] 視線方向の運動速度は、ドップラー効果によるスペクトル線の赤方偏移から測定することができる。ドップラー効果の概念をきちんと理解させたい。

[解答] 公式(1)よりこの恒星の赤方偏移 z を求めると $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{0.2}{590.0}$

これを公式(2)に入れると

$$v_r = cz = 3.0 \times 10^5 \times \frac{0.2}{590.0} \\ \approx 1.0 \times 10^2 (\text{km/s})$$

のバルマー α 線(波長656.3 nm)などの輝線スペクトルを測定すると銀河回転曲線を求めることができる。また、中性水素原子の電子のスピン反転に伴う波長21 cmの輝線スペクトルを観測すると、空間分解能は劣るが渦巻銀河の比較的外側まで回転速度を測定することができる。回転速度は中心領域では距離に比例して大きくなるが、やがて極大に達し、その外側の光や電波で測定できる範囲では、ほとんど減少しない。回転曲線の形

は銀河のバルジの発達度とも関係しており、銀河のハッブル型に依存する。

銀河の回転周期の目安として銀河系の例を考えよう。銀河系中心から約2.8万光年の距離にある太陽系がわれわれの銀河中心のまわりを公転している速さは約220 km/sであり、これは1周に約2億4000万年かかる速さである。太陽系の年齢を46億年とすると、太陽はまだ銀河系を20周ほどしかしていないことになる。銀河系の回転速度曲線は銀河中心から1000光年程度の距離でいったん250 km/s程度のピークに達し、その後1万光年近傍で極小となる。その外側では渦巻腕による加速や減速と関連する速度の波打ち現象が見られるが、回転速度が $r^{-1/2}$ に比例するケプラーの法則ほど急激に減少することはなく、比較的平坦である。

星間ガスの乏しい円銀河では吸収線スペクトルから銀河回転曲線を求めることができる。円銀河では恒星の軌道運動が乱雑で、逆行回転する星もあるため、平均の回転速度は渦巻銀河に比べると小さい値となる。吸収線の線幅から恒星系の視線速度の分散を測定することもできる。

銀河の回転による遠心力は銀河による重力とつりあう。銀河面に垂直な方向に恒星が広がる範囲は重力とのつりあいによって決まる。したがって、銀河回転曲線や恒星の運動のようすから銀河の重力分布を求めることができる。銀河の質量、半径、回転運動速度をそれぞれ M 、 R 、 V としたとき、大ざっぱには遠心力 MV^2/R と重力 GM^2/R^2 が等しいという関係が成り立つ。

この式から $M = RV^2/G$ となり、銀河

系の場合、

$$\begin{aligned} R &= 2.8 \text{ 万光年} \\ &= 2.8 \times 10^4 \times 9.46 \times 10^{12} \times 10^3 \text{ m} \\ V &= 220 \text{ km/s} = 2.2 \times 10^5 \text{ m/s} \\ G &= 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2 \end{aligned}$$

を代入すると、太陽の質量を $M_\odot = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ として、

$$M = 1.9 \times 10^{41} \text{ kg} = 9.7 \times 10^{10} M_\odot$$

となる。この値は銀河系の中で太陽より内側にある天体の総質量に相当するが、太陽より外側にある天体の分も考えると銀河系の総質量は約 $2 \times 10^{11} M_\odot$ 程度となると考えられている。

解説 重力レンズ効果 天体の重力場で空間が歪むため、天体の背後からの光線は天体によりわずかに曲げられる。重力源がレンズのようなはたらきをするので、これを重力レンズ効果とよぶ。エディントン(Arthur Stanley Eddington: 1882~1944イギリス)の率いる日食観測隊が1919年の皆既日食時に撮影した恒星の写真から、太陽の重力場による恒星の位置の変移量が一般相対性理論の予想値どおりであることが確かめられた。

遠くのクェーサーが手前の銀河団の重力場によるレンズ効果で、いくつかの像に分離して見えたり、円弧状に引き伸ばされたりする現象もハッブル宇宙望遠鏡の観測などで確認されている。その他にも、重力レンズによる増光効果が理論的に予想されていたが、大マゼラン星雲中の100万個におよぶ星を1年間にわたりモニター観測する観測計画が実施され、重力レンズ効果による一時的増光現象と確認された事例が1993年にいくつか報告された。マイクロレンズ現象とよばれるこのような増光現象は、銀河系のハローにある星が大小マゼラン星雲の中の星

のちょうど直前を横切るときに起こる重力レンズ現象で、非常にまれな現象だが、その増光時に色が変わらないことと、変光曲線が増光時と減光時とで対称な変化をすることで変光星と区別できる。発見されたマイクロレンズ現象の頻度から銀河系ハローにある小質量星の数が推定されているが、「見えない質量」を説明するに足るだけの数はないようである。

太陽以外の恒星による重力レンズ現象が確認されるまでに約60年かかったが、マッチョ計画とハッブル宇宙望遠鏡の活躍で重力レンズ現象は天文学の重要な研究分野となった。

解説 ダークマター 銀河回転曲線から銀河の重力場を求めると、その重力場を生じるのに必要な銀河の質量が計算できる。だが、銀河の光度を説明するのに必要な恒星の質量を積算しても、力学的に求めた質量にははるかに及ばない量にしかない。そこで、銀河には光らない暗黒物質(ダークマター)があるものと考えられてきた。同じ事情は銀河団中の銀河の運動のようすから推定される力学質量と銀河団中の銀河の質量の積算が合わないという事実にも現れている。

そのようなダークマターの候補として、ブラックホールや中性子星、白色わい星など、進化を終えた恒星、低質量なため核融合反応を起こせず光らない褐色わい星などの物質が検討された。褐色わい星やブラックホールを直接見ることは簡単ではない。重力レンズ効果で背後の天体の明るさが増す現象の観測から小質量の見えない星々がかなりあることが確認されているが、これらの天体は必要なダークマターの量を説明するには不十分である。

ダークマターの候補として他にも、通常の物質のもととなっているバリオン(陽子や中性子)とは弱い相互作用しかしない、仮想的な冷たい素粒子や熱いニュートリノが考えられてきた。ニュートリノが有限の質量をもつならばダークマターの候補となりうる。この場合宇宙の構造形成は大規模構造が先にできてやがて銀河団や銀河ができて行く。冷たいダークマターの場合は小規模の天体が先に発生して重力相互作用で次第に大規模構造が形成されることになる。ダークマターの正体の問題は決着が着いていない。

解説 渦巻腕と密度波 銀河回転の周期は銀河中心に近い星ほど短い。銀河回転のように回転周期が中心からの距離に依存する運動を差動回転(または微分回転)という。それに対し、レコード盤のような剛体の回転では、周期は中心からの距離によらない様な回転となる。渦巻腕で輝いているのがいつも同じ星々だとすると、銀河の差動回転のため腕は数億年できりきりと巻き込んでしまうはずである。だが、腕の巻き方のゆるい銀河が数多く存在し、しかもその大半が少なくとも約100億年を経た銀河である。バルジとよばれる球状の恒星系の大きさは数億年では変化しないはずだが、バルジの大きさと腕の巻きぐあいに関係があることも説明できない。これを巻き込みの困難という。

巻き込みの困難を回避する説として、渦巻腕は密度の波を見ているものであり、実体構造ではないとする密度波理論がある。渦巻腕にいつも同じ明るい星がはりついているのではなく、渦巻腕は星やガスの流れが滞るところだという説である。密度の濃いところは重力が強くな



<渦巻の巻き込みのようす>

差動回転のために渦巻腕は数回の回転で巻き込んでしまうと思われる。

り、まわりの物質をさらに集めていっそう濃くなる。このような重力不安定性で発生した密度の波は、微分回転する銀河でもその形状をある程度の時間にわたり保持できる。渦巻腕の位置ではガスが圧縮されて星が生まれやすくなる。生まれた星のうち質量の大きい星はすばやく進化して青白く輝くため、渦巻腕は青色で目立つ。

銀河の近くを別の銀河が通り過ぎるときには潮汐力で渦巻が発生する。潮の干満は月が地球に及ぼす潮汐力で起こる。月と地球の距離を r 、地球の半径を R 、月の質量を M 、万有引力定数を G とすると、月による引力は、

$$\text{地球の中心では } \frac{GM}{r^2}$$

$$\text{月に近い側の海には } \frac{GM}{(r-R)^2}$$

逆に月に遠い側の海には

$$\frac{GM}{(r+R)^2}$$

となる。このため、月に近い側の海水は地表に対して

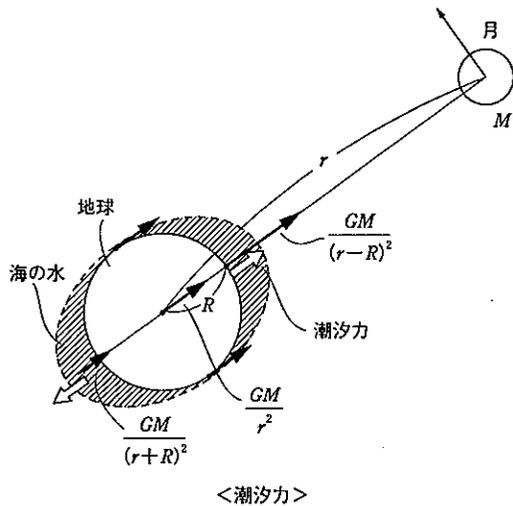
$$\frac{GM}{(r-R)^2} - \frac{GM}{r^2} = \frac{2GMR}{r^3}$$

の力(これを潮汐力とよぶ)で月のほうに引っ張られる。同様な計算をすると月と反対側の海水には、同じ大きさの力が反対向きにかかり、やはり海水を地表

から外側に引っ張ることがわかる。これと同じように、別の銀河による重力が潮汐力としてはたらくと、2本の渦巻腕ができる。銀河のニアミス直後の一過性の現象としてはあるが、計算機シミュレーションでM51など現実の銀河によく似た渦巻を再現することに成功している。

問3. [指導] 銀河系の円盤部は、銀河系中心のまわりを円運動していて、この回転によって生じる外向きの遠心力と、内向きの万有引力とが釣りあっている。これは太陽のまわりを公転する地球と同じように考えることができる。

[解答] 銀河系の質量を M 、太陽が銀河中心から R だけ離れた距離のところを周期 T で公転しているとする



<潮汐力>

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

が成り立つ。

また、太陽の質量を m とすると、与えられた式は太陽のまわりを公転する地球についても成り立つ。距離を天文単位で、周期を年で表すと $R=1, T=1$ と

なるのでこの式は $1 = \frac{Gm}{4\pi^2}$ となる。

この2つの式から

$$\begin{aligned} \frac{M}{m} &= \frac{R^3}{T^2} = \frac{(2.8 \times 10^4 \times 6.3 \times 10^4)}{(2 \times 10^8)^2} \\ &= \frac{(1.76 \times 10^9)^3}{(2 \times 10^8)^2} \div 1.4 \times 10^{11} (\text{倍}) \end{aligned}$$

123 C 銀河系の形成と進化

ここでは銀河系の形成と進化の過程にふれる。地学IBで扱った恒星の種族を復習し、銀河系内の恒星は大きく2種類に分けられることを示す。一つは銀河面からあまり離れずに銀河面内をほぼ円運動するもので、もう一つは、銀河面に限らず、ハローを含めた空間をばらばらな運動をするものである。これら種族の違いが銀河の進化の歴史と関連していることを理解させたい。

解説 恒星の種族 恒星の集団である球状星団と散開星団は対照的な性質をもっている。球状星団は赤い低温度の恒星からなり、銀河系の全体に球状に分布している。一方、散開星団は青白い高温の恒星からなり、銀河面に集中して分布している。スペクトル分析から、球状星団の恒星は太陽に比べてごくわずかしかな重元素(ここでは炭素より重い元素をまとめて重元素とよぶ)を含んでいないが、散開星団の恒星は太陽と同等かそれ以上の割合の重元素を含んでいる。恒星の進化論によると球状星団の星は小質量で老齢の天体であるのに対し、散開星団で目立つのは大質量の若い天体である。

太陽近傍の個々の恒星を調べると、視線速度が30 km/s程度以下で、太陽とともに銀河面内をほぼ円運動する星々のほかに、銀河面から飛び出して銀河系ハローの中をだ円運動するため、太陽から見た視線速度が100~300 km/sにも及ぶ高速度星とよばれる恒星があり、後者は球状星団の星と似て重元素量が少ないこと

が知られている。

散開星団やOB型星など年齢の比較的若い天体や電離水素領域や分子雲などのガス雲を種族Iの天体、球状星団や高速度星などハロー内をだ円運動し重元素の少ない比較的老齢の天体を種族IIの天体とよぶ。このような区別は1944年にバーデ(Walter Baade: 1893~1960 アメリカ)が最初に提案した。種族Iの星と種族IIの星の存在は、銀河系の進化の歴史を反映していると考えられている。

原始銀河ガスが収縮する段階で生まれた種族IIの星々は重元素が少なく、そのうちの小質量で寿命の長い星が現在もハローの中をだ円運動している。種族IIの星のうち進化の速い大質量の星で合成された重元素は、超新星爆発や恒星風により星間ガスとしてまき散らされ、しだいに銀河面内に集まり全体に回転する。そこから新しく生まれた種族Iの星々は重元素が多く、銀河系を円運動するようになる。これが銀河系の形成と進化のあらすじと考えられている。

II 銀河の世界

【章の内容と指導上の留意点】

ここでは、さまざまな形の銀河があることをできれば写真集やスライドなどの教材を用いて示し、銀河について興味をもたせるとよい。

まず、銀河がわれわれの銀河系の外にあり、銀河系と同じような規模の恒星系であることをしっかりと理解させる。次に銀河の形状による分類、距離の測り方、銀河が集団として分布することについて学習する。銀河の形成や進化に関する新しい考えについては簡単にふれる程度でよい。

キューサーやセイファート銀河、電波銀河といった活動的な銀河についても学ぶが、これらについては現象の記述の説明程度でよい。

銀河の写真教材には次のようなものがある。

- 【天体写真スライド集(35ミリ版70駒)】(木曾観測所のシュミット望遠鏡による天体写真集)

この写真集は日本天文学会で入手できる。また、天文学振興財団や宇宙科学振興財団では、国立天文台や宇宙科学研究所が作成したビデオ教材も販売している。これらの電話番号を下に記しておく。

- 日本天文学会：0422-31-1359
- 天文学振興財団：0422-34-8801
- 宇宙科学振興財団：042-759-8500

また、インターネットを利用できると、国立天文台などのホームページで銀河に限らずさまざまな写真を見ることができる。参考までに国立天文台などのURLを記しておく。

- 文部省国立天文台：<http://www.nao.ac.jp>
- 日本天文学会：<http://www.tenmon.or.jp>
- 文部省宇宙科学研究所：<http://www.isas.ac.jp>
- 宇宙望遠鏡科学研究所(ハッブル宇宙望遠鏡)：<http://www.stsci.edu> (英語のみ)

【地学IBとの関係】

地学IBでは扱っていない内容である。

1. 銀河の発見

教科書 p.125~127

125 A アンドロメダ銀河の論争

アンドロメダ銀河がわれわれの銀河系の外にあり、銀河系と同じような規模の恒星系であることがわかってきた経過を説明するとともに、銀河系内の星雲と区別するために銀河とよばせることも説明してほしい。

126 B 銀河の分類

図21はハッブルの分類図である。物理的にも特徴があるので、下のよう な表を用いて説明するとよい。

また、この図は銀河の進化を示す図と考えられた時期もあったが、今では解釈が変わってきていることを指摘しておこう。

解説 銀河の形状による分類 惑星状星雲やHII領域とよばれる電離水素領域などの銀河系内星雲とは別に、われわれの銀河系と同じような規模をもつ銀河が数多くあることがハッブルの研究でわかった。ハッブルは銀河を、その形でだ円銀河(E)、渦巻銀河(S)、棒渦巻銀河(SB)、不規則銀河(Irr)に大別し、有名なおん

さ型の分類図を提案した(→教科書p.126 図21)。ハッブルはこの系列を進化の時間系列だと考えたため、だ円銀河を早期型銀河、おんさの先端の渦巻銀河を晚期型銀河とよんだ。現在でも早期型や晚期型というよび方が使われることがあるが、ハッブル系列が進化の系列であるというハッブルの解釈は否定されている。ハッブル分類では、だ円銀河の形は見かけの丸さでE0からかなり偏平なE7に

<銀河の形状と天体の種族>

分類	形状	種族	星間物質
だ円型 (E型)	円またはだ円状	すべて種族IIと考えられる。	ほとんどない
レンズ型 (L型)	レンズ型。中央部の丸い部分と円盤部からなる。	(同上)	(同上)
渦巻型 (S型)	渦巻状の腕をもつ	円盤部(腕)の部分には青い若い星が存在し種族I、中心部は種族IIタイプと考えられる。	腕の部分に暗黒星雲や散光星雲が見られ、新しい恒星が誕生している。
棒渦巻型 (SB型)	中心を通る棒構造の端から渦巻腕が出る		
不規則型 (Irr型)	定まった形をなさない	種族Iを含むタイプと、全く含まないタイプに分けられる。	種族Iを含むタイプは星間物質を含むが、種族IIを含むタイプにはない。

まで分類する。E7はだ円形の短軸が長軸の7割減、つまり3割であることを意味する。見かけの形から立体構造を推定するのは容易ではないが、だ円銀河の形は回転軸の方向につぶれた扁平だ円体構造をしていると考えるのがまず自然であろう。連続的なガス流体ならば、遠心力がはたらくためこの形になるはずである。

ハッブルの系列は銀河が生まれたときの原始銀河ガスの回転の強さの系列であろう。銀河の形態が単独で変化する可能性はないが、銀河団の中ではだ円銀河の割合が多いことや銀河どうしの衝突現象が起こる確率が高いため、銀河団の中心にある大型のだ円銀河については、小型の銀河を次々に飲み込んで成長したものと考えられている。

2. 銀河の分布

127 A 銀河の距離

銀河の分布を知るためには、銀河までの距離を知る必要がある。しかし、ここまで学んだ方法ではせいぜい6000万光年までしか測定できない。ここでは、さらに遠い銀河までの距離の測定法にはどのようなものがあるか紹介する。距離の測定法は対象となる天体によって変わることをしっかり理解させておきたい。

解説 銀河の距離測定法 天体の距離の測定は、天文学でも古来からの難問である。月の距離などはパルスレーザーの反射光が戻るまでの時間を精密に測ることで直接測定できる。太陽近傍の恒星の距離は年周視差法で直接三角測量することができる。また、ヒアデス星団のような運動星団の距離は統計視差法という方法を用いて求めることができる。

角測量は使えない。絶対光度のわかっている標準天体を用いる。例えばブレアデス星団とヒアデス星団の距離の比は、両星団のHR図を比較することで求めることができる。この方法は系外天体には使えない。近傍の銀河の場合はセファイド型変光星の変光周期と絶対光度の関係をういたり、最も明るい惑星状星雲がほぼ一定の光度となることを用いる。極大光度がほぼ一定となるI型超新星を用いる

だが、より遠い天体の距離決定には三

<局部銀河群以外の代表的銀河>

銀河名	星座	赤経	赤緯	型	等級	視直径	距離
		h m	°		等		万光年
NGC55	ちょうこくしつ座	00 14.9	-39 11	SBm	7.9	32 × 6	690
NGC253	ちょうこくしつ座	00 47.6	-25 17	SABc	8.0	25 × 7	880
M74	うお座	01 36.7	+15 47	SAC	9.8	10 × 10	3700
M77	くじら座	02 42.7	-00 01	SAB	9.5	7 × 6	4700
NGC1365	ろ座	03 33.6	-36 08	SBb	10.3	10 × 6	5900
M81	おおぐま座	09 55.6	+69 04	SAab	7.8	26 × 14	1200
M82	おおぐま座	09 55.8	+69 41	I0	9.3	11 × 5	1200
M106	りょうけん座	12 19.0	+47 18	SABbc	9.0	18 × 8	2100
M49	おとめ座	12 29.8	+08 00	E2	9.3	9 × 7	5900
M87	おとめ座	12 30.8	+12 24	E0-1p	9.6	7 × 7	5900
NGC4565	かみのけ座	12 36.3	+25 59	SAB	10.4	16 × 3	3400
M104	おとめ座	12 40.0	-11 37	SAa	9.3	9 × 4	4600
NGC5128	ケンタウルス座	13 25.5	-43 01	S0p	8.0	18 × 14	1400
M51	りょうけん座	13 29.9	+47 12	SAbcp	9.0	11 × 8	2100
M83	うみへび座	13 37.0	-29 52	SABc	8.2	11 × 10	1600
M101	おおぐま座	14 03.2	+54 21	SABcd	8.2	27 × 26	1900

ともう少し遠くまで測定できる。中性水素原子の波長21cmの電波輝線や可視域の吸収線のスペクトル線の幅と、銀河の絶対等級の関係をを用いるターリー・フィッシャー法やフェイバー・ジャクソン法も用いられる。

銀河団の中での銀河の乱雑運動の速度は1000km/s程度であるので、視線速度が5000km/s以上の遠方の銀河では、宇宙モデルを仮定して、銀河の赤方偏移から距離を直接計算する。

128 B 局部銀河群

局部銀河群とは、われわれの銀河系およびアンドロメダ銀河を含む直径600万光年の領域の銀河の集団をいう。ここでは、銀河系周辺の銀河が集団をなしていることを指摘しておく。

解説 局部銀河群 われわれの銀河系とアンドロメダ銀河を中心とする半径300万光年ほどの空間には、およそ30個ほどの銀河があり、これらの集団を局部銀河群とよぶ。直径約10万光年のわれわれの銀河系の近くには距離16万光年の大マゼラン星雲と距離20万光年の小マゼラン星雲があり、大小マゼラン星雲は互いのまわりを回りながらわれわれの銀河系の周囲を回転してきたものと考えられている。大小マゼラン星雲とわれわれの銀河系の間にはマゼラン流とよばれる

中性水素ガスのかけはしがかかっていることが、電波観測から確かめられている。

隣の渦巻銀河であるアンドロメダ銀河M31(=NGC224)には、4つの矮小だ円銀河NGC221, NGC205, NGC185, NGC147がある。局部銀河群の中で3番目に大きい銀河はさんかく座の渦巻銀河M33(=NGC598)である。銀河系とアンドロメダ銀河の距離は230万光年。そのほかの銀河の多くは比較的小質量の矮小だ円銀河である。

<局部銀河群の銀河>

銀河名	赤経		赤緯	型	等級	視直径	距離
	h m	° ' "					
NGC147	00 33.2	+ 48 30	E5p	10.4	13 × 8	230	
NGC185	00 39.0	+ 48 20	E3p	10.1	11 × 10	230	
NGC205	00 40.4	+ 41 41	E5p	8.9	17 × 10	230	
M32	00 42.7	+ 40 52	E2	9.2	8 × 6	230	
M31 (アンドロメダ銀河)	00 42.7	+ 41 16	SAb	4.4	180 × 63	230	
SMC (小マゼラン星雲)	00 52.7	- 72 50	SBmp	2.8	280 × 160	20	
Sculptor system	01 00.0	- 33 42	dE3p	9	20 × 20	30	
M33	01 33.9	+ 30 39	SACd	6.3	62 × 39	250	
Fornax system	02 39.9	- 34 31	dE0p	9.0	20 × 14	60	
LMC (大マゼラン星雲)	05 23.6	- 69 45	SBm	0.6	650 × 550	16	

128 C 銀河団

銀河団には大規模なものがあり、おとめ座の銀河団はおよそ2500個、かみのけ座の銀河団はおよそ9000個の構成員よりなっている。銀河の大きさとそれらの距離の大きさから考えて、銀河団の中では銀河と銀河がすれ違ったり、衝突したり、合体したりすることが予想されることを示し、具体的に図23を説明すると生徒は興味をもつと思われる。

解説 銀河団 銀河群より大規模な銀河の集団としては、約2500個の銀河からなるおとめ座銀河団(距離約5900万光年)、かみのけ座銀河団(距離約3億光年)などがある。おとめ座銀河団のいくつかの銀河については、セファイド型変光星を使って距離が求められている。おとめ座銀河団には渦巻銀河がかなりあるが、かみのけ座銀河団はほとんどがだ円銀河である。とくに大きな銀河団の中心には巨大だ円銀河があり、強い電波源となっている場合が多い。これは銀河と銀河の衝突で、渦巻銀河が壊されてだ円銀河になるためであろうと考えられている。このような現象を銀河の共食現象とよぶ。銀河の数密度の高いところほどだ円銀河の割合が多いことが知られている。

これは密度-形態関係とよばれている。

銀河団の中の銀河間空間は希薄だが高温のプラズマで満たされており、X線観測でそのガスの広がりや鉄輝線のスペクトルから温度と質量が推定できる。銀河団によっては銀河の総質量と匹敵する銀河間ガスが存在する。

解説 銀河相互作用 銀河と銀河の衝突現場と思われる変形した銀河の対を集めた特異銀河の写真集がアープ(Halton Arp: 1966)により出版されている。有名なNGC5194/95の銀河対M51については、銀河と銀河の接近軌道をうまく選んでやると、その形をみごとに再現できることをトゥームレ兄弟がコンピュータシミュレーションで示した。彼らはこの他にも、アンテナ銀河NGC4038/39対、

<銀河団>

名称	エイベル番号	赤経		赤緯	等級	銀河数	赤方偏移	距離
		h m	° ' "					
おとめ座団	-	12 30.8	+ 12 23	9.4	45	0.0039	0.59	
ケンタウルス座団	A3526	12 48.9	- 41 18	13.2	33	0.0110	1.4	
うみへび座I団	A1060	10 36.9	- 27 31	12.7	50	0.0114	1.5	
ペルセウス座団	A426	03 18.6	+ 41 30	12.5	88	0.0183	2.3	
かみのけ座団	A1656	12 59.8	+ 27 58	13.5	106	0.0232	2.9	
ヘルクレス座団	A2151	16 5.2	+ 17 44	13.8	87	0.0371	4.6	
かんむり座団	A2065	15 22.7	+ 27 43	15.6	109	0.0721	8.6	
Cl0024 + 1654	-	00 26.6	+ 17 10	-	-	0.3920	34	
3C295団	-	14 11.8	+ 52 10	-	-	0.4610	38	
1305 + 2952	-	13 7.4	+ 29 36	-	-	0.947	55	

エイベル番号：エイベルらがつくった銀河団のカタログ番号。

等級：ここでは明るい方から10番目の銀河の等級を示す。



<アンテナ銀河対NGC4038/39>
(Palomar Observatory/PPS)

コマネズミ銀河 Arp242, 車輪銀河などの姿を見事に再現してみせた。

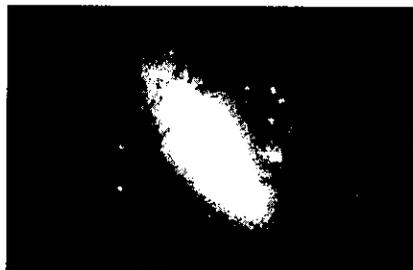
また、だ円銀河 NGC3923 などに見られる最大20層ものシェル構造は、別的小銀河がだ円銀河に捕らえられ、ばらばらになってまわりを巡ることにより、発生したと考えられる。そのような降着現象があった可能性としては、だ円銀河 NGC2685 や SB0型銀河 NGC4546 の例がある。これらの銀河では、恒星系の銀河回転方向と星間ガスの回転方向とが垂直になったり、逆向きになっている。最近捕らわれた矮小銀河のガス雲が銀河の自転方向と異なる向きに回りながら捕らわれたためであろうと考えられる。

熱いプラズマに満たされた銀河間空間を各々の銀河が約 1000 km/s の速さで走



<だ円銀河NGC3923のシェル構造>
(©Anglo-Australian Observatory, Photograph by David Malin/PPS)

るため、個々の銀河に付随した中性水素ガスがはぎ取られることがある。銀河の電波写真を撮ると、銀河を頭にして電波の強い部分が両側後方になびいたように見える例がいくつかある。これも、銀河団のプラズマの中を銀河が突き進んで行くために生じる現象と考えられている。



<だ円銀河NGC2685>
降り積もったガスがすじのようになって見えていると考えられる。(SPL/PPS)

130 D 大規模構造

遠い銀河の分布を調べると、銀河群や銀河団が集まってさらに大規模な構造をつくっている。このように宇宙は階層構造をなしていることに気づかせたい。

解説 銀河分布の大規模構造 銀河は銀河群や銀河団などの集団となって分布するものと、とくに集団に属さずに分布し

ているものがある。銀河団よりさらに大きなスケールでは宇宙の物質分布はほぼ一様となっているものと考えられてき

た。ところが、北天の約5億光年までの約2000個の銀河の赤方偏移を測り、その分布を調べたハーバード大学のゲラーたちは、銀河団や銀河群が「泡」の膜のように連なって分布し、泡の中は銀河がほとんどない「空洞」となっていることを発見し、1986年に発表した。

銀河の分布をより広い範囲で調べる研究はその後も続けられているが、このように大きな構造が膨張宇宙の中でいつどのようにして発生したのかは、これまでの宇宙論では説明できない謎として、研究者の議論をよんでいる。

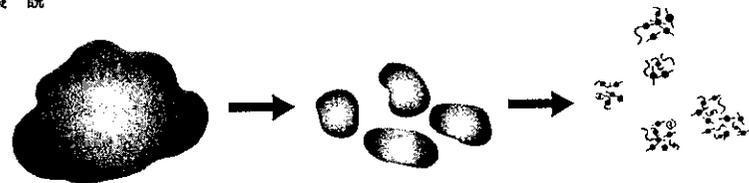
解説 銀河の形成 ビッグバン宇宙が広がり冷えて行く中で、物質密度のゆらぎが成長して銀河ができたと考えられる。物質の濃いところは重力が強く、より周辺の物質を集めて濃くなるという重力不安定性が、銀河ができる基本過程である。

だが、観測される宇宙背景放射のゆらぎは極めて小さく、物質のゆらぎが宇宙背景放射のゆらぎと同じ程度であれば、宇宙年齢程度の短時間ではそのゆらぎが成長しきれない。

通常の物質以外の素粒子が宇宙のゆらぎをつくる上で何かのはたらきをしたと考えられるが、主役となる素粒子の種類によって、最初に銀河団規模の大きな構造ができてそれから個々の銀河ができたという考えと、最初は銀河かそれよりも小さい天体でできて、それらが寄り集まったり合体したりして、銀河や銀河団ができていったとする考えとがある。

ビッグバン後10万年から10億年までの宇宙のようすは、まだ観測が始まったばかりであり、銀河の誕生のようすの解明はこれからの研究の大きなテーマである。

分裂説



超銀河団サイズのガス

銀河団サイズに分裂する

銀河ができる

集合説



あちこちにまず銀河ができる

銀河が集まって銀河団ができる

さらに超銀河団になる

<銀河形成の2つの考え>

3. 活動銀河

教科書 p.130~131

130 **A** クェーサー

クェーサーや電波銀河など宇宙には活動的な銀河が数多く存在している。クェーサーは初期の宇宙や宇宙の広がり、宇宙の進化などを調べる重要な天体である。これらの銀河についてさまざまなことがわかってきていることを説明するとともに、まだ解明されていないことも数多く残っていることを指摘しておきたい。

解説 クェーサー 電波望遠鏡で発見された天体の正体を調べるため、光学観測が進められていた1960年代の初め、電波源3C48が光で見ると約16等級の点状の恒星のような天体であることがわかった。そのスペクトルには正体不明の幅の広い輝線が写っていた。1963年になって、シュミット(Maarten Schmidt: 1929~ オランダ)が、同種の電波源3C273の輝線スペクトルが赤方偏移の大きい水素のバルマー輝線であることを発見し、新しい種類の天体であることが認識された。このような天体をクェーサー(準恒星状天体)とよぶ。

現在までに7000個以上のクェーサーが発見されている。赤方偏移の一番小さいクェーサーは3C273($z=0.16$)。もっとも大きいクェーサーはPC1247+3406

($z=4.9$)だが、多くのクェーサーは $z=2$ 前後である。この赤方偏移が宇宙膨張によるドップラー効果のためだとすると、極めて遠くにある天体ということになる。その距離から計算される絶対光度は、通常の銀河全体の明るさを上回るほどになる。ところが、その明るさがおよそ1年以内に変化することから、3C273の発光領域の大きさは1光年以下のはずである。

クェーサーのエネルギー放射率は通常の核融合反応より大きく、輝線スペクトルの幅からガスの運動速度が秒速1万kmにも及ぶことから、銀河中心にある巨大ブラックホールに降り積もるガスの重力ポテンシャルエネルギーが何らかの機構で電磁波として解放されて光るものと考えられている。3C273などからは光

のジェットが飛び出しているのが観測されている。降り積もるガスがブラックホールの近くで降着円盤を形成し、その円盤に垂直な方向にジェットが飛び出すものと考えられている。

解説 セイファート銀河 明るい中心核をもち、強い輝線スペクトルを示す渦巻銀河をセイファート銀河とよぶ。セイファート銀河には1型と2型の区別がある。

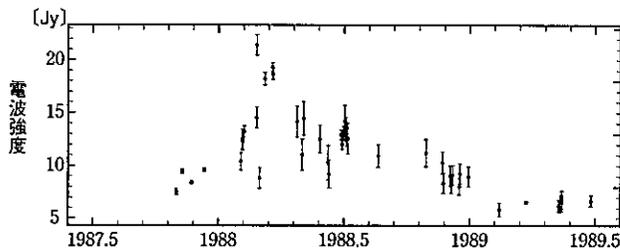
NGC4151に代表される1型セイファート銀河の中心核はクェーサーと同様に線幅が1万km/sにも達する輝線スペクトルを示し、連続光も非熱的なシンクロトロン放射成分の兆候を示す。その中心核の光度が母銀河の光度と同じかそれ以下であるという点が極めて明るいクェーサーとの違いであるほかは、クェーサーと共通点が多い。

これに対してNGC1068に代表される2型セイファート銀河は1型セイファート銀河のような幅の広い輝線を示さないが、塵による吸収の兆候が著しく、その偏光成分にやはり幅の広い輝線成分があることが確かめられている。これらのことから、1型セイファート銀河と2型セイファート銀河は本質的には同じ種類の天体であり、1型と2型の違いは単にブラックホールへの降着円盤を上から見ているか横から見ているかの違いであるとするセイファート銀河の統一的理解が提案されている。

解説 電波銀河 1932年にジャンスキ

ーが宇宙からの電波の存在を発見したあと、1949年にはおとめ座Aやケンタウルス座Aなどと名づけられた電波源がそれぞれ、M87やNGC5128などの銀河であることが判明した。空間分解の高い電波干渉計VLAが1970年代末に登場すると、これらの天体からの電波の強度分布を詳しく調べることができるようになり、銀河中心核からの連続波成分に加えて、中心核からジェット状に伸びた電波放射領域や、100kpc以上の広がりをもつ電波ハローをもつものなどさまざまな電波銀河が存在することが明らかとなった。

これらの電波は相対論的な速度に加速された電子群が磁場中で放射するシンクロトロン放射として解釈されている。シンクロトロン放射のスペクトルや偏波の観測から電子のエネルギー分布や磁場の向きが測定できる。偏波の方向は途中のプラズマにより変えられるという現象があるので、視線上のプラズマ柱密度に関する情報なども読みとることができる。ジェットの起源、電子の加速のメカニズム、クェーサーなどの活動銀河中心核との関係などの解明は大きな課題となっている。



<クェーサー3C273の電波強度の時間変化>

(Ian Robson, [Active Galactic Nuclei] Wiley, 1996)

III 宇宙の構造と進化

【章の内容と指導上の留意点】

この章では、膨張している宇宙について学び、宇宙の誕生と進化、宇宙の年齢を扱う。そして、新しい宇宙像をもたらしつつある新しい観測装置について学び、最後に宇宙の中での地球や人類文明について考えさせるようにした。

ハッブルの法則は宇宙の膨張を考える上で、きわめて重要な法則である。宇宙の膨張について理解させた上で、2節のビッグバンにつなげたい。

望遠鏡や観測装置の発達進歩の説明では、宇宙や天体に対する生徒の興味・関心が深まるように心がけたい。

地球が生命誕生に適したきわめてまれな条件にあること、そして地球の文明はきわめて微妙なバランスの上に成り立っていることを理解させたい。

【地学IBとの関係】

地学IBでは扱っていない内容である。

1. 膨張する宇宙

教科書 p.132~134

132 A ハッブルの法則

134 B 宇宙の膨張

ハッブルの法則は膨張宇宙論と関連した法則である。宇宙が膨張していると考えたとき、未来の宇宙はどうなるのか、そして過去の宇宙はどのような状態だったのかと推測させ、宇宙論、ビッグバン、および3K放射と展開すると興味ももて、系統性のある学習法となろう。

ハッブル定数の値は50~100(km/s)/Mpcとされていたが、最近の観測によると70~80(km/s)/Mpcという説が有力になりつつある。ハッブル定数の値は宇宙の年齢とも関係してくる(→問5)。最近の説も紹介しながら宇宙の年齢につなげたい。

解説 ハッブルの発見 エドウィン・ハッブル(Edwin Powell Hubble: 1888~1953 アメリカ)は学生時代に陸上競技、バスケットボール、ヘビー級ボクシングなどで活躍し、イギリス留学中は法学を学んだが、天文学への思いが強くなり、ヤーキス天文台で学位研究を行った。その後、第一次世界大戦に陸軍大尉として参戦し、帰国後ウィルソン山天文台でヒューマソンと共同で100インチ望遠鏡による観測を精力的に行い、1920年代の数年間に、次の3つの業績を挙げた。

(1) アンドロメダ大星雲にセファイド型変光星を発見してその距離を求め、渦巻星雲が銀河系外の巨大な恒星系であることを示した(1924年)。この研究で、渦巻星雲が銀河系内のガス星雲なのか銀河系に匹敵する巨大恒星系なのかという論争に終止符が打たれた。

(2) だ円銀河から渦巻銀河に至るおんさ型の分類体系(ハッブル分類)をつくりあげた。ハッブルはこの系列が進化の段階を示していると考え、だ円銀河を早期型、渦巻銀河を晩期型とよんだ。ハッ

ブル系列が進化の系列であるという考えは現在では否定されているが、分類体系自体は現在でも広く使われている。

(3) 遠方の銀河がその距離に比例した速度で遠ざかっていること(ハッブルの法則)を発見した(1929年)。この発見でわれわれの銀河系のような銀河が宇宙には無数にあり、宇宙全体が膨張しつつあることが示され、それまでの宇宙観が一変した。

当時天文学にはノーベル賞は与えられなかったため、ハッブルはノーベル賞こそ受賞していないが、20世紀最大の観測天文学者といえよう。

問 4. [指導] 銀河のスペクトルを観測すると、ごく近くの銀河を除いてスペクトル線の赤方偏移が見られる。この赤方偏移をもとに銀河の後退速度を求めることができる。この後退速度と銀河の距離との比例関係がハッブルの法則である。ハッブルの法則は膨張宇宙を理解する上で大事な法則である。

[解答] 公式(3)より $r = \frac{v}{H}$

ここで $v=c$ とすると

$$r = \frac{c}{H} = \frac{3.0 \times 10^5 \text{ (km/s)}}{80 \text{ ((km/s)/Mpc)}} = 3.75 \times 10^3 \text{ (Mpc)}$$

問 5. 【指導】 ハッブルの法則から、宇宙の後退速度は銀河の距離に比例する。つまり、銀河の距離をその後退速度で割ると銀河がその距離だけ離れたまでの時間になり、この値はどの銀河についても等しい。

したがって、この時間だけさかのぼるとすべての銀河は1点に集まることになる。これがハッブル年齢といわれる時間

で、宇宙の年齢の目安となる。

【解答】 与えられた式より

$$t = \frac{1}{H} = \frac{1}{80 \text{ ((km/s)/Mpc)}} = \frac{3.1 \times 10^{13} \times 10^6 \text{ (km)}}{80 \text{ (km/s)}}$$

$$\approx 3.88 \times 10^{17} \text{ (s)}$$

$$\text{ここで } 1 \text{ 年} = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ (s)}$$

$$\approx 3.15 \times 10^7 \text{ (s)}$$

であるから

$$t = \frac{3.88 \times 10^{17}}{3.15 \times 10^7} \approx 1.2 \times 10^{10} \text{ (年)} = 120 \text{ (億年)}$$

133 やってみよう 風船を使った膨張宇宙のモデル実験

宇宙が一樣に膨張するようすを実感させるには、風船を膨らませて、表面上の点が一様に離れていくようすを観察させるとよい。定性的な観察ならば夜店やおもちゃ屋で売られている風船に絵を描いて観察するだけでよいが、定量的な観察をするには材料を選ぶ必要がある。

均一に膨らむ風船としては、高層気象観測用のゴム気球がある。これは膨らませるのにそれほど力を必要としない上、かなりの範囲で球形を保っているため、この実験には最適である。

【注意】① 気象観測用のゴム気球は値段が少し高いので、くりかえして利用したい。そのために、ポンプを用意するとよい。

② 距離の測定には、布またはナイロン製のメジャーを使う。直定規では風船がゆがむので、正しく測定できない。

③ 気象観測用の気球はばら売りされていないので、入手しようとする際は製作会社に相談してみるとよい。

● 〒362-0058 埼玉県上尾市大字上野765 トーテックス株式会社

【まとめ】 以下に実験の結果の例を載せておく。

	②	③	増加の割合 (③/②)	④	増加の割合 (④/②)
AB	8.8cm	9.2cm	1.05	9.4cm	1.07
AC	11.0	11.6	1.05	12.1	1.10
AD	13.3	14.0	1.05	14.6	1.10
BC	14.0	14.6	1.04	15.3	1.09
BD	19.4	20.5	1.06	21.3	1.10
CD	22.2	23.5	1.06	24.5	1.10

2. 宇宙の進化

教科書 p.135~136

135 A ビッグバン宇宙

宇宙はビッグバンから始まった。生徒はビッグバンの前には何があったのかと考えがちであるが、ビッグバンから時間も空間も始まったのでその前には何もない。私たちにはなかなか受け入れがたい考えである。また、宇宙論以外の場でも「ビッグバン」という用語が本来とは違った意味で使われることがあり、指導には注意を要する。

解説 ビッグバン宇宙 ガモフ(George Gamow: 1904~1968 アメリカ)は、膨張する宇宙を過去にさかのぼる思考実験から、

(1) 宇宙が高温高密度状態から爆発的な膨張とともに始まったこと、

(2) 爆発から宇宙の温度が1億度以下に冷えるまでの間に、素粒子ができ、原子核融合反応が起こって、ヘリウムが合成されたこと、

(3) 宇宙の温度が約1万度以下となると、陽子と電子が結合してできる中性の水素原子が主となり、光に対して透明になること、

(4) この時代以降、物質との相互作用が切れた光子は、宇宙膨張とともに薄められ、赤方偏移して現在は電波として宇宙を満たしているはずであること(宇宙背景放射)を予言した。

宇宙には始まりも終わりもなく常に定常に保たれているはずという説を唱えていたホイルらは、ガモフの考えをからかい半分でビッグバンモデルとよんだが、この名前が定着した。

ハッブルの宇宙膨張の法則から生まれたガモフのビッグバン宇宙モデルは、その後の宇宙背景放射の発見と、核反応理

論による宇宙に普遍的ヘリウム量の説明の成功で、ゆるぎのないものとなっている。

解説 宇宙背景放射 1965年、ホーン型の電波アンテナを調整していたペンジャス(Arno Penzias: 1933~ アメリカ)とウィルソン(Robert Wilson: 1936~ アメリカ)は、どうしても取り除けない電波雑音があり、その強度がアンテナの向きや時間によらないことを突き止めた。プリンストン大学のディッケ(Robert Dicke: 1916~)は、これこそガモフが予言したビッグバンの残照であると直感した。

宇宙背景放射観測衛星COBEによる測定で背景放射が絶対温度2.735°の黒体放射スペクトルをもつことが、1990年になって実証されたが、このことはビッグバン宇宙モデルの正しさを示している。最近では赤方偏移が2~3程度のクエーサーのスペクトルの解析から、その時代の宇宙背景放射の温度が現在より高かったことも確かめられている。赤方偏移が1000の時代に相当する宇宙背景放射に空間的ゆらぎがあるかどうかは宇宙の構造形成との関連で重要な問題であり、この問題に答えを出す新しい観測が計画されている。

135 B 宇宙の年齢

現在の宇宙論に基づいていろいろな方法で宇宙の年齢を測定すると、相互に矛盾した結果が出てくる。最近の観測によるとそれらの年齢の差が小さくなってきており、近い将来宇宙の年齢はひとつに収束していくことと思われる。このような状況も説明するとよいだろう。

解説 ハッブル年齢と宇宙年齢 ハッブル定数の値は現在の宇宙の膨張率を表している。その逆数は現在の膨張率のまま過去に戻ったとき、宇宙が一点に縮まるまでの時間を表し、この値はハッブル年齢とよばれている。膨張する宇宙には、自らの重力で引き戻す力がはたらか、膨張にブレーキがかかるため、過去の宇宙膨張率はもっと大きかったはずである。したがって、実際の宇宙年齢はハッブル年齢よりも少し短いはずである。減速が良く効くモデルの場合、宇宙年齢はハッブル年齢の2/3程度となる。

ハッブルが最初に求めたハッブル定数

からは、約20億年というハッブル年齢が得られたが、岩石中の放射性同位元素の測定から求められていた地球の推定年齢約30億年と矛盾するという困難があった。その後、セファイド型変光星の性質の研究が進み、ハッブル定数の測定の根拠となる天体の距離測定の精度が向上して、宇宙年齢と地球の年齢の間の矛盾は解消した。だが、球状星団の進化理論から求めた年齢と宇宙年齢との矛盾はまだ解決していない。宇宙年齢の矛盾の解決には、より遠方の銀河の距離を精度良く測定して、より広い範囲でハッブル定数の測定を行う必要がある。

3. 新しい観測装置

教科書 p.136~138

136 A 望遠鏡の発達

ガリレオ・ガリレイがはじめて望遠鏡を天体観測に使用したのは17世紀初めである。宇宙のを知る手段としてのその後の望遠鏡の歴史を、光学望遠鏡の口径増大の面と、新しい観測装置の研究・開発という面からとらえさせたい。

ハッブル宇宙望遠鏡については口絵の解説を参照してほしい。

137 B 日本の観測装置

日本も、野辺山の電波望遠鏡、ハワイの光学赤外線望遠鏡、宇宙科学研究所のX線観測衛星など、さまざまな観測装置をつくり、多くの成果をあげている。それぞれの観測装置の特徴や目的を、立地条件なども含めて考えさせたい。

電波望遠鏡と「すばる」望遠鏡については口絵の解説を参照してほしい。

解説 X線観測衛星 宇宙からのX線は地球の大気で吸収されてしまう。天体からのX線を観測するため、宇宙科学研究所は「はくちょう」、「てんま」、「あすか」、「ぎんが」などのX線観測衛星を次々と打ち上げてきた。

強い磁場をもち高速で自転する中性子星は、パルス状のX線を放射するX線パルサーとして観測される。活動銀河中心核からは、中心のブラックホールに落ち込む高温のガスが放つX線が激しく変動

しているようすが観測される。これらの高密度天体からのX線のほかに、銀河団の銀河間空間を満たしている超高温ガスからのX線の観測も行われている。X線スペクトルの観測で超高温ガス中に鉄などの高電離イオンがあることが確認されている。

太陽からのX線を観測する衛星「ようこう」は、太陽のコロナ領域やフレア現象をみごとなX線画像としてとらえ、その変動のようすを明らかにした。

138 C 全く新しい望遠鏡

新しい宇宙像をもたらす、新しい手段としての望遠鏡・観測装置にはどのようなものがあるのか、ニュートリノや重力波、高エネルギー宇宙線の測定装置などについて具体的な例をあげて簡単に説明しておきたい。

解説 新しい望遠鏡 X線、可視光、電波などの電磁波をとらえる望遠鏡の他にも、宇宙を観測する新しい手段として、ニュートリノや重力波、高エネルギー宇

宙線を観測する装置が建設されている。

ニュートリノは物質とほとんど相互作用しない素粒子であり、地球の裏側からでも平気で通り抜けてくる。東京大学宇

宙線研究所は岐阜県の神岡鉱山の中に大きな水槽を設置した。これは、ニュートリノがごくまれに水中の電子と相互作用したときに生じる超光速電子からのチェレンコフ光を測定する装置であり、完成直後にマゼラン星雲中に発生した超新星1987Aからのニュートリノを検出することに成功した。太陽内部の核融合反応で生じるニュートリノの測定はいくつかのグループでなされてきたが、理論的に予想される量より少ない量のニュートリノしか測定されていない。地球大気で発生するニュートリノの観測から、ニュートリノの質量についての測定がなされている。

一般相対性理論によると、重力場が強い変動を伴うとき、重力波が発生すると予想されている。2つの中性子星が近接連星として互いのまわりを回る場合など、重力波が放出され、軌道運動エネルギーが減少して近接連星の公転周期が短

くなり、やがては2星が衝突合体することが予想される。このような場合に発生する重力波をとらえようと、さまざまな取り組みがなされている。たとえば、重力波が到来すると空間が歪み2点間の距離がわずかに変化するので、2点間の距離を極めて精密にモニターしていれば重力波を測定できる可能性がある。ただし、この距離の変化量は桁はずれに小さいので、2点間のあらゆる擾乱を取り除き、重力波によるものであると確信できるような測定を行わねばならない。このため、まだ、どのグループも測定に成功していない。テイラー (Joseph Taylor 1941 ~ アメリカ) とハルス (Russell Hulse 1950 ~ アメリカ) はパルサー連星の周期を数年にわたり精密に測定して、重力波の放出に伴う周期の減少が実在することを発見し、ノーベル賞を受賞した。

極めてエネルギーの高い宇宙線やガンマ線の観測もいろいろとなされている。

4. 宇宙と生命

教科書 p.138~140

138 A 太陽系の起源

日本の研究者の名がついた、林フェイズを中心に、恒星の誕生の過程について整理したい。

恒星はその質量によって異なった進化の過程をとることは地学IBで学んでいる。ここではそのことを思い出させ、次項の「元素の起源」で重元素を星間空間にまき散らす「新星」「超新星」といった現象に結びつけたい。

解説 太陽系外の惑星 太陽系外の惑星の探査は、惑星よりその母なる恒星のほうが桁違いに明るいので、撮影での確認は簡単でない。

それでも補償光学技術(→本書p.10)を用いた観測で、M型の恒星GL229の近くに暗い伴星GL229Bが発見され、その光度が太陽の10万分の1しかなく、自ら核融合で光る主系列星としては暗すぎることで、そのスペクトルに温度が1000度以下の星でないとできないメタンの吸収線が確認されたことから、この星は太陽質量の0.08倍以下で、自ら核融合で光ることができず、重力収縮により光っている褐色い星であることが確認され

た。

太陽系最大の惑星である木星は太陽の1000分の1の質量しかないが、太陽は主として木星の重力により太陽系の重心のまわりを木星の公転とともに12 m/sの速度で回転している。近傍の恒星のこのような速度の周期的変動から、見えない伴星を探す観測が続けられており、最近でははくちょう座51番星の視線速度が60 m/s、周期4.2日で変動していることが確認された。この観測からはこの伴星の質量は木星質量の0.47倍以上、軌道半径が0.05天文単位程度であると計算された。このような天体が惑星なのかどうかは今のところまだわからない。

139 B 元素の起源

ビッグバンの最初の5分間でヘリウム原子核が、10万年後には中性の水素原子がつけられた。その後、宇宙にはしだいにより重い元素が増えてきたが、これらはすべて星の中でつけられた。われわれの身体や地球が恒星の中で成されてきた元素から成っていることをしっかり理解させたい。また、それでも現在宇宙の物質はヘリウムと水素がほとんどであることも忘れないようにさせたい。

解説 元素の起源 ビッグバンの最初の5分間で、それまで高温のプラズマだった宇宙の中で、水素原子とヘリウム原子、少量のリチウム、ベリリウムなどがつく

られた。だがビッグバン宇宙は急激に冷えたため、炭素、窒素、酸素など炭素より重い元素をつくることはできなかった。これらの元素はすべて、恒星の内部

での核融合反応により、徐々にそのあとでつくられたものである。水素からヘリウムがつくられる核融合反応には陽子・陽子連鎖反応と、炭素・窒素・酸素循環反応がある。陽子・陽子連鎖反応は低質量星で起こり、炭素・窒素・酸素循環反応は高温な大質量星で重要となる。核反応は原子核の電気力による反発力に打ち勝つだけの温度と圧力がないと起きないが、温度が高くなるとその反応率は急激に増大する。

恒星の中心にはこうして水素から原子核融合反応でつくられたヘリウムがたまってゆくが、そのヘリウムもやがて 3α 反応という核融合反応で炭素に変わる。この時期になると星は大きく膨らんで巨星となる。大質量星ではさらに、炭素、酸素、ネオン……と順番に核融合反応が進み、鉄までがつくられる。鉄は原子核の中では安定な元素であり、それ以上重い元素をつくるには逆にエネルギーを与えなければならないので、原子核融合反応はここで止まる。

核反応が止まりエネルギー補給がなくなると、鉄でできた星の芯は収縮して内部温度が上がる。すると、鉄が光子を吸収してヘリウムに分解する吸熱反応が起こり、星の中心部が一挙につぶれ、その反動で超新星爆発を起こすと考えられている。このような超新星はII型超新星とよばれている。このほかに連星をなす白色わい星に伴星からのガスが降り積もり、太りすぎた白色わい星が一挙に爆発するI型超新星もある。超新星爆発の際には急激な核反応が起こり、鉄より重い元素もつくられる。恒星の死とともにこれらの重元素を含むガスが星間空間にまき散らされ、その星間ガスから新しい恒

星が生まれる。星とガスの輪廻の中で宇宙にはしだいに重元素が増えてきたが、それでも水素とヘリウム以外のすべての元素の数を足し合わせても、全体の1%程度にしかならない。観測されるヘリウム量が元素数比として約10%程度であることは、ビッグバン宇宙論の大きな根拠のひとつとなっている。重水素やリチウムなどの軽元素の量は初期のビッグバン宇宙のようすで決まるので、これらの測定が重要視されている。

私たちの身体はさまざまな原子からつ

<宇宙の元素組成>

ケイ素(Si)の元素数を 10^6 に規格化したときの太陽系の元素組成。

原子番号・元素	組成
1 H	2.79×10^{10}
2 He	2.72×10^9
3 Li	57.1
4 Be	0.73
5 B	21.2
6 C	1.01×10^7
7 N	3.13×10^6
8 O	2.38×10^7
9 F	843
10 Ne	3.44×10^6
11 Na	5.74×10^4
12 Mg	1.074×10^6
13 Al	8.49×10^4
14 Si	1.00×10^6
15 P	1.04×10^4
16 S	5.15×10^5
17 Cl	5240
18 Ar	1.01×10^5
19 K	3770
20 Ca	6.11×10^4
26 Fe	9.00×10^5
29 Cu	522
47 Ag	0.486
79 Au	0.187
92 U	0.0090

くられている。それらの原子ひとつひとつは宇宙の始まりから存在し、また恒星の中で合成されたという由来をもってい

る。この意味で、私たちは「宇宙人」といえよう。

140 C かけがえのない地球

ビッグバンから始まった宇宙に今地球があり、そしてその上に人類をはじめさまざまな生物が生きている。宇宙の中で生命が誕生し、文明が発生する確率は非常に小さい。ドレーク方程式なども示し、かけがえのない地球について考えさせたい。

解説 宇宙文明 人類文明に相当するような文明は、宇宙の中でどれくらい存在するのだろうか。恒星の中でも質量の大きい星は寿命が短すぎて、生命の進化の時間が足りない。逆に質量の小さい星では惑星を十分に暖めることができない。生命をはぐくむには、適切な恒星のまわりを、適切な距離を保って安定にまわる惑星が必要である。では、地球に似た環境の惑星があったとして、そこで最初の生命が発生する確率はどれくらいあるのだろうか。またその生命が高度な生物にまで進化するのに必要な期間、惑星環境が安定に保たれねばならない。文明が発生しても、社会構造が安定した文明でないと自滅してしまうおそれがある。

われわれの銀河系には約2000億個の星がある。では、現在その中には地球文明のような文明をもった惑星がいくつくらいあるのだろうか？ そのような惑星の数 N は、銀河系の恒星の数を S 、そのうち質量が適切で十分長い寿命をもつ恒星の割合を f_s 、1個の恒星に付随する平均惑星数を n_p 、そのうち文明を宿す環境にある惑星の割合を f_p 、惑星上で生命が発生する確率を f_l 、生命が進化して文明を築く確率を f_c 、文明の平均存続時間

を L 、星の平均寿命を T とすると、

$$N = \frac{S f_s n_p f_p f_l f_c L}{T}$$

となる。それぞれの数が正確にはわからないので、楽観的な値を入れるか、悲観的な値を入れるかで結果は何桁も変わる。例えば

$$S = 2 \times 10^{11}, \quad f_s = 0.1, \\ n_p = 10, \quad f_p = 0.1, \quad f_l = 1, \\ f_c = 0.01, \quad L = 10^4, \quad T = 10^9$$

とすると、 $N = 2000$ となる。これだと隣の文明までの平均距離は何千光年にもなってしまう、事実上交信はできない。一番わからないのが文明の存続時間 L だが、高度で安定な文明社会が存在するとして、 $L = 10^7$ 年とし、 $f_c = 1$ と楽観的立場をとれば、 $N = 2 \times 10^8$ となり、文明間平均距離は100光年程度となる。この程度の距離なら現在の電波望遠鏡でも十分交信可能な範囲である。そこで、地球外文明からの電波を受けようという計画が何度か試みられてきた。プエルトリコのアレシボにある直径300mの電波望遠鏡を用いたオズマ計画やセチ計画など、宇宙文明からの電波を受信しようという計画がなされたが、今のところ成功していない。また、最終的には太陽系の外へ旅立った惑星探査機ボイジャーには、人

類からのメッセージを刻んだ板が搭載された。

宇宙の中での地球、生命、人類につい

て学習し、大きな視点からその存在の意義を考えさせることが重要である。

第5編

課題研究