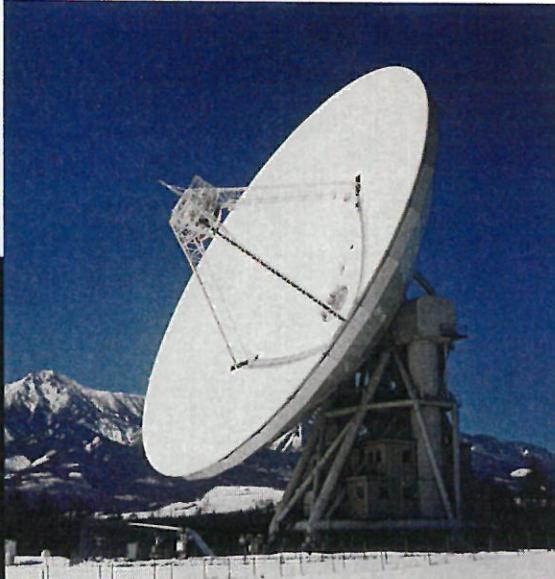
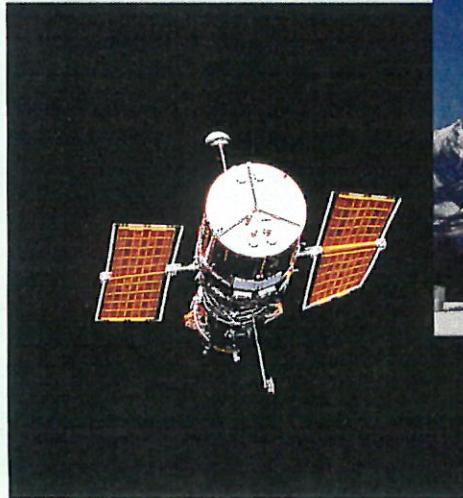


⑪ 望遠鏡

▼ハッブル宇宙望遠鏡

大気の影響を受けないのでシャープな映像を得ることができる。

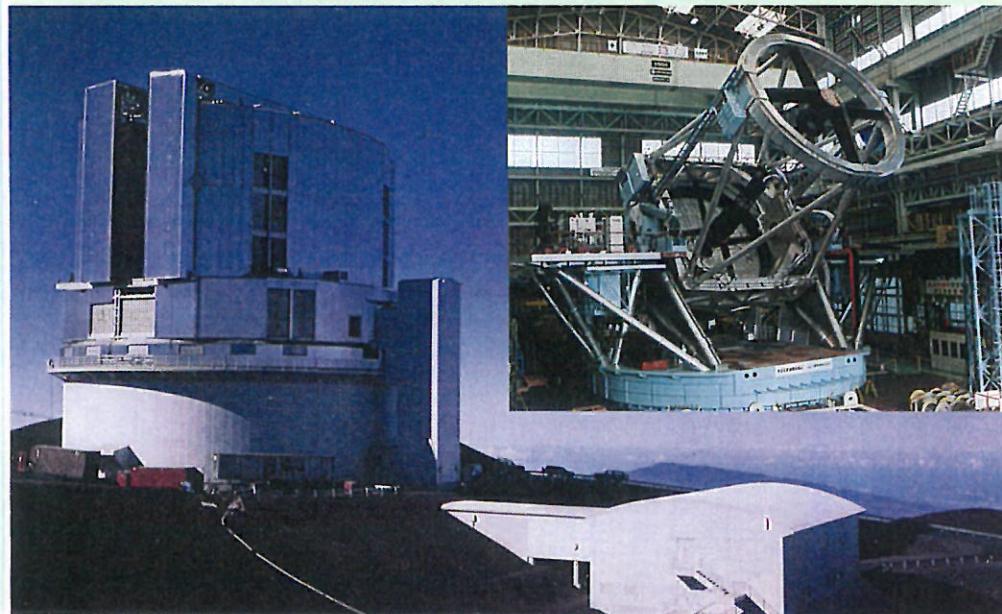


▲電波望遠鏡（長野県野辺山）

星間空間の分子雲や電波銀河からやってくる電波を観測している。

▼光学赤外線望遠鏡『すばる』

日本の国立天文台が、ハワイ島のマウナケア山頂に設置した最新式の望遠鏡である。



高等学校理科用

高等学校

地学Ⅱ

力武常次/家正則/小川勇二郎/永田豊/萩原幸男
日江井栄二郎/本藏義守/増田富士雄/丸山茂徳



数研出版株式会社

9 さまざまな銀河

►不規則銀河
(大マゼラン星雲)



▲渦巻銀河
(NGC4565)



◀だ円銀河
(M67)

▼ 棒渦巻銀河(NGC1365)



▼渦巻銀河(M74)



10

もあるが、湖沼生態系への影響、森林・農作物への影響が深刻になりつつある。樹木に対する影響は、現状での酸性雨程度の酸性液で育ても顕著な障害が現れないが、現実には硫酸塩・硝酸塩や硝酸ミストなどとの複合汚染が被害をもたらすと考えられる。また、酸性雨は土壤中のカルシウム・マグネシウムを溶出させ、アルミニウムを遊離させる。とくにこのアルミニウムの過剰化が森林に被害を与えていたと考えられる。このため、酸性雨の被害は広い森林にいっせいに起こるのではなく、局所的に土壤の汚染が進んだ部分だけに現れることが多い。



地球環境の保全と持続性のある発展

人間活動が地球環境そのものに大きな影響を与えるつある今、地学の研究は自然のよりよき理解を目指すのみならず、持続性のある人類の今後の発展の指針を与えるものとならなければならない。UNEP(United Nations Environment Programme:国連環境計画)が1985年にオゾン層保護条約を定め、1987年にフロンの規制内容を具体的に定めたウイーン条約が締結されたのは、そのような動きのひとつである。1992年にブラジルで環境と開発に関する国連会議が開かれ、21世紀に向けての行動計画が定められたが、十分な対策へと動きだしたとはいえないのが現状である。今後に予想される人間活動の増加に対応するためには、二酸化炭素やいろいろな汚染物質の排出規制が必要であり、そのための産業構造の変改がせまられている。また、世界の人口問題や貧困や南北格差もこの問題に大きくかかわっている。われわれの地球環境やその異常に対する理解や、その予測の精度が十分でなく、真に必要とされる人為活動の規制を量的に示し得ないことも問題である。環境にやさしい持続性のある発展を目指しての努力が何よりも急務である。

5

10

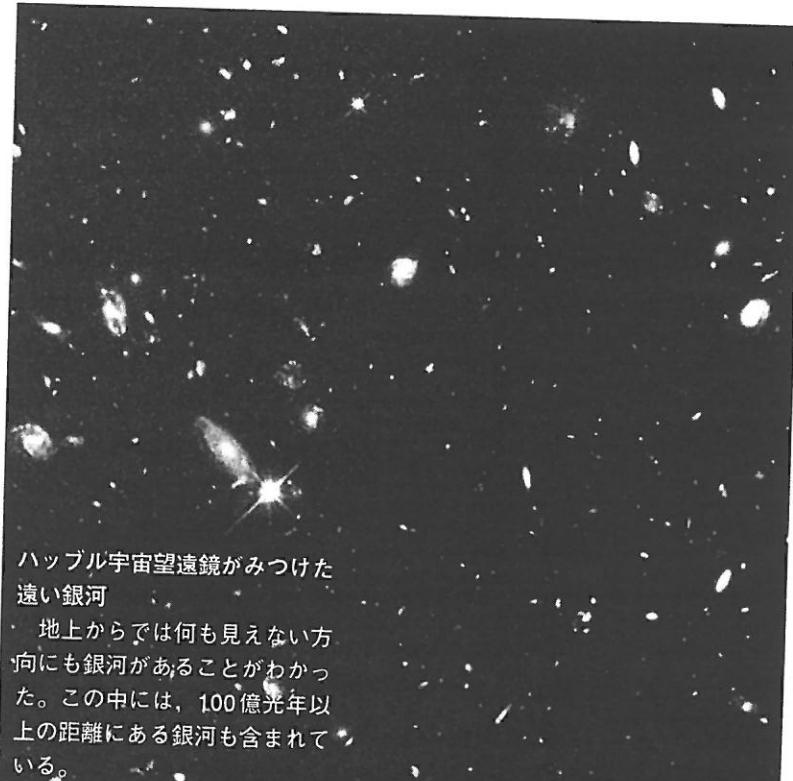
15

20

25

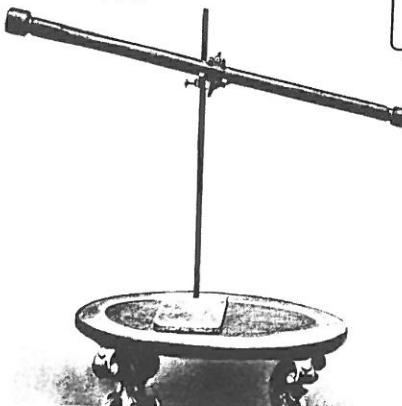
第4編

宇宙の構造



ハッブル宇宙望遠鏡がみつけた
遠い銀河

地上からでは何も見えない方向にも銀河があることがわかった。この中には、100億光年以上の距離にある銀河も含まれている。



ガリレイがつくった望遠鏡

I われわれの銀河系

銀河系は太陽をはじめとする多くの恒星と星間物質からなる。この中には散開星団や球状星団、星間物質が集まつた散光星雲や暗黒星雲が含まれる。しかし、内部にいるわれわれには銀河系のすがたはわかりにくい。ここでは、さまざまな観測によって明らかにされてきたわれわれの銀河系について学んでいこう。

5

銀河系の構造



A 天の川の正体

(1) 天の川 街明りのないところなら、月のない晴れた夏の夜空に、白い雲の帯のような天の川を見ることがある(図1)。



●図1 全天写真星図に見られる天の川

10

太古より人類は直径 7 mm ほどの瞳で夜空を見上げてきた。ギリシア神話では天の川は女神ヘラの乳が飛び散ったものとされ、西洋では「ミルキー・ウェイ」とよばれてきた。中国では銀河とよばれている。

天の川が無数の恒星からなっていることは、レンズの直径が 4 cm ほどの望遠鏡を作ったガリレオ・ガリレイ(イタリア)

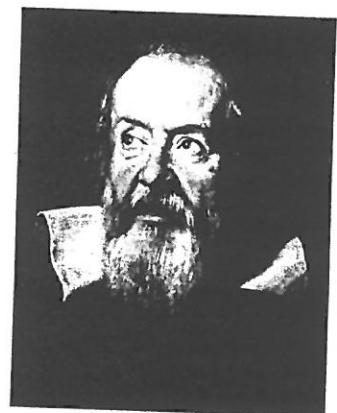
10 (図2)により、1609 年に発見された。木星の四大衛星、土星の輪、太陽黒点なども発見したガリレイは、思索に力点をおいたそれまでの哲学者と違って、ピサの斜塔での重力落下の実験も行い、実証を重んじた。

(2) オルバースのパラドックス 「恒星が無限のかなたまで一様に

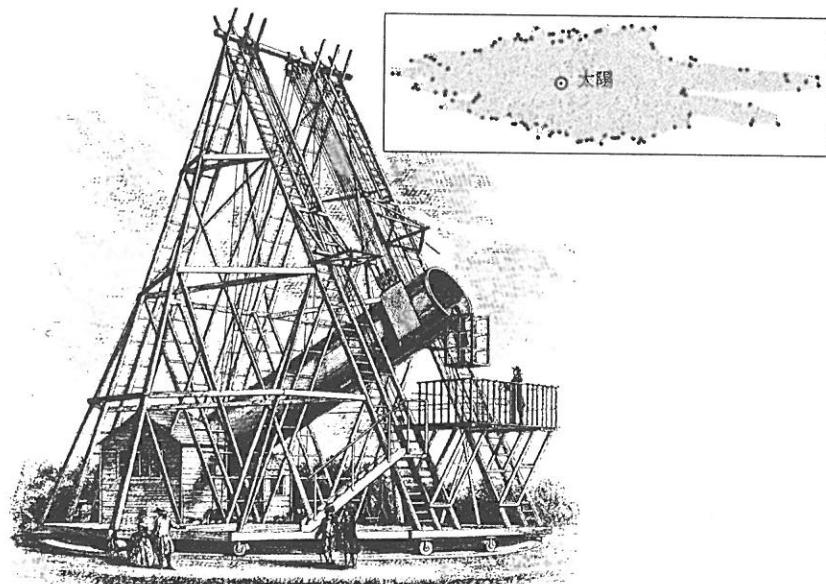
15 分布していれば、夜空のどの方向を見ても必ず星があるはずだ。遠くの星ほどその光はかすかになるが、その分だけ数が増えるので、夜空は結局、太陽と同じような星々で埋めつくされ、太陽と同じまばゆい明るさになるはずだ。」 オルバース(ドイツ)のパラドックスとよばれているこの考えは一見正しいように思われるが、実際には夜空は暗い。

20 どこが間違っているのだろう。オルバースの議論は、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。実際には、宇宙には始まりがあり、宇宙は膨張していて光が赤方偏移(→ p.120)し、無限の彼方まで同じように見えるわけではないため、この考えは成り立たない。

25 (3) ハーシェルの銀河系像 ウィリアム・ハーシェル(イギリス)は、妹や弟とともに次々と望遠鏡をつくり(図3)、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。



●図2 ガリレイ



●図3 ハーシェル兄妹のつくった直径122cmの望遠鏡とハーシェルが求めた銀河系の構造

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もわかる。

B 恒星の分布

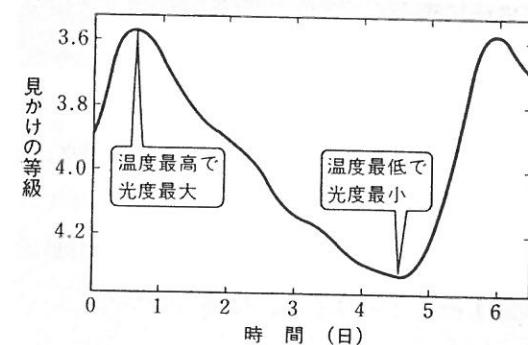
恒星の位置を知るには、その方向と距離を正しく決めねばならない。天体の距離はあまりに大きいため測定が難しく、さまざまな工夫がなされている。

(1) 距離の測定法 1838年、ベッセル(ドイツ)は地球の公転運動による年周視差を測定し、はくちょう座61番星の距離を三角測量法で約11光年と求めることに成功した。しかし、太陽系にもっと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¹⁾0.75"でしかない。年周視差により距離の測定ができるのは、せいぜい300光年までである。

1) “は角度の単位。1°(度)の60分の1が1'(分)、1'の60分の1が1"(秒)である。

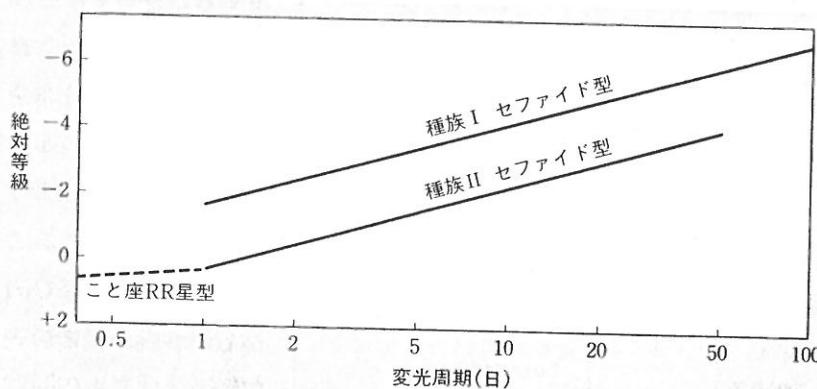


●図4 リーピット



●図5 セファイド型変光星の光度曲線

小マゼラン星雲中の変光星を調べていたリーピット(アメリカ)(図4)は、変光の周期と見かけの明るさの間に関係があることを1908年に発見した。小マゼラン星雲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、彼女が発見したことは変光周期と絶対光度が物理的に関係していること(これを周期光度関係(図6)とよぶ)を示す。セファイド型変光星(ケフェウス座 δ 星型変光星)やこと座RR星型変



●図6 セファイド型変光星の周期光度関係

セファイド型変光星には種族I(→ p.124)のものと種族IIのものとがあり、明るさが約1.5等異なる。こと座RR星型変光星の変光周期は1日以下で、絶対等級は周期によらずほぼ0.5等である。

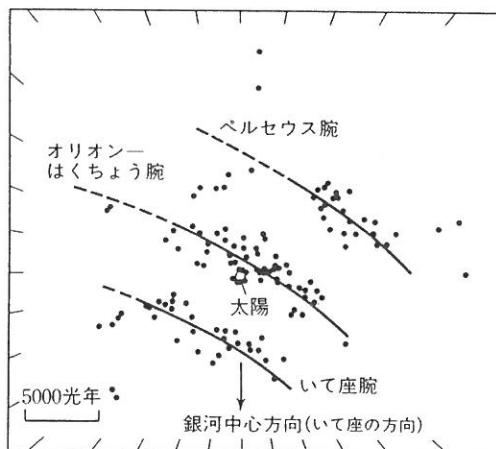
光星は、膨らんだり縮んだりして明るさが周期的に変化することが、理論的にも確かめられた。変光周期がわかれば絶対等級を求めることができ、それを見かけの等級と比べると、その距離を計算できる。これらの変光星は球状星団や近くの銀河の距離の測定に用いられている。

このほか、主系列星や巨星など、そのスペクトル型に応じて絶対光度がほぼ定まっている天体も、見かけの明るさと比べて、その距離を推定することができる。⁵

■問題1. ある球状星団の中に、周期が 0.40 日で変光をくりかえす、こと座RR星型変光星を発見した。この星の見かけの等級は平均すると 12.0 等であった。星間物質による光の吸収はないものとして、図 6 からこの球状星団までの距離を求めよ。¹⁰

ただし、恒星の絶対等級 M と見かけの等級 m と恒星までの距離 d [pc(パーセク)]¹¹との間には $M - m = 5 - 5 \log_{10} d$ の関係がある。また、 $\log_{10} 2 = 0.3$ とする。¹⁵ (2.0 × 10³ pc)

(2) 太陽近傍の構造 明るいO型星とB型星の集団や散開星団は、およそ 1 万光年までのものであれば、そのスペクトル型から距離を測



●図7 太陽近傍の渦巻構造

1) 1 pc(パーセク)=年周視差 1" に相当する距離=3.26 光年

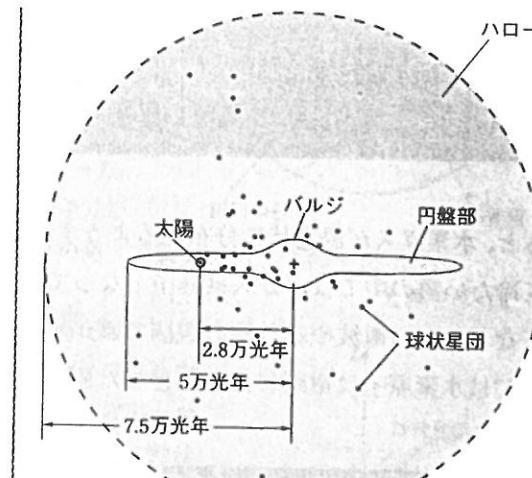
C 銀河系の大きさと形

(1) 球状星団の分布 シャプレー(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 年ころに発見した。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たため、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、それまではよくわからなかったのである。

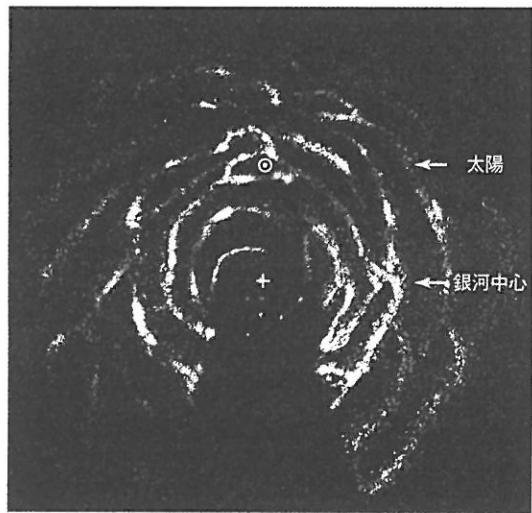
(2) 銀河系の構造

銀河系のおよそ 2000 億個の星々は、おもに直徑約 2 万光年の球状の部分(バルジとよぶ)と、直徑約 10 万光年の円盤部に分布している。しかし、およそ 200 個の球状星団は、銀河系全体をほぼ球状につつむ直徑 15 万光年の領域(ハローとよぶ)に分布している(図 8)。

星と星の間の空間には、1 cm³ に原子が 1 個程度しかない希薄な星間ガスがある。星間ガスは水素原子が主成分だが、ガスの分布は一様ではなく、濃い部分が星間雲としてただよっている。1951 年には星間空間の水素原子が発する波長 21 cm の電波を受信することに成功し、中性水素ガスの分布が調べられるようになった。電波は星間物質による吸収を受けにくいため、ほぼ銀河系全体を見渡すことができる。星間ガスが銀河中心のまわりを円運動しているとして、その分布を求め

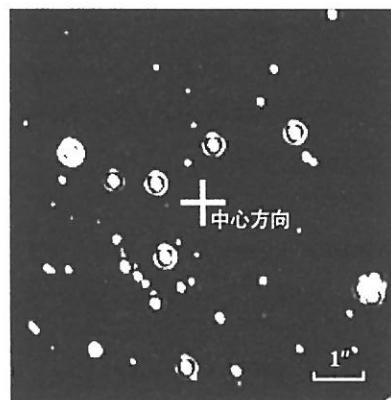


●図8 銀河系の円盤構造とハロー



●図9 銀河系の中性水素分布
◎は太陽の位置を表す。
銀河中心の向こう側は、距離の決定が困難なので示されていない。

ると、水素ガスが渦巻状に分布するようすが現れる(図9)。とくに濃くて冷たい雲の中では、ガスは分子となっていることが、一酸化炭素分子などからの電波や赤外線の観測で確かめられている。高温の星の近くでは水素原子は電離し、再結合した原子が光るため、散光星雲として見える。



●図10 赤外線で見た銀河系の中心方向
十印のところに銀河系の中心とみなされている電波源、いて座A*がある。

銀河系の中心方向である、いて座近くの天の川には暗黒星雲が数多く見られる。暗黒星雲中のちりが光を吸収するため、可視光では銀河系の中心部までは見通せない。電波や赤外線は吸収を受けにくいので、銀河系の中心部まで見通すことができる(図10)。

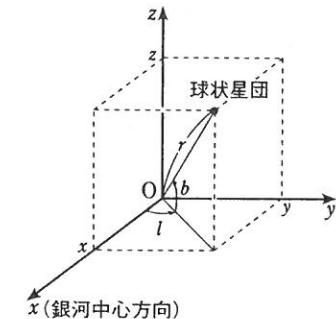
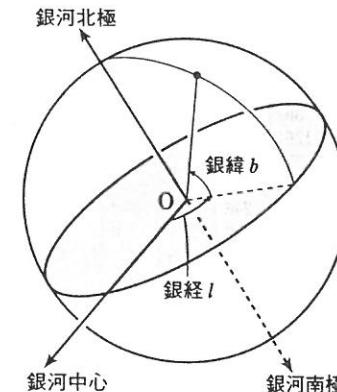
実習

球状星団の分布を調べる

銀河系を横から(銀河面上で銀河中心方向と垂直な方向から)見たときの球状星団の分布を調べ、太陽系がその分布の中心からはずれた位置にあることを確認する。

- 5 予備知識① 銀河座標 銀河系内の天
体の位置を表すときには、銀河座
標を使うとわかりやすく、球状星
団や散開星団の位置は一般に銀河
座標で表される。銀河座標は銀緯
と銀経で表す。銀緯 b は銀河円盤
を含む平面(銀河面)を基準とし、
天体の方向がその面となす角度で
測り、 $-90^\circ \sim +90^\circ$ で表す。一方、
銀経 l は銀河系の中心方向を基準
とし、そこから、東まわりの角度で測る。

- 10 ② 銀河座標から直角座標へ x y 面を銀河面と一致させ、太陽を原点にと
って、 x 軸を銀河中心の向きとすると、
球状星団の位置と銀経、銀緯の関係は図
のようになる。したがって、銀経 l 、銀
緯 b の方向で距離 r のところにある球状
星団の位置を (x, y, z) の座標で表す
と、 $(r \cos b \cos l, r \cos b \sin l, r \sin b)$
となる。次ページの表には、各球状星団
の銀経と銀緯の値のほかに、このように
して計算した x と z の値ものせてある。



準備 定規、B4判程度の大きさのグラフ用紙

- 手順① 紙の中ほどに太陽の位置◎を決め、 x 軸を横軸に、 z 軸を縦軸にとる。
② 表の x と z の値から球状星団の位置をプロットする。1万光年を1cm
にとるとよい。

- 考察① 球状星団の分布はどのようになったか。

- ② 太陽は球状星団の分布の中心からどれだけ離れているか。

発展 予備知識②の式で y 座標を計算し、球状星団の位置を xy 面や yz 面でプロットしてみるとどのような分布になるだろうか。

■表 I 球状星団とその位置

球状星団	銀経	銀緯	距離 (万光年)	x	z	球状星団	銀経	銀緯	距離 (万光年)	x	z
NGC 104	306°	-45°	1.6	0.7	-1.2	NGC6341	68°	35°	2.6	0.8	1.5
NGC 288	150	-89	4.8	0.0	-4.8	NGC6356	7	10	6.2	6.1	1.1
NGC 362	302	-46	3.2	1.1	-2.3	NGC6362	326	-18	2.3	1.8	-0.7
NGC1261	271	-52	9.5	0.1	-7.5	NGC6366	18	16	5.7	5.2	1.6
NGC1851	244	-35	5.5	-2.0	-3.2	NGC6388	346	-7	4.2	4.1	-0.5
NGC1904	227	-29	5.4	-3.2	-2.6	NGC6397	338	-12	0.9	0.9	-0.2
NGC2298	246	-16	9.8	-3.9	-2.7	NGC6402	21	15	4.7	4.3	1.2
NGC2808	282	-11	3.0	0.6	-0.6	NGC6426	28	16	6.8	5.8	1.9
NGC3201	277	9	1.3	0.2	0.2	NGC6440	8	4	1.3	1.3	0.1
NGC4147	253	77	6.1	-0.4	5.9	NGC6441	354	-5	2.9	2.9	-0.3
NGC4372	301	-10	2.0	1.0	-0.3	NGC6522	1	-4	3.9	3.9	-0.3
NGC4590	300	36	4.6	1.8	2.7	NGC6535	27	10	5.1	4.4	0.9
NGC4833	304	-8	1.6	0.9	-0.2	NGC6541	349	-11	1.3	1.3	-0.3
NGC5024	333	80	6.5	1.0	6.4	NGC6544	6	-2	1.6	1.6	-0.1
NGC5053	336	79	5.3	0.9	5.2	I C 1276	22	6	8.2	7.6	0.8
NGC5139	309	15	1.7	1.0	0.4	NGC6584	342	-16	4.2	3.9	-1.2
NGC5272	42	79	3.5	0.5	3.4	NGC6624	3	-8	4.2	4.2	-0.6
NGC5286	312	11	3.9	2.6	0.7	NGC6626	8	-6	1.6	1.5	-0.2
NGC5466	42	74	6.9	1.5	6.7	NGC6637	2	-10	2.3	2.2	-0.4
NGC5634	342	49	8.7	5.4	6.6	NGC6638	8	-7	5.0	4.9	-0.6
NGC5694	331	30	10.3	7.8	5.2	NGC6652	2	-11	5.2	5.1	-1.0
NGC5824	333	22	15.0	12.3	5.6	NGC6656	10	-8	1.0	1.0	-0.1
Pal 5	1	46	11.5	8.0	8.2	Pal 8	14	-7	15.6	15.0	-1.8
NGC5897	343	30	4.7	3.9	2.4	NGC6681	3	-13	6.5	6.4	-1.4
NGC5904	4	47	2.6	1.8	1.9	NGC6712	25	-4	1.9	1.7	-0.1
NGC5927	327	5	1.0	0.8	0.1	NGC6715	6	-14	5.5	5.3	-1.4
NGC5986	337	13	4.6	4.1	1.0	NGC6717	13	-11	4.8	4.6	-0.9
NGC6093	353	19	4.1	3.8	1.4	NGC6723	0	-17	2.4	2.3	-0.7
NGC6121	351	16	1.4	1.3	0.4	NGC6752	336	-26	1.7	1.4	-0.7
NGC6139	342	7	4.2	4.0	0.5	NGC6760	36	-4	2.7	2.2	-0.2
NGC6144	352	16	5.5	5.3	1.5	NGC6779	63	8	3.4	1.6	0.5
NGC6171	3	23	5.6	5.1	2.2	Pal 10	52	3	2.7	1.6	0.1
NGC6205	59	41	2.1	0.8	1.3	NGC6809	9	-23	2.0	1.8	-0.8
NGC6218	16	26	2.4	2.1	1.1	Pal 11	32	-16	9.4	7.7	-2.5
NGC6229	74	40	8.1	1.7	5.2	NGC6838	57	-5	0.8	0.5	-0.1
NGC6235	359	14	6.3	6.1	1.5	NGC6864	20	-26	11.4	9.7	-5.0
NGC6254	15	23	2.0	1.8	0.8	NGC6934	52	-19	6.0	3.5	-1.9
NGC6266	354	7	3.8	3.8	0.5	NGC6981	35	-33	6.9	4.7	-3.7
NGC6273	357	9	2.3	2.3	0.4	NGC7006	64	-19	13.0	5.4	-4.3
NGC6284	358	10	5.3	5.2	0.9	NGC7078	65	-27	3.4	1.3	-1.6
NGC6287	0	11	5.5	5.4	1.1	NGC7089	53	-36	4.0	1.9	-2.3
NGC6293	358	8	3.2	3.2	0.4	NGC7099	27	-47	4.3	2.6	-3.2
NGC6304	356	5	2.0	1.9	0.2	Pal 12	31	-48	12.4	7.2	-9.2
NGC6333	6	11	4.2	4.1	0.8	NGC7492	53	-63	11.3	3.0	-10.1

2 ダイナミックな銀河系

A 恒星の運動

恒星は天球上でその位置が変わらないと考えられてきた。ところが、18世紀のはじめ、2世紀に

つくられたヒッパルコス(ギリシア)の星図を最新の星図と比べていた

ハレー(イギリス)は、いくつかの星の位置がずれていることに気がついた。このことはこれら

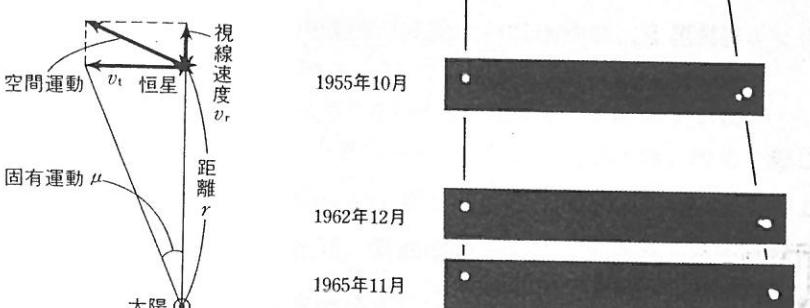
の星が実際に空間を動いているためである。

天球上での星の位置の変化率 μ を 固有運動

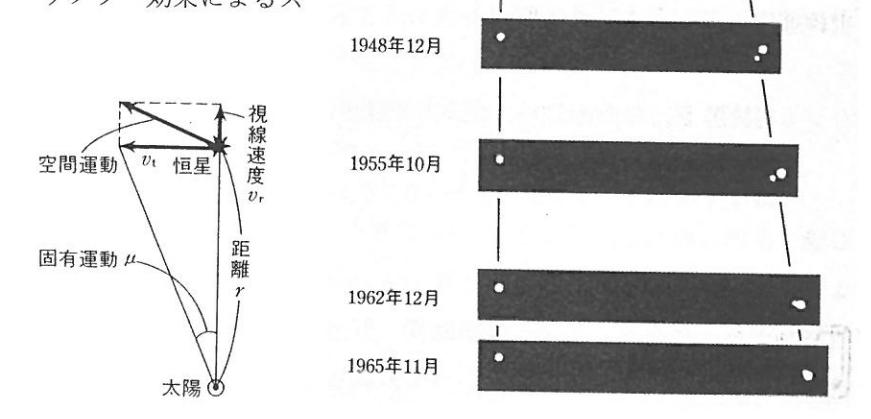
という(図12)。固有運動と星の距離 r がわかれば、視線に垂直な方

向の速度成分 v_t が計算できる(図11)。視線方向の運動速度 v_r はド

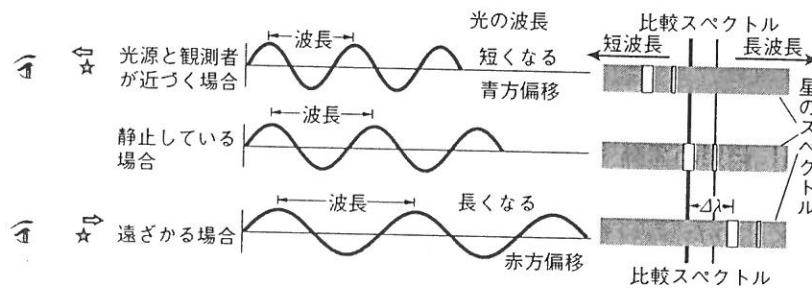
ップラー効果によるス



●図11 視線速度と固有運動



●図12 クリューガー 60番星の固有運動



●図13 ドッペラー効果と赤方偏移

ペクトル線の赤方偏移から測定できる(図13)。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。

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (1)$$

光の速さを c とすると、 $z \ll 1$ のとき

$$v_r = cz \quad (2)$$

となる。固有運動 μ 、視線速度 v_r と距離 r を測ることができれば、星の空間運動がわかる(前ページ図10)。逆にこのことから、ヒアデス星団の星々のように空間運動が共通な星の集団については、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。

問題2. ある恒星のスペクトルを観測したところ、590.0 nm の吸収線が 0.2 nm だけ赤方偏移していることがわかった。この恒星の視線速度は何 km/s か。真空中での光の速さを 3.0×10^5 km/s とする。

$$(1.0 \times 10^2 \text{ km/s})$$

B 銀河系の回転

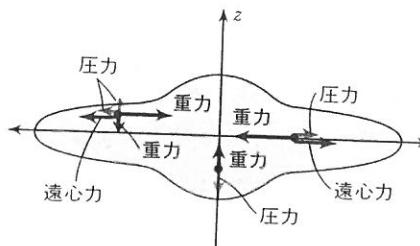
(1) 回転曲線 銀河系の円盤部の星々は銀河中心のまわりを公転している。太陽の場合、その速さは約 220 km/s。1 周に約 2 億年かかる速さである。太陽系の年齢を 46 億年とすると、太陽はまだ銀河系を 20 周ほどしかしていないこ

とになる。銀河の回転速度を、中心からの距離に対して、図に表したもの

を銀河回転曲線とよぶ(図14)。

銀河系の回転はその遠心力が銀河系による重力とつりあうように決まる。銀河面に垂直な方向に恒星が広がる範囲も重力とのつりあいで決まっている(図15)。したがって、銀河回転曲線や恒星の運動のよ

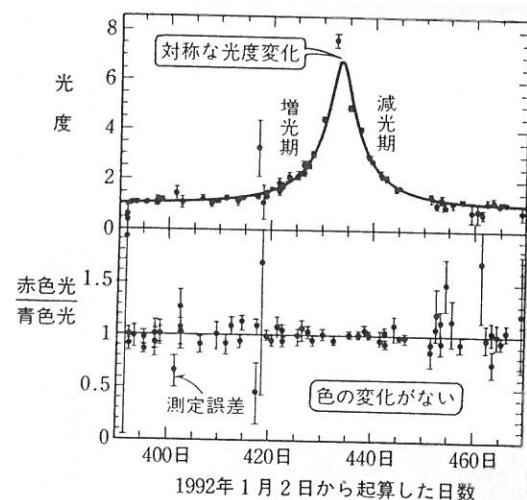
うから銀河系の質量分布を求めることができる。このようにして求めた質量は、実際に観測される恒星の質量を足し合わせた値よりも大きい。このため、ダークマターとよばれる光らない天体か物質が大量に存在すると推定されている。その正体としては、多数の褐色わい星やブラックホールなどの光らない天体や、ニュートリノ、未知の素粒子などの物質の可能性が議論されているが、まだ明らかにされていない。



●図14 銀河回転曲線

●図15 銀河系内の力のつりあい

太陽質量の 0.08 倍以下の星は、その中心の温度が核融合反応を起こすほど高温にならないため、長く光り続けることができない。そのような星を褐色わい星とよぶ。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。だが、そのような星がたまたま背後の星のちょうど手前を横切ると、手前の星の重力場がレンズのようなはたらきをして、背後の星を明るく見せる現象が起こる。1993 年には、このよ



●図16 重力レンズ効果による増光現象
重力レンズによる変光は、星がふくらんたり縮んだりするセファイド型変光星と違って、増光期と減光期が対称な変光曲線を示し、増光中も色が変化しない。

うな重力レンズ効果により、背後の天体の明るさが増す現象が実際に発見された(図16)。

問3. 太陽は、銀河中心から2.8万光年離れたところを2億年で1周している。このことから、銀河系の質量が太陽のおよそ何倍であるかを求めてみよ。

ただし、非常に大きな質量 M の天体のまわりを半径 R で公転する物体の公転周期 T は、万有引力定数を G とすると、万有引力と遠心力のつりあいから次の式を満たすことを用いてよい。

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

また、1光年=6.3×10¹¹天文単位である。 (1.4×10¹¹倍)

(2) 漶巻腕と密度波 O B型星や散開星団、それに中性水素ガスの分布から、われわれの銀河系にも渶巻の構造があることがわかった。銀河円盤の星々は、内側のものほど短い時間で一まわりしてしまう。回転の流れにずれがあるため、銀河の渶巻腕は数回まわるうちにどんどん巻きついてしまうように思えるが、腕の開いた渶巻銀河が少なく

5

10

15

ないのはなぜだろう。

渶巻腕にいつも同じ明るい星が貼りついているのではなく、渶巻腕は星やガスの流れが滞るところだと考えると、この謎は矛盾なく説明できる。密度の濃いところは重力が強くなり、まわりの物質をさらに集めていって濃くなる。回転の流れにずれがある銀河円盤では、重力のこのような性

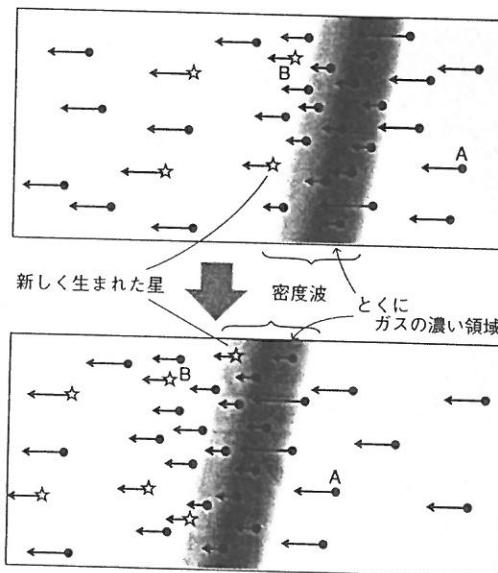
5

10

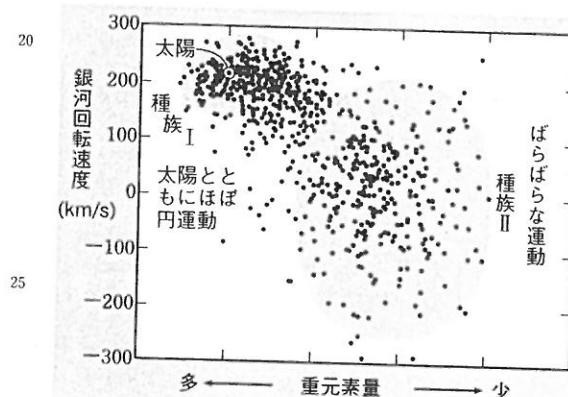
15

質でできた密度の濃い部分が渶巻状の波となって伝わる。この波を通過するガスから次々に新しく若い星が生まれて光るため、渶巻腕は強調されて見えるのである(図17)。

○ 銀河系の形成と進化



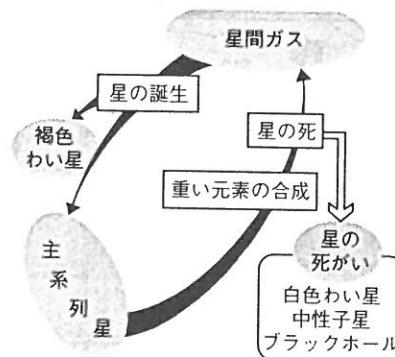
●図17 密度波



●図18 重元素量と銀河回転速度

銀河面から飛び出してハロー内をばらばらな運動をするものとに分けることができる。一方、恒星の元素組成をそのスペクトルから分析すると、ヘリウムより重い元素を太陽と同じ程度の割合で含むものと、それよりもかな

り少ない割合でしか含まないものとがある。恒星の軌道運動と重元素の量とは関連があり(前ページ 図18), 太陽のようにほぼ円軌道をえがき, 重元素を多く含む星々を 種族I, ハロー内をさまざまな軌道をえがいて運動し, 重元素の少ない星を 種族II とよぶ。



●図19 星とガスの輪廻

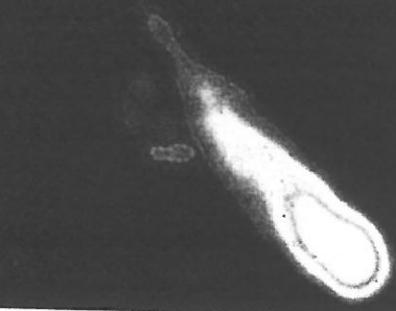
星はしだいに重元素の割合が大きいものになる(図19)。

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。原始銀河ガスが収縮する段階で生まれた種族IIの星々には重元素が少ない。種族IIの星のうち質量の小さい星は寿命が長く現在も残っているが, 質量の大きい星はつぎつぎに進化を終え, その内部でつくられた重元素を含むガスを周囲の空間にまき散らした。まき散らされたガスはしだいに銀河面に集まって, 銀河面内で回転する。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。銀河系の形成と進化のあらすじはこのように考えられている。

II 銀河の世界

われわれの銀河系のほかにも多数の銀河がある。渦巻銀河やだ円銀河はあちこちに集団となって存在している。また, 銀河と銀河が衝突合体する現象も観測されている。

ここでは, さまざまな銀河の分類や分布について学ぶとともに, クエーサーなどの活動的な銀河についても学ぼう。



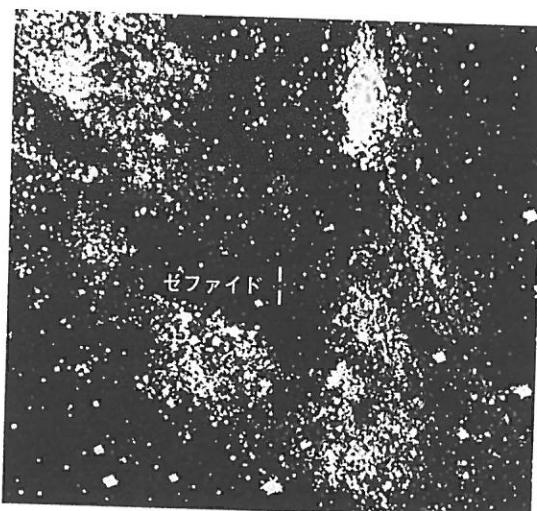
クエーサー 3C273 の電波写真

1 銀河の発見



A アンドロメダ銀河の論争

20世紀に入ると望遠鏡による天体撮影が盛んになり, 天の川の近くにある散光星雲や暗黒星雲, 天の川から離れた位置にある渦巻星雲など,



●図20 アンドロメダ銀河の中のセファイド型変光星

さまざまな星雲の存在が明らかになった。この中でアンドロメダ大星雲のような渦巻星雲が, 銀河系内のガス雲なのか, それとも銀河系外にある恒星系なのかという問題が論争となった。1885年にアンドロメダ大星雲に出現した新星の明るさから計算すると, アンドロ

メダ大星雲の距離はそう遠くはないはずであった。実はこれはふつうの新星より約10万倍も明るく輝く超新星だったのだが、その当時はこのような違いがまだ知られていなかったのである。

アンドロメダ大星雲の中にセファイド型変光星(図20)をみつけたハップル(アメリカ, → p.132 図26)は、1924年にその距離を計算して、アンドロメダ大星雲がわれわれの銀河系の外にあり、銀河系とほぼ同じ規模をもつ恒星系であることを明らかにした。⁵

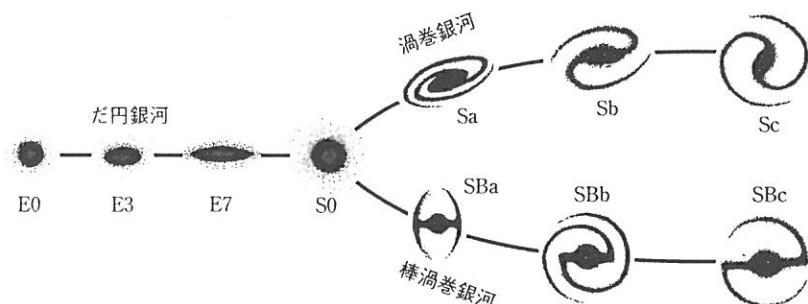
渦巻星雲などの銀河系外星雲は、銀河系内星雲とはっきり区別するため、現在では銀河とよばれている。

B 銀河の分類

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プルの研究でわかった。¹⁰

各々の銀河には100億個から1兆個の恒星が含まれる。銀河にはさまざまな形のものがあり、ハップル分類とよばれる分類法により、だ円銀河(E), 湾曲銀河(S), 棒湾曲銀河(SB), 不規則銀河(Irr)に大別される(図21, → 口絵 p. 9~10)。¹⁵

だ円銀河には、赤色や黄色に光る比較的年老いた恒星が、丸く集まっている。星間ガスは少なく、恒星の分布は連続的で、きわどった特徴に乏しい。見かけの形は球に近いもの(E0)からかなりつぶれたもの(E7)まで形のつぶれぐあいで細かく分類される。



●図21 ハップルによる銀河の分類

渦巻銀河や棒渦巻銀河は星間ガスを含む円盤状の恒星系である。渦巻銀河には中心のバルジから外側に伸びた2本または数本の渦巻腕がある。棒渦巻銀河は中央に棒状の恒星系があり、渦巻腕はその両端から出ている。渦巻腕には明るく青く光る若い星や電離したガスの雲がならぶ。渦巻腕のすぐ内側には暗黒星雲のすじが見えるものがある。中性水素ガスや分子雲の分布も渦巻腕に対応した構造を示す。バルジが大きくて腕がきつく巻き込んでいるSa型から順に、バルジが小さく腕が開いたものへとさらに細分し、Sb, Sc, Sd, Sm型とよぶ。

不規則銀河はだ円銀河や渦巻銀河でないものの総称である。銀河と銀河の衝突などで形が不規則に変形しているものと、Sm型の渦巻銀河よりさらに星間ガスが多く、渦巻腕の形がくずれて不規則な形になっているものとがある。

2 銀河の分布

A 銀河の距離

セファイド型変光星を用いて距離を測ることができる銀河は、せいぜい約6000万光年までである。中性水素原子の波長21cmの電波輝線や可視域のスペクトル線の幅は、銀河内での質量分布で決まるガスや星の運動速度と対応しているので、銀河の絶対等級と一定の関係があることが知られている。この関係を使って、より遠くの銀河の絶対光度を推定し、距離を求めることができる。他にも、爆発時の最大光度がほぼ一定の超新星をつかう方法などがある。さらに遠方の銀河では、膨張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。²⁰

B 局部銀河群

われわれの銀河系には、その直径の2倍以内の範囲に大マゼラン星雲と小マゼラン星雲の2つの不規則型銀河がある。大小マゼラン星雲とわれわれの銀河系の間には中性水素ガスがたなびいていることが、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の近くには2つの小さな円銀河がある。銀河系とアンドロメダ銀河との間の距離は230万光年。これらを中心とする直径600万光年の領域には、小さな銀河を含めると30個以上の銀河があり、この集団を**局部銀河群**とよんでいる。

C 銀河団

より大規模な銀河の集団としては、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)、ヘルクレス座銀河団(距離約4.6億光年)などがある(図22)。約2500個の銀河からな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。一般に銀河団の中ではだ円銀河の割合が多い。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。

太陽と隣の恒星ケンタウルス座 α 星との間の距離は太陽の直径の約2900万倍にもなる。宇宙年齢の間に太陽が他の恒星と衝突する可能性はほとんどない。だが、銀河団の中の銀河と銀河の間隔は銀河の直径の数10倍程度しかなく、銀河と銀河がすれ違ったり、衝突し合体することがある。

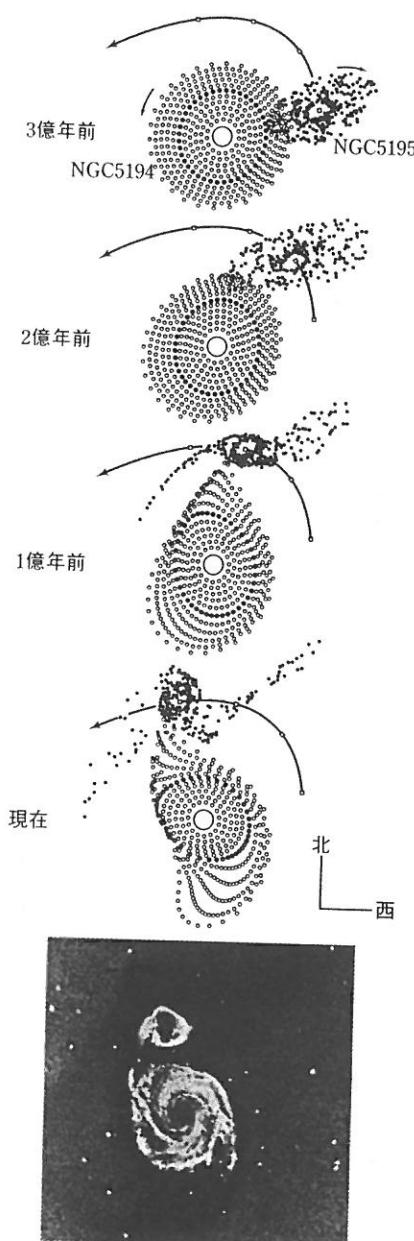
銀河対M51(NGC5194,



●図22 ヘルクレス座銀河団

NGC5195)のように、2つの銀河のすれ違いの現場と思われる銀河の対が多数あり、コンピューター・シミュレーションでM51のような形が再現できることが示されている(図23)。

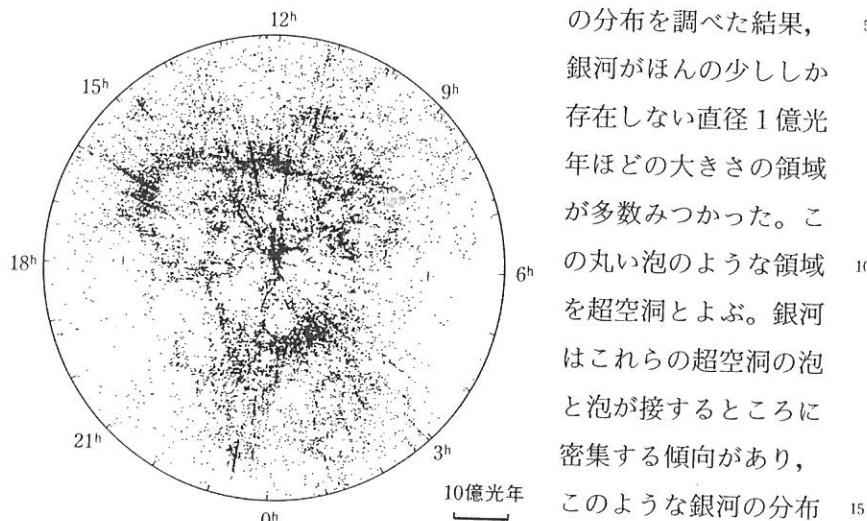
銀河団からは強いX線も観測される。銀河間空間には水素原子が1m³に数個程度しかない希薄なガスがある。銀河の運動とともに、このガスが1億度程度にまで加熱されて、X線を放射している。中性水素ガスを含む渦巻銀河も、非常に高温なガスに満たされた銀河団の中を運動するうちに、中性水素ガスがはぎとられてしまうことが電波観測で確かめられている。



●図23 NGC 5194とNGC 5195がすれ違うようすのシミュレーションと写真

D 大規模構造

遠方の銀河は宇宙の膨張のため、その距離にはほぼ比例した速度でわれわれから遠ざかっている。したがって、個々の銀河の視線速度を測れば、その距離を求めることができ、銀河の分布地図をつくることができる。10万個におよぶ銀河



●図24 銀河の分布
まわりの数値は赤経を表す。

の分布を調べた結果、銀河がほんの少ししか存在しない直径1億光年ほどの大さの領域が多数みつかった。この丸い泡のような領域を超空洞とよぶ。銀河はこれらの超空洞の泡と泡が接するところに密集する傾向があり、このような銀河の分布構造は泡構造とよばれている(図24)。

3 活動銀河

A クエーサー

1960年代のはじめ、電波源3C273の正体を光の観測で確かめるため、スペクトル観測を行っていたシュミット(オランダ)は、見たこともないスペクトル線を示す天体をみつけた。ほとんど恒星としか見えないその天体のスペクトルが、実は16%も赤方偏移していることに、やがてシュミットは気づいた。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

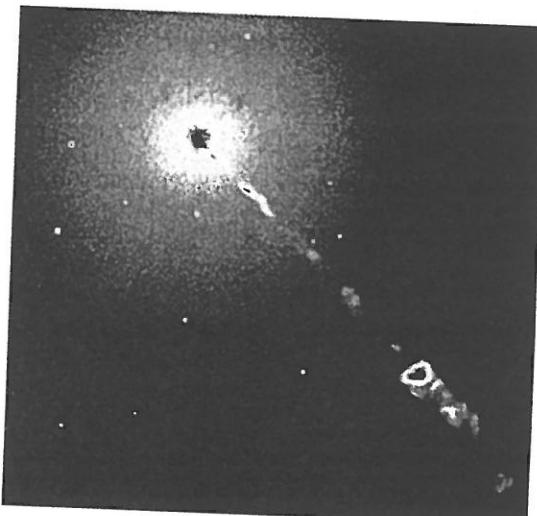
めて遠くにある天体ということになる。その距離から計算される絶対光度は、ひとつの銀河全体の明るさを上まわるほどになる。

ところが、その明るさがおよそ1年以下の短期間に変動を示すことから、3C273の発光領域の大きさは1光年以下のはずである。大きさに似合はず極めて明るいこれらの天体は、通常の核融合反応では説明できない強い放射源である。このような天体をクエーサー(準星)とよぶ(→p.125章初め写真)。クエーサーには、そのスペクトル線の広がりから、1万km/sにおよぶ激しいガスの運動がともなっていることがわかっている。これらのことから、クエーサーには巨大なブラックホールがあり、そこへ落ち込むガスから、なんらかの機構で強いエネルギーが放射されているものと考えられている。

クエーサーに似た性質を示す銀河中心核をもつ渦巻銀河をセイファート銀河とよんでいる。クエーサーのほかにも巨大な円銀河には非常に強い電波を出しているものがあり、電波銀河とよんでいる。これら活動的な銀河の中心核からの放射はX線から電波に至る広い波長領域で観測される。

クエーサーや電波銀河の中には中心からジェットが吹き出しているものがある(図25)。

また、数百万光年におよぶ電波放射領域をともなっているものもあり、銀河中心核の活動現象の解明は大きな課題となっている。



●図25 電波銀河M87から吹き出すジェット

III 宇宙の構造と進化

かんむり座銀河団

遠い銀河ほど、われわれから高速度で遠ざかっている。これは宇宙が膨張していることを示している。技術の進歩とともに、宇宙を観測する装置もどんどん新しくなり、新しい宇宙像がもたらされつつある。ここでは、ビッグバンから始まる宇宙の膨張と進化について学び、宇宙の中での地球や生命の起源と意義について考えてみよう。

1 膨張する宇宙

A ハッブルの法則

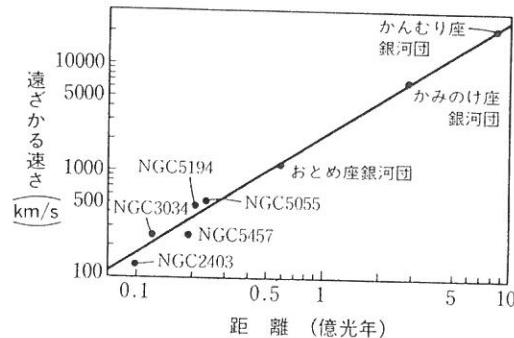
1929年、銀河の視線速度を測っていたハッブル(図26)は、遠い銀河ほど高速度でわれわれから遠ざかっていることを発見した。近づく銀河はほとんどない。銀河の距離を r 、後退速度を v とすると、この関係は

$$v = H \cdot r \quad (3)$$

と表せる(図27)。この関係を **ハッブルの法則**といい、宇宙の膨張率



●図26 ハッブル

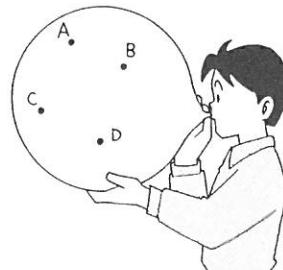


●図27 銀河の後退速度と距離の関係

やってみよう

風船を使った膨張宇宙のモデル実験
宇宙の膨張と銀河の後退運動のようすを、ゴム風船を使ったモデル実験で調べてみよう。

- 手順① 丸くふくらむゴム風船を少しづくらませ、その表面に油性のフェルトペンでいくつか点を記入する。
- ② それぞれの点をA, B, C, ……とし、任意の2点間の距離を測る。
- ③ 風船をさらにふくらませ、②で測った2点間の距離を測る。
- ④ それぞれの距離の増加の割合を比較してみよう。
- ⑤ 風船を③よりさらに大きくふくらませ、距離を測る。
- ⑥ ふたたび距離の増加の割合を比較してみよう。



	②	③	増加の割合 (③/②)	④	増加の割合 (④/②)
AB	cm	cm		cm	
AC	cm	cm		cm	
BC	cm	cm		cm	
…					

を表す比例定数 H を **ハッブル定数** とよぶ。ハッブルの法則はわれわれが膨張する宇宙の中心にいることを示すのだろうか。水玉模様の風船をふくらませることを考えてみよう。水玉のひとつに止まった虫から見ると、まわりの水玉がすべて遠ざかるように、しかも遠くの水玉ほど速く遠ざかるように見える。つまり、宇宙が一様に膨張すれば、どの観測者から見てもまわりの銀河は遠いものほど高速度で遠ざかるようになるのである。

- 問 4. ハッブル定数を $80(\text{km/s})/\text{Mpc}$ ¹⁾ として、後退速度 v が光の速さ $c (= 3.0 \times 10^5 \text{ km/s})$ になる距離を求めよ。 $(3.75 \times 10^3 \text{ Mpc})$

1) 1 Mpc(メガパーセク)は 10^6 pc (パーセク)で $1 \text{ pc} = 3.1 \times 10^{13} \text{ km}$ である。

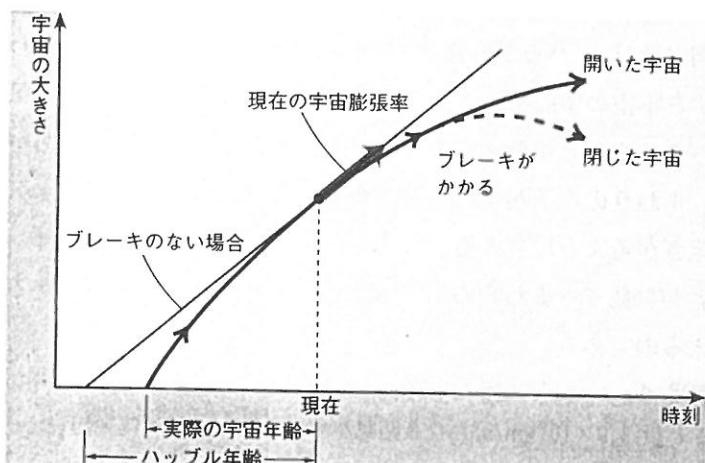
問 5. 現在、距離 r にある銀河が v の速さで遠ざかっているとすると、距離 r を速さ v で割った $\frac{r}{v}$ だけ時間をさかのぼると、その銀河までの距離は 0 だったことになる。この時間が宇宙の年齢 t のめやすとなり、ハッブル年齢とよばれている。 $v = H \cdot r$ より

$$t = \frac{r}{v} = \frac{1}{H} \text{ となる。}$$

ハッブル定数を $80(\text{km/s})/\text{Mpc}$ として、ハッブル年齢 t を求めてみよ。
(120 億年)

B 宇宙の膨張

ハッブル定数の値はおよそ $50\sim100(\text{km/s})/\text{Mpc}$ と測定されている。問 5. で見たようにこの逆数は宇宙の年齢のめやすとなり、100~200 億年である。膨張する宇宙には、自らの重力で引き戻す力がはたらき、膨張にブレーキがかかる。このため、過去の膨張率はもっと大きかったはずで、実際の宇宙年齢はハッブル年齢よりも少し短い。宇宙の平均密度が十分大きければ減速が効き、膨張はやがて止まり収縮に転じる閉じた宇宙となる。平均密度が小さいと膨張は止まらず、開いた宇宙となる(図 28)。宇宙の膨張のようすは現在の膨張率であるハッブル定数とブレーキの効き度合いを支配する宇宙の密度により定まる。



● 図 28 宇宙の膨張

2 宇宙の進化

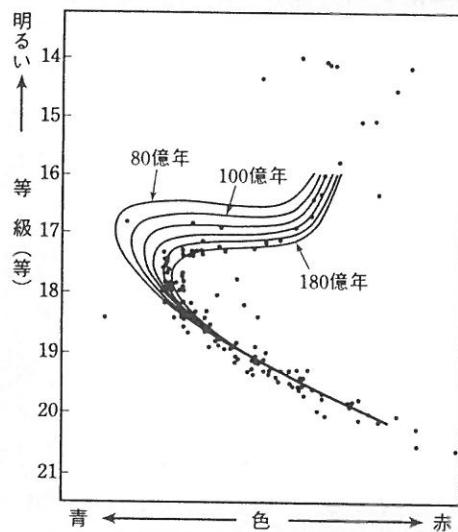
A ビッグバン宇宙

宇宙は ビッグバン とよばれる、超高温で高密度の状態から始まった。このことは、膨張する宇宙の過去の姿を考えて、ガモフ(アメリカ)が 1948 年に予言した。ビッグバンから始まる宇宙は、膨張とともに温度と密度が急激に低下する。最初の 5 分間に宇宙の全質量の約 20 % あまりが陽子からヘリウム原子核に変わる。実際、年齢の古い天体を分析しても、ヘリウムの割合がこれより少ない天体はみつからない。ビッグバンから約 30 万年後には宇宙の温度が約 1 万度以下となり、陽子と電子が結合してできる中性の水素原子が主成分となる。これ以後の宇宙は光に対して透明になる。この時代の紫外線が赤方偏移して、現在は電波として宇宙を満たしているはずだとガモフは指摘した。1965 年にはペンジャス(アメリカ)とウィルソン(アメリカ)が、背景放射とよばれるそのような電波放射があることを突き止めた。最近の測定によると、現在の宇宙の背景放射の温度は絶対温度で 2.7 度に相当することが確かめられている。

ビッグバンから約 30 万年後までは、このようにかなり理解が進んだ。宇宙の背景放射に強度のむらが見えないことから、この時代の宇宙の密度のむらもまだ小さかったと考えられる。現在知られているもっとも遠い天体は、宇宙が始まってからまだ 10 億年以内の時代の天体である。

B 宇宙の年齢

ハッブル定数と宇宙の平均密度が測定できれば、宇宙の年齢が決まる。現在の測定値からは、宇宙年齢は約 150 億年以下という数字が得られる。一方、球状星団の色-等級図(HR 図)を星の進化理論と比べると、球状星団の年齢が測定できる。これは、年齢の古い球状星団では質量の大きな星から順に進化



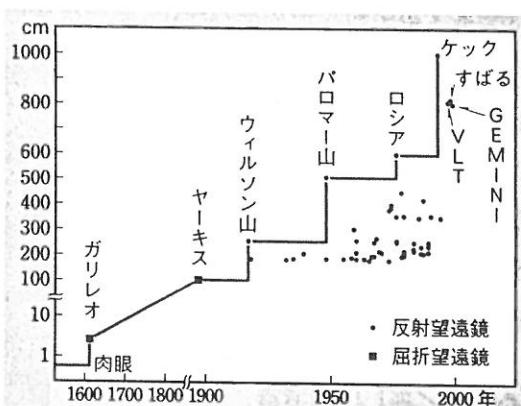
●図29 きよしちょう座の球状星団の色-等級
とさまざまな年齢の球状星団の理論曲線

を終えて主系列から離れていくことを使う方法だが、この方法では球状星団の年齢は約150億年以上となる(図29)。宇宙の年齢は球状星団の年齢よりは大きいはずである。球状星団の年齢とハッブル定数などから求められる宇宙年齢とが一致しないことは、現在の宇宙論の大きな謎のひとつである。

星が打ち上げられている。口径2.4mのハッブル宇宙望遠鏡(→口絵p.7)は、地上からは観測できない紫外線や一部の赤外線による観測を行うことと、大気のゆらぎに妨げられないシャープな解像力を

10 目指した望遠鏡である。

打ち上げ直前のスペースシャトル・チャレンジャー号の爆発事故や、打ち上げ後にわかった主鏡の研磨ミスなどのトラブルに見舞われたが、1993年末にスペースシャトルに乗った技術チームが望遠鏡の修理に成功し、その後はさまざまな目覚ましい発見をもたらしている。



●図30 光学望遠鏡の口径増大の歴史

15 **B 日本の観測装置**
国立天文台は長野県野辺山に直径45mの電波望遠鏡(→口絵p.11)をつくり、星間空間にただよう分子雲や電波銀河の観測を行ってきた。電波望遠鏡は宇宙からの電波を聞き、電波の強さを地図に描く装置である。電波望遠鏡1台ごとの分解能は、光の望遠鏡に比べると劣るが、遠く離れた電波望遠鏡を組み合わせることにより、今では光の望遠鏡以上の解像力が達成できるようになった。

20 国立天文台はまた、ハワイ島の海拔4100mのマウナケア山頂に口径8.2mの光学赤外線望遠鏡「すばる」を建設している(→口絵p.11)。この望遠鏡の主鏡は厚さ20cmの特殊ガラス製で、コンピューター制御の支持機構により、つねに最良の状態で観測できるように調節される。21世紀はじめには、すばる望遠鏡をはじめとして全世界で8m～10m級望遠鏡が10台ほど、動き始めるはずである。

3 新しい観測装置

A 望遠鏡の発達

ガリレオ・ガリレイが自作の望遠鏡ではじめて木星の衛星や、天の川の正体を見てから、人類の望遠鏡はどんどん大きくなってきた。レンズを用いた最大の屈折式望遠鏡は、1897年に完成したヤーキス天文台(アメリカ)の101cm望遠鏡である。1948年にはパロマー山(アメリカ)に508cmの反射式望遠鏡が完成した。1990年代に入り、直径8mから10m級の望遠鏡が次々に建設されている(図30)。

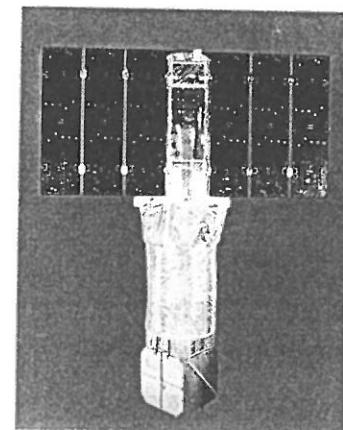
25 地上の望遠鏡が大型化する一方、地上からは観測できないX線や紫外線、それに一部の赤外線を観測するために、さまざまな天体観測衛

一方、宇宙科学研究所は「はくちょう」、「てんま」、「あすか」などのX線観測衛星を次々と打ち上げてきた(図31)。これらの科学衛星では、中性子星やブラックホールなどの高密度天体や、銀河団の高温の銀河間ガスからのX線の観測が行われている。

C 全く新しい望遠鏡

X線、可視光、電波

などの電磁波をとらえる望遠鏡のほかにも、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測定する装置が建設されている。21世紀にはこれらの観測装置が新しい宇宙像をもたらすことが期待されている。

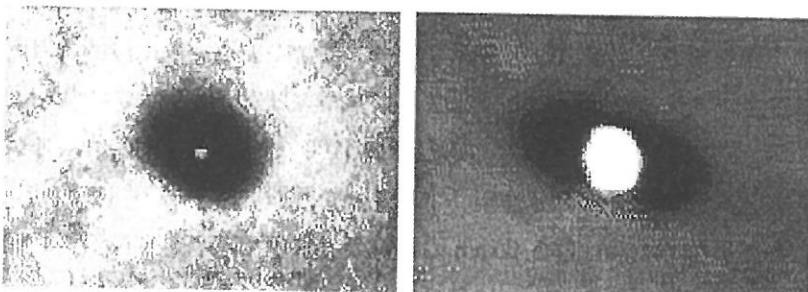


●図31 X線観測衛星「あすか」

4 宇宙と生命

A 太陽系の起源

星間ガスには濃いところと薄いところがある。¹⁵濃くて冷たいところでは、星間ガスの主成分である水素原子は分子の雲になっている(図32)。近くで超新星爆発が



●図32 オリオン星雲に見られる分子雲の影

中央にある生まれてまもない星のまわりの分子雲が、後ろの星雲の光をさえぎり影をついている。

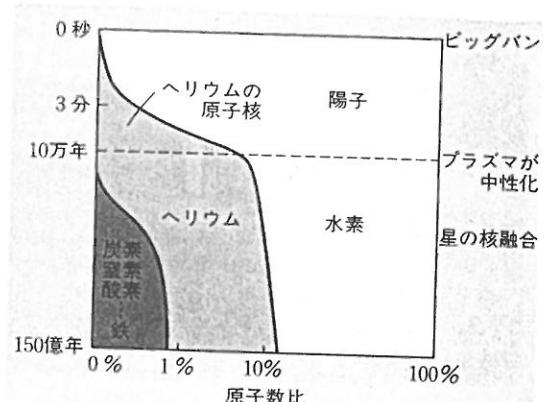
起こったり、渦巻腕の作用で星間雲が圧縮されると、このような雲が自らの重力でさらに収縮を始める。

太陽のような恒星はこうして誕生したものと考えられている。収縮するガス雲は、回転しながらしだいに円盤状につぶれてゆく。円盤の中心部の温度と密度が十分高くなると、核融合反応が始まり、自ら輝く恒星が誕生する。原始星の収縮の過程は、それを調べた日本の研究者の名前をとって 林フェイズ とよばれている。質量が太陽の0.08倍以下の星は中心温度が十分に高くならないため、核融合反応に点火できず、しばらくは収縮熱で光っているが、しだいに冷えて、暗く目立たない星(褐色わい星(\rightarrow p.121))となってしまうと考えられている。

B 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ヘリウム原子核がつくれられ、ビッグバンの10万年後には水素原子がつくられた。炭素、窒素、酸素などの、より重い元素はすべて、恒星の内部での核融合反応により、そのあとでつくられたものである。恒星の死とともにこれらの重元素は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(図33)。

私たちの身体をつくりているさまざまな原子も、そのひとつひとつが恒星の中で合成さ



●図33 元素の起源

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。

◎かけがえのない地球

夜の地球の写真(→口絵 p. 7)を見ると、サハラ砂漠やシベリアなどを除き、大陸のほとんどの部分に光が見られる。これらはほとんどが人間の生活と結びついた光である。人類文明の発達とともに夜の地球が明るくなってきたといえよう。⁵

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、進化の時間が足りない。逆に質量の小さい星は核融合エネルギーが不十分である。生命を育むには、適切な恒星のまわりを、適切な距離を保ち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、十分長期間にわたり存続するだけの安定な社会構造も備える必要がある。このように考えると、地球の文明が宇宙の微妙なバランスの中で発生し支えられている、かけがえのないものであることがわかる。¹⁰
¹⁵

第5編

課題研究

