

地学基礎

森本雅樹・天野一男・黒田武彦



実教出版

宇宙を さぐる

遠くを見ることは昔を見ること

●宇宙の昔の姿はどうしてわかるのだろう。

私たちが宇宙を調べる手段は、光や電波などの電磁波^①である。電磁波の速度は秒速30万kmであり、地球上では一瞬のうちに伝わってしまう速さである。しかし広大な宇宙では、光が伝わるのに何年も何千年も、ときには何億年もかかることさえある^②。

遠くの天体からくる光ほど、地球に到達するまでに時間がかかる。これは、遠ければ遠い天体ほど、より昔の姿を見ていることを示している。

つまり、宇宙の歴史を知るには、できるだけ遠くの天体をさぐる必要がある。



光が届く時間

それぞれの天体を出発した光が、地球に届く時間を示す。その時間は、それだけ昔の光ということになり、遠くを見るのが昔を見ることにつながっている。

①波長の短い方から、ガンマ線、X線、紫外線、可視光線(光)、赤外線、電波などに分類される。

②光が1年間に進む距離を1光年という。

地球をさぐる

地層や化石は過去の地球からの手紙



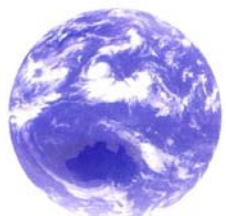
流星
(高度 80~120 km 付近)



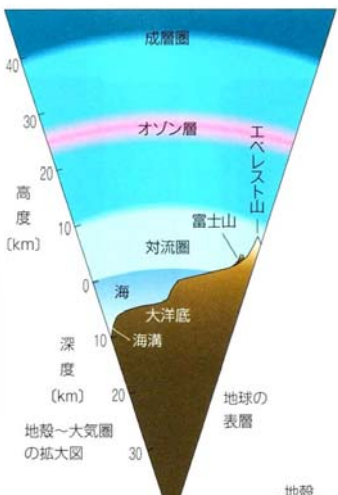
オーロラ (高度 100 km 以上)

●地球の歴史はどうしたらわかるのだろうか。

地層の重なりや化石は、過去の地球や生物の変化のようすを教えてくれる。しかし、地層や化石から地球の歴史を調べることには限界がある。最近の科学や技術の進歩は、今まで知ることのできなかった地球内部のようすや深海・高層大気構造、原始地球の姿などを次々に明らかにしている。こうして誕生以来の地球の歴史がしだいにわかってきた。



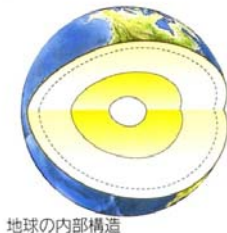
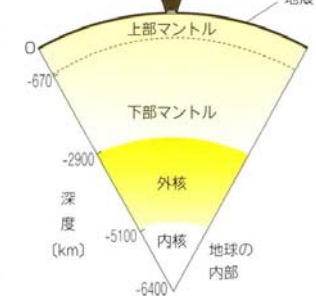
気象衛星による雲の観測



地層 地層の重なりは、過去の時間を閉じてこめている。



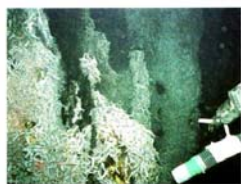
化石 化石は過去の生物の生の情報を提供してくれる。



地球の内部構造



海洋調査



海底調査

宇宙の誕生

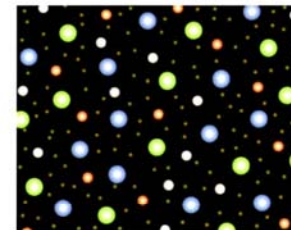
宇宙は急激な膨張で始まった。その直後のビッグバン(超高温、高密度の小さな宇宙)で膨張を続けて温度が下がり、基本的な原子核を形成し、やがて最初の天体が生まれた。

ビッグバン

宇宙は 137 億年前、とても小さな状態から始まった。



ビッグバン(イメージ図)

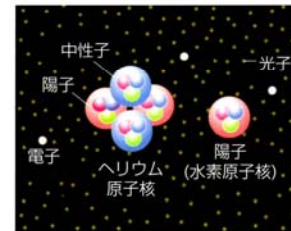


ビッグバン直後の宇宙では、さまざまな小さな粒子(素粒子)が生まれた。

原子の誕生

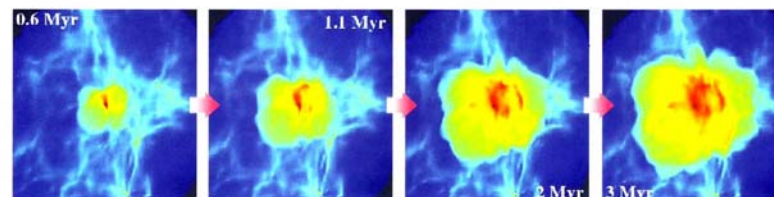
宇宙初期の3分間で、簡単な原子核がつくられた。

クォークとは最も小さいと考えられる小さな粒子で、陽子や中性子などをつくる。



最初の天体の誕生

ガスが集まって、最初の天体が生まれたらしい。



60 万年後 110 万年後 200 万年後 300 万年後
時間とともにガスが集まり、大きな塊(赤色)へと成長するようす(シミュレーション)

ビッグバン

原子の誕生
宇宙の始まり

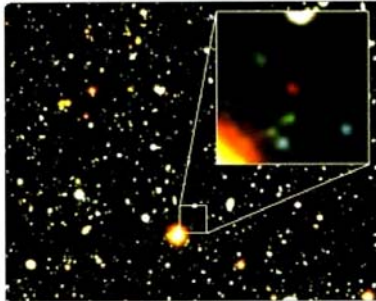
最初の天体誕生

銀河と銀河系の誕生

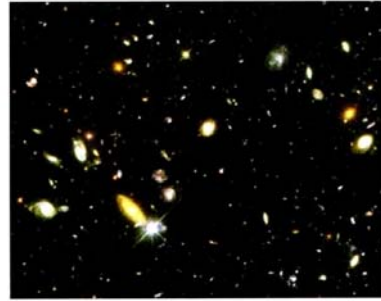
宇宙誕生後 2 億年から 10 億年の間に、数多くの銀河が誕生した。私たちの住む銀河系が誕生したのはおよそ 130 億年前、宇宙誕生 7 億年後のことであった。

銀河の誕生

銀河とは 1 億から 1 兆個の星の集まりである。宇宙には 1000 億個以上の銀河があるらしい。



129 億光年かなたの銀河（枠内の赤い点）



宇宙初期の銀河たち

銀河系の誕生

銀河系は星とガス、塵の大集団で、星の一生のドラマがくり広げられている。



銀河系は直径 10 万光年の大きな渦巻き型をしていて、太陽は中心から約 3 万光年離れた場所にある。



私たちは銀河系の渦巻きを、内側から天の川としてながめている。



銀河系は、おとめ座銀河団のはずれにあつて、いくつかの銀河と集団をつくっている。

銀河の誕生

銀河系の誕生

銀河の形成

太陽系の誕生

約 50 億年前、銀河系の中に漂う大きなガスがゆっくりと収縮を始めた。ガスは回転しながら円盤状になり、その中心部では太陽が誕生、円盤部では地球を初めとする惑星が形成されていった。

太陽系の材料のみなもと

太陽系のもとになったガスは、大爆発をした前の世代の星からもたらされたものである。



星は一生を送るうちに、さまざまな元素をつくりだす。それらが太陽系の材料になっている。

暗黒のガスが収縮し、星が誕生。一生を終えるときの爆発で、ガスを宇宙空間にまき散らす。

太陽系の形成

太陽が生まれ、そのまわりで惑星が誕生していく。

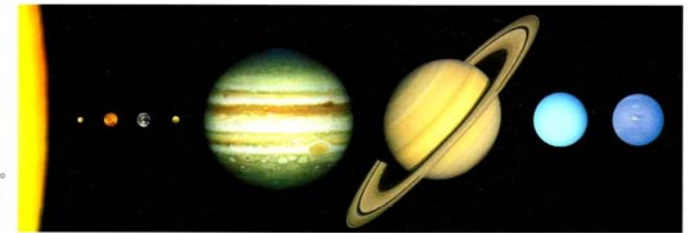


星雲の中心で太陽が誕生

太陽系の形成は 46 億年前。地球も太陽系の一員として、このとき誕生した。

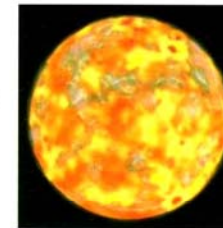


星雲中の塵が集積して惑星に



地球の誕生

原始地球の表面は溶け、マグマオーシャンにおおわれる。



マグマオーシャンにおおわれた地球



誕生初期は隕石の落下も盛んだった。

太陽の誕生

地球の誕生

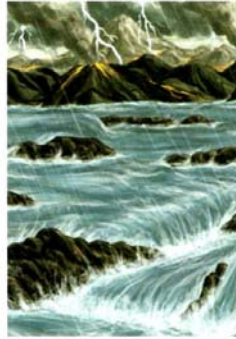
太陽系の形成

生命の誕生

地球が誕生し、海が形成されたのが約 40 億年前である。海の中で最初の生命が誕生したのは 38 億年より以前だと考えられている。地球上の生命の歴史はここから始まるのである。

海の形成

大気中の水蒸気が凝結し、雨を降らせ、低地を埋めて海ができた。海は生命の誕生の場となった。



原始の海 (イメージ図)

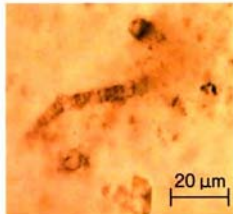


海底の熱水噴出孔

海底の熱水噴出孔からは硫化水素やメタンなどの有機物質が噴出しており、生命の誕生と関わりがあると考えられている。

原始生命の誕生

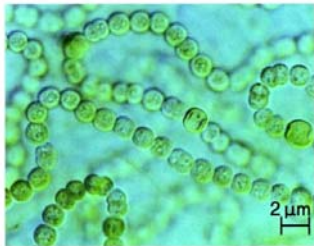
生命の誕生が、環境に影響を与え、環境の変化が進化を促す力となった。



35 億年前の生命の化石



先カンブリア時代最後のころの海中のようす (イメージ図)



27 億年ほど前に出現したシアノバクテリアが、光合成を行って酸素を生産、オゾン層の形成へとつながる

6 億年前の地球



海の形成

原始生命誕生

シアノバクテリア誕生

オゾン層の形成

先カンブリア時代

生物の上陸

先カンブリア時代に蓄積した酸素は、海洋生物の発展を促し、魚類も出現した。その後オゾン層が形成されると、生物が陸上進出を果たし、大型のは虫類も登場した。

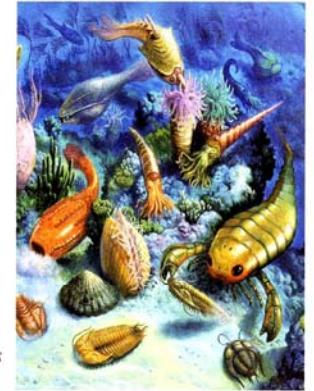
海洋生物の進化

急速に進化した海洋生物。三葉虫が全盛をきわめ、魚類も登場した。



三葉虫

海洋生物が多様化



生物の陸上進出

植物が陸上に出現し、これを食料とする動物が上陸した。魚類の一部は両生類へと進化し、陸上へ進出した。両生類の一部はは虫類へと進化し、次にくる恐竜の時代への準備を始めた。



大量の樹木が酸素を生み出す。

樹幹の化石



恐竜の祖先となるは虫類、哺乳類の祖先となる単弓類が登場した。

5 億 4000 万年前の地球



4 億年前の地球



2 億 8000 万年前の地球



海洋生物の急速な進化

生物の上陸

両生類やは虫類の出現

古生代

恐竜の時代

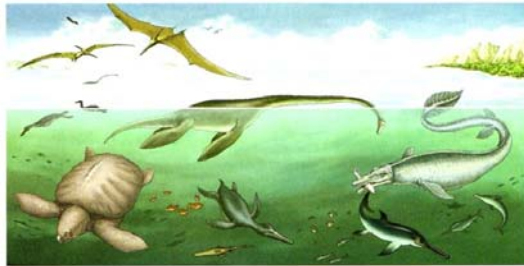
大陸が分裂を始め、海ではアンモナイトが、陸上では恐竜が大繁栄した。鳥類や哺乳類も現れた。

恐竜の繁栄と鳥類・哺乳類の出現

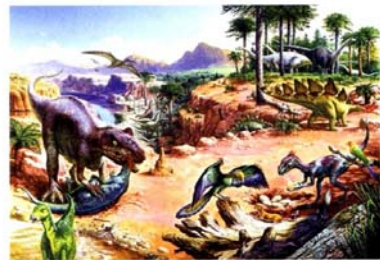
恐竜は大型化し、陸上に君臨した。鳥類や哺乳類も現れた。



恐竜の卵の化石



中生代の海の様子 (イメージ図)



中生代の陸上の様子 (イメージ図)

全盛をきわめたアンモナイト



アンモナイトや恐竜の絶滅

長く繁栄したアンモナイトは、大隕石の落下で絶滅した恐竜とともに中生代末に姿を消した。

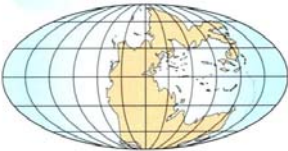


始祖鳥の化石



巨大な隕石の落下

2億4000万年前の地球



恐竜や哺乳類の出現

1億5000万年前の地球



鳥類の出現

9000万年前の地球



恐竜の繁栄

恐竜の絶滅

中生代

哺乳類の繁栄と人類の発展

恐竜が絶滅したあと、哺乳類が繁栄した。その中の霊長類から、直立二足歩行を行う人類が出現した。人類は道具を使いこなし、文明を築いた。

哺乳類の繁栄

ネズミくらいの大きさの小型動物が、すべての哺乳類の祖先らしい。



中生代初期に登場した初期の哺乳類 (想像図)



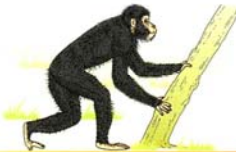
霊長類の進化

哺乳類の中で、霊長類から直立二足歩行する人類へと進化を遂げた。

● 霊長類の進化

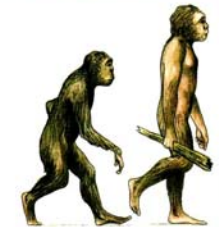


初期の霊長類
プレシアタピス
4700万年前の
初期原猿類



エジプトビテクス
3500~3200万年前
の初期真猿類

プロコンスル
1800万年前の
初期類人猿



新人 (Modern human)

人類は、約700万年前の猿人に始まり、原人、旧人、新人となり現代までつながっている。

6500万年前の地球



哺乳類の発展

3500万年前の地球



猿人

原人

現在の地球



旧人

新人

新生代

地学 基礎

EARTH SCIENCE

高等学校理科用
文部科学省検定済教科書

2 東書 地基301

東京書籍



1 編 まとめ

1 宇宙の構造と進化

ビッグバンと宇宙の進化

- ・宇宙の始まり……約140億年前にビッグバンによって誕生した。宇宙の初期にできた元素は水素とヘリウム。

宇宙原理と宇宙の膨張

- ・宇宙原理……宇宙は均一であり、特別な場所も、特別な方向もないという前提。
- ・宇宙の膨張……宇宙全体は現在も一様に膨張している。

天体の誕生

- ・恒星の誕生……物質が重力により収縮し、やがて自ら光を放つ恒星となる。
- ・最初の銀河……最初は不定形で小さかったが、衝突と合体を繰り返して大きな銀河に成長。

銀河と天の川銀河

- ・天の川銀河……約1000億個の恒星が集まった1つの巨大な天体。バルジ、円盤部、ハローから成り立っていて、円盤の直径は約10万光年もある。

銀河の集団と宇宙の大規模構造

- ・銀河群と銀河団……数十個以下の銀河がまとまった集団を銀河群、それより多いものを銀河団と呼ぶ。

2 太陽と惑星

太陽系の誕生と進化

- ・太陽系の天体……今から約46億年前、星間雲が収縮してほぼ同時にできた。
- ・太陽のエネルギー……太陽の中心部分で核融合反応が生じており、この状態の恒星を主系列星と呼ぶ。

惑星・小惑星・彗星の起源

- ・惑星の分類……原始太陽からの距離に応じて、地球型惑星と木星型惑星の2種類の惑星ができた。

太陽の進化とその最後

- ・太陽の進化……太陽は約50億年後膨張し、表面温度の低い赤色巨星に進化すると考えられている。そのあと、高密度で高温の白色矮星が中心に残る。

太陽の特徴

- ・黒点……周囲より低温のため暗く見える。多い時期と少ない時期がある。
- ・皆既日食時……光球の外側にはコロナがみられる。

太陽の活動と地球への影響

- ・太陽活動の極大期……フレアという爆発が多発し、放出されるX線がデリンジャー現象を引き起こす。強まった太陽風が地球の磁気圏を刺激し、オーロラや地球の磁場の乱れを多発させる。

地球型惑星と木星型惑星

- ・地球型惑星……小さく、表面は岩石で、さまざまな地形がある。
- ・木星型惑星……大きく、分厚い大気層をもち、環と多数の衛星がある。

太陽系の広がりや地球

- ・太陽系……太陽のまわりには惑星(全部で8個)以外にも大小さまざまな天体が公転している。太陽系は冥王星軌道のずっと先まで広がっている。
- ・地球と生命……地球が太陽からほどよい距離にあったこと、ほどよい質量をもっていたことにより生物が繁栄できたと考えられる。

1 私たちの宇宙の進化

宇宙は進化している。宇宙は超高温で超高密度の状態から急激な膨張を経て、現在の姿になった。その過程で恒星やその集団である銀河が生まれ、銀河が集まって銀河団やそれらが連なる大規模構造が形成された。また、恒星とともに惑星も生まれた。太陽系もその1つである。そして、太陽系の惑星の1つとして地球が誕生し、その上で生命が発生し、その結果、私たちが存在している。どのようにして、これらのことが分かったのだろうか。また、なぜ地球には生命が発生できたのだろうか。

1章 宇宙の構造と進化

| | |
|----------------|----|
| ビッグバンと宇宙の進化 | 4 |
| 宇宙原理と宇宙の膨張 | 6 |
| 天体の誕生 | 8 |
| 銀河と天の川銀河 | 10 |
| 銀河の集団と宇宙の大規模構造 | 12 |

2章 太陽と惑星

| | |
|----------------------|----|
| 太陽系の誕生と進化 | 14 |
| 惑星・小惑星・彗星の起源 | 16 |
| 太陽の進化とその最後 | 18 |
| Earth pedia 宇宙での物質循環 | 20 |
| 太陽の特徴 | 22 |
| 太陽の活動と地球への影響 | 24 |
| 地球型惑星と木星型惑星 | 26 |
| 太陽系の広がり | 28 |
| Earth pedia 惑星探査 | 30 |
| まとめと問題 | 32 |

探究

| | |
|----------------------|----|
| 天体の分布について調べる | 34 |
| 宇宙の大きさを調べる | 36 |
| 太陽表面を観測する | 38 |
| 簡易分光器を用いた身近なスペクトルの観察 | 40 |

1章 宇宙の構造と進化



❶ 無の状態とは、物質・空間がないだけでなく、時間さえもない状態のことである。

❷ ビッグバンがなぜ、どのようにして起きたのかは現在の科学知識の限界を超えるところがあり、いくつかの予想はあるものの、まだ科学者の間でも意見が分かれている。

❸ 物質を構成している基本的な成分を元素という。

1 ビッグバンと宇宙の進化

A ビッグバンと宇宙の誕生

ビッグバン big bang

今から140億年ほど昔、宇宙は、無の状態から密度も温度も無限に高い点として突然発生したと考えられている。宇宙がこのような状況で誕生したことをビッグバンと呼ぶ。宇宙がどのように変わってきたのか、現在知られている法則を用いて、ビッグバン直後から現在までその大筋はわかりやすくなってきた。ビッグバンから現在までの変化を宇宙の進化と呼ぶ。これがどのようなものであったのかを、ビッグバン直後から順に見てみることにしよう。

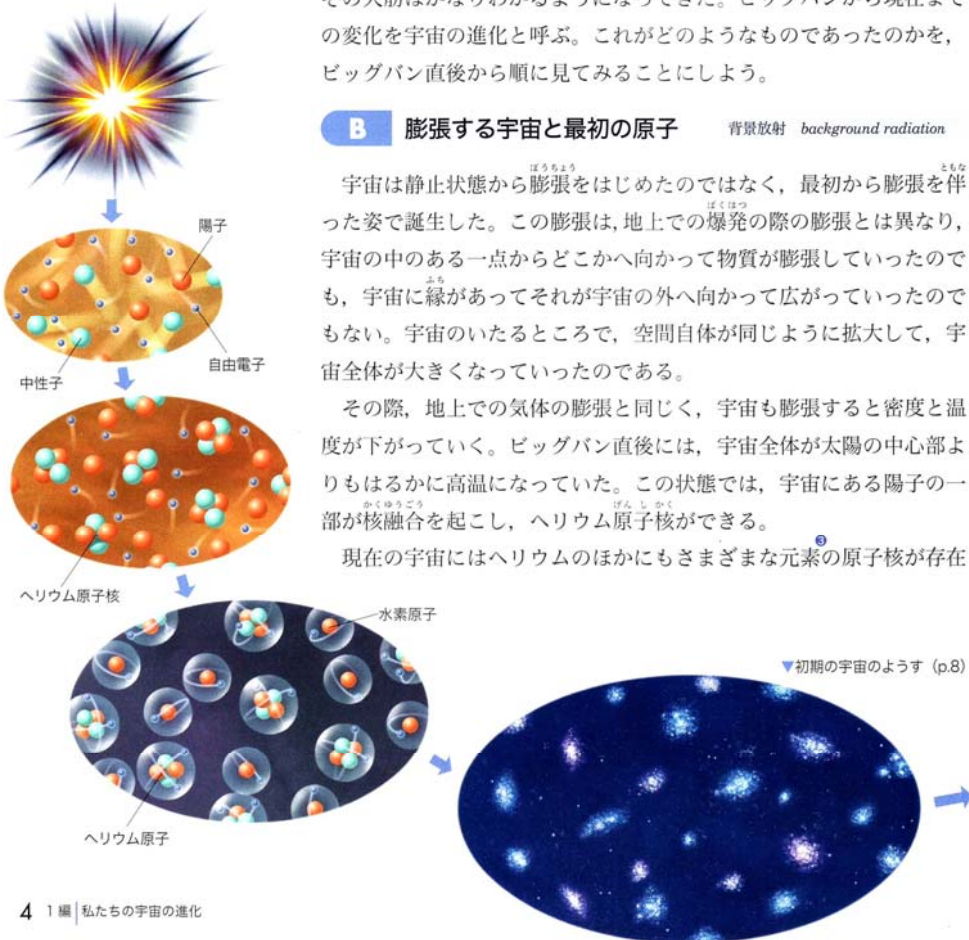
B 膨張する宇宙と最初の原子

背景放射 background radiation

宇宙は静止状態から膨張をはじめたのではなく、最初から膨張を伴った姿で誕生した。この膨張は、地上での爆発の際の膨張とは異なり、宇宙の中のある一点からどこかへ向かって物質が膨張していったのではなく、宇宙に縁があってそれが宇宙の外へ向かって広がっていったのではない。宇宙のいたるところで、空間自体が同じように拡大して、宇宙全体が大きくなっていったのである。

その際、地上での気体の膨張と同じく、宇宙も膨張すると密度と温度が下がっていく。ビッグバン直後には、宇宙全体が太陽の中心部よりもはるかに高温になっていた。この状態では、宇宙にある陽子の一部が核融合を起こし、ヘリウム原子核ができる。

現在の宇宙にはヘリウムのほかにさまざまな元素の原子核が存在

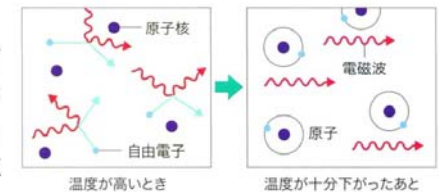


▼初期の宇宙のようす (p.8)

するが、それらはこの段階ではできない。宇宙の膨張が急激なため、より重い元素の原子核ができる前に、密度が下がり、核融合が起らなくなってしまうためである。

ビッグバンから40万年ほど経つと、陽子と電子、ヘリウム原子核と電子から、それぞれ水素原子やヘリウム原子ができた。最初の原子ができると宇宙全体は急に透明になった。これを宇宙の晴れ上がりと呼ぶ。宇宙の晴れ上がり以降、宇宙は水素とヘリウムのガスで一様に満たされた状況になった。この時代の宇宙には星は1個もなかった。

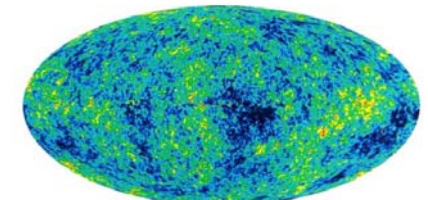
原子内にとどまっていなかった電子を自由電子と呼ぶ。自由電子は、あらゆる波長の電磁波を容易に吸収・散乱し、自分の温度に応じた特徴をもつ電磁波を放射する。このため、宇宙が自由電子で満たされていると、電磁波は容易に吸収・放射されるため、長い距離を伝播することができない。つまり、宇宙は不透明となる。温度が十分に下がると自由電子は原子核に捕まり原子を構成する。この状態になると、電磁波は電子の影響をあまり受けなくなり、長い距離を伝播できるようになる。つまり、宇宙は透明になるわけである。



▲図2 宇宙の晴れ上りの概念図

宇宙の背景放射

宇宙の晴れ上がり以降は、すべての電磁波(p.9)を容易に放射・吸収する電子がなくなるので、晴れ上がりのときに放たれた電磁波は、現在の地球まで伝わることができ、電波として観測される。こうして観測される電磁波は宇宙背景放射と呼ばれ、宇宙の晴れ上がり時点での宇宙のようすを知る大きな手がかりを与えてくれる。



▲図 全天にわたる宇宙背景放射の分布
電波強度に応じて、赤黄緑青の色をつけて描いている。

▼現在の宇宙のようす (p.10)



◀図1 宇宙の進化



▲図3 宇宙の広がりとはレーズンパン
宇宙全体を巨大なレーズンパン、銀河をその中に点在するレーズンと考え、自分がその1つの上にいると考え、このパンはとも巨大で私たちはその縁を知ることができない。これをオープンで焼いて、全体が一様に膨らむと、パンの中にあるレーズンどうしは生地が膨らむにつれて、遠ざかっていく。

2 宇宙原理と宇宙の膨張

A 宇宙の一様性と宇宙原理

宇宙原理 cosmological principle

広大な宇宙に比べて、人間が直接訪れることができる範囲は極めて狭い。宇宙のようすやしくみを知るには、自然界の基本となるさまざまな法則に基づいて、望遠鏡による観測結果を解釈する必要がある。このとき十分に広い範囲を平均すれば、宇宙は一様で等方であることを前提としている。この前提を宇宙原理と呼ぶ。宇宙原理が正しいという確実な保証はないが、そう考えるのが最も単純であり、この考えと著しく矛盾する観測結果はまだ得られていない。

宇宙原理に基づけば、宇宙には特別な場所はなく、どこから観測してもおおむね地球から観測したのと同じ結果が得られるはずである。したがって、地球からはるかかなたにある銀河に住む宇宙人が観測した現在の宇宙のようすは、私たちが知っている現在の宇宙のようすと基本的には大差がないとするのが標準的な予想である。

B 過去の宇宙を調べる

宇宙の歴史 cosmic history

遠くの天体が放った光は地球に届くまでにその距離に応じた時間がかかっている。例えば、現在観測される1億光年かなたの銀河の姿は今から1億年前のようすである。したがって、宇宙原理が正しければ、遠くの天体を調べることで昔の宇宙のようすを直接知ることが可能になる。

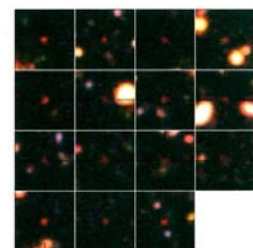
しかし、同じ明るさで同じ大きさの天体であっても、遠くにあれば暗く小さくしか見えないので、観測はそれだけ困難になる(図4)。宇宙で最初にできた星や銀河は遠くて暗過ぎるため、現在の技術では直接観測することができない。現在建設計画が進んでいる、より高性能な望遠鏡を使えば、私たちが予想している宇宙の歴史が正しいかどうか判定することができるかもしれない(図5)。

予想を立てることは非常に重要であるが、それが本当かどうかは常に観測によって確かめる必要がある。新しい観測の結果によっては、現在の考え方では不都合な天体や現象が発見されるかもしれない。その場合には、これまでの理解を根本にまでさかのぼって考え直す必要も出てくるだろう。実際、これまでも、新たな観測と説明の改良によって、宇宙についての理解が進んできた。私たちが解き明かすべき宇宙のなぞはまだたくさんあるのだ。

宇宙で距離を測る単位

宇宙では、私たちが普段よく使うkmやmを用いず、それよりも大きい単位である「天文単位」や「光年」などの単位を用いる。

- 天文単位[AU]
地球と太陽の平均距離に相当する。
1AU=約1億4960万km
- 光年
光が1年で進む距離で定義される。
1光年=約9兆4600億km



▲図4 すばる望遠鏡が撮影した極めて遠方にある15個の銀河の赤外線画像
宇宙膨張の影響で、これらの銀河の光は、ほとんどは赤外線として観測される。各画像の中央で赤く写っている天体は、ビッグバンから8億年後のある銀河の姿である。



COLUMN

宇宙膨張の証拠

私たちは現在の宇宙しか観測できないのに、宇宙が膨張していることを、どうして知ることができたのだろうか。

天体望遠鏡で遠くの銀河を観測すると、遠い銀河ほど速い速度で遠ざかっていることがわかる。さまざまな銀河が現在の距離まで遠ざかるのに要した時間を求めてみると、すべての銀河でほぼ一定の値になる。この値は方向に無関係なので、宇宙空間そのものが膨張している結果、そこに点在している銀河の間の距離が伸び、遠ざかる速度として観測されると考えられる。これが宇宙膨張という考え方である(図3)。

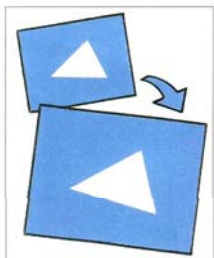
現在の位置まで達するのに要した時間が等しいということは、時間をさかのぼれば全銀河が1点に集中していたことになる。では、その1点はどこなのだろうか？

宇宙全体は一様に膨張しているので、宇宙のどの部分も同じ割合で膨張している。これは、宇宙のどこから観測しても銀河の遠ざかり方が同じように見えるということを示す。つまり、宇宙には中心のような特別な地点がないことを意味するのである。



コピー機で宇宙膨張を観察しよう

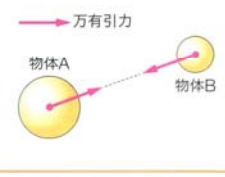
三角形を書いた紙をコピー機で拡大すると、各辺の拡大率は、どうなるだろうか。



▲図5 すばる望遠鏡(左)とアルマ望遠鏡(右)
すばる望遠鏡はハワイ島にあり、可視光と赤外線を中心にさまざまな天体を観測している。アルマ望遠鏡は南米のアンデス山中に建設され(2011年運用開始)、電波によって宇宙を観測する。また、このほかにも小さいながらもユニークな性能で新しい観測結果を得ている望遠鏡も多数ある。

アイテム 重力(万有引力)

すべての物体は周囲の物体に引力を及ぼす。これを重力または万有引力と呼ぶ。重力は重い物体ほど強く引きつけ合い、距離が近いほど強くなる。ただし、地球上の現象を扱う場合(p.80)には、地球が示す万有引力に地球の自転による遠心力を加えた力を重力と呼ぶ。



▲図6 オリオン星雲
輝線星雲の1つで、明るく強力な紫外線を発する星によって周囲のガスが刺激され特定の波長の光だけで輝いている。

3 天体の誕生

A 恒星の誕生

星形成 star formation

宇宙の晴れ上がりの後、宇宙がさらに膨張し密度も温度もさらに下がっていくと、さまざまな原因によりガスの分布に濃淡ができる。ガスが周囲より濃い部分は自らの重力によって互いに引きつけ合う力をはたらく。

物質の濃淡の違いが著しくなり、重力の影響が宇宙全体の膨張による影響よりも強くなると、物質の濃い部分はますます濃くなる。すると、重力によってガスが集中し、ガスの雲は自分自身の重力によってさらに収縮することになる。

この収縮が加速度的に進むと、収縮したガスの温度が上昇する。高温のため原子核と電子に分かれてしまい、約1000万℃に達すると水素が核融合反応を始め、自分自身で光を放つ天体となる。これが恒星の誕生である。恒星の誕生は現在の宇宙でも頻繁に起こっている。

B ガスと星雲

星雲 nebula

ガスの雲から恒星ができる際には、もともとあったガスの雲がまるごとすべて恒星になるわけではない。残ったガスはそのまま宇宙空間に漂っているだけではなく、できた恒星からの影響を受ける。特に、明るくて紫外線を強く出す恒星は、周囲のガスを刺激し発光させる(図6)。

恒星は永久に輝き続けるわけではなく、最後には爆発したり、周囲の宇宙空間にガスを放出したりする。放出されたガスには、恒星内部での核融合反応の結果生じた元素からなる塵も混ざっている。

このようなガスや塵が宇宙空間には広がっている。これらは、非常に希薄だが、宇宙空間は広大なので、その量は無視できないほど多い。その中で、ある程度物質が集まったところは星雲として可視光で容易に観測できる場合も多いが、それ以外の場所にもガスや塵が存在することが、電波や赤外線での観測でわかっている。

C 最初の星と最初の銀河

暗黒物質 dark matter

最初の恒星ができ、それらが多数集まると銀河ができる。ビッグバンから数億年ほどでこれらの天体が形成されたと推定されている。

COLUMN

最初にできた銀河

宇宙には、恒星やガスや塵のほかに、質量はもつが電波や光はもとより、どんな波長の電磁波でも、直接は観測できない物質が存在すると考えられている。これを暗黒物質(ダークマター)と呼ぶ。暗黒物質の濃淡のむらも重力を生じ、ガスの分布に影響する。ただし、その広がりは銀河よりずっと大きいため、銀河は集団をなして形成されると考えられている。

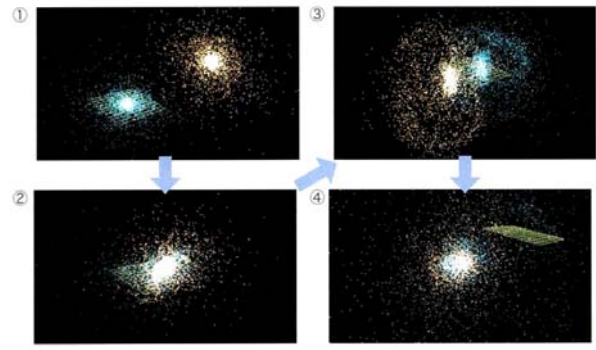
最初にできた銀河は、不定形で小さなものが多かったらしい。2つの銀河が接近すると、それぞれの銀河内の星の運動は相手の銀河の重力によって大きく乱され、もとの形から大きく変形する(図A)。接近の状況によっては2つの銀河が合体することもある。

る(図B)。こうした過程で多数の銀河が合体し、しだいに大きな銀河ができる。合体による銀河の成長は現在も起こっており、多くの銀河で、そこに飲み込まれつつある小さな銀河やその痕跡が見つかっている。

宇宙は、ビッグバンから現在見られるような姿に変わってきたと考えられているが、まだよくわかっていないことも多く、その解明のため現在も研究が続けられている。



▲図A 触角銀河
2つの銀河が接近して著しく変形してしまったもの。昆虫の触角のような特徴的な構造が見られる。



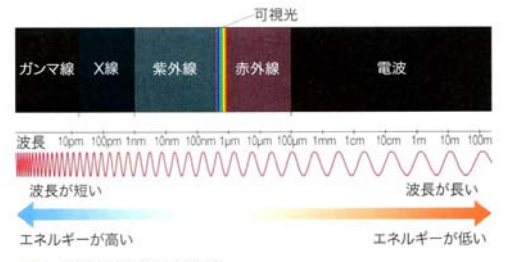
▲図B 2つの銀河が接近して合体するようす

コンピュータを用いて予想計算したもの。図中の格子は、①の左側の銀河のもとの位置と向きを示している。

- ①接近する2つの銀河。識別のため、属する星を色分けしている。
- ②恒星はその大きさの10万倍以上も離れているので個々には衝突しない。
- ③しかし、互いに及ぼす重力の違いにより軌道が乱され変形する。
- ④最後には合体して大きな銀河になる場合も多い。

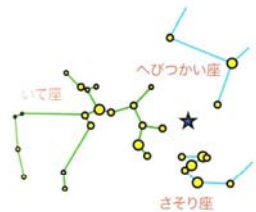
アイテム 電磁波の種類

電波・赤外線・可視光・紫外線・X線・ガンマ線はすべて電磁波という同種の波であるが、波長が大きく異なると物質に対する影響のしかたが大きく変わり、別の性質をもつ波のように見える。このうち、可視光とは人間の目に見える光をいうが、その波長範囲はかなり限られている。



▲図 電磁波の波長と呼び名

① 銀河系というのは銀河のうち、特定の1個の名称である。不自然な名称だが、この銀河が宇宙に存在する唯一の銀河であって、銀河という言葉が天の川自体を指すだけだった時代の名残である。

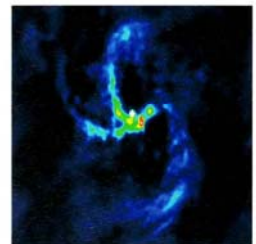


▲図7 いて座
天の川銀河の中心は、図の星印の位置でいて座の方向にあたる。

② 近年でも1000光年程度の見積り誤差がある。

▶図8 天の川銀河の構造
多数の恒星が円盤状に集まった部分を円盤部と呼ぶ。太陽系もここに位置する。中心には厚さが顕著に膨らんだ部分があり、ここをバルジと呼ぶ。また、円盤部やバルジを取り巻く空間にも、この銀河に属する天体が点在する。この部分をハローと呼ぶ。

探究 1 1 → p.34
天体の分布について調べる



▲図10 電波で観測された天の川銀河の中心部にあるガスの渦
いて座A西と呼ばれる。色の違いは電波強度の違いを表し、青緑黄赤白の順に強くなる。ブラックホールは3本の腕の交点から少しだけ外れた方向に見え、この画像では白い点として写っている。

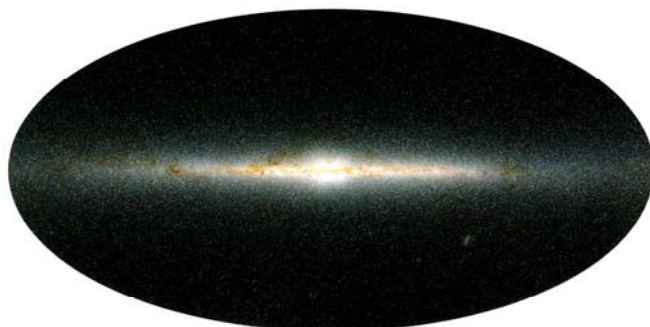
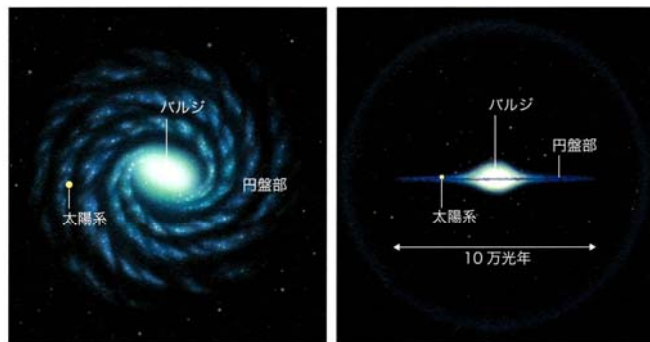
4 銀河と天の川銀河

A 天の川銀河

天の川銀河 Milky Way Galaxy

太陽系は、地球上から天の川として見える銀河に属しており、この銀河を天の川銀河あるいは銀河系と呼ぶ。天の川銀河は標準的な規模の銀河で、1000億個程度の恒星が、直径10万光年、厚さ数千光年の円盤状に集まっている(図8)。太陽系はこの円盤の中で中心から2万8000光年ほど離れている場所にある。

宇宙空間に広がっている塵が背後の星を隠してしまうため、天の川に沿った方向は、可視光では太陽系から1万光年程度までしか観測することができない。実際、地球の夜空で目立って見える恒星は、ほとんどが太陽系からの距離が1000光年の範囲内にある。したがって、天の川銀河の全体を調べるには、塵による影響が可視光よりもずっと少ない、赤外線や電波による観測が必要である(図9、図10)。



▲図9 赤外線で見えた全天のようす
世界地図と同様の図法で空全体の球面を楕円の図として示した。赤道に相当するところを天の川に一致させている。図の中心はいて座の方向。

B 銀河の中心とブラックホール

ブラックホール black hole

銀河の中心は、他の部分とはかなり異なる。最も詳しく調べられている天の川銀河の中心は、地球から見ていて座の方向にある(図7)。可視光ではまったく観測できないが、電波・赤外線・X線などで観測すると、そこには太陽の400万倍程度の質量をもつブラックホールがあると推定されている(図10)。

ブラックホールとは大量の物質が狭い範囲に密集した結果、その周囲で重力が極めて強くなり、その内部からはどんな物体も、どんな電磁波も放出されない天体のことである。多くの銀河の中心で発見されていて、その質量はどれも太陽の数百万倍以上と推定されている。

銀河には、中心部が極めて強く輝いているものがあり、そこから高速のガスが噴き出している(図11)。これは、巨大なブラックホールに周囲から大量のガスが流れ込んだ結果、生じたと考えられている。

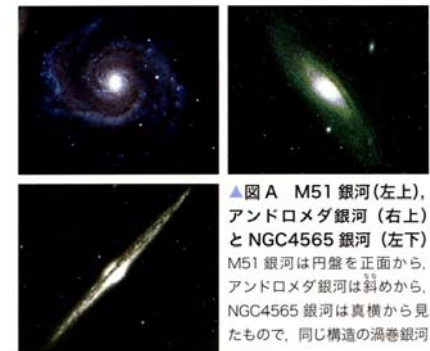


▲図11 巨大楕円銀河M87の中心核から噴き出すガス

COLUMN さまざまな銀河

現在の宇宙にはさまざまな銀河がある。どの銀河も多数の恒星の集団である。地球からは、1つの銀河を1つの方向からしか観測できないが、多数の銀河の調査から、立体的な構造が推定でき、その共通性をもとにいくつかの種類に分けられる。

全体が円盤状に見える銀河を渦巻銀河と呼ぶ。程度の違いはあるが、星分布の粗密が描く渦巻模様が見られる。これを渦状腕と呼ぶ。



▲図A M51銀河(左上)、アンドロメダ銀河(右上)とNGC4565銀河(左下) M51銀河は円盤を正面から、アンドロメダ銀河は斜めから、NGC4565銀河は真横から見たもので、同じ構造の渦巻銀河である。

全体として楕円形に見える銀河を楕円銀河と呼ぶ。ほぼ円形に見えるものもあるが、一般にはどの方向から見ても楕円形に見える立体形状をしていると考えられている。



▲図B M59銀河
楕円銀河には際立った模様がなくガスも塵もとぼしい。

渦巻銀河とも楕円銀河とも異なる特徴の銀河をまとめて不規則銀河と呼ぶが、統一的な性質を示すわけではない。星がまばらにしか存在しないため不規則な形に見える銀河、2つの銀河が接近して互いの重力で変形した銀河、特定の部分で明るい星が大量にできたために不規則な形に見える銀河などが含まれている。

銀河の規模は大小さまざまである。天の川銀河の数分の1から数倍程度の規模のものが典型的だが、その10倍以上の規模の楕円銀河や10分の1以下の規模の銀河もある。

発展

1編

5 銀河の集団と宇宙の大規模構造

A 銀河群と銀河団

銀河団 cluster of galaxies

銀河は宇宙に一律に分布しているわけではなく、密集したところと、まばらなところがある。多数の銀河がまとまっている集団を銀河群や銀河団といい、おおむね数十個より少ないものを銀河群、多いものを銀河団と呼ぶ。

① 天の川銀河から最も近い渦巻銀河である。

天の川銀河とアンドロメダ銀河は、周囲のより小さな銀河とともに銀河群を形成している。この銀河群を局部銀河群と呼ぶ。アンドロメダ銀河は局部銀河群のなかでは天の川銀河と並ぶ標準的な大きさの銀河で、太陽系からの距離は230万光年である。天の川銀河の直径10万光年程度と比べると、銀河どうしの間隔はかなり近いといえる。実際にアンドロメダ銀河を観察してみよう(観察実験①)。

天の川銀河に最も近い大規模な銀河団はおとめ座銀河団(図12)で、距離は5900万光年である。太陽系からはおとめ座の方向に見え、その中心には巨大楕円銀河M87がある。

探究 2 宇宙の大きさを調べ

図12 おとめ座銀河団

図の左側で際だって大きく見えるのが巨大楕円銀河であるM87で、より広い範囲を見渡すとこの銀河が銀河団のほぼ中心に位置することがわかる。

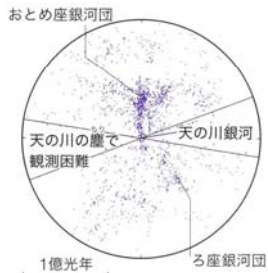


図13 局部超銀河団の構造

点1つが銀河1個を示す。中心は天の川銀河。グレーで塗られた所は、天の川の塵に妨げられるため観測が困難な領域を示している。

B 超銀河団と宇宙の大規模構造

大規模構造 large scale structure

個々の銀河団の境界はそれほど明確ではなく、その間も周囲に比べて銀河の密度が高い領域で結ばれていることが多い。このような複数の銀河団がつながってできている、より大きな構造を超銀河団と呼ぶ。天の川銀河は、おとめ座銀河団を中心とする超銀河団に属しており、この超銀河団を局部超銀河団と呼ぶ(図13)。

超銀河団は、ほかにも多数発見されていて、より広い範囲を見渡してみると超銀河団どうしも相互につながっている。銀河の濃淡によってこれを図示すると立体的な網目状の構造をつくっていて、その網目の間隔は、数億〜十数億光年もある。これは現在知られている限り、宇宙で最も大きな構造で、宇宙の大規模構造と呼ぶ。



観察実験 1

アンドロメダ銀河の観察

宇宙を構成している基本単位ともいえる「銀河」を観察してまとめてみよう。

手順▶ 天体望遠鏡で、アンドロメダ銀河(M31)を観察する。空の暗い条件のよい場所なら肉眼でもその姿を確認することができる。届いた光は230万年も前にM31を出発した光である。

考察▶ 自分の目で観察したようすと、右の図や天体写真集やインターネット上の画像と比べてみよう。



▲図 アンドロメダ銀河



COLUMN

銀河団と暗黒物質

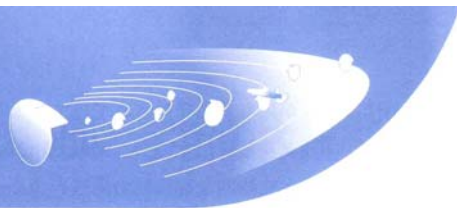
銀河団に属する個々の銀河はさまざまな方向に1000km/sほどの速度で運動している。それぞれの銀河に属している恒星の総質量による重力では、この速度で飛び交う銀河を捕まえておくことができない。銀河団には可視光で見える星の総量よりもずっと多くの物質が集まっているのである。

その1つが超高温ガスである。銀河団をX線で観測すると、極めて希薄ながら数千万〜数億℃に達する超高温ガスが充満していることがわかる(図)。このガスの総質量は銀河団内の銀河の総質量を上回るが、このガスが銀河団から逃げ出さないだけの重力を生じるには、ガス自身も含めて銀河団内で見つかった物質の総質量では不足することがわかっている。

このため、銀河団には電磁波では直接観測できない未知の物質があり、その質量による重力が銀河や超高温ガスを銀河団内にとどめていると考えられている。この未知の物質は、銀河のハロー(p.10 図8)に存在すると考えられている暗黒物質と同じものだと予想されていて、黒いというよりは“完璧に透明な物質”である。さまざまな仮説はあるものの、その正体はまったくわかっていない。



▲図 かみのけ座銀河団の可視光(上)とX線(下)画像 X線で光っているガスは個々の銀河に属しているのではなく、銀河団全体に広がっていることがわかる。



1 太陽系の誕生と進化

A 太陽系の誕生

太陽系 solar system

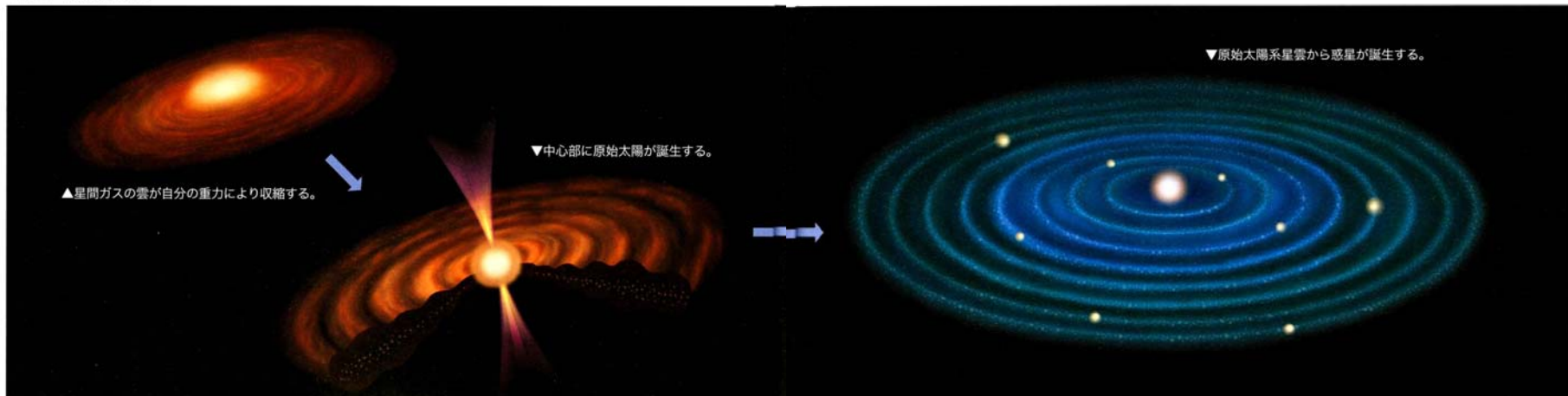
生命が息づいている青い地球。この地球は、恒星の1つである太陽のまわりを回っている惑星の1つである。太陽のまわりには、惑星をはじめとして、衛星、小惑星、彗星、惑星間塵など大小さまざまな天体が公転している。これらの天体の集団が太陽系なのである。この多様性に富んだ世界は、どのようにして形成されたのだろうか。

1章で学んだように、140億年ほど前に宇宙がビッグバンで始まって以来、宇宙は膨張し続け、銀河が誕生し、銀河の中では星が生まれては死んでいくということが繰り返された。後で学ぶように、星が進化していく過程では、水素やヘリウムのような軽い元素から、より重い元素が作られる。そして、最後にはそれらの物質は宇宙空間にまき散らされる。こうして、宇宙空間には、いろいろな元素を含んだ星間雲ができていったのである。

今から約46億年前、天の川銀河の片隅にあった星間ガスの雲が自分の重力によって収縮し、中心部に原始太陽が誕生した。星間ガスの雲が収縮するにつれて、原始太陽の温度は上昇していった。中心の温度が約1000万°Cに達すると、核融合反応が始まった。

この時点が、恒星としての太陽の誕生なのである。核融合反応によ

▼図1 太陽系の誕生



る熱で、膨張する力と、重力によって縮もうとする力が釣り合った状態になった星を、主系列星と呼ぶ。太陽も現在は主系列星である。

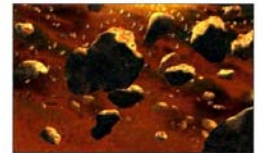
一方、中心の太陽に取り込まれなかった星間ガスの雲は、そのまわりを回りながら円盤状に集積していった。これを原始太陽系星雲と呼ぶ。原始太陽系星雲の内部では、小さな塵のような固体が集積し、惑星のもとになる微惑星が形成された(図2)。微惑星は、衝突合体を繰り返しながら大きな惑星へと成長していき、原始惑星となった。これが太陽系の誕生である。

B 太陽系の進化

進化 evolution

誕生したばかりの太陽系には、ガスや多くの微惑星が残っていた。これらのガスや微惑星は、惑星に取り込まれたり、太陽系の外に放出されたりして、太陽系空間から急速に減っていった。実際、原始の地球にも多数の微惑星が衝突してきた。衝突で生じた熱のため原始地球はその全体がとけて、鉄などの重い成分は中心に沈んで核をつくり、そのまわりを岩石が覆うような層構造を形成した。また、気体となる成分は内部から抜け出て大気を形成した。ほかの惑星においても、誕生の初期段階で成分に違いはあるものの、それぞれに層構造が形成された。そして、太陽に近いところには地球型惑星、遠いところには木星型惑星が存在している現在の太陽系となった。

その後、太陽系の構造はほとんど変化することなく、現在にいたっている。ただし、小さな天体の衝突は継続的に起こっており、クレーターを形成するなど天体の表面に変化をもたらしている(図3)。また、惑星や一部の衛星などでは、地殻変動、火山、風・雨による侵食・風化作用などによって、その表面が変化し続けている。



▲図2 微惑星(想像図)
微惑星は、塵が集まって1~10km程度の大きさの天体になったものと考えられている。



▲図3 アリゾナのバリンジャー隕石孔
約5万年前に小天体の衝突によって形成された。(直径約1.2km)

2 惑星・小惑星・彗星の起源

A 地球型惑星と木星型惑星の起源

惑星 planet

惑星が形成される時に、原始太陽からの距離が近いかに遠いかによって、まったく性質が異なる2種類の惑星ができた(表1)。それが、地球型惑星と木星型惑星である。地球型惑星は水星・金星・地球・火星であり、大きさは小さいが、表面は固体の状態になっている。これに対して、木星・土星・天王星・海王星は、地球型惑星に比べると非常に大きく、はっきりした固体の表面はない(図4)。これらは、木星型惑星と呼ばれているが、さらに、木星と土星を**巨大ガス惑星**と呼び、天王星と海王星を**巨大氷惑星**と呼んで区別することもある(p.26～p.27)。これは、木星と土星が原始太陽系星雲の成分に近いガスを多量にもっているのに対して、天王星と海王星は水の氷の厚い層があるためである。なお、惑星の内部は、物質の種類ごとに分かれた層構造をしていると推定されているが、これは惑星がとけたことにより、物質の分化が起こったものと考えられている。

惑星にこのような違いができたのは、太陽からの距離が異なることや、惑星が形成されたときに集まった物質の量や性質が異なっていたためである。原始太陽に近いところでは、その熱によって水のような物質は昇華して気体になってしまい、岩石のような固体の成分のみが惑星をつくる材料となった。ところが、木星くらいから遠方になると、水が氷として存在したため、岩石成分に加えて氷も惑星をつくる材料となった。このように、原始太陽から遠い木星型惑星の領域のほうが、惑星をつくる材料が豊富にあったため、より大きな原始惑星の核が形成された。さらに、原始太陽の近くにあった地球型惑星では、ガスは惑星にはあまり集積しなかったが、遠方にあった木星や土星では、ガスが多量に取り込まれて巨大な惑星となった。このようにして、地球型惑星と木星型惑星の違いが生じた。なお、天王星や海王星が誕生したときには、すでに原始太陽系星雲が消失していたため、これらの惑

星には木星や土星ほど大量のガスはないのである。

▼表1 地球型惑星と木星型惑星の特徴

| | 地球型惑星 (水・金・地・火) | 木星型惑星 | |
|------------|---|---------------------------|----------------|
| | | 巨大ガス惑星 (木・土) | 巨大氷惑星 (天・海) |
| 半径 | 2～6千km | 6～7万km | 約2万5千km |
| 質量(地球質量=1) | $\frac{1}{20}$ ～1 | 95～318 | 15～17 |
| 密度 | 大きい(約5g/cm ³) | 小さい(約1g/cm ³) | |
| 自転周期 | 長い(1～240日) | 短い(10～17時間) | |
| 衛星 | 少ない(0～2個) | 多い(10個以上) | |
| 環 | 無し | 有り | |
| 大気組成 | 水星：無し 金星：二酸化炭素、窒素 地球：窒素、酸素 火星：二酸化炭素、窒素 | 水素、ヘリウム | |

B 小惑星と彗星の起源

小惑星 asteroid

地球型惑星と木星型惑星の境目、つまり火星の軌道と木星の軌道の間では、何が起こったのだろうか。この領域では、水などの成分が蒸発していたため、惑星をつくる材料が少なかった。さらに、すぐ外側に大きな惑星である木星が先にできてしまったため、その重力の影響を受けて微惑星の運動が大きく乱され、1つの天体に集積できなかった。現在の太陽系では、火星軌道と木星軌道の間には**小惑星**と呼ばれる多数の小さな天体が存在しているが、これらは大きな惑星に成長できなかった天体の名残だと考えられている(図5)。

また、惑星の重力によって太陽系の外縁へと放り出された微惑星が、太陽付近に接近して、**彗星**となるのではないかと考えられている。彗星には揮発性の成分がたくさん存在しているので、太陽のそばにくるとそれらが蒸発してガス状のコマが形成され、さらに太陽からの放射によって吹き流されて尾となる(図6)。小惑星や彗星は、誕生当時の状態を保ったままあまり変化をしていないため、太陽系形成時の情報を秘めた天体である。



▲図5 小惑星イダ



▲図6 ハール・ボップ彗星
彗星は、一般に中心部に輝く核と、そのまわりの明るい部分のコマ、長く伸びる尾から構成される。

アイテム さらに小さい天体

夜空を眺めていると、時々、星が流れていくように見える現象が見られる。流星(流れ星)である。流星は、本当に星が流れているわけではなく、地球大気に飛び込んできた小さな塵(惑星間塵)が、大気に高速で衝突し、高度80～120kmで塵と大気が発光する現象である(p.117)。この塵は、おもに彗星から放出されたものである。

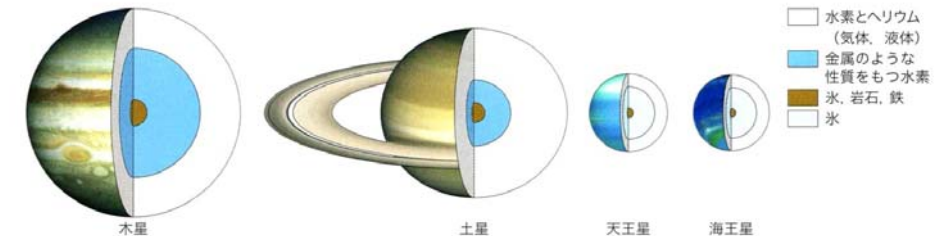
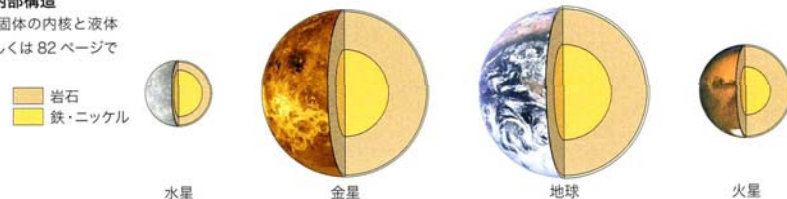
▲図 しし座流星群

衛星の起源

惑星には、そのまわりを回る衛星をもったものが多いが、衛星の起源としては小天体が惑星の引力によってとらえられたものが多いと考えられている。ただし、月の起源としては、いろいろな説があるが、地球が生まれたときに大きな天体が衝突し、その天体と地球から放出された物質から月が形成されたという「巨大衝突説」が有力になってきている。

▶図4 惑星の内部構造

地球については、固体の内核と液体の外核がある。詳しくは82ページで学習する。



3 太陽の進化とその最後

A 太陽の進化とその最後

赤色巨星 red giant

① 太陽から地球に降り注ぐエネルギーは、1cm²あたり1分間に約2カロリー（8ジュール）である。これは、1分間に1gの水の温度を2℃ほど上げるエネルギーである。（詳しくは118ページで学ぶ）

▼表2 太陽の諸量

| | 太陽 | 地球の |
|------|------------------------|---------------|
| 半径 | 約70万km | 109倍 |
| 質量 | 2.0×10 ³³ g | 33万倍 |
| 密度 | 1.4g/cm ³ | $\frac{1}{4}$ |
| 自転周期 | 25～30日* | |

*緯度によって異なる。

太陽系の中心にできた太陽は、安定してエネルギーを生み出し続けている。地球は、太陽から膨大な量のエネルギーを受けとっているが、地球が受けとるエネルギーの量は、太陽が宇宙空間に放出している全エネルギーの20億分の1に過ぎない。太陽は、私たちが想像できないくらい多量のエネルギーを発しているが、このエネルギーは、どこから生まれているのだろうか。

太陽は、木星の1000倍、地球の33万倍もの質量をもっている。その4分の3は水素であり、太陽は、その水素の核融合反応でエネルギーを生成しているのである。水素の核融合反応とは、簡単にいえば4つの水素の原子核から1つのヘリウムの原子核をつくる反応である。このときに莫大なエネルギーが生まれる。核融合反応では、わずかな量で莫大なエネルギーを生み出すことができるが、無限にエネルギーが出続けるわけではない。太陽は、今後どうなっていくのであろうか。

太陽が主系列星である間は、核融合反応は太陽の中心部で起こっている。ところが、核融合で生じたヘリウムが中心部に溜まると、核融合が起こる場所はその周囲に移動する。その結果、星の構造が大きく変わり、現在の100倍以上の半径に膨張し、表面温度が今より低い赤い星になる。このような恒星を赤色巨星と呼ぶ(図7)。赤色巨星は主系列星が極端に膨張してできた星なので、その平均密度は非常に低い。太陽の平均密度が地上での水と同じ程度であるのに対して、赤色巨星は地表での大気の1万分の1程度の希薄さである。

主系列星
太陽は、今後、約50億年間は現在と同じように光り輝く。

赤色巨星
半径が現在の100倍以上にもなる赤色巨星となり、その表面からガスが宇宙空間に流れ出す。

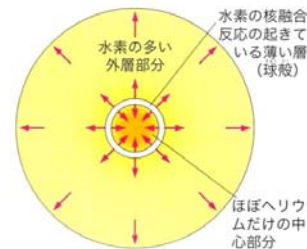
中心部に水素がなくなると、太陽は膨張を始める。

太陽の場合、今から50億年程度で主系列星から赤色巨星に変わると考えられている。赤色巨星になってしまうと、その後が続く核融合反応の期間は短いので、主系列星である期間を恒星の寿命と呼ぶことが多い。太陽の場合、主系列星でいる期間は100億年程度であり、これが太陽の寿命である。また、太陽では、水素の核融合反応でできたヘリウムがさらに核融合反応を起こして、炭素と酸素までがつくられる。

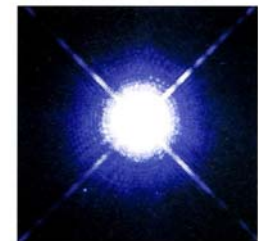
赤色巨星になると、その表面から大量の物質が宇宙空間に流れ出す。これを恒星の質量放出という。質量放出が続くと、恒星の中心には水素をほとんど含まない部分だけが残り、脈動変光星の段階を経て、小さくて密度の高い高温の星が生じる。このような星を白色矮星という(図8)。白色矮星となった直後には、周囲には流れ出した物質が残っている。白色矮星からの紫外線で、これが刺激されて輝くと惑星状星雲と呼ばれるものになる(図9)。太陽の最後も、白色矮星と惑星状星雲になると考えられている。

白色矮星はエネルギー源がないため、しだいに冷えて暗くなる。また、惑星状星雲のガスは星の重力を振り切って膨張し続けているので、やがて星の周囲から逃げ去ってしまう。このため、惑星状星雲は数万年ほどたつとなくなってしまい、白色矮星だけが残される。白色矮星が完全に暗くなるまでには何百億年もかかると予想されている。太陽がこのような大変化をとげると、太陽系のようなすは大きく変わってしまうことになるが、それは今から50億年後のことである。

宇宙空間に逃げ去ったガスからは、いずれ新しい恒星や惑星系が誕生することになる。



▲図7 赤色巨星への進化



▲図8 シリウスとその伴星
左下の小さな点が白色矮星であるシリウスの伴星である。



▲図9 環状星雲
惑星状星雲の典型的な例。中心には白色矮星がある。

白色矮星
中心には白色矮星が残る。やがて白色矮星の温度が低くなり、暗くなっていく。

◀図10 太陽の進化のようす

宇宙での物質循環

恒星の間に広がっているガスや塵をまとめて星間物質という。星間物質は、恒星とは見かけの姿が全く異なるが、何億年以上にもわたる長い時間で考えると、同じ物質が姿を変えたものなのである。

星間物質

惑星状星雲も超新星残骸も長い時間の後には冷えて薄くなり、周囲の星間物質と区別が付かなくなる。こうしてもどってきた星間物質は、恒星にならなかったガスと混ざって次第に均質になる。この星間物質が次の世代の星をつくる材料になる。

恒星が進化する過程で、段階的にさまざまな核融合反応が起こる。水素やヘリウムのような軽い元素のほかに炭素・窒素・酸素・ケイ素・鉄などの重い元素がつくられる。新たにできる元素の量は、星全体の質量に比べればわずかな割合なので、惑星状星雲や超新星残骸として周囲に放出された物質の大半は水素やヘリウムである。しかし、それ以外の物質も、恒星の進化が繰り返されることにより、しだいに増えていくことになる。こうして、宇宙にはさまざまな元素でできた物質が見られるようになる。

原始星

星間物質に密度が高い部分ができる、自分自身の重力によって収縮する。こうして最初にできた天体を、原始星と呼ぶ。

質量が太陽と同程度の恒星の場合

主系列星

原始星の中心温度が十分に高くなると水素がヘリウムになる核融合反応が始まり、明るく輝く恒星となる。これが主系列星である。現在、太陽は主系列星である。

赤色巨星

中心で核融合をする物質がなくなると、核融合が起こる部分がその周囲に移動する。すると恒星の内部構造に変化が生じ、半径が100倍以上も巨大化する。これを赤色巨星という。主系列星から赤色巨星に変わる時期は恒星の質量によって大きく異なるが、太陽と同じ質量の恒星の場合だと、誕生してから100億年ほどである。

質量が太陽よりずっと重い恒星の場合

惑星状星雲

太陽程度の質量の恒星の場合、赤色巨星にふくれ上がったあと、そのままガスが宇宙空間に流れ出していく。このガスは可視光で光って見える星雲となる。これを惑星状星雲と呼ぶ。

ブラックホール・中性子星

超新星爆発ですべてがふき飛んでしまう場合と、中心部に非常に密度が高い天体である中性子星ができる場合がある。爆発前の恒星の質量がさらに大きく、より高い密度にまでつぶれると、その表面から光も脱出できない天体であるブラックホールになる。

超新星残骸

超新星爆発を起こした恒星が放出したガスは周囲のガスと混ざって淡く輝く星雲を作る。これを超新星残骸と呼ぶ。

超新星爆発

質量が太陽よりずっと重い恒星は、その進化の最後に超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こし、周囲にガスを放出する。

白色矮星

惑星状星雲となって恒星からガスが宇宙空間に流れ出した後、中心には小さくて密度の高い白色矮星が残る。