

ビッグ アイデア

—天文学の主要概念—

天文学リテラシーの提案



ビッグ アイデア —天文学の主要概念—

天文学リテラシーの提案

執筆者:

João Retrê (ジョアン・レトレ / ポルトガル・天体物理・宇宙科学研究所)、Pedro Russo (ペドロ・ルッソ / オランダ・ライデン大学)、Hyunju Lee (ヒョンジュ・リー / 米国・スミソニアン科学教育センター)、Eduardo Pentado (エデュアルド・ペンテアド / ブラジル・宇宙科学博物館)、Saeed Salimpour (サイド・サリンポー / オーストラリア・ディーキン大学)、Michael Fitzgerald (マイケル・フィッツジェラルド / オーストラリア・エディスコワン大学)、Jaya Ramchandani (ジャヤ・ラムチャンダニ / ザ・ストーリー・オブ財団)、Markus Pössel (マルクス・ベッセル / ドイツ・天文学研究所)、Cecilia Scorza (セシリア・スコルザ / ドイツ・ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘン及び天文学研究所)、Lars Lindberg Christensen (ラース・リンドバーク・クリステンセン / ヨーロッパ南天天文台)、Erik Arends (エリック・アレンズ / オランダ・ライデン大学)、Stephen Pompea (スティーブ・ポンペア / アメリカ国立光学天文台)、Wouter Schrier (ウーター・シュリエ / オランダ・ライデン大学)

第1版 2020年1月

ISBN/EAN: 978-94-91760-21-1

ライセンス: クリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 (CC BY 4.0)



謝辞:

Ismael Tereno (イズマエル・テレノ / 天体物理・宇宙科学研究所)、Pedro Figueira (ペドロ・フィゲイラ / ヨーロッパ南天天文台)、Sérgio Pereira (セルジオ・ペレイラ / 天体物理・宇宙科学研究所)、Monica Bobra (モニカ・ボブラ / スタンフォード大学)、Piero Bienvenuti (ピエロ・ベンヴェヌチ / パドバ大学) および Roy Bishop (ロイ・ビショップ / アカディア大学) による本書への意見に感謝する。João Retrê (ジョアン・レトレ) は、ポルトガル科学技術財団による研究助成金IA2017-09-BGCTおよびUID/FIS/04434/2013を通じた経済的支援に感謝する。

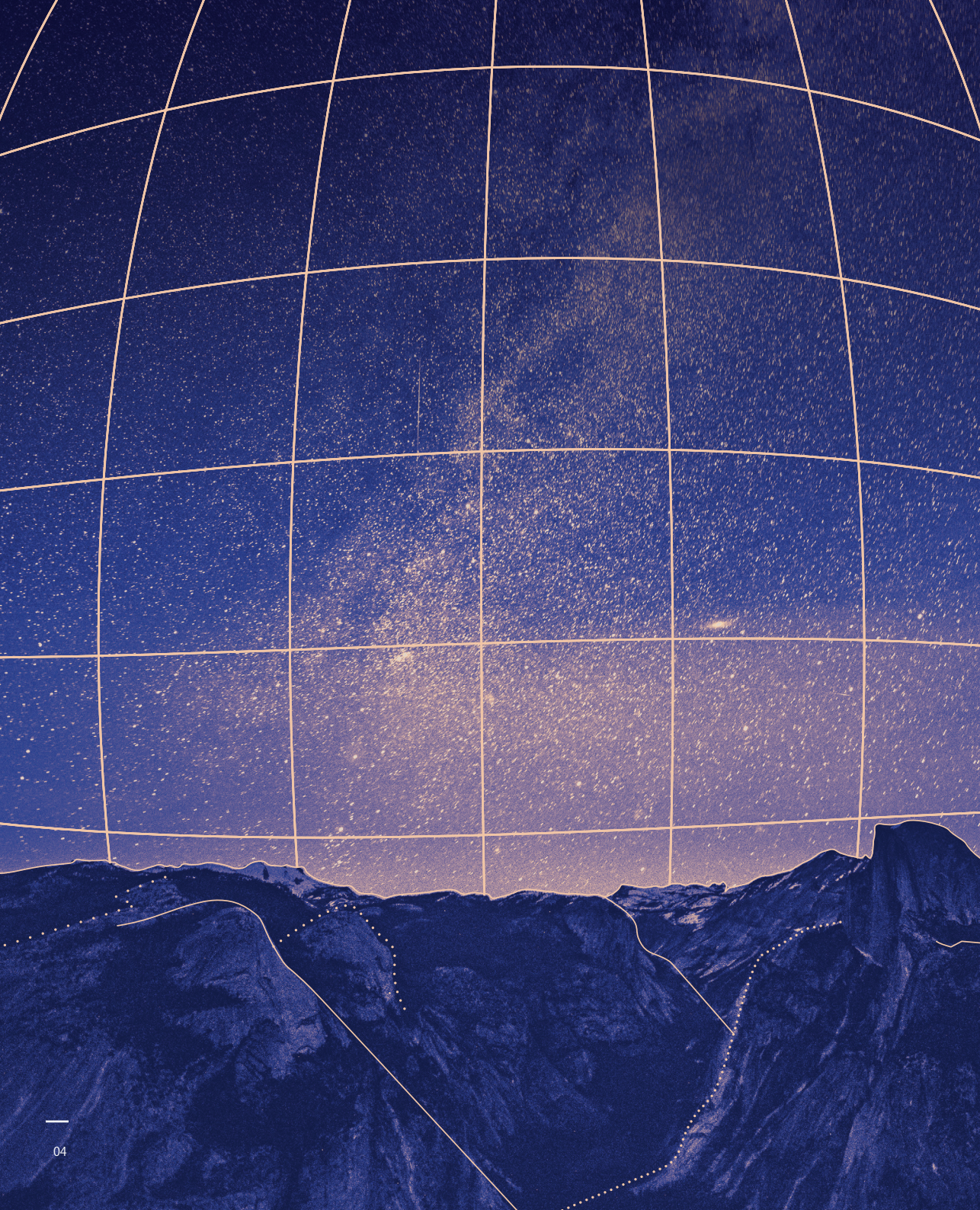
Pedro Russo (ペドロ・ルッソ) は、国立天文台 & 総合研究大学院大学の縣彦彦准教授がコーディネートするプロジェクト「天文学リテラシー」からの支援に感謝する。アメリカ国立光学天文台 (NOAO) は、アメリカ国立科学財団との共同契約に基づき、全米天文学大学連合 (AURA) により運営されている。意見聴取の過程で本書にフィードバックを頂いたコミュニティの皆様にも感謝する。

天文学リテラシーの目標は、IAU C1委員会:リテラシーとカリキュラム開発に関する作業部会の枠組みにおけるライデン天文台、ライデン大学 (オランダ)、天体物理・宇宙科学研究所 (ポルトガル) によるプロジェクトである。

IAU C1委員会 天文教育と発展 委員長: Paulo Bretones (パウロ・ブレトネス)

IAU C1 リテラシーとカリキュラム開発に関する作業部会 代表: Robert Hollow (ロバート・ホロー)





目次

06	大要
08	はじめに
10	概要 ビッグ アイデア —天文学の主要概念— <i>Pedro Russo (ペドロ・ルソン)</i>
12	ビッグ アイデア —天文学の主要概念—
18	天文学は人類の歴史の中で最も古い学問の一つ
22	日常生活の中の天文学
26	夜空は豊かでダイナミック
30	天文学は天体と宇宙の現象を研究する学問
34	天文学は技術と共に発展する
38	宇宙論は宇宙全体を探究する学問
44	私たちは太陽系の中の小さな惑星に暮らしている
48	私たちはみな星屑からできている
52	宇宙には何千億もの銀河がある
58	宇宙にいるのは私たちだけではないかもしれない
62	宇宙で唯一の故郷である地球を守ろう

大要

1

天文学は人類の歴史の中で
最も古い学問の一つ

2

日常生活の中の天文学

3

夜空は豊かで
ダイナミック

4

天文学は天体と宇宙の現象を
研究する学問

5

天文学は技術と共に発展する

6

宇宙論は宇宙全体を
探究する学問

7

私たちは太陽系の中の
小さな惑星に暮らしている

8

私たちはみな星屑
からできている

9

宇宙には何千億もの銀河がある

10

宇宙にいるのは私たち
だけではないかもしれない

11

宇宙で唯一の故郷である
地球を守ろう

はじめに

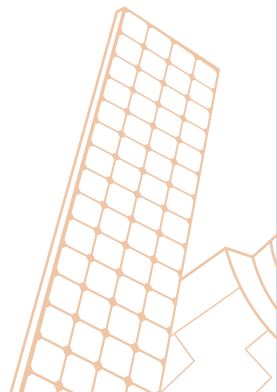
万人のための天文学 (Astronomy for All)

これは国際天文学連合 (IAU) 国際普及室 (OAO) の標語である。「万人」が社会とコミュニティを定義する広い言葉だとすれば、知識の総体としての「天文学」も同様に広い意味を持つ。この「天文学の主要概念 (Big Ideas in Astronomy)」プロジェクトでは、次の問題を追究する。「科学教育を受けた市民は、天文学について何を知っているべきか」

幾たびかの議論、会議、ワークショップ、プレゼンテーション、電話会議、文章のやりとりの結果、私たちは「天文学リテラシーの目標へのロードマップ」として、天文学の主要概念 (Big Ideas) をとりまとめて提唱することにした。そして本書によって、地球上のすべての市民が天文学について知るべき「大要」とそれを裏付ける概念を確立する。

「天文学の主要概念」は、先駆的な取り組みである米国科学振興協会 (AAAS) の「プロジェクト2061」を基礎としている。AAASのプロジェクト2061は、ハレー彗星が近日点を通過した1986年に始まった。AAASは、これから学校に通い、そして再び2061年にハレー彗星を見るであろう子どもたちと自然界のつながりに、何が影響を与えるかということに関心を持った。子どもたちは生涯でどのような科学や技術の進歩に出会うだろうか。そして、子どもたちが世界の仕組みを理解し、批判的・自立的に思考し、ますます科学と技術によって形成されていく文化の中で興味深く責任ある実り多い人生を送るために教育はどのような準備を彼らにしてあげられるだろうか。「天文学の主要概念」は、気候学のリテラシー (Climate Science Literacy)、地球科学のリテラシー (Earth Science Literacy Principle)、海洋のリテラシー (Ocean Literacy)、自然科学のビッグアイデア (Big Ideas of Science) など、他の科学分野の教育法やプロジェクトによって推進される研究にも広く関わりをもつ。

「天文学の主要概念」では、11の大要を紹介し、各大要をそれぞれに含まれる概念や追加情報を通じて詳しく説明する。本書は、教育者や天文学者を念頭に置いて構成されており、教育、研修、アウトリーチ活動、資源開発においてどのテーマを扱うかを決定するための指針となる文書である。しかし、この文書は改善され続けるべきもので、私たちは天文学、天文学教育、科学教育の学界からの意見や批評を歓迎する。



次のステップ

私たちの次のステップは、本書をさらに発展させることである。そのため、専門家が考える天文学のリテラシーを正確に体現するものとして、本書の体系化を図る研究プロジェクトを遂行する。そのなかで、次のような取り組みを進める。

- × これらの大要に沿ったカリキュラムの開発
- × 大要に関する評価ツールの開発
- × 教育資料ガイド
- × 教師の専門能力開発資料
- × ポリシー・レポート

IAU戦略計画2020-2030は、天文学教育を世界的な天文学の取り組みの中心に据えている。IAUは、学校教育において天文学を利用した指導教育を促進するとの目標を設定している。本書がこの目標に寄与し、教育のための天文学リテラシーの目標について最初の分析と枠組みを提供することを期待する。

天文学の 主要概念の概略¹

Pedro Russo (ペドロ・ルッソ)

天文学は、宇宙とその中の万物の起源と進化を研究する学問である。この定義は一見単純なようだが、宇宙はあらゆる大きさ、形、年齢と、魅力的な天体たちと驚くべき天文現象に満ちた広大な空間である。

天文学は、人類の文化史と科学史の一環として、私たちの考え方、世界の見方、そして広い宇宙における私たち自身の位置づけに幾度となく革命を起こしてきた。かつて、天文学の進歩は、時刻の計測や大洋の航行など、実用的な用途に利用されてきた。今日、天文学と関連分野の科学・技術開発は、私たちの日常生活のさまざまな要素——コンピューター、通信衛星、ナビゲーションシステム、ソーラーパネル、無線インターネット、その他多くの技術的用途——に欠かせないものとなっている。

あらゆる科学と同様に、天文学は知識の蓄積によって進歩している。時折、技術や思考の突如のブレイクスルーが進歩を加速させる。太陽中心説やビッグバン宇宙論などの革新的発想がこれにあたる。ビッグバン宇宙論は、宇宙の進化の歴史を説明するものである。およそ140億年前、生まれたての「宇宙」は限りなく小さく熱かった。それが突然の爆発から膨張を続け、その後、冷えたことにより、素粒子や原子といった基礎的構成要素が形成され、銀河、恒星、惑星、やがて生命が形成されるに至った。これまでのデータから、天文学者は、宇宙の膨張はダークエネルギー（暗黒エネルギー）と呼ばれる謎のエネルギーによって引き起こされていると考えている。

闇夜に空を見上げると、地平線から地平線へと空を横切って伸びる光の帯が見える。この帯と空に見えるすべての星は、私たちが暮らす「天の川銀河」または「銀河系」と呼ばれる一つの銀河の一部分である。銀河はフィラメントや塊を形成することもある。これはあたかも宇宙にたくさんある広大な何も無い海を取り巻く島々に例えられる²。天の川銀河には何千億もの恒星があり、太陽はその一つにすぎず、砂浜にある一粒の砂のように名もない存在である。これらの恒星は万有引力の法則に従い、巨大なブラックホールがある天の川銀河の中心の周りを調和しつつ周回している。この宇宙という「大洋」には、他にも多数の島々（銀河）があり、天の川銀河はそこにひしめく何千億もの銀河の一つにすぎない。

太陽はごく平均的なタイプの恒星だが、最近まで人間の知識においては特別な地位にあった。つまり、惑星に囲まれていることがわかっている唯一の恒星だった。現在では惑星を持つ何千もの恒星が知られており、それらの惑星は太陽系外惑星（または系外惑星）と呼ばれ

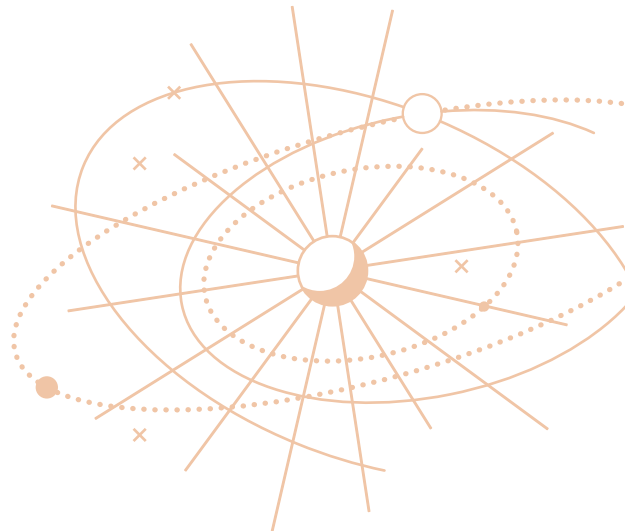
1. 初出はボルトガル語
時事雑誌「Visão」
2012年1月3日号

2. 宇宙大規模構造を念頭に置いて、「広大な何も無い海」はボイド、「島」は銀河を指している。それらを全て含むのが宇宙という「大洋」である。

ている。太陽に似た恒星の20%以上に惑星があり、中には地球に似た惑星もあると推定されている。地球に似た惑星とは、質量は小さく恒星から十分な距離を保って周回しているため、その表面に水の存在が可能な惑星であり、そこには生命が存在する可能性もある。

いったい宇宙は何からできているのだろうか。惑星、恒星、銀河など、私たちに見えるものはすべて原子、陽子、中性子、クォークなどからできている(バリオン物質と呼ばれる)。しかし、それだけではない。他にも広大で奇妙で神秘的なものがあり、それが何なのかは誰にもわからない。太陽系で惑星が太陽の周りを周回するのと同じように、恒星は銀河の中心の周りを周回している。太陽に近い惑星は、それより遠い惑星よりも速く公転する。ところが、銀河中心を回る恒星の場合はそうなっていない。銀河内の恒星は、中心からの距離によらずほぼ同じ速度で銀河の中心の周りを公転しているのだ。私たちに肉眼で見えない何かが存在し、恒星をこのように公転させているに違いない。天文学者はこれを「ダークマター(暗黒物質)」と呼ぶ。私たちに肉眼で見えるものは、宇宙に存在するあらゆるもののごく一部にすぎないと推測される。その他すべてのものはよくわかっておらず、いまだ直接観測されていない。

天文学は科学の進歩や技術の応用だけにかかわるものではない。私たちの限られた視野を広げ、宇宙との中で私たちが住む場所の美しさ、壮大さを発見する機会を与えてくれるものである。このような見方を一般に「ユニバーサルな視点(宇宙的な視点)」といい、天文学が果たすきわめて重要な人類への貢献の一つである。



ビッグ アイデア

—天文学の主要概念—



1

天文学は人類の歴史の中で
最も古い学問の一つ

- 1.1 空を眺め太陽と惑星の動きを理解することは、自然界を理解しようとする最初の試みの一つであった
- 1.2 古代文明において、人々は夜空の星々をつないで星座をつくった
- 1.3 天文学は多くの文明の文化や芸術に影響を与えた
- 1.4 天文学は、古代の農業に不可欠な重要な時季を知るための知識をもたらした
- 1.5 天文学は、かつて航海者にとって重要だった
- 1.6 天文学は、科学的な手法を用いることで占星術とは異なる
- 1.7 かつては地球が宇宙の中心だと信じていた文化もあった
- 1.8 コペルニクスの地動説は、100年以上の年月を経て人々に受け入れられるようになった
- 1.9 天文学者は400年以上前に、初めて望遠鏡を用いた天文学の系統的な観測を行った
- 1.10 私たちの住む地球はほぼ球形で、それは何世紀にもわたってさまざまな方法で説明されてきた

2

日常生活の中の天文学



- 2.1 昼と夜があるのは地球が自転しているからである
- 2.2 季節があるのは、地球が自転軸を傾けつつ1年かけて太陽の周りを公転するからである
- 2.3 満ち欠けの周期のなかで、月はさまざまな形に見える
- 2.4 日食・月食は太陽、地球、月が特別な配列に並んだ時に起きる
- 2.5 潮の満ち干は月と太陽の重力によるものである
- 2.6 太陽の光は、地球上のほとんどの生物にとって不可欠である
- 2.7 太陽から出た粒子が地球に届きオーロラを発生させる
- 2.8 天文学研究のために開発された技術は私たちの日常生活の一部になっている

3

夜空は豊かでダイナミック



- 3.1 空気が澄んだ暗い夜には肉眼で数千個の星を見ることができる
- 3.2 夜空のおかげで自分が地球上のどこにいるのか、どちらに進めば良いのかを知ることができる
- 3.3 地球の自転軸は何千年にもわたり首振り運動(歳差運動)をしている
- 3.4 太陽が昇っている間に肉眼で見えるほど明るい天体はごくわずかである
- 3.5 地球の自転によって天体は東から昇り西に沈む
- 3.6 星が瞬くのは地球の大気のせいである
- 3.7 何百万もの流星物質が地球の大気圏に毎日降り注いでいる

4

天文学は天体と宇宙の現象を研究する学問

- 4.1 光(電磁波)は天文学研究の主要な情報源である
- 4.2 大きなスケールで見ると重力が宇宙で最も支配的な力である
- 4.3 重力波と素粒子は宇宙の新しい研究方法をもたらした
- 4.4 天文学は観測やシミュレーションに基づいて、最新理論の枠組みの中で天文現象をモデル化している
- 4.5 天文学研究は、物理学、数学、化学、地質学、生物学など多分野の知識を統合して行われる
- 4.6 天文学は多くの専門分野に分かれている
- 4.7 天文学で扱う距離と時間のスケールは、私たちが日常生活で使うものとは桁違いである
- 4.8 分光学は遠く離れたところから私たちが宇宙を研究できる重要な技法である

5

天文学は技術と共に発展する

- 5.1 望遠鏡と観測装置は天文学の研究に欠かせない
- 5.2 複数の望遠鏡を組み合わせて一つの大きな望遠鏡として使うことができる
- 5.3 天文台は地上と宇宙空間(スペース)にある
- 5.4 地上の天文台は世界各地の人里離れた所に建設されることが多い
- 5.5 現在の天文学は「ビッグサイエンス」であり「ビッグデータ」も扱う
- 5.6 天文学における複雑なシミュレーションや膨大なデータの扱いには、高性能のスーパーコンピューターが必要である
- 5.7 天文学は国際チームによるグローバルな科学であり、データや研究成果は共有される
- 5.8 太陽系を調査するため、たくさんの探査機が打ち上げられている

6

宇宙論は宇宙全体を 探究する学問

- 6.1 宇宙の年齢は130億歳を超えている
- 6.2 宇宙は大きなスケールで見ると一様でかつ等方的である
- 6.3 私たちは宇宙の過去しか観測できない
- 6.4 私たちが直接観測できるのは宇宙全体のごく一部にすぎない
- 6.5 宇宙は主にダークエネルギーとダークマターで構成されている
- 6.6 宇宙は膨張しており、その膨張は現在加速している
- 6.7 宇宙の膨張によって、遠くの銀河から地球にとどく光の波長は赤い方へ偏移する
- 6.8 地上で知られた自然法則(万有引力の法則など)は宇宙全体でも成り立つように見える
- 6.9 宇宙の大規模構造は、フィラメント、シート、超銀河団、ボイドなどで構成される
- 6.10 宇宙マイクロ波背景放射によって私たちは初期の宇宙を探查できる
- 6.11 宇宙の進化はビッグバンモデルによって説明できる

7

私たちは太陽系の中の 小さな惑星に暮らしている

- 7.1 太陽系は約46億年前に形成された
- 7.2 太陽系は太陽、惑星、準惑星、衛星、太陽系外縁天体、彗星、小惑星、流星物質などで構成されている
- 7.3 太陽系には8つの惑星がある
- 7.4 太陽系外縁天体にはいくつかの冥王星型天体がある
- 7.5 惑星には地球型(岩石)惑星と巨大ガス惑星がある
- 7.6 数十個の衛星を持つ惑星もある
- 7.7 地球は太陽を周回する第3惑星であり、月という衛星を持つ
- 7.8 小惑星と太陽系外縁天体は太陽系形成時の残存物である
- 7.9 彗星は氷を多く含む天体で、太陽に温められると尾を生じる
- 7.10 太陽の重力の影響は地球の1万倍以上の彼方まで及んでいる



私たちはみな星屑からできている

- 8.1 恒星は内部で起きる核反応によりエネルギーを生成し自ら光を発する
- 8.2 恒星は分子雲の中で生まれる
- 8.3 地球に最も近い恒星は太陽である
- 8.4 太陽は活動的な恒星である
- 8.5 恒星の色からその表面温度がわかる
- 8.6 恒星間の空間の大部分はほぼ真空だが、星を生む分子雲もある
- 8.7 恒星の一生は生まれたときの質量によってほぼ決まる
- 8.8 巨大な恒星が一生を終えると恒星質量ブラックホールができる
- 8.9 新しい恒星とその惑星系は、過去の星がその領域に残した物質から生まれる
- 8.10 人体は昔に存在した恒星で作られた原子からできている



宇宙には何千億もの銀河がある

- 9.1 銀河は恒星、塵、ガスでできた大きな天体である
- 9.2 銀河には大量のダークマターがあると思われる
- 9.3 銀河は誕生後も成長する
- 9.4 銀河には、渦巻銀河、楕円銀河、不規則銀河の3つの主要タイプがある
- 9.5 私たちは天の川銀河（銀河系）と呼ばれる渦巻銀河に住んでいる
- 9.6 銀河の渦巻腕はガスと塵が集まってできる
- 9.7 ほとんどの銀河の中心には超大質量ブラックホールがある
- 9.8 遠くにある銀河の観測は難しい
- 9.9 銀河は集団を形成している
- 9.10 銀河は重力によって相互に影響を及ぼす



10

宇宙にいるのは私たち だけではないかもしれない

- 10.1 地球外で有機分子が発見されている
- 10.2 地球には極限環境でも生き延びる生物がいる
- 10.3 液体の水の痕跡らしいものがあることから、かつて火星に生命が存在した可能性がある
- 10.4 太陽系の衛星の中には生命が存在する条件が整っていると見られるものもある
- 10.5 太陽以外の恒星を周回する太陽系外惑星(系外惑星)と呼ばれる惑星が多数存在する
- 10.6 系外惑星はきわめて多様で、一つの恒星に複数の惑星が発見されることも多い
- 10.7 地球に似た惑星が発見される日も近い
- 10.8 科学者は地球外知的生命体を探している

11

宇宙で唯一の故郷である地球 を守ろう

- 11.1 光害は人間だけでなくその他多くの動植物に悪影響を与える
- 11.2 地球を周回する軌道上には人間が作った宇宙ゴミ(スペースデブリ)が大量にある
- 11.3 私たちは、地球上の生命にとって危険となりうる天体を監視している
- 11.4 人間は地球環境に重大な影響を与える
- 11.5 気候と大気は人間の活動によって大きな影響を受ける
- 11.6 私たちの地球を守るには「グローバルな視点」が必要である
- 11.7 天文学は「ユニバーサルな視点」を提供し、私たちを地球市民として結束させる

1

天文学は人類の歴史の中で
最も古い学問の一つ



ラスコーの先史時代の洞窟壁画には、オーロックス(原牛)の背後の頭上にプレアデス星団に似た点の集まりが描かれている。

画像提供: Ministère de la Culture/Centre National de la Préhistoire/Norbert Aujoulat



1.1 空を眺め太陽と惑星の動きを理解することは、自然界を理解しようとする最初の試みの一つであった

天体観測の最初の記録は、先史時代の人々が空に見えたものを形として記録しようとする試みから始まった。古代文化においては、天文学は宗教上や神話上の信仰に関係していた。天文現象は時間を計測したり暦を作ったりするために使われ、それにより日ごと、季節ごとの行事を計画することができた。

1.2 古代文明において、人々は夜空の星々をつないで星座をつくった

想像上の線を使って星々をつなぎ、夜空に描かれた形を星座という。最も古い星座は、古代文化によって作られた。こうして識別された星々の集まりは、ギリシャ、マヤ、アメリカ先住民、中国などの文化の固有の物語や神話と結びつけられることがあった。現代の天文学では、古代の星座と15、16、17および18世紀に作られた星座を組み合わせることによって、星座は天球を区切った88の領域として明確に定義されている。オーストラリア先住民や南米先住民など、一部の文化では明るい天の川の中の黒いシルエットの形を星座としていた。

1.3 天文学は多くの文明の文化や芸術に影響を与えた

芸術家、詩人、作家、そして多くの創造的な思想家達は何世紀にもわたって、夜空から着想を得たり、夜空を創作の対象としてきた。宇宙に関する主題は、絵画、彫刻、音楽、映画そして文学作品などに取り上げられている。夜空の本質や美しさや神秘さを直接間接に伝えるために、これらの作品には夜に実際に見られるものが使われている。芸術の持つ普遍性およびその文化との強い結びつきは、天体や天文現象が持つ美しさだけでなく、それらに関する知識についても人々に理解させる強力な手段となり得る。そしてこのことが、天文学に関する世界的な関心を増加させ、ひとつの空の下に生きているという概念の中で異文化間の理解を促進する。

1.4 天文学は、古代の農業に不可欠な重要な時季を知るための知識をもたらした

多くの古代文化においては、農業用の暦の精度を高めるために天文学が発展した。例えば、エジプト人は恒星シリウスの観測をもとに暦を作り、毎年ナイル川洪水の時期を判断した。

1.5 天文学は、かつて航海者にとって重要だった

多くの文明において人々は、恒星やその他の天体の位置を使って陸地、海、大洋を航行した。天文航法は今日でも教えられている。

1.6

天文学は、科学的な手法を用いることで占星術とは異なる

前近代までは、天文学と占星術の区別はあいまいだった。現在では、天文学と占星術は明確に区別されている。天文学は科学であり、占星術は科学ではない。占星術は天体のみかけの位置を使って未来のできごとを予測する。しかし、占星術とその予測を詳しく調査した結果、占星術の予測は正確ではなく、科学的根拠もないことが示された。

1.7

かつては地球が宇宙の中心だと信じていた文化もあった

紀元前300年頃に活躍した古代ギリシャの何人かの天文学者は特別な例外であったが、昔の人々はほとんど、地球が宇宙の中心だと信じていた。この地球中心説はヨーロッパとアジアの文化において、16世紀のいわゆる「コペルニクスの転回」まで二千年以上にわたって続いた。現代の天文学者は、宇宙には特定の中心はないことを知っている。

1.8

コペルニクスの地動説は、100年以上の年月を経て人々に受け入れられるようになった

16世紀、コペルニクスは太陽が宇宙の中心であり、地球はその周りを公転しているという地動説を提唱した。現在では太陽が宇宙の中心ではないことはわかっているが、太陽は太陽系の中心である。地球ではなく太陽を中心に惑星が回っているというコペルニクスの地動説は当時革命的な考えで、近代天文学の発展に貢献した。

1.9

天文学者は400年以上前に、初めて望遠鏡を用いた天文学の系統的な観測を行った

ガリレオは、望遠鏡の発明者ではないが、初めて科学的目的のために望遠鏡を使った人物である。ガリレオは、屈折望遠鏡を改良することにより、月のクレーター、金星の満ち欠け、そして現在ガリレオ衛星と呼ばれる木星の4大衛星などを発見した。彼の数々の発見は、地動説の考え方を裏付ける説得力ある証拠にもなった。

1.10

私たちの住む地球はほぼ球形で、それは何世紀にもわたってさまざまな方法で説明されてきた

世界の多くの地域の古代文化においては、宇宙の説明の一環として、地球を平面または円盤として記述していた。地球は丸いという考え方は数千年前からあり、多くの文化の世界観を構成する重要な要素となっていて、1000年以上前から広く支持される考え方となっている。地球がほぼ球形(回転楕円体)であることを実証する経験的手段はいくつもある。ごく初期の数学的手法の一つは古代エジプトのエラステネスによるもので、彼は各地で棒を立ててできる影の長さを分析することにより、地球1周の長さを測定した(紀元前3世紀)。

2

日常生活の中の天文学

畏敬の念を抱かせる夜空の光の
ショー— アラスカ原野の
オーロラ (北極光)

画像提供: Jean Beaufort
(バブリックドメイン写真)



2.1 昼と夜があるのは地球が自転しているからである

地球の太陽に向いている側は昼になり、反対側は夜になる。地球が自転軸（地軸）を中心として自転し、太陽が空の上で同じ位置に戻るまでにかかる時間を太陽日といい、平均で24時間である。

2.2 季節があるのは、地球が自転軸を傾けつつ1年かけて太陽の周りを公転するからである

地球の自転軸は、太陽を中心とした公転軌道面に対し23.4度傾いている。このため地球は、公転軌道上の約半分、北半球と南半球のいずれかが太陽に向かって傾きもう一方が太陽の反対側に傾いている状態となる。太陽に傾く側は夏になる。夏には太陽の南中高度が高くなるため、高い位置から地表に太陽光が届き、昼の時間も長い。一方、太陽から反対側に傾いた半球は冬になる。冬には太陽光が大きく斜めに傾いて地表に届き、広い面積に拡散するので気温が下がる。冬は太陽の南中高度が低いいため、昼は短くなる。公転軌道上の残りの半分、すなわち冬から夏に向かう間の春と、夏から冬に向かう間の秋は、昼と夜の時間があまり変わらず、太陽の高度も夏と冬の間になる。

2.3 満ち欠けの周期のなかで、月はさまざまな形に見える

月が地球の周りを公転すると、太陽や地球との位置関係が変化する。月面上で太陽光によって照らされている部分が変わり、地球から見える月の形（位相）が変化する。月の位相は、新月、三日月、上弦、満月、下弦、新月と移り変わり、満月から次の満月までは29.53日である。月の位相は地球上のどこから見てもほぼ同じだが、地球から見る月の向きは、地球の北半球からと南半球からとは異なる。例えば、北半球のある場所では三日月の左側が欠けているように見えても、同じ時刻に南半球の他の場所では三日月の右側が欠けているように見える。

2.4 日食・月食は太陽、地球、月が特別な配列に並んだ時に起きる

月がちょうど太陽と地球の間を通過することがあると、月が太陽の光を遮って地球に影を落とし、日食が起こる。地球がちょうど太陽と月の間に入ることもある。その場合、地球が月に影を落として月面を隠し、月食が起こる。食には、天体の一部だけが欠ける部分食と、天体全体が欠ける皆既食がある。月食が起きるのは満月の時だけなので、夜しか観測できない。地球上のどこであってもある特定の場所を決めれば、日食より月食が見られる可能性の方が高い。月食は日食より継続時間も長い。

2.5 潮の満ち干は月と太陽の重力によるものである

月と太陽によって地球の潮の満ち干が起きる。月の影響に比べれば太陽の影響は小さい。地球、特に海は、月や太陽に最も近い側とその反対側が、少しだけ膨らむ。地球が自転していく中で、これらの膨らみが海岸線に達し、その部分の水位が上昇する。太陽、地球、月がほぼ一直線上にある時（満月と新月）は、最も潮位が高い「大潮」となる。一方、地球に対する太陽と月の方向が直角をなす時（上弦と下弦）は、潮位が低い「小潮」となる。

2.6 太陽の光は、地球上のほとんどの生物にとって不可欠である

太陽は、地球上の生物が利用するエネルギーの主な源である。例えば、植物は日光を使って光合成することによって成長し、その過程で酸素分子を生成する。その酸素は動物によって呼吸に使われる。かつて、空を飛べない恐竜と当時地表にいた多くの生物種が絶滅したことがあった。これは小惑星が地球に衝突したために長い冬が来て地球環境が破壊されたためだと考えられている。衝突による爆発で大量の塵が大気中に巻き上げられ、太陽の光を遮ったのだ。太陽の光は私たちの心身の健康にも影響を及ぼす。皮膚は日光に曝されるとビタミンDを生成する。ビタミンDは私たちの体の生化学的プロセスにおいて重要な役割を持つ。うつ（鬱）と日光不足の関係を示す研究もある。

2.7 太陽から出た粒子が地球に届きオーロラを発生させる

太陽表面で太陽フレアやコロナ質量放出などの爆発が起きると、電気を帯びた粒子（主に電子と陽子）が放出され、1億5千万kmを飛ばして地球に届く。これらの粒子は地球の磁場に巻き付いて磁極へと移動し大気中の粒子と相互作用する。最も高速の粒子は1時間で太陽から地球まで到達するが、最も遅い粒子は5日もかかる。時にはこれらの粒子の嵐が地球の磁場を乱し（磁気嵐）、人工衛星や送電線に被害を与える。しばしば、太陽からの粒子は地球大気中の酸素と窒素と反応する。この反応によってオーロラができる。オーロラは、北半球（北のオーロラ）と南半球（南のオーロラ）の磁極の周辺で夜空を彩る素晴らしい光のショーである。

2.8 天文学研究のために開発された技術は私たちの日常生活の一部になっている

天文学研究のデータ解析に使われる解析ツールや手法は、産業、医学など私たちが毎日使う技術に応用されている。最初は天文学の研究用に開発された検出装置が、現在、スマートフォンなどに内蔵されているデジタルカメラにも使われている。天体望遠鏡のために開発された特殊ガラスが、液晶スクリーン、コンピューターチップ、セラミック調理台の製造にも使われている。天文学と医学の間での知識移転は、とりわけ磁気共鳴画像装置（MRI）やコンピューター断層撮影装置（CTスキャナー）の開発などに貢献している。

3

夜空は豊かで
ダイナミック

チリのアンデス山脈にある
チャントール高原で撮影
された長時間露光写真。
地球の自転による星の軌跡が
写っている

画像提供: S. Otarola/ESO



×

×

×

—

3.1 空気が澄んだ暗い夜には肉眼で数千個の星を見ることができる

都市の光害から遠く離れた場所で月のない夜空を見上げると、肉眼でおおよそ4000個の星を見ることができる。私たちが肉眼で見ることができる星々は太陽にごく近いもので、全て天の川銀河（銀河系）に属している。一つの銀河の中には1千億もの星があり、観測可能な宇宙には何千億もの銀河がある。遠方の銀河にある星々はあまりにも遠いので、私たちの肉眼では光の点として見るができないほど小さく暗い。地球上のいつどこで夜空を見上げるかによって異なるが、銀河系の星々に加えて、太陽系の明るい惑星5つ、天の川、天の川銀河の2つの伴銀河（大マゼラン銀河と小マゼラン銀河）、そしてアンドロメダ銀河（大きな渦巻銀河）も肉眼で見ることができる。

3.2 夜空のおかげで自分が地球上のどこにいるのか、どちらに進めば良いのかを知ることができる

夜空を見上げることで方角を知ることができる。北半球で北を確認する最も簡単な方法は、天の北極のすぐそばにある北極星（ポラリス）を見つけることである。北極星を見つける最も簡単な方法は、おおぐま座（北斗七星）とこぐま座あるいはカシオペア座を見つけることである。南半球では、天の南極に最も近い星である、はちぶんぎ座シグマ星は簡単には見つけられない。南半球で南を確認する最も簡単な方法は、みなみじゅうじ座とケンタウルス座にある2つの明るい星を使う方法である。

3.3 地球の自転軸は何千年にもわたり首振り運動（歳差運動）をしている

地球の自転のようすは回転するこまに似ている。自転軸の方向は、約2万6000年の周期でゆっくり変化している。この運動によって自転軸の方向が時間とともに変化し、それに伴って天の北極と南極の位置も時間とともにゆっくりと変化する。例として、今の北極星（ポラリス）はやがて北極星ではなくなるが、その時の地球の自転軸の方向により、別の星が北極星になるかもしれない。現在、天の南極付近に明るい星はないが、将来は「南極星」と呼ぶにふさわしい星があるかもしれない。

3.4 太陽が昇っている間に肉眼で見えるほど明るい天体はごくわずかである

夜空の天体のほとんどは暗すぎて、明るい昼間の空では観測できない。都会の夜も同様で、人工的な光のせいで夜空が明るく（光害）、ごく一部の星しか見えない。太陽が昇っている間に肉眼で見えるほど明るい天体はごくわずかである。月齢によっては、月は昼間でも見ることができる。時期によっては、金星も朝（明けの明星）や夕方（宵の明星）に観測できる。ごくまれに、特別に明るい彗星が昼間も見ることがある。

3.5 地球の自転によって天体は東から昇り西に沈む

地球が西から東へと自転しているため、地表にいる私たちから見ると、空全体が地球の周りを東から西へと反対に回っているように見える。このように空が地球の周りを回る見かけの動きを日周運動という。すべての天体が東側から昇り、西側に沈むように見えるのはこのためである。

3.6 星が瞬くのは地球の大気のせいである

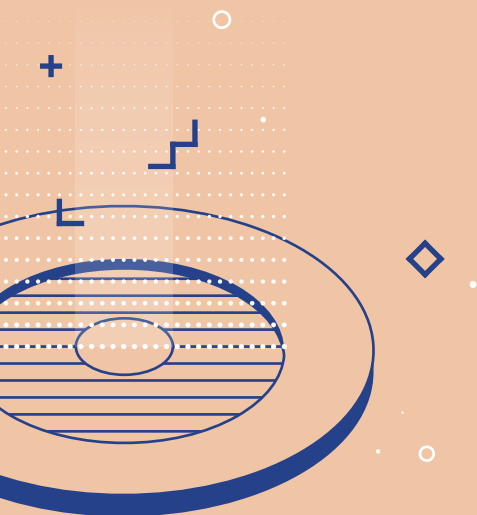
温度や密度が異なる層からなる地球の大気は、絶えず屈折率が変化しているので、その中を通過してきた星の光の通り道はふらついてしまう。このため、星の明るさや見える方向は絶えず変化し、地上の観測者からは、星が瞬いているように見える。惑星の場合、その影響ははるかに小さい(気づきにくい)。その理由は、惑星は実際には大きさをもって見えるからである(双眼鏡を使うと容易に確認できる)。一方、恒星は小さな光の点にしか見えないため、すべての光が一点から届き、屈折率の変化の影響をきわめて受けやすい。

3.7 何百万もの流星物質が地球の大気圏に毎日降り注いでいる

流星の元になる流星物質(流星体)は小さな岩石または金属の物体で、大きさは砂粒ほどのものから1メートル程度までさまざまである。流星物質が地球の大気に突入すると、空気の動圧(ラム圧)によって加熱され、夜空に光のすじを描く。この現象が流星(流れ星)である。流星物質が大気中で燃え尽きずに地表まで達すると、隕石と呼ばれる。地球の大気では一日に何百万もの流星が発生しているが、その元となる流星物質のほとんどは地表に達する前に燃えてガスとちりになる。

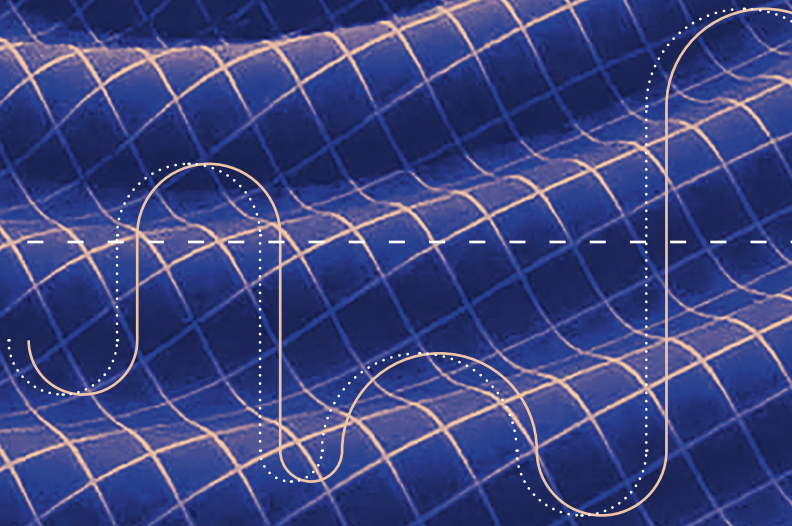
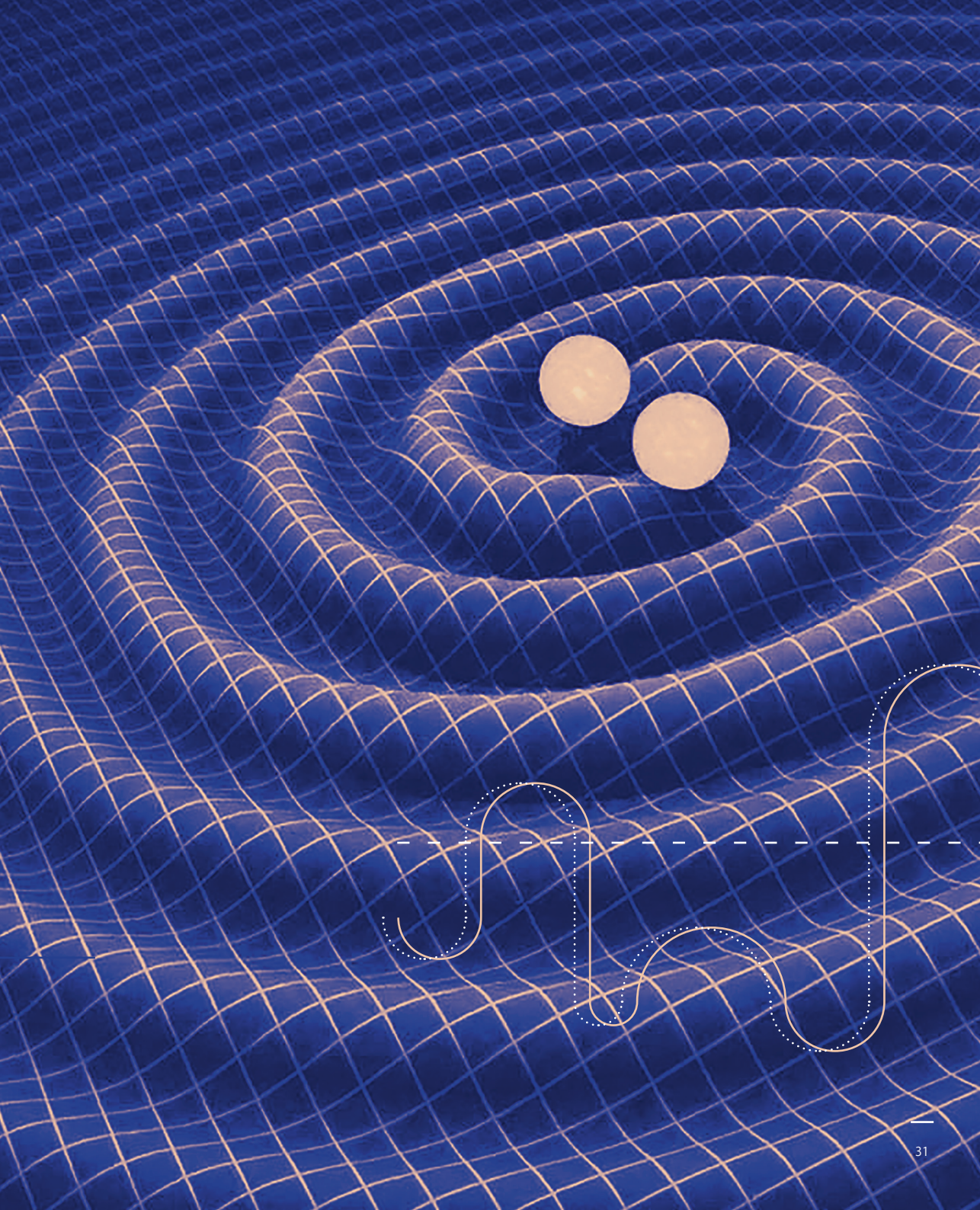


天文学は天体と宇宙の現象を
研究する学問



互いの周りを回る二重
中性子星連星が合体直前に放
出する重力波の想像図

画像提供：
R. Hurt/Caltech-JPL



4.1 光(電磁波)は天文学研究の主要な情報源である

ほとんどの天体は遠すぎて実際に行くことができないため、天体について調べるにはそれらの天体から発せられる光(電磁波)に頼るしかない。波長が異なるさまざまな電磁波から、各種の天文現象のメカニズムや天体の性質に関する情報を引き出せる。現代の天文学においては、宇宙の研究は広い波長範囲にわたる電磁波全体—電波、マイクロ波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線—を利用して行われる。一般には光という語は可視光を指すが、天文学では電磁波全体を光という場合がある。

4.2 大きなスケールでみると重力が宇宙で最も支配的な力である

平均すると、天体の正味の電荷はゼロである。天体が長距離を隔てて相互作用する最も有力な手段は重力(万有引力)である。重力によって惑星は太陽の周りを回り、恒星は銀河の中心の周りを回り、恒星の高温プラズマは球形にまとまる。ほとんどの天文現象はニュートンの万有引力の法則を使って説明できるが、特に極端な状況において正確な説明をするにはアインシュタインの一般相対性理論が必要である。

4.3 重力波と素粒子は宇宙の新しい研究方法をもたらした

重力波—時空のさざなみ—の存在は、理論的には20世紀初頭の一般相対性理論によって予言されていた。重力波が初めて直接検出されたのは2015年のことで、科学者はこれを宇宙研究の新たな手段として利用できるようになった。重力波は、ブラックホールや中性子星の合体などの強力な重力相互作用によって発生する。また、天文学者は、太陽の内部や宇宙におけるとりわけ高エネルギーのプロセスについて知るために、ニュートリノ、電子など各種の素粒子や陽子などを観測している。

4.4 天文学は観測やシミュレーションに基づいて、最新理論の枠組みの中で天文現象をモデル化している

天文学者は、天体とその関連現象や、天体の進化について数学的モデルを作成する。これらのモデルの枠組みは、物理学と化学の基礎理論によって構築されている。モデルの中には簡単な数学的関係で構成されているものもあれば、数値シミュレーションを利用したより複雑なモデルもある。最も複雑なシミュレーションは、世界最大級のスーパーコンピューターで実行されている。望遠鏡や観測装置によって得られる観測データは、モデルを検証し改善するために使われる。新しい発見は、観測とモデルの相互作用によって生み出される。

4.5

天文学研究は、物理学、数学、化学、地質学、生物学など多分野の知識を統合して行われる

専門的な天文学研究は、物理学、数学、化学、地質学、生物学、工学、コンピューター科学、その他の分野の知識を統合して行う。天体と天文現象の性質を解き明かしてモデル化するには、このような広い視点が必要不可欠であることがわかっている。例えば、星の内部で起きている核融合反応を理解するには原子核物理学が必要である。核融合反応により生まれた恒星の大気の成分を検出するには、化学が必要である。望遠鏡や観測装置の開発・製造には工学が不可欠であり、これらの機材から得られたデータを分析するにはそれぞれの機材に応じたソフトウェアの開発が極めて重要である。

4.6

天文学は多くの専門分野に分かれている

天体と天文現象を適切に説明するには、他の科学分野についての十分な知識が必要なので、現代の天文学は、対象とする主なテーマに応じて専門が分かれている。これらの専門の中には、宇宙生物学、宇宙論、観測天文学、宇宙化学、惑星科学などが含まれる。さらに天文学者は、ある特定の天体（白色矮星など）の研究を専門とする場合もある。天文学における物理学の重要な役割を考えると、「宇宙物理学」と「天文学」という言葉は相互に言い換えることができる。

4.7

天文学で扱う距離と時間のスケールは、私たちが日常生活で使うものとは桁違いである

月は地球に最も近い天体で、その距離は約38万kmである。太陽は地球に最も近い恒星で、地球との距離は約1億5000万km（これを「天文単位」といい、記号auで表す）、その直径は約140万km、質量はkgで表すと約2千兆のそのまた1千兆倍（ 2×10^{30} kg）である。太陽に最も近い恒星はプロキシマ・ケンタウリで、約4.25光年離れている。1光年は光が1年間に進む距離で、9兆km余りである。天の川銀河の直径は10万から12万光年。銀河のなかには天の川銀河から100億光年以上離れているものもある。天文学で用いられる単位は想像もつかない大きさである。天文学の時間のスケールも長く、数百万年、数十億年は当たり前である。

4.8

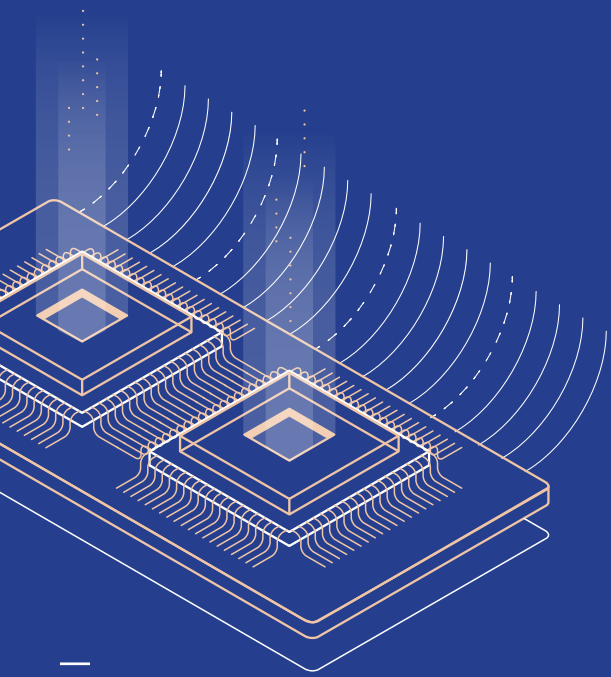
分光学は遠く離れたところから私たちが宇宙を研究できる重要な技法である

天体の特徴の中には、スペクトルを分析しないとわからないものもある。スペクトルは光を虹のように多数の色に分解（分光）したもので、その色はそれぞれ光の波長によって決まる。天文学者は、天体から集めた光を分析することにより、その天体の元素組成、温度、圧力、磁場などの詳細な特徴と運動状態を知ることができる。



5

天文学は技術と共に発展する



チリのアンデス山の高原にある
大型望遠鏡 (VLT) -口径8級の
望遠鏡 4基のうち2基

画像提供: ESO/P. Horálek



5.1 望遠鏡と観測装置は天文学の研究に欠かせない

天文学では電磁波が主な情報源である。電磁波を収集し、解析するには望遠鏡と観測装置が重要な役割を担う。大きな望遠鏡は集光力が高いため、かすかな天体でも識別して解析することができる。大きな望遠鏡は分解能も高いため、小さな望遠鏡より天体をさらに細部まで調べることができる。初期の天体観測は望遠鏡を直接のぞいて行っていたが、現在は観測装置によって行うので、さまざまな波長で得られた観測結果を客観的に記録できるようになった。

5.2 複数の望遠鏡を組み合わせると一つの大きな望遠鏡として使うことができる

複数の望遠鏡を組み合わせることで使う干渉計という技術により、一つの大きな望遠鏡としての性能を得ることができる。干渉計により得られた合成画像の解像度は、観測に用いた中で最も遠い2つの望遠鏡の間隔と同じ大きさの望遠鏡の解像度と同じである。この方法により、天体の細部を詳しく調べることや、恒星とその惑星系のように近接した天体をそれぞれに分離して調べることができる。

5.3 天文台は地上と宇宙空間（スペース）にある

地球の大気はほとんどの電磁波を吸収する。大気は可視光、紫外線の一部、赤外線の一部、そして電波の中で短波長のものに対しては透明だが、それ以外はほとんど通さない。ほとんどの紫外線と赤外線、X線、ガンマ線は大気を通り抜けることができない。そのため、可視光や電波、およびその他大気を透過する特定の波長帯以外の電磁波を観測する場合、宇宙空間（スペース）に望遠鏡を打ち上げなければならない。可視光は地上から観測できるが、地球大気のゆらぎが画質に影響を及ぼすため、可視光で観測する光学望遠鏡も宇宙空間に置かれることがある。

5.4 地上の天文台は世界各地の人里離れた所に建設されることが多い

標高が高く、光害がなく、特定の波長に対して大気が透明といった天文観測にとって理想の観測条件がそろった場所は、地上では大変少ない。このような場所は厳しい環境にあり、アクセスも難しく、一般に人が住む場所から遠く離れている。天文学者はそのような場所に赴いて観測するか、経験豊富な現地の望遠鏡オペレーターに観測してもらるか、遠隔操作で動くロボット望遠鏡を利用する。

5.5

現在の天文学は「ビッグサイエンス」であり「ビッグデータ」も扱う

サーベイ観測によって大量のデータが得られるようになったが、今後観測データは桁違いに増加する見通しである。この新しい分野を「ビッグデータ天文学」といい、大量のデータを蓄積、転送、解析する画期的な方法を見出すことに焦点が当てられている。人間の優れたパターン認識能力を活用するなど、ビッグデータ天文学からさまざまなシチズンサイエンス（市民による科学、市民天文学）のプロジェクトが生まれている。現代の望遠鏡や観測装置は高価であり、その建設にはさまざまな技術が必要である。そのような設備は一般に国際組織や複数の国からなる多数の天文機関が参加するコンソーシアム（共同事業体）によって建設されている。

5.6

天文学における複雑なシミュレーションや膨大なデータの扱いには、高性能のスーパーコンピューターが必要である

シミュレーションや観測によって得られる膨大な量のデータを処理するには、複雑な計算を短時間に実行できるコンピューターが必要である。最新のスーパーコンピューターは、1秒間におよそ 2×10^{17} 回（20京回）の計算を実行できる。このようなスーパーコンピューターを使うと、天文学者は、宇宙の理論モデルを計算し、大規模サーベイによる観測結果と比較することが可能となる。

5.7

天文学は国際チームによるグローバルな科学であり、データや研究成果は共有される

研究機関としての天文台では得られたデータを無料で公開している所が多い。天文学者はさまざまな国で研究をしながらキャリアを積み上げていくことが多い。望遠鏡や観測装置の建設、組織的な観測キャンペーンなど、大規模なプロジェクトになるほど、世界各国の研究者や研究機関の参加の下で協力して行われる。天文学は全世界的であり国際的な科学である。私たちはみな「宇宙船地球号」の乗組員であり、ひとつの空の下で宇宙を探究している。

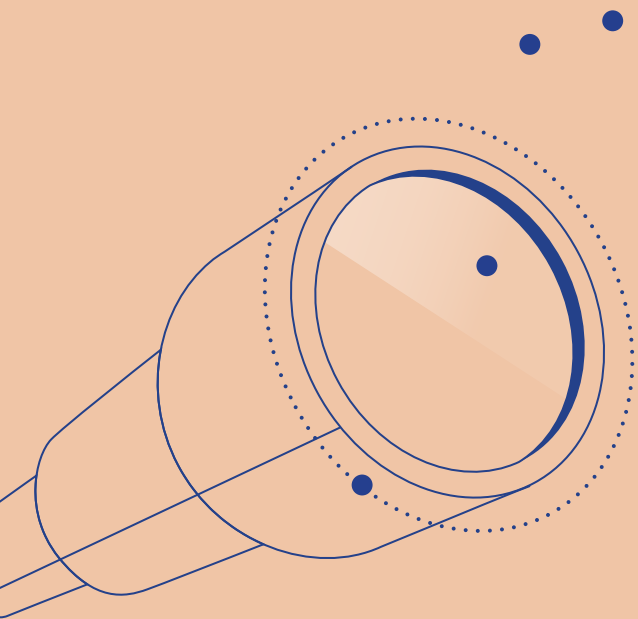
5.8

太陽系を調査するため、たくさんの探査機が打ち上げられている

私たちは宇宙のどのような場所にいるのか、もっと詳しく知るために、私たちは太陽系全体に無人探査機を送っている。これらの探査機の中には、月、惑星、彗星、さらには小惑星を周回するものもあれば、それらの天体に着陸したものもある。これまでに着陸、周回または近接通過などの方法で無人探査機が送り込まれた天体は、すべての惑星、準惑星の冥王星とケレス、月、木星と土星の衛星、彗星、小惑星などである。

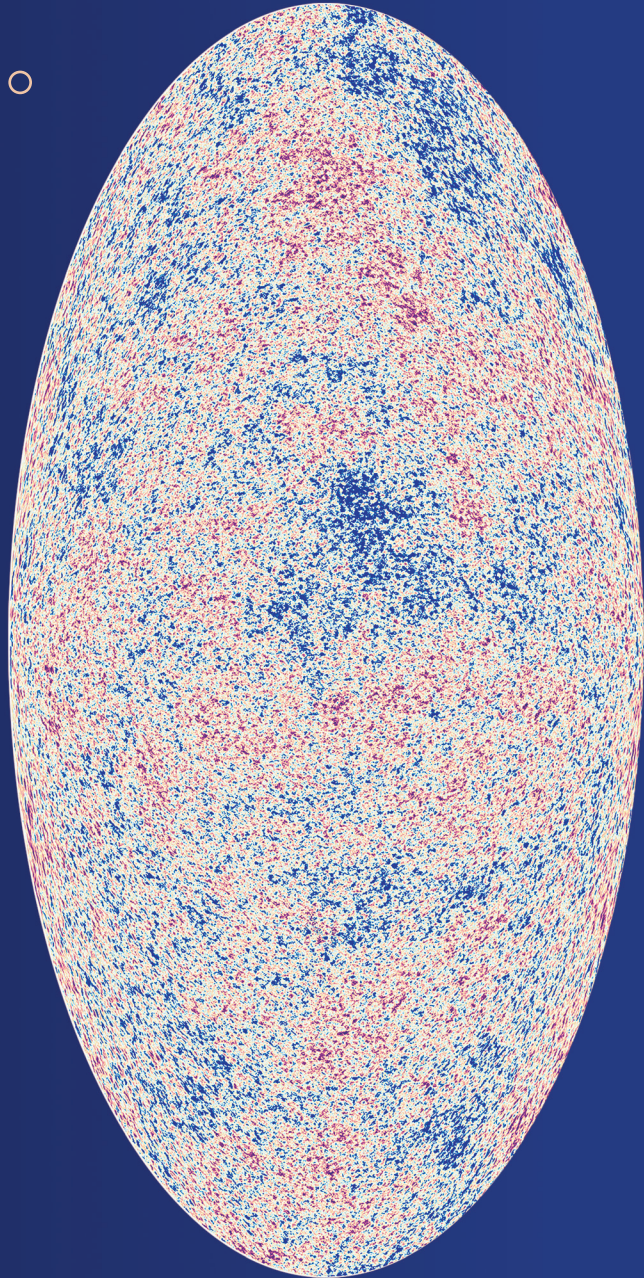
6

宇宙論は宇宙全体を 探究する学問



誕生後約37万年後の宇宙から
届く宇宙マイクロ波背景(CMB)
放射のイメージ

画像提供:ESAおよびPlanck
Collaboration



6.1 宇宙の年齢は130億歳を超えている

最新の観測と宇宙の初期進化に関する最先端の宇宙論モデルによる推定では、宇宙の年齢は約138億歳である。宇宙論とは、宇宙の進化と構造を研究する研究分野のことである。

6.2 宇宙は大きなスケールで見ると一様でかつ等方的である

非常に大きなスケール(ほぼ3億光年以上)で宇宙を見てみると、宇宙の物質は均等に分布しているように見える。密度は場所によらずほぼ一定で、どの場所でも同じような構造が見られるので、宇宙はどこを見ても(一様性)、どの方向を見ても(等方性)、ほぼ同じように見えるのである。

6.3 私たちは宇宙の過去しか観測できない

光の速度が有限であるため、天文学者は天体の現在の姿を見ることはできず、常に過去の姿を見ることとなる。例えば、太陽の光が私たちに届くまでには約8分かかるため、私たちが実際に見ている太陽は約8分前の姿である。また、アンドロメダ銀河の光が地球に届くまでには約250万年かかるため、私たちが見るアンドロメダ銀河は250万年前の姿である。このように、天文学者は常に過去を観測し、138億年前の宇宙までたどりつける。限られた空間範囲であっても、特定の距離にある天体を観測することにより、その距離に対応する時刻(年代)の宇宙の姿を垣間見ることができる。同じ時刻の宇宙は大きなスケールで平均すればどの場所でも同じ性質を持っているので、空間が限られているとしても、観測されたさまざまな年代の宇宙の姿は、宇宙全体の歴史を明らかにする貴重な手がかりとなる。

6.4 私たちが直接観測できるのは宇宙全体のごく一部にすぎない

光の速度は有限なので、宇宙の遠方にはまだ私たちが観測できない領域がある。その理由は、単にその遠方の領域からの光が地球の観測装置に届くのに時間が足りないからである。私たちに見えるのは、「観測可能な宇宙」と呼ばれる領域内の天体だけである。この領域は、宇宙がビッグバンで生まれてから現在までの間に地球に光を届けることが可能であったあらゆる天体で構成されている。とくに関心が持たれるのは、この領域のはずれにある天体である。それらは、生まれて間もない宇宙の姿を私たちに見せているのである。

6.5

宇宙は主にダークエネルギーとダークマターで構成されている

星や、私たちが呼吸する空気や私たちの体、そして私たちの周りにあるすべてのものは原子で構成されており、その原子は陽子、中性子、電子で構成されている。この私たちが日常生活で関わりを持つものがいわゆるバリオン物質である。観測的な証拠によると、バリオン物質は宇宙のエネルギー全体の約5%を占めるにすぎない。実際、宇宙は主にダークエネルギーという未知の形態のエネルギー（約69%）とダークマターという通常とは異なる形態の物質（約26%）で構成されている。いわゆるダークエネルギーとダークマターの性質は、特にそれらがバリオン物質に与える影響を観測することにより、活発に研究されている分野である。

6.6

宇宙は膨張しており、その膨張は現在加速している

宇宙は膨張しておりその膨張は現在加速していることが観測からわかっている。その原因はダークエネルギーだと考えられている。宇宙は全体として膨張しているため、銀河団同士は互いに離れつつある。宇宙論のモデルによると、銀河団相互間の距離はどれも普遍的なスケール因子と呼ばれる量に比例して増大する。遠くにある銀河ほど速い速度で私たちから遠ざかっていることが観測データから示されている（ハッブル・ルメートルの法則）。仮に他の銀河にいる異星人が観測していたとしても、同じことがわかるだろう。一方で、自らの重力によって束縛された系である銀河団や銀河群、そして銀河それ自身は、宇宙膨張の影響を受けない。銀河団や銀河群の中には、個々の銀河が互いの周りを回ったり、銀河同士が衝突したりすることもある。天の川銀河とアンドロメダ銀河もそのうち衝突すると考えられている。

6.7

宇宙の膨張によって、遠くの銀河から地球にとどく光は赤い方へ偏移する

宇宙の膨張は宇宙を飛び交う光の性質にも影響を与える。遠くの銀河から私たちに届く光は、私たちとの距離が遠くなればなるほど波長が伸びて赤くなる。これを赤方偏移という。この宇宙論的な赤方偏移は、宇宙が大きくなると共に光の波長が伸びるということで直接理解できる。遠くの銀河が放つ光が赤外線または電波でしか観測できないのも、宇宙マイクロ波放射がほとんどマイクロ波の波長域で地球に届くのも、この宇宙膨張による赤方偏移という現象のためである。

6.8

地上で知られた自然法則（万有引力の法則など）は宇宙全体でも成り立つように見える

地上で知られている重力（万有引力）、熱力学、電磁気力の法則などの物理学の法則が遠くの宇宙でも同じかどうかを確かめるため、多くの検証が行われてきた。これまでのところ、すべての検証で、物理学の基本的な法則が宇宙全体でも成り立っていることがわかっている。

6.9

宇宙の大規模構造は、フィラメント、シート、超銀河団、ボイドなどで構成される

銀河の大規模な赤方偏移サーベイの結果、数億光年単位の大きなスケールで見ると、宇宙には銀河の分布が作り出す糸状や面状の構造（フィラメントやシート）、さまざまなサイズの塊（銀河団や超銀河団）、巨大な空洞（ボイド）などからなる三次元のスポンジ状のクモの巣構造があることがわかった。天文学者はこれを「宇宙の大規模構造」あるいは「コズミックウェブ」と呼んでいる。複数の銀河団がフィラメントやシートでつながった超銀河団は何百万個もの銀河で構成されている。また、ボイドはフィラメントやシートに取り囲まれており、そこでは直径数億光年もの空間にこくわずかな銀河しか存在しない。宇宙の大規模構造は数十億光年より先まで広がっている。

6.10

宇宙マイクロ波背景放射によって私たちは初期の宇宙を探査できる

私たちが観測できる宇宙の最も遠い領域から発せられた最古の電磁波は、宇宙マイクロ波背景放射である。これは高温高密度の初期の宇宙が残したビッグバンのなごりであり、宇宙誕生の約37万年後の時点の情報が刻まれている。宇宙マイクロ波背景放射によって、私たちは宇宙に含まれるダークマター、バリオン物質、ダークエネルギーのそれぞれの量、さらには宇宙の形状や現在の宇宙の膨張率など、宇宙全体の主な特徴を測定することができる。宇宙マイクロ波背景放射は、宇宙のあらゆる方向から観測できることから、宇宙がほぼ等方であることを示しており、宇宙の一様性の間接的証拠ともなっている。

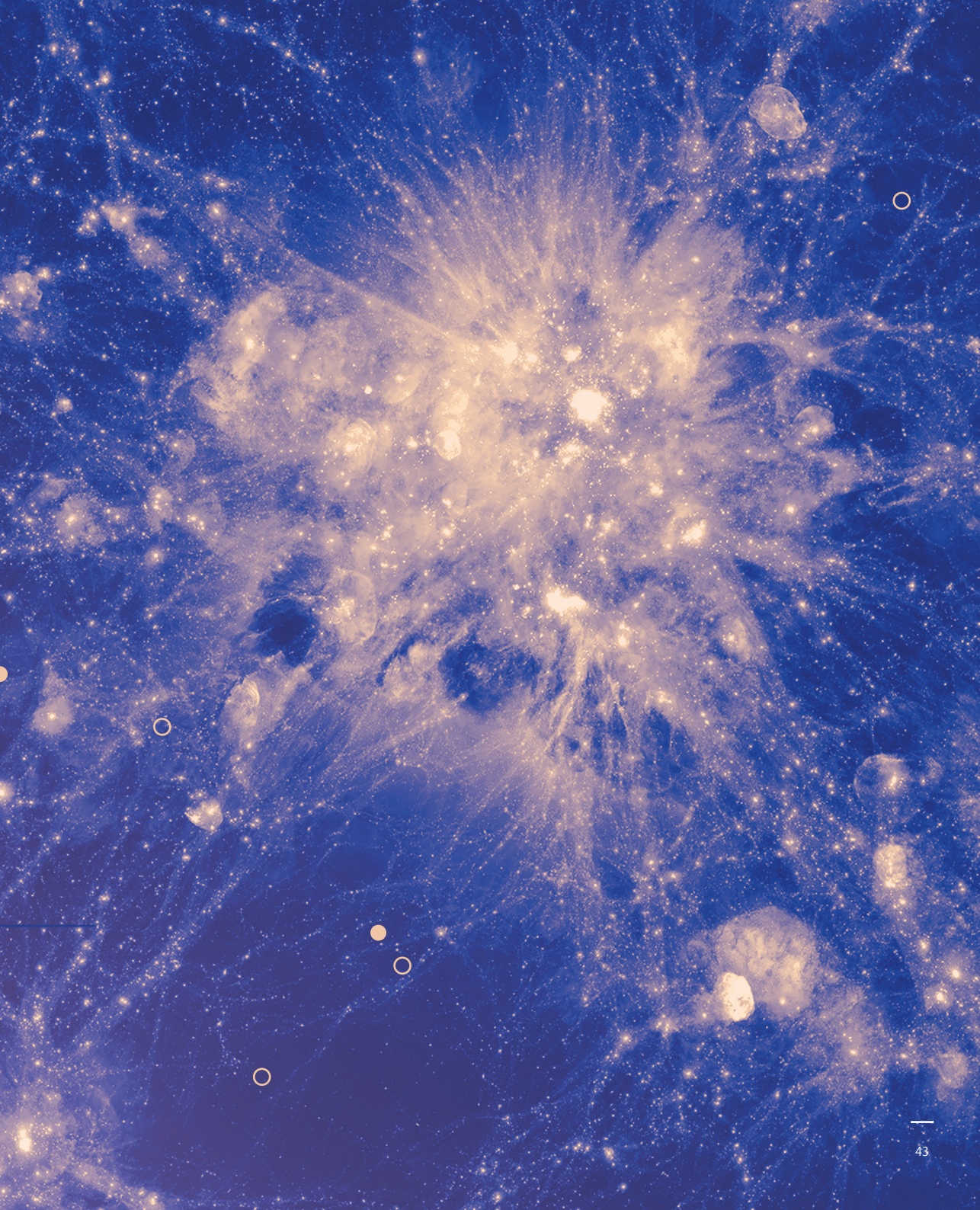
6.11

宇宙の進化はビッグバンモデルによって説明できる

入手可能な最良の観測的な証拠によると、私たちの周りにあるすべての物質とエネルギーは、約138億年前には原子より小さな空間に閉じ込められていた。宇宙はこのきわめて高温高密度の状態から現在の状態へと膨張したのである。高温高密度の初期状態をビッグバンといい、膨張する宇宙を表すモデルを Λ CDMモデルという（ Λ [ラムダ] は宇宙のダークエネルギー要素を表し、CDM: Cold Dark Matterは冷たいダークマターを表す）。すでに存在している空間（大きさは変わらない）に物質が拡散する通常の爆発と異なり、宇宙膨張では、はじめから物質で満たされた空間そのものが膨張するため、膨張とともにその空間内中の物質の平均密度が低下し続けることになる。銀河が形成されて以来、各々の銀河間の平均距離は広がり続けている。ビッグバンモデルには、現在の宇宙について多数の検証可能な予測があり、そのほとんどは観測データによって確認されている。

大規模な宇宙論シミュレーションにより示された宇宙の一部の進化の様子。ダークマターの密度にガスの速度を重ねている

画像提供:
The Illustris Collaboration



7

私たちは太陽系の中の
小さな惑星に暮らしている

トランシット1という恒星を周回
する数個の系外惑星のイメージ
図。トランシット1には、地球と近い
大きさの岩石惑星が少なくとも
7個ある。

画像提供：
ESO/M. Kornmesser



7.1 太陽系は約46億年前に形成された

隕石の放射年代測定により、太陽系の年齢を知ることができた。この約46億年という年代は、持ち帰られた月の石や地表で発見された最も古い岩石の年代測定の結果とも一致している。

7.2 太陽系は太陽、惑星、準惑星、衛星、太陽系外縁天体、彗星、小惑星、流星物質などで構成されている

太陽系の中心には太陽という恒星があり、他のすべての天体はその重力の影響を受け太陽の周りを回っている。これらの天体には、惑星とその衛星、準惑星、太陽系外縁天体、彗星、小惑星、流星物質などがある。太陽系の全質量の99.87%以上を太陽が占めている。

7.3 太陽系には8つの惑星がある

2006年の国際天文学連合 (IAU) の決議により、天体が惑星とされるには次の3つの基準を満たさなければならないことになった。1. 太陽の周りを回っていること。2. 十分大きな質量を持つためにほぼ球形になっていること。3. 自分の軌道の周囲から他の天体をきれいになくしてしまっていること。衛星以外で、最初の2つの条件は満たしているが、3番目の条件を満たしていない天体は、準惑星と呼ばれることになった。太陽系の惑星は、太陽に近い方から、水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星である。

7.4 太陽系外縁天体にはいくつかの冥王星型天体がある

準惑星はすべて地球の月 (直径約3500 km) より小さい。本書製作の2020年時点で準惑星は、冥王星、エリス、ハウメア、マケマケ、ケレスの5つである。準惑星はいずれも固体で、氷に覆われ、組成も似ている。ケレスのみ火星と木星の軌道の間にあるが、他の4つの準惑星は海王星の軌道より外のエッジワース・カイパーベルトで発見されており、太陽系外縁天体の仲間である。太陽系外縁天体のうち準惑星であるものは冥王星型天体という種族名で呼ばれている。

7.5 惑星には地球型 (岩石) 惑星と巨大ガス惑星がある

太陽に近い水星、金星、地球、火星の4つの惑星を地球型惑星という。これらの惑星はいずれも表面が固体で、岩石を主成分とする。地球と比べて金星は大気が濃く、火星は薄い。水星には大気はない。これら内側の小さい地球型惑星とは対照的に、巨大ガス惑星と呼ばれる、木星、土星、天王星、海王星の4つの外側の惑星 (木星型惑星とも呼ばれる) はとても大きい。巨大ガス惑星は主に気体 (水素とヘリウム) でできており、大気はきわめて濃い。巨大ガス惑星はすべて環を持っている。中でも土星の環は印象的で、小さな望遠鏡でも見ることができる。

7.6 数十個の衛星を持つ惑星もある

水星と金星以外の惑星は1つ以上の衛星を持っている。地球は太陽系で唯一、衛星を1つしか持たない惑星である。火星には2つの衛星がある。地球型惑星とは対照的に、巨大ガス惑星にはいずれも多数の衛星が周回している。木星と土星は、2019年までに確認されているだけで70個以上の衛星を持ち、天王星、海王星も衛星が多い。

7.7 地球は太陽を周回する第3惑星であり、月という衛星を持つ

私たちの地球は太陽から3番目に近い惑星であり、円に近い楕円軌道で太陽の周りを公転している。地球の大気は窒素と酸素が主成分で、地表の70%以上が水に覆われており、平均気温は約15℃である。月は地球の唯一の衛星であり、人類が足を踏み入れた唯一の天体である。

7.8 小惑星と太陽系外縁天体は太陽系形成時の残存物である

太陽系形成時の残存物である小惑星は主に、火星と木星の間の小惑星帯と、海王星の軌道より外のエッジワース・カイパーベルトに見られる。2006年の国際天文学連合 (IAU) の決議により、後者は太陽系外縁天体と呼ぶことになった。小惑星帯には百万個以上の小惑星があり、これらの小惑星の大きさは10 m程度から1000 km程度である。これらすべての小惑星の質量を合わせても地球の月の質量より小さい。太陽系外縁天体は2019年までに3000個以上見つかった。

7.9 彗星は氷を多く含む天体で、太陽に温められると尾を生じる

彗星は主に揮発しやすい氷でできているが、塵や岩石も含まれている。彗星が太陽に近づくとき太陽風と太陽放射によって氷が蒸発し二本の尾ができる。彗星の尾は、彗星の動く方向にかかわらず、いつも太陽と反対向きに伸びる。塵 (ダスト) からなる尾 (ダストの尾) は彗星の進む方向の反対側にやや曲がって伸び、何百万キロメートルにもなることがある。プラズマの尾は太陽と反対側にまっすぐ伸びるが、淡いので肉眼では見えにくい。彗星のほとんどは、海王星軌道の外側にあるエッジワース・カイパーベルトか、太陽系の周縁にあるオールトの雲からやってくると考えられている。

7.10 太陽の重力の影響は地球の1万倍以上の彼方まで及んでいる

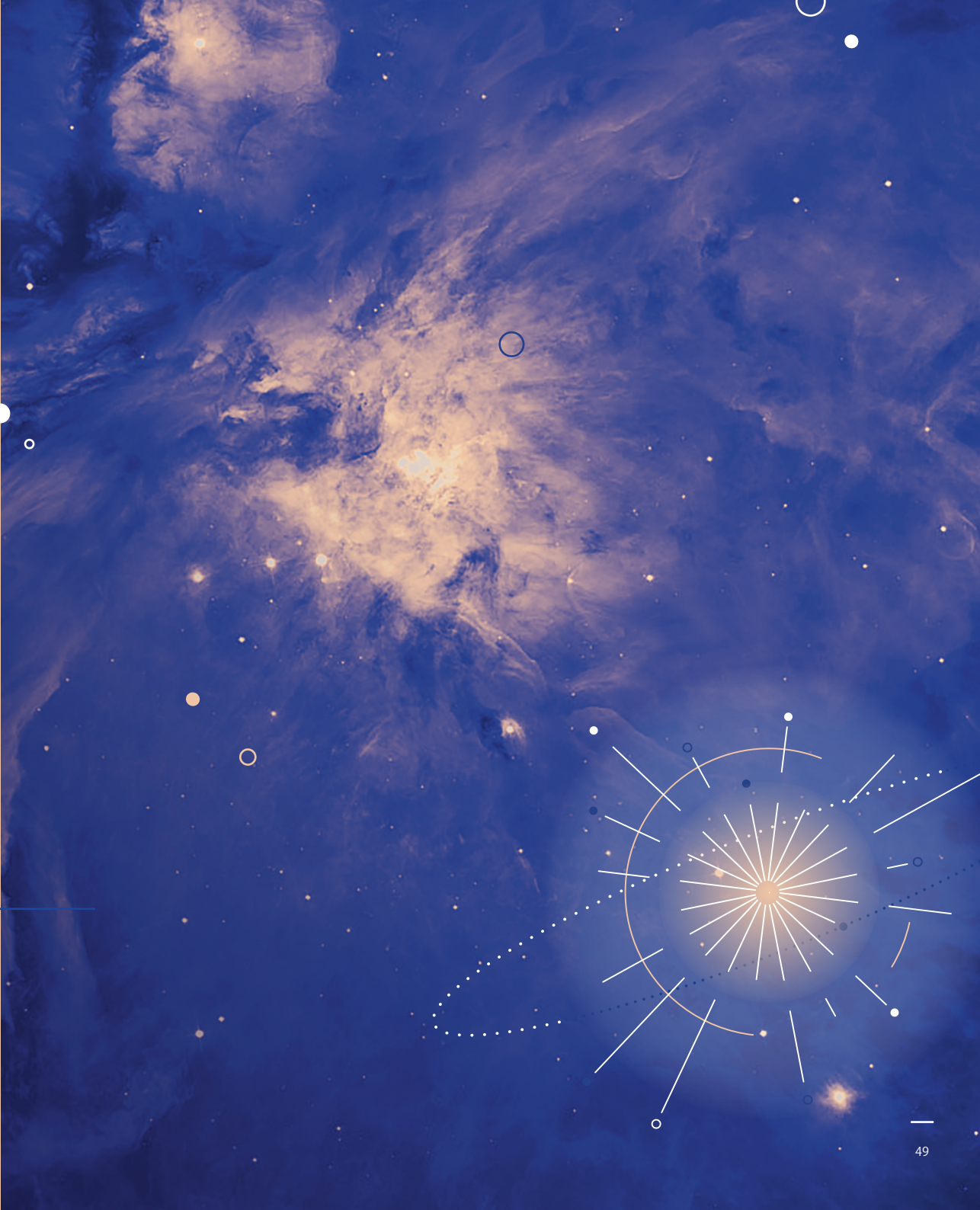
太陽系の端には唯一の定義はない。太陽の表面からは太陽風が放出され、磁場が遠方まで伸びている。太陽から出た太陽風が到達できる領域 (太陽圏) の端をヘリオポーズという。1977年に打ち上げられた探査機ボイジャー1号は、2012年に太陽から約100天文単位 (au) の位置で、人工物として初めてヘリオポーズを越えた。太陽圏の外側には太陽風はもはや到達できないが、太陽の重力圏としての太陽系は続いている。重力圏の端のあたり太陽から約1万-10万auの範囲には、オールトの雲と呼ばれる小天体が太陽を球殻状に取り囲んだ構造があると考えられているが、まだ観測的には確認されていない。



私たちはみな星屑
からできている

オリオン大星雲 (M42)。
約1500光年かあなたの地球に
最も近い巨大な星形成領域

画像提供: NASA, ESA, M.
Robberto (Space Telescope
Science Institute/ESA)
および Hubble Space
Telescope Orion Treasury
Project Team



8.1

恒星は内部で起きる核反応によりエネルギーを生成し自ら光を発する

恒星は、自らの重力によりまとまった高温のプラズマ（電子と原子核がほぼ分離したガス）からできている。恒星が輝き続けるためのエネルギーは、その中心で起きる核融合反応によって生成される。最初は陽子-陽子連鎖反応（質量の大きい恒星の場合は炭素-窒素-酸素のCNOサイクル）によって水素が融合してヘリウムとなり、やがてさらに重い元素へと融合していく。恒星は、中心部の核融合反応で解放されるエネルギーにより維持される圧力が、重力で潰れようとする力と釣り合った状態で安定を保っている。太陽と同じかそれ以下の質量を持つ恒星のほとんどは、数十億年、あるいは数百億年にわたり安定に輝き続ける。

8.2

恒星は分子雲の中で生まれる

巨大な冷たい塵とガスの雲（分子雲）の中で恒星が生まれる。分子雲の中で密度の高い部分が重力崩壊すると、中心部がさらに高温高密度となって分子雲コアが形成される。温度と圧力がある限界値を超えると核融合がはじまり、恒星が誕生する。この若い星は、最初は塵とガスでできた原始惑星系円盤に囲まれている。数百万年のうちに、この円盤から惑星や小天体ができる。

8.3

地球に最も近い恒星は太陽である

太陽は地球に最も近い恒星で、その赤道直径は140万kmあり地球のおよそ109倍である。太陽は地球に比べると巨大だが、宇宙にはこれよりもはるかに大きな恒星がある。例えば、超巨星おおいて座VY星は直径が太陽の約1400倍ある。おおいて座VY星を太陽系の中心に置くと、その表面は木星の軌道よりもさらに外側に位置する。一方、太陽よりもはるかに小さい恒星もある。太陽系に最も近い恒星であるプロキシマ・ケンタウリは、直径がおよそ20万kmの赤色矮星であり、地球の20倍にも満たない。

8.4

太陽は活動的な恒星である

太陽の表面は一見滑らかで一様に見えるが、暗い斑点が見えることがある。磁場が強いこの斑点を黒点といい、周りよりも少し温度が低いために黒く見える領域である。約11年の周期で、たくさんの黒点が見られる時期とほとんど黒点のない時期が繰り返す（太陽活動周期）。時々太陽の磁場がねじれて巻き付き、溜まったエネルギーが光や粒子として爆発的に放出されることがある。この爆発はフレアやコロナ質量放出と呼ばれる。しかし静穏なときでも太陽は、毎秒10億キログラムもの磁場を伴う高温のガスを外部に放出している。この太陽風は太陽系全体を吹き抜け惑星と相互作用する。他の恒星にもフレアや恒星風がある。

8.5

恒星の色からその表面温度がわかる

恒星の表面温度は摂氏数千度から5万度である。高温の星は電磁波スペクトルの青色から紫外線の領域（短波長）でエネルギーの大半を放射するため、肉眼では青みがかって見える。逆に温度の低い星は、電磁波スペクトルの赤色から赤外線領域（長波長）でエネルギーの大半を放射するため、赤みがかって見える。

8.6

恒星間の空間の大部分はほぼ真空だが、星を生む分子雲もある

恒星間の空間には、微量のガス、塵、高エネルギー粒子（宇宙線）などの物質が存在する。この物質を「星間物質」という。星間物質の密度はとても低いが、銀河のどの部分にあるかによってかなり異なる。しかし、星間物質が最も濃い分子雲内でも、大部分の場所は実験室で作り出す最高の真空状態より1000倍も希薄である。

8.7

恒星の一生は生まれたときの質量によってほぼ決まる

最も質量の大きい星（太陽質量の30倍程度以上）の寿命は1000万年以下である。一方、太陽程度の質量の恒星の平均的な寿命は約100億年である。太陽よりずっと質量の小さい赤色矮星は、数兆年も生きることができる。太陽と同程度の質量を持つ恒星は、やがて赤色巨星へと進化し、その後質量の大部分を宇宙空間に放出し、惑星状星雲に取り巻かれた後に、小さな白色矮星となる。太陽の8倍以上の質量を持つ恒星は、赤色超巨星に進化した後に超新星爆発と呼ばれる爆発現象を起こし、そのあとには中性子星または恒星質量ブラックホールが残る。

8.8

巨大な恒星が一生を終えると恒星質量ブラックホールができる

ブラックホールとは、その非常に強い重力場により、何も（光さえ）逃げ出すことのできない、「事象の地平面」に囲まれた宇宙空間の領域のことを指す。事象の地平面とはブラックホールを取り巻く境界面であり、そこではブラックホールの重力場を逃れるために必要な速度が光速となる。したがって、事象の地平面内に入ったものは再び外には出られない。理論モデルでは、ブラックホールの中心には物質の密度と時空のひずみが無限大に近づく特異点があると予想されている。恒星質量ブラックホールの質量は太陽の質量の数倍から数十倍に及ぶが、事象の地平面の半径は（質量によって）数kmから数10 kmにすぎない。

8.9

新しい恒星とその惑星系は、過去の星がその領域に残した物質から生まれる

水素、ヘリウムの大部分、少量のリチウムを除き、現在宇宙にある元素はすべて恒星の内部や恒星進化末期の諸現象で生まれたものである。太陽のように質量の小さい星は核融合により酸素までの元素を生成するが、質量の大きい星は酸素より重い鉄までの元素を作り出せる。鉄より重い金やウランなどの元素は、高エネルギーの超新星爆発や中性子星合体などによって作られる。星が死ぬ時にはその質量の大部分は星間空間へ放出され星間物質となる。この星間物質から新しい星が形成され、宇宙の再生プロセスが展開されてゆく。

8.10

人体は昔に存在した恒星で作られた原子からできている

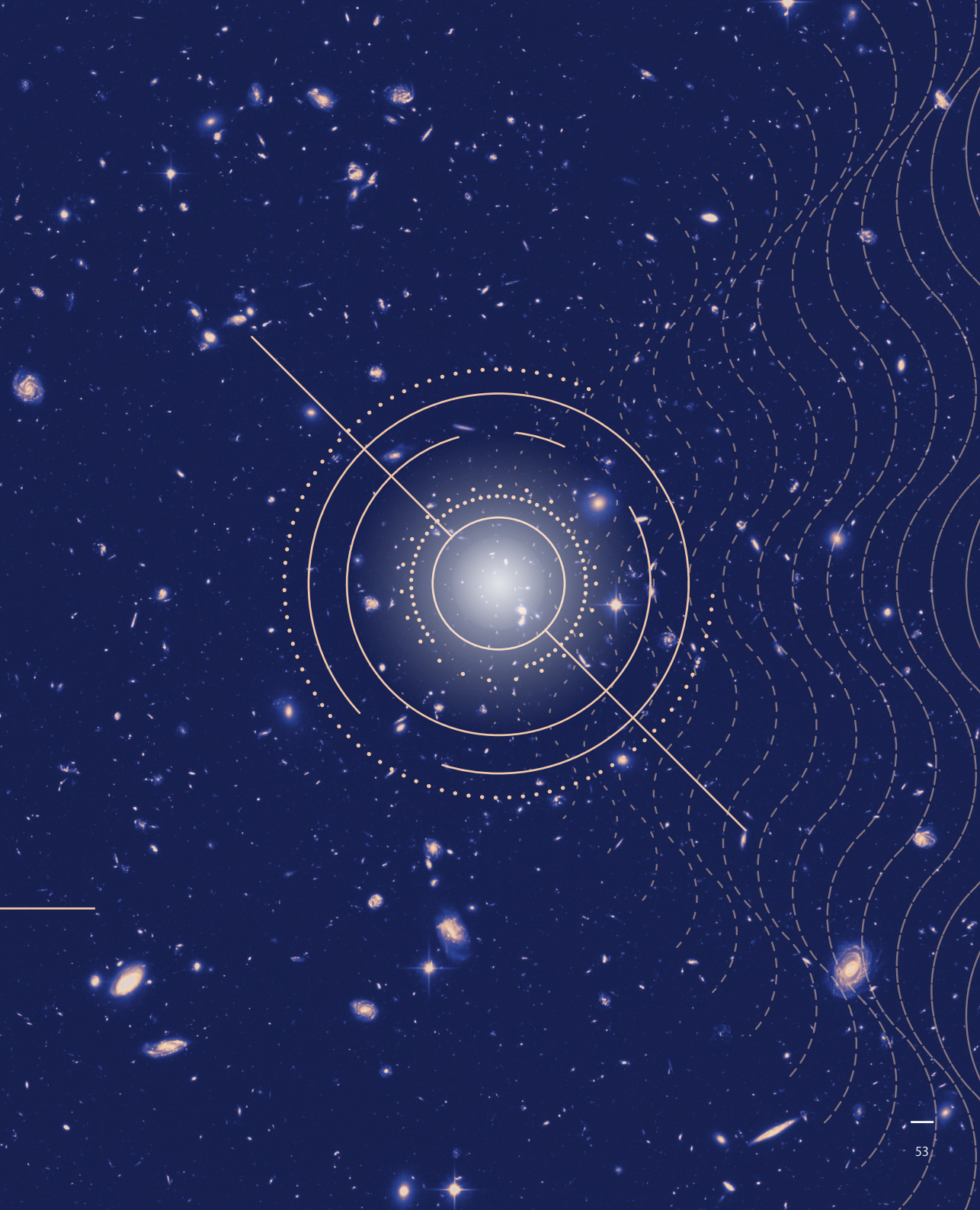
水素とヘリウム、およびごく少量のリチウム以外の元素は主に恒星内部と恒星進化末期の諸現象で作られ、星の一生の最終段階で宇宙に放出される。これは、骨のカルシウム、血液の鉄、DNAの窒素など、人体を構成するほとんどの元素の起源となる。同様に、人間以外の動物、植物、および私たちの周りにあるほとんどのものを構成する元素は、数十億年以上前に恒星によって作られたものである。

9

宇宙には何千億もの銀河がある

ハッブル・ウルトラ・ディープ・
フィールド — 満月の直径の
約10分の1ほどの狭い領域に
1万個近い銀河が見つかった

画像提供：
NASA, ESA, S. Beckwith
(STScI) およびHUDF Team



9.1 銀河は恒星、塵、ガスでできた大きな天体である

銀河には数百万から数千億の恒星があり、お互いの間に働く重力によってまとまっている。銀河の星は星団に属しているものもあるが、大半は銀河全体にばらばらに分布している。銀河には恒星の残骸、塵、ガス、ダークマターなどもある。多くの銀河の中心には超大質量ブラックホールがある

9.2 銀河には大量のダークマターがあると思われる

ダークマターは、電磁波を出さず、また電磁波と相互作用もしない仮説上の物質であり、観測によって直接見ることはできない。ダークマターは見ることはできないが質量を持つので、目に見える物体への重力的な影響からその存在が推測される。例えば、天体の動きや重力レンズ効果による形の歪みなどがそういった影響である。銀河は星の円盤やハローよりずっと大きなダークマターハローに覆われている。私たちが見ている銀河は氷山の一角にすぎないと言える。

9.3 銀河は誕生後も成長する

宇宙の誕生後、数億年の内にダークマターは密度の大きなたくさんのかたまりになった。これをダークマターハロー（または暗黒ハロー）と呼ぶ。ダークマターハローにはその重力で水素とヘリウムガスが引き込まれ、最初の恒星が誕生し、そして最初の銀河が形作られた。大きな銀河はその強い重力でたくさんの小さな銀河を引き寄せ、取り込み、天の川銀河のようなさらに大きな渦巻銀河に成長した。大きな銀河はさらに衝突と合体を繰り返し、巨大な楕円銀河になったものもある。銀河の中で誕生する星の数は、原料となるガスの量と、爆発する恒星や銀河中心の活動によるガスの加熱の度合いによって変わる。

9.4 銀河には、渦巻銀河、楕円銀河、不規則銀河の3つの主要タイプがある

銀河は、その見かけの形から、渦巻銀河、楕円銀河、不規則銀河に分類される。これらのタイプは形だけでなく、構成する成分にも違いがある。渦巻銀河には平たい渦巻状の腕があり、その渦巻腕は主に明るく輝く若い星や、大量のガスと塵で作られている。一方、楕円銀河にはガスが少ない。楕円銀河の星はほとんどが年老いており、楕円体または球状に分布している。これらの標準的な2つのタイプに該当しない銀河は不規則銀河と呼ばれる。矮小銀河の大半は不規則銀河である。

9.5

私たちは天の川銀河(銀河系)と呼ばれる渦巻銀河に住んでいる

天の川銀河は中心に棒状の構造を持つ渦巻銀河である。太陽系は天の川銀河の中心から約2万5000光年離れた渦巻腕の中にある。天の川銀河では直径約10万光年、厚さわずか約2000光年の円盤に星が分布している。この円盤では若い星や塵が渦巻腕を形作っている。天の川銀河の円盤部分には1000億もの星がある。星空のきれいな場所で空を見上げると、その星々のほんの一部が夜空を横切るようにぼんやりと白い帯(天の川)となって見える。天の川は私たちの住む天の川銀河を内側から見たものである。

9.6

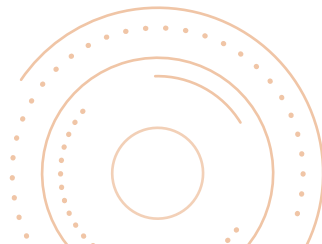
銀河の渦巻腕はガスと塵が集まってできる

渦巻腕はなぜできるか。それを説明する有力な理論の一つが密度波理論である。その理論によると、密度の少し高い場所が渦巻状のパターンを作って銀河の円盤の中を波のように動くと、交通量の多い高速道路で渋滞が起きるのと同じように恒星や、ガス、塵がパターンの中に集積する。このため、さらに密度が高くなり渦巻状の腕のように見える。この高密度の領域には新しい星の誕生に必要な大量のガスと塵がある。そのため、渦巻腕では星の誕生が盛んで、若く明るい星がたくさんある。

9.7

ほとんどの銀河の中心には超大質量ブラックホールがある

平均的な大きさの銀河にはおよそ1億個の恒星質量ブラックホールがあると推測されている。そのような恒星質量ブラックホールは大質量星の超新星爆発により作られる。また大半の銀河には、その中心に超大質量ブラックホールがあり、その質量は、太陽の数百万倍から10億倍以上と言われている。天の川銀河の中心には、太陽の約400万倍の質量を持つブラックホールがある。約6千万光年彼方にある巨大楕円銀河M87の中心にあるブラックホールに対して、世界中の8つの電波望遠鏡のデータを結合して、2019年に初めて事象の地平面のシルエット画像が得られた。



9.8 遠くにある銀河の観測は難しい

天の川銀河に最も近い銀河はおおいぬ座矮小銀河で、約2万5000光年の距離にある。しかし他の銀河はこれよりずっと遠くにある。遠くの銀河はごくかすかにしか見えないため、観測することが難しい。遠くの銀河の像をとらえるには、分解能が高い大型の望遠鏡を使い、長い時間をかけてたくさんの光を集める必要がある。

9.9 銀河は集団を形成している

銀河は宇宙全体にまんべんなく散らばっているわけではない。むしろ、銀河はほとんどが銀河群や銀河団のメンバーである。銀河団は、数百、あるいは数千もの銀河が互いの重力によってまとまっている銀河の集団である。複数の銀河団が集まって超銀河団というさらに大きな構造を形作っている。天の川銀河は、50個以上の銀河からなる局所銀河群という集団のメンバーである。局所銀河群はおとめ座銀河団の端の方にあり、おとめ座銀河団はおとめ座超銀河団に属している。さらにおとめ座超銀河団はラニアケア超銀河団のメンバーである。

9.10 銀河は重力によって相互に影響を及ぼす

銀河同士の相互作用は、その外見や進化に影響を及ぼす。かつて、銀河は年齢と共に別のタイプに変わるのではないかと考えられていたが、最近の科学成果によると、重力の相互作用によって銀河のタイプが変化する場合もあることがわかってきた。例えば、巨大な楕円銀河は大きな銀河が合体してできたと言われている。また銀河同士の合体は一挙に星が誕生する原因となっている。

ケンタウルス座Aのカラー合成画像
— 銀河中心の活発なブラック
ホール周辺から飛び出すジェット
の先にローブ(丸い突出部)が見える

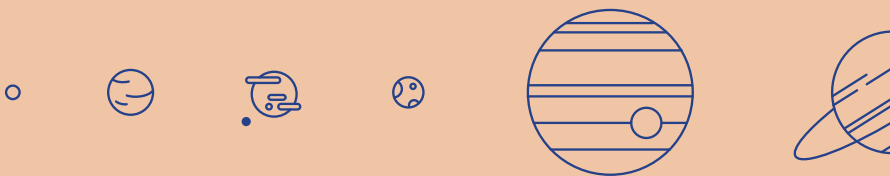
画像提供: ESO/WFI (I 光学)、
MPIFR/ESO/APEX/A. Weiss et
al. (サブミリ波)、NASA/CXC/
CfA/R. Kraft et al. (X線)





10

宇宙にいるのは私たち
だけではないかもしれない



探査機カッシーニが約15億km
離れた土星のそばから撮影した
画像。
地球と月(矢印)を愛おしんでい
るかのように見える。

画像提供: NASA/JPL-Caltech/
Space Science Institute



10.1 地球外で有機分子が発見されている

有機分子には私たちが知る生命の基本材料となる炭素が含まれている。星間物質の観測により、宇宙空間にアミノ基を含む有機分子が存在することがわかった。彗星や隕石ではアミノ酸も検出されている。これらの分子は、太陽系が形成されるもとなったガスや塵の中に既に存在していた可能性が高い。

10.2 地球には極限環境でも生き延びる生物がいる

地球上のほとんどの生命は環境条件に敏感だが、一部の有機体、極限微生物は極端な条件下でも生き延びることがわかってきた。このことは、従来は生命が存在しそうにないと思われた場所でも生命が存在する可能性があることを示唆している。これらの有機体は、幅広い温度、圧力、pH、放射線被曝に強い耐性を持っている。それらの生物は砂漠、極地、深海、地殻の中、さらには火山の中ですら生息するものもある。知られている最も耐性の高い生物は、真空状態でも生き延びることができる。こうした事実から、地球に比べて環境の厳しい他の惑星や衛星に生物がいる可能性について、従来よりも楽観的な考えも出てきている。

10.3 液体の水の痕跡らしいものがあることから、かつて火星に生命が存在した可能性がある

私たちが知っている生命の発達にとって、液体の水の存在は重要な要素である。このため、地球以外の他の惑星やその衛星で液体の水を探すことが、地球外生命の探査において重要な目標となっている。火星に水があるかないかは長らく論争的であり、何年も前から水の流れた痕跡かも知れないものが発見されている。火星に現在水があるという証拠の信頼性については多くの議論があるが、この痕跡は、単純な形の生命がかつて存在したかもしれないという考えを支持する。もし火星の地下深くに液体の水があれば、そこに生命が存在する可能性がある。

10.4 太陽系の衛星の中には生命が存在する条件が整っていると見られるものもある

太陽系の巨大ガス惑星を周回する多くの衛星の中には、大気が濃く火山活動が活発など、地球型惑星と似通った特質を持つものがある。木星の四大衛星の一つ、エウロパは表面が氷で覆われた衛星である。その氷の下には液体の海が存在していると考えられている。この海は単純な生命体が存在するのに適した環境であると学者たちは考えている。他にも単純な生命体がいる可能性がある天体が、土星最大の衛星タイタンである。タイタンは複雑な有機化合物が豊富で、大気も濃く、地表に液体のメタンがあることが確認されており、地下に液体の水でできた海があるという仮説が立てられている。

10.5 太陽以外の恒星を周回する太陽系外惑星(系外惑星)と呼ばれる惑星が多数存在する

太陽以外の恒星を周回する太陽系外惑星(系外惑星)が初めて発見されて以来、何千もの系外惑星が発見されてきた。発見される系外惑星の数は加速度的に増え続けており、現在では太陽系に近い距離にある系外惑星については、特徴に基づいて分類ができるようにすらなった。

10.6 太陽系外惑星はきわめて多様で、一つの恒星に複数の惑星が発見されることも多い

太陽系外惑星は幅広い物理特性や軌道特性を持っている。その質量は水星程度から木星の数倍まで、半径は数百kmから木星の半径(約7万km)の数倍のものまである。太陽系外惑星には、数時間と短い公転周期のものもあれば、太陽系の彗星のように非常に細長い軌道を持つものもある。太陽系外惑星は二つ以上の惑星系になっているものもかなり発見されている。

10.7 地球に似た惑星が発見される日も近い

検出方法の精度が高まったことによって、地球より質量が小さいものや、大きさも地球の半分くらいの系外惑星を発見できるようになった。これまでの限られた探査の中でも、太陽系近くの恒星に惑星が豊富にあることがわかっている。これらの惑星の中には、主星の周りのハビタブルゾーン(生命居住可能領域)の中を周回するものもある。ハビタブルゾーンとは、主星から適当な距離にあることで惑星の地表に液体の水が存在できる領域と定義されている。

10.8 科学者は地球外知的生命体を探している

地球外文明を探査する方法の一つは、既知の天文現象によって自然に発生しない信号を探すことである。そのような信号の系統的探査プロジェクトが地球外知的生命体探査(Search for Extraterrestrial Intelligence: SETI)である。これまでのところ、そのような信号は発見されていないが、SETIのアンテナは空をスキャンし続け、地球の人類を超えるほど進化した生命体の手がかりを探している。

11

宇宙で唯一の故郷である
地球を守ろう

国際宇宙ステーションから見た
地球の夜景。韓国と日本の
人工光が見える

画像提供・NASA



11.1 光害は人間だけでなくその他多くの動植物に悪影響を与える

地球上の生命は、長きにわたり人工光がない状態で発達し、さまざまな生物種のほとんどは昼または夜の活動に適応してきた。電気が発明されると、人間は次第に人工光で夜の暗さを奪い、深刻な光害問題を引き起こしてきた。光害は地球環境、動物の行動、そして人体の健康に多くの影響を与えている。野生動物の大半は、昼の明るさと夜の闇に頼って生活している。生理機能と生殖機能から空間的定位能力と捕食能力まで、人工光によって地球全体で野生動物の生活が破壊されている。私たちは祖先が享受した暗い夜空を失いつつある。多くの都市部や郊外の環境では、夜に天の川を見ることはほぼ不可能である。

11.2 地球を周回する軌道上には人間が作った宇宙ゴミ（スペースデブリ）が大量にある

人類は宇宙技術の発展とともに、ロケットを使って宇宙にさまざまな物体を送り込むことができるようになってきた。宇宙探査時代の幕開け以来、ロケットや古い人工衛星の破片など、人間が宇宙に残したスペースデブリの数は急増している。現在、宇宙ごみとも呼ばれる推定50万個ものデブリが地球を周回している。宇宙ごみは高速で移動しているため、宇宙船や人工衛星に衝突すれば深刻な損害が生じるおそれがある。国際宇宙ステーションやその他の有人宇宙船にとっては特に危険が大きい。スペースデブリの監視技術、および不要となった人工衛星とスペースデブリの回収技術は活発な研究開発が行われている分野である。

11.3 私たちは、地球上の生命にとって危険となりうる天体を監視している

太陽系形成の初期段階においては、新たに形成された惑星にたびたび小惑星などの小天体が衝突していた。地球上のいくつかのクレーターや月に多数見られるクレーターは、そのような衝突が大きな危険をはらんでいる直接的な証拠である。まだ研究と議論の段階ではあるが、約6500万年前に、空を飛ばない恐竜とその他多くの生物種が絶滅したのは巨大隕石が地球に衝突したためと考えられている。現在、これほどの規模の衝突が起こる可能性はきわめて低いが、地球上の生命にとって脅威となりうる天体をすべて監視することが重要である。今後数年以内に、宇宙機関、天文台、その他の機関による監視プログラムにより、危険が潜在する直径1 km以上の全ての小惑星を特定できるようになる。現在、地球と衝突する進路を取る既知の小惑星はない。

11.4 人間は地球環境に重大な影響を与える

産業社会は私たちに多くの利点をもたらしたが、同時に地球にいくつもの環境問題を引き起こしている。私たちは、森林破壊や河川・海洋・大気汚染によって、地球上の生命に必要な清浄な空気や食物や水の大切な供給源にダメージを与えている。人類は多くの生物種を絶滅させ、危機に瀕した環境の中で鉱物やエネルギー資源を求め掘削を続けている。人類が引き起こした気候変動（地球温暖化）は地球規模で私たちの環境を変え、私たち人類と多くの生物種を危険にさらしている。

11.5 気候と大気は人間の活動によって大きな影響を受ける

大気がなければ、この地球は氷に覆われ、平均気温は-18℃となる。しかし、大気中の温室効果ガスが地面からの熱放射を部分的に吸収して地表に戻すため、地球は居住可能な環境になっている。人間の活動によって地球大気中の主要な温室効果ガスの濃度が大幅に上昇し、地球のエネルギー収支のバランスが崩れている。温室効果ガスの増加によってより多くのエネルギーが地球に閉じ込められ、平均気温が上昇している。地球は自然の仕組みを通してこの余分なエネルギーを外へ放射できない。そのため、エネルギーの不均衡により、地球規模の気候変動が生じている。

11.6 私たちの地球を守るには「グローバルな視点」が必要である

私たち一人一人がこの地球の住人である。集団の一員として、また個人として地球規模の問題を解決するために誰もが行動できることを理解する助けとなるのは、地球を全体として管理する責任という概念である（グローバルな視点）。私たちの子孫のために地球を残す必要がある。私たちが現在確実に知る限りでは、地球は宇宙で生命を維持できる唯一の惑星である。

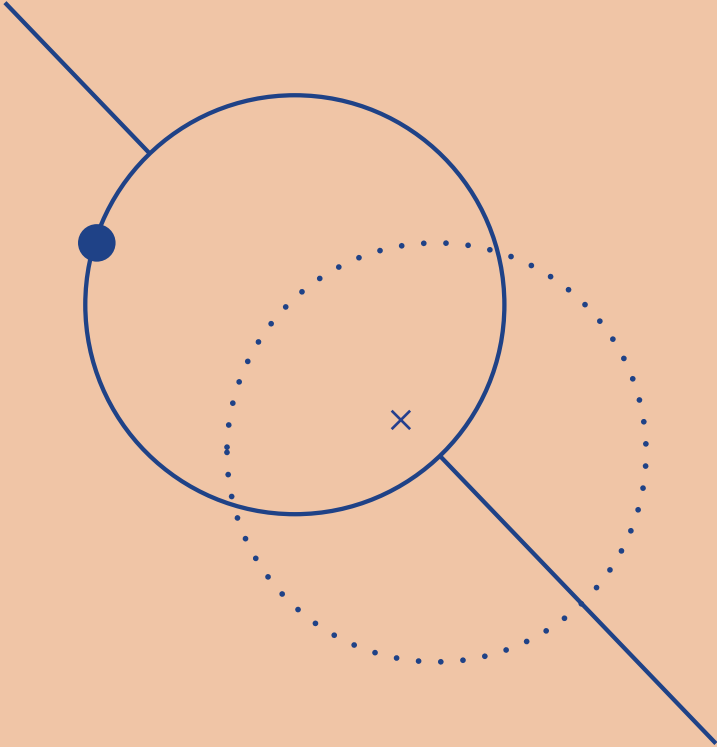
11.7 天文学は「ユニバーサルな視点」を提供し、私たちが地球市民として結束させる

地球上のすべての人はひとつの空の下に生き、宇宙の奥深さについての見方を共有している。1972年にアポロ17号から撮影された「ブルー・マーブル (Blue Marble)」(青いビー玉)と呼ばれる地球の写真は、あらためて「私たちみんなの宇宙船」に対する理解を深めさせてくれた。宇宙から見ると、個々の国の間の国境は全く見えない。ボイジャー2号やカッシーニなどの宇宙船からの画像に見られる地球は、この広大な宇宙の中のほんの小さな点「ペイル・ブルー・ドット (Pale Blue Dot)」(淡く青い点)にすぎない。宇宙から地球を見るこのようなユニバーサルな視点(宇宙的な視点)は、子孫に地球を残すために私たちが地球市民として結束することの必要性を教えてくれる。

x

x

x



x

x

x

x

x

x

ビッグアイデア 一天文学の主要概念—
日本における天文学リテラシーの定着を目指して

日本語版 (2020年4月)

監訳・編集： 一般社団法人日本天文教育普及研究会

縣 秀彦	浅見奈緒子	市川 隆	岡村定矩
亀谷和久	鷹野重之	俣俣裕子	津村耕司
富田晃彦	松本直記	矢治健太郎	八巻富士男

作 成： 国立天文台天文情報センター
国際天文学連合国際普及室

本冊子の作成に当たっては、日本の教育現場でより有効に使えるように配慮して、原文を和訳するだけにとどまらず、若干の文章や用語の加除、有効数字桁数の統一、最新の数値への改訂などを行った。そのような対処をしたおもな項目は以下である。
2.2, 2.7, 3.2, 4.7, 4.8, 5.8, 6.5, 6.7, 6.9, 6.10, 7.2, 7.4, 7.8, 7.10, 8.2, 8.3, 9.3, 9.6, 9.8, 9.9, 10.6, 11.7

本冊子のPDF版は、国際普及室 <https://www.iau.org/public/> 及び、日本天文教育普及研究会 <https://www.tenkyo.net/> から自由にダウンロードしてご利用ください。

英語版ダウンロード先： <https://www.iau.org/news/announcements/detail/ann19029/>

