宇宙図

宇宙が生まれたから元素が生まれた。そこから人間が生まれ、そして科学が生まれた。

宇宙とはなんだろうか？

宇宙とは、すべての物質的存在を含んだ時間と空間の広がりです。私たちや、私たちが目にする景色、そこに生きる動物や植物は、すべて宇宙の一部です。夜空に輝く星々や、そのあいだに淡く広がる天の川、巨大な望遠鏡でしか見ることのできない遠くはるかな銀河も、すべて宇宙の一部です。私たちの知るすべてを含み、さらにそのかなたへと広がっているもの、それが宇宙なのです。

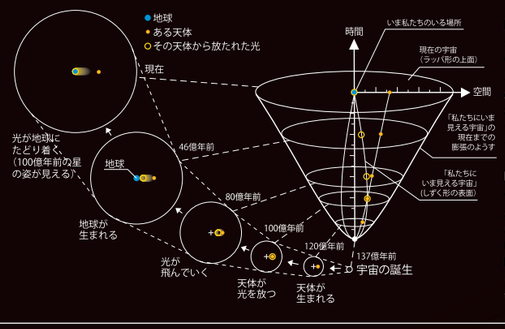
科学とはなんだろうか？

科学とは、宇宙に含まれるすべてのモノやコトを理解するための方法です。私たちが何か不思議なことに気がついたときの「なぜ？」という自然な問いかけは、科学への第一歩です。興味をもった対象を実験や観測で調べ、より深く理解することは、科学する行動です。その過程で新しい見方や考え方に気づくなら、それは科学的発見です。私たちが宇宙を知る方法、それが科学なのです。

宇宙図の見方

4つのルールで、宇宙を感じてみよう

この「宇宙図」は、最新の研究や観測にもとづく宇宙の姿を、私たち人間を中心にして描いたものです。縦方向には、人間からさかのぼって宇宙の誕生までの「時間の流れ」が表され、横方向には、宇宙の「空間の広がり」が表現されています。全体のラッパのようなかたちから、宇宙は生まれてからずっと、膨張（ぼうちょう）を続けていることがわかります。この宇宙図は、あなたがはるかな時間と空間を旅するためのガイドマップ。4つのルールを味方につけ、あなたの眼で、宇宙の姿にせまってみてください。



ルール1 宇宙を見ることは、昔を見ること

不思議なことに、地球から宇宙をながめると、そこに見えるのは昔の宇宙の姿です。例えば私たちに見える太陽は、8分ほど昔の姿。すばる（散開星団M45）は400年ほど昔の姿なのです。なぜ、そんなことが起こるのでしょう？ 私たちにものが見えるのは、そこから発した光が、私たちに届くから。けれど宇宙の星々はとても遠いので、光でさえやってくるのに時間がかかります。そのため、こちらに届くころには、その光が伝える星の姿はもう「昔の姿」になってしまっているのです。

ルール2 見える宇宙と見えない宇宙がある

宇宙図の中心に描かれた私たち人間の前後左右には、「現在の宇宙」が広がっています。しかし私たちに、その宇宙の姿は見えません。ルール1を忘れずに。見えてくるのは、昔の宇宙なのです。私たちが肉眼や望遠鏡で捉えることのできる天体をこの宇宙図に並べていくと、図の中心にあるような、きれいなしずく形の表面になります。宇宙のこの部分だけを、私たちの眼は見ています。またそれぞれの天体は、何千年前、何億年前と、違う時代の姿を私たちに見せているのです。

ルール3 宇宙では、遠くの距離は要注意

天体までの距離を表す時によく使われるのが、「光が旅をしてきた道のり」です。例えば、私たちに見える宇宙の中で一番遠くからきた光は、137億年をかけて「137億光年」の距離を旅してきました。しかしその長い旅の間にも宇宙は広がり続けたため、光が進んでなければいけない道のりは、スタート時点よりもどんどん伸び、光が放たれた場所自体も、はるかに遠ざかってしまいました。光が届いた現在、その場所は、もう私たちから470億光年のかなたに離れていると推測されています。

ルール4 宇宙は「科学の眼」で見えてくる

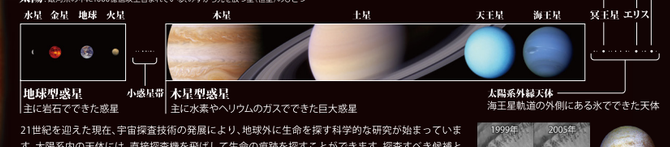
私たちに見える宇宙は、広大な宇宙の、ほんのひとしずくです（しずく形の表面）。しかし「科学の眼」は、それを手がかりに、さまざまなことを明らかにしてきました。私たちに見える宇宙が、どうやって誕生したのか（ラッパ形の底の部分）。それがどのように広がってきたか（ラッパ形の表面のかたち）。そしてラッパ形の向こうにも、宇宙は遠く広がっているという可能性。この宇宙図には、そうした科学的発見の成果がたくさんに詰まっています。宇宙は、あなたに読み解かれるのを待っています。

太陽系天体に生命を求めて

私たち人間の住む地球以外に、この宇宙に生命は存在するのでしょうか？ まずは私たちに身近な太陽系の天体たちから、その可能性を探ってみましょう。太陽系は、大きさも環境もさまざまに異なる、数多くの天体からなっています。

太陽系の天体＝太陽、8つの惑星、冥王星型天体、衛星、小惑星、彗星など

太陽：銀河系の中に1000億個以上含まれている、みずから光を放つ星（恒星）のひとつ



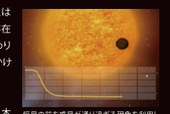
21世紀を迎えた現在、宇宙探査技術の発展により、地球外に生命を探す科学的な研究が始まっています。太陽系内の天体には、直接探査機を飛ばして生命の痕跡を探すことができます。探査すべき候補と考えられているのは、地下に液体の水があるかもしれない火星や、表面を覆う氷の下に海が広がっている可能性のあるエウロパ（木星の衛星）など。知的生命体や進化した生物の可能性はほとんどありませんが、いつか地球の微生物のような存在が、これらの天体で発見される日がくるかもしれません。

もうひとつの地球を探して

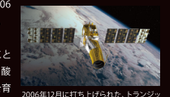
太陽系の外に広がるはるかな宇宙にも、生命は存在するのでしょうか？ 恒星は生命の住む環境とは考えにくいので、太陽系外に生命を探すには、まず「太陽系外惑星」を探す必要があります。その存在が初めて確認されたのは、比較的最近の1995年のこと。以来、天文学者たちは、惑星が恒星のまわりを公転することで恒星がわずかにふらつく運動や、惑星が恒星の前を通り過ぎる際に、恒星が見かけ上少し暗くなる現象などを手がかりに、200個以上の太陽系外惑星を発見しています。

しかし、もうひとつの地球と呼べるような惑星は、まだ見つかっていません。これまでの観測では、木星型の大きな惑星は数多く発見されたものの、地球のように小さな惑星は見つけることができなかったのです。そこで、専用の望遠鏡を備えた人工衛星がいくつか計画され、その中のひとつが2006年に打ち上げられました。宇宙から地球型惑星を探す取り組みが、いよいよ始まろうとしています。

太陽系外の天体はあまりに遠いため、地球型惑星が見つかったとしても、探査機を直接飛ばすことはできません。そこで、惑星の環境や大気組成を地球から観測して、液体の水の存在を調べたり、酸素やオゾン、クロロフィルなど生物が作り出す物質（バイオマーカー）の痕跡を探して、そこが生命を育む環境かどうかを調べる方法が考えられています。今後のさらなる研究によって、地球のような惑星や地球型の生命が、宇宙の中で普遍的な存在かどうかが明らかになっていくことでしょう。



恒星の前を惑星が通り過ぎる現象を利用した、太陽系外惑星探査の方法（トランジット法）



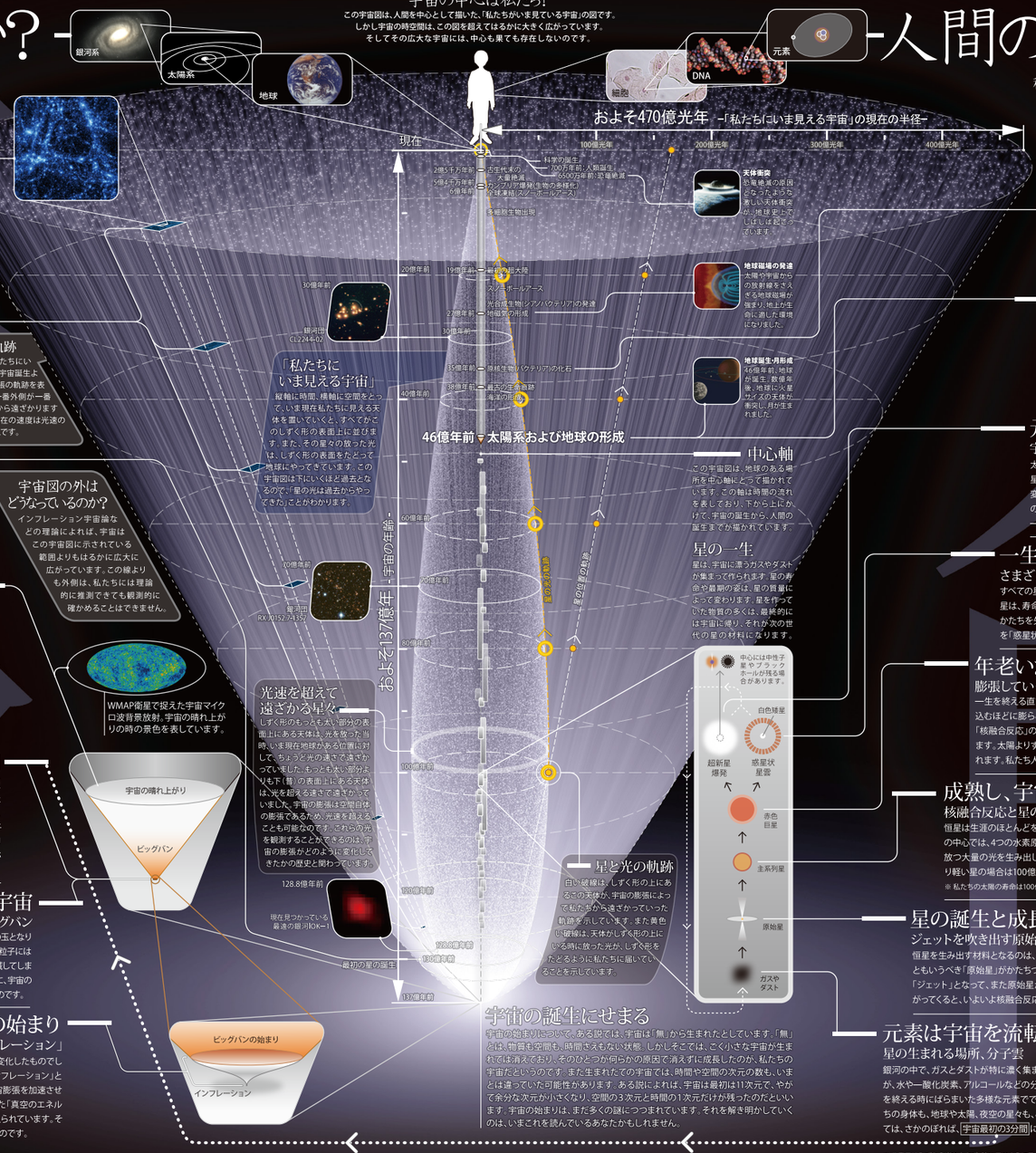
2006年12月に打ち上げられた、トランジット法で地球型の太陽系外惑星を探す人工衛星COROT

宇宙はどのように生まれたのか？

私たちをとりまく広大な宇宙。この見渡す限りの大宇宙は、かつては目にも見えないほどの小ささでした。現代の科学は、私たち人間を生み出した宇宙の謎にせまり、宇宙創世の驚くべきシナリオを明らかにしつつあります。137億年のはるかな宇宙の歴史を、その誕生の瞬間までさかのぼってみましょう。

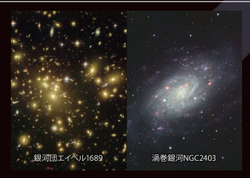
宇宙の中心は私たち？

この宇宙図は、人間を中心として描いた、「私たちがいま見ている宇宙」の図です。しかし宇宙の時空間は、この図を超えてはるかに大きく広がっています。そしてその広大な宇宙には、中心も果ても存在しないのです。



現在の宇宙の姿

暗黒の中に輝く星々



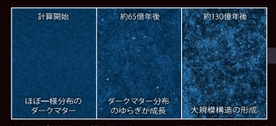
最新の観測が明らかにした宇宙の姿。それは、宇宙を構成する成分の7割以上が宇宙膨張を加速させる謎のエネルギー「ダークエネルギー」、2割以上が正体不明の物質「ダークマター」であり、普通の「元素（※）」は4%程度である、というものでした。この宇宙には、星が数百億、数千億集まっている銀河や、銀河が数百個、数千個も集まっている銀河団、さらに何億光年にもまたがった銀河の網の目状の構造「大規模構造」など、多様な階層構造が存在していることもわかってきています。

※ 私たちのまわりのすべてのものを作っている基本的な成分のことを元素といいます。私たちをはじめ、動植物から夜空に輝く星々までのすべては、元素の組み合わせだけからできています。

WMAP衛星が明らかにした宇宙の組成

宇宙に現れる網の目

ダークマターと大規模構造



宇宙の大規模構造の時間進化のシミュレーション画像。青い濃淡のものがダークマターを表しています。実際にはダークマターは見えません。

銀河はなぜ、網の目状に分布しているのでしょうか？その原因となったのが、ダークマター。重力は働くものの、光で観測することのできない、いまだ正体不明の物質です。かつてこの宇宙では、ダークマターがまわりよりわずかに多い部分に、重力によっていっそう多くのダークマターが集まり、立体的な網の目のような「大規模構造」が作られていったと考えられています。ダークマターの多い部分には普通の物質もより多く集まるので、この大規模構造をなぞるようにして、やがて銀河が誕生したのです。

膨張の軌跡

このラッパ形は「私たちにいま見える宇宙」の、宇宙誕生より現在までの膨張の軌跡を表しています。一番外側が一番遠く私たちから遠ざかりますが、その現在の速度は光速の3倍以上です。

「私たちにいま見える宇宙」

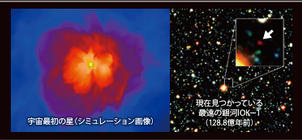
縦軸に時間、横軸に空間をとって、いま現在私たちに見える天体を置いていくと、すべてがとのしずく形の表面上に並びます。また、その星々の放った光は、しずく形の表面をたどって地球にやってきています。この宇宙図は不にいくほど過去となるので、「星の光は過去からやってきた」ことがわかります。

宇宙図の外はどうなっているのか？

インフレーション宇宙論などの理論によれば、宇宙はこの宇宙図に示されている範囲よりもはるかに広大に広がっています。この縁よりも外側は、私たちには理論的に推測できても観測的に確かめることはできません。

最初の星が宇宙に灯る

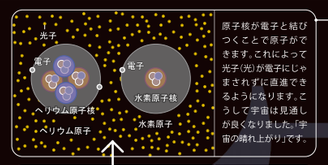
星や銀河の出現



約130億年前には、銀河はまだに宇宙に存在したことが、観測からわかっています。しかし最初の星がいつ頃生まれたのかについては、正確なことはわかっていません。宇宙で最初の星たちはおそらく、太陽の数百倍程度の重さを持っていました。その巨大な星々は、内部でさまざまな元素を作り出した後、超新星爆発を起こして宇宙に消えていきました。こうしてまき散らされた元素が、次の世代の星の種となったのです。

原子が登場し、宇宙が晴れ上がる

原子核と電子の結合



原子核が電子と結びつくことで原子ができます。これによって光子（光）が電子にじゃまされずに直進できるようになります。こうして宇宙は見通しが良くなりました。「宇宙の晴れ上がり」です。

宇宙誕生から約38万年後、「宇宙の晴れ上がり」が起こります。それまでの宇宙は、高温のため大量の「電子（※）」が飛び交っていました。光は、この電子と衝突してしまって直進できず、そのため宇宙は雲の中のように不透明だったのです。しかし宇宙の温度が約3000度まで下がると、電子は原子核と結合して「原子」となり、光をじゃましなくなりました。こうして、宇宙は見通しが良くなったのです（※）。原子のなかでも同じ性質を持つもの同士を元素といいますが、この元素が、最初の星たちの材料となっていきます。

※ この世界の物質をバラバラにしていったときに、これ以上分けられない最小のものが「素粒子」。電子はこの素粒子のひとつです。
※ この時に解き放たれた光を、現在私たちは宇宙マイクロ波背景放射として観測することができます。

陽子と中性子が結びついて、原子核ができます。水素原子の場合は、陽子ひとつがそのまま原子核となります。

何種類もある素粒子のうち、クォークと呼ばれるものが結びついて、陽子と中性子ができます。

すべてを生み出した3分間

物質生成の出発点

超高温の中で、さまざまな粒子が飛び交っています。

宇宙誕生直後の約3分間。それは、私たちのまわりにある、すべての物質のもとが生み出された時間でもありました。超高温の宇宙は、この間に急激な膨張を起こしながら冷えていきました。その中で、物質のもとである素粒子のうち「クォーク」と呼ばれるものが集まり、陽子や中性子となりました。さらにはその陽子や中性子が集まって、元素の中でももっとも軽い、水素やヘリウムの「原子核」がつぎつぎと生み出されたのです。このとき生まれた原子核は、総数の92%が水素、残り8%がヘリウムでした。それでは、宇宙誕生の瞬間にもっと近づいてみましょう。

超高温の火の玉宇宙

灼熱のビッグバン

宇宙は誕生直後、とてつもない大量のエネルギーによって加熱され、超高温・超高密度の火の玉となりました。ビッグバンの始まりです。その中で、光（光子）を含む、大量の素粒子が生まれます。素粒子にはふたつの種類がありました。ひとつが「粒子」で、もうひとつが粒子と反応すると光を出して消滅してしまう「反粒子」です。何らかの理由で、粒子よりも反粒子の方が10億個に1個ほど少なかったために、宇宙のごく初期に反粒子はすべて消滅し、わずかに残った粒子が、現在の宇宙の物質のもととなったのです。

時間と空間の始まり

宇宙の急膨張「インフレーション」

ビッグバンのすさまじい高温は、その直前まで宇宙に満ちていたエネルギーが熱に変化したものでした。宇宙は誕生直後からビッグバン直前までの10の34乗分の1秒（※）の間に、「インフレーション」と呼ばれる、桁も桁も大きくなるような猛烈な加速膨張を起こしたのです。現在の宇宙膨張を加速させているダークエネルギーと同じ、しかしその100桁以上もの驚異的な大きさをもった「真空のエネルギー」が、生まれたばかりの宇宙空間を倍々に膨張させていったのではないかと考えられています。そしてこのインフレーションとともに、この宇宙には、時間が流れ、空間が広がり始めたのです。

※ これは1秒の1000兆分の1の1000兆分の1の1万分の1にあたります。
※ この膨張のスケールを例えるなら、ウイルスが一瞬にして銀河団以上の大きさになるほどの、想像を絶するものでした。

人間の材料はどこから来たのか？

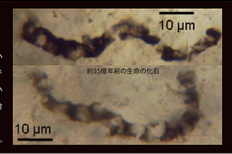
私たち人間をかたちづくる身体。それは「小さな宇宙」ともたとえられ、元素という材料から成り立っています。現代の科学は、この元素が、宇宙に輝く星々の中で生まれ、まき散らされたものであることを明らかにしました。宇宙と人間の不思議なつながりを、時間をさかのぼりながらひもといてみましょう。

さまざまな元素から、生命が生まれた

地球上生命の誕生と進化

現在の地球では、私たち人間をはじめとして、陸上にも多くの生命が繁栄しています。しかし、かつては海だけが生命の世界でした。地球最初の生命も、太古の海中で誕生したのです（※）。海に含まれるさまざまな元素が組み合わさり、しだいに複雑な有機物となるという化学反応が、やがて最初の生命の誕生につながったと考えられています。こうして生命を生み出した地球は、では、どのようにしてこの宇宙に生み出されたのでしょうか？

※ 地球最初の生命がいつ生まれたのかはまだわかりませんが、発見されている最古の化石は約35億年前のものです。



生命を生み出すステージが整う

太陽系および地球の形成

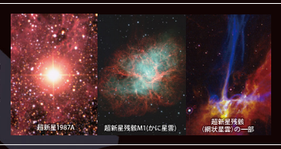
地球を含む太陽系の仲間たちが誕生したのは、およそ46億年前。宇宙を漂うガスやダストの集まりからただいに太陽がかたちづくられ、同じ頃、その周囲をまわるガスやダストが、地球やその他の惑星となっていったのです（※）。では、このガスやダストはどこからやってきたのでしょうか？ それは、いまはもう消えてしまった星々が宇宙に残した"かけら"だったのです。

※ 宇宙には、空気のような気体（ガス）と、砂粒よりも細かな固体（ダスト）が大量に漂っている場所があります。

元素をばらまく、星の大爆発

宇宙の錬金術、超新星爆発

太陽系の材料となった"かけら"たち、それを作り出した、宇宙にばらまいた原因のひとつは、「超新星爆発」でした。太陽の10億倍以上も明るく輝く爆発は、星の中の元素を一気に別の元素へと変えてしまいます。2種類ある超新星爆発のうち、太陽よりずっと重い星が起こす爆発では、星の中で作られた酸素などの元素が飛び散ると同時に、金や銀のような元素が生み出されます。一方、白色矮星を含む連星が起こす爆発は、私たちの身体に欠かせない鉄を作り出します。



一生を終え、宇宙に溶ける星

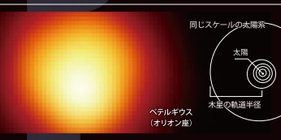
さまざまな姿をとる惑星状星雲

すべての星が、一生の最後に超新星爆発を起こすわけではありません。太陽のような比較的軽い恒星は、寿命がくると、ゆっくりと自分自身を作っていた物質を宇宙に放出し始めます。星はしだいにかたちを失い、白色矮星と呼ばれる恋だけを中心に残して、宇宙空間へと広がっていくのです。これを「惑星状星雲」といい、丸いものや細長いものなど、さまざまな姿のものがあります。

年老いた星は、元素の工場

膨張していく赤色巨星

一生を終える直前の星は、どのような姿をしているのでしょう。星は年老いるとまわりの惑星を飲み込むほどに膨らみ、赤く光る「赤色巨星」になります。このとき中心では、それまで星を輝かせてきた「核融合反応」の燃料である水素がなくなり、ヘリウムから炭素や酸素を作る別の核融合反応が進みます。太陽よりずっと重い星の中心では、さらに核融合反応が進行し、ケイ素や鉄などの元素が作られます。私たち人間にとって重要な元素の多くは、こうして年老いた星の内部で作られたのです。



成熟し、宇宙に輝く星

核融合反応と星の寿命

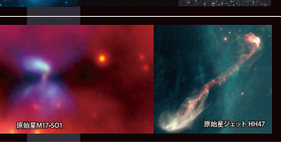
恒星は生涯のほとんどを「主系列星」として過ごします。これはいわば、一人前となった恒星の呼び名。その中心では、4つの水素原子から1つのヘリウム原子を作る核融合反応が進んでおり、この反応が、恒星が放つ大量の光を生み出しています。星が主系列星として輝く期間は、その星の質量で決まります。太陽より軽い星の場合は100億年以上ですが、太陽の10倍重い星は、数千万年にとどまります（※）。

※ 私たちの太陽の寿命は100億年あまり。50億年以上先の遠い将来には赤色巨星となり、最終段階では白色矮星になります。

星の誕生と成長

ジェットを吹き出す原始星

恒星を生み出す材料となるのは、宇宙に漂うガスやダストです。これらが大量に集まることで、星の赤ちゃんともいうべき「原始星」がかたちづくられます。このとき集まってきた物質の一部は、細いガスの流れである「ジェット」となって、また原始星から飛び出していきます。物質が集まり続け、中心部分の温度と圧力が上がってくると、いよいよ核融合反応が始まり、原始星は主系列星となって宇宙に輝き始めます。



元素は宇宙を流転する

星の生まれる場所、分子雲

銀河の中で、ガスとダストが特に濃く集まった場所を「分子雲」と呼びます（※）。その主成分は水素分子ですが、水や一酸化炭素、アルコールなどの分子もごくわずかに含まれます。これらは、前の世代の星たちが一生を終える時にばらまいた多様な元素でできています。つまり星は、元素に帰るのです。私たちの身体も、地球や太陽、夜空の星々も、みんなこの元素の大循環の一部。そして宇宙を流転する物質のすべては、さかのぼれば、宇宙最初の3分間に生み出された物質へと行きつくのです。

※ 分子雲はみずから光を出さず、暗い雲のように見えるものや、まわりの星に照らされて輝いて見えるものがあります。

宇宙の誕生にせまる

宇宙の始まりについてある説では、宇宙は「無」から生まれたとしています。「無」とは、物質も空間も、時間さえもない状態。しかしそこでは、ごく小さな宇宙が生まれてほ消えており、そのひとつが何らかの原因で消えずに成長したのが、私たちの宇宙だというのです。また生まれたての宇宙では、時間や空間の次元の数も、いまとは違っていた可能性があります。ある説によれば、宇宙は最初は11次元で、やがて余分な次元が小さくなり、空間の3次元と時間の1次元と残ったのだといいます。宇宙の始まりは、まだ多くの謎につつまれています。それを解き明かしていくのは、いまこれを読んでいるあなたかもしれません。

光速を超えて遠ざかる星々

しずく形のもっとも太い部分の表面上にある天体は、光を放った当時、いま現在地球がある位置に対してちょうど光の速さで遠ざかっていました。もっとも太い部分よりも下（幅）の表面上にある天体は、光を超える速さで遠ざかっていました。宇宙の膨張は空間自体の膨張であるため、光速を超えることも可能なのです。これらの星を観測することができるのは、宇宙の膨張がどのように変化してきたかの歴史と関わっています。

星と光の軌跡

白い破線は、しずく形の上にあるこの天体が、宇宙の膨張によって私たちから遠ざかっていった軌跡を示しています。また黄色い破線は、天体がしずく形の上にいる時に放った光が、しずく形をたどるように私たちに届いていることを示しています。

この宇宙図は一様かつ等方な、曲率のない（ユークリッド）宇宙を前提とし、WMAP衛星の最新の観測成果に基づいて計算されたものです。

一家に1枚 宇宙図 2007　詳しくはWEBへ　http://stw.mext.go.jp（科学技術週間）

初版発行:3月27日　第2版発行:9月1日　監修:文部科学省、（社）日本天文学会 天文教材委員会　著作および販売元:（財）科学技術広報財団　企画:大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 国立天文台、天文学とプラネタリウム　制作:「一家に1枚宇宙図」制作委員会（縣秀彦、小阪淳、高梨直紘、平松正顕、川越至桜、成田憲保、内藤誠一郎、日下部展彦、高田裕行、石川直美、杉山直、市来淨與、山岡均ほか）

アートディレクション:小阪淳　コピーディレクション:片桐暁　協力:観山正見、佐藤勝彦、青木和光、三浦均、額谷宙彦、枠島正洋、石崎昌春ほか　参考文献: D. N. Spergel et al. (2007) "Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology" (The Astrophysical Journal, astro-ph/0603449)　画像提供:国立天文台・パワノ観測所すばる望遠鏡、三鷹キャンパス50cm望遠鏡、石垣島天文台105cm望遠鏡/国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト（4D2U）/小久保英一郎、長島雅裕、矢作日出樹/ネイチャー・プロダクション/吉田直紀
Anglo-Australian Observatory/David Malin Images/Caltech/CNES/ESA/ESO/HEIC/James Clerk Maxwell Telescope, Joint Astronomy Centre, Hawaii/JPL/J.William Schopf,University of California,Los Angeles/Malin Space Science Systems/NASA/NOAA/SOHO/Space Science Institute/STScI/The Hubble Heritage Team/PDB ID:1DNN Trifonov,E.N.,Sussman,J.L.,Smooth bending of DNA in chromatin.In:"Molecular Mechanisms of Biological Recognition"(Ed. M. Balaban),Elsevier/North Holland Biomed.Press,1979,pp.227-232/WMAP Science Team