地球の公転軌道は、押しピンの穴の百兆倍ぐらいの大きさです。

## 宇宙とはなんだろうか?

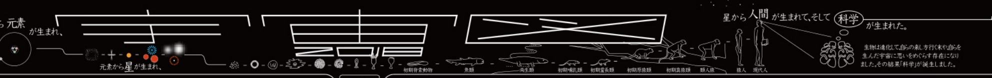
宇宙とは、時間と空間を含むすべての広がりです。私たちや、私たちが目にする景色、そこに生きる動物や植物は、すべて宇宙の一部です。夜空に輝く星々や、そのあいだに淡く広がる天の川、巨大な望遠鏡でしか見ることのできない遠くはるかな銀河も、すべて宇宙の一部です。私たちの知るすべてを含み、私たちの知らないすべても含むもの、それが宇宙なのです。

観測機プランク

この宇宙図は一様かつ等方な、曲率のないルメートル宇宙を前提とし、観測機プランク等の最新の観測成果に基づいて計算されたものです。

$H_0$ = 67.81 km/s/Mpc
$\Omega_M$ = 0.308
$\Omega_\Lambda$ = 0.692

# 宇宙図 2018



初期脊索動物
魚類
両生類
初期哺乳類
初期霊長類
初期原猿類
初期真猿類
類人猿
猿人
現代人

宇宙が生まれたから元素が生まれ、元素から星が生まれ、星から人間が生まれて、そして科学が生まれた。

生物は進化して、自らの来し方行く末や、自らを生んだ宇宙に思いをめぐらす存在になりました。その結果「科学」が誕生しました。

## 科学とはなんだろうか?

科学とは、私たちが関わ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察で調べ、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のひとつ、それが科学なのです。

地球は、押しピンの穴の百億倍ぐらいの大きさです。

## 宇宙図の見方

### 4つのルールで、宇宙を感じてみよう

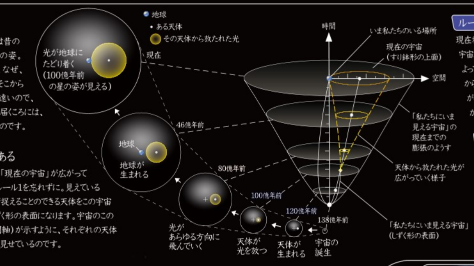
この「宇宙図」は、最新の研究や観測にもとづく宇宙の姿を、私たち人間を中心にして描いたものです。縦方向には、人間からさかのぼって宇宙の誕生までの「時間の流れ」が表され、横方向には、宇宙の「空間の広がり」が表されています。全体のすり鉢のようなかたちから、宇宙は生まれてからずっと、膨張を続けていることがわかります。この宇宙図は、あなたがはるかな時間と空間を旅するためのガイドマップ。4つのルールを味方につけて、あなたの眼で、宇宙の姿にせまってみてください。

### 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M 45)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。見えているのは、「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、私たちは見ています。そして縦方向(時間軸)が示すように、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。



地球
ある天体
その天体から放たれた光
光が地球にたどり着く(100億年前の星の姿が見える)
現在
46億年前
地球
地球が生まれる
80億年前
100億年前
120億年前
138億年前
光があらゆる方向に飛んでいく
天体が光を放つ
天体が生まれる
宇宙の誕生
時間
空間
いま私たちのいる場所
現在の宇宙(すり鉢形の上面)
「私たちにいま見える宇宙」の現在までの膨張のようす
天体から放たれた光が広がっていく様子
「私たちにいま見える宇宙」(しずく形の表面)

### ルール3 宇宙の膨張と、しずく形の意味

現在私たちに届いている光のうち、一番長い時間を旅してきた光は、138億年前のもの。宇宙が膨張していなければ、到達に4200万年しかかからなかったはずの光が、膨張によって、近づくどころか、いったん地球の位置から遠ざかってしまったのです。しずく形の下から上までの曲線が、まさにその軌跡を描き出しています。宇宙の膨張は、かつてその光が放たれた場所自体も彼方に押しやりました(すり鉢形のふちの地点)。仮に現在その場所から光が放たれても、宇宙の膨張に阻まれて、未来永劫、地球に届くことはありません。

### 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(すり鉢形の底の部分)。それがどのように広がってきたか(すり鉢形の表面のかたち)。そしてすり鉢形の背景にも、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。

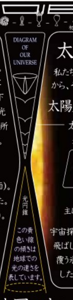


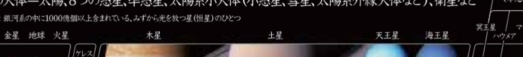
DIAGRAM OF OUR UNIVERSE
光円錐
この黄色い線の傾きは地球での光の速さを表しています。

## 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、準惑星、太陽系小天体(小惑星、彗星、太陽系外縁天体など)、衛星など

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



水星
金星
地球
火星
ケレス
木星
土星
天王星
海王星
冥王星
ハウメア
マケマケ
エリス
?

冥王星型天体(準惑星に属す)

地球型惑星 主に岩石でできた惑星

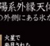
小惑星帯 ケレスのみ準惑星に属す

木星型惑星 主に水素やヘリウムなどでできた巨大惑星

太陽系外縁天体 海王星軌道の外側にある氷が主成分の天体

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、地中に氷が発見された火星や、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)やエンセラダス(土星の衛星)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。

火星で発見された地中の氷(左)が数日後に気化している(右)



エウロパ

## 太陽系外に生命は存在するか?

### 太陽系外惑星を発見する

夜空に見える星々はみな、自ら輝く恒星です。太陽を惑星が巡るように、それらの恒星にも惑星があるものと想像されていましたが、実際に太陽系外に惑星が発見されたのは1995年のこと。以来、3500個以上の太陽系外惑星が見つかっています。その発見には、惑星の公転によって恒星がわずかにふらつく運動を捉えるドップラー法や、惑星が恒星の前を通り過ぎることで、恒星が見かけ上少し暗くなる現象を利用するトランジット法が用いられています。

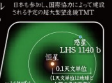
日本も参加し、国際協力によって建設される予定の超大型望遠鏡TMT

### 「第二の地球」を求めて

こうした観測から、太陽系外に多種多様な惑星系が存在していることがわかってきました。その中には、木星型の大きくて重い惑星や、地球と同程度の大きさや質量を持つ惑星などが含まれます。恒星からの距離が適度であれば、惑星表面は、液体状態の水を保つことができます。このような領域をハビタブルゾーンといいますが、数十個の恒星のハビタブルゾーンに惑星が発見され、中には地球と同程度の大きさの惑星も見つかっています。

### 遥か彼方の生命の探し方

太陽系外の天体はあまりに遠いため、探査機は直接飛ばせません。そこで検討されているのは、地上の超大型望遠鏡や宇宙望遠鏡から、惑星の表層環境や大気を観測する方法。具体的には、生命が作り出す可能性のある物質である酸素やオゾン、メタンなどを探す方法や、陸上植物の存在の兆候を探す方法です。地球のような惑星や地球型の生命は、この宇宙の中で普遍的な存在なのか。今後の研究が、その答えを次第に明らかにしていくことでしょう。



惑星 LHS 1140 b
恒星
0.1天文単位
(1天文単位は地球と太陽の平均距離)
ハビタブルゾーン

LHS 1140星系のハビタブルゾーン(緑)とその系外惑星LHS 1140 bの軌道のイメージ図

## 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。そのはるかな歴史を、宇宙の誕生に向け、科学に可能な限りさかのぼってみましょう。

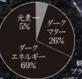
### 推測される「現在の宇宙」の姿 - 暗黒の中に輝く星々

銀河団 Abell 2744

渦巻銀河 M 81

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約7割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」、3割近くが正体不明の物質「ダークマター」であり、普通の「元素※」は5%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、中心に超大質量ブラックホールを持つ銀河、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。



観測機プランク等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

131億年前
約80億年前
現在
ほぼ一様分布のダークマター
ダークマター分布のゆらぎが成長
大規模構造の形成

宇宙の大規模構造の時間進化のシミュレーション画像。明るさはダークマターの密度を表しています。実際にはダークマターは観測できません。

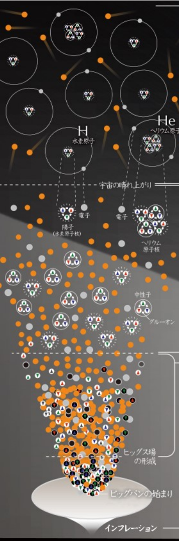
銀河はなぜ、網の目状に分布しているのでしょうか?その原因となったのが、ダークマター。重力は働くものの、直接観測することのできない、いまだ正体不明の物質です。かつてこの宇宙では、ダークマターがまわりよりわずかに多い部分に、重力によっていっそう多くのダークマターが集まり、立体的な網の目のような「大規模構造」が作られていったと考えられています。ダークマターの多い部分には普通の物質もより多く集まるので、この大規模構造をなぞるようにして、やがて銀河が誕生したのです。

### 最初の星が宇宙に灯る - 星や銀河の出現

宇宙最初の星(シミュレーション画像)

現在見つかっている最も昔の銀河 GN-z11 (134億年前)

約134億年前には、銀河はすで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、太陽の数十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。



H 水素原子
He ヘリウム原子
宇宙の晴れ上がり
電子
陽子(水素原子核)
ヘリウム原子核
中性子
グルーオン
粒子
光子
電子
アップクォーク
ダウンクォーク
反粒子
陽電子
反アップクォーク
反ダウンクォーク
ヒッグス場の形成
ビッグバンの始まり
インフレーション

### 原子が登場し、宇宙が晴れ上がる - 原子核と電子の結合

さらに宇宙の歴史をさかのぼると、大きく風景が変わる時代に突き当たります。その時代には、宇宙の高温が原因で大量の「電子※1」が飛び交っていました。光(光子)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3,000度まで下がると、電子は原子核と結合して「原子」の一部となり、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※2。これを「宇宙の晴れ上がり」とよびます。この時に作られた原子がだんだんと集まり、最初の星たちの材料となっていきます。

※1 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要素を「素粒子」といいますが、電子や光子はこの素粒子の一種です。

※2 この時に解き放たれた光を、私たちは現在「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。

### すべてを生み出した3分間 - 物質生成の出発点

わずか3分間。それが、現在の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す。超高温の宇宙は、この間に急激な膨張を起こすことによって冷えていきました。その中で、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ました。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、素粒子が生まれた時代へとさかのぼってみましょう。

### 超高温の火の玉宇宙 - 灼熱のビッグバン

私たちの宇宙はかつて、超高温・超高密度の火の玉のような状態でした※1。この期間をビッグバンと呼びます。その期間に、光子を含む大量の素粒子が生まれたのです。それらはみな光の速さで飛び交っていましたが、ビッグバンの始まりの約1兆分の1秒後に「ヒッグス場」が形成されたため、「ヒッグス場」との相互作用によって特定の素粒子は動きにくくなり、光よりも遅くなりました。「動きにくさ＝慣性質量※2」を持ったのです。素粒子には「粒子」と「反粒子」があり、お互いが出会うと消滅し、光子となる性質を持っています。しかし粒子の方が反粒子より10億個に1個ほど多かったため、粒子の方がわずかに残ることになりました※3。これが、現在の宇宙の物質のもとになったと考えられているのです。

※1 この時の温度は10億度の10億倍のさらに10億倍にもなります。

※2 質量には、「動きにくさ」である慣性質量と、万有引力を引き起こす重力質量の2つがあります。これらは全く同じ大きさになりますが、なぜ同じになるのかはわかっていません。

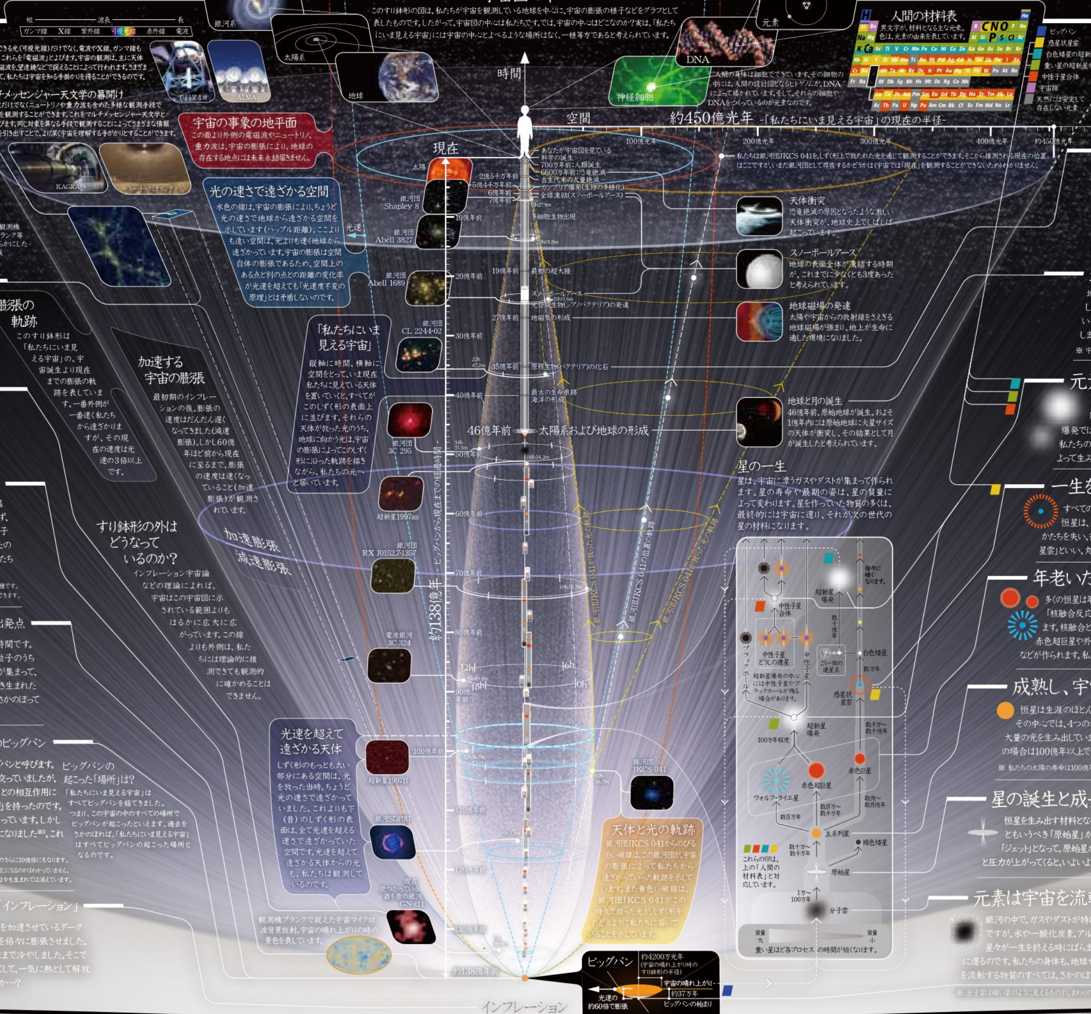
※3 反粒子は今も生まれては消えています。

素粒子の種類

| | | |
|---|---|---|
| 物質粒子 | クォーク | アップクォーク、ダウンクォークなど |
| | レプトン | 電子やニュートリノなど |
| 力を伝える粒子 | 光子 | 「電磁気力」を媒介 |
| | ウィークボソン | 素粒子の間に働く「弱い力」を媒介 |
| | グルーオン | クォーク同士をつなぐ「強い力」を媒介 |
| | ヒッグス粒子 | ヒッグス場の動きに伴う粒子 |

### 急膨張と、絶対零度 - 想像を絶する「インフレーション」

ビッグバンの直前、宇宙は完全に冷え切ったといわれています。現在の宇宙膨張を加速させているダークエネルギーより100桁以上も大きい「真空のエネルギー」が、誕生直後の宇宙を倍々に膨張させました。想像を絶するこの「インフレーション」が、宇宙を低温の限界である絶対零度にまで冷やしました。そこで空間の性質が変化し、膨張に使われていた真空のエネルギーが行き場をなくして、一気に熱として解放されたというのです。では、そのインフレーションの前には、何があったのでしょうか…?



短
波長
長
ガンマ線
X線
紫外線
可視光線
赤外線
電波
銀河系
太陽系
地球
すばる望遠鏡
ALMA
KAGRA
スーパーカミオカンデ
神経細胞
DNA
元素
時間
空間
現在
太陽
銀河団 Shapley 8
銀河団 Abell 3827
銀河団 Abell 1689
銀河団 CL 2244-02
銀河団 3C 295
超新星1997as
銀河団 RX J0152.7-1357
電波銀河 3C 324
超新星1997ff
銀河SDP.81
現在見つかっている最も昔の銀河 GN-z11
銀河団 JKCS 041
光速
加速膨張
減速膨張
あなたが宇宙図を見ている
科学の誕生
700万年前：人類誕生
6600万年前：恐竜絶滅
古生代末の大量絶滅
カンブリア爆発(生物の多様化)
全球凍結(スノーボールアース)
2億5千万年前
5億4千万年前
6億年前
7億年前
10億年前
多細胞生物出現
19億年前
最初の超大陸
20億年前
スノーボールアース
光合成生物(シアノバクテリア)の発達
27億年前
地磁気の形成
30億年前
35億年前
原核生物(バクテリア)の化石
40億年前
最古の生命痕跡
海洋の形成
46億年前
太陽系および地球の形成
50億年前
60億年前
70億年前
80億年前
90億年前
100億年前
110億年前
120億年前
130億年前
約138億年前
約138億年 - ビッグバンから現在までの経過時間 -
12h
18h
6h
0h
銀河団JKCS 041が放った光の軌跡
銀河団JKCS 041の位置の軌跡
100億光年
200億光年
300億光年
400億光年
約450億光年
インフレーション
徐々に暗くなります。
超新星爆発
中性子星合体
数十億年
白色矮星
ごく一部の連星系
数万年
ブラックホール
中性子星どうしの連星
中性子星
超新星爆発の中心には中性子星やブラックホールが残る場合があります。
惑星状星雲
100万年程度
数千万〜数十億年
ウォルフ・ライエ星
赤色超巨星
赤色巨星
数百万年
数百万〜数千万年
数億〜数百億年
主系列星
褐色矮星
数十万〜数十万年
原始星
1万〜100万年
分子雲
これらの印は、上の「人間の材料表」と対応しています。
質量 大
質量 小
重い星ほど各プロセスの時間が短くなります。
H He
Li Be B C N O F Ne
Na Mg Al Si P S Cl Ar
K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr
Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe
Cs Ba Hf Ta W Re Os Ir Pt Au Hg Tl Pb Bi Po At Rn
Fr Ra Rf Db Sg Bh Hs Mt Ds Rg Cn Nh
La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu
Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr
ビッグバン
惑星状星雲
白色矮星の超新星爆発
重い星の超新星爆発
中性子星合体
宇宙線
天然には安定して存在しない元素

#### 宇宙図の中心

このすり鉢形の図は、私たちが宇宙を観測している地球を中心に、宇宙の膨張の様子などをグラフとして表したものです。したがって、宇宙図の中心は私たちです。では、宇宙の中心はどこなのか?実は、「私たちにいま見える宇宙」には宇宙の中心とよべるような場所はなく、一様等方であると考えられています。

#### 電磁波

私たちの見ることができる光(可視光線)だけでなく、電波やX線、ガンマ線も「光の仲間」です。これらを「電磁波」とよびます。宇宙の観測は、主に天体から放たれる電磁波を、望遠鏡などで捉えることによって行われます。さまざまな観測によって、私たちは宇宙を知る手掛かりを得ることができるのです。

#### マルチメッセンジャー天文学の幕開け

電磁波だけでなくニュートリノや重力波なども含めた多様な観測手段で宇宙を観測することができます。これをマルチメッセンジャー天文学と呼びます。同じ対象を異なる手段で観測することによってさまざまな情報を引き出すことで、より深く宇宙を理解する手がかりとすることができます。

#### 宇宙の事象の地平面

この面より外側の電磁波やニュートリノ、重力波は、宇宙の膨張により、地球の存在する地点には未来永劫届きません。

#### 光の速さで遠ざかる空間

水色の線は、宇宙の膨張により、ちょうど光の速さで地球から遠ざかる空間を示しています(ハッブル距離)。ここよりも遠い空間は、光よりも速く地球から遠ざかっています。宇宙の膨張は空間自体の膨張であるため、空間上のある点と別の点との距離の変化率が光速を超えても「光速度不変の原理」とは矛盾しないのです。

#### 膨張の軌跡

このすり鉢形は「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。一番外側が一番速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。

#### 加速する宇宙の膨張

最初期のインフレーションの後、膨張の速度はだんだん遅くなってきました(減速膨張)。しかし60億年ほど前から現在に至るまで、膨張の速度は速くなっていること(加速膨張)が観測されています。

#### 「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ている天体を置いていくと、すべてがこのしずく形の表面上に並びます。それらの天体が放った光のうち、地球に向かう光は、宇宙の膨張によってこのしずく形に沿った軌跡を描きながら、私たちの元へと届いています。

#### すり鉢形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。この線よりも外側は、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。

#### 光速を超えて遠ざかる天体

しずく形のもっとも太い部分にある空間は、光を放った当時、ちょうど光の速さで遠ざかっていました。これよりも下(昔)のしずく形の表面は、全て光速を超える速さで遠ざかっていた空間です。光速を超えて遠ざかる天体からの光も、私たちは観測しているのです。

#### ビッグバンの起こった「場所」は?

「私たちにいま見える宇宙」はすべてビッグバンを経てきました。つまり、この宇宙の中のすべての場所でビッグバンが起こったといえます。過去をさかのぼれば、「私たちにいま見える宇宙」はすべてビッグバンの起こった場所となるのです。

観測機プランクで捉えた宇宙マイクロ波背景放射。宇宙の晴れ上がりの時の景色を表しています。

#### ビッグバン

約4200万光年(宇宙の晴れ上がり時のすり鉢形の半径)

宇宙の晴れ上がり 約37万年

ビッグバンの始まり

光速の約60倍で膨張

数センチメートル〜数メートル(ビッグバンの始まりの時のすり鉢形の半径)

#### 天体と光の軌跡

銀河団JKCS 041からのびる白い破線は、この銀河団が、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、銀河団JKCS 041がこの時点で放った光が、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。

#### 約450億光年 -「私たちにいま見える宇宙」の現在の半径-

私たちは銀河団JKCS 041を、しずく形上で放たれた光を通じて観測することができます。そこから推測される現在の位置はここですが、いまだ銀河団として存在するかどうかは(宇宙では「現在」を観測することができないため)わかりません。

人間の身体は細胞でできています。その細胞の中には、人間の設計図となるヒトゲノムが、DNAによって描かれています。そして、それらの細胞やDNAをつくっているのが元素なのです。

#### 人間の材料表

黒文字が、材料となる主な元素。色は、元素の由来を表しています。

#### 天体衝突

恐竜絶滅の原因となったような激しい天体衝突が、地球史上でしばしば起こっています。

#### スノーボールアース

地球の表面全体が凍結する時期が、これまでに少なくとも3度あったと考えられています。

#### 地球磁場の発達

太陽や宇宙からの放射線をさえぎる地球磁場が強まり、地上が生命に適した環境になりました。

#### 地球と月の誕生

46億年前、原始地球が誕生。およそ1億年内には原始地球に火星サイズの天体が衝突し、その結果として月が誕生したと考えられています。

#### 星の一生

星は、宇宙に漂うガスやダストが集まって作られます。星の寿命や最期の姿は、星の質量によって変わります。星を作っていた物質の多くは、最終的には宇宙に還り、それが次の世代の星の材料になります。

## 人間の材料はどこから来たのか?

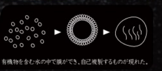
私たち人間をかたちづくる身体。それは「小さな宇宙」ともたとえられ、元素という材料から成り立っています。現代の科学は、この元素が、宇宙に輝く星々の中で生まれ、まき散らされたものであることを明らかにしました。宇宙と人間の不思議なつながりを、時間をさかのぼりながらひもといてみましょう。

### 多様な元素から、生命が生まれた - 地球生命の誕生と進化

約35億年前の生命の化石
10 μm

現在の地球では、私たち人間をはじめとして、多くの生命が繁栄しています。地球に生きる生命は、およそ40億年以上前に誕生したと考えられています。最初の生命が誕生した場所はまだわかっていませんが、水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?

※ 地球最初の生命が生まれた場所は、海の中とも、陸上の温泉ともいわれています。



有機物を含む水の中で膜ができ、自己複製するものが現れた。

### 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し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。

GJ 504b

おうし座HL星

### 元素をばらまく宇宙の錬金術 - 超新星爆発と中性子星合体

太陽系の材料となった“かけら”たち。それを作り出し、宇宙にばらまいたのは「超新星爆発」と「中性子星の合体」でした。2種類ある超新星爆発のうち、太陽よりずっと重い恒星が起こす爆発では、内部で作られた酸素などの元素が飛び散ると同時に、より重い元素が生み出されます。一方、私たちの身体に欠かせない鉄は主に、白色矮星を含む連星系の、ごく一部が起こす超新星爆発によって生み出されます。中性子星合体では、金や銀などさらに重い元素が作られます。

超新星残骸 M 1 (かに星雲)

超新星1994D

重力波源 GW170817 (中性子星合体)

### 一生を終え、宇宙に溶ける星 - さまざまな姿の惑星状星雲

すべての恒星が、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、後に白色矮星となる芯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。

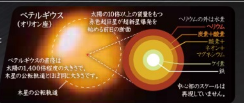
こと座のリング星雲 M 57

惑星状星雲 NGC 6302

さまざまな姿の惑星状星雲

### 年老いた星は、元素の工場 - 一生を終える寸前の恒星

多くの恒星は年老いると、大きく膨らんで赤色巨星になります。中心ではこの時、それまで恒星を輝かせてきた「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。核融合とは別の反応で、鉛などの重い元素も作られます。太陽よりずっと重い恒星は、より大きい赤色超巨星や外層を失ったウォルフ・ライエ星になり、中心ではさらに核融合反応が進行してケイ素や鉄などが作られます。私たち人間にとって重要な元素の多くは、こうして年老いた恒星の内部で作られたのです。



ベテルギウス(オリオン座)
太陽の10倍以上の質量をもつ赤色超巨星が超新星爆発を始める前日の断面
ヘリウムの外は水素
ヘリウム
炭素＋酸素
酸素＋ネオン＋マグネシウム
ケイ素
鉄
ベテルギウスの直径は太陽の1,400倍程度の大きさで、木星の公転軌道とほぼ同じ大きさです。
木星の公転軌道
中心部のスケールは再現していません。

### 成熟し、宇宙に輝く星 - 核融合反応と恒星の寿命

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、この反応が大量の光を生み出しています。恒星が主系列星として輝く期間は、その質量で決まります。太陽より軽い恒星の場合は100億年以上ですが、太陽の10倍重い恒星で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。

散開星団 M 45(すばる)

二重星 アルビレオ(はくちょう座)

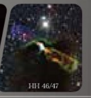
球状星団 M 15

### 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。これらが大量に集まることで、恒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。集まってきた物質の中には、細いガスの流れである「ジェット」となって、原始星から再び飛び出していくものもあります。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輝き始めます。

HH 30

オリオンKL電波源I



HH 46/47

### 元素は宇宙を流転する - 恒星の生まれる場所、分子雲

銀河の中で、ガスや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、前の世代の星々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。つまり恒星は、元素から生まれ、元素に還るのです。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。

※ 分子雲は暗い雲のように見えるものや、まわりの恒星に照らされて輝いて見えるものがあります。

暗黒星雲 LDN 57

M 42(オリオン座大星雲)の中心部

M 16(わし星雲)の一部

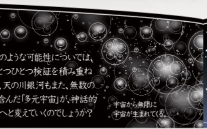
## 宇宙は、この宇宙ひとつだけなのか?

### 理論的に考えられる、数え切れない種類の宇宙

ある説によれば、私たちの宇宙は、別の宇宙の中から生まれたとされます。永久にインフレーションを続ける「宇宙の背景の宇宙」の中で、性質の異なる宇宙が次々と生まれており、私たちの宇宙は、実はそのうちのひとつである。こうした考え方は、マルチバース(多元宇宙)と呼ばれる世界観のひとつです。素粒子のあり方から宇宙の振る舞いまでを論じる「超弦(ちょうげん)理論」も、このマルチバースの考え方を支持しています。超弦理論によれば、この宇宙には、空間の3次元と時間の1次元以外にも、私たちには感じ取れない6つの次元があるとされます。そのあり方の違いに着目すれば、次元の数や、素粒子の種類・質量等が異なる宇宙が、10の500乗(10を500回かけ合わせた数)通り以上、理論的には考えられるというのです。

### ユニバースを描き変える「マルチバース理論」

私たちが関与できないどこかに、他の世界が存在しているかもしれない。科学的根拠は伴っていませんでしたが、そのような可能性については、はるか昔の私たちの祖先も神話的あるいは宗教的な世界観として考えていました。それに対して、科学者たちはひとつひとつ検証を積み重ねながら、地球は太陽を周る惑星のひとつに過ぎず、その太陽は、天の川銀河の中の無数の恒星のひとつに過ぎず、天の川銀河もまた、無数の銀河のひとつに過ぎないことを明らかにしてきました。そして現在、私たちの住む宇宙だけでなく、それ以外の宇宙も含んだ「多元宇宙」が、神話的存在ではなく、科学理論の対象となっています。はたして科学は、この宇宙を唯一の宇宙から、無数の宇宙のひとつへと変えていくのでしょうか?



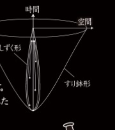
宇宙から無限に宇宙が生まれてくる。

夜空を見上げて宇宙に思いをはせる。

## 人間は宇宙の彼方に何を見るのか?

見上げる夜空に輝く、あの星やこの星。その星々までの距離を表すために考えられたのが「光年(＝光が旅してきた時間×光の速さ)」です。さまざまな方向にある天体を、この「光年」に応じて配置すれば、右図のように、天体を三次元的に配した地図を描くことができます。しかしこの描き方では、大きな宇宙を描こうとするほど、大きな矛盾が生まれてきます。星々は、地球から遠くにあるものほど、昔の姿を見せています。ということは、遠くを見るほど「昔の、まだ小さかった頃の宇宙の景色」が見えてくるはずなのに、この描き方では最も昔の宇宙ほど、最も大きいように錯覚してしまうのです。問題は、距離の単位として、「光が旅してきた時間×光の速さ(＝光年)」を使ってしまったこと。宇宙が膨張していなければ、それで問題ありません。しかし今日の私たちは、宇宙が膨張している事実を知っています。膨張している空間で、測るのに時間がかかる定規(光年)を使おうとすれば、次第に無理が出てくるのは当然のことです。この宇宙図では、これらの問題を解決した上で、私たちが実際に観測できる宇宙(しずく形の表面)や、そこから推測される宇宙の膨張(すり鉢形)を、厳密にあなたの眼の前に描き出しています。私たちに見えるものをどう解釈すれば、合理的な世界を描けるのか。それはまさに科学が行ってきた考察ですが、その考察は、私たちの「常識」を幾度も覆してきました。そしていま、科学は見えるものの遥か彼方をも考察しています。マルチバースという世界観も、その結果の一つです。このマルチバースの背景には、私たちの知るものを根底から覆す、まったく知らなかった理(ことわり)に支えられた世界が、広がっているのかもしれません。

最も昔の景色が、最も大きい?



時間
空間
しずく形
すり鉢形

押しピンの穴は、空間が生まれたからこその「大きさ」です。

なぜ何もないのではなく、あるのか。

一家に1枚 宇宙図 2018 http://stw.mext.go.jp 第1版発行 2007年3月27日 第3版発行 2018年3月10日 監修：文部科学省／日本天文学会教材委員会 著作および販売元：(公財)科学技術広報財団 企画：自然科学研究機構 国立天文台、天文学普及プロジェクト「天プラ」 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、亀谷和久、塚田健、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：青木和光／石崎昌春／杵島正洋／駒宮幸男／佐藤勝彦／額谷宙彦／野村泰紀／三浦均／観山正見／村山斉／東京大学国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU)／Kevin Bundy／Ramsey Lundock／Yolande Mclean ほか 参考文献、情報提供：Jennifer Johnson／"Planck 2015 results XIII. Cosmological parameters", A&A 594, A13 (2016) 画像提供：国立天文台・ハワイ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／TMT観測所公社／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／小泉周／吉田直紀／ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)／Andrew Fruchter／Anglo-Australian Observatory／AURA／Adam Riess (STScI, Baltimore, MD)／Caltech／Canada-France-Hawaii Telescope／Coelum／CNES／CXC／the ERO team／ESA／ESO／The Hubble Heritage Team／HEIC／INAF／JPL／J.William Schopf,University of California,Los Angeles／Malin Space Science Systems／NASA／NOAA／North Holland Biomed.Press,1979,pp.227-232／Palomar Observatory Sky atlas - National Geographic Society／The Planck Collaboration／S.Andreon et al Optical: DSS; ESO／SAO／SOHO／Space Science Institute／STScI／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／VLT

押しピンの穴は、水素原子の1千万倍ぐらいの大きさです。