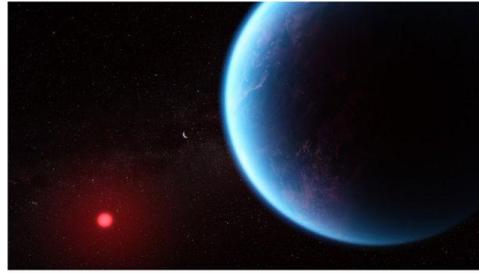
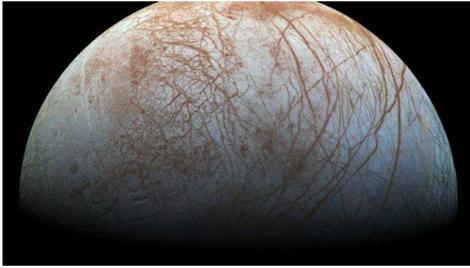


地球外生命体、「あと数年」で見つかると言われている理由は？

2023年10月3日 パラブ・ゴージュ科学担当編集委員



画像提供,ESA 画像説明, : 木星の氷の衛星エウロパは、太陽系で最も異星人が住んでいそうな場所とされている

画像提供,NASA 画像説明, : 赤色矮星（わいせい）を周回する惑星「K2-18b」（イメージ画像）

天文学者の多くが、「この宇宙のどこかに生命がいるのだろうか」とはもう問わなくなっている。

代わりに学者らの頭の中にあるのは、「我々はいつ、生命を見つけられるのか」という疑問だ。

多くの研究者が、我々が生きているうち、もしかしたら今後数年以内に、生命のしるしを検知できると前向きに考えている。木星探査を主導するある科学者はさらに、木星の氷の衛星のうちの一つに生命がいなかったら世界は「驚くだろう」とまで豪語している。

イギリスの研究チームは先に、米航空宇宙局（NASA）のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡で、[太陽系外の惑星における生命の手がかりを見つけた可能性](#)があると発表した。ウェッブ望遠鏡はさらに多くの世界をとらえている。現在進行中、あるいはこれから開始される数々の探査計画は、史上最大の科学的発見をめぐる新たな宇宙開発競争の証だ。スコットランド王立天文学会のキャサリン・ヘイマンズ教授は、「我々は無限の宇宙に住んでおり、そこにある星や惑星も無限だ。多くの研究者にとって、自分たちだけが知的生命体であるはずがないことは明らかだ」と語った。

「我々がこの宇宙で孤独なのかどうか、我々にはその質問に答える技術と能力がある」

「ゴルディロックス・ゾーン」

現在の科学では、宇宙望遠鏡で惑星や遠方の周回する星の大気を分析できる。これにより、少なくとも地球上では生物だけが生成できる化学物質を探すことが可能だ。

こうした発見の一端が、今月初めにあった。地球から120光年離れた「K2-18b」と呼ばれる惑星の大気に、地球では海洋生命が生成する硫化ジメチル（DMS）が存在する可能性が示唆された。

この惑星は、天文学者が「ゴルディロックス・ゾーン」と呼ぶ領域に位置している。星の表面温度が高すぎも低すぎもせず、生命に必要な液体の水が存在できるような恒星との距離関係だ。

研究チームは1年以内に、このあいまいな生命のしるしが確認されるのか、消えてしまうのかが分かるとみている。この研究を主導した英ケンブリッジ大学天文学研究所のニック・マドウスダン教授は、このしるしが確認されれば、「生命探査についての考え方を劇的に変えることになるだろう」と話した。

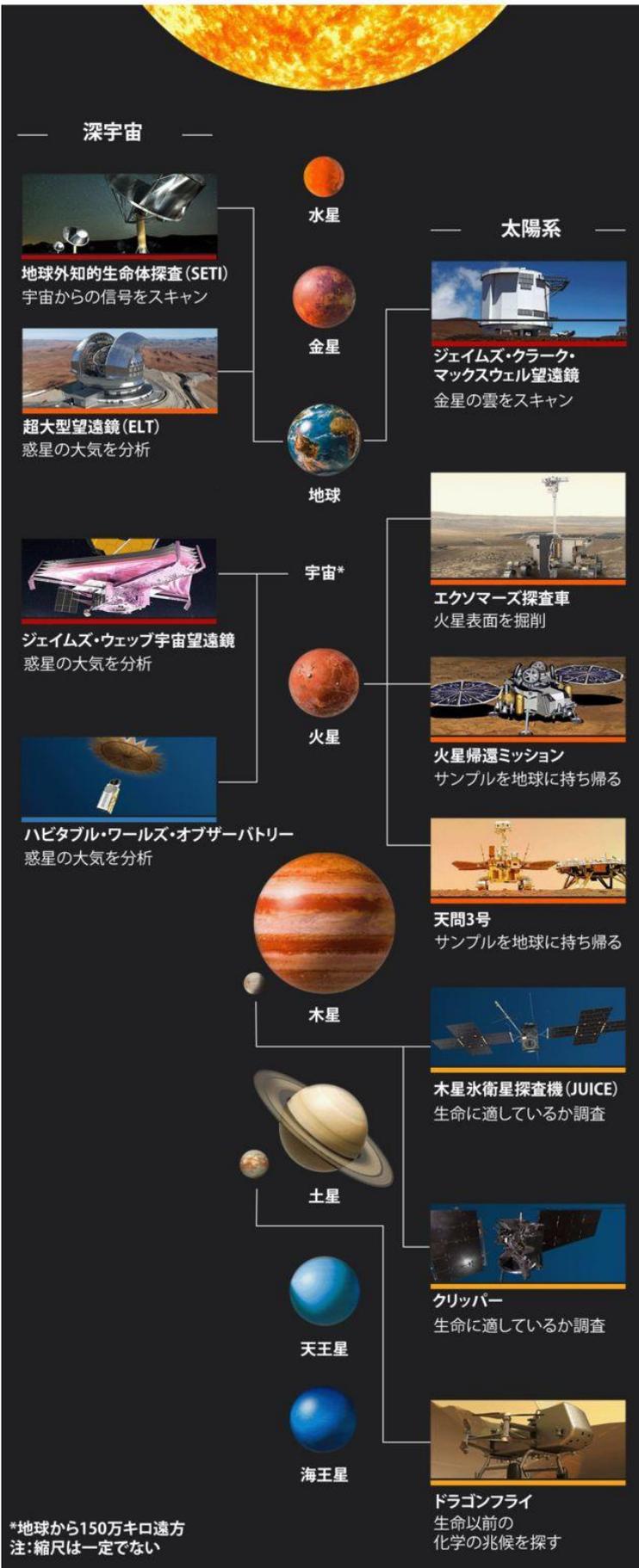
「最初に調査した惑星で生命の証拠が見つかったとなれば、宇宙に生命が遍在する可能性が高まる」マドウスダン教授は、宇宙の生命についての我々の理解は、5年以内に「大きな変化」を迎えると予測している。

仮に「K2-18b」で生命の証拠を見つけられなくても、このチームの調査リストには、さらに10個のゴルディロックス・ゾーンにある惑星が記されている。このリストは今後も増え続けるだろう。何も発見できなかった場合でも、「こうした惑星に生命がいる可能性について重要な示唆を与えてくれる」と、マドウスダン教授は述べた。マドウスダン教授のプロジェクトは、宇宙に生命の痕跡を探すために進行中、あるいは今後数年間で計画されている多くのプロジェクトのひとつに過ぎない。プロジェクトには、太陽系内の惑星を調査するものから、さらに遠くの深宇宙へ目を向けるものまである。

宇宙で生命を探す試み

太陽系や深宇宙で進行・予定されている探査計画

■ 現在進行中
 ■ 2020年代後半
 ■ 2030年代初め
 ■ 2030年代中盤



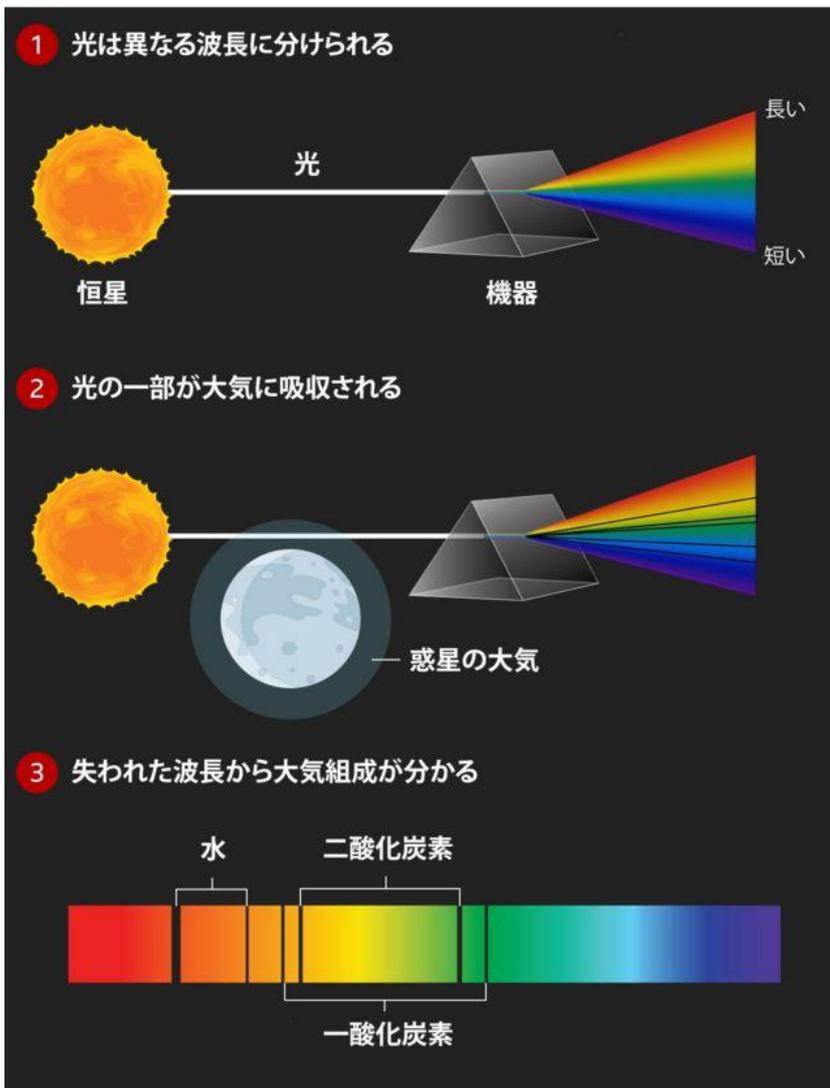
出典:BBCリサーチ、画像:米航空宇宙局、欧州宇宙機関、ゲッティイメージス、欧州南天天文台、中国国家航天局 **B B C**

ウェブ宇宙望遠鏡は強力だが、同時に限界も抱えている。地球では、その大きさと太陽との距離が生命を維持している。しかしウェブ望遠鏡ではグレアの影により、遠い宇宙で地球のような小ささの惑星や、地球と太陽ほど距離の近い惑星を検知できない。前述の「K2-18b」は、地球の8倍の大きさがある。

そのため NASA は今年初め、2030 年代の運用を目指す次世代宇宙望遠鏡「ハビタブル・ワールドズ・オブザーバトリー」（HWO、生存可能世界観測機）を発表した。HWO では、高機能の遮光シールドを使い、惑星が周回する恒星からの光を最小限に抑える。そのため、地球と似たような惑星の大気を発見し、サンプルを採取することができるという。一方、2020 年代に運用開始を見込んでいるのは、南米チリの砂漠に設置され、満天の星空を観測する超大型望遠鏡（ELT）だ。この望遠鏡では全長 39 メートルという最大級の鏡が使われ、これまでの望遠鏡よりもはるかに詳細に惑星の大気を観測できるという。

これら三つの大気観測望遠鏡には、化学者が数百年にわたって使ってきた、物質が発する光から物質内部の化学物質を識別する技術が用いられている。この技術では、何百光年も離れた恒星を周回する惑星の大気から発せられるわずかな光からでも、化学物質を検出することができる。

光で惑星の大気を分析する仕組み



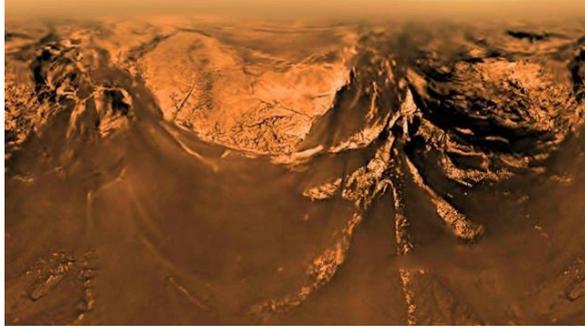
出典：米航空宇宙局、欧州宇宙機関、ゲッティーイメージズ

BBC

太陽系での探査

遠くの惑星に目を向ける天文学者がいる一方で、調査範囲を我々の裏庭である太陽系に絞る研究チームもある。太陽系で最も生命がいる可能性が高いのが、木製の氷の衛星「エウロパ」だ。その地表には、トラの縦じまのような美しい亀裂が入っている。エウロパの氷の地表の下には海があり、そこから水蒸気が宇宙空間に噴

出している。NASAの探査機「クリッパー」と欧州宇宙機関（ESA）の「木星氷衛星探査機（JUICE）」は共に、2030年代初頭にエウロパにたどり着く予定だ。



画像提供,NASA 画像説明, : エウロパのトラのしま模様は氷表面の亀裂によるものだ

画像提供,ESA 画像説明, : 欧州宇宙機関（ESA）のホイヘンス着陸機が、タイタンの地表に降下した際に撮影した画像

JUICE 計画が承認された2012年、私はこの計画の主任科学者であるミシェル・ドウワーティー教授に取材を申し込み、生命を見つける可能性があると思うかを聞いた。同教授の回答は、「木星の氷の衛星のひとつに生命体がいなかったとしたら、それはむしろ驚くべきことだ」というものだった。

NASAはまた、土星の衛星の一つである「タイタン」に探査機「ドラゴンフライ」を送り込んでいる。タイタンには有毒な炭素を多く含む化学物質からなる湖や雲があり、惑星を不気味なオレンジ色のもやで覆っている。だがこうした物質は水と共に、生命誕生に必要なだと考えられている。

火星は現在のところ、あまりにも生物には適さない惑星と考えられている。しかし天文生物学者らは、かつてこの惑星は緑豊かで、厚い大気と海があり、生命を維持することができたとみている。

現在、[NASAの火星探査車「パーサヴィアランス」](#)が、太古に河川のデルタ地帯があったとみられるクレーターでサンプル採取を行っている。これらのサンプルは、今はもういない単純な生命体の微化石を分析するため、2030年代に計画されている別のミッションで地球に持ち帰られる予定だ。

地球外生命体が人類に接触する可能性は？

科学者の中には、この疑問はサイエンス・フィクションの領域であり、望みは薄いと考える人もいる。一方で、地球外知的生命体探査（SETI）研究所をはじめとして、他の星からの電波信号の探査は何十年も続けられてきた。宇宙空間はとても広いので、これまでの探査は無作為に行われてきた。しかし、ウェッブ望遠鏡などが、異星人の文明が存在する可能性が最も高い場所を特定できるようになったことで、SETIは探索の焦点を絞れるようになった。SETIのカール・セーガン宇宙生命体研究センターのナタリー・カブロール所長は、こうした新技術が新たな原動力になったと話す。同研究所は望遠鏡群を近代化し、現在では遠くの惑星からの強力なパルスレーザーによる通信を探す機器を使っている。著名な宇宙生物学者であるカブロール氏は、SETIの信号探査に懐疑的な科学者がいる理由も分かっていると話す。だが、はるか彼方の惑星の大気で化学的な示唆があったことや、衛星のフライバイ（近接通過）からの興味深い測定値、火星からの微化石にすら、解釈の余地があるという。異星人からの信号を探すことは、「生命の証拠を見つけるためのさまざまなアプローチの中で、最もとっぴに思えるかもしれない。だがそれは最も明確で、いつでも起こりうることでもある」と、カブロール博士は述べた。「実際に理解できる信号があった場合を想像してほしい」

30年前、我々は他の恒星の周囲をめぐる惑星について何も知らなかった。それが今では、5000個以上の惑星が発見され、天文学者や宇宙生物学者はそれらを前例のない詳しく研究できる。

「K2-18b」の研究チームに所属する英カーディフ大学のスバジット・サルケル博士は、驚異的な科学的ブレークスルー以上の発見につながる要素はすべてそろっていると語る。

「もし生命のしるしが見つければ、それは科学における革命であり、人類が自分自身と、宇宙における自分たちの居場所を見つめる方法を大きく変えることになるだろう」

65 光年以内の惑星に「生命が存在」するはず 最新版ドレイクの方程式が示唆



[Jamie Carter | Contributor](#)



惑星を持つ恒星として有名なトラピスト 1 恒星系のイラスト。

数的研究によれば、太陽から 326 光年の距離の範囲内に、太陽に似た恒星を公転する、地球に似た太陽系外惑星が 1 万 1000 個存在する (NASA/JPL-Caltech)

太陽から 326 光年の距離の範囲内に、太陽に似た恒星を公転する、地球に似た太陽系外惑星が 1 万 1000 個存在する可能性があるとする数理的な研究結果が発表された。さらにこの研究によれば、太陽から 65 光年以下の距離にある系外惑星に、生命が存在する可能性があるという。この研究は、生命を探索している天文学者や宇宙生物学者の助けになるかもしれない。この興味深い研究知見は、米カリフォルニア大学天文学・天体物理学部のピエロ・マドーが、査読前論文の公開サイト arXiv に投稿した論文の草稿に掲載されている。太陽系外生命生存可能な惑星や地球外生命を探索する、この最新の数理的枠組みでは、2018 年に運用を終了した米航空宇宙局 (NASA) のケプラー宇宙望遠鏡の観測データを含む最新のデータを用いている。ケプラー望遠鏡は、2009 年～2018 年の 9 年間で 2662 個の系外惑星を発見した。

ドレイクの方程式を超えて

今回の新しい枠組みは、天体物理学者フランク・ドレイクが 1960 年代に考案した「[ドレイクの方程式](#)」の最新版で、技術的に高度な文明から、生命存在可能な惑星で発生した単純な微生物までの地球外生命の探索に成功する要因をまとめたものだ。決定的なデータがほぼないため、多数の仮定、推定、推量が必要になるドレイクの式は主に、宇宙で地球外生命の探索をどのように始めればよいかを検討するためのツールとされる。

さまざまな種類の系外惑星

マドーが提唱する枠組みは、系外惑星を探索する研究者らが、さまざまな種類の恒星の周りに、さまざまな種類の惑星がどのように形成されているかや、惑星の年齢と存在頻度などに関する統計的な理解を深められるように考案されている。その主な知見は、次の 4 点だ。

- ・ 太陽から 326 光年以内には、スペクトル型が K 型の (太陽に似た) 恒星のハビタブルゾーン (生命居住可能領域) 内に地球サイズの惑星が統計的に 1 万 1000 個存在する
- ・ 太陽系は、岩石質の系外惑星を持つ近傍の恒星系の 77% よりも若い
- ・ 岩石質の系外惑星は、宇宙の初期には木星型の系外惑星より数が多かった
- ・ 統計的に、生命が存在する最も近くの地球型惑星は、65 光年離れている

[次ページ > 生命探査への「現実的な」アプローチ](#) [生命存在指標を探す](#)

この最後の主張は、岩石質の系外惑星全体のわずか 1% で、地球の生命誕生と同時期 (つまり、生命存在可能な状態になってから 10 億年後) に微生物が発生したとする仮定に基づいている。「単純な生命体が大量に存在する場合は、古くからの存在でもあり、現在に生命が存在する惑星全体の約 3 分の 1 で、80 億年以上前に発生したと考えられる」と、マドーは論文に記している。「地球類似惑星はより古いほど、環境を改変し、検出可能

な酸素を含む生命存在指標を生成する能力を持つ十分に複雑な生命体を発達させている可能性が高くなる」生命存在指標は、惑星の大気に含まれる微量の気体で、表層に生命体が存在することの手がかりを与える可能性がある。だが、太陽類似恒星を公転する岩石惑星 1 万個に 1 個にのみ生命が発生するとすれば、地球は太陽近傍にある唯一の生命を宿す惑星になるとも、マドローは指摘している。

生命の発生

地球では生命存在可能になってから 10 億年以内に生命が発生したため、ケプラー望遠鏡が恒星周囲のハビタブルゾーン内で発見した多くの岩石惑星にも同じことが当てはまるかもしれないと、論文は主張している。ハビタブルゾーンが「ゴルディロックゾーン」と呼ばれることもあるのは、中心星から適度な距離にあり、気温が暑すぎず寒すぎず、表層に水が液体で存在する可能性のある軌道のことを指すからだ。地球の生命誕生とケプラー望遠鏡の観測結果から得られる知識は「過去に他の天体で生命が発生した可能性が（もしあるとすれば）どのくらいの頻度かという疑問をもたらす」と、マドローは記し、この疑問に答えるには、次の 3 点について知る必要があると主張している。

- ・生命が存在できる可能性のある岩石質系外惑星がいくつあるか
 - ・各系外惑星の気候はどのようなものか
 - ・それぞれの系外惑星の大気中に手がかりとなる化学的なバイオマーカー（生物指標化合物）があるかどうか
- 現在稼働中および今後稼働予定の宇宙望遠鏡の多くは、太陽系外惑星科学を中心に据えているものの、人類がこの 3 つの作業を終わらせるのは非現実的だと、マドローは述べている。「個々の恒星系に関する包括的なデータを収集するのは、不可能ではないにしても現実的ではないため、フォローアップ（追跡）観測の対象の優先順位を決めるのに、統計的な観点が必要になる」と、マドローは記している。 (forbes.com [原文](#))

<https://www.gizmodo.jp/2023/10/carbon-dioxide-on-europa.html>

木星の衛星エウロパには水が存在、生命体発見への期待が高まる

2023.10.02 23:00 Isaac Schultz - Gizmodo US [\[原文\]](#)（湯木進悟）



Image: NASA, ESA, CSA, G. Villanueva (NASA/GSFC), S. Trumbo (Cornell

Univ.), A. Pagan (STScI)

もしやもしや…？

人類は地球外知的生命体の存在を発見すべく、これまで数々の宇宙探査プロジェクトを立ち上げてきました。このほど欧州宇宙機関 ([ESA](#)) は、ウェッブ宇宙望遠鏡の観測を通じ、木星の衛星エウロパから、新たに二酸化炭素の存在を示す証拠データを入手したとの発表を行ないましたよ。

液体の水と二酸化炭素の両方が存在

実は地球外の惑星に二酸化炭素が存在することは、それほど珍しい発見ではありません。そもそも火星には豊富な二酸化炭素の存在が確認されました。しかしながら、いまだ液体の水の存在は突き止められていません。一方、木星の周囲を回る衛星エウロパには、地表面を覆う氷の下に液体の水が存在すると考えられています。新たにウェッブ宇宙望遠鏡の「NIRSpec」という赤外線解析探査装置のデータ分析が進められた結果、エウロパの「Tara Regio」というエリアに、二酸化炭素の存在を発見。Tara Regio には大量の水蒸気が吹き上げられているようで、地表下の海から二酸化炭素が出てきた可能性も高いのだとか。エウロパの地表面で観測データから

発見された炭素は、（その下の）海から来たものだと考えている。これは取るに足りない発見などではない。炭素は生命の存在に欠かせないものだからだ。今回の分析調査チームを率いた、コーネル大学の Samantha Trumbo 氏は、こんなふうには語っています。もし本当にエウロパに液体の海水が存在し、そこに炭素が含まれているとしたら、生命を発見することにつながっていく可能性は大いに高まりますよね！

さらなる探査は 2030 年代に

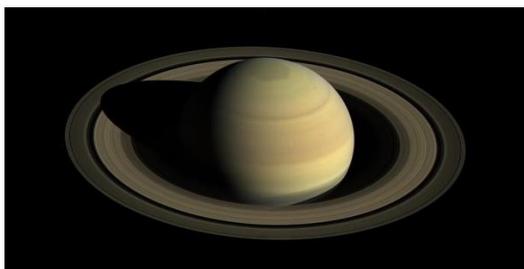
ESA では、今後も木星探査が計画されています。今年 4 月には、探査機の「JUICE」が打ち上げられ、2031 年に木星付近へ到着予定。衛星のエウロパだけでなく、ガニメデやカリストなどの観測が進むそうです。さらには、来年 10 月にも、NASA が「Europa Clipper」を打ち上げ、2030 年にエウロパに到着して探査を進める計画が立てられていますよ。

<https://sorae.info/astromy/20231003-saturn-ring.html>

土星の環は数億年前に 2 つの衛星が衝突した結果形成されたか 新たな衛星が誕生した可能性も

2023-10-03 [sorae 編集部](#)

土星最大の特徴である大きな環は土星が形成された頃から存在するのではなく、地質学的には最近と言える数億年前に形成された可能性が近年の研究で指摘されています。グラスゴー大学／オスロ大学の Luis Teodoro さんを筆頭とする研究チームは、土星の環は 2 つの衛星が衝突したことで形成されたとする研究成果を発表しました。



【▲ 土星探査機カッシーニが撮影した土星。2016 年 4 月撮影（Credit: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute）】

【▲ 今回の研究で実施されたシミュレーションを紹介するアメリカ航空宇宙局（NASA）の動画（Credit: NASA/Jacob Kegerreis/Luís Teodoro）】

土星の環が衛星どうしの衝突で生じた破片から形成された可能性に着目した研究チームは、衛星の大きさや衝突の仕方を変えた約 200 通りのシミュレーションを実施しました。その結果、2 つの氷衛星の衝突によって生じた破片から環が形成されたり、新たな衛星が形成されたりする可能性が示されたといいます。

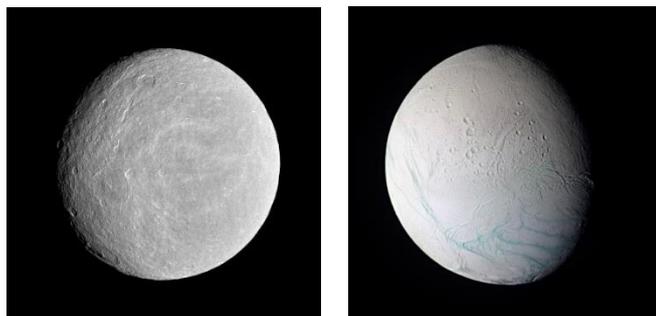
土星の環は主に水の氷でできていて、岩は少ししか存在しないことが知られています。研究に参加したダラム大学の Vincent Eke さんによると、氷衛星どうしの衝突では衛星の中心部にある岩よりもその上にある氷のほう

が分散しやすいことから、土星の環が主に氷でできていることをうまく説明できる可能性があるようです。長いあいだ存在していた 2 つの衛星が数億年前に衝突したのは、太陽の重力によるわずかな影響が積み重なった結果、衛星の軌道が他の衛星と交差する楕円軌道に変化したからだと考えられています。月が少しずつ地球



から遠ざかっているように土星の衛星も少しずつ土星から遠ざかっており、衛星の軌道がある位置まで広がった時に、こうした衛星どうしの衝突につながる変化が生じると予想されています。

興味深いことに、現在では土星の衛星レア（直径約 1530km）がまさにそのような位置で公転しているといえます。ところが、古くから存在する衛星であれば軌道が不安定になる影響を受けているはずなのに、レアの軌道はほぼ真円です。このことから、レアは古くから存在する衛星ではない可能性が指摘されています。



【▲ 土星探査機カッシーニ（Cassini）の広角カメラで 2009 年 11 月 21 日に撮影された衛星レア（Credit: NASA/JPL/Space Science Institute）】

【▲ 土星探査機カッシーニの狭角カメラで 2005 年 7 月 14 日に撮影されたエンケラドゥス（紫外線・可視光線・赤外線フィルタを使用して取得したデータをもとに作成）（Credit: NASA/JPL/Space Science Institute）】

今回の研究は土星の環がまだ新しいとする近年の研究と一致する結果にたどり着きましたが、それでもなお土星とその衛星には幾つもの謎が残されています。研究内容を紹介したアメリカ航空宇宙局（NASA）は、その一例として衛星エンケラドゥス（直径約 500km）を挙げています。

エンケラドゥスは氷の外殻の下に内部海が広がっている可能性があり、生命が誕生している可能性も指摘されています。仮に土星の衛星の一部がまだ新しいとすれば、エンケラドゥスの生命居住可能性を探る研究にも関わってくるかもしれません。今回の研究成果は、土星やその衛星をさらに深く理解することにつながると期待されています。

Source [NASA](#) - New Simulations Shed Light on Origins of Saturn's Rings and Icy Moons

Teodoro et al. - A Recent Impact Origin of Saturn's Rings and Mid-sized Moons (The Astrophysical Journal)

文/sorae 編集部

<https://forbesjapan.com/articles/detail/66398>

2023.10.05

月や火星、水星へ いま注目の宇宙ミッション7選



shutterstock

2020 年代に計画されている多くの宇宙ミッションと共に、月やその他の宇宙空間への到達を目指す勢いが世界中で高まっています。NASA の「アルテミス 3」は、人類を再び月面へ戻すことを目指し、他の宇宙機関は、火星や水星などへのミッションを計画しています。

世界経済フォーラムのブリーフィングペーパー「[宇宙技術が地球上の生活に恩恵をもたらす 6 つの方法](#) (Six Was Space Technologies Benefit Life on Earth)」によると、宇宙での科学研究は、健康科学、材料科学、ロボット工学、その他の技術への理解の新境地を開拓する手助けをしています。本題について WEF のアジェンダからご紹介します。

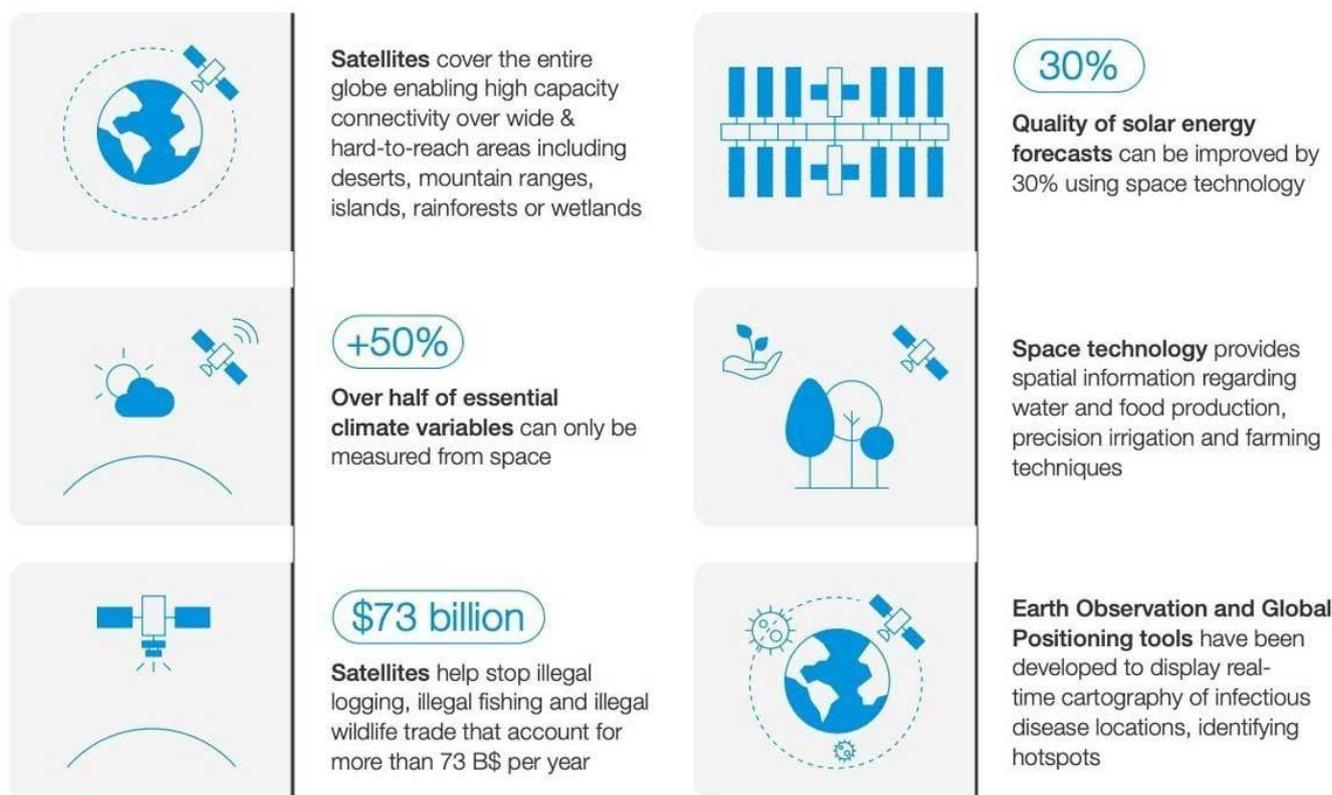
「私たちは皆、月とその先を目指すことができる」

8月にインドの無人月面探査機が月の南極に歴史的な着陸を果たした後に、同国のナレンドラ・モディ首相が語ったこの言葉は、今、現実のものになりつつあります。月およびその他の宇宙空間への到達を目指す勢いが世界中で高まっており、2020年代には多くの宇宙ミッションが計画されています。日本は、インドの後を追うように、月面着陸を目指す探査機「SLIM」を搭載した「H2A」ロケットを9月初旬に打ち上げました。インドのチャンドラヤーン3号が将来の月探査を支える可能性のある[水氷の発見を目指している](#)のに対し、日本のSLIMは、降りたい場所をピンポイントで狙って精度100メートル以下で降下することができる特徴を生かして、月への「高精度着陸」が可能であることを証明しようとしています。

増加する宇宙開発への支出

宇宙財団によると、各国政府は、2022年に宇宙開発への支出を90億ドル増加させています。これは、国防費の45%を占めるようになったことを意味し、1年前の41%から増加しています。そして、宇宙探査は国だけのものではなく、[企業による宇宙プログラム開発も勢いを増しています](#)。こうした流れは、宇宙探査の可能性を広げ、地球が直面している最大の課題のいくつかに取り組む手助けになるかもしれません。

Examples of benefits



宇宙研究は、地球が直面している最大の課題への答えを見つける鍵となっています。 Image: World Economic Forum

「地球を周回する人工衛星は、最も正確な気象情報を提供し、迫る暴風雨を警告します。毎日気候を観測することで、気候変動の進行速度とその影響を追跡する助けとなります」と、世界経済フォーラムのグリーンペーパー「[宇宙技術が地球上の生活に恩恵をもたらす 6 つの方法](#) (Six Ways Space Technologies Benefit Life on Earth)」では述べられています。「軌道上で行われる科学研究は、健康科学、材料科学、ロボット工学、その他の技術への理解の新境地を開拓する手助けをしています。」

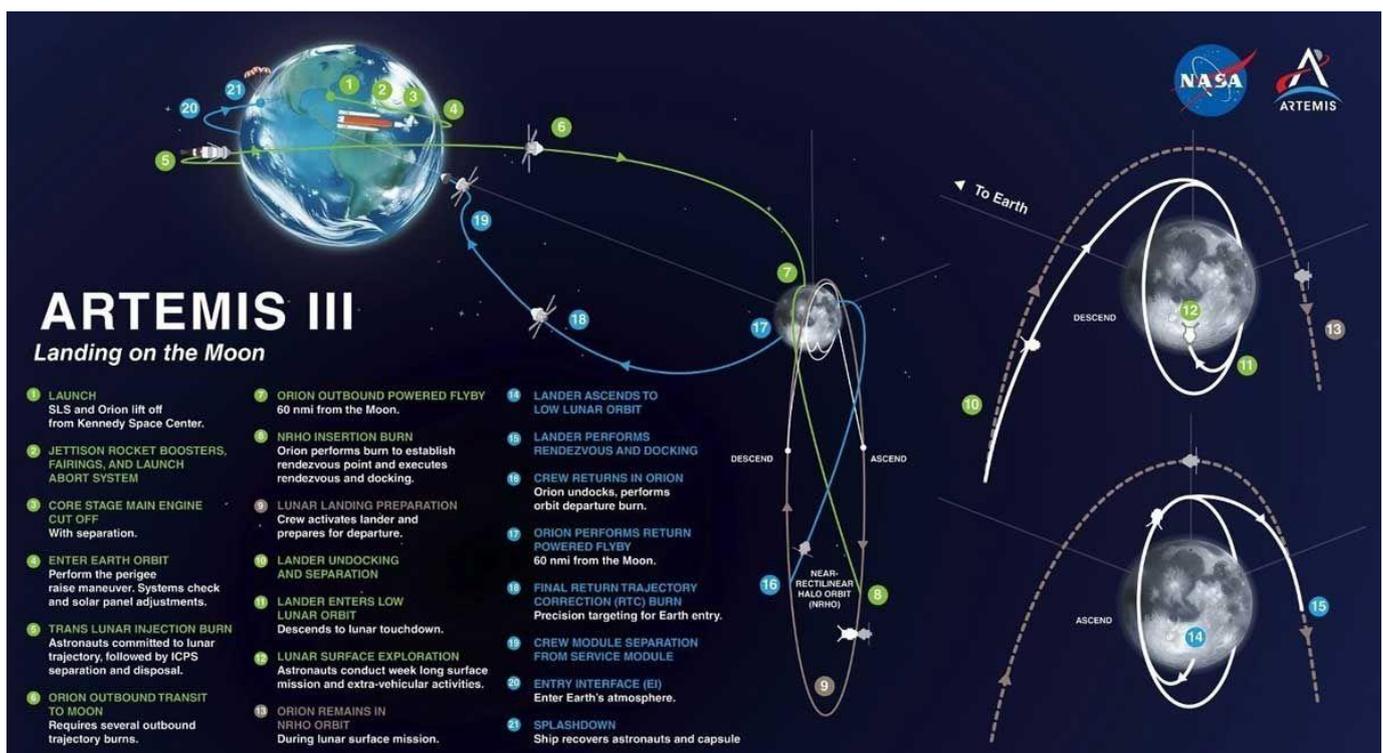
本稿では、2020年代に計画されている最も重要な宇宙ミッションのいくつかを紹介します。

[次ページ >50年ぶりに人類が月面を歩く](#)

NASA のアルテミス 3：人類を月に戻す

2025年の実施が予定されている、有人月面着陸プロジェクト「[アルテミス 3](#)」ミッションが成功すれば、50年ぶりに人類が月面を歩くことができるかもしれません。

インドと同様に、米国の宇宙機関 NASA も月の南極付近の探査を計画している。宇宙飛行士は、着陸後、地質調査のために写真やビデオを撮影する予定です。また、太陽系全体の理解を深めるため、サンプルの採取も行うことになっています。



アルテミス 3 は、人類を再び月面へ戻すことができるかもしれません。 Image: NASA

「このミッションは、人類が一貫して月にアクセスし、有人惑星探査ミッションが手の届くところにある未来を切り拓くでしょう」と、NASA は述べています。さらに、アルテミス 3 により蓄積された知識と技術発展は、人類初の火星探査への道を拓く助けになるだろうと強調しています。

ヨーロッパのエクソマーズ：火星の探査

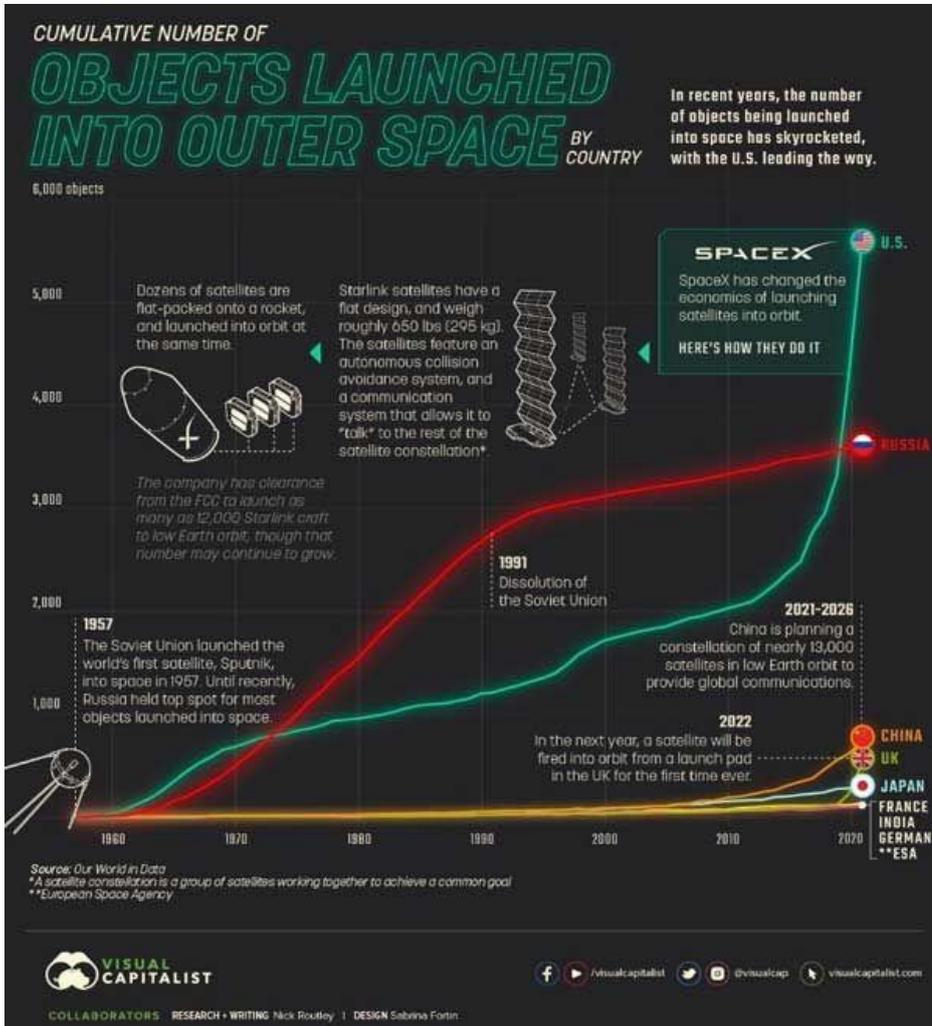
火星に生命は存在するのでしょうか。あるいは、生命は存在していたのでしょうか。2008年に打ち上げられた欧州宇宙機関 (ESA) の火星探査機「エクソマーズ」の[ミッション](#)は、それを突き止めようとしています。この火星探査ミッションの目的は、自走型の火星探査車「ロザリンド・フランク」を火星の表面に送り込み、地質学的サンプルを採取するために地下 2 メートルまで掘削を行うこと。別の探査車は、火星の大気に含まれている微量ガスを調査します。

エクソマーズの着陸は 2030 年に予定されていますが、そのタイミングが重要になります。ミッションは 6 カ月の研究期間を要しますが、火星の北半球の冬は大量の塵が舞い上がり、探査機の機能に支障をきたす可能性があるため、冬が到来する前に出発する必要があります。また、アラブ首長国連邦 (UAE) も火星でのミッショ

ンを手がけています。UAE は、2021 年に火星探査機「ホープ」を火星周回軌道に投入。ホープが撮影した写真は、火星全体を一望できる新しい地図の作成につながりました。UAE は、2117 年までに火星に人類が居住できる最初の都市を建設するという長期目標を掲げています。

日本の MMX：火星の衛星に向かう

宇宙航空研究開発機構（JAXA）による火星衛星探査計画「[Martian Moons eXploration \(MMX\)](#)」は、2025 年に火星周回軌道に投入され、火星の衛星フォボスを探査する予定です。フォボス表面には、隕石衝突により火星表面から吹き飛ばされたサンプルが降り積もっていると考えられており、JAXA は、生命の痕跡を含む火星表層からのサンプルを世界で初めて地球に持ち帰ることを目指しています。



国だけでなく、企業も進める宇宙開発。 Image: Visual Capitalist

「このミッションの主要な目標は、2つの火星衛星の起源や火星圏（火星、フォボス、ダイモス）の進化の過程を明らかにすることです」と、JAXA。「このシステムは、太陽系の惑星形成の謎を解く鍵を得ることに貢献します。」

スペース X のファルコン 9：宇宙にインターネットを

イーロン・マスク氏の会社、スペース X は、軌道に乗るためのコストを劇的に削減する再使用可能なロケットが、宇宙探査におけるブレークスルーとなるだろうと述べています。

現在、ほとんどのロケットは一度しか使用されないが、スペース X は、世界で初めて商用用ロケットの再使用を成し遂げました。スペース X の「ファルコン 9」は、[スターリンク](#)と名付けられた宇宙ベースのインターネット通信システムを構築する計画の一環として打ち上げられる予定です。これにより、世界中で高速インターネットが利用できるようになると、同社は述べています。

[次ページ > 太陽に最も近い惑星、水星への旅](#) ベピコロンボ：水星へ向かう

水星は太陽系で最も小さい惑星であり、太陽系の中では最も探査が進んでいません。2018年に打ち上げられたESAの「[ベピコロンボ](#)」は、一連の惑星スイングバイを経て2025年に水星周回軌道へ投入される予定です。ベピコロンボは、水星周回軌道に入る史上2番目のミッションです。太陽に最も近い惑星でその表面は最高430°Cにも達する水星に、磁場があるのか、なぜ極地のクレーターに氷があるのかなどについて調査をします。「水星は、他の恒星を周回する太陽系外惑星を研究する科学者にとって、特に興味深い存在だ」と、NGOの惑星協会は述べています。「何千もの既知の太陽系外惑星が、恒星に極めて近い軌道を周回しています。私たちの裏庭にあるとも表現できる水星を研究することで、これらの軌道が近接している惑星がどのようなものかをより理解することができるでしょう。」

中国の嫦娥6号：月の岩石サンプルを採取する

2024年5月に打ち上げが予定されている中国の月面探査機「嫦娥6号（Chang'e-6）」は、4つの宇宙船で構成されており、このミッションは、月の裏側の南半球の[アポロ盆地](#)として知られる地域の岩石サンプルを採取することを目的としています。この盆地は、幅538kmのクレーターで、玄武岩質の溶岩が月面の窪みに流れ込んで形成される「（月面の）海」に覆われていると考えられています。

嫦娥6号は、月の歴史をより詳しく知ることを目的とし、2kg泥やその他サンプルが採取される予定です。

2026年と2028年には、嫦娥7号と8号のミッションを計画している中国は、2030年までに月面に宇宙飛行士を送り込みたいとしています。

NASAのドラゴンフライとダヴィンチ：土星と金星への旅

NASAの「[ドラゴンフライ](#)」は、2026年に打ち上げられ、2034年に土星圏に到着します。このミッションは、2年をかけて地表のサンプルを採取し、ハビタビリティ（居住可能性）を調査します。

ドラゴンフライは、土星に向かう途中で金星を通過しますが、2029年に打ち上げが予定されている金星探査ミッション「[ダヴィンチ](#)」は、太陽系で地球に最も近い金星にまっすぐ向かいます。

このミッションの目的は、金星の大気の起源と進化を解明し、そして金星と地球や火星の違いやその理由をより良く理解すること。また、金星にかつて海があったのかを探り、火山活動のレベルも調査します。

（この記事は、世界経済フォーラムの[Agenda](#)から転載したものです）

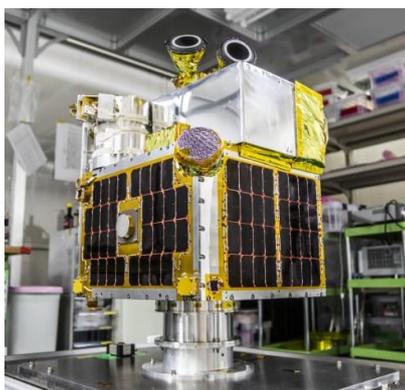
<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2310/03/news182.html>

「すごい流れ星が見えるかも」 400粒もの“流れ星の素”を積んだ人工衛星が近

く大気圏再突入

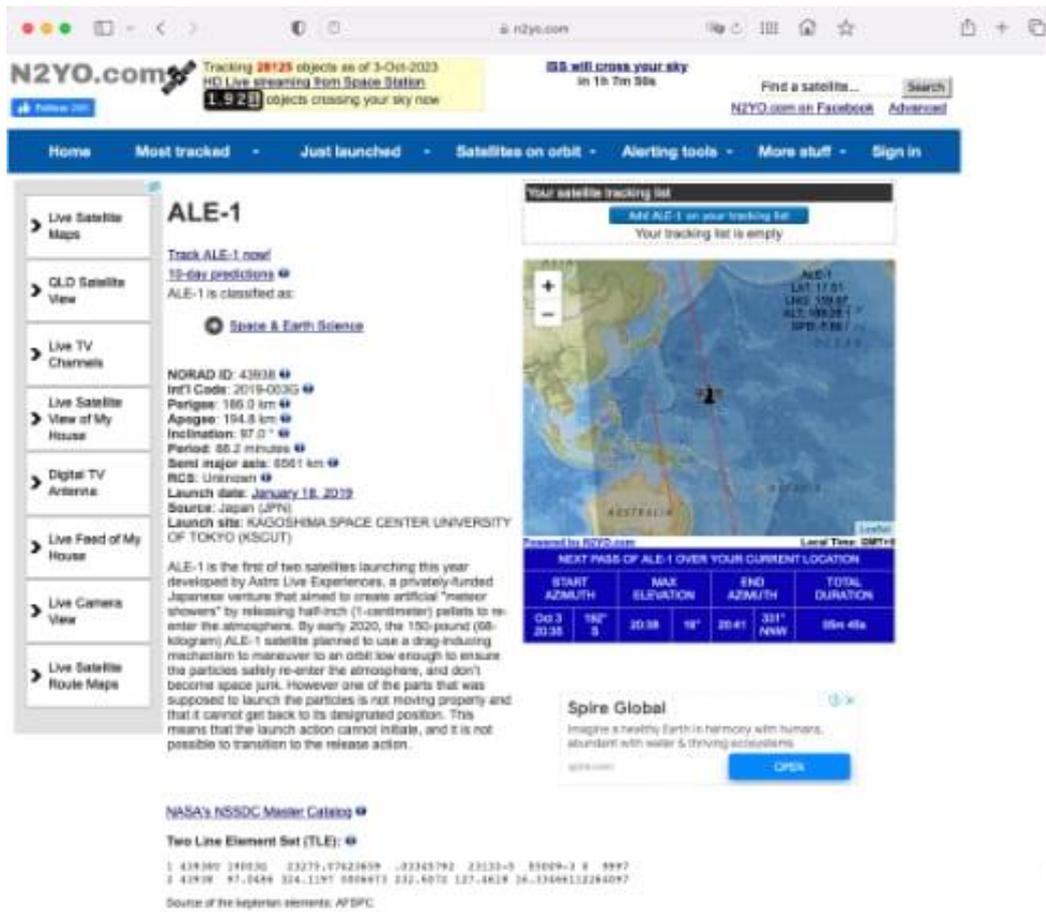
2023年10月03日 19時22分 公開 [ITmedia]

「地球上の皆様にお願ひです」——人工流れ星プロジェクトを進める宇宙スタートアップのALE（東京都港区）は、実証衛星「ALE-1」が近く大気圏に再突入するとして広く観測を呼び掛けている。衛星には400粒もの“人工流れ星の素”（流星源）を搭載しており「すごい流れ星が見えるかも」という。



ALE-1の外観（公式Xアカウントより）

ALEの岡島礼奈代表は、9月27日に自身のnoteを更新し、天体観測や流星のカメラ観測をしている人達に向けて広くデータ収集への協力を要請した。ただし、「いつ、どこで再突入するか」分からないため、人工衛星の位置が分かるWebサイト「N2YO.com」のURLを添えた。「みんなでALE-1の再突入を追ってほしいです！もしかするともしかすると、400粒の流れ星が一気に光ったりするかも？」ALE-1の降下ペースは予想より遅く、9月の時点では10月3日の再突入が有力視されていたが、ALEのX(旧Twitter)公式アカウントは「この高度だと本日中のリエントリはなさそうですね」(3日午後4時時点)と投稿している。



ALE-1の位置(3日午後7時時点)

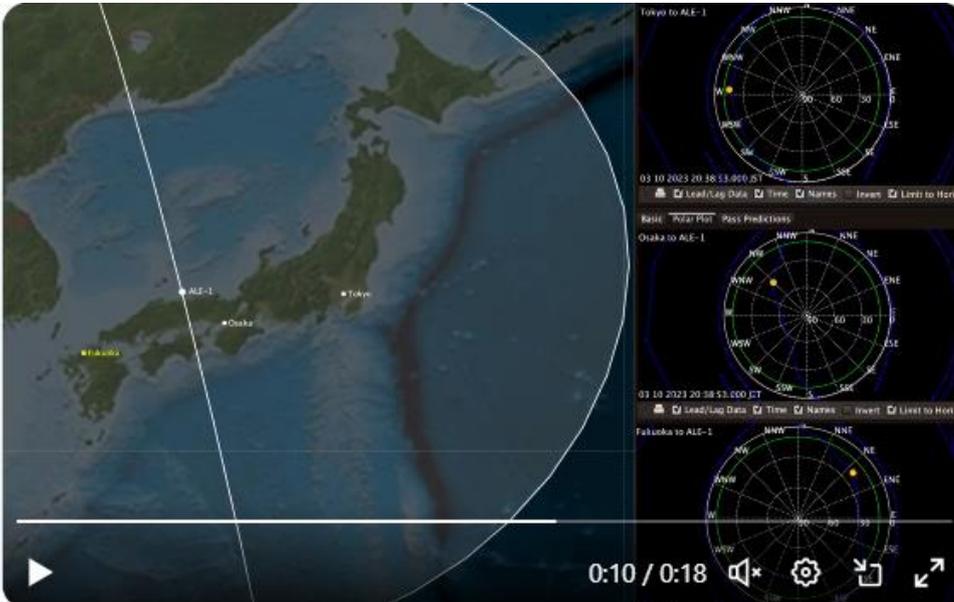
ALE-1は、2019年1月18日にイプシロンロケット4号機によって打ち上げられた同社初の実証衛星。22年には高度500kmの軌道から人工流れ星の放出運用高度である約400kmへの軌道降下ミッションを完了した。最後に流星源を放出し大気圏に再突入する見通しで、衛星本体は高度60~80kmで燃え尽きるとみられている。ALEは世界初の人工流れ星を実現する予定だった2号機「ALE-2」も19年末に打ち上げたが、流星源装填機構の動作不良で果たせず、今年4月に大気圏に再突入し燃え尽きた。ただし、2つの実験機で得た知見も生かしてすでに3号機「ALE-3」の打ち上げを計画。24年に打ち上げ、25年にサービスを開始するとしている。

[Abe Shinsuke 阿部新助@AveilSky](#)

今夜、搭載されている400粒の流星花火が降るかも!? 2019年イプシロンロケット4号機で打ち上げられた

[@ALE_StarAle](#)

の人工流れ星衛星「ALE-1」が大気圏再突入。2023年10月3日~4日頃の予報。東京、大阪、福岡から見える今夜20:36~20:41(JST)のALE-1の時間と方角を動画にしました。報告を待つ! [#SkyCanvas](#)



午後 2:04 · 2023 年 10 月 3 日 Copyright © ITmedia, Inc. All Rights Reserved.

<https://resemom.jp/article/2023/10/02/74039.html>

巨大反射鏡が崩落したアレシボ天文台、再出発が決定

2023.10.2 Mon 18:45

米国科学財団（NSF）が、プエルトリコのアレシボ天文台を教育施設として再出発させるため、4つの機関に管理を移すと発表しました。



米国科学財団（NSF）が、プエルトリコのアレシボ天文台を教育施設として再出発させるため、4つの機関に管理を移すと発表しました。

アレシボ天文台と言えば、1963年に完成した口径305メートルの巨大反射鏡がトレードマークの電波天文台。2016年に中国が500m球面電波望遠鏡（FAST）を完成させるまでは世界最大の反射鏡として知られています。映画『コンタクト』や『007／ゴールデンアイ』では、アレシボの巨大なボウルのような反射鏡が登場したのを覚えていることでしょう。1992年にそれまで確認されることがなかった太陽系外惑星を初めて発見したのもこの施設でした。しかし2020年8月、それまで地震やハリケーンの襲来にも耐えてきたアレシボ天文台の副鏡の一部が崩落して主鏡を壊し、同年12月にも主鏡の上に吊り下げられている900tのプラットフォームが落下して壊滅的な被害が発生したため、長年この施設に資金提供してきた米国科学財団をはじめとする運営者らは、アレシボの天文台、天文学研究施設としての役割を終了し、敷地内設備を教育施設として改修する方針を打ち出していました。今回の発表では、アレシボを生物学やコンピュータサイエンスなどの科学教育と、地域社会への支援に重点を置く教育センター（通称アレシボC3）として運用していくため、米ニューヨーク州にある生物学・医学を専門とするコールド・スプリング・ハーバー研究所、米メリーランド大学ボルチモア・カウンティ校、プエルトリコ大学リオ・ピエドラス校、プエルトリコ・サンファン・University of the Sacred Heartの4機関に運営を引き継ぐとしました。またNSFは、引き続き今後5年間で550万ドルを投じて、このプロジ

エクトを推進していく計画です。コールド・スプリング・ハーバー研究所の関係者は、アレシボ C3 について「計算スキルの必要性、科学をすべての人の生活に統合する必要性を教育し、そして最終的にはコミュニティの人々に手を差し伸べることが、科学センターの役割だ」と述べています。すべてが計画通りに進めば、このセンターは 2024 年初めに開設される予定。アレシボ C3 は、部分的に天文学ではなく生物学、特に遺伝子研究の支援に移行するとしており、旧天文台周辺の動植物から DNA サンプルを収集し、短い遺伝子配列またはバーコードから標本を特定し、地域の生物多様性をカタログ化していく計画だとされています。

ただ、研究者のなかにはアレシボが天文学研究の第一線から退くことを残念に思う人もいます。Nature はアレシボ C3 の構想を打ち出しても、世界最大規模の望遠鏡を使用した観測や現場での活発な研究がなければ、以前ほど多くの有能な学生たちが集うのは難しいかもしれないとの懸念を伝えています。

<https://news.livedoor.com/article/detail/25103490/>

宇宙ごみ投棄で初の罰金＝米企業に 2 2 5 0 万円

2023 年 10 月 4 日 5 時 3 分 [時事通信社](#)



[写真拡大 \(全 2 枚\)](#)

【ワシントン時事】米連邦通信委員会（FCC）は 2 日、古い人工衛星を適切に軌道から離脱させなかったとして、米衛星放送企業ディッシュネットワークに罰金 1 5 万ドル（約 2 2 5 0 万円）を科したと発表した。

米当局が宇宙ごみを巡って罰金を科するのは初めて。民間企業による宇宙開発が進展する中、今後同様のケースが増えそうだ。宇宙ごみは地球の周回軌道上にある不要な人工衛星やロケットの破片などで、衝突の危険が指摘されている。欧州宇宙機関（ESA）の 2 0 2 2 年の報告書によると、周回軌道上には 3 万個以上が漂

っているという。  時事通信社

<https://www.cnn.co.jp/usa/35209845.html>

宇宙ごみ捜査で米衛星テレビ会社に初の罰金 米 FCC

2023.10.04 Wed posted at 12:34 JST



住宅の屋根に取り付けられたディッシュのロゴのある衛星受信アンテナ＝7 月 3 1 日、米カリフォルニア州ク
ロケット/David Paul Morris/Bloomberg/Getty Images/FILE

(CNN) 米衛星テレビ会社のディッシュ・ネットワークが衛星の適切な廃棄を怠ったとして、米連邦通信委員会(FCC)が15万ドル(約2240万円)の罰金を命じた。宇宙ごみに対して米連邦当局がこうした処罰を科すのは初めて。FCCは2日、ディッシュに対する捜査が決着し、罰金と同社による「責任の認定」につながったと発表した。これに対してディッシュは声明を発表し、問題とされたのは2002年に打ち上げられた古い衛星で、最低廃棄軌道を求めるFCCのルールの対象外だったと強調。この衛星が安全上の懸念を生じさせるとはFCCは主張していないと述べ、ディッシュには「大型衛星群を安全に飛行させてきた実績があり、FCCの免許事業者としての責任を真剣に受け止めている」とした。

宇宙ごみは衛星の運用にとって差し迫った問題になりつつある。地球の軌道上には、1センチを超す制御不能の宇宙ごみが70万近くあると推定されている。こうした物体は衛星や国際宇宙ステーション(ISS)に衝突したり、宇宙ごみ同士で衝突したりする危険がある。厳格な宇宙ごみ対策勧告の順守は最近まで、大部分が衛星業界の自主規制に委ねられていた。FCCのディッシュに対する捜査の対象となっていたのは、02年に地球の上空約3万6000キロの静止軌道へ打ち上げられた「エコスター7」と呼ばれる衛星。FCCは12年、運用空間の約300キロ上空で同衛星を引退させる廃棄計画を承認した。機能しなくなった衛星を、運用中の衛星と衝突するリスクのない墓場軌道へ移動させる計画だった。

しかしFCCによると、ディッシュがこの衛星に十分な燃料を残さなかったために計画が実行できず、エコスター7は機能しなくなった状態で静止軌道内の運用空間の約122キロ上空に取り残された。

https://news.biglobe.ne.jp/domestic/1005/dol_231005_0751225685.html

なぜ、時間は前にしか進まないのか? 「わかっていること」と「わかっていること」

2023年10月5日(木) 6時0分 [ダイヤモンドオンライン](#)



[写真を拡大](#)

「この本は、まちがいなく買いた」。竹内薫氏絶賛の1冊『僕たちは、宇宙のことぜんぜんわからない』。本書は、「宇宙は何でできてるの?」「ビッグバンの時には何が起こったの?」「ダークマターって何?」「宇宙で僕らはひとりぼっちなの?」……こんな「まだ解かれていない宇宙の謎」を解説する「世界一わかりやすく面白い宇宙入門」だ。本連載では、本書の一部から抜粋して、わかりやすい宇宙の話をお伝えする。

Photo: Adobe Stock

疑問: どうして時間は前にしか進まないの?

時間をさかのぼることができなかつたら、当然こう思うだろう。「どうして時間は前にしか進まないんだろう?」 時間が前に進まなかつたらおかしいだろう。

料理をオープンに入れると材料に戻ったり、暑い日にコップに入れたジュースの中で氷ができたり、食べてしまったガールスカウトのクッキーが口から出てきたり。どれも前に進むのは見慣れているけれど、逆に進んでいるのを見たら薬の量を減らしたほうがいい。また、過去に起こったことを思い出すのはできるけれど、未来に起こることを思い出すのは無理だ。時間には好きな方向というのがあるみたいだけれど、それがどうしてなのかは、ぜんぜんわからない。どうして時間は前にしか進まないんだろう? この基本的な疑問に、物理学者は昔から頭を悩ませている。そもそも「時間が前に進む」ってどういう意味だろう?

時間が反対に進んでいる宇宙に住む科学者は、その方向を前と呼んでいるはずだ。だから本当はこう言わないといけない。「どうして時間はこの方向に流れているんだろう?」

最初に考えないといけないのは、時間が反対に流れてもこの宇宙は成り立つかどうかだ。時間の流れは物理法則によって1つの方向に決まっているのだろうか？

どこかの宇宙を写したビデオを観ているとしよう。そのビデオが正しい方向に再生されているか、それとも逆再生になっているか、注意して観察したら言い当てられるだろうか？

たとえば、ビデオには跳ねているボールが写っているとしよう。完璧に跳ね返る（摩擦や空気抵抗でエネルギーが減っていかない）ボールなら、順再生しても逆再生してもまったく同じに見えるはずだ！

ボンベの中で跳ね回る気体の分子とか、川の中を流れる水の分子とかでもそうだ。量子力学でさえ、時間が逆に流れてもぜんぜん問題ない。ほとんどの物理法則は、時間が前に進んでも後ろに進んでも何も変わらないのだ。でも全部じゃない。完璧に跳ね返るボールの例は現実には起こらない。ボールと地面のあいだの摩擦とか空気抵抗とかいった、ボールのエネルギーを熱に変えてしまういろんな作用を無視してしまっているからだ。君のペットのフェレットが大好きなスーパーボールでさえ、スーパーボールでさえ、何回か跳ねたらだんだん低くしか跳ねなくなって、最後は地面に止まってしまう。ボールのエネルギーはすべて、空気分子やボール分子や地面分子の熱に変わってしまうのだ。

跳ねている実際のボールを写したビデオを逆再生したらどんなに変に見えるか、思い浮かべてみてほしい。

地上に止まっていたボールが突然跳ねはじめて、どんどん高く跳ねていくのだ。エネルギーの流れ方はますます奇妙だ。空気とボールと地面が少しだけ冷えて、そのぶんの熱がボールの運動に変わってしまうのだ。

この例なら順再生と逆再生の違いを確実に見分けられる。さっき挙げた、料理ができる、氷が融ける、クッキーを食べるといった例でもそうだ。でもほとんどの物理法則、とくに熱や拡散のミクロの物理は、逆再生でも問題なく通用する。じゃあどうして、マクロなプロセスは一方方向にしか進まないように見えるのだろうか？それは、ある範囲の中の乱雑さ、いわゆるエントロピーが、時間の方向をとてつもなく選り好みするからだ。エントロピーは、時間が進むにつれて必ず大きくなる。それを「熱力学の第二法則」という。

エントロピーは、何かの乱雑さと考えたらいい。

餌をやるのを忘れてたら、フェレットは部屋をめっちゃくちゃにする。そのとき、部屋の乱雑さは増して、エントロピーは大きくなる。家に帰ってきた君が片づければ、部屋のエントロピーは小さくなるけれど、それにはかなりエネルギーが必要だ。そのエネルギーは、熱とかイライラとか、ルームメイトに「フェレットはやめとけてあれだけ言ったのに」とぶつぶつ愚痴る声とかで解放される。

部屋が片づく一方で君がエネルギーを解放するので、全体のエントロピーは増える。

本を積むとか、メモを取るとか、エアコンをつけるとかして、ある一部の場所を整理整頓したら、必ずその代わりに乱雑さが、ふつうは熱として生まれるのだ。

第二法則によると、時間が進むにつれて全体の平均のエントロピーが小さくなることはありえないのだ。

（注意：これは確率の問題だ。理屈の上では、怒り狂ったフェレットの群れがたまたま整然と一列に並んで、エントロピーが小さくなることはありえるけれど、その確率はすごく小さい。たまにそういうことが起こるのはありえるけれど、平均ではエントロピーは必ず大きくなるのだ）よくよく考えるとぞっとする。エントロピーが大きくなりつづけたら、遠い遠い遠い未来、宇宙の乱雑さは最大限に達してしまう。それを「宇宙の熱的死」という。聞こえは悪くない名前だ。その状態になった宇宙は、どこも同じ温度で、あらゆるものが完全に乱雑で、秩序立った構造（人間など）はどこにも見当たらない。

そうなる前なら、宇宙の乱雑さはまだ最大限に達していないので、どこか一部分の乱雑さと引き換えに別の一部分に秩序を生み出す余裕はある。次に時間をさかのぼって考えてみよう。過去のどの瞬間にも、宇宙のエントロピーはいまより小さかった（もっと秩序立っていた）。

ビッグバンの瞬間までずっとそうだ。ビッグバンは、新築の家に引っ越しのトラックと小さい子どもたちが到着した瞬間のようなものだ。

エントロピーがいちばん小さかったその最初の宇宙の条件によって、宇宙の誕生から熱的死までどれだけ時間があるかが決まる。もしすごく乱雑な状態が始まったら、熱的死までの時間はそう長くないだろう。でも実際の宇宙はすごく秩序立った状態から始まったらしくて、エントロピーが最大値に達するまでには長い時間があるのだ。じゃあどうして、この宇宙はそんなに秩序立ったエントロピーの小さい状態からスタートしたんだろう？ ぜんぜんわからない。でもそれがラッキーだったのは間違いない。惑星とか人間とかアイスキャンディーをつくるといった、おもしろいことを始めてから終わらせるまでの時間がたっぷりあるのだから。**エントロピーを手掛かりに時間を理解できるのか？**

エントロピーは、どういうわけか時間の流れ方を気にする数少ない物理法則の1つだ。

気体分子の衝突を左右する力学の法則など、エントロピーに影響を与えるプロセスのほとんどは、逆方向に進んでもぜんぜん問題ない。ところがそれがたくさん集まると、時間とともに秩序は下がっていくという法則に従うようになる。だから、時間とエントロピーは何かしら関係があるはずだ。でもいまのところ、時間とともにエントロピーが大きくなることしかわかっていない。 ということは、山があるから水が低いほうにしか流れないのと同じように、エントロピーがあるから時間は前にしか進まないんだろうか？

それとも、竜巻に瓦礫が吸い込まれるのと同じように、エントロピーは時間の進む方向に従っているだけなんだろうか？ 時間とともにエントロピーが大きくなることがわかっても、どうして時間が前にしか進まないのかは説明できない。たとえば、時間が逆に流れるとともにエントロピーが小さくなっていくような宇宙を考えることもできる。それでもエントロピーと時間の関係は変わらないし、熱力学の第二法則も破られないのだ！ だから、エントロピーは手掛かりにはなるけれど、それでズバリ答えが出るわけじゃない。

でも時間のしくみを解き明かす数少ない手掛かりの1つなので、気をつけて見る価値はある。

エントロピーは時間の方向を理解する鍵になるんだろうか？ 多くの人がそう思っているらしいけれど、まだわからない。それどころか、攻略法さえもほとんどないのだ。

時間と素粒子

小さい素粒子になると、時間の流れる方向はたいていどっちつかずになるらしい。たとえば、電子は光子を放出することもあるし吸収することもある。クォークが2個合体してZボソンになることもあれば、Zボソンが崩壊して2個のクォークになることもある。ほとんどの場合、素粒子が作用しあう場面を見ただけだと、この宇宙で時間がどっちの方向に流れているかはわからない。でもわかる場合もある。

時間が前に進むか後ろに進むかで違ってくる素粒子の相互作用が1つあるのだ。

WボソンとZボソンが伝える、原子核の崩壊を引き起こす弱い核力は、1方向の時間の流れを好むのだ。

細かい話は理解できなくてもさほど問題ないし、そもそも違いは小さいけれど、実際の話だ。

たとえば、クォーク2個が強い核力で結びついているとき、クォークどうしの組み合わせり方には2通りある。弱い核力を使うとその組み合わせり方を変えられるのだけれど、一方に移るほうがその反対に移るよりも長い時間がかかる。だから、そのプロセスを写したビデオを逆再生すると、ふつうに再生したときと違って見えるのだ。それが時間とどう関係があるんだろう？ 正確なことはわかっていないけれど、何か役に立つ手

掛かりのにおいがする。 

https://news.biglobe.ne.jp/domestic/1003/dol_231003_3930017992.html

【宇宙の話】 **ダークマターって何？** **どんなことがわかっている？**

2023年10月3日（火）6時0分 [ダイヤモンドオンライン](#)



[写真を拡大](#)

「この本は、まちがいなく買いた」。竹内薫氏絶賛の1冊『僕たちは、宇宙のことぜんぜんわからない』。本書は、「宇宙は何でできてるの?」「ビッグバンの時には何が起こったの?」「ダークマターって何?」「宇宙で僕らはひとりぼっちなの?」……こんな「まだ解かれていない宇宙の謎」を解説する「世界一わかりやすく面白宇宙入門」だ。本連載では、本書の一部から抜粋して、わかりやすい宇宙の話をお伝えする。

Photo: Adobe Stock

どうやったらダークマターを調べられるんだろう?

何か間違いなく存在している。その何かは、星々が宇宙空間に飛んでいってしまうのを防いだり、銀河からやって来る光を曲げたりする。 また、スローモーションで爆発する車から振り返らずに歩いて出てくるアクションヒーローのように、宇宙の巨大な衝突をそのまますり抜けていく。

ダークマターは、そんなカッコいいヤツなんだ。でもダークマターは何でできているんだろう? 「宇宙は何でできているのか」という大きい疑問にも、その中でいちばん調べやすい5パーセントを調べただけでは答えを出したことはない。

27パーセントも占めるダークマターを無視するわけにはいかないのだ。

最初の疑問に短く答えるなら、ダークマターが何なのかはまだほとんどわかっていない。

存在していることはわかっているし、だいたいどこにどのくらいの量があるかもわかっている。

でも、それがどんな粒子でできているのか、そもそも粒子でできているのかどうかもわかっていないのだ。

1種類の変った物質で宇宙全体を説明してしまいたくなるかもしれないけれど、慎重になったほうがいい。広い心を持っていないと、僕らの宇宙観を変えるような発見はかなわないのだから。

前に進むためには、いくつか具体的なアイデアを出して、そこから何か結論を導いて、それを検証するための実験を工夫しないとイケない。単純で、しかも具体的な説を1つ紹介しよう。

ダークマターはある1種類の新しい粒子でできていて、その粒子は新たな力でふつうの物質とごくごく弱く作用しあうという説だ。

どうして1種類だけなんだろう? いちばん単純で、最初に試してみるのにちょうどいいからだ。

もちろん、ダークマターもふつうの物質と同じように何種類もの粒子でできている可能性だってある。そうしたダーク粒子はいろいろ複雑な相互作用をして、ダーク化学、ダーク生物学、名曲「ダークライフ」、果てはあの真っ黒なモンスター・デスターキーをもつくり出しているかもしれない(考えるとぞっとする)。

この仮説上の粒子は、「弱く相互作用する質量のある粒子」(Weakly Interacting Massive Particle)の頭文字を取ってWIMP(ウィンプ)と呼ばれている[wimpとは「弱虫」という意味]。

WIMPは、仮説上の新しい力を使って、僕らの知っている物質とごくごく弱く作用しあうのではないかと考えられている。その強さはニュートリノと同じくらいのレベルだという。一時期、別の説として、ふつうの物質が集まった木星サイズの巨大な塊なんかも検討された。

それはWIMPと区別するために、MACHO(マッコ) (「重くて宇宙物理学的なコンパクトなハロー天体」(Massive Astrophysical Compact Halo Object))というあだ名がつけられた[machoとはいわゆる「マッコ」の意味]。ダークマター粒子がふつうの物質と重力以外の力で作用しあうのかどうか、実際にはわかっているんだろうか? わかっていないのだ。でもそのほうがずっと簡単に検出できるから、そうであってくれとみんな願っている。

そうしてすごく難しい実験に挑みながら、もっと不可能な実験に挑戦せずに済みますようにと祈るのだ。

この仮説上のダークマター粒子を検出するための実験がいろいろ考え出されている。

昔ながらの方法が1つある。圧縮した低温の希ガス [キセノンなど] を容器に入れて、そのまわりに検出器を並べ、希ガスの原子1個にダークマターがぶつかるのを検出するのだ。

いまのところその手の実験ではダークマターの証拠は見つかっていないくて、ようやく検出できそうな規模と感度になったところだ。

もう1つの方法は、高エネルギー粒子コライダーを使って、ふつうの物質の粒子（陽子や電子）をものすごいスピードに加速して衝突させ、ダークマターをつくり出すという方法だ。

実験自体もすごいけれど、おまけに新しい粒子を探せるというメリットもある。コライダーは物質の種類を変えるパワーを持っているからだ。粒子どうしが衝突すると、その中身が組み替わるだけじゃない。物質が消滅して新たな形の物質が生まれるのだ。

まるで素粒子レベルの錬金術だ（冗談で言っているわけじゃない）。だから、何が見つかりそうか前もってわからないのに、ほとんどどんな種類の粒子でもつくれてしまう（とはいっても限界はあるけれど）。科学者は現在、たくさんの衝突を調べて、ダークマター粒子ができればいい証拠をせっせと探しているのだ。

3つめの方法は、ダークマターがたくさん集まっていそうな場所に望遠鏡を向けるという方法。

そうした場所の中でも地球にいちばん近いのが銀河系の中心で、そこにはダークマターの巨大な塊があるらしい。ダークマター粒子が2個たまたま衝突すると、互いに消滅してしまう。でも、もしダークマターどうしが何らかの形で作用しあうと、衝突によってふつうの物質の粒子に変わるかもしれない。ちょうど、ふつうの物質の粒子が2個衝突してダークマターが生まれるかもしれないのと同じだ。もしそれが頻繁に起こっていたら、生まれたふつうの物質の粒子はある特徴的なエネルギーと場所の分布を示すだろう。それを望遠鏡で観測すれば、ダークマターの衝突でつくられた粒子らしいとわかる。でも、そのためには銀河系の中心で何が起きているかが詳しくわからないといけないけれど、それもまた謎だらけなのだ。

どうしてダークマターが大事（マター）なの？

これまでいろんな発見や進歩があったけれど、宇宙の素性はまだほとんど謎のままだ。

ダークマターはそれを解き明かす大きな手掛かりになる。知識のレベルで言ったら、僕らは洞窟人科学者ウークやグルーグと同レベルだ。現在の数学的・物理的な宇宙モデルの中に、ダークマターは入っていない。僕らをこっそり引き寄せている物質が大量にあるのに、それが何なのか、わかっていないのだ。

その大量の物質を理解していないのに、この宇宙を理解したなんて言い張るわけにはいかない。

ダークで謎めいた不気味な物質がそこいらじゅうに漂っていると思うと、パラノイアにでもなりそうだ。でもその前に考えてみてほしい。もしダークマターが何かものすごい代物だったら？

ダークマターは僕らが直接感じられない何かでできている。見たこともないし、想像したこともない振る舞いもするかもしれない。そんなものがここに存在していたら？ ダークマターが何か新しい種類の粒子でできていて、その粒子を高エネルギーコライダーでつくったり利用したりできたとしたら？

あるいは、ダークマターを見つける途中で、それまで知らなかった物理法則が見つかったとしたら？

たとえば、新しい基本的な相互作用とか、知られている相互作用の新しい使い方とか。

もっと言うと、その新発見のおかげで、ふつうの物質の新しい取り扱い方が見つかったとしたら？

生まれてからずっとあるゲームをしていて、ある日突然、特別なルールか新しい駒があったと気づいたら、いったいどんな気分だろう？ ダークマターの正体と振る舞い方が明らかになったら、どんな驚きの技術や知識の扉が開くんだろう？ いつまでもダークのままにしておくわけにはいかない。ダークだからといってどう

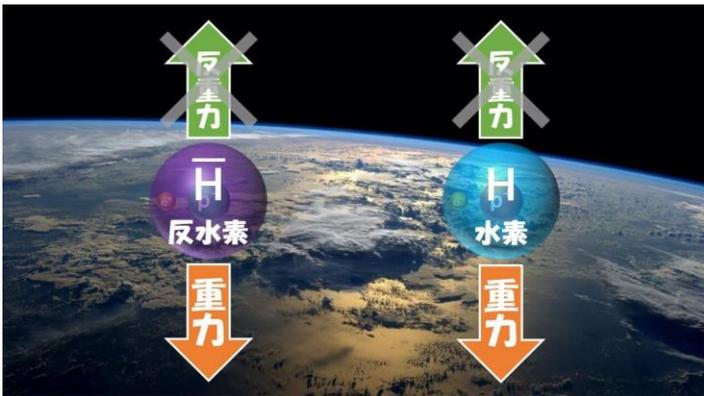
でもいいわけじゃないんだから。 

「反物質」に働く重力は「反重力」ではないと確認 直接測定の実験は世界初

2023-10-04 彩恵りり

普通の物質に対して一部の性質が反転している「反物質」の性質は、理論的な関心が高い一方で測定は難しく、実験的に証明されていない性質がいくつかあります。その1つが反物質に働く重力の向きです。大多数の物理学者は普通の物質と同じく、反物質にも同じ方向に重力が働くと考えていますが、重力とは反対方向の「反重力」が働いている可能性を否定する実験的な証拠は、これまで存在しませんでした。

反物質の1つである「反水素」の研究を行う「ALPHA」実験の国際研究チームは、反物質に働く重力の向きと強さを実験装置「ALPHA-g」で測定した結果、反水素に働く重力の向きと強さは普通の物質と一致し、反物質に反重力が働いている可能性は事実上除外できることが明らかになったとする研究成果を発表しました。この結果は、現代物理学の枠組みでは「反重力は存在しない」と言い換えることもできます。



【▲ 図1: 今回の ALPHA-g による実験結果は、反物質には物質と同じ重力が働いていることを明らかにしました (Credit: NASA, Reid Wiseman (背景))】

■これまでも「反物質に働く重力は普通の物質と同じ」と考えられていた

私たちの身近にある物質は基本的に「(正の) 粒子の組み合わせでできた (正の) 物質」です。その一方で、私たちの宇宙には (正の) 粒子と比較して一部の性質が反転している「反粒子」が存在し、反粒子の組み合わせでできた「反物質」が存在することも分かっています。理論上、物質と反物質の性質は「向き (符号) も強さも同じ」あるいは「強さは同じだが向きは反対」のどちらかだと予想されており、これまでの実験でもほとんどの場合で成立していることが確かめられています。ただし、反物質が普通の物質に出会うと対消滅してしまうため、反物質の性質を実験的に調べることは一般的に極めて困難です。そのため、「反物質に働く重力の向きと強さ」という基本的な性質さえも、これまでは確認できていませんでした。反物質の性質の一部が普通の物質の性質と反対向きであるならば、反物質に働く重力も反対向きになる、つまり「反重力」が働くような性質を反物質が持つ可能性もあるのではないかと、素朴に考えることはできます。それでも、反物質に働く重力の向きと強さは、これまで実験的に証明されたことはありませんでした。

■反物質に働く重力 (または反重力) を確かめようとする理由

実験的に確かめられたわけではないにも関わらず、なぜ多くの物理学者は反物質に働く反重力を否定してきたのでしょうか。また、否定しているにも関わらず、反物質に働く重力を実験的に測定しようと試みてきたのはなぜなのでしょう。 「量子力学」とともに現代物理学を成り立たせている「一般相対性理論」は、重力の振る舞いを非常に正確に記述していることが数々の実験で確かめられています。その一般相対性理論では、物質に働く重力の強さは物質の種類によって変わらないという「弱い等価原理 (Weak Equivalence Principle)」が予言されています。弱い等価原理が正しいことは長年の研究で確かめられており、正しくないない可能性は 1000 兆分の 1 程度であることが 2022 年の時点で確かめられています。

また、普通の物質に対して反転しているのは反物質の性質の一部であり、反物質に働く重力が反対であることを示す証拠は見つかっていません。もしも反物質に働く力が反重力であると仮定する場合、それは反物質が「負の質量（ネガティブ・マス）」（※1）を持つことを暗示します。しかし、「質量エネルギー保存則」（※2）や「CPT 対称性」（※3）をもとに、実際には反物質が負の質量を持つとは考えられておらず、実験的にも反物質とそれに対応する（正の）物質の質量の違いは報告されていません。多くの物理学者が反物質に働く反重力を否定してきた背景には、こうした事情があります。

ただし、一般相対性理論の正しさは多くの研究で確かめられているものの、ブラックホールの中心部や誕生直後の宇宙といった量子力学を考慮しなければならない非常に極端な環境における一般相対性理論の振る舞いはよく理解されていません。そのような環境での振る舞いを理解するには一般相対性理論と量子力学が1つの理論に統合されなければなりません。その試みが未だに成功していないことが大きな理由です。これとは別に、宇宙の大半を占めると考えられているものの、正体が判明していない「暗黒物質（ダークマタ）」（※4）や「暗黒エネルギー（ダークエネルギー）」（※5）の存在も、重力に関する理解が完全ではないことを示唆しています。実際に、一部の研究では暗黒エネルギーを反物質に働く反重力だと仮定する試みもありました。

また、ほとんどの場合、物質と反物質の性質は一部が反転していても強さは一緒です。ところが、「弱い相互作用」（※6）ではこの関係が成立していないことがこれまでに明らかになっています。私たちの宇宙には物質が満ちており、反物質がほとんど存在しないという「バリオン数生成問題」（※7）についても、物質と反物質のわずかな性質の差に理由があるのではないかと考えられており、わずかな性質の差を突き止める研究も日々行われています。さらに、アルベルト・アインシュタインが一般相対性理論を発表したのは1915年ですが、反物質の存在が初めて予言されたのは1928年、実験的に確認されたのは1932年であるため（※8）、一般相対性理論を構築する過程で反物質は考慮されていなかったとも言えます。正の質量を持つ反物質に反重力が働くことは現在の理論的枠組みでは予言されていないため、仮にそうだとすれば新しい理論が必要になることを意味しますが、証明するには実験的な検証が必要となります。こうした様々な事情を考慮すると、理論が間違っている可能性を考慮し、反物質に働く重力の振る舞いを実験で確かめることは（ALPHA 実験の研究チームの言葉を借りれば）“賢明である（prudent）”と言えます。

■反物質に働く重力の測定は極めて困難

“間接的証拠”はこれだけ揃っているものの、「反物質に働く重力」を直接測定した実験はこれまでに無かったため、「地球上の反物質は物質と同じように落下するのか？」という疑問に対する“直接的証拠”は存在しませんでした。反物質の実験には数々の困難が壁として立ちはだかるのがその理由です。

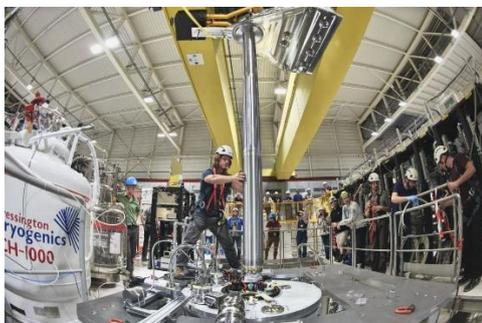
まず、反物質はこの宇宙にはほとんど存在しないため、実験を行うには高エネルギーを与えて反物質を生成する必要があります。得ようとする反物質が複雑な構造になればなるほど必要なエネルギー量は多くなり、同時に生成された無関係な副産物を分離するなどの様々な手間やコストがかかります。

苦勞して作った反物質も、普通の物質と出会えば対消滅してエネルギーに戻ってしまいます。そのうえ生成された反物質は運動エネルギーが高い状態であり、重力の影響が無視できるほどの高速で運動していることも珍しくありませんので、何らかの方法で運動エネルギーを取り除く必要があります。

対消滅するのを防いだり運動エネルギーを減少させたりするために、実験では生成した反物質を磁力で閉じ込める方法が使われます。実は、反物質に働く重力を測定する上では、この方法が極めて大きな問題となっていました。磁力、より正確に言えば「電磁相互作用」は、同じ距離で働く重力相互作用と比べて10の36乗倍（1 澗（かん）倍=1兆×1兆×1兆倍）も強い力です。小さな磁石が重力に逆らって鉄板に逆さに貼りつく様子からもわかるように、磁場や電場は反物質の動きをわずかな力で簡単に変えてしまうのです。

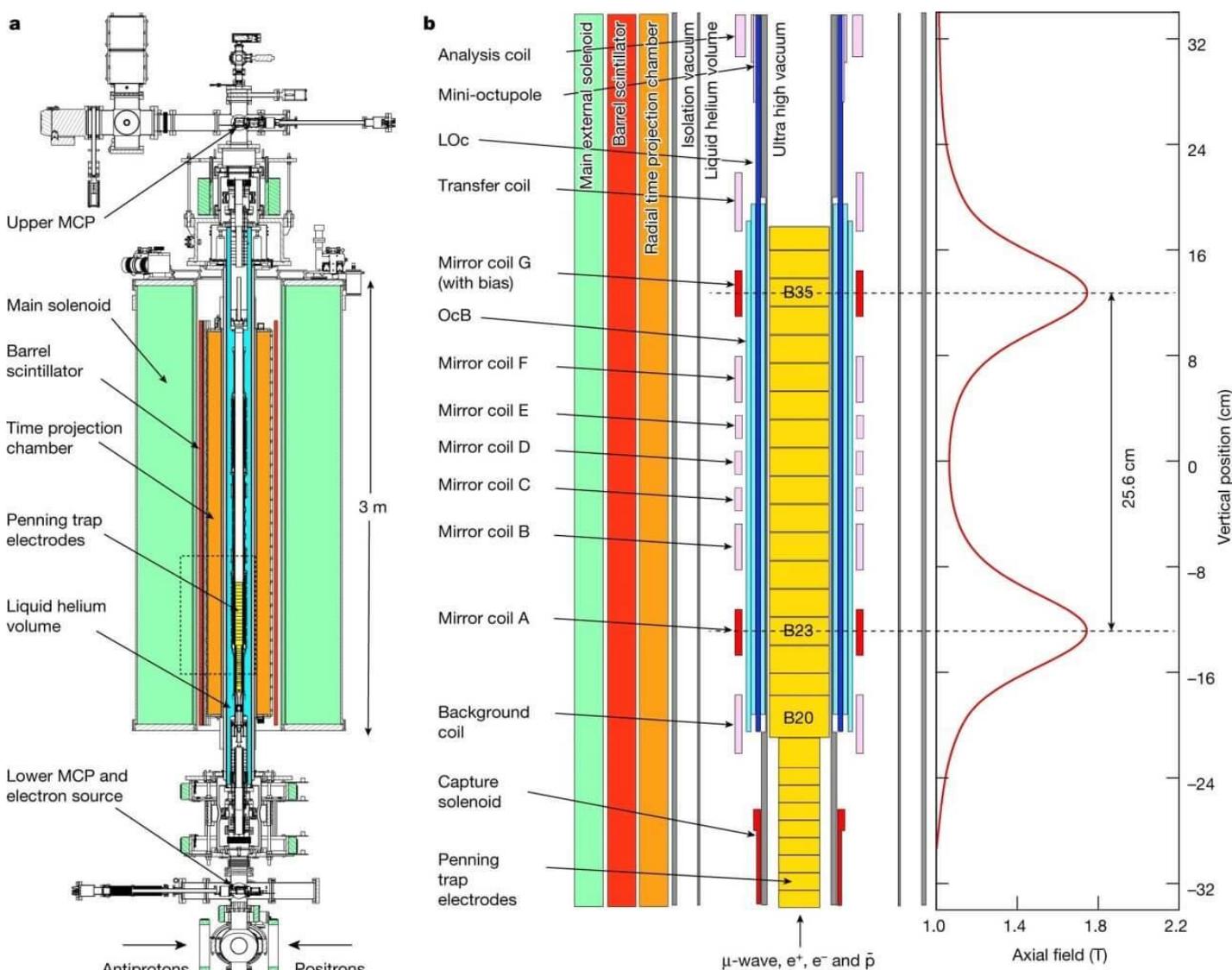
電場の問題については反陽子と陽電子が結合して電氣的に中性となった反物質である「反水素」原子を実験に利用することで解決できますが、反水素にも磁場は働くため、依然として大きな問題のままです。

■反水素の落下を「ALPHA-g」で実験



【▲図 2: 反水素が注入される真空パイプを含んだ実験装置を挿入している、建設中の ALPHA-g 実験装置の様子 (Credit: CERN)】

反水素を使って反物質の性質を測定する研究を行っている「ALPHA」実験の国際研究チームは、実験装置「ALPHA-g」を使用した 2022 年の実験で、反物質に働く重力の向きと強さを直接測定することに世界で初めて成功しました。この結果は、反物質の制御方法について 30 年もの長きに渡り実験と研究を重ねたことで蓄積された技術や知識によって、初めて得られたものです。



【▲図 3: ALPHA-g 実験装置の概略図。今回の実験では真空パイプ中の高さ 26.5cm の範囲が使われました。実験時には上下を塞ぐ“蓋”の役割を果たす電磁石 (Mirror coil G & Mirror coil A) の磁力を弱めることで反水素を落下させます (Credit: E. K. Anderson, et al.)】

実験ではまず、別々の装置で生成した反陽子と陽電子を ALPHA-g 内で混合し、反水素を作ります。反水素を ALPHA-g 内に閉じ込めるには十分な冷却 (運動エネルギーの減少) が必要となるため、反陽子の生成段階で運

動エネルギーを減少する他、反物質生成装置や ALPHA-g で反水素を閉じ込める領域内を液体ヘリウムでマイナス 269°C (4K) まで冷却しています。

この措置により、反水素の運動エネルギーは温度に換算して約マイナス 272.7°C (約 0.5K) まで抑えられ、垂直方向に立てられた真空のパイプ内 (直径 4.4cm/高さ 25.6cm) に電磁石の磁場によって収めることができます。これほどまでに運動エネルギーを抑えても、パイプ内の反水素は約 100m/s の速さで移動し、磁場に跳ね返される衝突を 1 秒間に数百回も繰り返します。

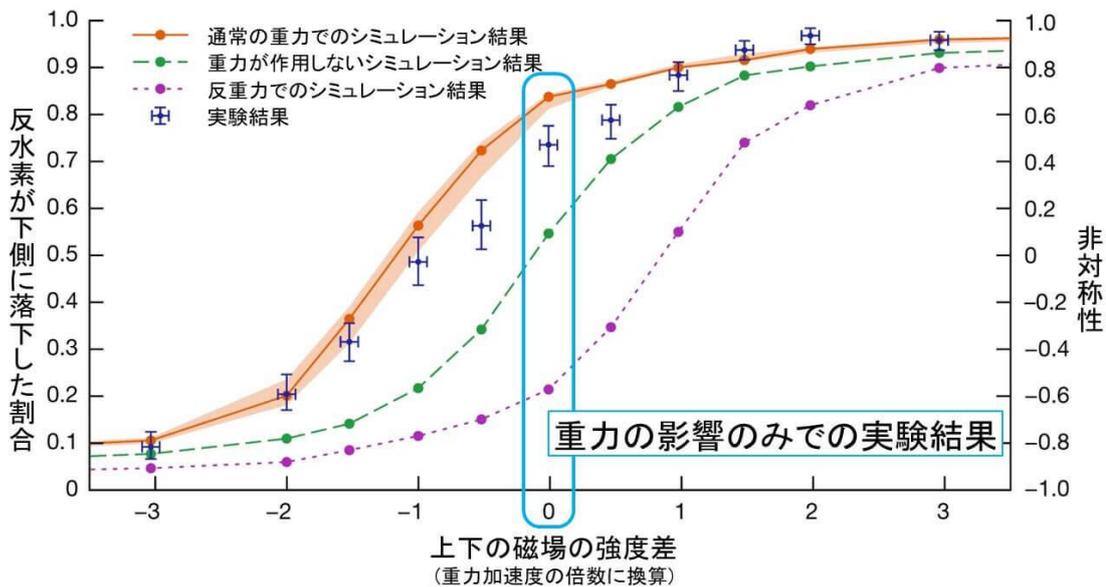


【▲図 4: 今回の実験の概略。①実験開始時には、上下を磁力で閉じ込めた真空パイプ内に反水素元素を約 100 個生成します。②上下の磁力を徐々に弱めると、反水素は落下または浮上します。出口から出た反水素は物質と出会って消滅し、エネルギーを放出するため、上下どちらに幾つの反水素が移動したのかを数えることができます (Credit: Keyi "Onyx" Li, U.S. National Science Foundation / アニメーションから引用、日本語訳および説明の加筆は筆者による)】

次の手順では、反水素を閉じ込めるために装置内にかけている磁場を 20 秒間だけ除去します。パイプの上下それぞれの出口は電磁石による磁場で出口に“蓋”をしています。磁場が弱まれば反水素は出口から逃げ出すことができます。もしも反物質が普通の物質と同じように重力を受ける場合、パイプの上側に浮上する反水素よりも、下側に落下する反水素の方が多はずです。事前の計算では、上側に浮上する反水素は約 20%なのに対し、下側に落下する反水素は約 80%だと予測されました。パイプから逃げ出した反水素は装置を構成する無数の物質のどれかと衝突して対消滅し、エネルギーを放出するため、このエネルギーを捉えることで反水素が上下どちらに移動したのかを突き止めることができます。ただし、重力が極めて弱い力であることを考慮すると、反物質に関する未知の性質などが実験結果を左右する可能性があります (※9)。このため研究チームは、上下の磁場を全く同じ強度で弱めるだけでなく、強度に差をつける実験も行いました。磁場の強度に差が生じれば重力の影響を無視できる落下や浮上が発生しますが、その振る舞いはシミュレーションで予測できます。もしもシミュレーション結果と実験結果に大きな誤差がない場合、ALPHA-g での実験結果が重力を反映したものだとして証明することができます。今回の実験では、上下の磁場が全く同じ強度の場合から最大で重力の 3 倍になる強さまで、様々な強度差の磁場がかかった反水素の振る舞いも確認されました。

今回の研究では 1 回あたり約 100 個の反水素原子を ALPHA-g 内で生成・落下させる実験が、それぞれの磁場の強度で 6 回または 7 回繰り返されました。各実験における反水素原子の具体的な生成数や消滅数は不明であるため、統計的な処理を行うことで実験条件ごとの反水素の挙動が調べられ、結果が算出されました。

■反物質に働く重力は普通の物質と同じだと世界で初めて直接確認！



【▲図 5: 今回の実験結果を事前のシミュレーションと比較したグラフ。実験結果と最も一致するシミュレーションは、通常の重力が働いていると仮定した場合であることが分かります (Credit: E. K. Anderson, et al. / 日本語訳および説明の加筆は筆者による)】

ALPHA-g での実験の結果、反水素に働く重力の向きは通常の物質と同じ下向きであり、その強さは普通の物質に対して 0.75 ± 0.29 倍 (※10) と、誤差の範囲内で一致することが判明しました。

仮に、この実験結果が偶然の結果だとすると、次に可能性が高いのは「反水素には重力が働かない」という結果であり、その確率は 0.029% です。いずれにしても「反水素に反重力が働いている」確率は 1000 兆分の 1 未満という、具体的な数値にする意味が乏しいほど小さな可能性しかないため、研究チームは「反物質に反重力が働いている可能性はない」と結論付けています。また、反重力が働く事実上唯一の候補であった反物質において存在が否定されたことから、現在の物理学の枠組みでは「反重力は存在しない」(※11) と言い換えることもできます。一見すると当たり前の結果であり、インパクトが伝わりにくいかもしれませんが、しかし、「反物質には普通の物質と同じ向き・同じ強さの重力が働く」という“当たり前の予測”は、数多くの思考実験と間接的な推論で成り立っていたものであり、間違っている可能性がゼロではありませんでした。その意味で今回の ALPHA-g での実験は、従来の“当たり前の予測”に強力な証拠を与える結果となりました。また、可能性は低いながらも、反物質に反重力が働いている場合は暗黒エネルギーの正体やバリオン数生成問題に影響を与える可能性があるため、今回の実験結果はいくつかの宇宙モデルを直接的に否定することになります。

ALPHA 実験の研究チームは、実験精度を高めることで、反物質に働く重力の強さをより具体的に算出することを次の目標としています。物質と反物質の重力の強さに差があるかどうかを調べることで、これまで物質のみで考えられてきた弱い等価原理について、別の方向からの検証を行うことができます。実際のところ、今回の実験で使われたのは長さが約 3m ある ALPHA-g の真空パイプ全体の一部であり、もっと高さを取ることで、より精度の高い実験を行うことが可能です。このような実験を通じて物質と反物質の違いを詳細に調べる取り組みは、現在の物理学における多くの謎を解決する可能性を秘めています。

■脚注

※1...もしも質量が負の値を持つ物体 (物質か反物質かを問わない) が存在すると仮定すれば、生じる重力も負の値、つまり反重力となることが、一般相対性理論を近似的に解いた場合に予測されます。ただしこの場合、正の質量を持つ物体は正負両方の質量を持つ物体を重力で引っ張り、負の質量を持つ物体は正負両方の質量を持つ物体を反重力で遠ざけるため、質量の絶対値が同じ正の質量の物体と負の質量の物体を近くに置くと、両者が無限に加速し続ける「暴走運動 (runaway motio)」が発生します。暴走運動状態の物体は一般相対性理論に反して、総質量、総エネルギー、総運動量がゼロであるという奇妙な状況が発生します。一般相対性理論を

解いて生じたにも関わらず、一般相対性理論の枠組み内で自ら矛盾する状況が発生した場合、前提が誤っていると考えるため、負の質量の物体は存在しないと理論的に考えられます。

※2...物質と反物質の対生成には、それらの総質量に等しいエネルギーが必要です。もしも反物質が負の質量を持つとすれば質量に等しいエネルギーは負の値となり、対生成に必要なエネルギーはゼロになってしまうという前提の破綻が生じます。

※3...電荷などの「チャージ」、粒子の位置の「パリティ」、そして「時間（タイム）」のそれぞれを全て反転させると、反転させる前と全く同じ状況が発生するという物理の基本原則を「CPT 対称性」と呼びます。弱い相互作用における CP 対称性のように一部の対称性が成立していない状況でも、CPT 対称性は成り立つことが知られています。物質と反物質の性質の違いを調べる実験では反物質でも CPT 対称性が成立することが確認されており、これは反物質に反重力が働いていないことの証拠の 1 つとなります。

※4...可視光線などの電磁波では見えないものの、重力の観測で存在が示唆されている物質を暗黒物質と呼びます。宇宙には普通の物質と比べて 5 倍も多い暗黒物質が存在していますが、詳しい正体は現在でも分かっていません。

※5...私たちの宇宙は膨張しており、その速度は重力によって減速するはずですが、観測結果によればむしろ加速しています。これは重力よりもずっと強い“反重力”とも言える未知の斥力が働いているはずですが。この未知の力の源を暗黒エネルギーと呼びます。暗黒エネルギーの正体は現在でも分かっていません。また、暗黒エネルギーを反重力と表現するのは例え話に近く、実際には暗黒エネルギーと反重力の性質はかなり異なることが分かっています。このため、反重力の存在の否定は暗黒エネルギーの存在には影響を及ぼしません。

※6...原子核を構成する素粒子（クォーク）の種類を変えたり、ニュートリノを他の物質と相互作用させたりする力を弱い相互作用と呼びます。弱い相互作用によって起こる物理現象は物質と反物質でわずかながら異なる振る舞いをするのが明らかにされており、これを「CP 対称性の破れ」と呼びます。

※7...物質と反物質に関する現在の理論や実験では、物質と反物質は常にペアで生成する「対生成」が確認されています。しかしその場合、全ての物質と反物質は出会って再びエネルギーとなってしまう「対消滅」を起こすはずですが。実際の宇宙には物質が豊富に存在し、反物質はほとんど残されていないため、何らかの理由で対生成に 10 億分の 1 ほどのわずかな差が生じたと考えられますが、その理由は判明していません。これを「バリオン数生成問題」と呼びます。もしも反物質に反重力が働いていると仮定すると、反物質は物質と反物質の両方から逃げ出すため、対消滅を免れて宇宙に薄く分布しているとも考えられます。

※8...ポール・ディラックは電子の反物質である陽電子の存在を 1928 年に予言しました。そのことをカール・デイヴィッド・アンダーソンが実験的に立証したのは 1932 年になってからのことでした。ただし、反物質に関するディラックのオリジナルの理論は、現在の理論とは若干異なります。

※9...実験に影響する可能性があるとして検討された背景は、「反水素がわずかに電気を帯びている可能性（反陽子と陽電子の電荷の差は理論的には等しいものの、実験的にはごくわずかな差がある可能性を否定できない）」「反水素の磁気双極子モーメント値の不確かさ（実験的には通常の水素とは異なる値である可能性を否定できない）」「基底状態の反水素原子の分極率の不確かさ（実験的には通常の水素とは異なる値である可能性を否定できない）」「真空パイプ内に存在する除去しきれない原子（反水素落下実験中に衝突し、偽のシグナルを発生する可能性がある）」です。これらの影響は今回の実験の精度よりもずっと小さな影響しか与えないことが明らかにされています。

※10...より正確には重力加速度の 0.75 ± 0.13 (統計誤差 + 系統誤差) ± 0.16 (シミュレーション誤差) 倍。

※11...一般相対性理論と量子力学を統合した拡張理論においては、未知の素粒子である「重力光子 (Graviphoton)」が伝達する「第 5 の力 (Fifth force)」のように、反重力のような力を予言する理論もあります。しかし、反重力を予言しない拡張理論も多く存在しており、どの理論が正しいのかどうかも判明しておらず、そしてどの理論も未完成のままというのが現状です。このため、現在の物理学の枠組みを超えた領域で

の反重力の有無に言及することは、現時点では不可能です。また、予言された反重力が正しいとしても、その一部は重力とは強さや伝達距離が異なることが分かっています。そして、一部の拡張理論が予言する反重力は実験的に否定されています。

Source

[E. K. Anderson, et al.](#) “Observation of the effect of gravity on the motion of antimatter”. (Nature)

[“ALPHA experiment at CERN observes the influence of gravity on antimatter”](#). (CERN)

[Robert Sanders.](#) “Antimatter embraces Earth, falling downward like normal matter”. (University of California, Berkeley)

[Jason Stoughton.](#) “Down goes antimatter! Gravity's effect on matter's elusive twin is revealed”. (National Science Foundation)

[D. Pollard.](#) “Antigravity and classical solutions of five-dimensional Kaluza-Klein theory”. (Journal of Physics A: Mathematical and General)

[W. B. Bonnor.](#) “Negative mass in general relativity”. (General Relativity and Gravitation)

[Robert L. Forward.](#) “Negative matter propulsion”. (Journal of Propulsion and Power)

[Michael Martin Nieto & T. Goldman.](#) “The arguments against “antigravity” and the gravitational acceleration of antimatter”. (Physics Reports)

[Masaki Hori, et al.](#) “Two-photon laser spectroscopy of antiprotonic helium and the antiproton-to-electron mass ratio”. (Nature)

[M. Ahmadi, et al.](#) “Observation of the 1S–2S transition in trapped antihydrogen”. (Nature)

[M. J. Borchert, et al.](#) “A 16-parts-per-trillion measurement of the antiproton-to-proton charge–mass ratio”. (Nature)

[MICROSCOPE Collaboration.](#) “MICROSCOPE Mission: Final Results of the Test of the Equivalence Principle”. (Physical Review Letters)

[Christos Dimopoulos, et al.](#) “Hubble law and acceleration curve emerges in a repulsive matter-anti matter galaxies simulations”.

文／彩恵りり

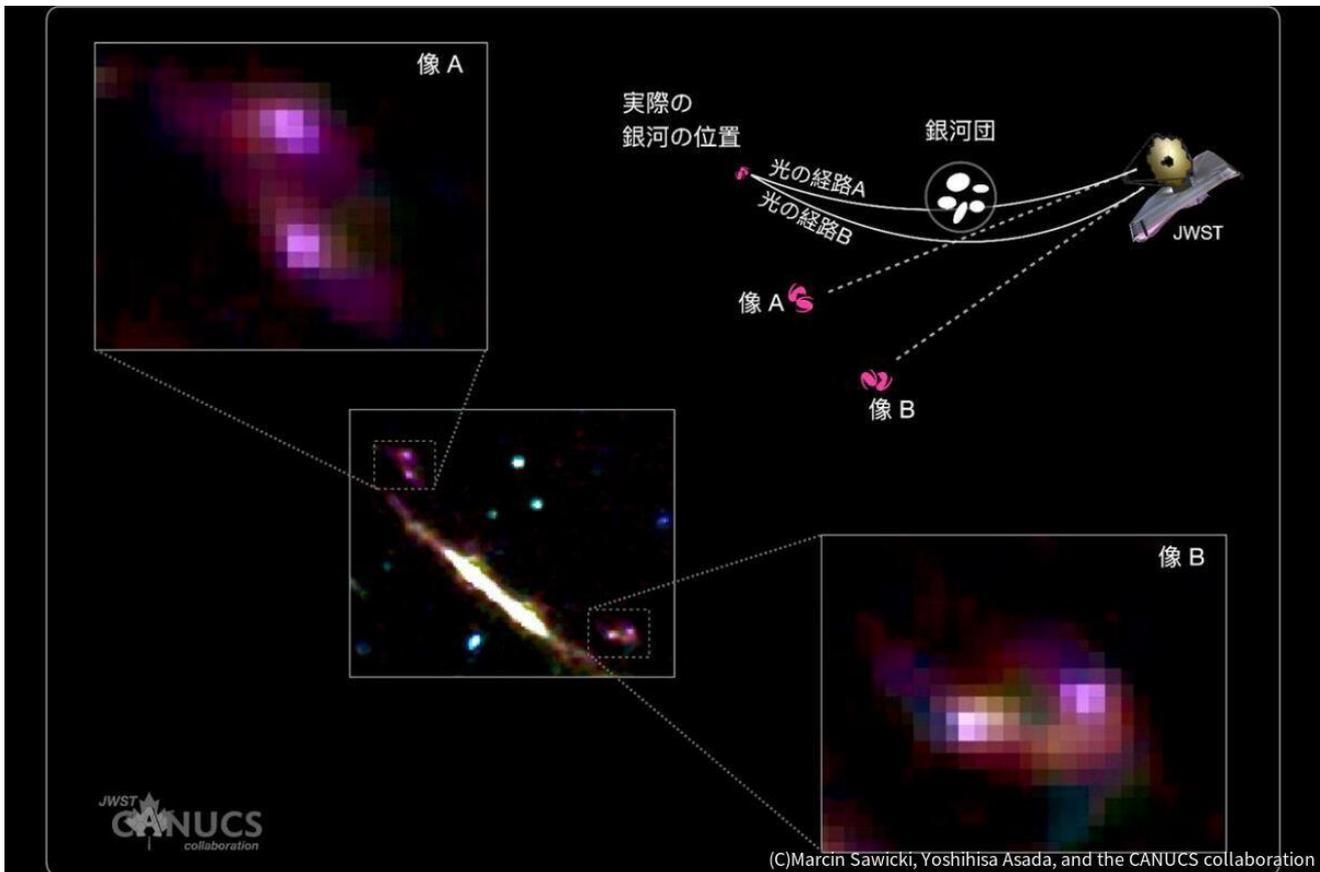
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20231002-2783442/>

京大、JWST と重力レンズ効果を組み合わせて 120 億光年彼方の銀河合体を観測

掲載日 2023/10/02 18:09 著者：波留久泉

京都大学(京大)は9月28日、国際プロジェクト「CANadian NIRISS Unbiased Cluster Survey」(CANUCS)の観測から、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)を用いた観測により、初期宇宙において「赤ちゃん銀河」同士が合体、急成長している現場を発見したことを発表した。

同成果は、京大大学院 理学研究科の浅田喜久大学院生、米・セント・メアリーズ大学大学院理学研究科の Sawicki Marcin 教授らの国際共同研究チームによるもの。詳細は、[英国王立天文学会が刊行する天文学術誌「Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters」に掲載された。](#)



今回発見された「赤ちゃん銀河」同士の合体の様子。本来は2つの銀河だが、両銀河は巨大な銀河団の後方に位置しているため、重力レンズ効果により光の経路が曲げられた結果、両銀河が二重に観測される(像Aと像B)。右上図はこの重力レンズ効果の概念図。左下図は実際のJWSTによる観測画像を用いた擬似カラー画像。左上と右下に、2つの銀河のペアが二重に観測されている様子の拡大図が示されている(それぞれ像Aと像B) (C)Marcin Sawicki, Yoshihisa Asada, and the CANUCS collaboration (出所:京大プレスリリース PDF)

CANUCSは、JWSTを用いて銀河の宇宙論的進化の様子を調べることを目的の1つとした大規模観測プロジェクトであり、120億光年以上も遠方の銀河の様子を詳細に調べるためには可視光線の情報が重要となるが、そのような遠方の銀河からの可視光線は宇宙膨張により2μmよりも長波長に伸びてしまうため、ハッブル宇宙望遠鏡では観測不可能だったが、JWSTならそのような波長でも観測することが可能だという。

さらにCANUCSプロジェクトでは、重力レンズ効果を用いてより遠くの暗い天体の様子を探ることも目指しており、同効果を受けた天体は本来のその天体の明るさよりもさらに明るく観測される。つまりCANUCSプロジェクトでは、重力レンズ効果とJWSTの観測を組み合わせることで従来よりも遥かに暗く、成長初期段階にある遠方銀河の進化の様子を詳しく知ることができるのである。

研究チームは今回、CANUCSプロジェクトで観測された銀河団領域「MACSJ0417.5-1154」の背後において、赤方偏移5以上(宇宙年齢で約10億歳未満)にある形成初期の銀河の成長について調査を行うことにしたという。その結果、赤方偏移5.1付近にある2つの超低質量銀河が衝突している様子が発見された。「ELG1」と「ELG2」と命名されたこの2つの銀河は、どちらも天の川銀河の1万分の1以下という超低質量しかなく、形成されて間もない銀河であると考えられるという。このような遠方にある超低質量の銀河は極めて暗いため、本来ならJWSTでも詳細な観測は困難だが、重力レンズ効果により本来の明るさよりも15倍程度明るく見えていることから、詳細な観測が実現された。今回の観測では、複数のカラーフィルタによる撮像観測が行われその結果、両銀河も超低質量だけでなく、活発な星形成活動も明らかになった。特に両銀河の場合、その特徴的な色から何らかの要因で最近唐突に星形成活動が活発になったことが示唆されたという。これまでの近傍銀河の観測的研究から、銀河同士の衝突現象は星形成活動を誘発する可能性があることがわかっている。両銀河は

今まさに銀河同士の衝突を経験していることから、活発な星形成活動は銀河衝突に由来すると考えられるとした。さらに研究チームは、両銀河では、その進化の大部分が銀河衝突によって行われるのではないかと予想しているという。両銀河はこれまで細々と星を作ってきたが、今回の衝突により急激な星形成活動が誘発され大量の星が形成されている。今後、両銀河が合体し、1つの銀河になる時には星質量にして元々の銀河の4倍以上の銀河へと成長する可能性が推測された。

両銀河は重力レンズ効果によって約15倍の増光を受けた極めて希な天体であり、初期宇宙における形成初期の銀河の進化の様子を調べる上で絶好の観測対象であるといえるという。今回の結果は複数のカラーフィルタによる撮像観測に基づいたものであり、さらなる調査のためには分光観測による銀河のスペクトル解析が必要不可欠とする。実際、CANUCSプロジェクトによる観測の一環として、JWSTを用いた分光観測がすでに実施済みで、現在は解析中とした。さらには、ミリ波サブミリ波などの電波領域での観測も行うことで、両銀河に含まれる分子ガスの様子が明らかにされることも期待されるという。分子ガスは星形成の基となる重要な構成要素であり、これらの銀河中に残されている分子ガスの量から「なぜ銀河衝突によって星形成が促進されたのか」という、より根源的な謎を解き明かすことにつながるとした。

<https://natgeo.nikkeibp.co.jp/atcl/news/23/091900482/>

最新望遠鏡で原始の宇宙へ

「ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡」が知られざる宇宙の起源に迫る 2023.09.29



ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡は、これまでで最も深遠な宇宙で輝く無数の恒星や銀河を見せてくれる。中央に見えるのは、背景にある銀河からの光をゆがめる銀河団だ。（画像合成：NASA, ESA, CSA, STSCI）

[\[画像のクリックで別ページへ\]](#)

この記事は[雑誌ナショナル ジオグラフィック 日本版 2023年10月号](#)に掲載された特集です。定期購読者の方のみすべてお読みいただけます。

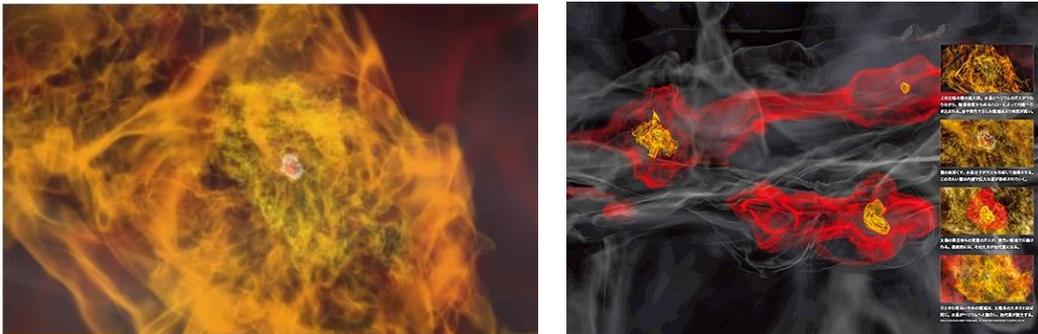
史上最大にして最高の機能を誇る「ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡」が知られざる宇宙の起源に迫る。

今から138億年近く前、宇宙がまだ若かったとき、暗黒の空間に星は一つもなかった。

天文学では「暗黒時代（ダークエイジ）」と呼ぶこの時代は、その後の宇宙に誕生するすべてのものの原料となる水素とヘリウムで満たされていた。そこには正体不明の物質「暗黒物質（ダークマター）」も存在し、その重力が水素とヘリウムのガスを引きつけて複雑な網状の構造を作っていた。それが膨張して温度が下がると、ダークマターの一部が巨大な球状に固まり始め、その核にガスが集まる。「ハロー」と呼ばれるその球状の構造内部で重力が高まると、水素原子同士が融合してヘリウムが形成され、原始の宇宙における初代星（ファーストスター）が光を放つ。宇宙に夜明けをもたらしたその火花を、私は3Dメガネをかけて見つめていた。ここは米スタンフォード大学のカブリ素粒子天文学・宇宙論研究所。スクリーン上では灰色で示されたダークマターが、宇宙が膨張するに従って、ハロー同士の間を糸のように枝分かれしていく。私はその様子

を、感嘆しながら見守った。生まれたての恒星は、大きな渦を描きながらハローの中心に向かい、初代銀河（ファーストギャラクシー）を形成する。

科学者たちは、宇宙の起源をめぐる物語の空白を、これまで数十年かけて少しずつ埋めてきた。だが、その第1章が、この1年で書き換えられた。それを可能にしたのが、史上最大かつ最先端の宇宙望遠鏡「ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡」だ。この望遠鏡がとらえた原始の銀河は、これまで予想されていたよりも明るく、数が多く、活動的だった。宇宙と時間の壮大な物語の幕開けは、狂騒に満ちていたのだ。もっとも初代星は個々に検出するには明るさが足りず、ウェッブ望遠鏡で観測することはできない。だがこの時代の恒星は誕生から数百万年後、熱く燃えさかり、巨大なサイズに成長した後、超新星爆発を起こす。それは天文学上の時間になると、ほんの一瞬の出来事だ。「この動きはかなり遅くしました」と話すのは、計算宇宙論の研究者で、このシミュレーションの解説をしてくれるトム・エイブルだ。「とにかく速いんです。実際に忠実に作ったら、これよりもはるかに速い閃光（せんこう）になります」



初代星の誕生 ガスの繭（まゆ）に包まれた原始の雲のコンピューター・シミュレーション。ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡では見ることができない、ビッグバンのわずか1億年後の初代星が誕生する領域だ。（RALF KAEHLER AND TOM ABEL, STANFORD UNIVERSITY/KIPAC/SLAC）

三つの原始の雲が現れる段階から順を追って原始の雲のコンピューター・シミュレーションの解説している。（RALF KAEHLER AND TOM ABEL, STANFORD UNIVERSITY/KIPAC/SLAC）

[\[画像のクリックで別ページへ\]](#) [次ページ：宇宙を変えた初代星の超新星爆発](#)