

# 最先端物理学が描く宇宙

# Frontiers of Physics & Cosmology

第15回 2026/1/19

## 第6章 これからの宇宙論研究(2)

真貝 寿明

Hisao Shinkai



真貝の武庫川講義ページtop



<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/mukogawa/>

レポート締め切り 1/30(金) 23:59

## 課題

- ・「光を波と考えるか、粒子と考えるか」の論争点は何か。現状ではどう理解するのが正しいか。
- ・朝永振一郎の書いた『光子の裁判』(1949)のプリントを第9回の授業時に配布しています。この要旨をまとめてください。
- ・そして、次のキーワードから2つ以上を使って、論争点と解決案を説明してください。  
『神はサイコロをふらない』「確率解釈」「不確定性原理」「観測問題」「シュレーディンガーの猫」「EPR パラドックス」「トンネル効果」「コペンハーゲン解釈」「多世界解釈」
- ・最後に、皆さんこの問題に関する感想をお願いします。

## 作成要領

- ・A4用紙3-5枚程度。表紙は不要。必要であれば、図や表を添付してよい（ページ枚数に含める）。
- ・参考とした文献（webページ含む）は必ず記すこと。（剽窃、無断転載行為が判明したら受理しない。きちんと引用するならOK）。

## 提出手順

- ・Google Classroomの課題として提出。手書きの場合は写真撮影したものを提出。
- ・提出〆切は、**2025年12月28日（日）23:59**
- ・提出ファイルの名前は、「Q 学科 XXXXXXXX ○○○○」の形式とすること。（QはQuantumの頭文字でレポート区別するためのもの、学科は大日/短生など2文字で、XXXXXXXは学籍番号、○○○○は氏名）とすること。ファイル名には空白を入れず、学籍番号は半角で。一括ダウンロードして読むため、このファイル名でお願いします。
- ・ファイル内の初めにも、タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること。
- ・pdfファイルが望ましいが、wordファイルでもよい。

**成績20点分**

# 最終 まとめ確認レポート

## 課題

- 1 以下の問題(1)-(6)より、1つ選んで説明せよ。(A4 1~1.5枚程度)
- 2 以下の問題(7)-(12)より、1つ選んで説明せよ。(A4 1~1.5枚程度)
- 3 この講義で扱ったトピックについて、自分で問題を考えて、解答例を示せ。(枚数自由)

第12回でプリント配布

## 論点

- (1) ケプラーが発見した惑星法則
- (2) ガリレオが発見した天体観測の成果
- (3) ニュートン物理学が受け入れられていく過程
- (4) 物理学史における 1905 年の持つ意義
- (5) アインシュタイン・ポドルスキ・ローゼンのパラドックス
- (6) ビッグバン膨張宇宙論と定常宇宙論の論争
- (7) アインシュタインの導入した「宇宙項」
- (8) ダークマターとダークエネルギー
- (9) インフレーション宇宙モデル
- (10) ブラックホールが存在することはどうしてわかるのか
- (11) マルチメッセンジャー天文学の成果
- (12) 星までの距離の測定方法

成績30点分

### 作成要領

- 参考とした文献(web ページ含む)などがあれば、必ず記すこと。剽窃行為が認められる場合は評価を下げます。(参考文献から引用するのは構いませんが、引用範囲は必ずそう明記すること。)
- インターネット上の文献を引用するときは、書き手が不明な個人のものは避けること。
- 表紙は不要。必要であれば、図や表を添付してよい(ページ枚数に含める)。

### 提出手順

- Google Classroom の課題として提出。手書きの場合は写真撮影したものを提出
- 提出〆切は、**2026年1月30日（金）23:59**
- 提出ファイルの名前は、「C 学科 XXXXXXXX ○○○○」(C 大日 2212345 武庫川子) の形式とすること。  
(C は Cosmology の頭文字でレポート区別するためのもの、学科は大日/短生など 2 文字で、XXXXXXX  
は学籍番号、○○○○は氏名) とすること。ファイル名には空白を入れず、学籍番号は半角で、一括ダウ  
ンロードして読むため、このファイル名をお願いします。
- ファイル内の初めにも、タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること。

# 関西の星見スポット

兵庫県で星を見物するにオススメの場所はありますか

## 西はりま天文台

標高430m. 日本最大、公開用では世界最大の2mのなゆた望遠鏡あり。公園や宿泊施設などもある。

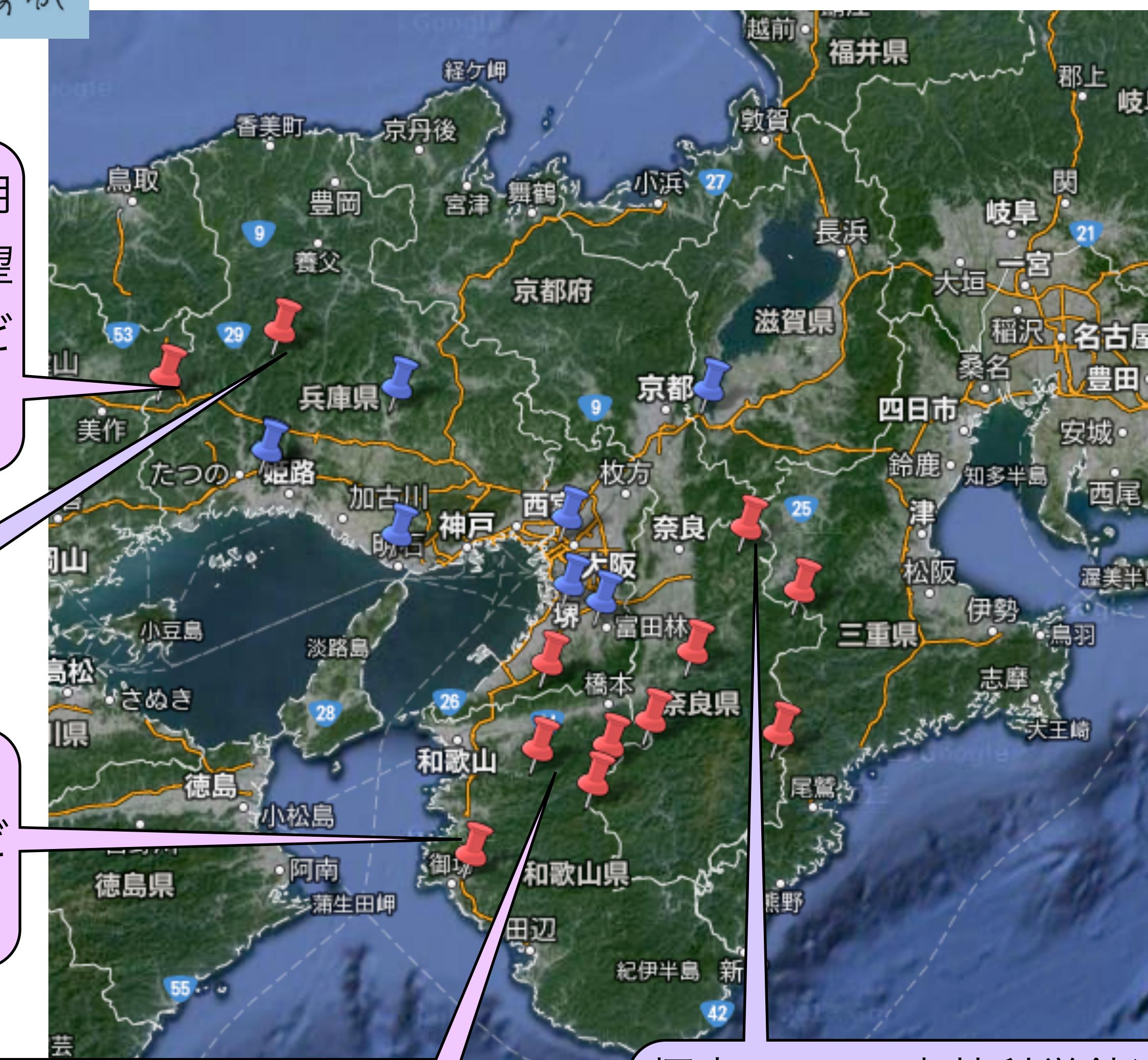
**峰山高原** 標高920m.

## かわべ天文台公園

標高90m. 1mの望遠鏡あり。プラネタリウムや宿泊施設などもある。

## みさと天文台

標高420m. 1mの望遠鏡あり。駐車場は夜間も開放。



標高500m. 森林科学館近くの駐車場。

**フォレストパーク神野山**

# 前回のミニツツペーパーから

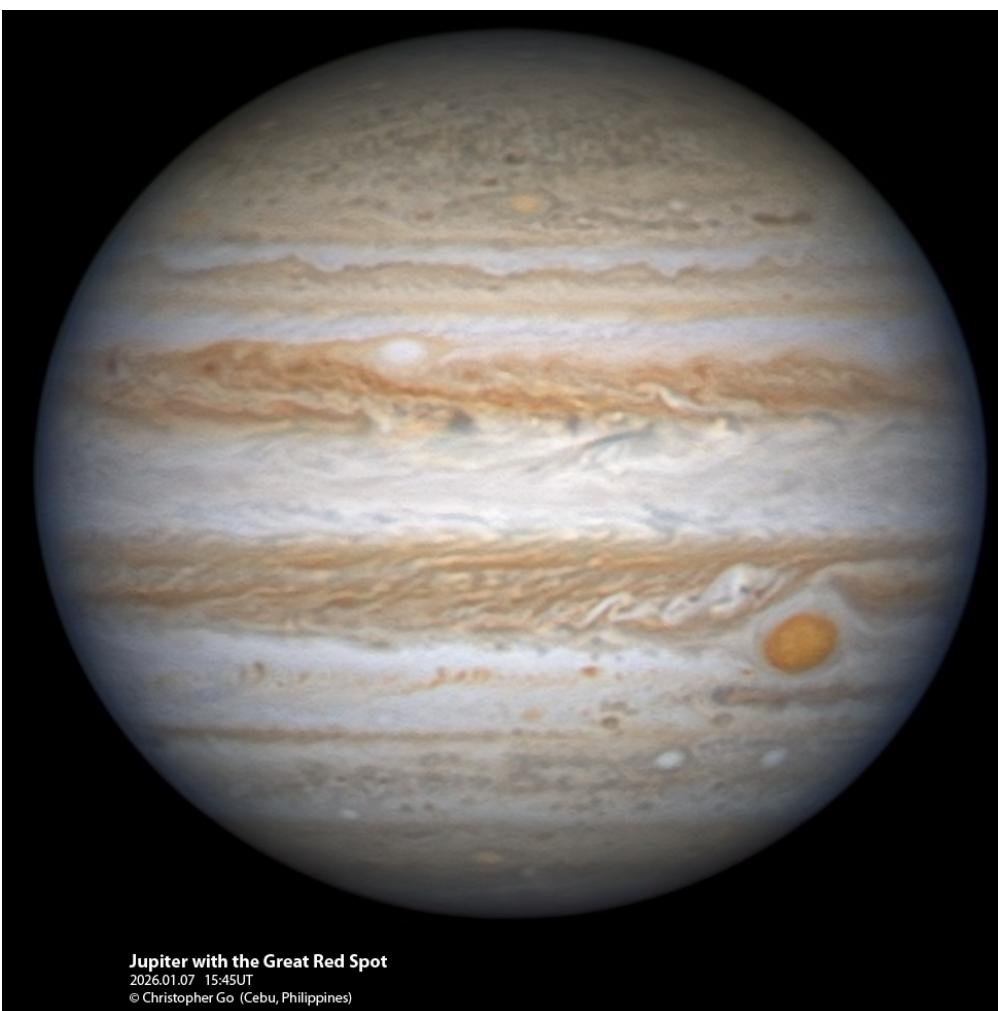
授業スライドで宇宙の画像がたくさんありました、どれも実際に撮影されたものなのかと疑うくらい綺麗でした。コチラの映画であります気はなんですが、北海道にも観測地がある…?

<https://apod.nasa.gov/apod/>

Astronomy Picture of the Day というNASAのページがおすすめです。



<https://apod.nasa.gov/apod/ap260113.html>



<https://apod.nasa.gov/apod/ap260114.html>

<https://apod.nasa.gov/apod/ap260110.html>

<https://ja.wikipedia.org/wiki/公開天文台一覧#近畿地区>

名称	所在地	備考
尾鷲市立天文科学館	三重県尾鷲市	口径81cm反射式望遠鏡
ダイニックスアストロパーク天究館	滋賀県犬上郡多賀町	口径60cm反射式望遠鏡
綾部市天文館パオ	京都府綾部市	口径95cm反射式望遠鏡
京都大学理学系研究科附属花山天文台	京都府京都市	口径45cm屈折式望遠鏡、口径70cmシロースタット型太陽望遠鏡、口径18cm屈折式望遠鏡
丹波天文館	京都府船井郡京丹波町	口径50cm反射式望遠鏡
京都産業大学神山天文台	京都府京都市	口径130cm反射式望遠鏡
アクトバル宇治	京都府宇治市	口径25cm屈折式望遠鏡
大阪市立科学館	大阪府大阪市	口径50cm反射式望遠鏡
LICはびきの	大阪府羽曳野市	口径40cm反射式望遠鏡
ソフィア・堺	大阪府堺市	口径60cm反射式望遠鏡
善兵衛ランド	大阪府貝塚市	口径60cm反射式望遠鏡
兵庫県立大学西はりま天文台	兵庫県佐用郡佐用町	口径200cm反射式望遠鏡、口径60cm反射式望遠鏡
猪名川天文台	兵庫県川辺郡猪名川町	口径50cm反射式望遠鏡
にしづき経緯度地球科学館	兵庫県西脇市	口径81cm反射式望遠鏡
星の子館	兵庫県姫路市	口径90cm反射式望遠鏡
神戸市立青少年科学館	兵庫県神戸市	口径25cm屈折式望遠鏡
明石市立天文科学館	兵庫県明石市	口径40cm反射式望遠鏡
大塔コスミックパーク星のくに	奈良県五條市	口径45cm反射式望遠鏡、口径40cm反射式望遠鏡
みさと天文台	和歌山県海草郡紀美野町	口径105cm反射式望遠鏡
かわべ天文公園	和歌山県日高郡日高川町	口径100cm反射式望遠鏡

# 前回のミニツツペーパーから

講義はあと1回。どうしても聞いておきたい話は？

もう十分で"すげえ"ね \*

!

今日も面白い講義をありがとうございました。最後の講義も楽しかっていました。  
先生の一番好きな惑星、星は何ですか。また、宇宙に行くことが出来たら  
やってみたいことを教えて下さい。  
全く関係ないのですが、先生の好きな音楽・曲は何ですか。

受講してみて「宇宙について深く知ること」  
できただのでもうかがっています。

- この講義を受講し始めたから、宇宙。大王カセ言迷に2125年ある時間が  
増えた=22歳、自分の成長がいちばん早い=感じ、人生叶う=現れています。
- 人生で一回は宇宙に行きたい=22歳可。簡単に行きよう日が来ると思ひますか?  
また人類が最後に月面着陸した=1970年代と思ひますか。なぜそんだけ難い=22歳?

私の好きな惑星は、地球です。

宇宙に行くことができたら、無重量状態を楽しみたい

好きな曲？ ホルスト 組曲「惑星」

ブルックナー 交響曲4番「ロマンティック」

映画「ラ・ブーム」の主題歌

この講義で今まで知らない間に宇宙についての  
詳しい話をたくさん聞きておもしろかったです。  
いいお手を～！

悩みが減ったのはいいことです。

宇宙は広い。人生で悩んでもしょうがない、という境地へようこそ。

>まだ、あと一回の授業があるが、楽しかった。  
レポートは私の学部ではすることが少なく大変だが、頑張る。

レポート頑張ります！

# 前回のミニツツペーパーから

【14-1】宇宙を構成する物質を多い順に並べよ.

## 普通の物質, ダークマター, ダークエネルギー

Planck 衛星のデータや, 超新星爆発の距離測定など, 現在入手できるデータから  $\Lambda$ CDM モデルのパラメータで一番よくフィットするものを計算すると,

- CMB の温度は  $2.72548 \pm 0.00057$  K である.
- CMB は, 宇宙誕生後 37 万 7700 年 の光である.
- 宇宙の年齢は,  $t_0 = 137.98$  億年  $\pm 3700$  万年である.
- ハッブル定数は,  $H_0 = 67.80 \pm 0.77$  [km/s/Mpc].

となっている. より詳しくは表 5.3 のようになる.

そして, 宇宙の構成要素の割合を計算すると, 現在の宇宙の構成要素は, 69.1% が正体不明の (宇宙を加速膨張させる要因) ダークエネルギーで, 25.9% が正体不明の (物質として存在しているはずの) ダークマターであり, 残りの 5.0% が既知の物質である. つまり, 宇宙全体の 95% は正体不明の物質であると報告されている (図 5.40).

教科書 p187

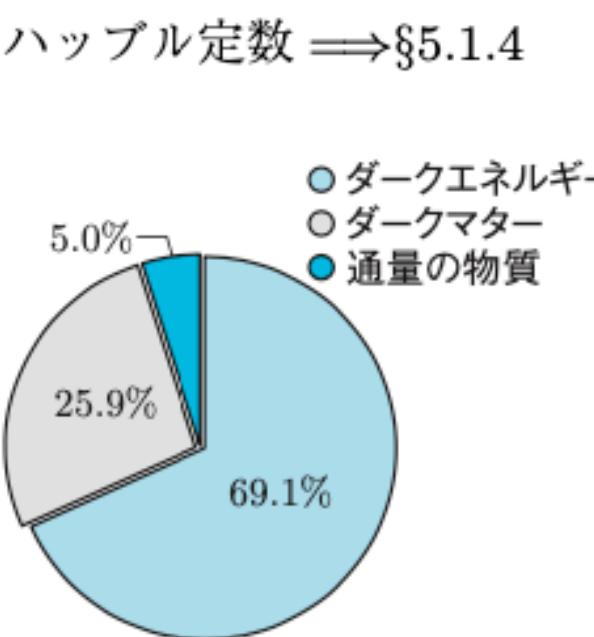


図 5.40 現在の宇宙の構成要素の割合.

宇宙の多くが目に見えない物質でできていることが印象に残った.  
今後、未知の物質は大変興味を惹かれたと呼ばれた。

## ダークマター

銀河の回転する速度を観測すると,  
見えている星以上の質量が存在している.  
これらを暗黒物質(dark matter)と名付けた.

恒星全体の質量の 5 倍は存在している.  
正体不明. 未知の素粒子と考えられている.

## ダークエネルギー

現在の宇宙は加速膨張している.  
従来モデルと整合させるためには,  
加速させる未知のエネルギーが必要で,  
これを dark energy と名付けた.  
宇宙全体のエネルギーの 70% を占める.

理論を修正したり, 宇宙原理を外せば  
考えなくてもよい, とする理論もある.

# 前回のミニツツペーパーから

論》 5.5 宇宙論のモデルを決める最近の観測結果》 5.5.2 ダークエネルギー

教科書 p184

## 宇宙の最期

### ビッグクランチ

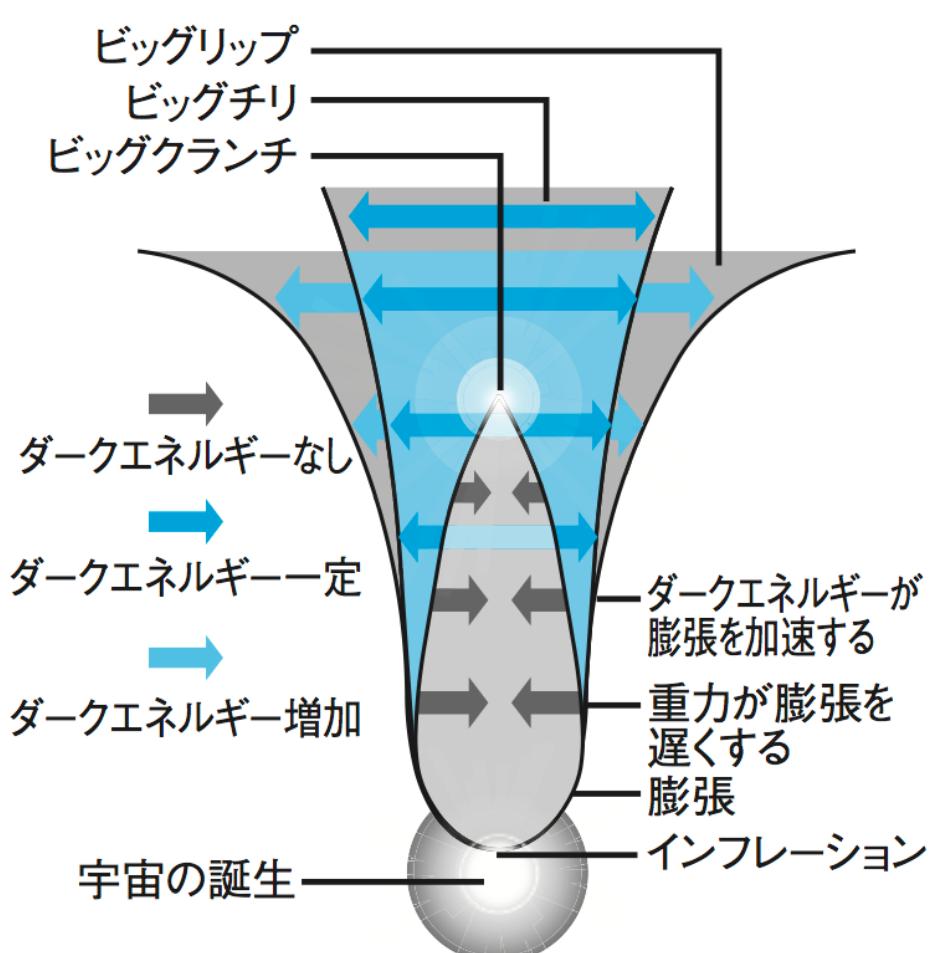
どこかで加速膨張が終わり、やがて重力が強くなつて最期には再び収縮する。ビッグバンの逆戻りとなつて、すべてが再び融合する。

### ビッグフリーズ、ビッグチリ

現在のまま宇宙は永遠に膨張を続け、すべての銀河が孤立し、やがて星は燃え尽きて温度ゼロ状態の「熱的な死」へ。

### ビッグリップ

今後もますます加速膨張をつづけ、やがては時空自体が引き裂かれ、銀河も星も何も構造が残らない。



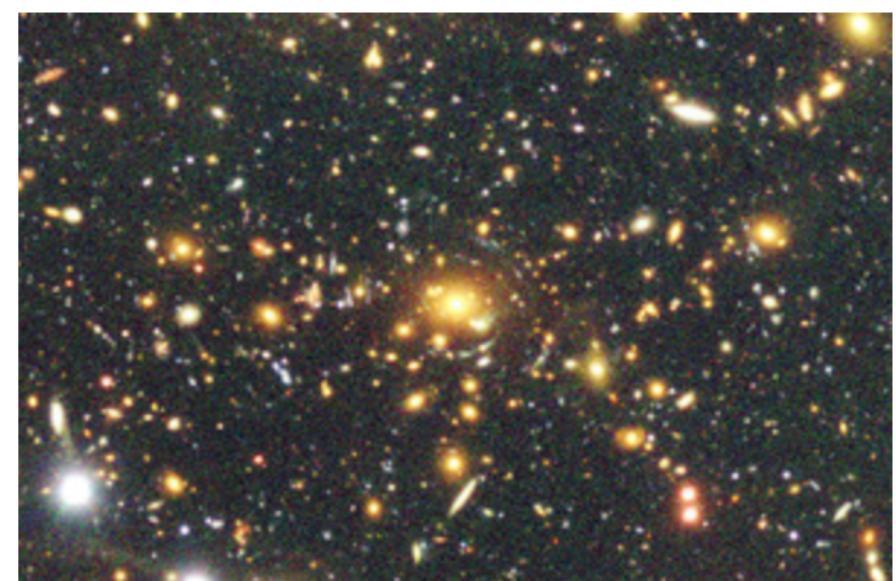
75

1400億年先なんか全く想像で「100%」など思いません。  
なぜ1400億年先まで「安泰」なの? いかにもエリ理解できませんでした。

## 宇宙、あと1400億年は「安泰」 すばる望遠鏡で調査

東山正宜 2018年9月27日09時25分

[シェア](#) 286 [ツイート](#) 7 [ブックマーク](#) [スクラップ](#) [メール](#) [印刷](#)



中央の銀河と「暗黒物質」によって光が曲がる重力レンズ効果。周囲の小さな銀河が同心円状に引き延ばされて見える（国立天文台提供）

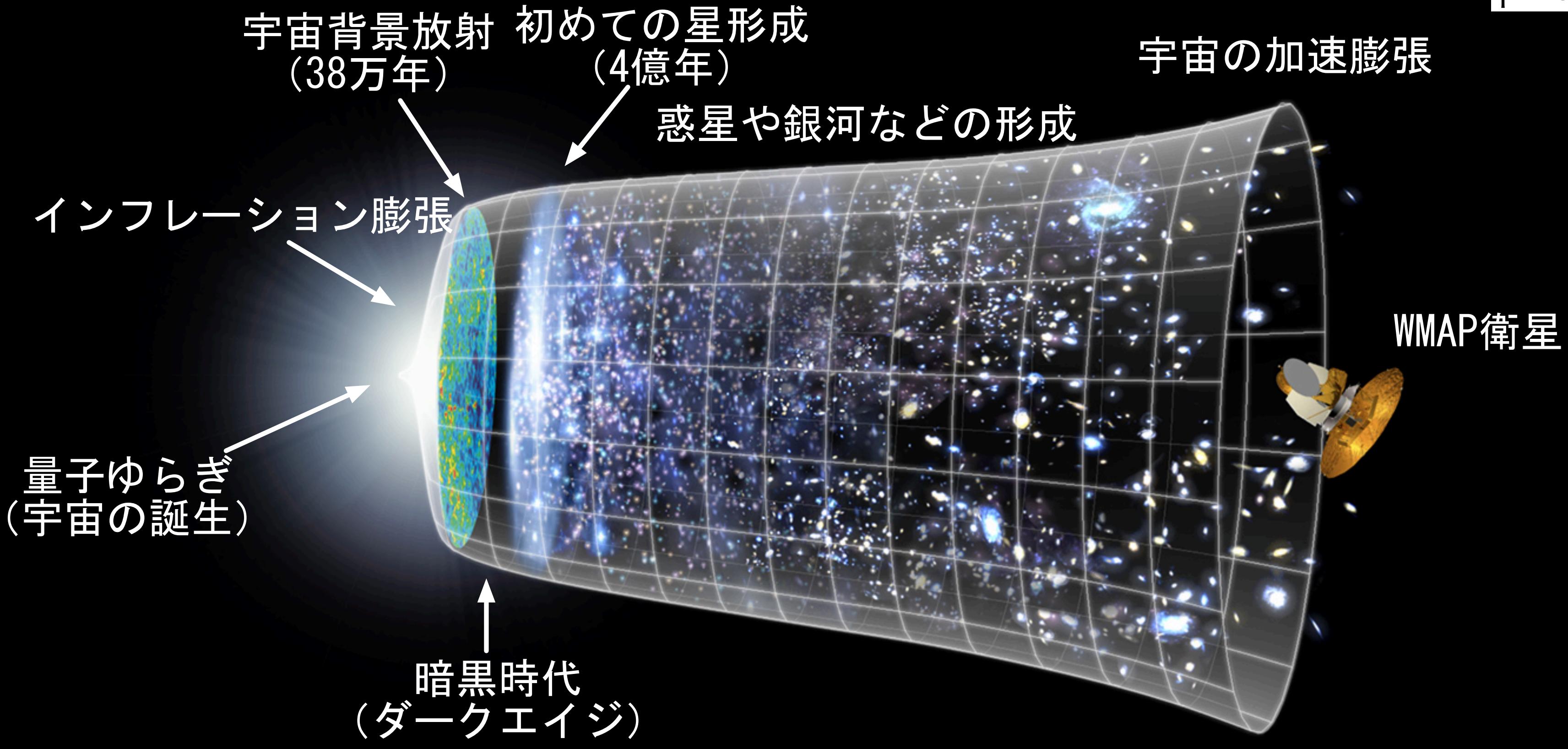
宇宙はこのまま静かに広がり続けるのか、それとも速く広がり過ぎて引き裂かれてしまうのか——。すばる望遠鏡で多くの銀河を精密に観測した結果、少なくともあと1400億年は「安泰」だと分かった。東京大学と国立天文台などのチームが26日、論文を公開した。

宇宙は、約138億年前に「ビッグバン」と呼ばれる大爆発で誕生後、膨張を続けている。宇宙の95%を占める正体不明の「暗黒エネルギー」や「暗黒物質」によって、膨張が加速していることが分か

ってきたが、今度は膨張が速くなり過ぎて宇宙が引き裂かれる「ビッグリップ」が起こるかが焦点になっている。

東大カブリ数物連携宇宙研究機構の日影千秋特任助教らは、すばる望遠鏡に取り付けた超広視野のカメラで約1千万の銀河を観測。銀河や暗黒物質の重力で遠くの光が曲がる「重力レンズ効果」を精密に調べた。

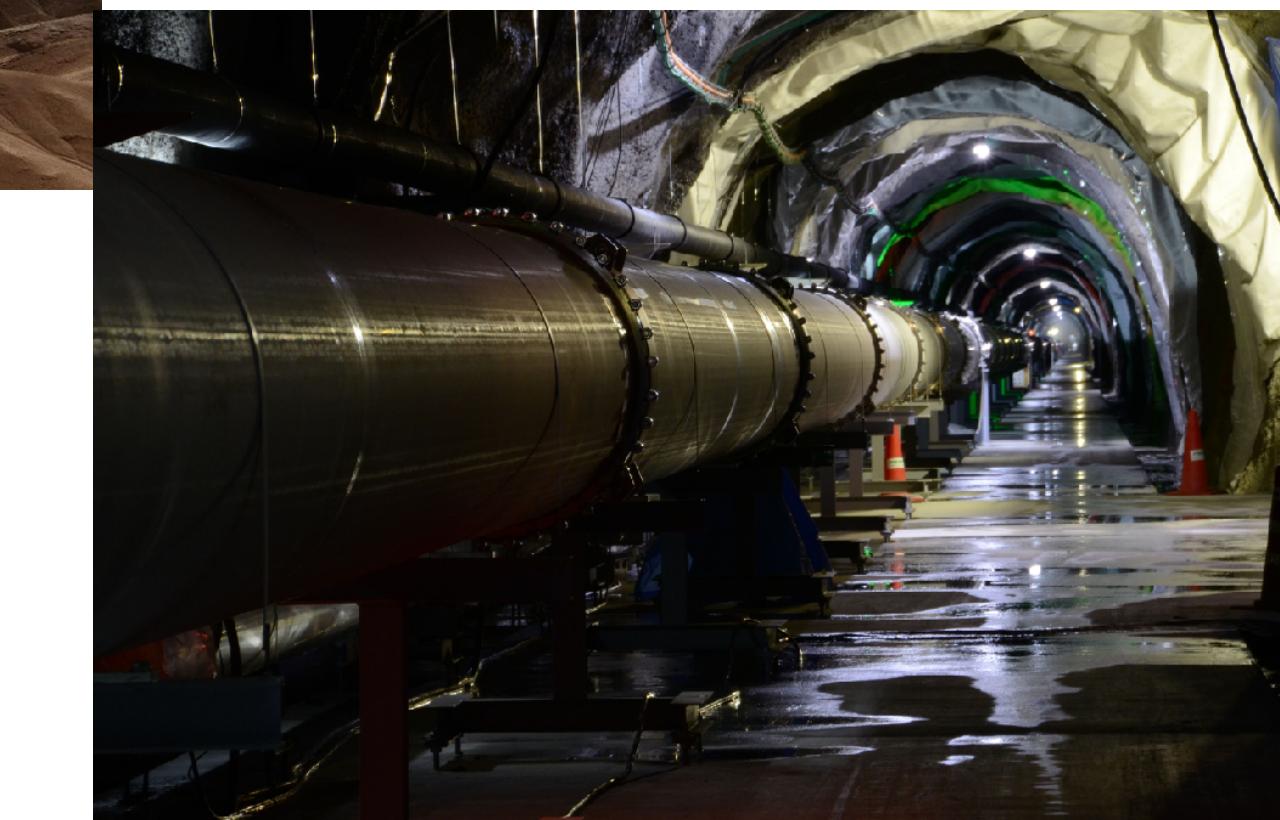
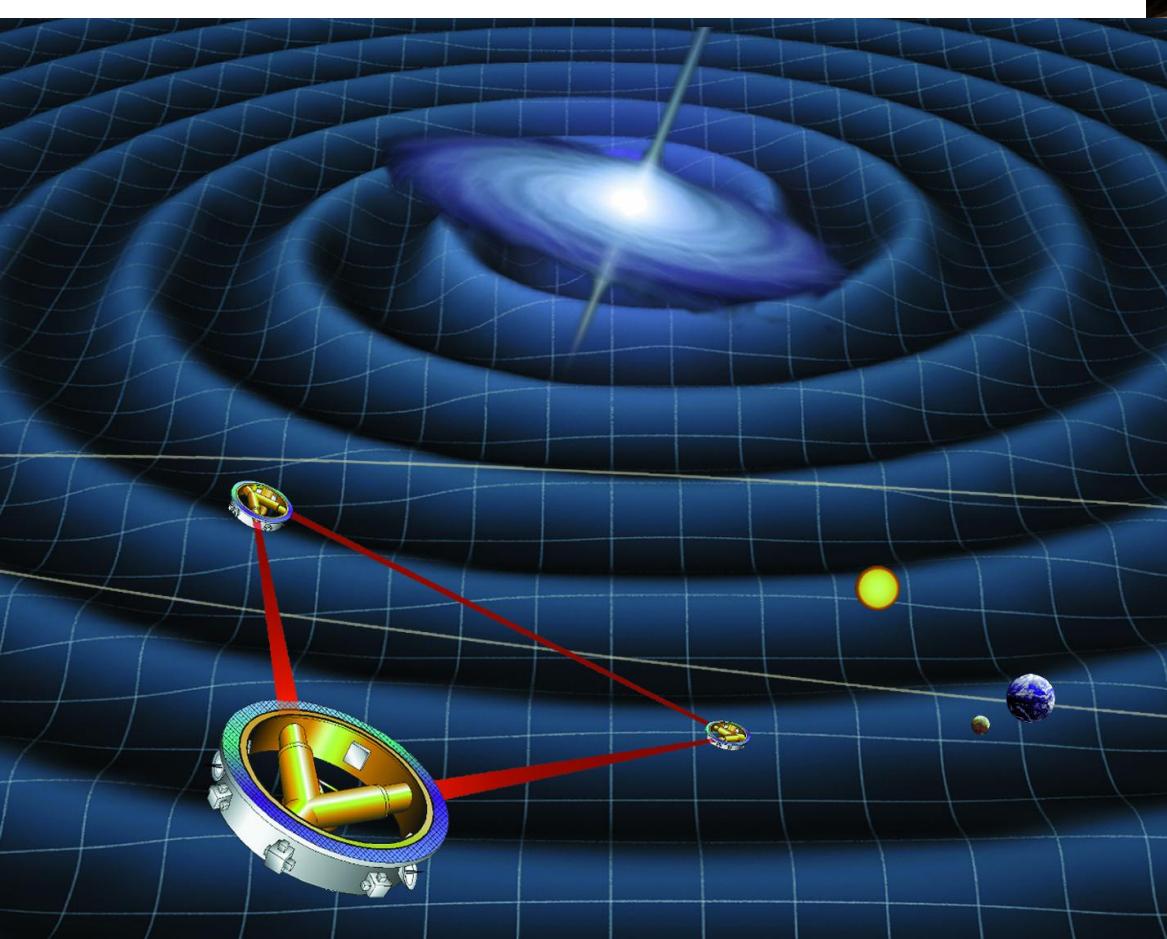
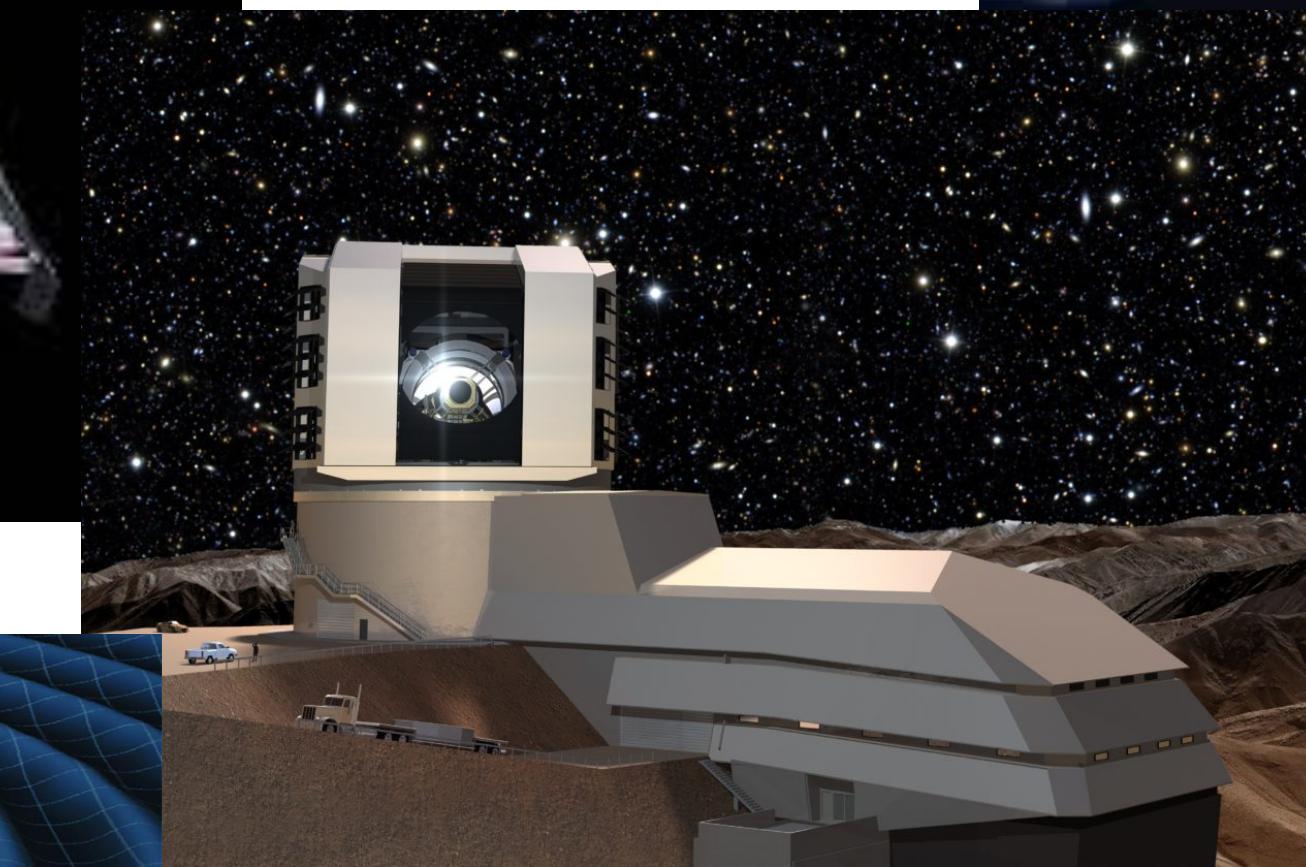
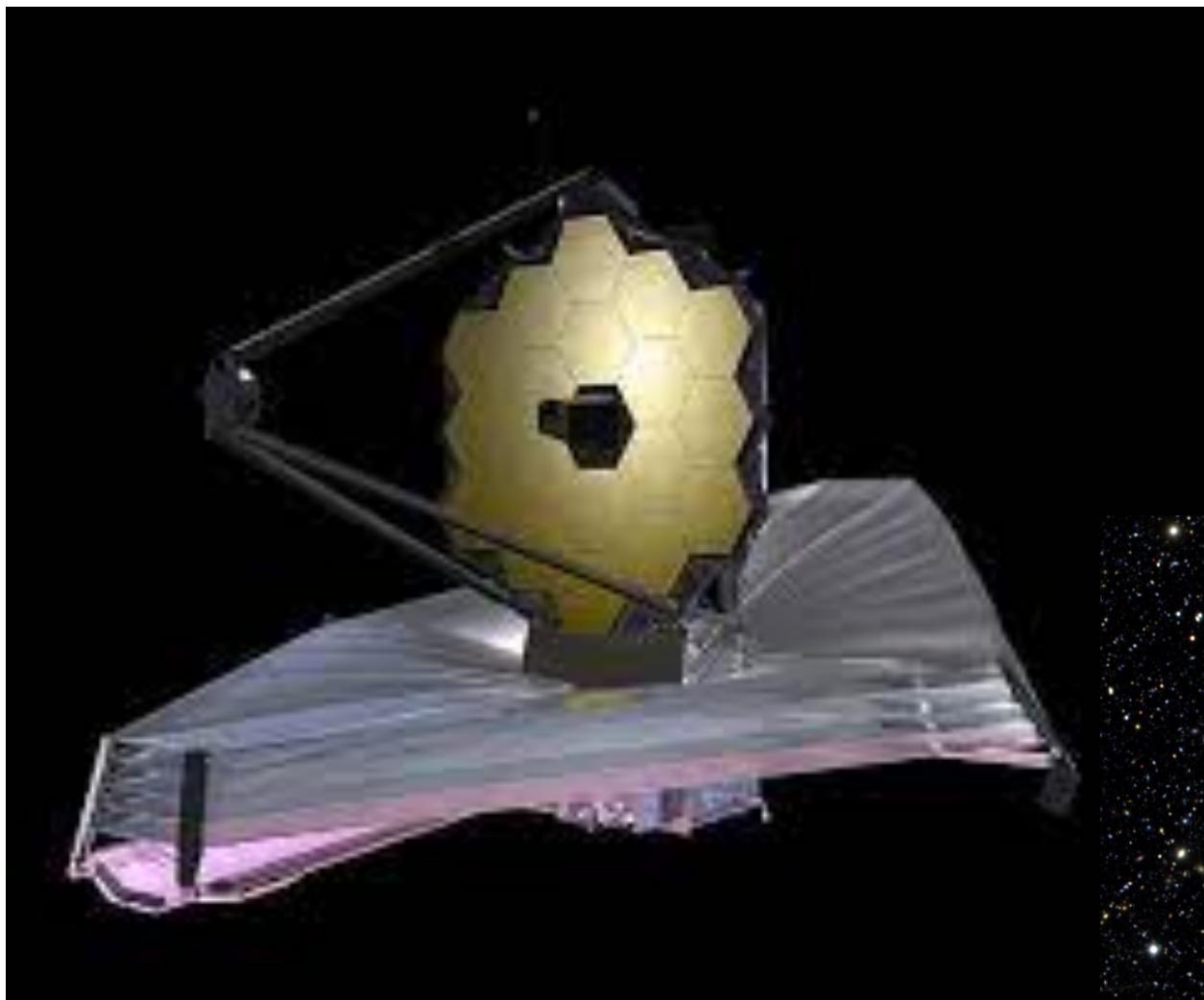
その結果、宇宙を広げる暗黒エネルギーはそれほど増えておらず、宇宙は年齢の10倍ほどの時間（約1400億年）は存在できることが分かった。日影さんは「さらに多くの数の銀河を観測し、宇宙の終わりがどうなるのか確かめたい」と語った。論文はサイト（<https://arxiv.org/abs/1809.09148>）で読める。（東山正宜）



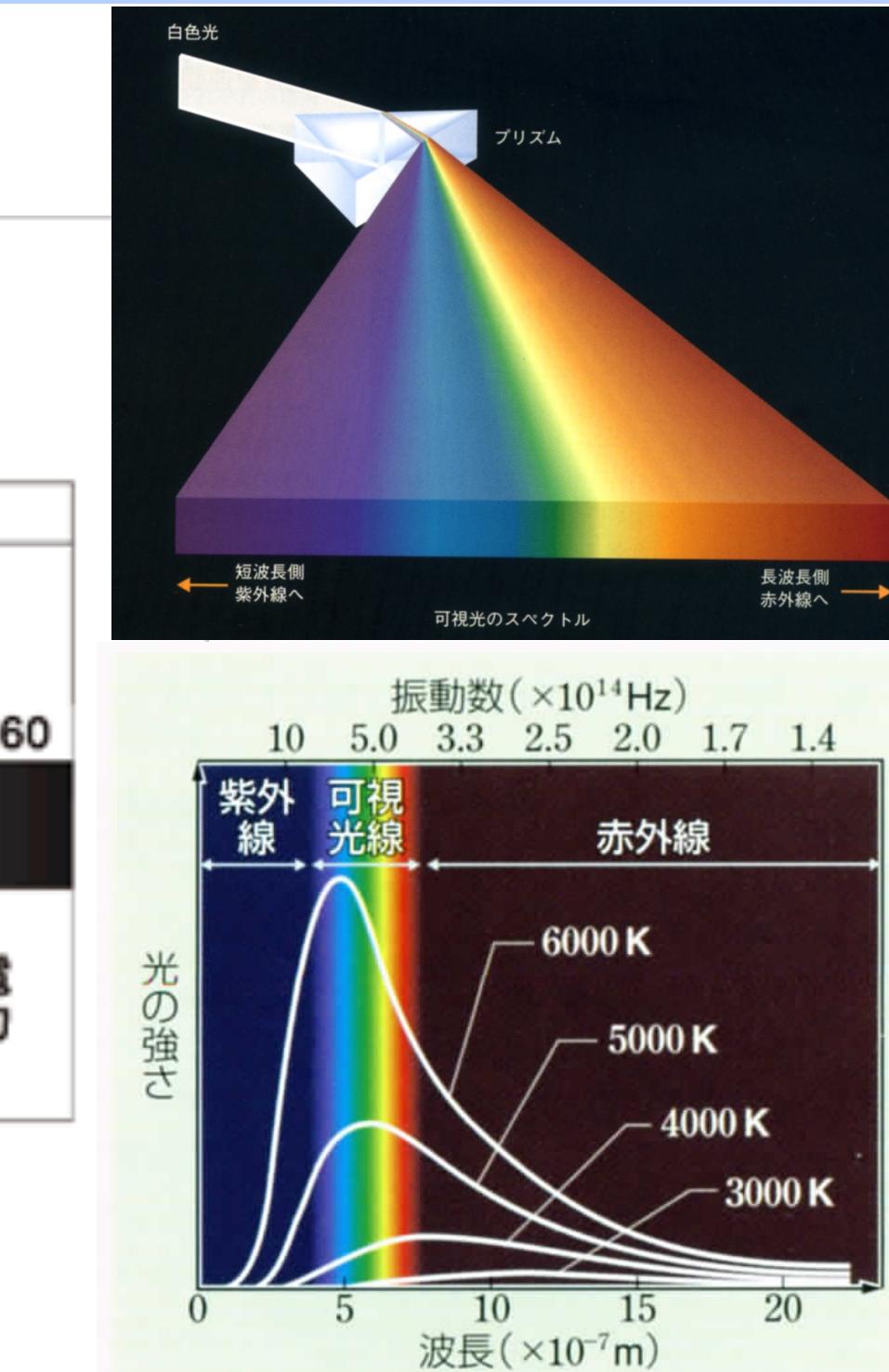
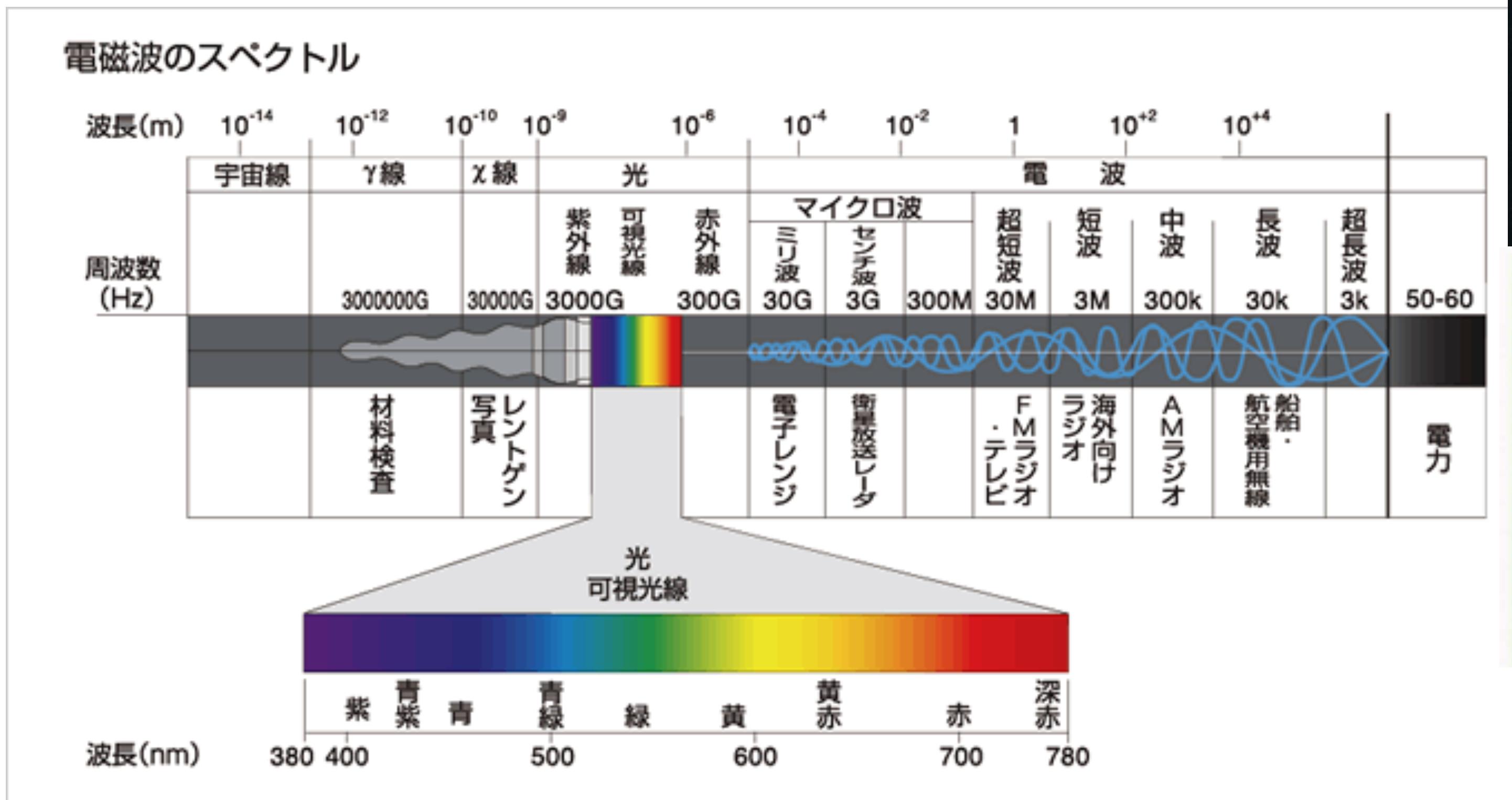
未知の問題	ダークエイジ dark age
	ダークマター dark matter
	ダークエネルギー dark energy

# Finale これからの宇宙論研究

より遠くまで より広範囲に より詳細に より広いエネルギー幅で

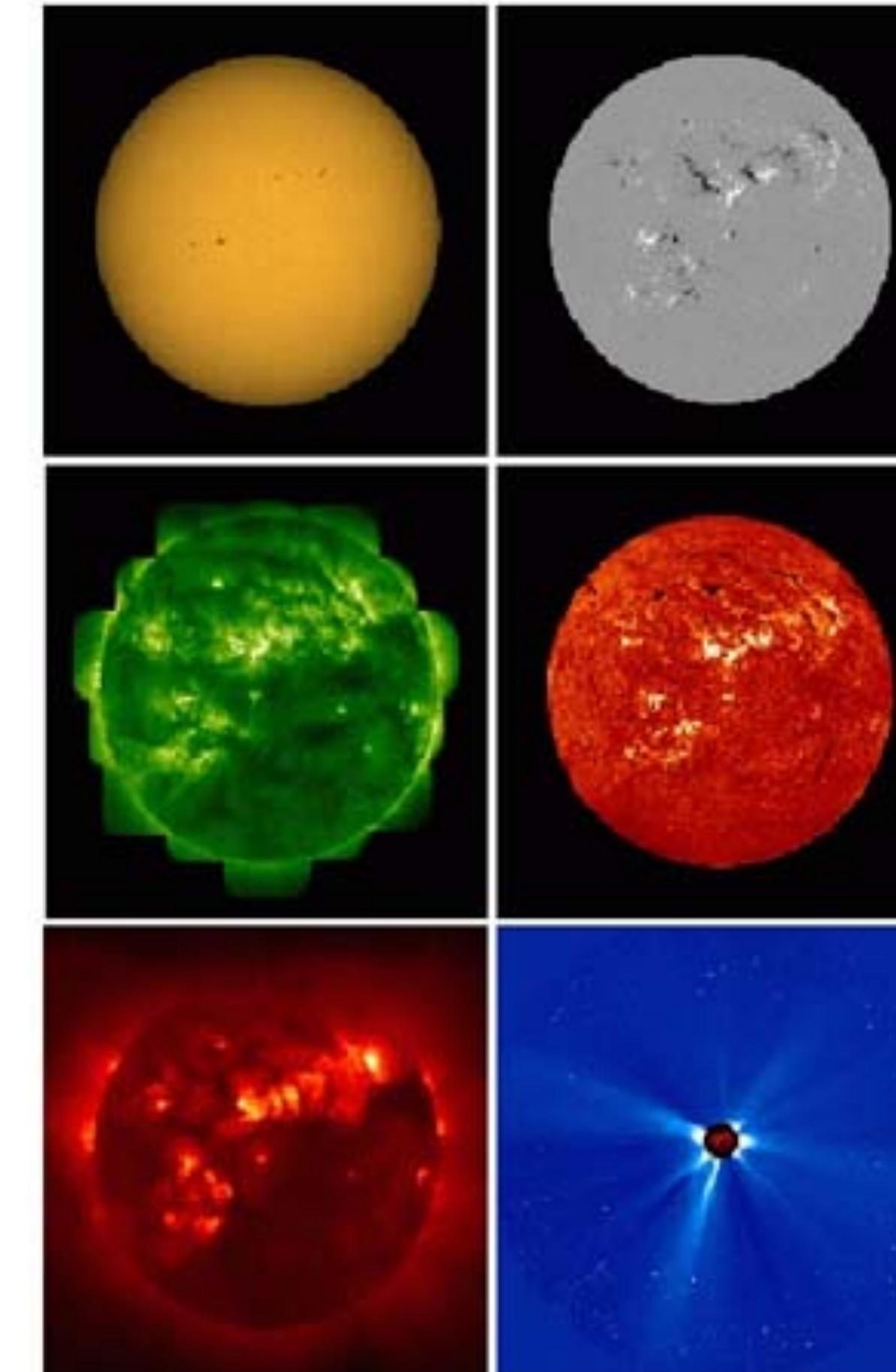
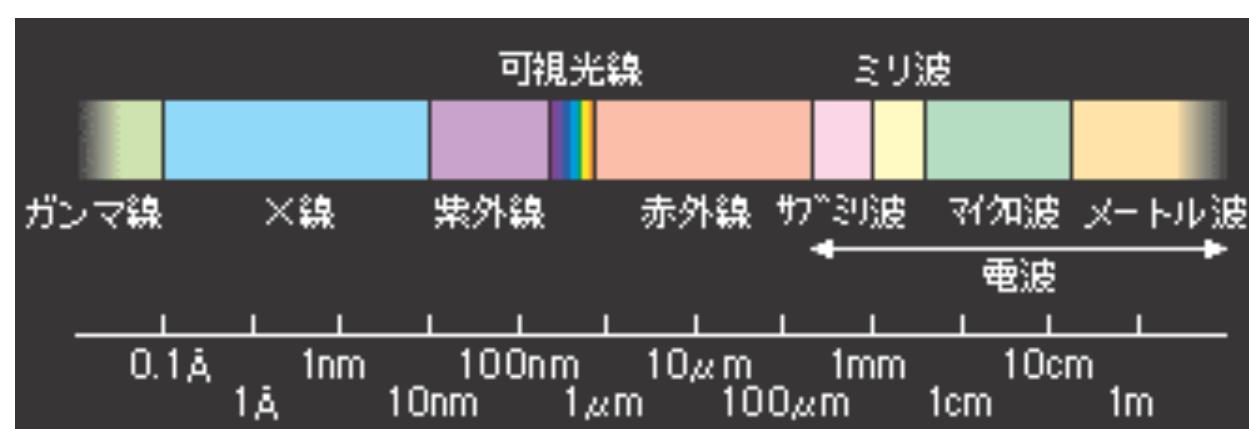
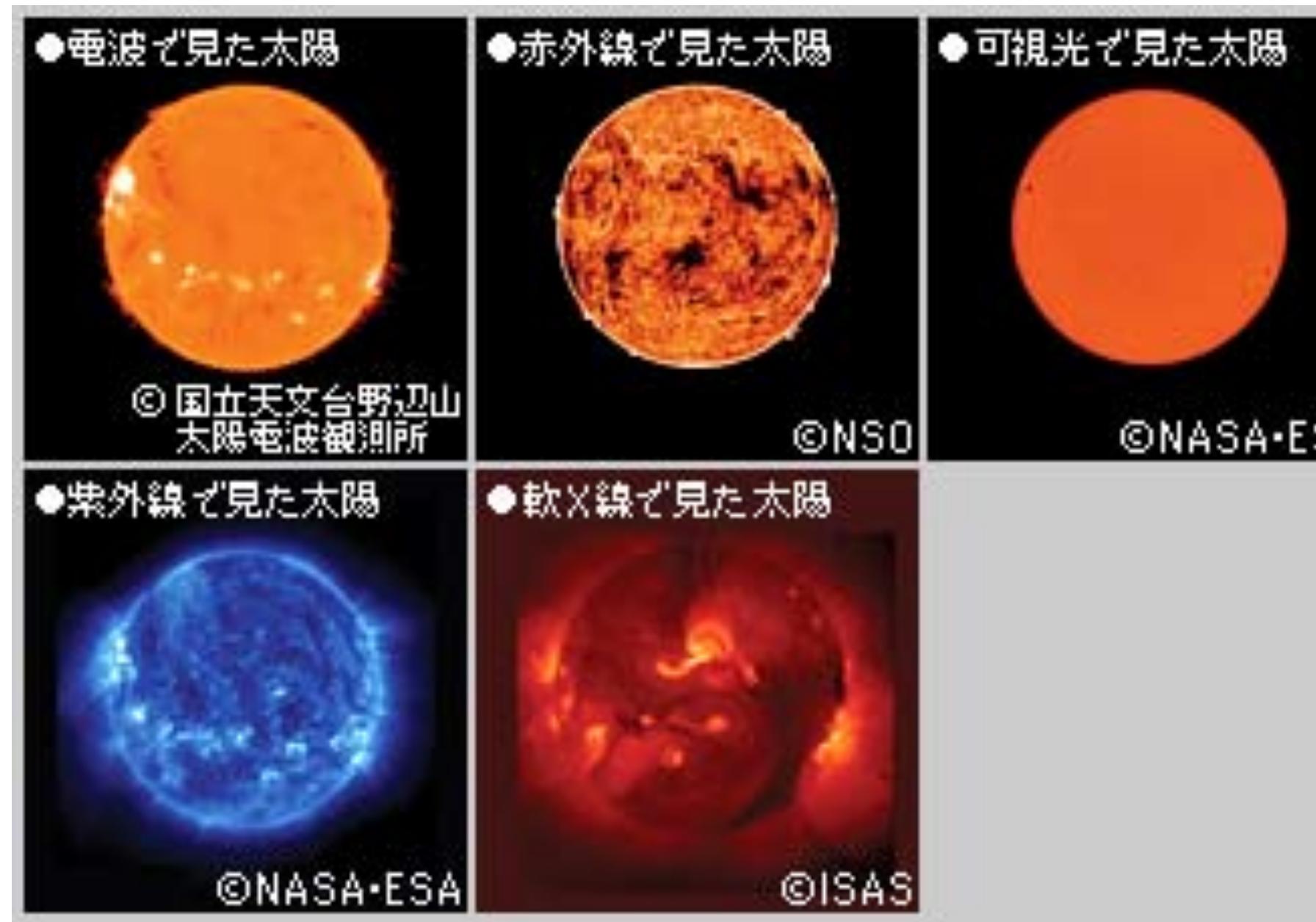


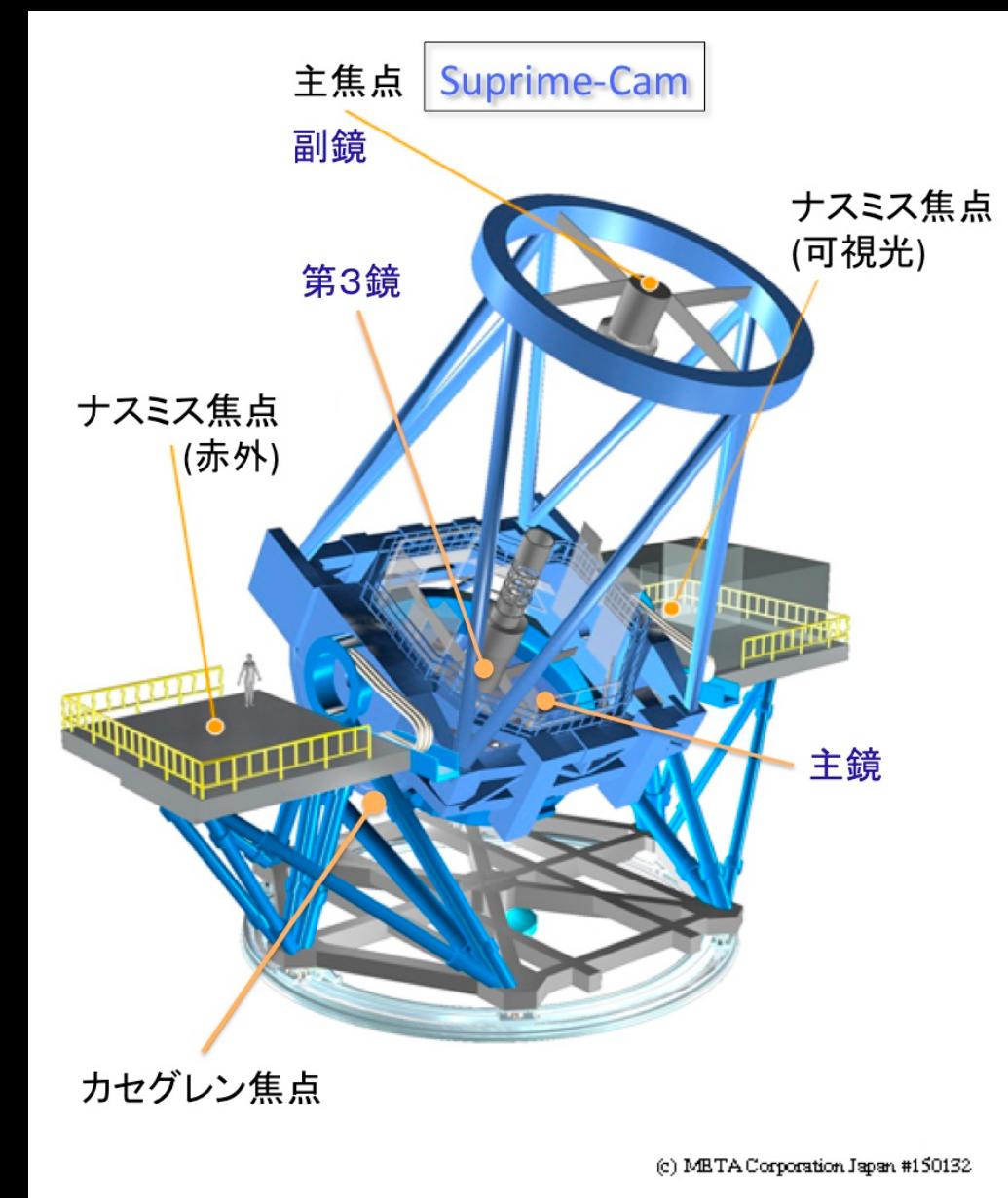
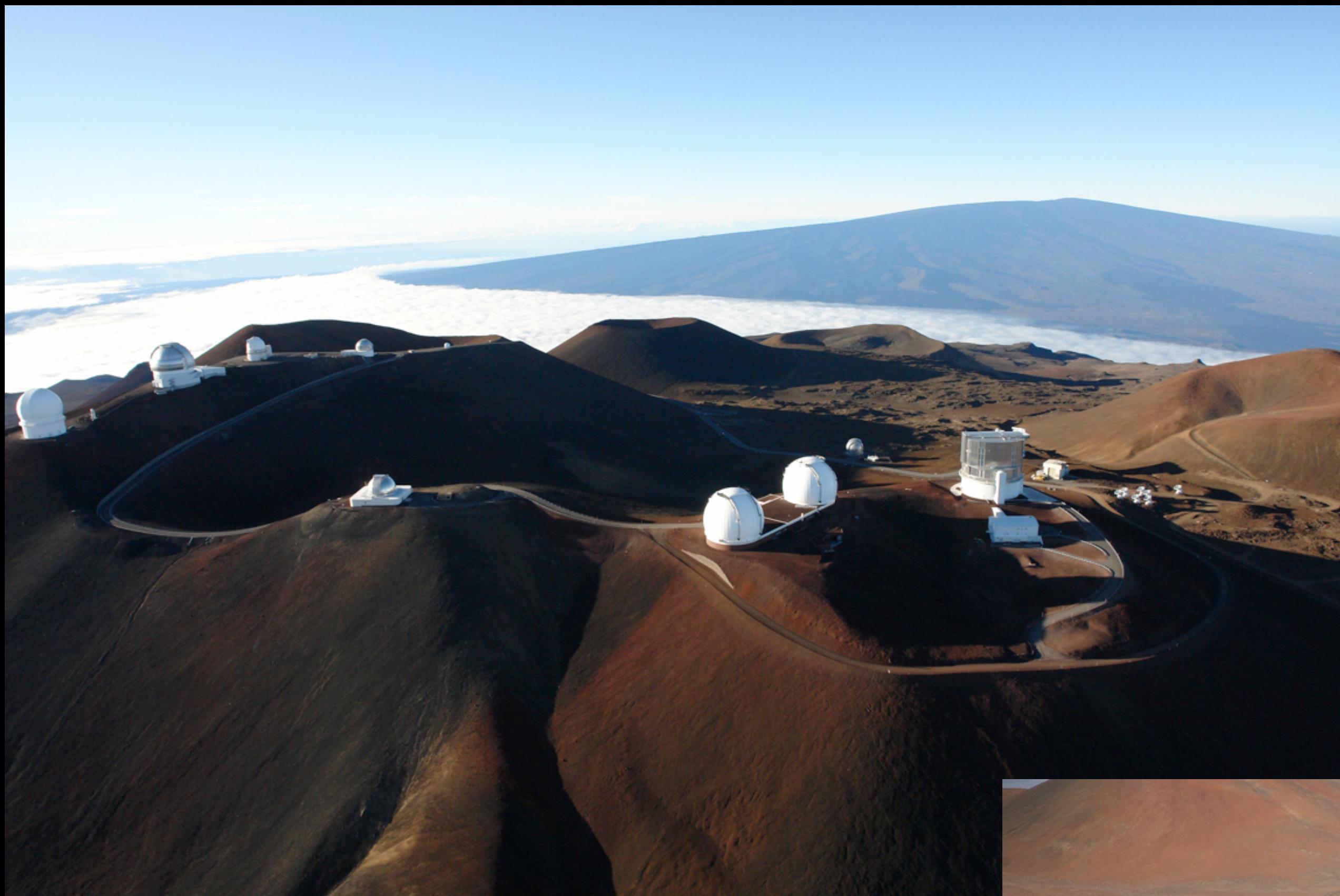
# F.1 さまざまな望遠鏡



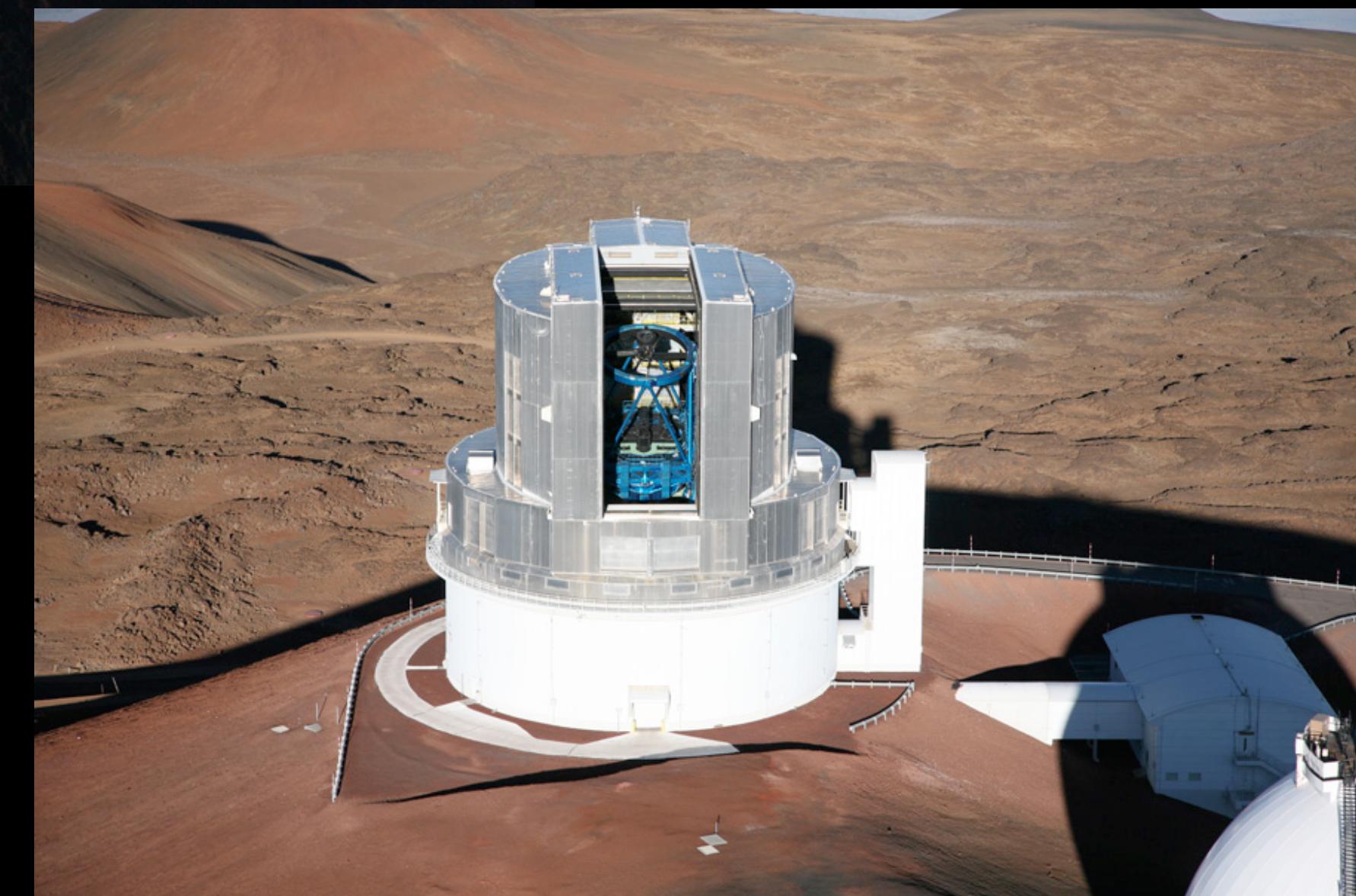
より遠くまで より広範囲に より詳細に より広いエネルギー幅で

# いろいろな波長で見た太陽





# ハワイにある日本の すばる望遠鏡



# 30m 望遠鏡 TMT (Thirty Meter Telescope)



- 口径30m
- 0.31-28um
- 日本・アメリカ・カナダ・NSF・中国・インドの国際協力
- ハワイ・マウナケア
- 総予算1500億円
- 2021年末観測開始

残念ながら、まだ建設地選定途中

ターナーの謎がより深まりました。TMTの話は何かの文章で知ったのですがその姿が見れてよかったです。山で流星おとしめたりターカタの謎は生きてるうちに解明されませんよ？

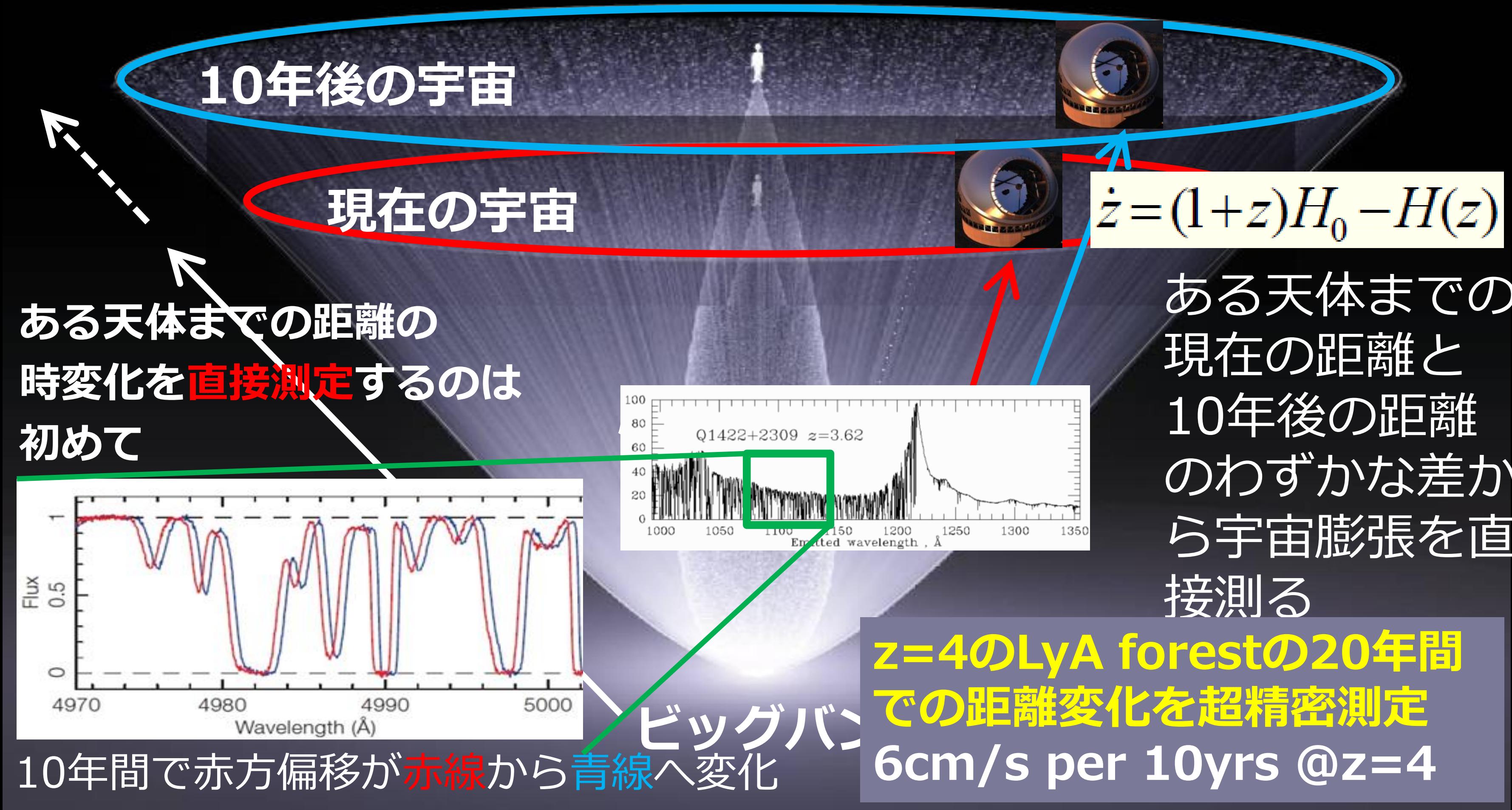
次世代望遠鏡による分からうこと詳しく述べた。。。この講義を通して宇宙観測から理解する物理学の面白さを実感した。

# 宇宙膨張の直接測定

- 非常に高精度な測定ができれば、赤方偏移の時間変化=宇宙膨張の加速度・減速度を知ることができる。

宇宙の未来は？

ダークエネルギーとは？



# 大気の窓

望遠鏡は地上にあるもののみでないと思い、つい。

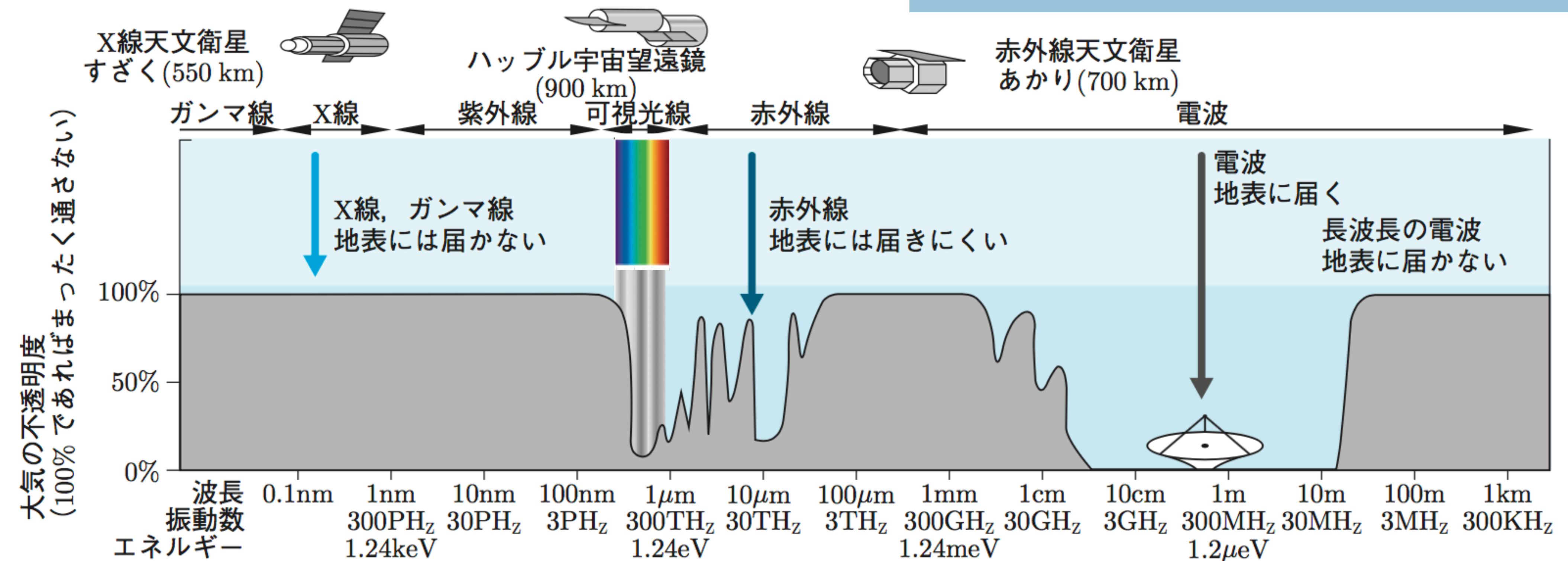


図 A.12 大気の窓。電磁波にとって大気を通過できるのは可視光と電波の領域である。したがって、可視光と電波の観測は地上で可能だが、ガンマ線・X線・赤外線での観測は不可能である。

【14-2】X線を観測するための望遠鏡を宇宙に打ち上げる理由は何か？

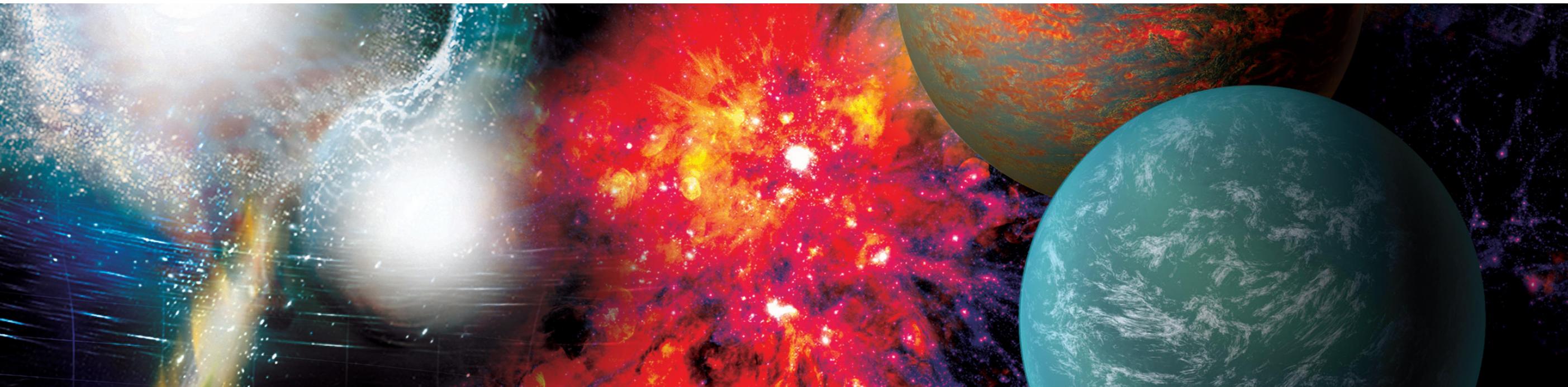
地表にはX線は届かないから

【14-3】可視光線で観測するための望遠鏡を宇宙に打ち上げる理由は何か？

大気で揺らがないクリアな  
画像が撮れるから

# Astro2020 (アメリカの10年計画, 2021年11月発表)

<https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>



## ( i ) Pathways to Habitable Worlds 地球外生命体はいるのか。

太陽系外惑星をその環境を決める中心星の性質と合わせて統一的に理解することを目指す。

## ( ii ) New Windows on the Dynamic Universe 新しい「眼」で宇宙を観測する

従来の電磁波（可視光、赤外線、電波、X線、ガンマ線）に加えて、超高エネルギー宇宙線、ニュートリノ、重力波という新たな観測手法を用いて、未知の物理学の開拓を目指す。

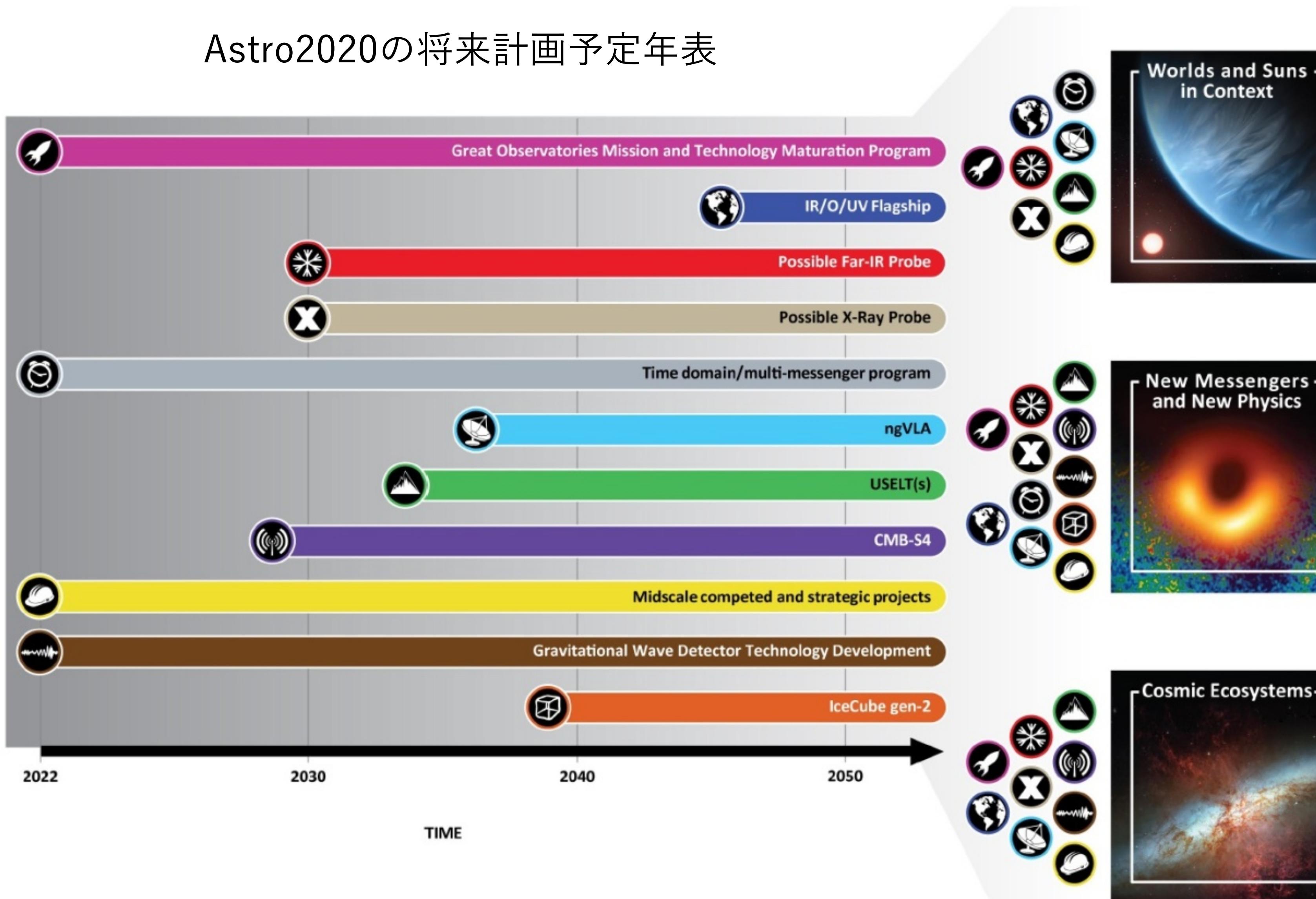
## ( iii ) Drivers of Galaxy Growth 銀河進化を生態系として理解する

天体は、その化学的・力学的進化の最期に再び宇宙空間に戻って次世代の天体を形成する。その基礎過程を解明する。

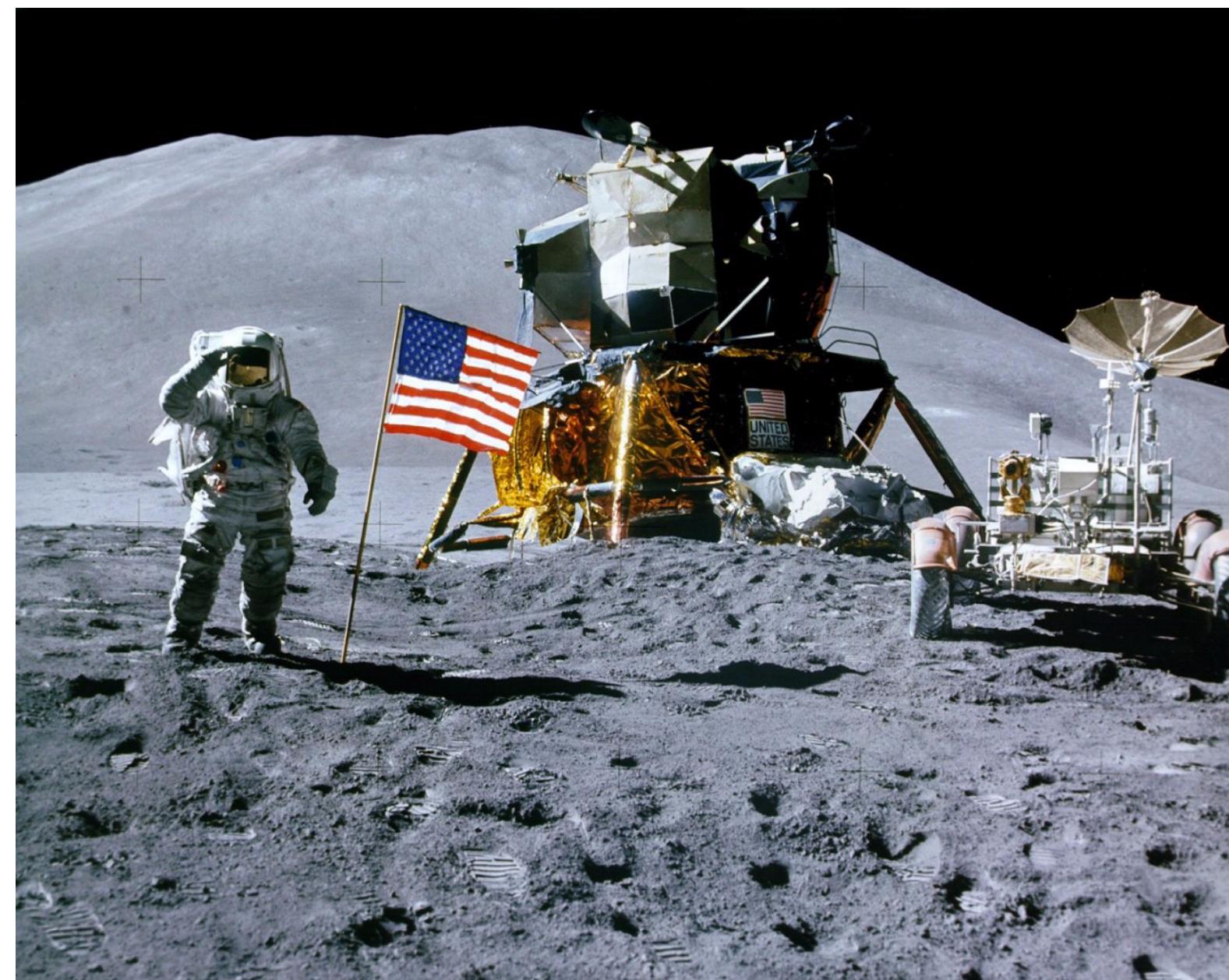
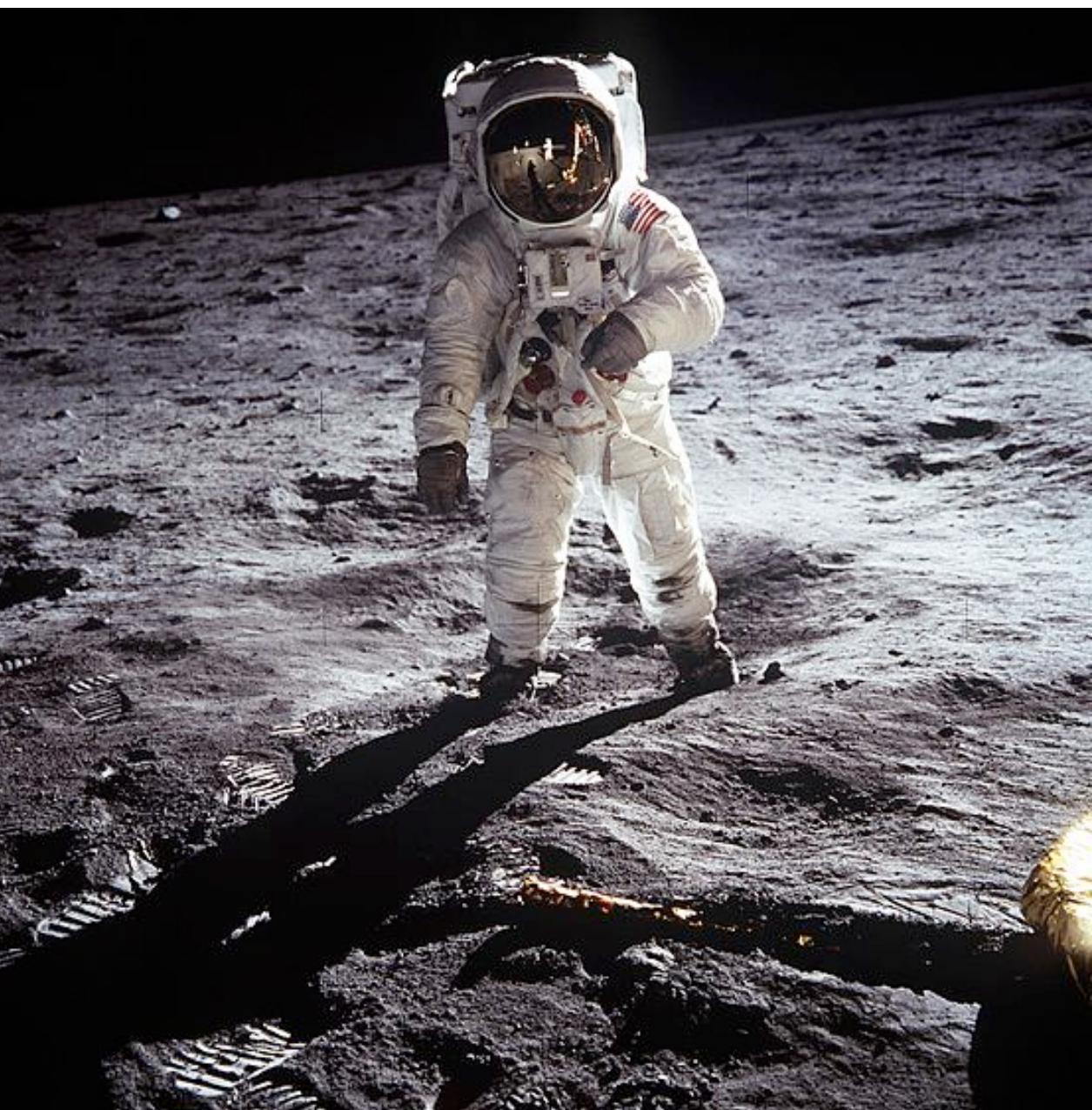
# Astro2020 (アメリカの10年計画, 2021年11月発表)

<https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020>

## Astro2020の将来計画予定年表



## 太陽系惑星探査：NASAによる月探査



1960年代半ばから1970年代半ばにかけて、65回の月面着陸

初めての月面着陸は1969年7月20日で、アポロ11号のNeil Armstrong (1930-2012) とBuzz Aldrin (1930-)。

最後に月面を歩いたのは、1972年12月に月に到着したアポロ17号のEugene Cernan (1934-2017) と Harrison Schmitt (1935-)。

That's one small step for (a) man, one giant leap for mankind.



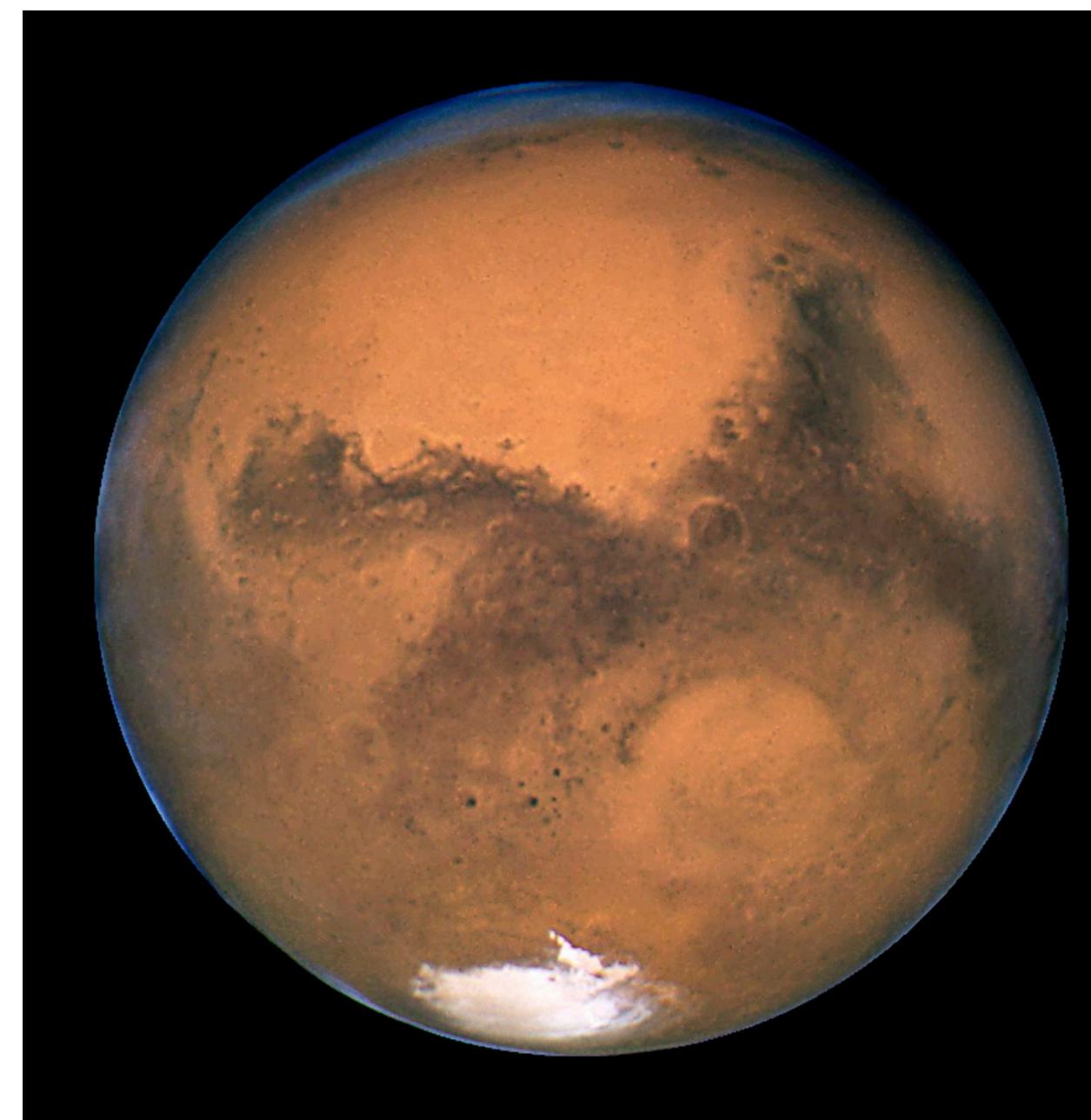
I'm, ah... at the foot of the ladder. The LM footpads are only, ah... ah... depressed in the surface about, ah.... 1 or 2 inches, although the surface appears to be, ah... very, very fine grained, as you get close to it. It's almost like a powder. (The) ground mass, ah... is very fine.  
いま着陸船の脚の上に立っている。脚は月面に1インチか2インチほど沈んでいるが、月の表面は近づいて見るとかなり…、かなりなめらかだ。  
ほとんど粉のように見える。月面ははっきりと見えている。



I'm going to step off the LM now.  
これより着陸船から足を踏み降ろす。

**That's one small step for (a) man, one giant leap for mankind.**  
これは一人の人間にとっては小さな一歩だが、人類にとっては偉大な飛躍である。

初めての月面着陸1969年7月20日で、アポロ11号のNeil Armstrong



火星の大気は 95% が二酸化炭素. 大気圧は地球の 0.75%. 気温は最高 20°C. 重力は地球の 40%.



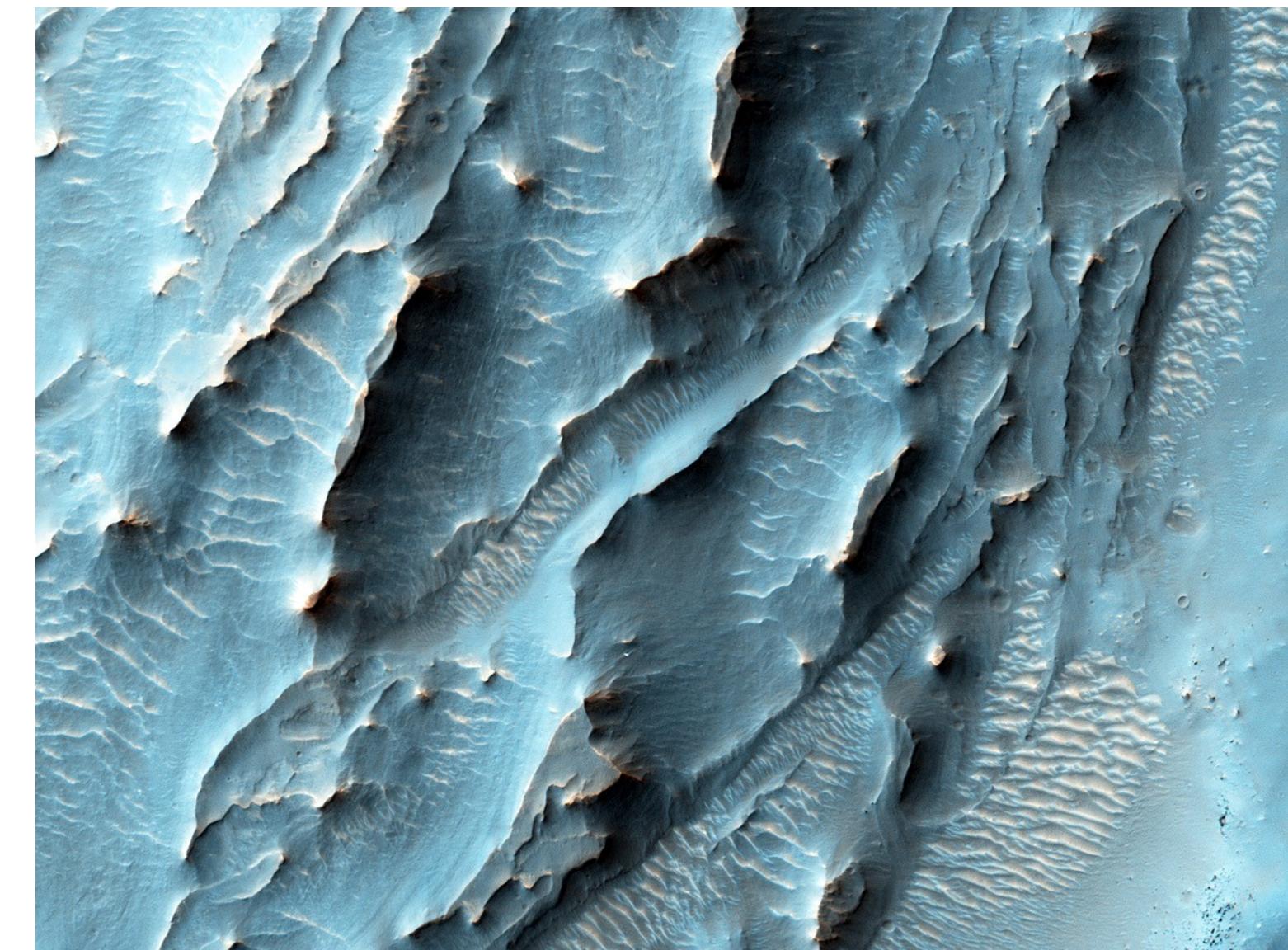
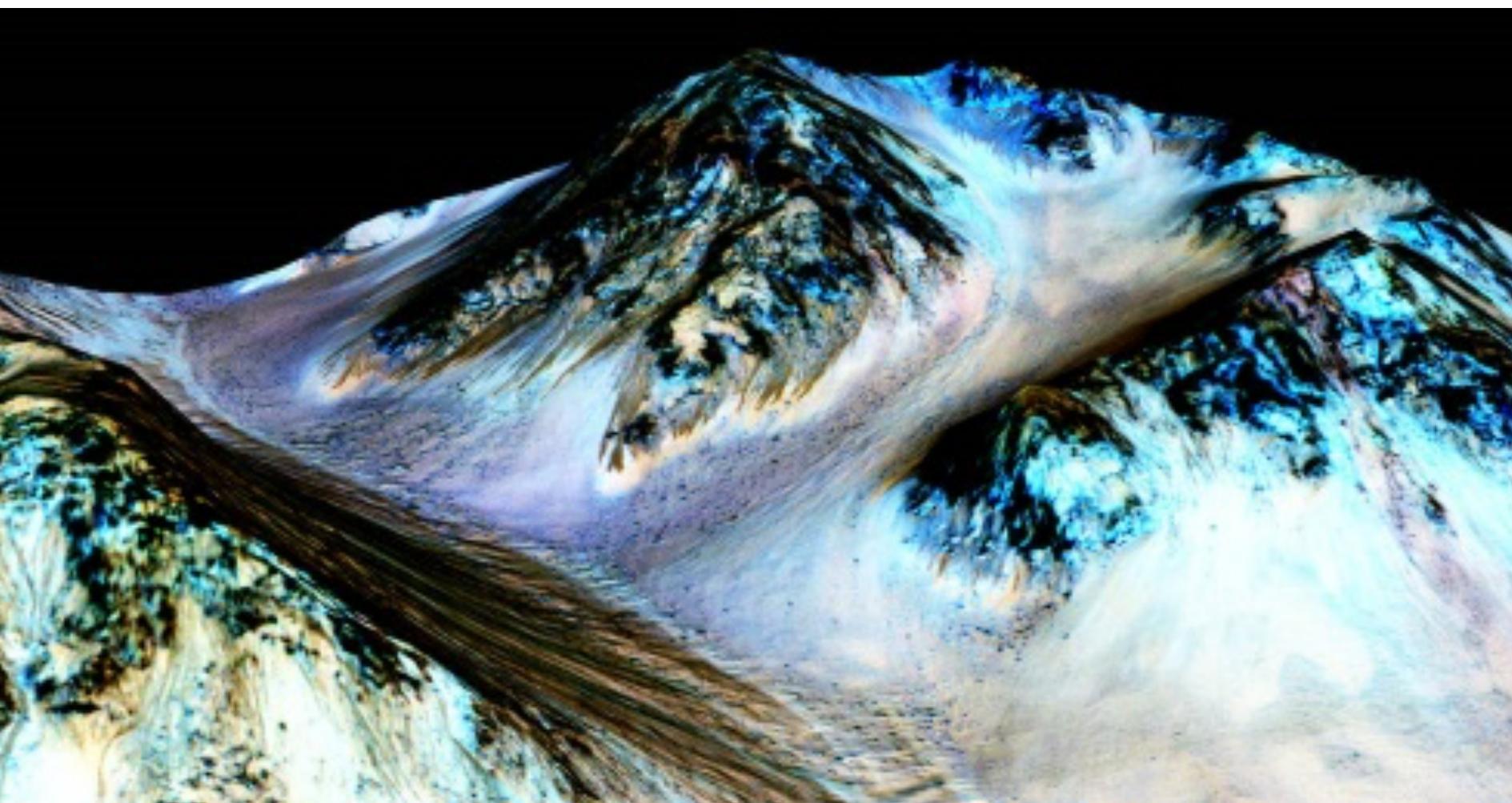
キュリオシティが着陸直後に撮影した火星表面のパノラマ写真。

2012 年 8 月 13 日 NASA

火星には過去に液体の水が存在した (2004年発表)

極地方では現在も水が存在している可能性 (2015年9月29日発表)

火星の大気は太陽から吹き出したプラズマ流(太陽風)によって剥ぎ取られた



斜面上を約 100m の長さにわたって伸びる暗い筋模様が液体の水の存在 を示している。  
山の斜面と上空からの写真。

Seismic discontinuity in the Martian crust possibly caused by water-filled cracks

米航空宇宙局（NASA）の火星探査機「インサイト」が観測した地震波データから、複数のグループが、火星の地殻では、地震波が伝わる速度が変わる不連続な面が、地下10キロと20キロあたりにあると解析していた。そのあたりで岩石の種類や割れ目の入り方（空隙率）が変化する可能性があるという。広島大学の研究者らは、水の存在によっても地震波の速度は変わることを実験で確認。岩石の空隙率は約1%で変わらないという前提条件で、地下0～10キロの割れ目は乾燥、10～20キロの割れ目は水を含むと仮定して計算してみた。その結果は、地震波の速度変化に関する先行研究とも合っていた。算出される量の違いはあるが、米国のグループも地下に水があると推定している。

RESEARCH ARTICLE | SEPTEMBER 24, 2024

Early Publication

## Seismic discontinuity in the Martian crust possibly caused by water-filled cracks

Ikuo Katayama; Yuya Akamatsu

+ Author and Article Information

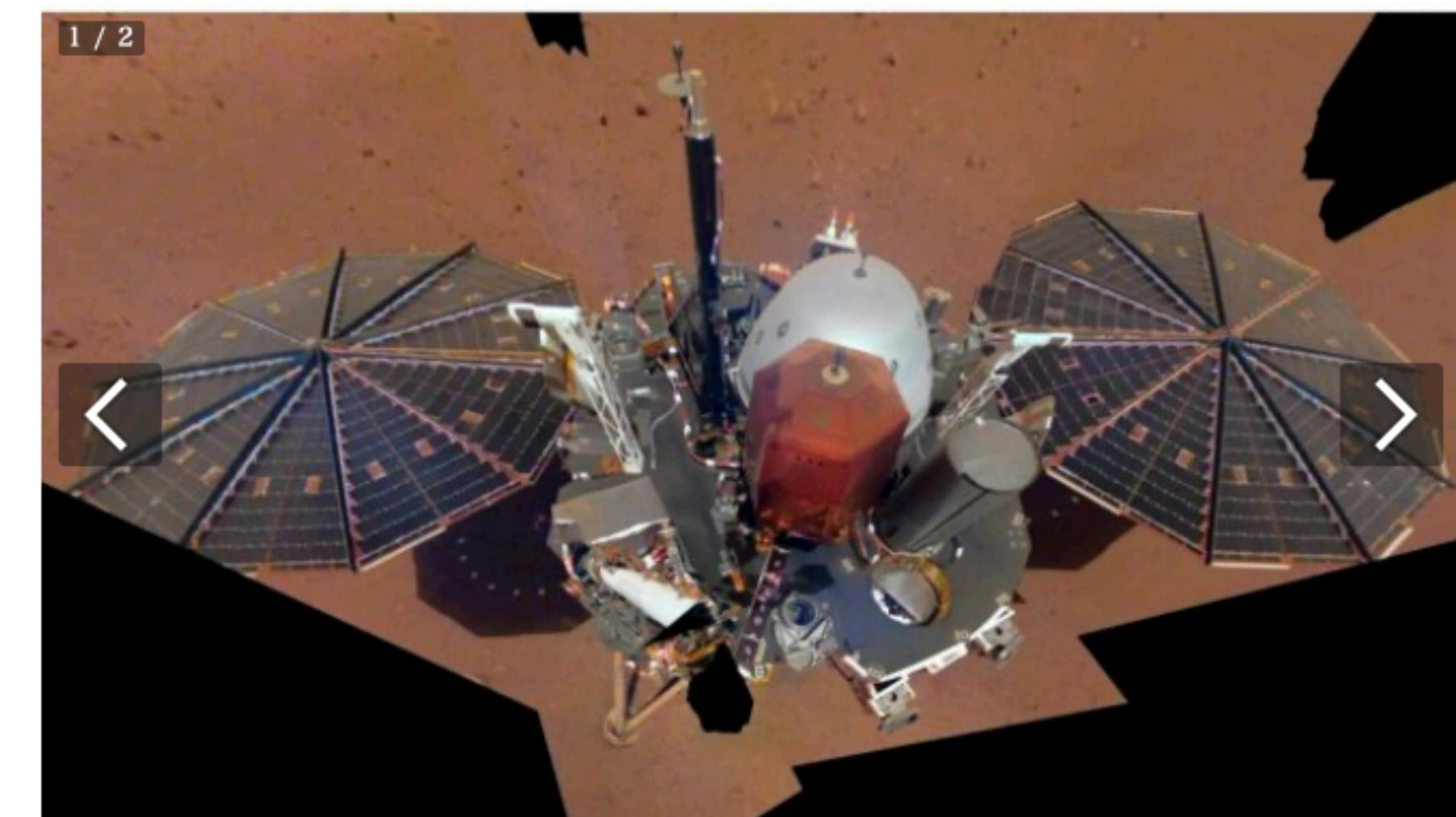
Geology (2024) | <https://doi.org/10.1130/G52369.1> | Article history

Standard View PDF Cite Share Permissions

Recent seismic data acquired by the InSight lander have revealed seismic discontinuities in the Martian crust that have been interpreted as sharp transitions in porosity or chemical composition. Here we propose an alternative model in which the transition from dry cracks to water-filled cracks could explain the observed seismic discontinuity in the Martian crust. Our model can explain sharp increases in seismic velocity and Vp/Vs at ~10 km depth with no associated changes in porosity or chemical composition. The present model suggests the local existence of liquid water in the Martian crust, which could potentially serve as a subsurface habitat for life.

<https://doi.org/10.1130/G52369.1>

[https://digital.asahi.com/articles/ASS9T2SQ9S9TPLBJ001M.html?iref=pc\\_photo\\_gallery\\_breadcrumb](https://digital.asahi.com/articles/ASS9T2SQ9S9TPLBJ001M.html?iref=pc_photo_gallery_breadcrumb)



2018～22年に火星探査を実施したインサイト=NASA/JPL-Caltech提供

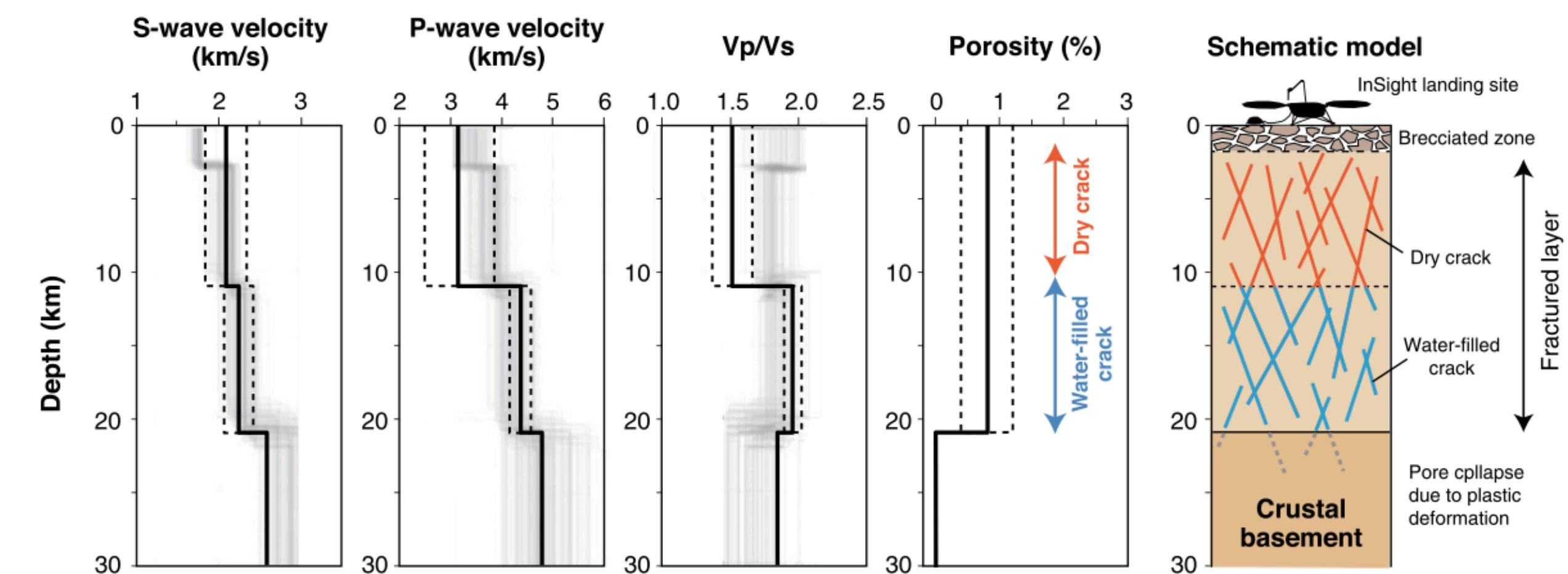


Figure 2. Calculated velocity structure in Martian crust. Model assumed a water-rich fracture layer underlying a dry fracture layer and that these layers have constant porosity of 0.4%–1.2% down to ~20 km depth. Seismic velocities for water- and gas-filled cracks were calculated from the effective medium theory using crack aspect ratio of  $6 \times 10^{-3}$ . Transition from a dry to a water-rich layer can lead to a significant increase in seismic velocity, which may explain the observed seismic discontinuity at ~10 km depth at the InSight landing site (gray lines are seismic profiles from Carrasco et al., 2023). Calculated parameters are listed in Table 1, where reference bulk and shear moduli are derived from seismic velocities below ~20 km depth from Carrasco et al. (2023).

これまで、米航空宇宙局（NASA）の火星探査車による分析などで、火星の有機物に含まれる炭素のうち「炭素13」の割合が地球や隕石の有機物に比べて異常に小さいことがわかっている。東工大らのグループは、実験で、大気中の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）が太陽光（紫外線）によってCOに分解されると、炭素13の割合が小さくなることを示した。さらに実験結果をもとに計算したところ、初期の火星では大気中のCO<sub>2</sub>のうち最大20%がCOをへて有機物になっていたこともわかった。

30億年前の火星には液体の水（海または湖）があり、有機物が堆積していたと考えられている。この有機物の由来は不明であったが、大気中の化学反応でできたものが地上に降り注いだ可能性が出てきた。地球での生命起源の議論にも関連しそうだ。

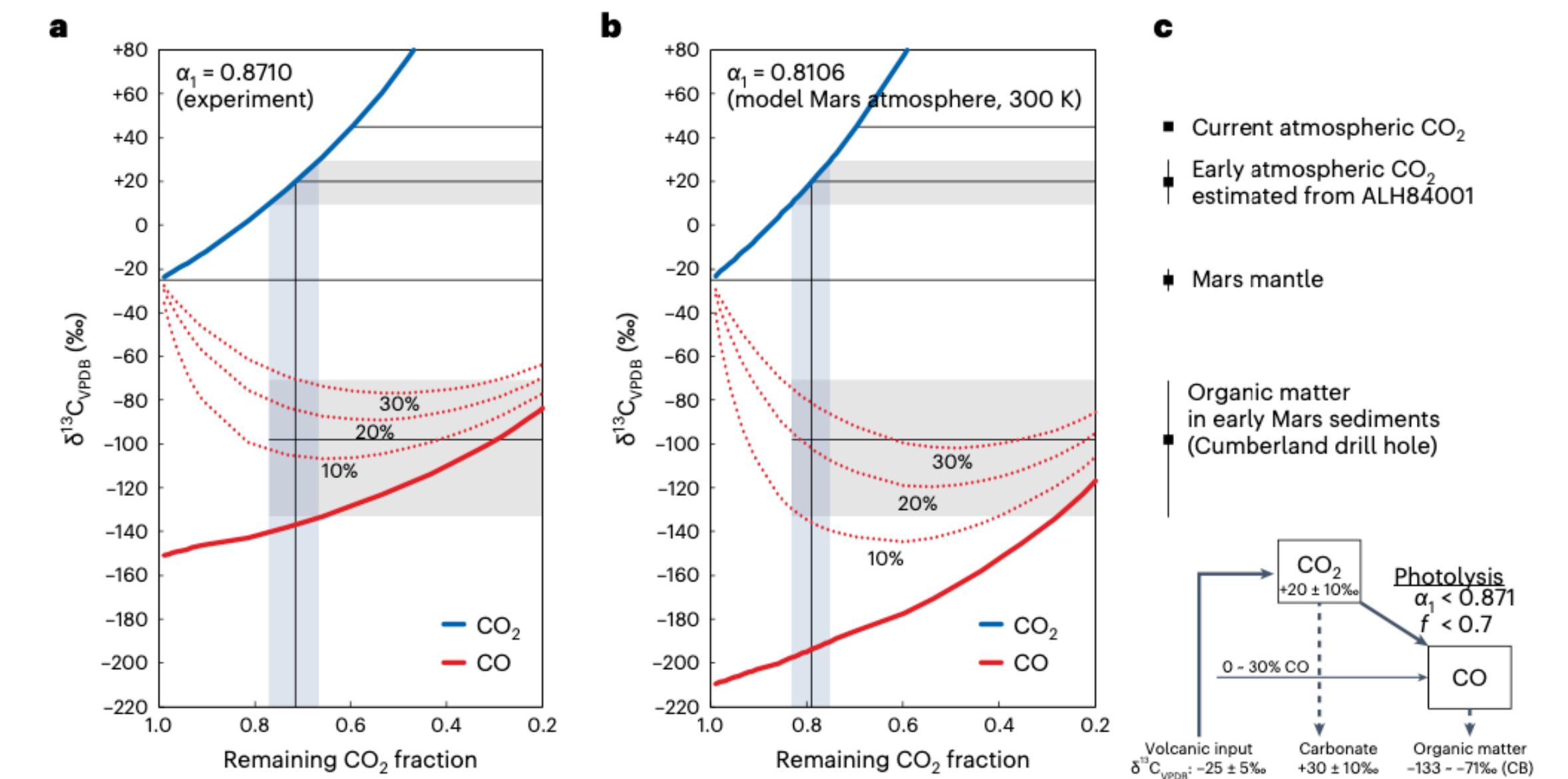
Article | [Open access](#) | Published: 09 May 2024

## Synthesis of <sup>13</sup>C-depleted organic matter from CO in a reducing early Martian atmosphere

[Yuichiro Ueno](#)✉, [Johan A. Schmidt](#), [Matthew S. Johnson](#), [Xiaofeng Zang](#), [Alexis Gilbert](#), [Hiroyuki Kurokawa](#), [Tomohiro Usui](#) & [Shohei Aoki](#)

[Nature Geoscience](#) (2024) | [Cite this article](#)

<https://www.nature.com/articles/s41561-024-01443-z>

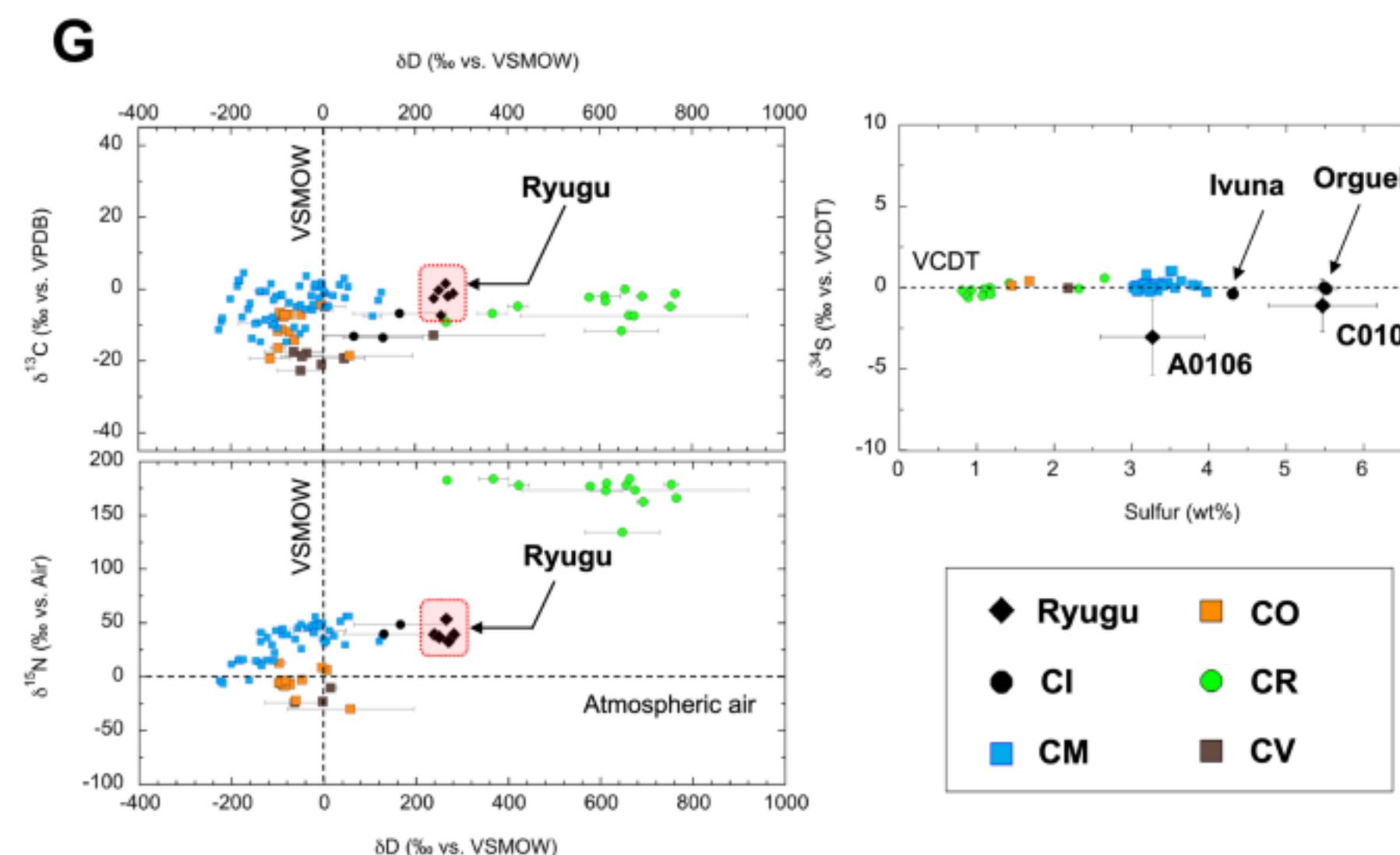
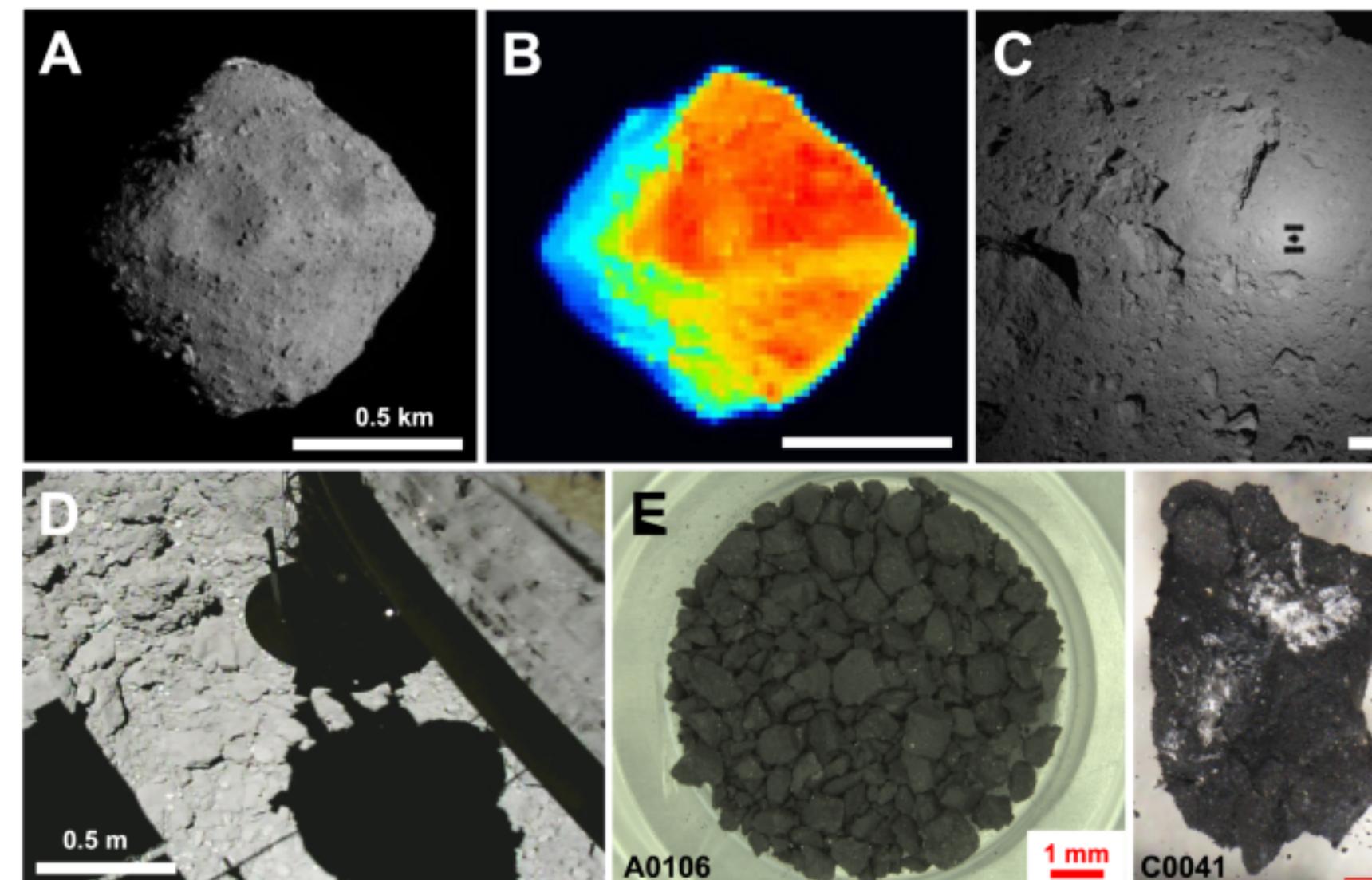


**Fig. 3 | Modelled global averaged carbon isotopic compositions of atmospheric CO<sub>2</sub> and CO on early Mars.** **a**,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  values of CO<sub>2</sub> (blue) and CO (red) as a function of the remaining CO<sub>2</sub> after photolysis ( $f = (\text{CO}_2) / (\text{CO}_2 + \text{CO})$ ), assuming the experimental fractionation factor ( $\alpha_1 = 0.871$ ). Dotted lines show the cases for volcanic gas containing 10%, 20% and 30% CO, which has the same  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  value as volcanic CO<sub>2</sub> ( $-25 \pm 5\text{\textperthousand}$  (ref. 22)). **b**, The model assuming

fractionation factor ( $\alpha_1 = 0.8106$ ) calculated for model Mars atmosphere (Methods). **c**, Reported carbon isotope ratios used for constraining the model (Methods). The possible ranges of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$  values for early atmospheric CO<sub>2</sub> and organic matter in Cumberland (CB) drill core are also shown as grey bands in **a** and **b**.

<https://digital.asahi.com/articles/ASS5G2S9VS5GULBH006M.html>

# Primordial aqueous alteration recorded in water-soluble organic molecules from the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu



探査機「はやぶさ2」が小惑星リュウグウから持ち帰った砂に、アミノ酸などの材料となる分子が含まれていたと、海洋研究開発機構（JAMSTEC）などのグループが10日発表した。

研究チームは、試料の含有成分を熱水で抽出して分析した。試料からはこれまでアミノ酸や核酸塩基が見つかっているが、今回さらに、アミノ酸の材料になる「ピルビン酸」▽核酸塩基の材料になる「リンゴ酸」▽細胞壁のもとになる「メバロン酸」▽エネルギー代謝に必須の「クエン酸」——など65種類の有機酸と、19種類の窒素分子が見つかったという。

リュウグウは、昼は最高100度、夜は氷点下50度にもなり、水は凍結と融解を繰り返す。それに伴い、水に浸された岩石が壊され、細かなすき間ができる。その過程で、水と鉱物と有機物が相互に働き合い、多種多様な有機酸が作り出されたと考えられるという。

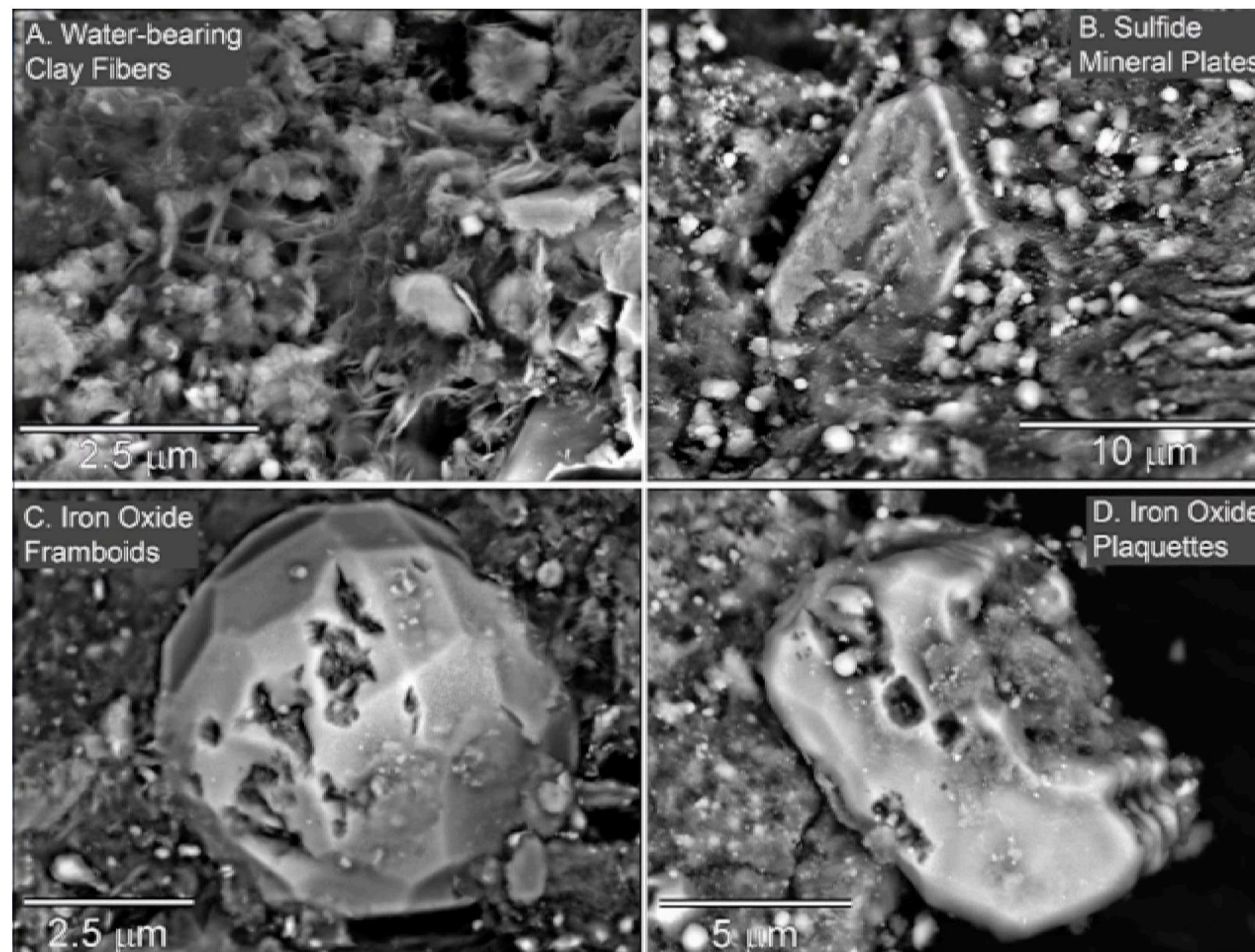
チームによると、リュウグウはかつて水に満たされていた。だが、今回見つかった有機酸の一つで、水に接すると構造を変えてしまう「マロン酸」の残存量が少なかった。これはリュウグウが、水と鉱物などの化学反応が比較的進んだ天体であることを示しているという。

Article | [Open access](#) | Published: 10 July 2024

## Primordial aqueous alteration recorded in water-soluble organic molecules from the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu

Yoshinori Takano Hiroshi Naraoka, Jason P. Dworkin, Toshiki Koga, Kazunori Sasaki, Hajime Sato, Yasuhiro Oba, Nanako O. Ogawa, Toshihiro Yoshimura, Kenji Hamase, Naohiko Ohkouchi, Eric T. Parker, José C. Aponte, Daniel P. Glavin, Yoshihiro Furukawa, Junken Aoki, Kuniyuki Kano, Shin-ichiro M. Nomura, François-Regis Orthous-Daunay, Philippe Schmitt-Kopplin, Hayabusa2-initial-analysis SOM team, Hisayoshi Yurimoto, Tomoki Nakamura, Takaaki Noguchi, ... Shogo Tachibana + Show authors

NASA's Bennu Asteroid Sample Contains Carbon, Water



ベンヌ試料の電子顕微鏡写真。（左上）粘土鉱物の纖維状結晶。（右上）硫化物の板状結晶。（左下・右下）磁鉄鉱の結晶。

9月24日に地球に帰還したNASAの小惑星探査機「オサイリス・レックス(OSIRIS-REx; Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer)」のカプセルが開封され、小惑星ベンヌ Bennu の試料分析が始まった。早くも炭素や水を含む鉱物が見つかっている。

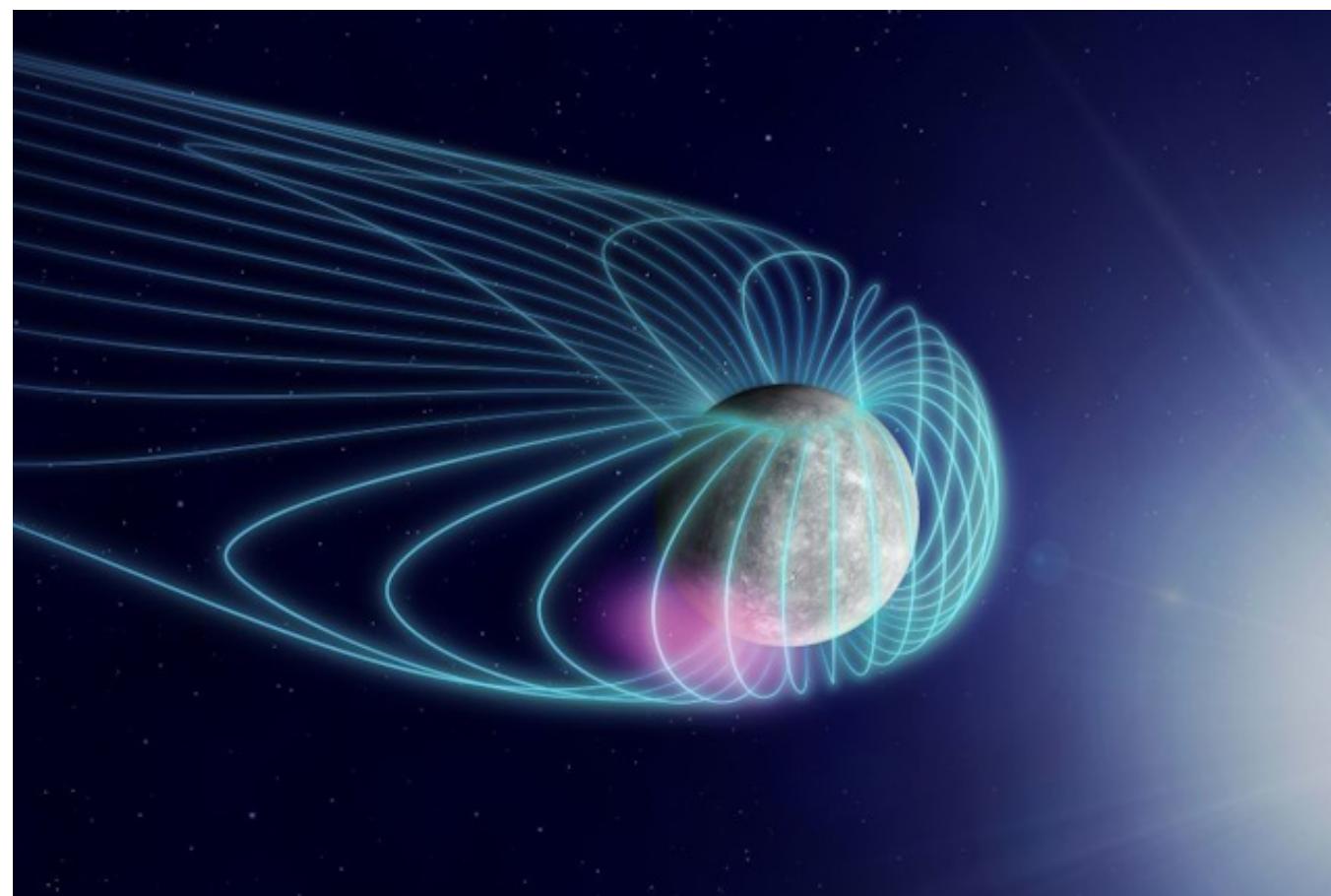
オサイリス・レックスが持ち帰ったベンヌの物質は約250gと推定されている。これは「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウの試料(5.4g)の40倍以上に当たる。電子顕微鏡で撮影したり、赤外線分光観測、X線回折分析、元素分析などの簡易的な分析が進められている。電子顕微鏡での観察では、ベンヌ粒子から含水粘土鉱物、硫化物、磁鉄鉱、炭酸塩などの鉱物が見つかった。これらは液体の水が存在する環境で作られる鉱物で、リュウグウの試料からも見つかっている。また、ベンヌ試料に含まれる炭素の量が約4.7%に達することが明らかにされた。



[https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13236\\_frb](https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13236_frb)

<https://www.nasa.gov/news-release/nasas-bennu-asteroid-sample-contains-carbon-water/>

## Implications of asymmetric loss cone distribution on whistler-driven electron precipitation at Mercury



水星でのコーラス波動発生のイメージ図（提供：金沢大学、水星画像：NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington）



ホイッスラー波動により高エネルギー電子が水星表面へ降下するイメージ図

金沢大学の研究グループはシミュレーションを用いて、水星の特異な磁力線構造により、水星周囲の電磁波が増強されて高エネルギー電子を効率よく水星表面へ降下させることを示した。降下した電子と鉱物との化学作用により水星表面で水が形成される可能性を示唆する結果だ。

水星は太陽からの平均距離が約6000万km（太陽～地球の約4割）しかなく、昼の表面温度は約430度に達する。一方で、南北の極域のクレーター内部には、太陽光が差し込まない永久影となる摂氏マイナス170度以下の領域があり、氷の存在も報告されている。

氷のもととなつた水の供給源としては彗星などの天体衝突による「外因性供給」が有力候補として考えられているが、外部からの供給以外の可能性として、表面で何らかの水形成メカニズムが働いているかもしれない。たとえば、大気も磁場も持たない月では、地球からの高エネルギー電子が月の水形成に影響を与えるとする研究結果が報告されている。また、太陽風が月面に直接衝突する際に、太陽風の陽子と月面岩石中の酸素イオンが化学作用し、水が生じるという説もある。これに対して、水星は固有の磁場を持ち、その磁気圏により太陽風が水星表面に直接衝突することを防いでいる。そのため、水星表面での水形成においては、太陽風の直接衝突以外のメカニズムが必要となる。

日欧の水星探査ミッション「ベビ・コロンボ」では、2021年と2022年の水星フライバイ時に水星磁気圏の電磁波を観測し、ホイッスラー波動の一種であるコーラス波動が水星磁気圏内に存在することを確認した。ホイッスラー波動は高エネルギー電子を効率よく散乱し、地球では特殊なオーロラを発光させる原因にもなっている。

シミュレーションでは、南北非対称な構造となっていると考えられている水星の特異な磁力線構造により、ホイッスラー波動の成長が促されて、対称な磁力線構造を仮定した場合に比べて3.8倍多くの高エネルギー電子を南北極域表面へ降下させることができた。さらに、降下する電子の数が、数十ミリ秒オーダーでホイッスラー波動の強度変化とよく似た変動を示し、ホイッスラー波動による非線形なプラズマ散乱メカニズムが効率のよい電子降下を担っていることが示された。

## Geophysical Research Letters®

Research Letter | Open Access | CC BY

## Implications of Asymmetric Loss Cone Distribution on Whistler-Driven Electron Precipitation at Mercury

Mitsunori Ozaki, Takeru Kondo, Yuto Yamada, Satoshi Yagitani, Mitsuru Hikishima, Yoshiharu Omura

First published: 31 October 2024 | <https://doi.org/10.1029/2024GL111744>

[https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13832\\_mercury](https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13832_mercury)

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2024GL111744>

# ドレークの式

1960年にアメリカの天文学者ドレークが発表した  
「地球外文明の数を推定する式」

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_\ell \times f_i \times f_c \times L$$



Frank D Drake  
1930-2022

		楽観論	中間論	悲観論
$R_*$	銀河系で毎年生成される星の数（個/年）	50	20	1
$f_p$	生成される星のうち惑星系を持つ星の割合	1.0	0.5	極めて小
$n_e$	星の周りで生命にとって適当な環境を持つ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
$f_\ell$	そうした惑星上で生命が発生する確率	1.0	0.5	極めて小
$f_i$	生命が知的文明段階にまで進化する確率	1.0	0.1	極めて小
$f_c$	知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合	1.0	0.5	極めて小
$L$	そのような技術文明の平均寿命	$10^8$	$10^4$	100

## 地球外に生命体が存在するかどうか

ハビタブルゾーン(habitable zone, 生命居住可能ゾーン)

宇宙の中で生命が誕生するのに適した環境となる領域

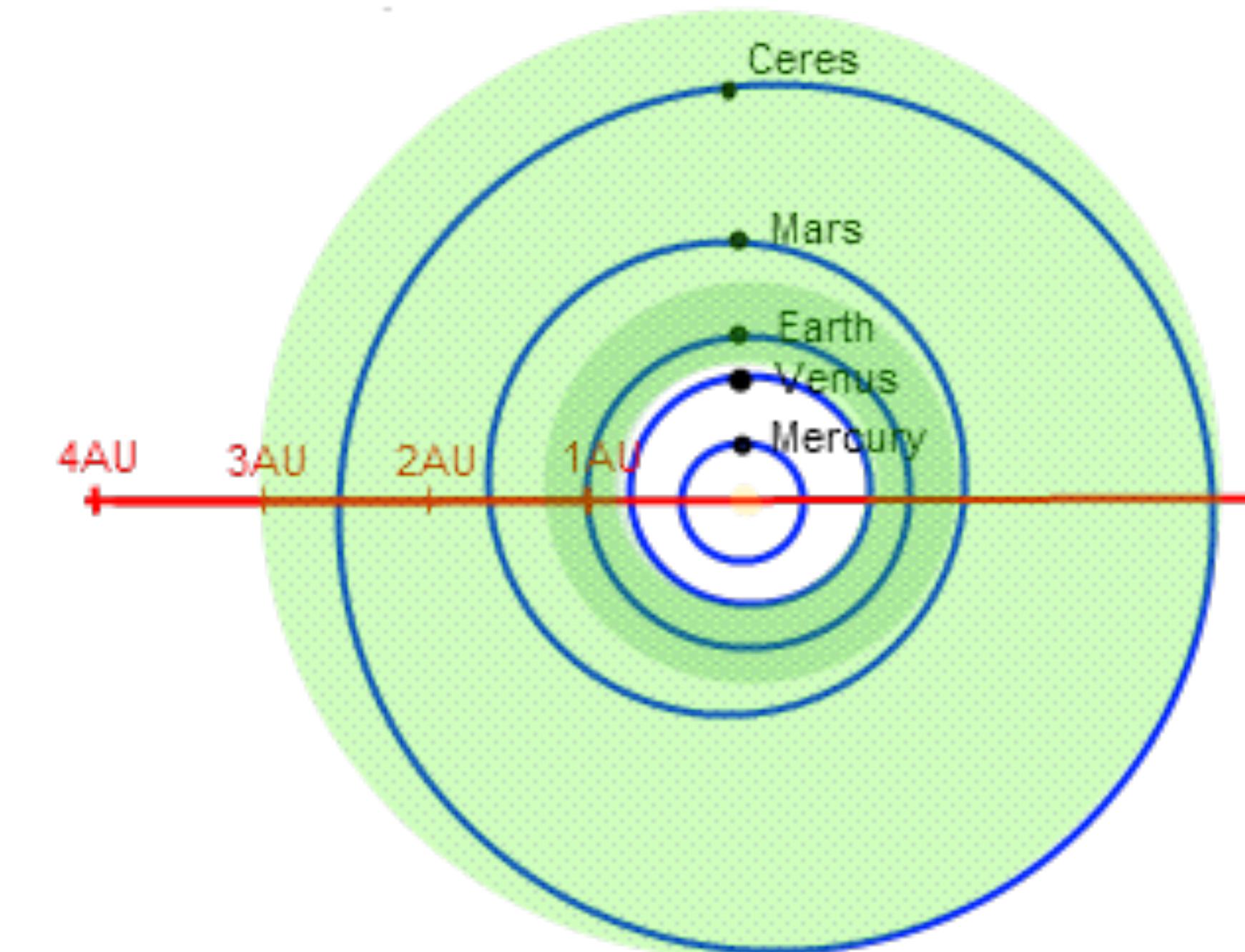
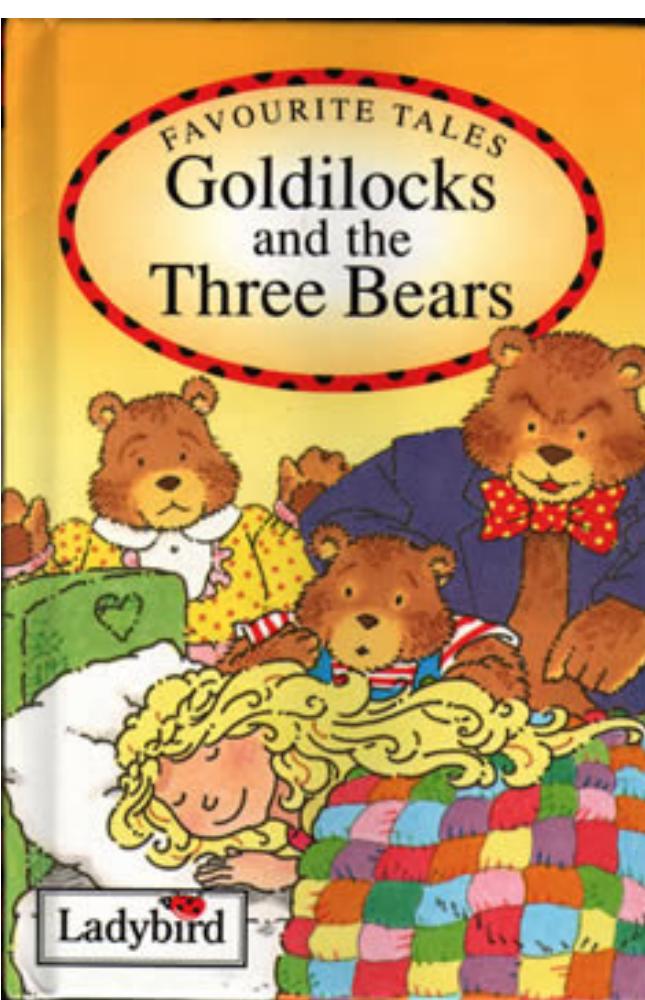
条件1:水が液体として存在できる位置に惑星があること

= ゴルディロックスゾーン(Goldilocks zone)

$$180 \text{ K} < \text{Equilibrium (T)} < 310 \text{ K}$$

条件2:岩石惑星であること

(ガス惑星ではないこと)



# 系外惑星の探査法

## ★直接観測

惑星からの光を直接観測 (2008年から)

## ★位置天文学法(Astrometry法)

巨大な惑星によって恒星がふらつく様子を位置天文学的手法で精密観測(2009年から)

## ★視線速度法 (Doppler法)

惑星によって恒星が視線方向にふらついた時に起こるドップラー効果による  
スペクトル変化を調べる(2009年までは最多, 1995年に初めて発見された系外惑星も)

## ★食検出法(transit法)

惑星が恒星の前を横切る時の明るさの変化によって惑星を探す方法.  
(2011年よりKepler衛星で大量発見, 現在に続く)

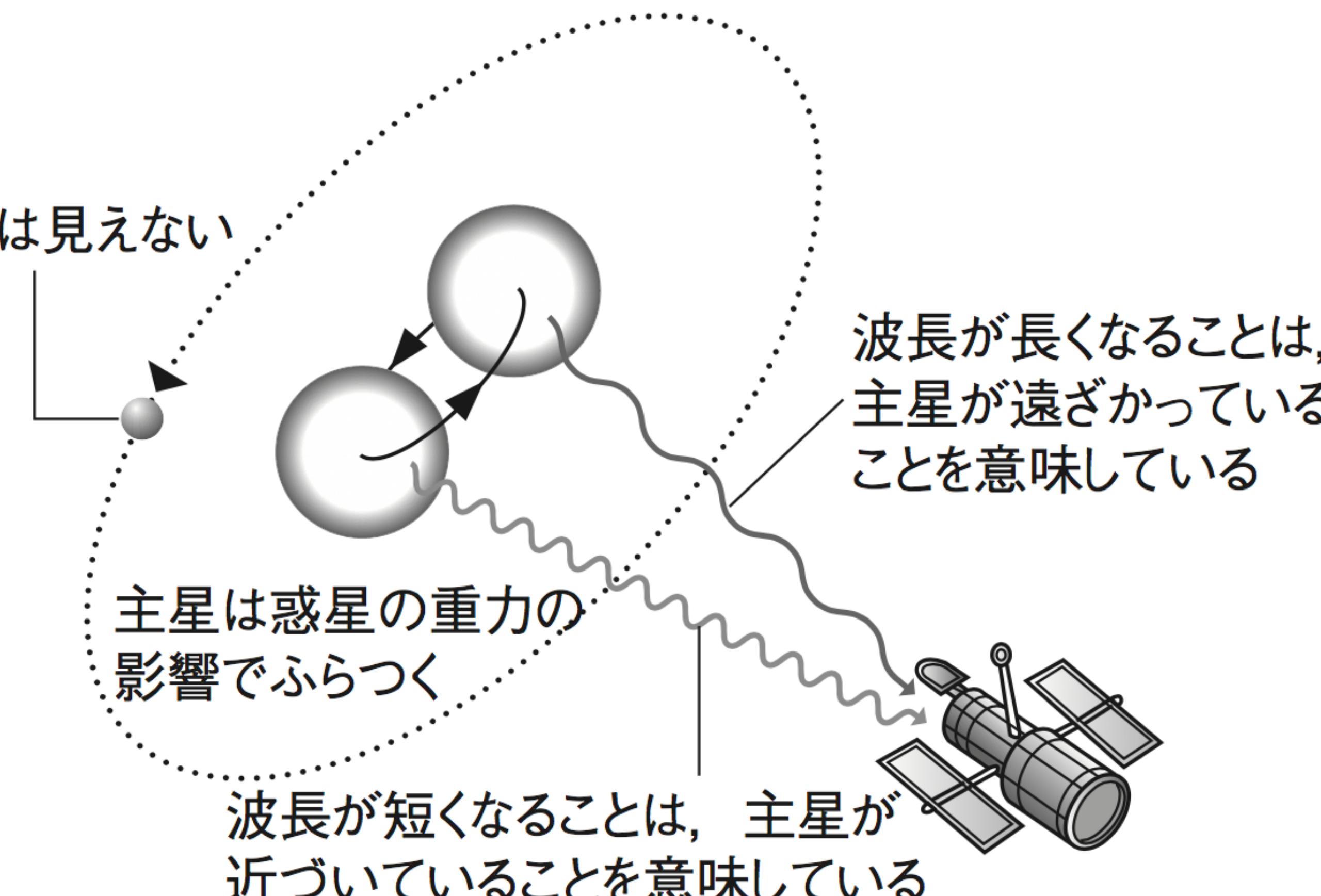
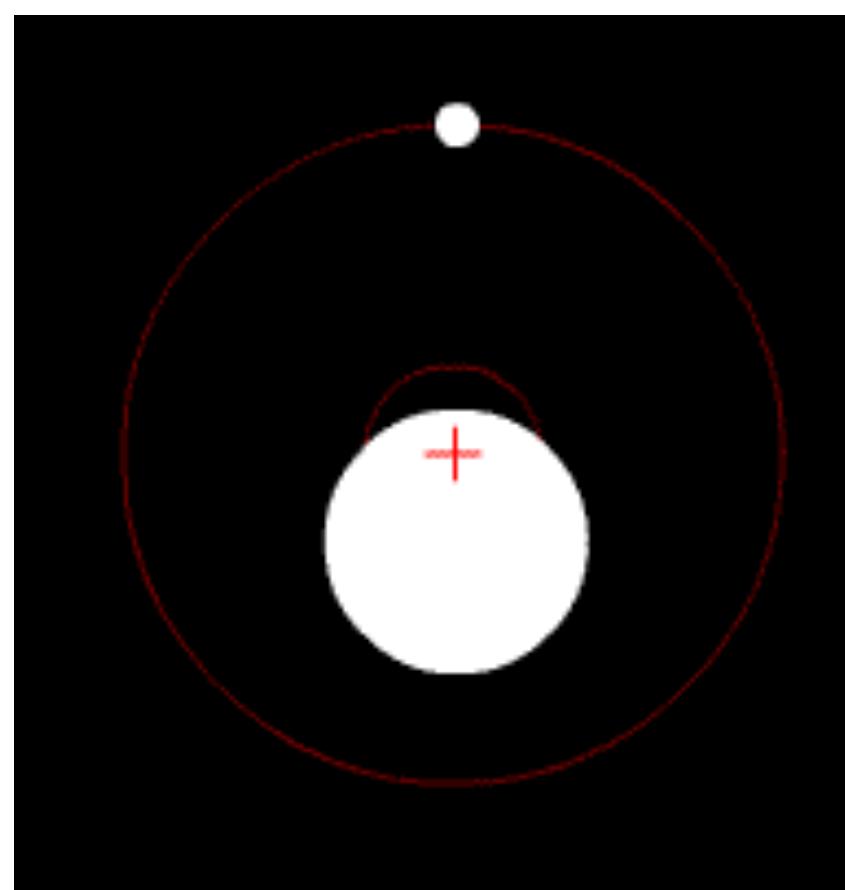
## ★重力レンズ法 (micro lensing法)

惑星による背後の天体からの光の集光現象を利用する方法. (2005年から発見)

## ★パルサー・タイミング法 ◀◀◀ 系外惑星探査とは違うが, 精度よい方法

周期的に電磁波を放出するパルサーに惑星が存在する場合, パルスの周期的なズレが  
発生 (初めて発見された惑星, 1992年; おとめ座PSR B1257+12)

# ドップラー法による系外惑星探査



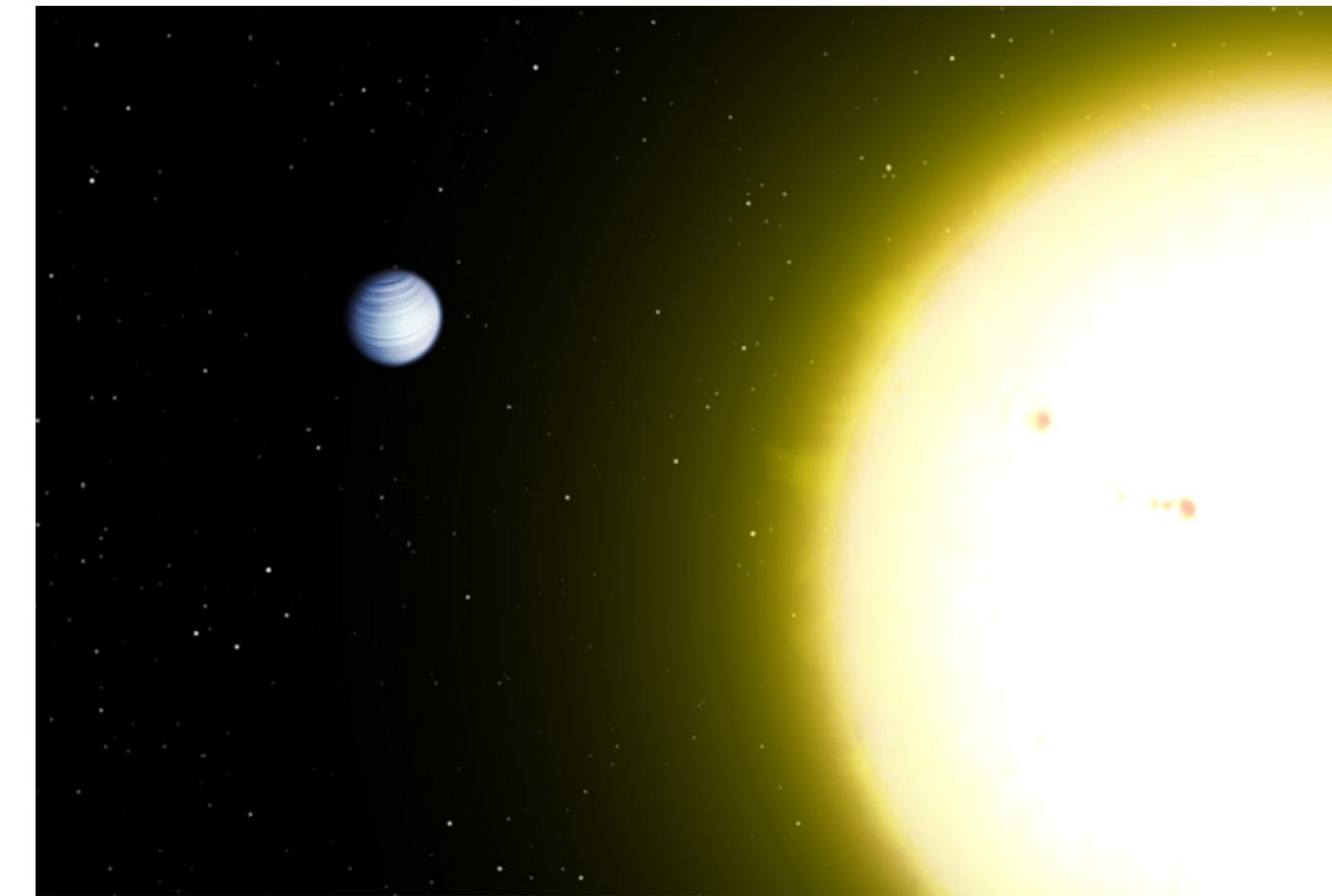
# 初めて発見された系外惑星は、ホットジュピター

1995年10月6日  
ジュネーブ天文台の  
マイヨール(Michel Mayor)と  
ケロー (Didier Queloz)

ペガス座51番星 (51 Pegasi)  
= 地球から50光年先  
木星クラスの質量を持った惑星の存在を確認  
ドップラー法

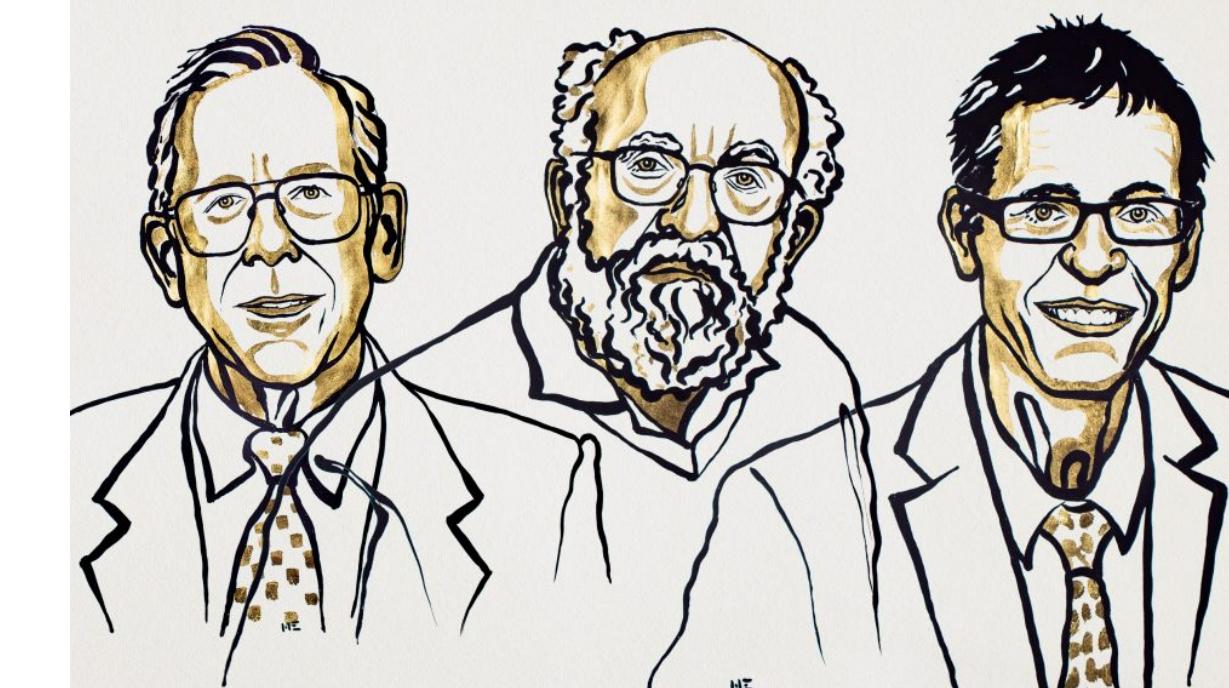
主星から0.05天文単位  
(太陽-水星の距離の1/6)  
**4.2日で公転**  
質量は木星の半分  
表面は1000°C

「ホット・ジュピター」(熱い木星)



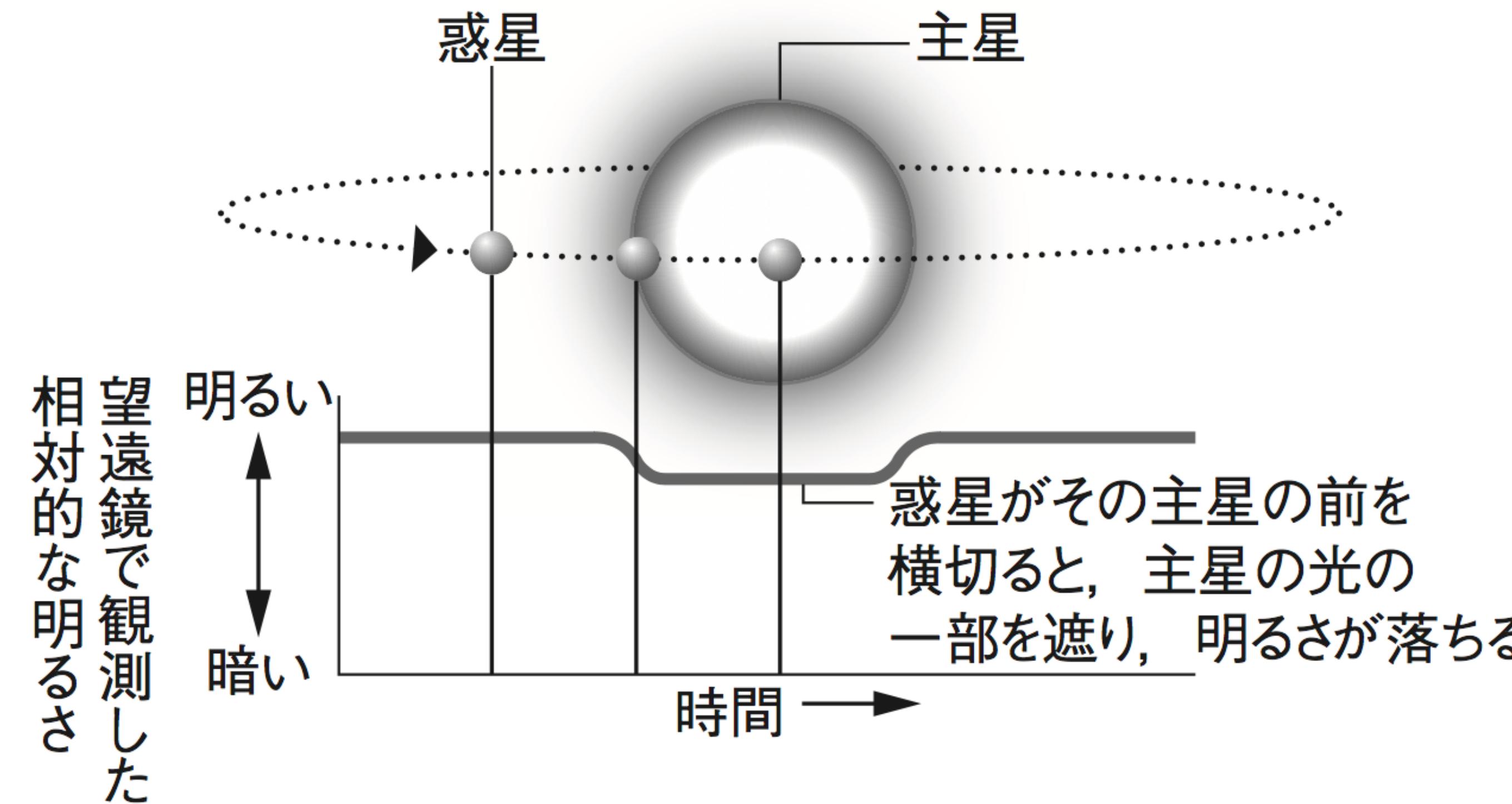
太陽系外惑星としては初めて発見された  
ペガス座51番星b (想像図)

2019年のノーベル物理学賞

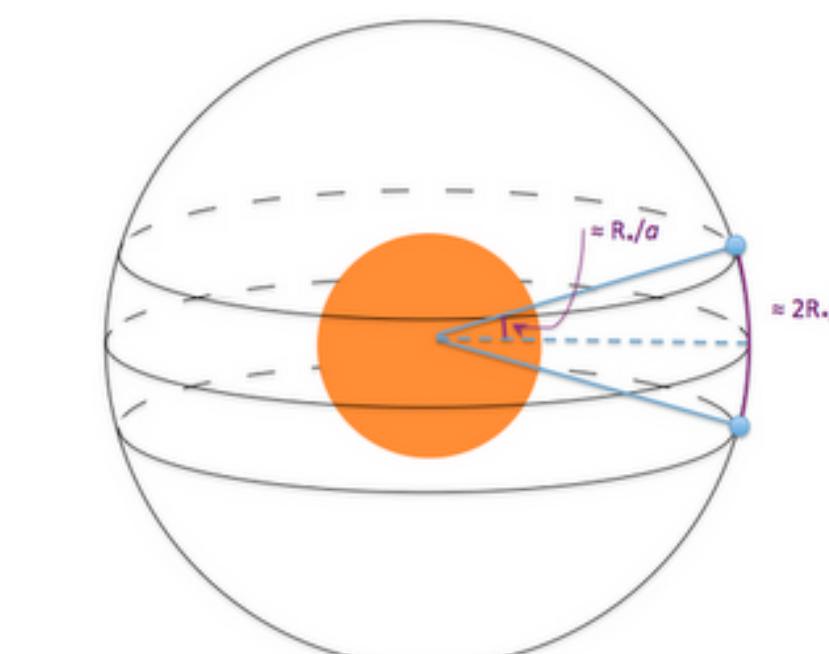


James Peebles, Michel Mayor, Didier Queloz

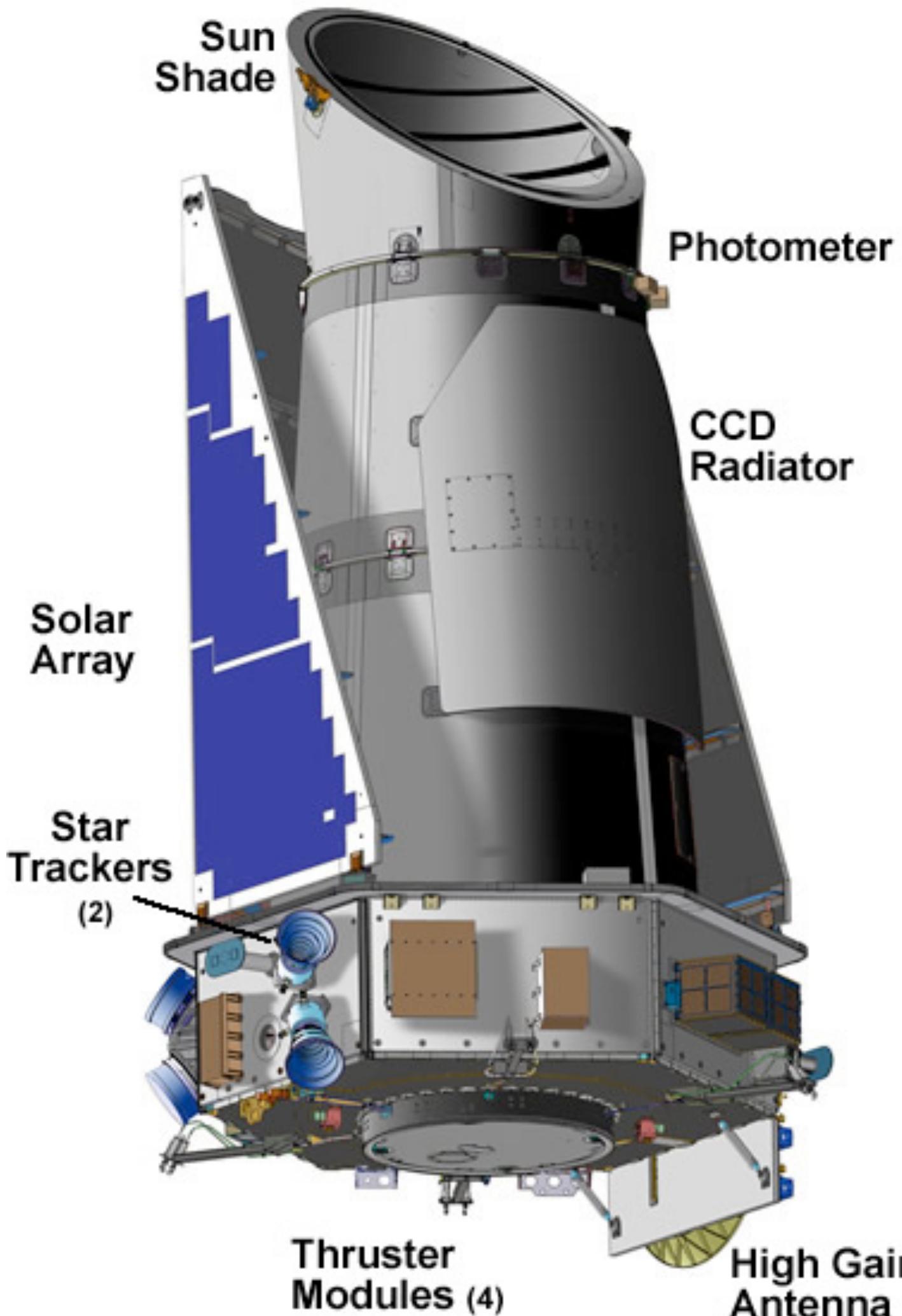
# トランジット法による系外惑星探査



	公転周期 P(yr)	公転長半径 a (AU)	トランジット時間 (hr)	トランジット深度 (%)	幾何学的確率(%)	発生見込み角度 (deg)
	orbital period	semi-major axis	transit duration	transit depth	geometric probability	inclination invariant
<b>Mercury</b>	0.241	0.39	8.1	0.0012	1.19	6.33
<b>Venus</b>	0.615	0.72	11.0	0.0076	0.65	2.16
<b>Earth</b>	1.00	1.00	13.0	0.0084	0.47	1.65
<b>Mars</b>	1.88	1.52	16.0	0.0024	0.31	1.71
<b>Jupiter</b>	11.86	5.20	29.6	1.01	0.089	0.39
<b>Saturn</b>	29.5	9.5	40.1	0.75	0.049	0.87
<b>Uranus</b>	84.0	19.2	57.0	0.135	0.024	1.09
<b>Neptune</b>	164.8	30.1	71.3	0.127	0.015	0.72



# ケプラー衛星(2009-13/2014-18)による系外惑星探査



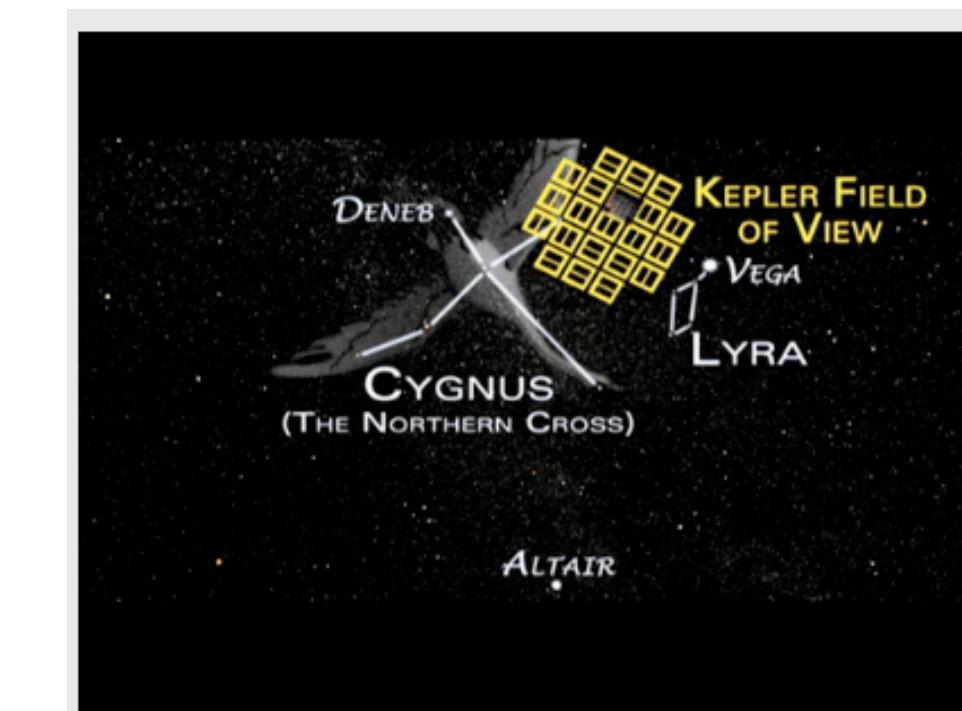
NASA

地球型の太陽系外惑星探査

2009年3月9日打ち上げ

太陽周回軌道、主鏡口径1.4m

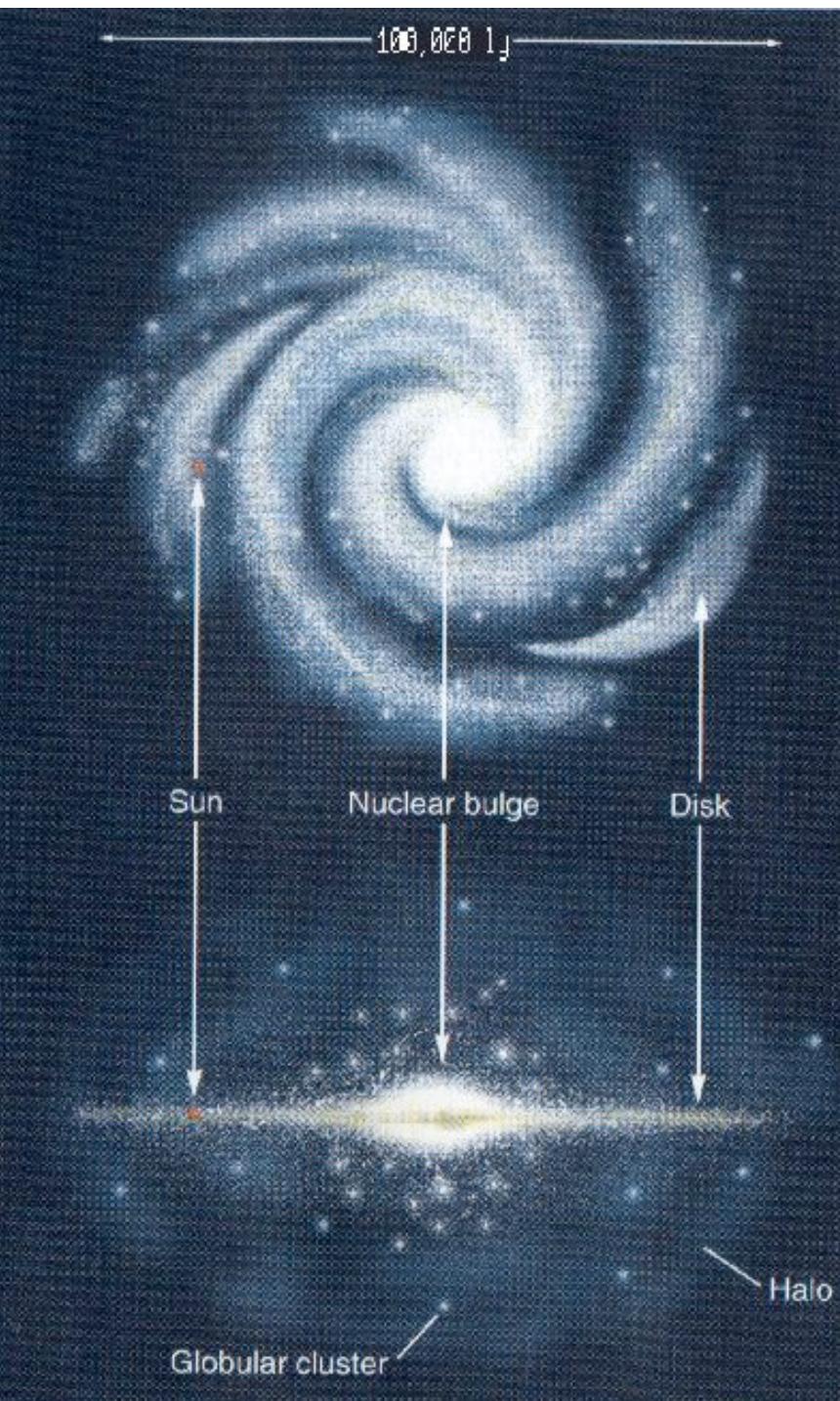
はくちょう座の方向、  
常時15万個の恒星観測



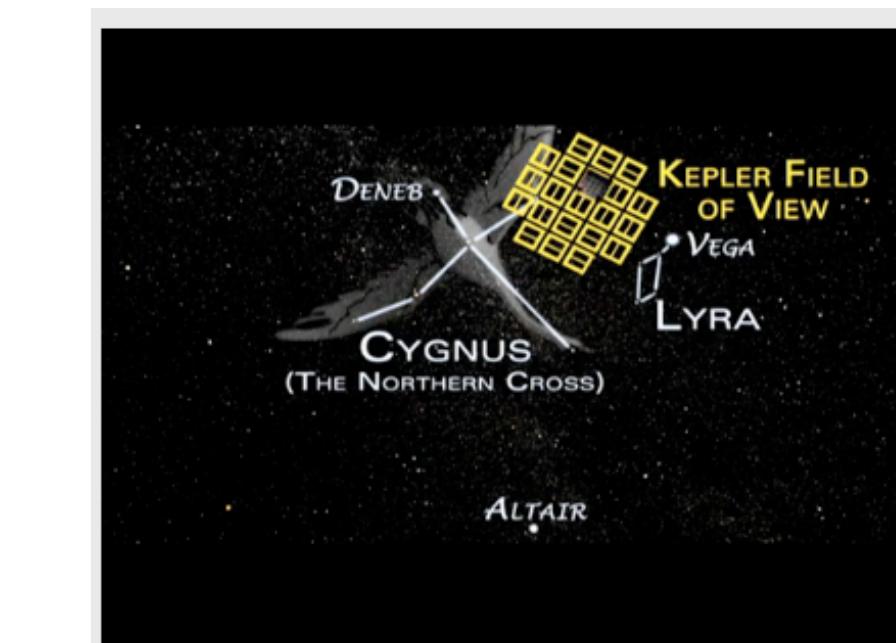
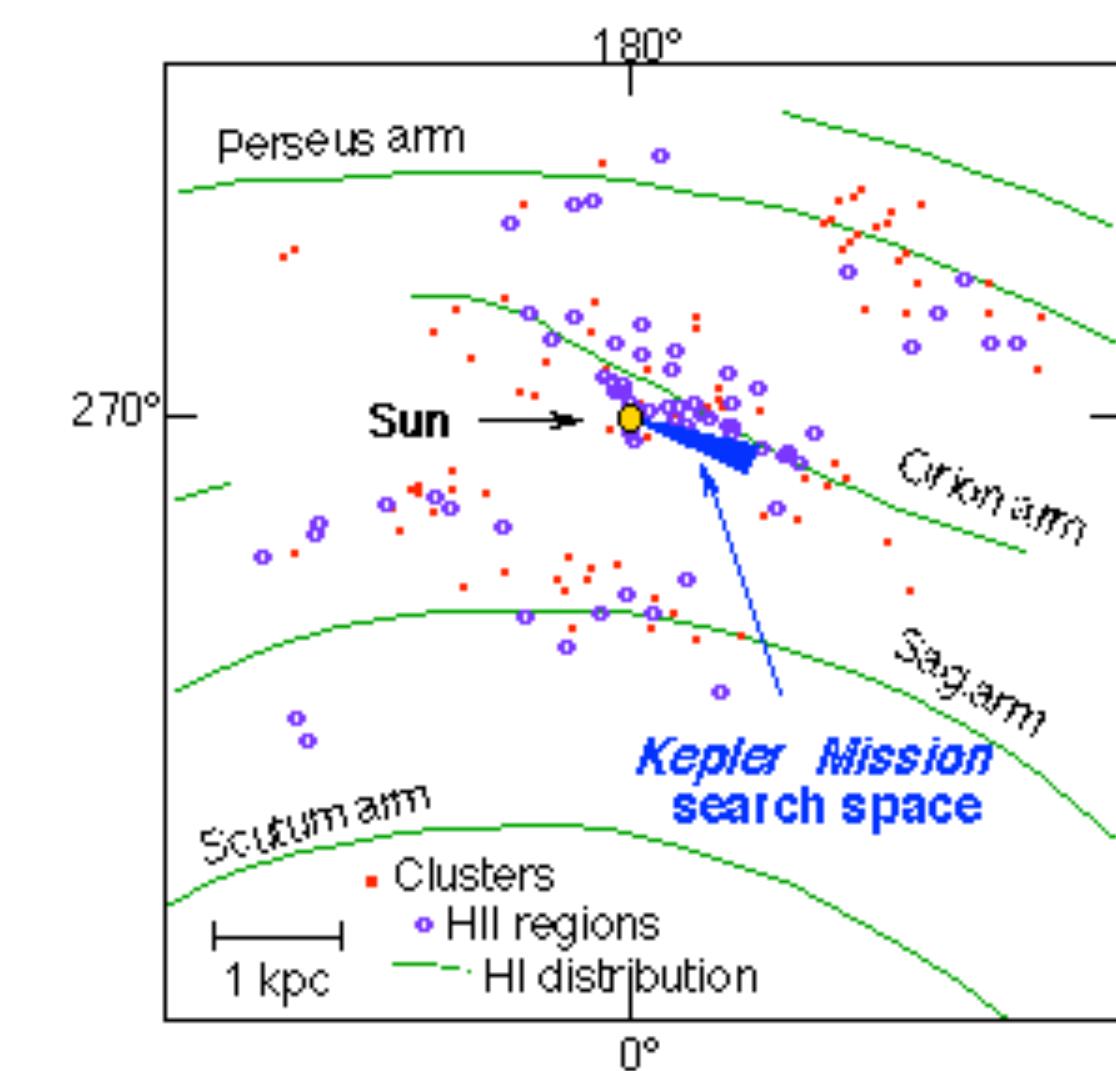
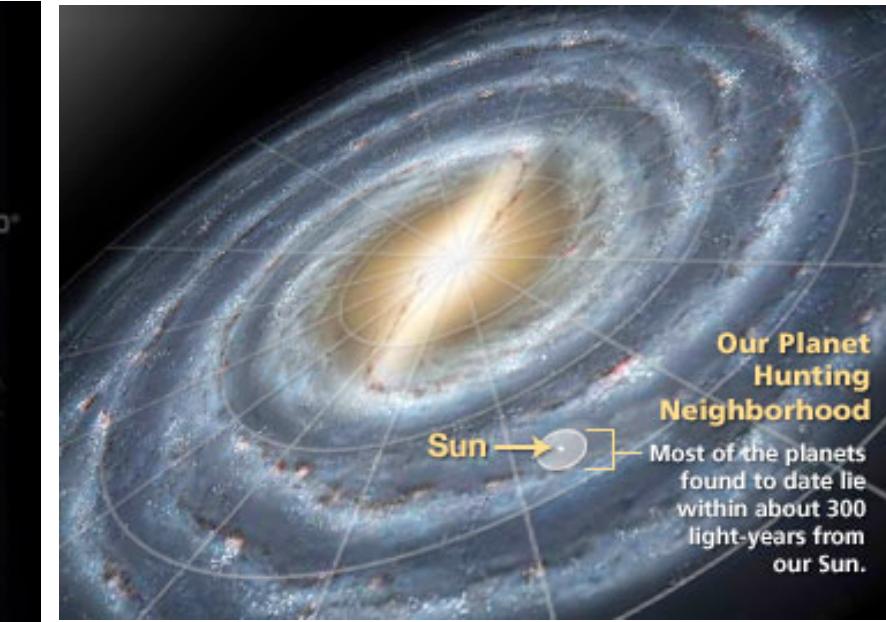
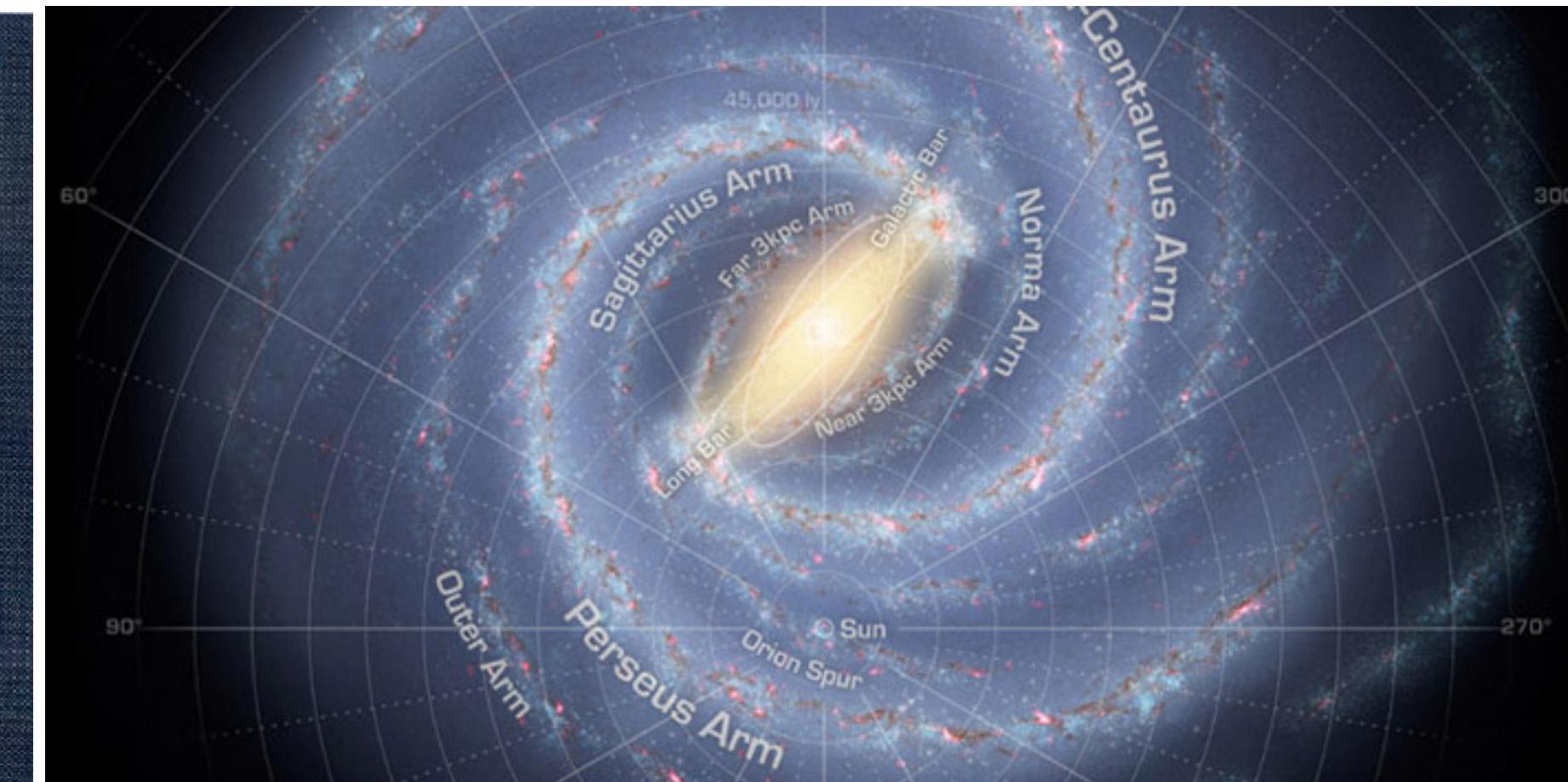
トランジット法

主星を隠す時に生じる周期的な明るさの  
変動を検出すること

# ケプラー衛星(2009-13/2014-18)による系外惑星探査



$$\begin{aligned}1 \text{ kpc} &= 326 \text{ 光年} \\&= 2 \times 10^8 \text{ AU}\end{aligned}$$



The figure shows what we believe to be the local structure of our Galaxy, the Milky Way. The stars sampled are similar to the immediate solar neighborhood. Young stellar clusters, ionized hydrogen (HII) regions and the neutral hydrogen (HI) distribution define the arms of the Galaxy.

# ケプラー衛星(2009-2013)による系外惑星探査

**KEPLER DISCOVERS FIVE EXOPLANETS**

[+ Play Audio](#) | [+ Download Audio](#) | [+ Join mailing list](#)

January 4, 2010: NASA's Kepler space telescope, designed to find Earth-size planets in the habitable zone of sun-like stars, has discovered its first five new exoplanets.

Named Kepler 4b, 5b, 6b, 7b and 8b, the planets were announced Monday, Jan. 4, by the members of the Kepler science team during a [news briefing](#) → at the American Astronomical Society meeting in Washington.

**Right:** An artist's concept of the Kepler space telescope on a mission to discover habitable planets outside our own Solar System. [\[more →\]](#)

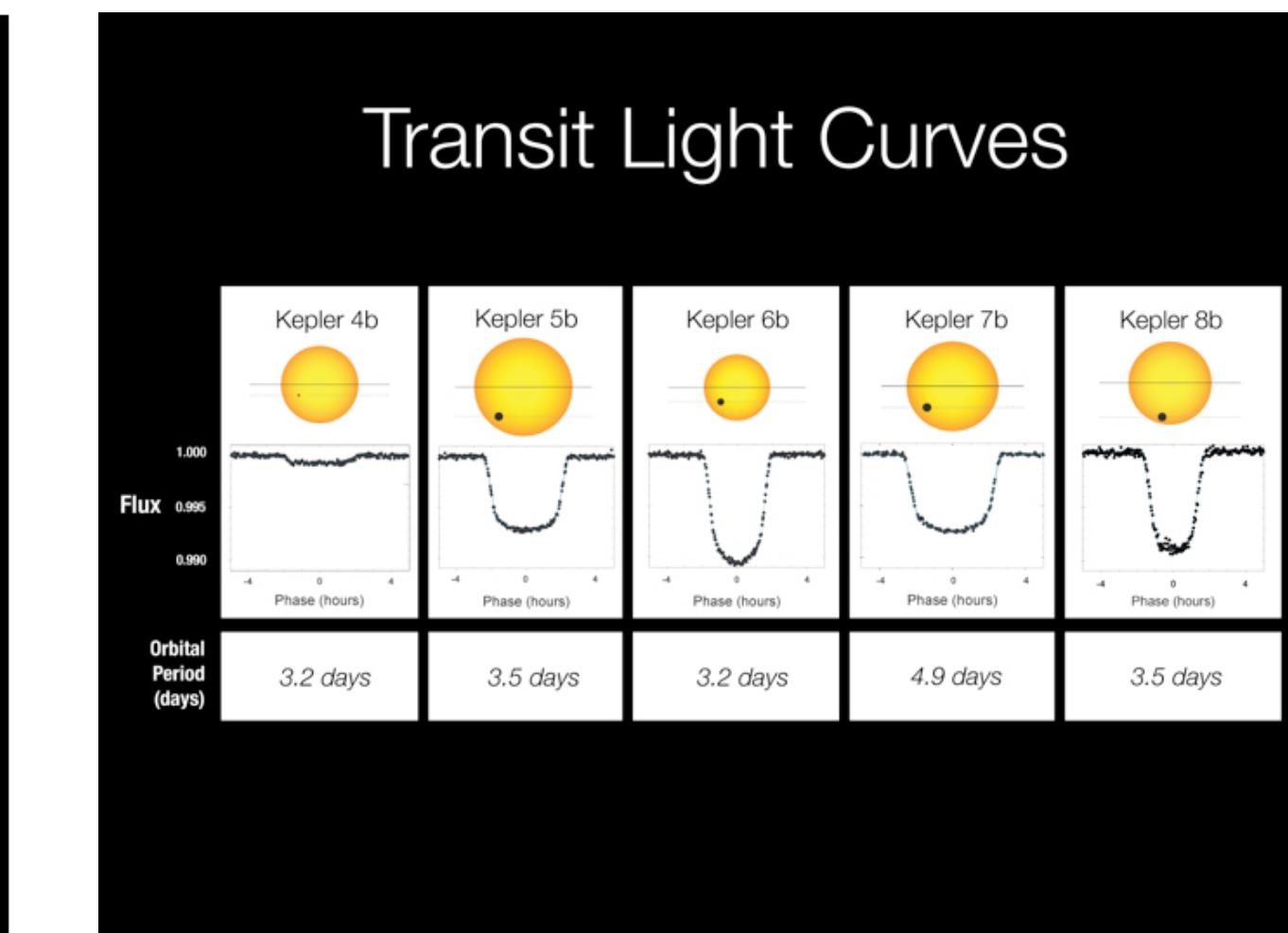
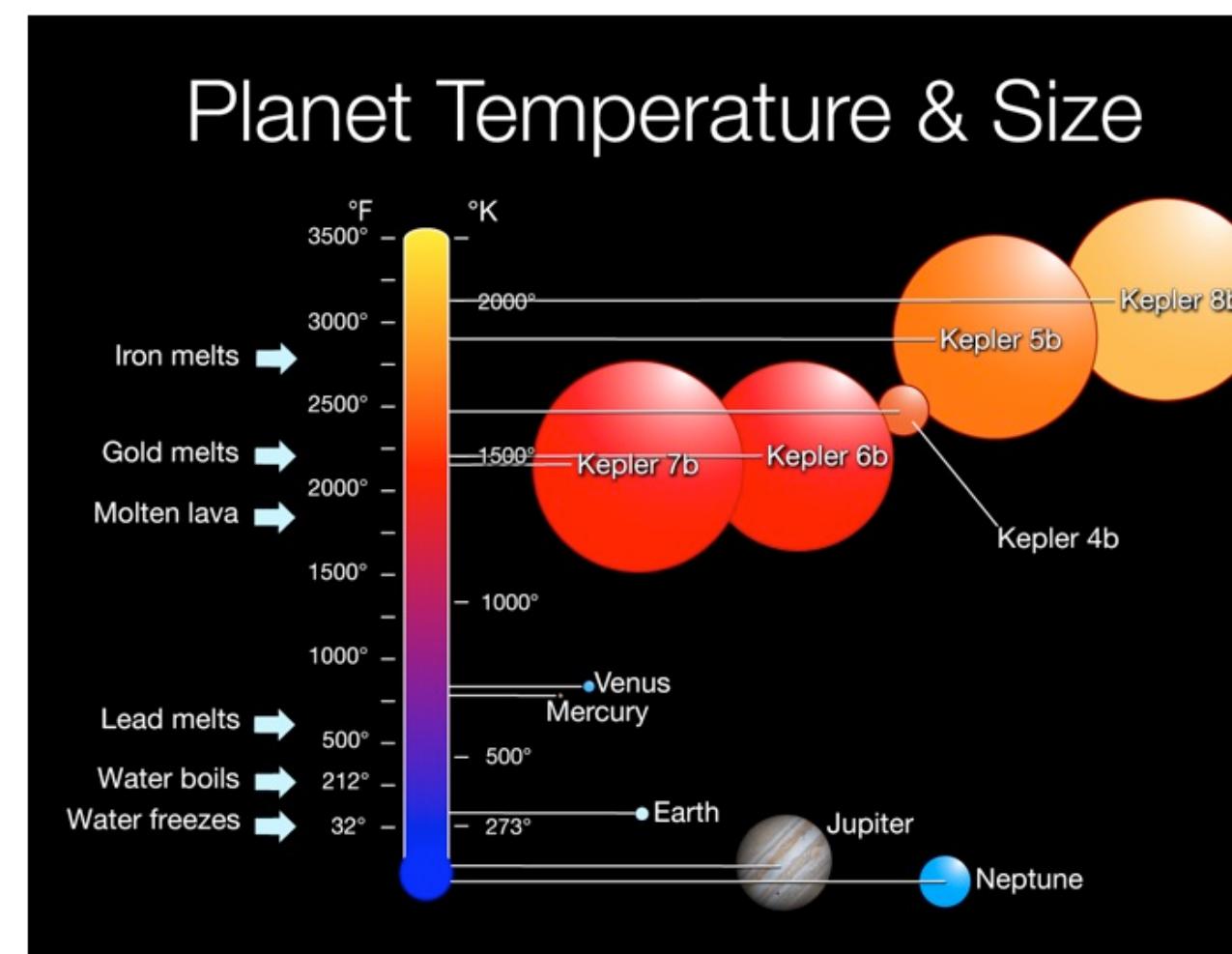
"The discoveries show that our science instrument is working well," says William Borucki of NASA's Ames Research Center in Moffett Field, Calif. Borucki is the mission's science principal investigator. "Indications are that Kepler will meet all its science goals."

The five planets are quite a bit larger than Earth. Known as "hot Jupiters" because of their high masses and extreme temperatures, the new exoplanets range in size from similar to Neptune to larger than Jupiter. They have orbits ranging from 3.3 to 4.9 days. Estimated temperatures of the planets range from 2,200 to 3,000 degrees Fahrenheit, hotter than molten lava and much too hot for life as we know it.

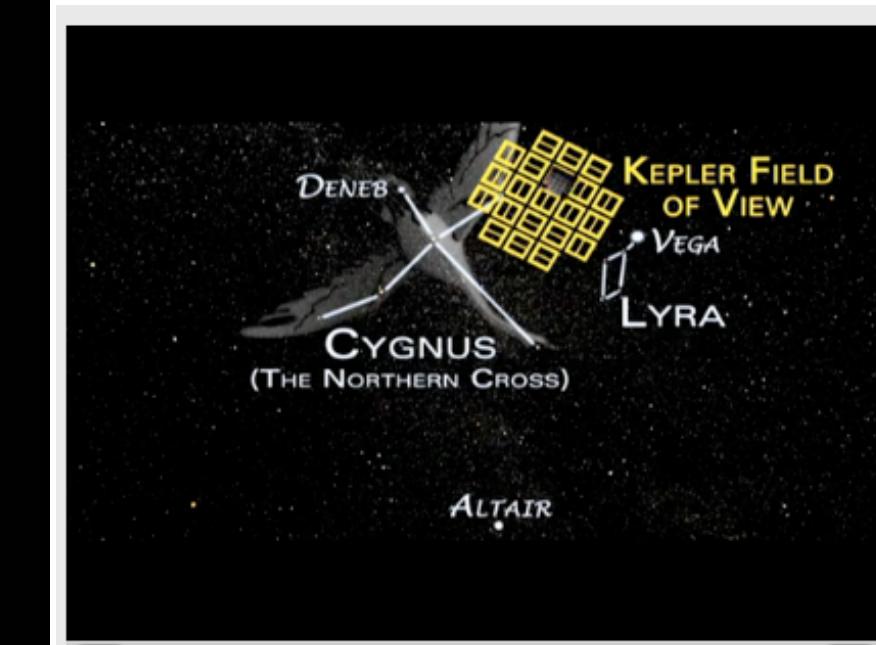
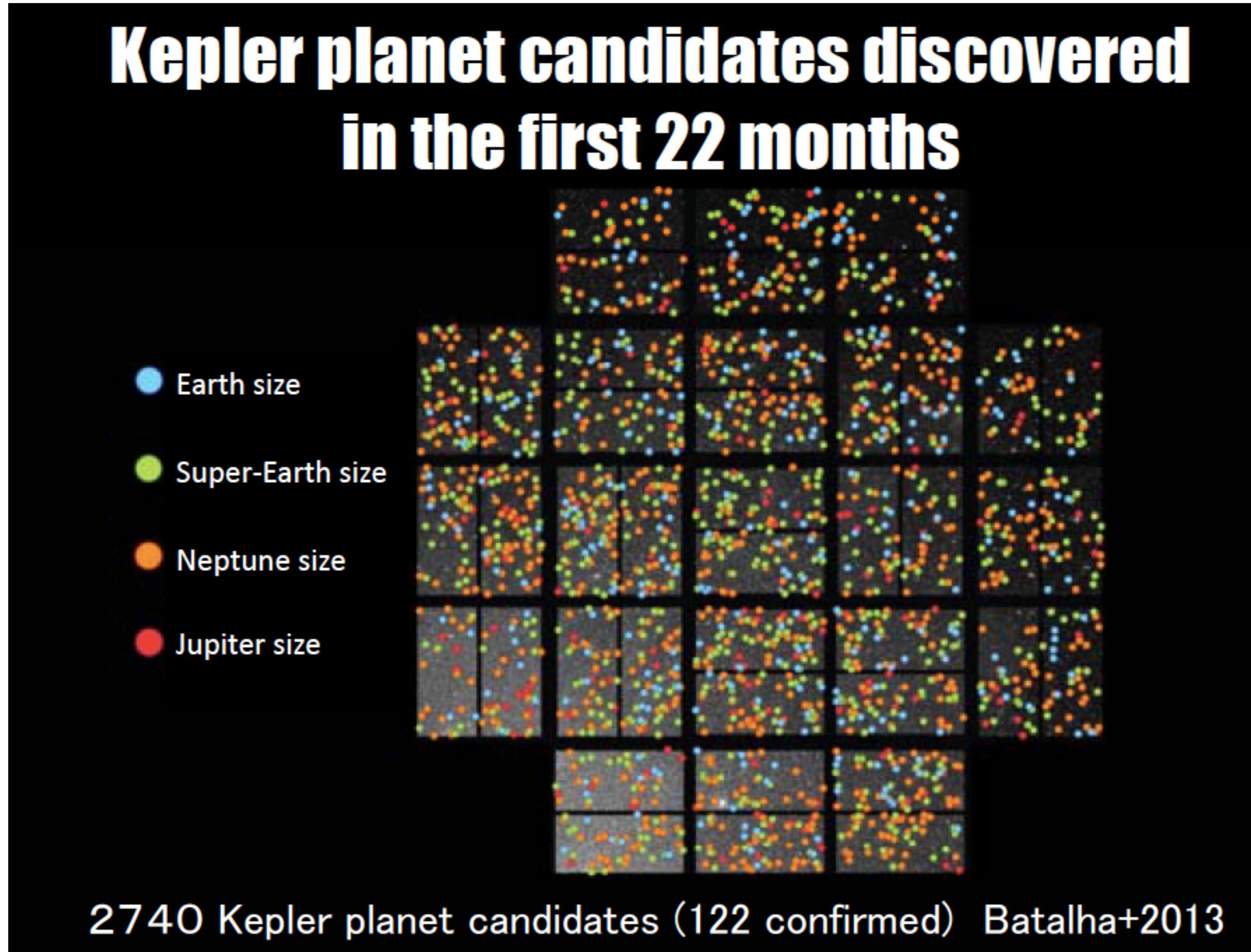


初プレスリリース

2010年1月4日



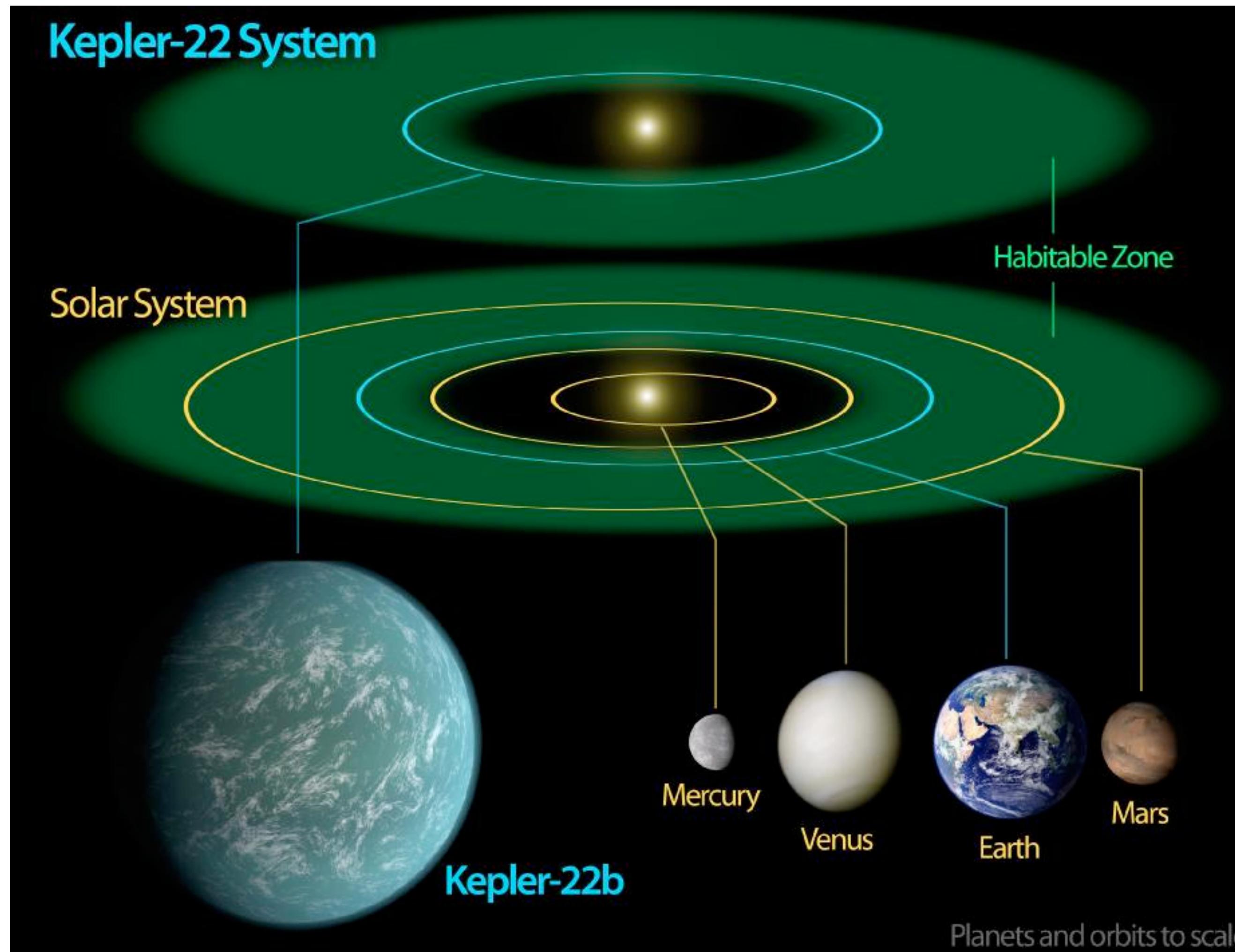
# ケプラー衛星(2009-13/2014-18)による系外惑星探査



The figure shows what we believe to be the local structure of our Galaxy, the Milky Way. The stars sampled are similar to the immediate solar neighborhood. Young stellar clusters, ionized hydrogen (HII) regions and the neutral hydrogen (HI) distribution define the arms of the Galaxy.

# ケプラー衛星、ハビタブルゾーンの系外惑星を発見

Kepler-22b :Comfortably Circling within the Habitable Zone



This diagram compares our own solar system to Kepler-22, a star system containing the first "habitable zone" planet discovered by NASA's Kepler mission. The habitable zone is the sweet spot around a star where temperatures are right for water to exist in its liquid form. Liquid water is essential for life on Earth.

Kepler-22's star is a bit smaller than our sun, so its habitable zone is slightly closer in. The diagram shows an artist's rendering of the planet comfortably orbiting within the habitable zone, similar to where Earth circles the sun. Kepler-22b has a yearly orbit of 289 days. The planet is the smallest known to orbit in the middle of the habitable zone of a sun-like star. It's about 2.4 times the size of Earth.

Image credit: NASA/Ames/JPL-Caltech

# TESS衛星(2018-)による系外惑星探査

NASA Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)

地球型の太陽系外惑星探査

2018年4月18日打ち上げ

Keplar, K2 よりも400倍広い領域で  
30–100倍明るい星を探査する



トランジット法  
主星を隠す時に生じる周期的な明るさの  
変動を検出すること

# 太陽系外惑星の発見数(2019年)

教科書p190

2019年1月23日現在

表 5.4 これまでに発見された太陽系外惑星の数 (2018 年 3 月 10 日現在).  
[<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]

	全観測	Kepler	K2	発見された方法	発見数
				Astrometry	1
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)*	3706 <b>3885</b>	2342 <b>359</b>	307 <b>359</b>	Imaging	44 <b>707</b>
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	612 <b>647</b>			Radial Velocity	669 <b>707</b>
ハビタブルゾーンにある星 (確定 + 候補天体)		290 <b>361</b>		Transit	2900 <b>3023</b>
候補天体 (Kepler/K2 Candidates)		4496 <b>2424</b>	479 <b>473</b>	Transit timing variations	15
				Eclipse timing variations	9
				Microlensing	54 <b>72</b>
				Pulsar timing variations	6
				Pulsation timing variations	2
				Orbital brightness modulations	6

# 太陽系外惑星の発見数(2020年)

教科書p190

2020年1月25日現在

表 5.4 これまでに発見された太陽系外惑星の数 (2018 年 3 月 10 日現在).  
[<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]

	全観測	Kepler	K2	発見された方法	発見数
				Astrometry	1
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)*	3706 <b>4108</b>	2342 <b>2356</b>	307 <b>426</b>	Imaging	44 <b>49</b>
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	612 <b>647</b>			Radial Velocity	669 <b>782</b>
ハビタブルゾーンにある星 (確定 + 候補天体)		290 <b>361</b>		Transit	2900 <b>3137</b>
候補天体 (Kepler/K2 Candidates)		4496 <b>2420</b>	479 <b>891</b>	Transit timing variations	15 <b>21</b>
				Eclipse timing variations	9 <b>16</b>
				Microlensing	54 <b>86</b>
				Pulsar timing variations	6 <b>7</b>
				Pulsation timing variations	2
				Orbital brightness modulations	6

# 太陽系外惑星の発見数(2021年)

教科書p190

2021年1月16日現在

表 5.4 これまでに発見された太陽系外惑星の数 (2018 年 3 月 10 日現在).  
[<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]

	全観測	Kepler	K2	発見された方法	発見数
				Astrometry	1
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)*	3706 <b>4331</b>	2342 <b>2414</b>	307 <b>450</b>	Imaging	44 <b>51</b>
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	612 <b>1841</b>			Radial Velocity	669 <b>826</b>
ハビタブルゾーンにある星 (確定 + 候補天体)		290 <b>361</b>		Transit	2900 <b>3294</b>
候補天体 (Kepler/K2 Candidates)		4496 <b>2366</b>	479 <b>889</b>	Transit timing variations	15 <b>21</b>
				Eclipse timing variations	9 <b>16</b>
				Microlensing	54 <b>106</b>
				Pulsar timing variations	6 <b>7</b>
				Pulsation timing variations	2
				Orbital brightness modulations	6

<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

# 太陽系外惑星の発見数(2022年)

教科書p190

2022年1月16日現在

2021年1月16日現在

表 1: これまでに発見された太陽系外惑星の数. Kepler 衛星 (2009–2013) のミッションは、一旦終了したものの、同衛星を用いて K2 ミッション (2014–2018) が引き続き行われた。その後 TESS( Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018–) に観測が引き継がれている。(2022 年 1 月 16 日現在). [<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]

	全観測	Kepler	K2	TESS	発見された方法	発見数
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)	4903 <b>4331</b>	2707	477 <b>450</b>	176	Astrometry	1
候補天体 (candidates)		2058	1024	5164	Imaging	57
					Radial Velocity	826
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	2040		<b>1841</b>		Transit	3294
ハビタブルゾーンにある星 (確定) =表面温度が 180–310K のもの	469		<b>361</b>		Transit timing variations	21
					Eclipse timing variations	16
					Microlensing	106
					Pulsar timing variations	7
					Pulsation timing variations	2
					Orbital brightness modulations	9
					Disk Kinematics	1

<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

# 太陽系外惑星の発見数(2023年)

教科書p190

2023年1月12日現在

表 1: これまでに発見された太陽系外惑星の数. Kepler 衛星 (2009–2013) のミッションは、一旦終了したものの、同衛星を用いて K2 ミッション (2014–2018) が引き続き行われた。その後 TESS( Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018–) に観測が引き継がれている。(2022 年 1 月 16 日現在). [http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/]

	全観測	Kepler	K2	TESS	発見された方法	発見数
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)	4903 <b>5241</b>	2707 <b>2710</b>	477 <b>543</b>	176 <b>285</b>	Astrometry	1 2
候補天体 (candidates)		2058	1024	5164	Imaging	57 62
	<b>2054</b>	<b>978</b>	<b>6137</b>		Radial Velocity	912 <b>1023</b>
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	2040				Transit	3755 <b>3941</b>
ハビタブルゾーンにある星 (確定) =表面温度が 180–310K のもの	<b>2205</b>				Transit timing variations	22 24
	469				Eclipse timing variations	16 18
	<b>488</b>				Microlensing	121 152
					Pulsar timing variations	7
					Pulsation timing variations	2
					Orbital brightness modulations	9
					Disk Kinematics	1

<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

2023年のデータで修正表作成

## 5.6 第2の地球はあるのか

この項は、毎年観測の進展が著しく、太陽系外惑星の発見数は年々増加しています。p190の表5.4を2023年1月現在のものとして更新すると、次のようにになります。

表1:これまでに発見された太陽系外惑星の数。Kepler衛星(2009–2013)のミッションは、一旦終了したもの、同衛星を用いてK2ミッション(2014–2018)が引き続き行われた。その後TESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018-)に観測が引き継がれている。(2023年1月12日現在)。[<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]

	全観測	Kepler	K2	TESS	発見された方法	発見数
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)	5241	2710	543	285	Astrometry	2
候補天体(candidates)		2054	978	6137	Imaging	62
					Radial Velocity	1023
					Transit	3941
					Transit timing variations	24
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	2205				Eclipse timing variations	18
ハビタブルゾーンにある星(確定) =表面温度が180–310Kのもの	488				Microlensing	152
					Pulsar timing variations	7
					Pulsation timing variations	2
					Orbital brightness modulations	9
					Disk Kinematics	1

<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

# 太陽系外惑星の発見数(2024年)

教科書p190

2023年のデータで修正表作成

2024年1月18日現在

## 5.6 第2の地球はあるのか

この項は、毎年観測の進展が著しく、太陽系外惑星の発見数は年々増加しています。p190の表5.4を2023年1月現在のものとして更新すると、次のようにになります。

表1:これまでに発見された太陽系外惑星の数。Kepler衛星(2009–2013)のミッションは、一旦終了したもの、同衛星を用いてK2ミッション(2014–2018)が引き続き行われた。その後TESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018-)に観測が引き継がれている。(2023年1月12日現在)。[\[http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/\]](http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)

	全観測	Kepler	K2	TESS	発見された方法	発見数
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)	5241 <b>5569</b>	2710 <b>2778</b>	543 <b>548</b>	285 <b>415</b>	Astrometry	2 <b>3</b>
候補天体(candidates)		2054	978	6137	Imaging	62 <b>69</b>
	<b>1984</b>	<b>977</b>	<b>4706</b>		Radial Velocity	1023 <b>1075</b>
					Transit	3941 <b>4151</b>
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)		2205		<b>2369</b>	Transit timing variations	24 <b>28</b>
ハビタブルゾーンにある星(確定) =表面温度が180–310Kのもの			488	<b>514</b>	Eclipse timing variations	18 <b>17</b>
					Microlensing	152 <b>207</b>
					Pulsar timing variations	7 <b>7</b>
					Pulsation timing variations	2 <b>2</b>
					Orbital brightness modulations	9 <b>9</b>
					Disk Kinematics	1 <b>1</b>

<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

# 太陽系外惑星の発見数(2025年)

教科書p190

2023年のデータで修正表作成

2025年1月16日現在

## 5.6 第2の地球はあるのか

この項は、毎年観測の進展が著しく、太陽系外惑星の発見数は年々増加しています。p190の表5.4を2023年1月現在のものとして更新すると、次のようにになります。

表1:これまでに発見された太陽系外惑星の数。Kepler衛星(2009–2013)のミッションは、一旦終了したもの、同衛星を用いてK2ミッション(2014–2018)が引き続き行われた。その後TESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018-)に観測が引き継がれている。(2023年1月12日現在)。[\[http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/\]](http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)

	全観測	Kepler	K2	TESS	発見された方法	発見数
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)	5241 <b>5819</b>	2710 <b>2778</b>	543 <b>547</b>	285 <b>595</b>	Astrometry	2 <b>3</b>
候補天体(candidates)	2054	978	6137		Imaging	62 <b>82</b>
	<b>1982</b>	<b>975</b>	<b>7358</b>		Radial Velocity	1023 <b>1096</b>
					Transit	3941 <b>4333</b>
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	2205		2447		Transit timing variations	24 <b>33</b>
ハビタブルゾーンにある星(確定) =表面温度が180–310Kのもの	488		<b>532</b>		Eclipse timing variations	18 <b>17</b>
					Microlensing	152 <b>235</b>
					Pulsar timing variations	7 <b>8</b>
					Pulsation timing variations	2 <b>2</b>
					Orbital brightness modulations	9 <b>9</b>
					Disk Kinematics	1 <b>1</b>

<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

# 太陽系外惑星の発見数(2026年)

教科書p190

2023年のデータで修正表作成

2026年1月12日現在

## 5.6 第2の地球はあるのか

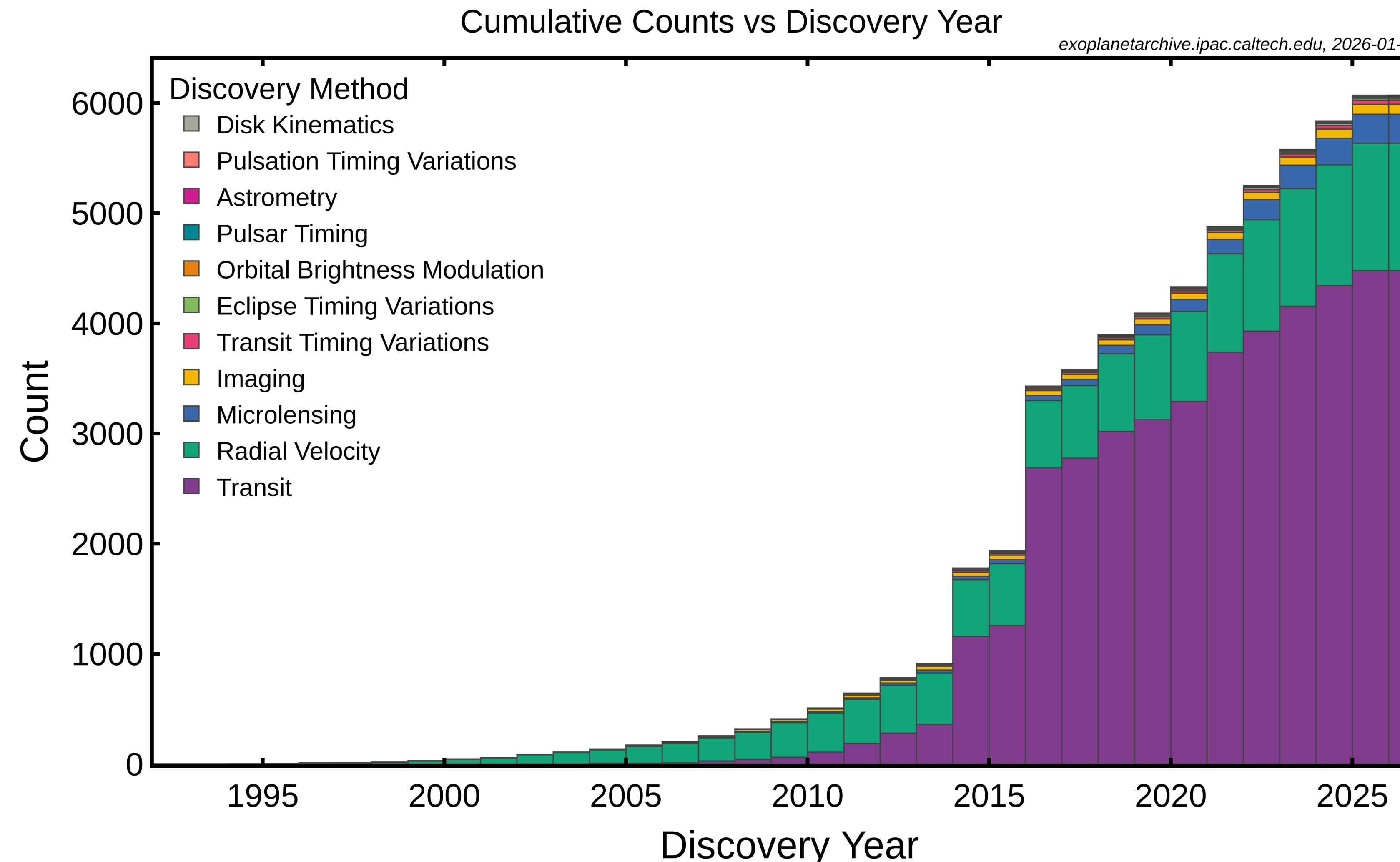
この項は、毎年観測の進展が著しく、太陽系外惑星の発見数は年々増加しています。p190の表5.4を2023年1月現在のものとして更新すると、次のようにになります。

表1:これまでに発見された太陽系外惑星の数。Kepler衛星(2009–2013)のミッションは、一旦終了したもの、同衛星を用いてK2ミッション(2014–2018)が引き続き行われた。その後TESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018-)に観測が引き継がれている。(2023年1月12日現在)。[\[http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/\]](http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/)

	全観測	Kepler	K2	TESS	発見された方法	発見数
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)	5241 <b>6071</b>	2710 <b>2783</b>	543 <b>549</b>	285 <b>725</b>	Astrometry	2 <b>6</b>
候補天体(candidates)	2054	978	6137		Imaging	62 <b>91</b>
	<b>1979</b>	<b>976</b>	<b>7821</b>		Radial Velocity	1023 <b>1158</b>
					Transit	3941 <b>4478</b>
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	2205		<b>2574</b>		Transit timing variations	24 <b>39</b>
ハビタブルゾーンにある星(確定) =表面温度が180–310Kのもの	488		<b>553</b>		Eclipse timing variations	18 <b>17</b>
					Microlensing	152 <b>262</b>
					Pulsar timing variations	7 <b>8</b>
					Pulsation timing variations	2 <b>2</b>
					Orbital brightness modulations	9 <b>9</b>
					Disk Kinematics	1 <b>1</b>

<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

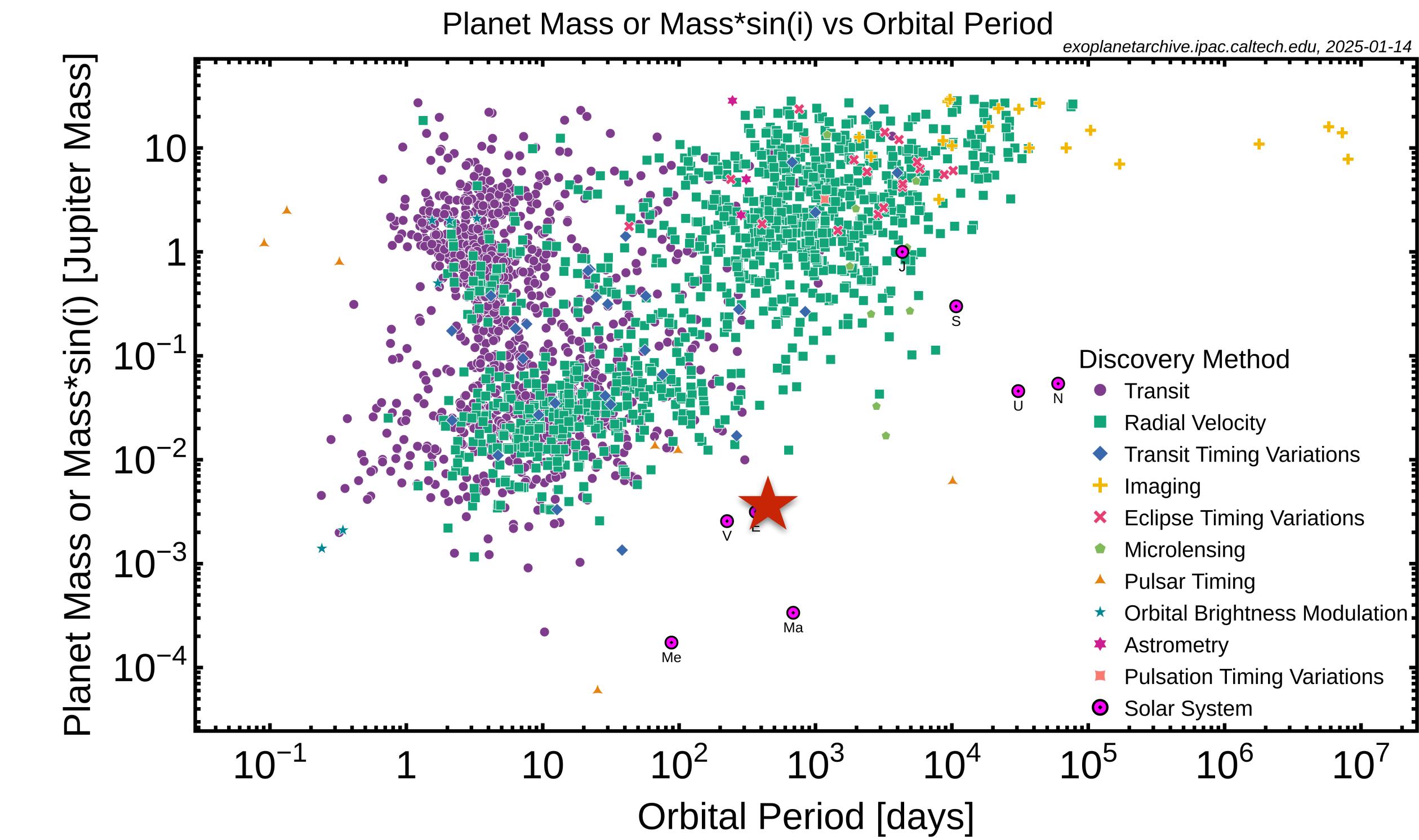
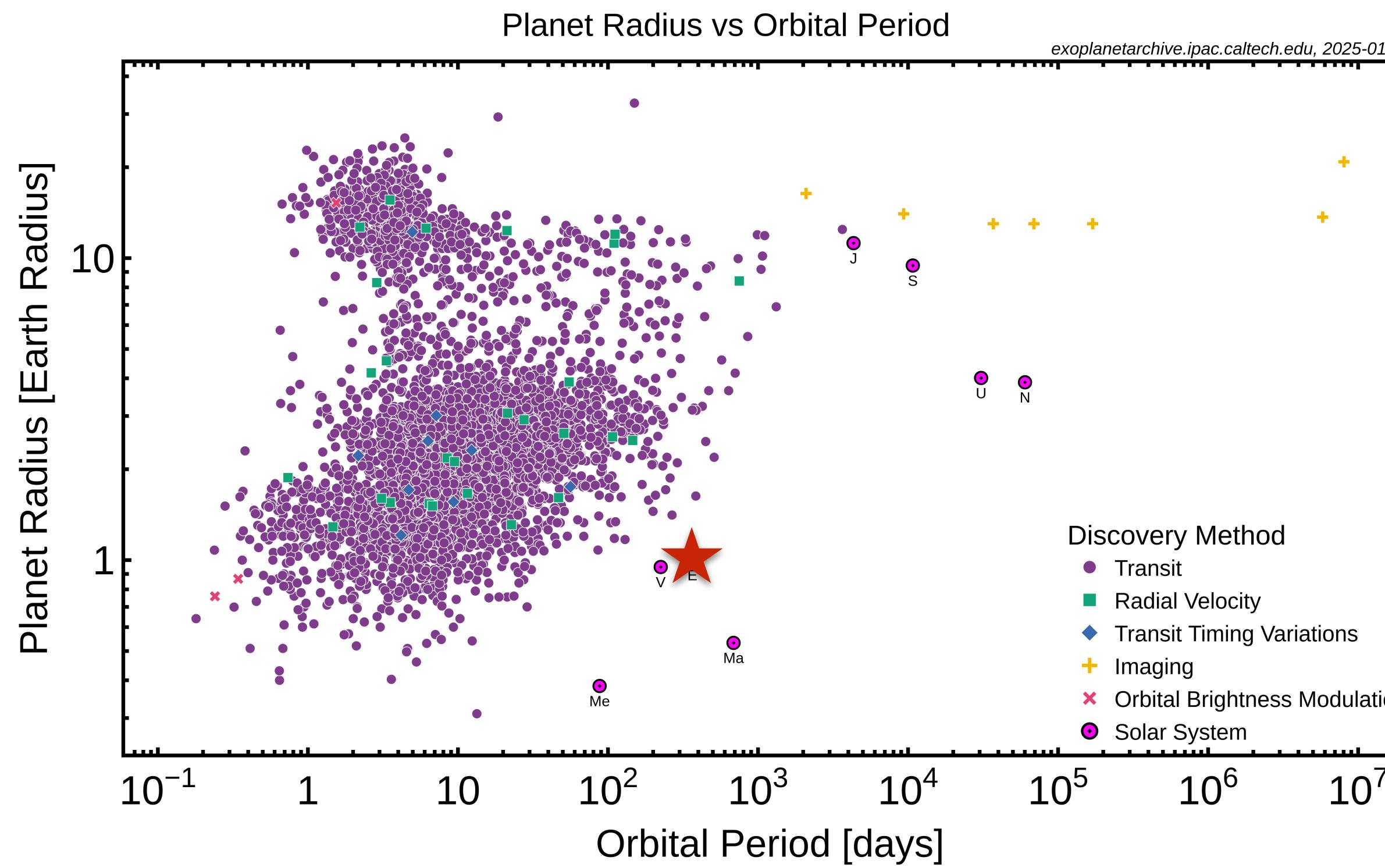
# 太陽系外惑星の発見数(累積)



2026年1月12日現在 6000個以上。  
恒星の 42% には惑星が発見されている。

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>

# 太陽系外惑星 公転周期と質量分布 (2025年)

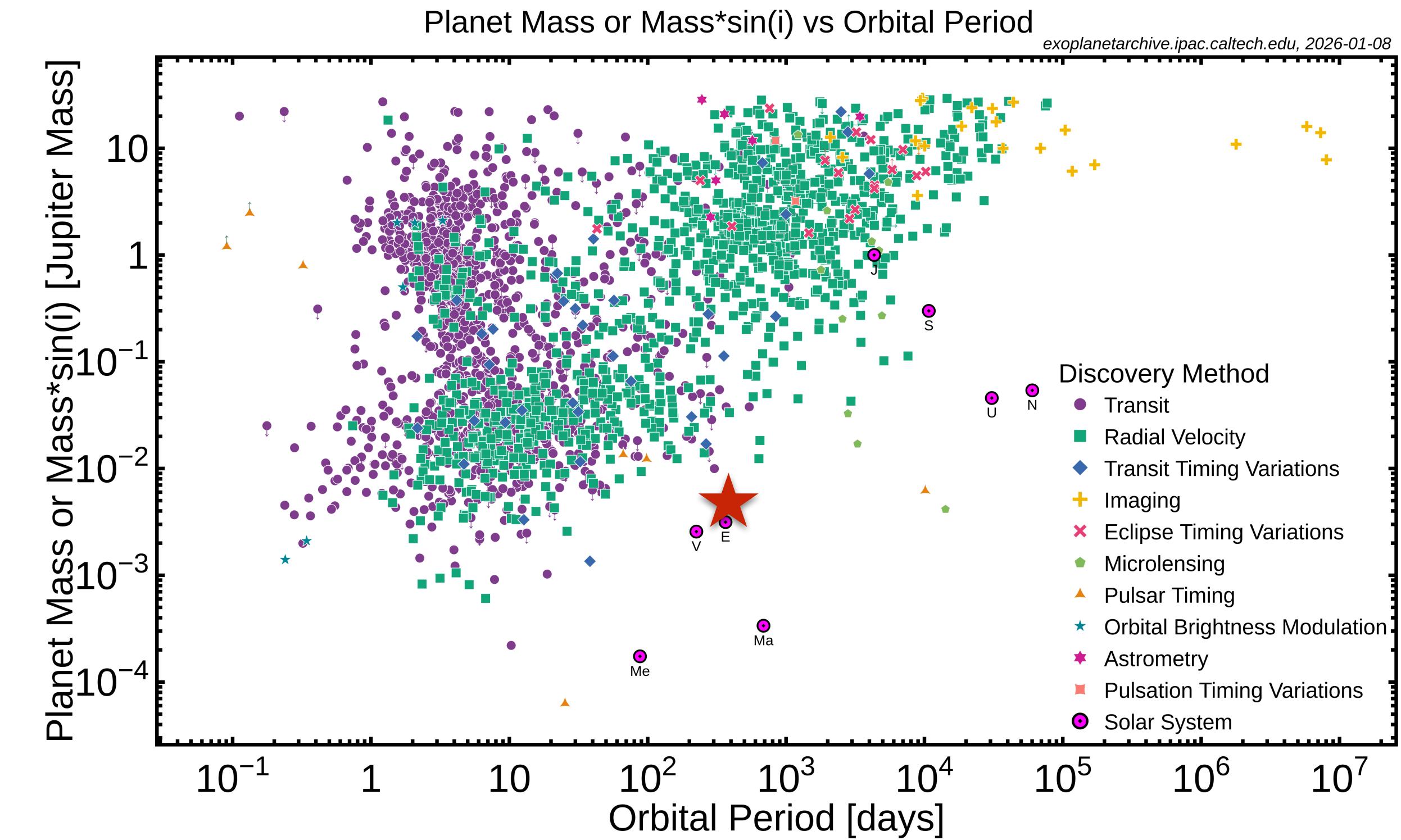
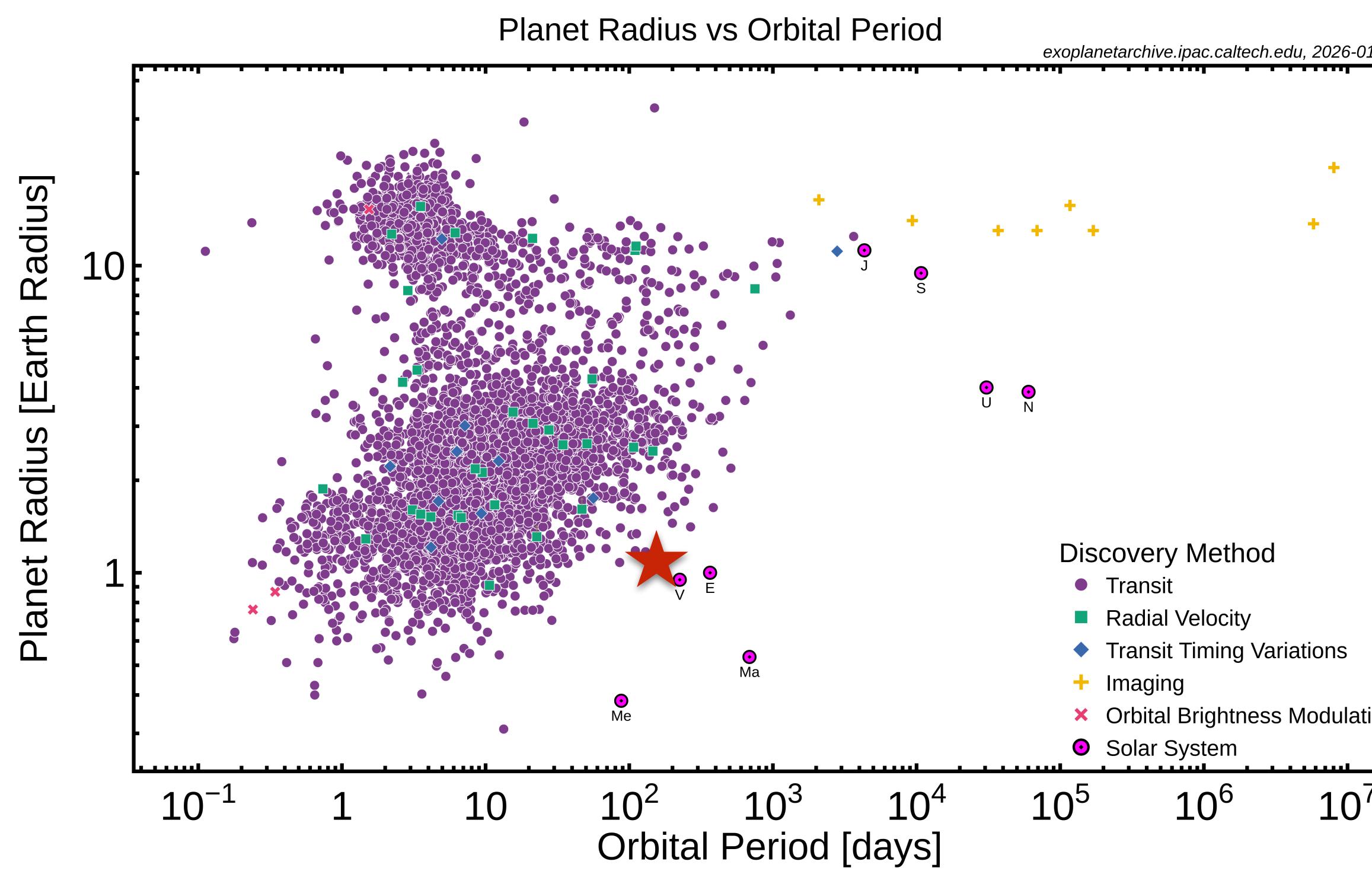


地球質量x318=木星質量

地球質量=木星質量x0.0003

2025年1月16日現在 2400システム、5800個以上。  
恒星の42%以上には惑星が発見されている。

# 太陽系外惑星 公転周期と質量分布 (2025年)



地球質量x318=木星質量

地球質量=木星質量x0.0003

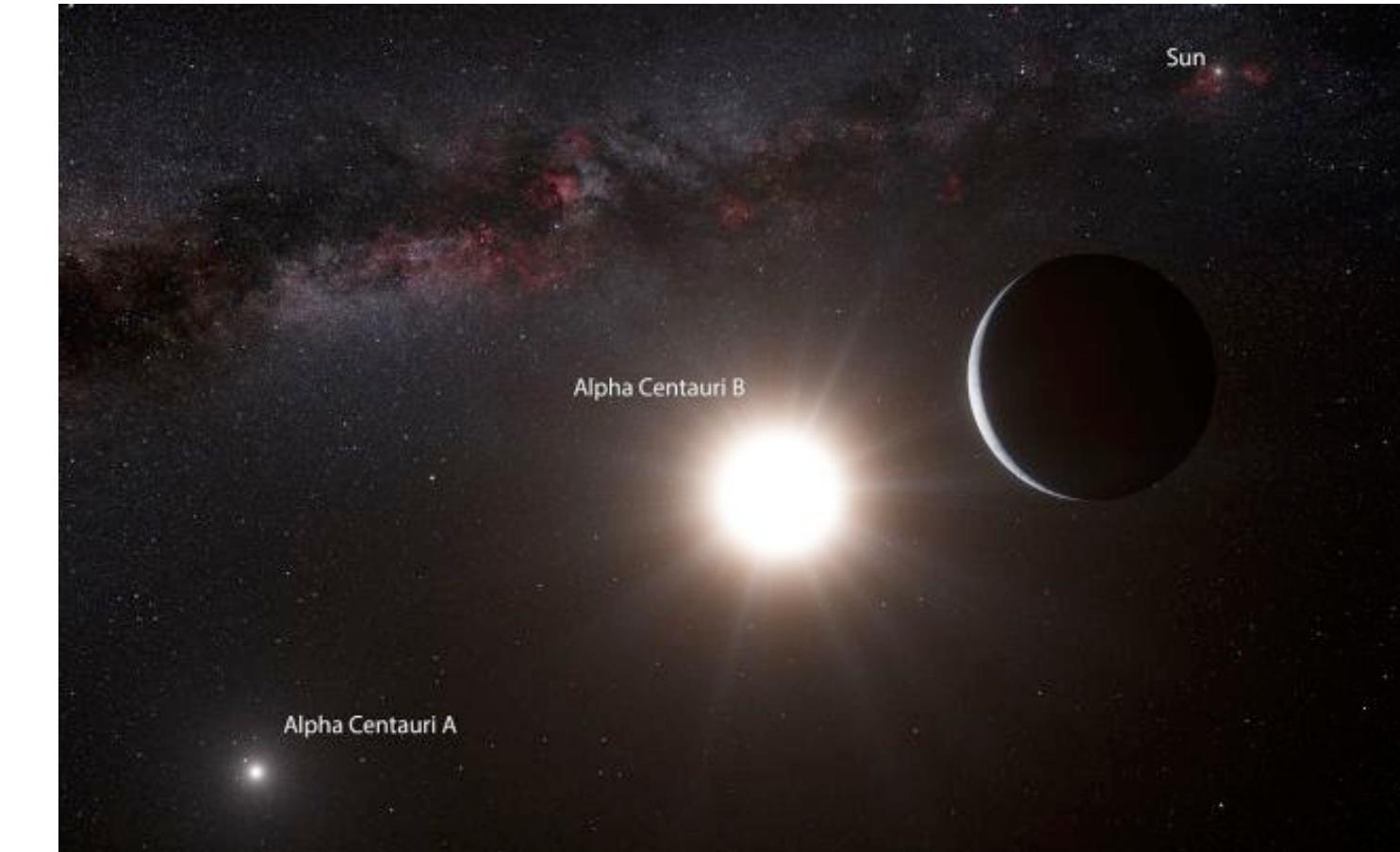
2026年1月12日現在 2570システム、6000個以上。  
恒星の 42%以上 には惑星が発見されている。

## Planet Found in Nearest Star System to Earth

太陽系にもっとも近い4.3光年先の恒星系リギルケンタウルス（アルファケンタウリ）に、地球と同じくらいの質量の惑星が見つかった。また、4連星の中にある惑星の発見も発表されている。

リギルケンタウルスに惑星が存在するかどうかは19世紀から議論されてきたが、最近まで確認できなかった。今回初めて、チリにあるラシーヤ天文台のHARPS（高精度視線速度系外惑星探査装置）と3.6m望遠鏡を用いた観測で、リギルケンタウルスBの周りを回る惑星が発見された。この惑星は、主星からは600万km程度離れていて、3.2日の周期で公転している。太陽系で言えば、水星よりも内側の軌道を回っていて、生命が存在するには熱すぎると考えられる。

視線速度法（ドップラーシフト法）によって観測されたものだが、今回は、秒速51cm（時速1.8km）という極めて小さい動きを検出したもので、視線速度観測としては史上最高精度の観測。



リギルケンタウルスは南半球ではよく見える明るい星（想像図）

<http://www.eso.org/public/news/eso1241/>  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/news/kepler-ph1.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/news/kepler-ph1.html)

<http://jp.arxiv.org/abs/1210.3612>

## Planet Hunters: A Transiting Circumbinary Planet in a Quadruple Star System

Megan E. Schwamb, Jerome A. Orosz, Joshua A. Carter, William F. Welsh, Debra A. Fischer, Guillermo Torres, Andrew W. Howard, Justin R. Crepp, William C. Keel, Chris J. Lintott, Nathan A. Kaib, Dirk Terrell, Robert Gagliano, Kian J. Jek, Michael Parrish, Arfon M. Smith, Stuart Lynn, Robert J. Simpson, Matthew J. Giguere, Kevin Schawinski  
 (Submitted on 12 Oct 2012)

We report the discovery and confirmation of a transiting circumbinary planet (PH1) around KIC 4862625, an eclipsing binary in the Kepler field. The planet was discovered by volunteers searching the first six Quarters of publicly available Kepler data as part of the Planet Hunters citizen science project. Transits of the planet across the larger and brighter of the eclipsing stars are detectable by visual inspection every ~137 days, with seven transits identified in Quarters 1-11. The physical and orbital parameters of both the host stars and planet were obtained via a photometric-dynamical model, simultaneously fitting both the measured radial velocities and the Kepler light curve of KIC 4862625. The  $6.18 \pm 0.17$  Earth radii planet orbits outside the 20-day orbit of an eclipsing binary consisting of an F dwarf ( $1.734 \pm 0.044$  Solar radii,  $1.528 \pm 0.087$  Solar masses) and M dwarf ( $0.378 \pm 0.023$  Solar radii,  $0.408 \pm 0.024$  solar masses). For the planet, we find an upper mass limit of 169 Earth masses (0.531 Jupiter masses) at the 99.7% confidence level. With a radius and mass less than that of Jupiter, PH1 is well within the planetary regime. Outside the planet's orbit, at ~1000 AU, a previously unknown visual binary has been identified that is bound to the planetary system, making this the first known case of a quadruple star system with a transiting planet.

# 太陽系から一番近い星



European  
Southern  
Observatory

## The Alpha Centauri Star System



4.39光年

4.25光年

This image shows the closest stellar system to the Sun, the bright double star Alpha Centauri AB and its distant and faint companion Proxima Centauri. In late 2016 ESO signed an agreement with the Breakthrough Initiatives to adapt the VLT instrumentation to conduct a search for planets in the Alpha Centauri system. Such planets could be the targets for an eventual launch of miniature space probes by the Breakthrough Starshot Initiative.

<http://www.eso.org/public/images/eso1702b/>



European  
Southern  
Observatory

eso1629 – Science Release

SPACE SCOOP

## Planet Found in Habitable Zone Around Nearest Star

Pale Red Dot campaign reveals Earth-mass world in orbit around Proxima Centauri

24 August 2016



Astronomers using ESO telescopes and other facilities have found clear evidence of a planet orbiting the closest star to Earth, Proxima Centauri. The long-sought world, designated Proxima b, orbits its cool red parent star every 11 days and has a temperature suitable for liquid water to exist on its surface. This rocky world is a little more massive than the Earth and is the closest exoplanet to us — and it may also be the closest possible abode for life outside the Solar System. A paper describing this milestone finding will be published in the journal Nature on 25 August 2016.

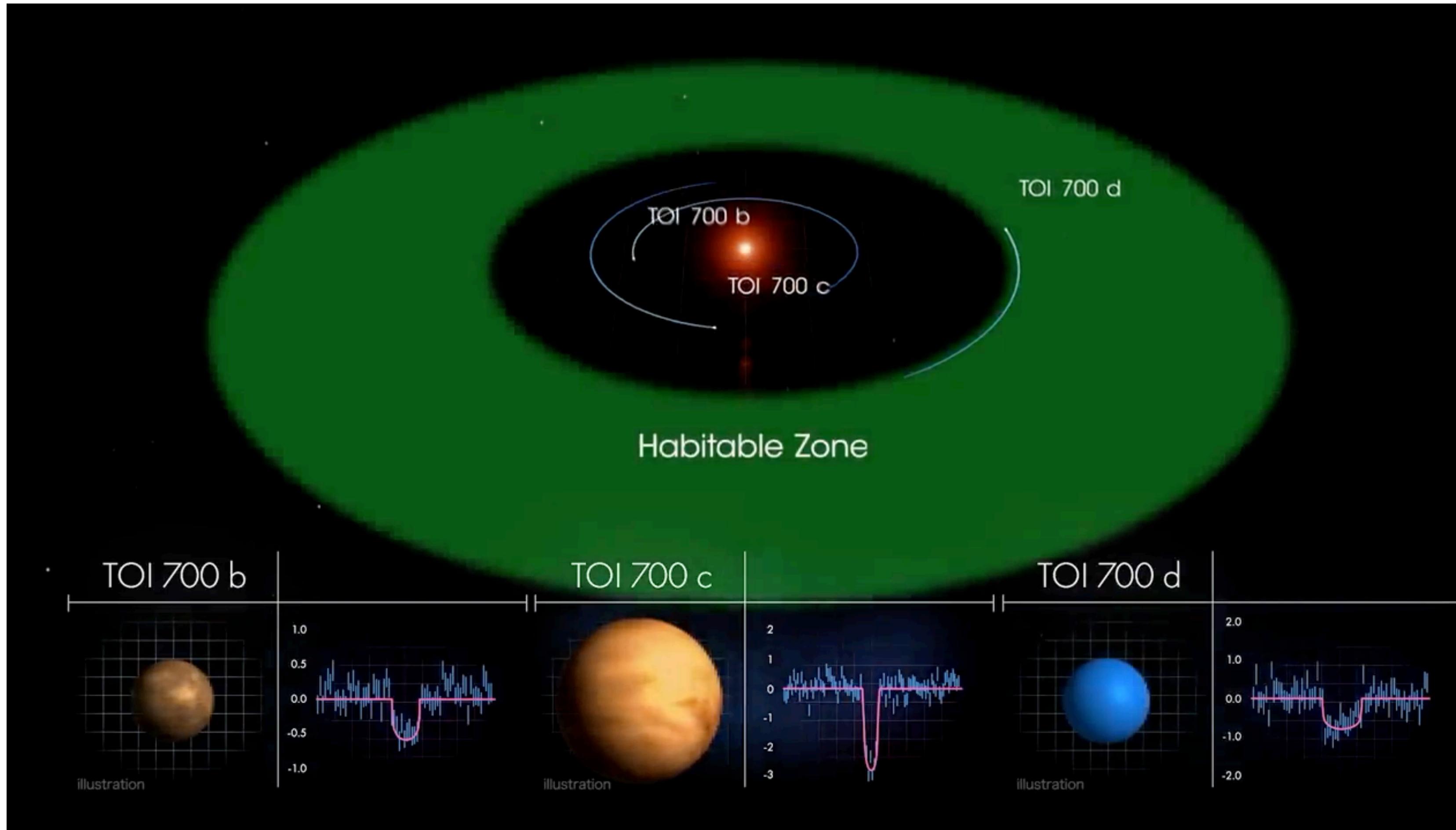
<http://www.eso.org/public/news/eso1629/>

At a distance of 1.295 parsecs, the red dwarf Proxima Centauri ( $\alpha$  Centauri C, GL 551, HIP 70890 or simply Proxima) is the Sun's closest stellar neighbour and one of the best-studied low-mass stars. It has an effective temperature of only around 3,050 kelvin, a luminosity of 0.15 per cent of that of the Sun, a measured radius of 14 per cent of the radius of the Sun and a mass of about 12 per cent of the mass of the Sun. Although Proxima is considered a moderately active star, its rotation period is about 83 days (ref. 3) and its quiescent activity levels and X-ray luminosity are comparable to those of the Sun. Here we report observations that reveal the presence of a small planet with a minimum mass of about 1.3 Earth masses orbiting Proxima with a period of approximately 11.2 days at a semi-major-axis distance of around 0.05 astronomical units. Its equilibrium temperature is within the range where water could be liquid on its surface. Nature, 2016, vol. 536, p. 437-440

プロキシマ・ケンタウリ  
4.25光年

プロキシマ・ケンタウリb  
0.05 au (約750万 km) の距離  
を11.2日で公転  
地球質量の1.3倍  
ハビタブルゾーン内  
液体の水を有する可能性

## NASA Planet Hunter Finds Earth-Size Habitable-Zone World



[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=88&v=QU0qsIGS6MQ](https://www.youtube.com/watch?time_continue=88&v=QU0qsIGS6MQ)

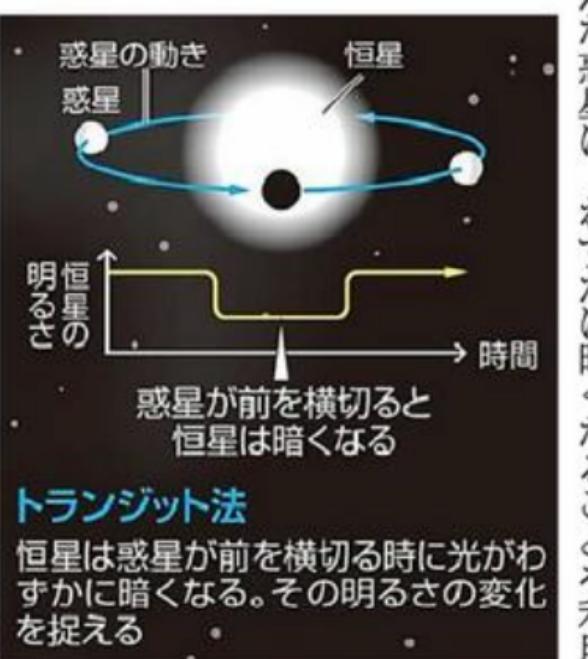
<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2020-002&rst=7569>

TOI 700  
かじき座 13等級  
100光年先

# 科学

kagaku@asahi.com

火曜掲載



## 地球発の電波 惑星29個が受信? 英誌に論文



生命が存在するのに欠かせない液体の水をたたえた惑星（右）のイメージ=NASA提供

地球の存在に気づき、人類が出した電波を受信できる惑星が、太陽系の近くに29個ある? そんな推定を米コーン大などのチームが昨年、英科学誌ネイチャーに発表した。「我々の存在はすでに、人間のような知的生命体にばれているかも知れない」という。太陽以外の恒星の周りを回る「系外惑星」は、これまでに4800個以上が見つかっている。人類はそんな惑星に

知的生命体がいないか探索しているが、逆にこちらが発見されている可能性があるのであります。しかし、チームは考えた。そこで、人工的な電波が受信できる100光年以内に、生命の存在に必要な液体と、それが液体であることを示す指標として、これまでに判明している系外惑星の統計から、75個の恒星に液体の水があると分かっていいるかもしれない」と指摘した。

一方、こちらから地球外にして系外惑星を探す「トランジット法」に注目。銀河系の三次元地図から、地球が太陽の光を遮るのを観測できる位置にあって、さらに太陽から100光年以内の恒星が75個あることをついた。そして、これまでに判明している系外惑星の統計から、75個の恒星に液体の水があると分かっていいるかもしれない」と指摘した。

一方、こちらから地球外にして系外惑星を探す「トランジット法」に注目。銀河系の三次元地図から、地球が太陽の光を遮るのを観測できる位置にあって、さらに太陽から100光年以内の恒星が75個あることをついた。そして、これまでに判明している系外惑星の統計から、75個の恒星に液体の水があると分かっていいるかもしれない」と指摘した。

一方、こちらから地球外にして系外惑星を探す「トランジット法」に注目。銀河系の三次元地図から、地球が太陽の光を遮るのを観測できる位置にあって、さらに太陽から100光年以内の恒星が75個あることをついた。そして、これまでに判明している系外惑星の統計から、75個の恒星に液体の水があると分かっていいるかもしれない」と指摘した。

## 知的生命体 我々の存在知ってるかも

## 人類が電波を使い始めて100年

100光年以内の恒星は75個、そのうちハビタブルゾーンにある惑星は29個

# ドレークの式

1960年にアメリカの天文学者ドレークが発表した  
「地球外文明の数を推定する式」



Frank D Drake  
1930-2022

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_\ell \times f_i \times f_c \times L$$

		楽観論	中間論	悲観論
$R_*$	銀河系で毎年生成される星の数（個/年）	50	20	1
$f_p$	生成される星のうち惑星系を持つ星の割合	1.0	0.5	極めて小
$n_e$	星の周りで生命にとって適当な環境を持つ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
$f_\ell$	そうした惑星上で生命が発生する確率	1.0	0.5	極めて小
$f_i$	生命が知的文明段階にまで進化する確率	1.0	0.1	極めて小
$f_c$	知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合	1.0	0.5	極めて小
$L$	そのような技術文明の平均寿命	$10^8$	$10^4$	100

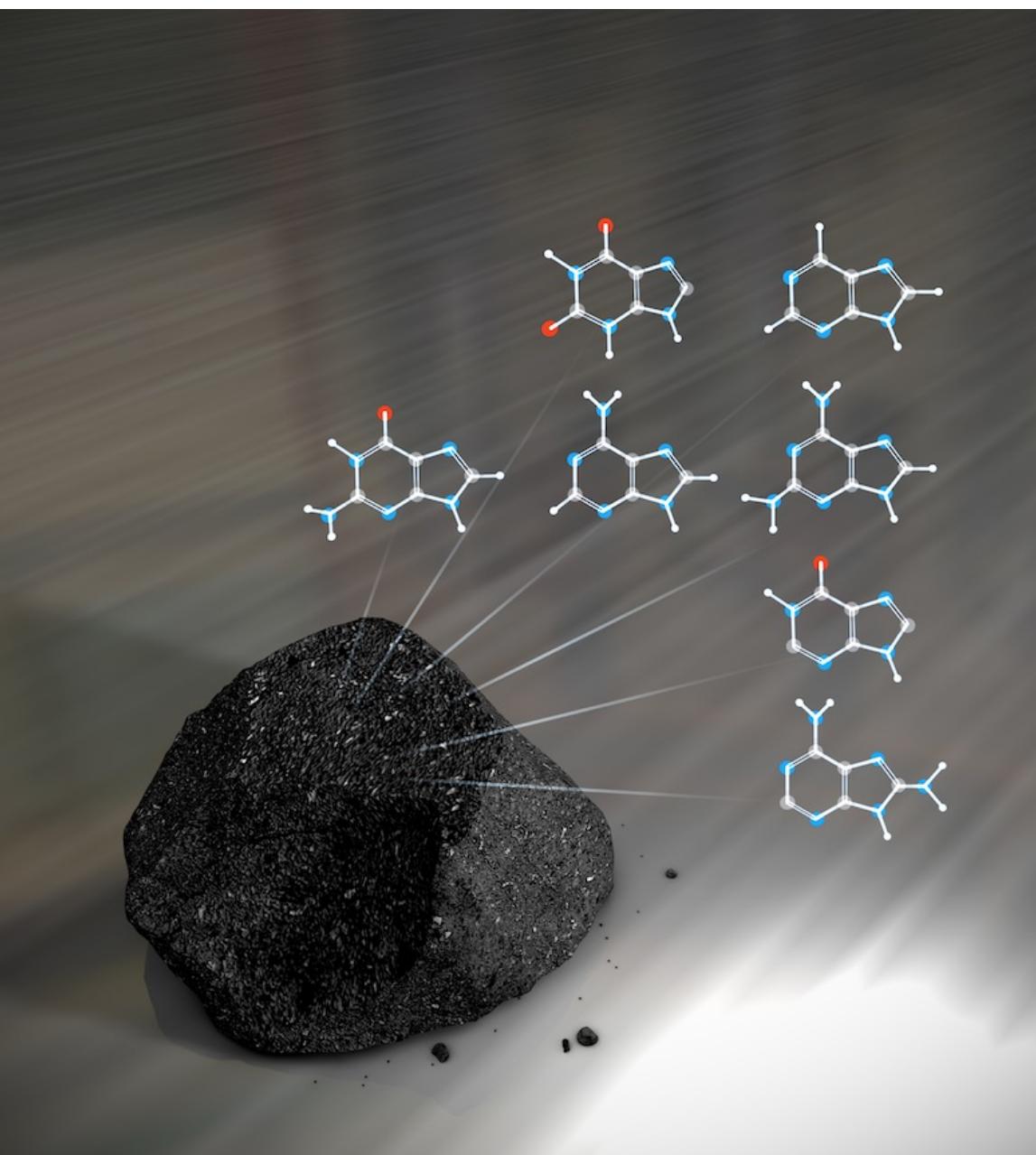
諸説あり

# 生命をつくる材料は宇宙から？

隕石中に有機物の存在が確認される。

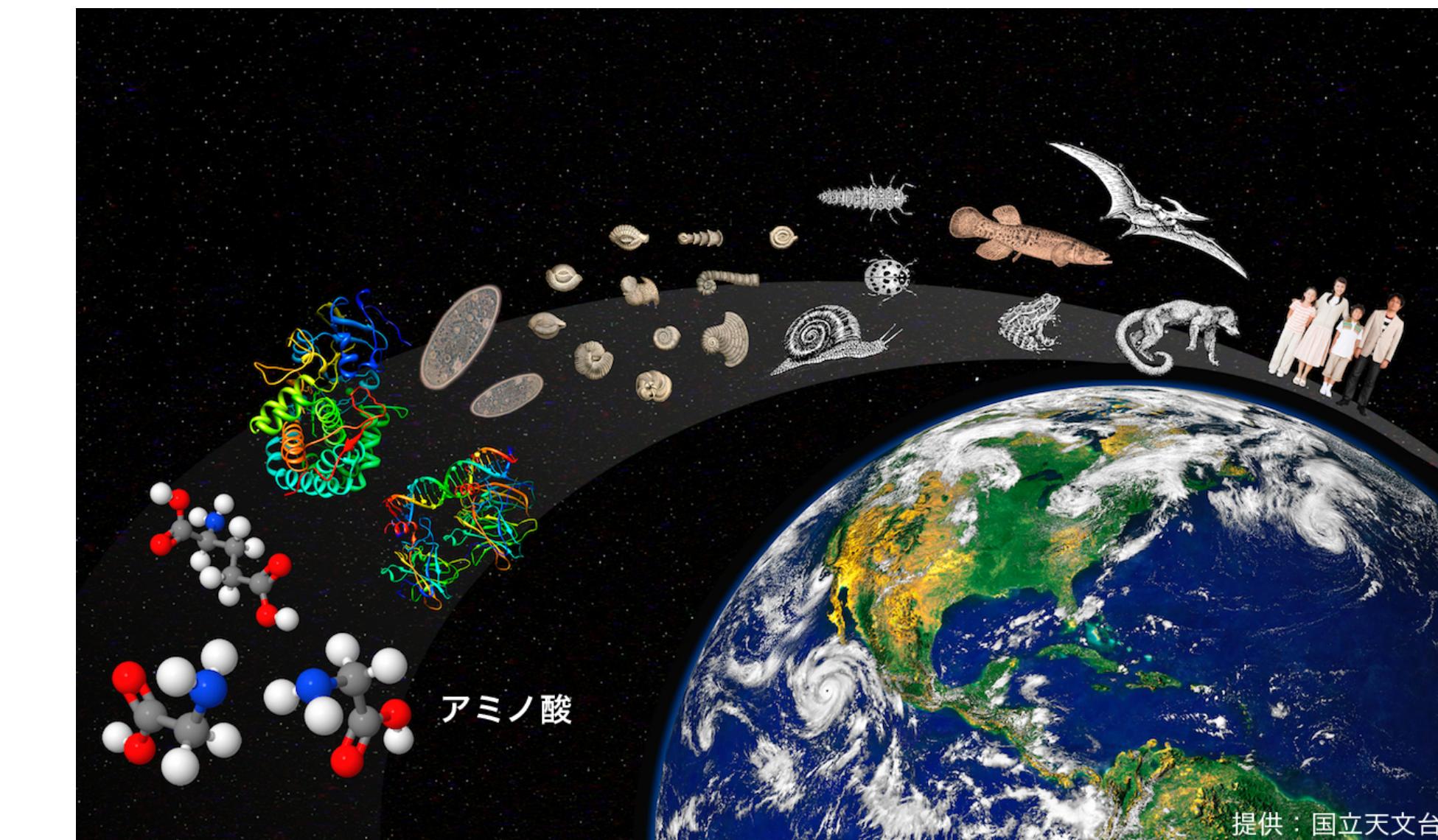
DNAを構成する塩基の一部と地球上で天然に作られることのない生命に関連した有機物(2011年NASA)

<http://www.astroarts.co.jp/news/2011/08/22meteorite/index-j.shtml>



星形成領域に有機物の存在が確認される。

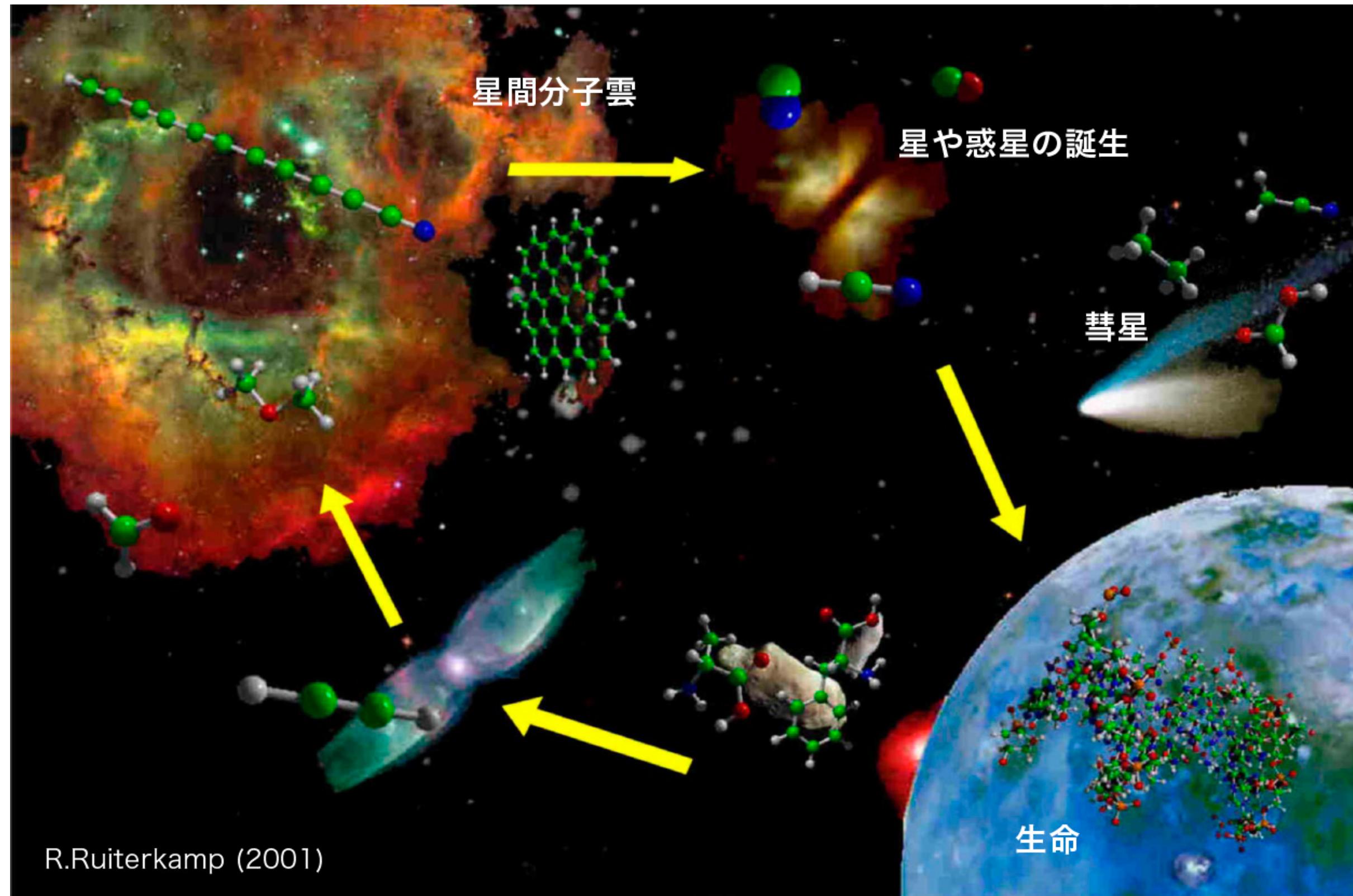
タンパク質の構成要素であるアミノ酸は普通に存在する(2014年国立天文台)



<http://www.nro.nao.ac.jp/news/2014/pr0910/0910-preglycine.html>

諸説あり

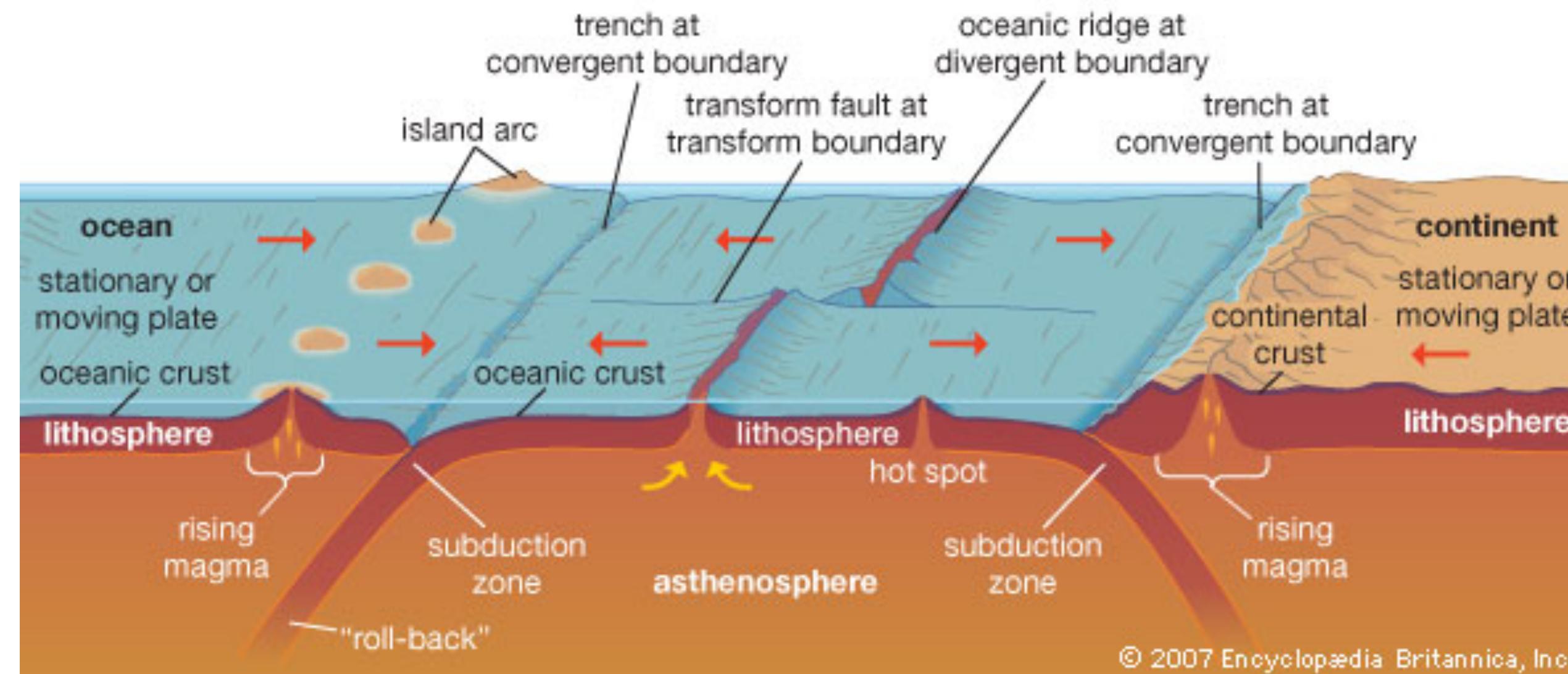
# 生命をつくる材料は宇宙から？



生命発生に関する仮説として、分子雲中に含まれていた生命材料物質の一部は彗星や隕石によって運搬されて惑星に降り積もり、さらに複雑な化学進化を経て最初の生命に至ったという考え方がある。パンスペルミア説(panspermia=種をまく)は、よくSF映画のネタにされている。

諸説あり

# 生命の起源はどこか？（1）熱水噴出孔説



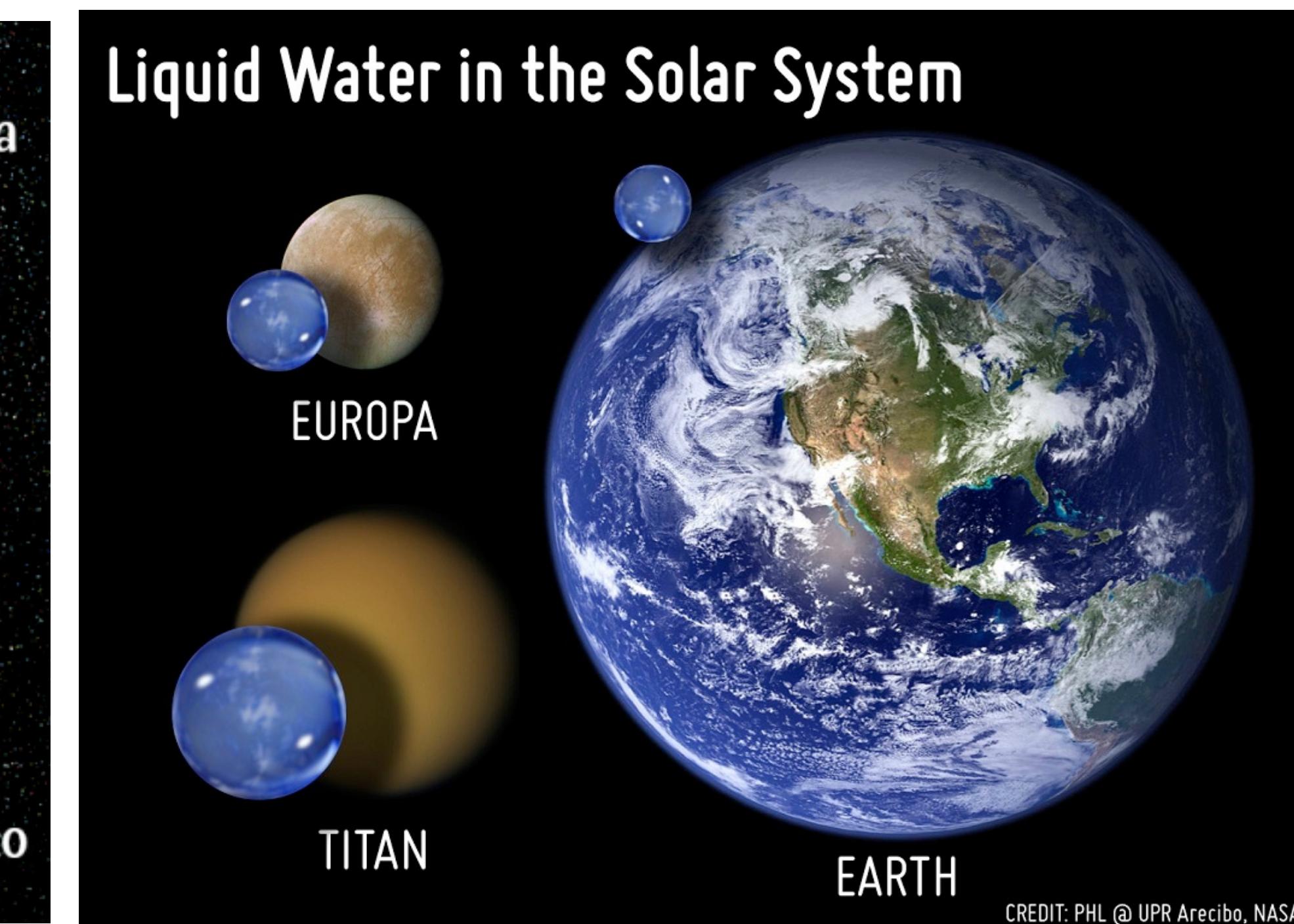
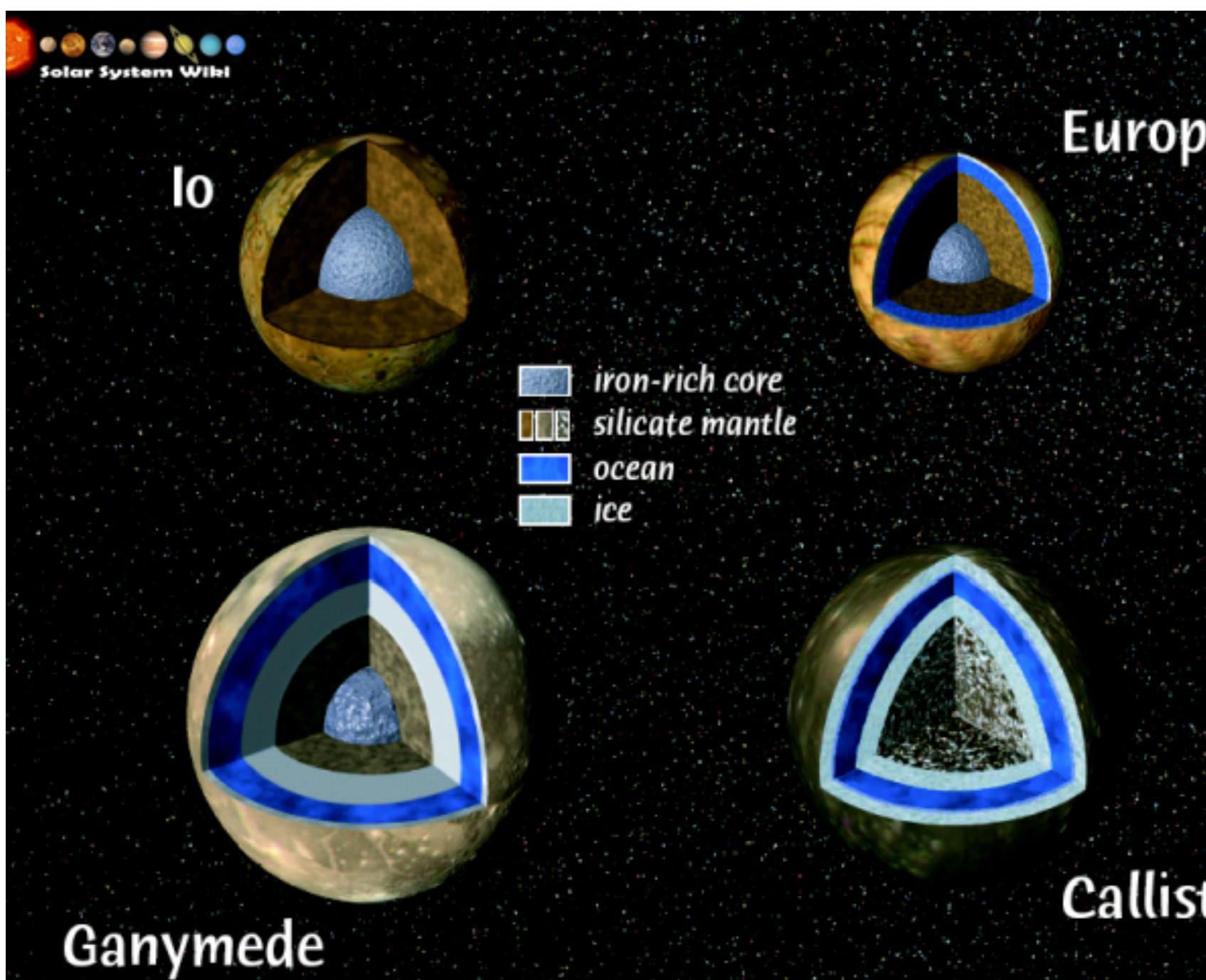
原始地球ではメタン、硫化水素、アンモニア、水素などの還元的物質が豊富に存在し、それらが高温・高圧下で反応して生体分子がつくられ、鉱物表面で重合して高分子化し、紫外線が遮断された環境で細胞化した。地球生命は熱水噴出孔で生まれた。

# 宇宙に熱水噴出孔はあるか？

海と火山活動があればよい。

原始火星には大量の水と熱水活動があった。

木星の第2衛星エウロパ (Europa) は、表面を覆う厚い氷殻の下に、海と熱水噴出孔が存在する可能性が高い。



# Europa ミッション 2018年衛星打ち上げへ ▶ 延期 ▶ 2024年10月

A A news.discovery.com

**OD NEWS** TECH | SPACE | HUMAN | EARTH | HISTORY | ANIMALS | ADVENTURE | VIDEO | + | 🔎 Adventure!

**SPACEFLIGHT**

## Europa Mission Wins Big in New NASA Budget

DEC 26, 2014 09:18 AM ET // BY IRENE KLOTZ

**VIEW RELATED GALLERY »**

Jupiter's ocean-bearing moon Europa  
NASA/JPL-CALTECH/SETI INSTITUTE

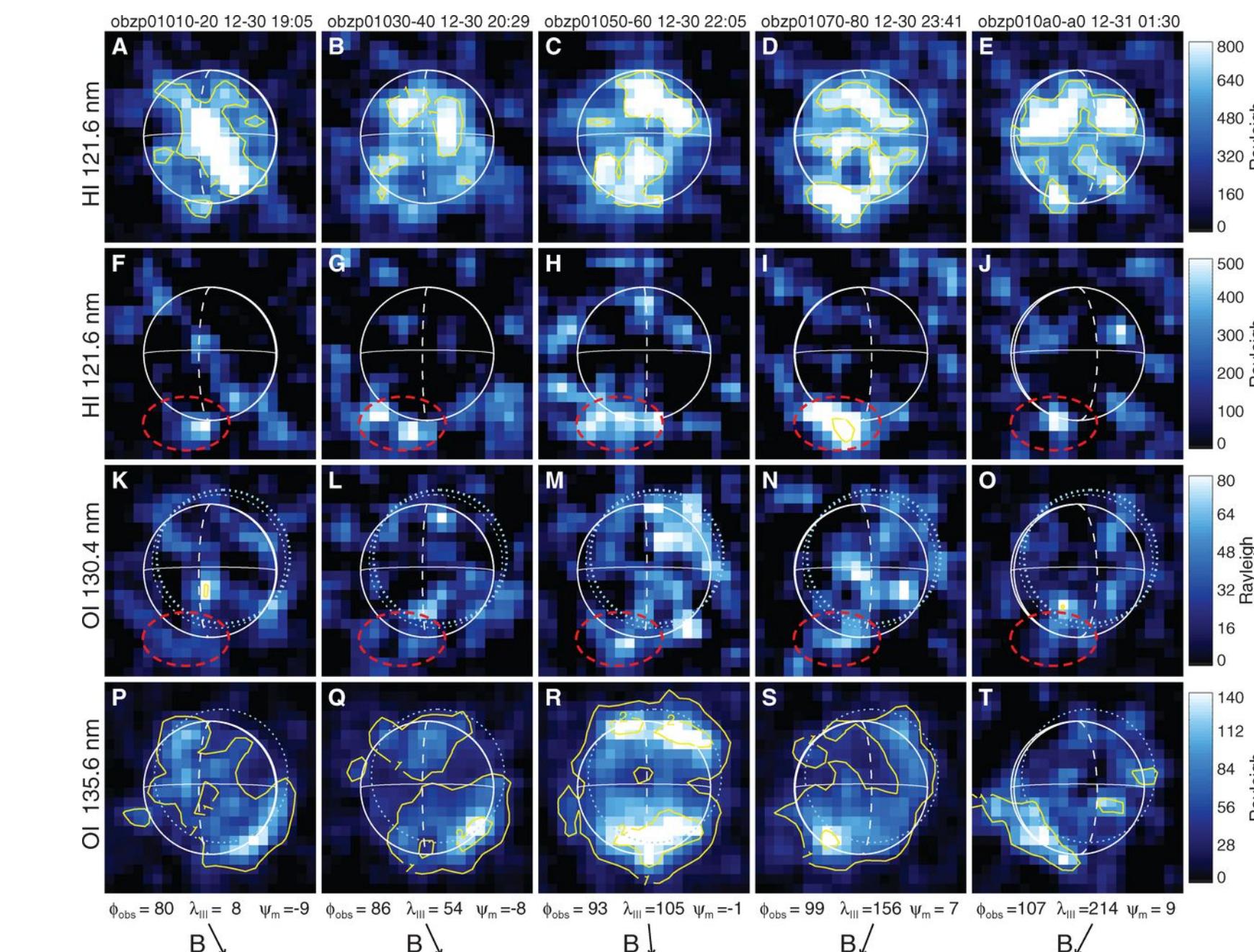
NASA begins the new year with an unexpected budget bump from Congress, which added \$530 million to President Barack Obama's request before adjourning for the holidays. The space agency's \$18 billion budget for the year that began Oct. 1 is part of the \$1.1 trillion spending plan Obama signed last week.

More than half the bonus is earmarked for the new heavy-lift Space Launch System rocket, which is expected to debut in 2018. NASA will now spend \$1.7 billion on the program through the fiscal year ending Sept. 30, 2015, an increase of \$320 million above the White House's request.

The other prime beneficiary is NASA's planetary science program, which ends the year with \$1.44 billion in its budget, an increase of \$157 million. Congress set aside \$100 million to begin work on a mission to Jupiter's ocean-bearing moon Europa. The Obama administration had requested \$15 million.

PHOTOS: Exquisite Exoplanetary Art

<http://news.discovery.com/space/private-spaceflight/europa-mission-wins-big-in-new-nasa-budget-141226.htm>



# Europa Clipper ミッション 2024年10月10日衛星打ち上げへ

NASA

Topics    Missions    Galleries    NASA TV    Follow NASA    Downloads    About    NASA Audiences    Search   

**Latest**    **Related**

[NASA Scientists Confirm Water Vapor on Europa](#)  
2 months ago

[Europa Clipper's Mission to Jupiter's Icy Moon Confirmed](#)  
5 months ago

[Europa Clipper High Gain Antenna Undergoes Testing at Langley](#)  
10 months ago

Joan Stupik, Guidance and Control Engineer  
10 months ago

[Radiation Maps of Jupiter's Moon Europa: Key to Future Missions](#)  
2 years ago

[Europa's Ocean Ascending](#)  
2 years ago

NASA Hosts Live Discussion about Europa

**Europa Clipper**

Aug. 20, 2019

## Europa Clipper's Mission to Jupiter's Icy Moon Confirmed

An icy ocean world in our solar system that could tell us more about the potential for life on other worlds is coming into focus with confirmation of the [Europa Clipper](#) mission's next phase. The decision allows the mission to progress to completion of final design, followed by the construction and testing of the entire spacecraft and science payload.

"We are all excited about the decision that moves the Europa Clipper mission one key step closer to unlocking the mysteries of this ocean world," said Thomas Zurbuchen, associate administrator for the Science Mission Directorate at NASA Headquarters in Washington. "We are building upon the scientific insights received from the flagship Galileo and Cassini spacecraft and working to advance our understanding of our cosmic origin, and even life elsewhere."

<https://europa.nasa.gov>

### Key Facts About Europa Clipper

- **Spacecraft Type:** Orbiter
- **Launch Window Opens:** October 10, 2024
- **Science Instruments:** 9
- **Science Target:** Europa
- **Jupiter Orbit Insertion:** April 2030

### What will Europa Clipper do?

Europa Clipper's main science goal is to determine whether there are places below the surface of Jupiter's icy moon, Europa, that could support life.

# 木星の衛星を探査、「エウロパ・クリッパー」打ち上げ成功

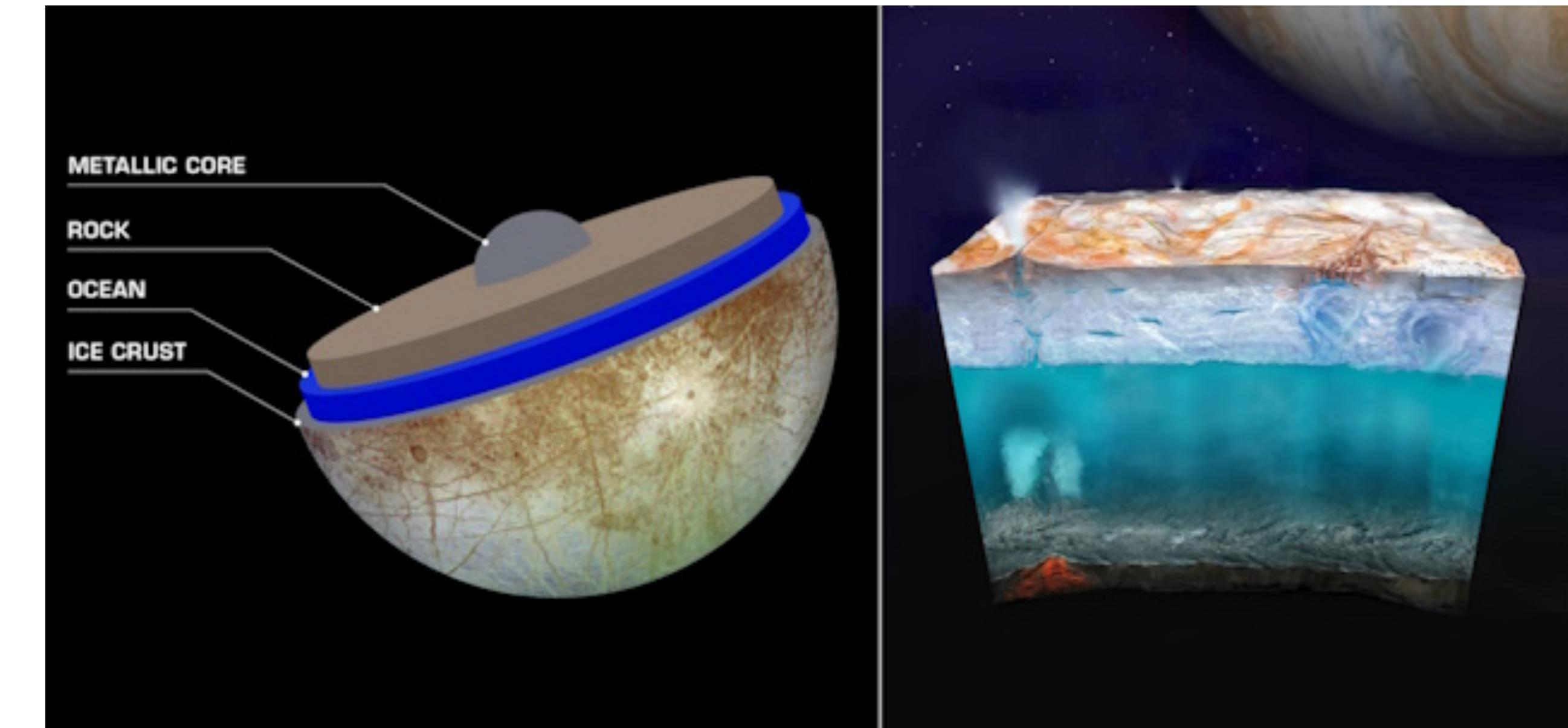
Liftoff! NASA's Europa Clipper Sails Toward Ocean Moon of Jupiter



NASAの探査機「エウロパ・クリッパー」が10月15日にスペースX社のファルコンヘビーロケットによって打ち上げられた。木星の衛星エウロパの表面下にある海などを調べ、生命に適した環境の有無を探る。

エウロパ・クリッパーは来年2月に火星スイングバイ、2026年1月に地球スイングバイをそれぞれ実施し、約5年半に及ぶ29億kmもの旅の末に2030年4月に木星系に到着する。その後、2031年から4年間かけてエウロパへの接近飛行を49回実施し、最接近時は地表からわずか25km上空を通過して、分光計やレーダー、磁力計など9つの観測機器を使って衛星全体を調べる。

エウロパ・クリッパーが目指す木星の第2衛星エウロパは、地球の月と同じくらいの大きさの天体で、表面は厚い氷に覆われている。その氷の殻の下には地球上の海水のおよそ2倍の塩水をたたえた内部海が存在すると考えられていて、生命の材料となる有機物や、生命に必須の化学エネルギー源の存在も示唆されている。さらに、水や有機物、化学エネルギーを持つ環境が過去40億年間安定して続いてきたとみられている。こうしたことからエウロパは、太陽系内では地球以外で生命に適した環境の存在が最も期待できる天体の一つとなっている。



[https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13736\\_europa\\_clipper](https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13736_europa_clipper)

<https://www.nasa.gov/news-release/liftoff-nasas-europa-clipper-sails-toward-ocean-moon-of-jupiter/>

# Europa Clipper ミッション 2024年10月15日衛星打ち上げ

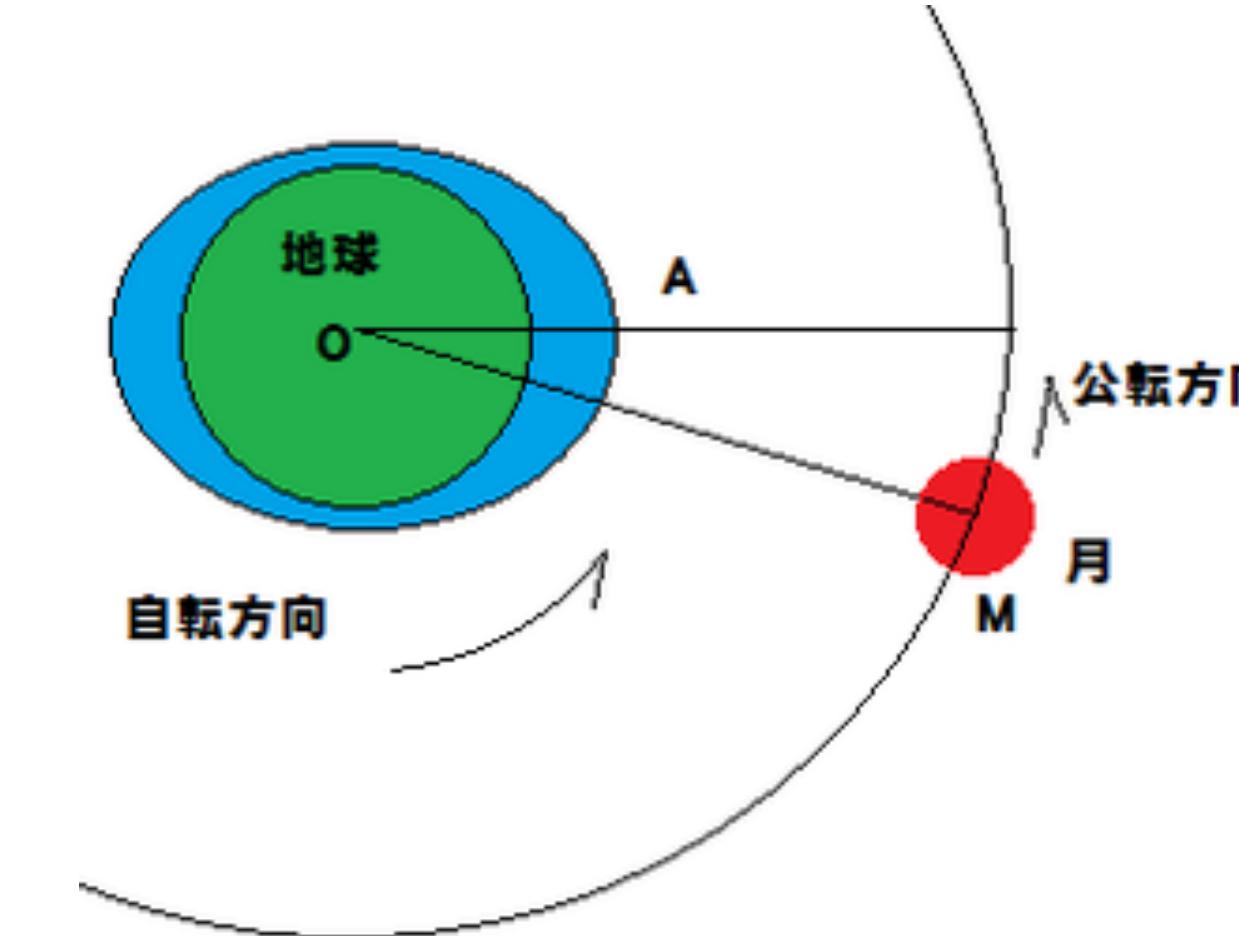
<https://europa.nasa.gov>

<https://www.jpl.nasa.gov/videos/nasas-europa-clipper-mission-launches-from-kennedy-space-center-highlights/>

## 諸説あり 生命の起源はどこか？（2）月の潮汐力説



<http://www.ipmu.jp/en/node/1974>



月の重力が引き起こす絶え間ない潮の流れによって、生命体が出現した、という説。  
原始の月は今より地球に近く月の潮汐力はとても大きく、初期の地球は今の1000倍  
の高さの潮の干満が発生していた。

かつての地球の自転ははやく1日は6時間。3時間ごとに巨大な津波が押し寄せたり引  
いたりしていた。こうして陸地の水たまりで水が濃縮され、強い太陽光が化学反応を促  
進し、脂肪酸(炭素・酸素・水素原子の鎖)やタンパク質のようなこれまでになかった複  
雑な有機化合物を作り出した。

# もし月がなかったら？

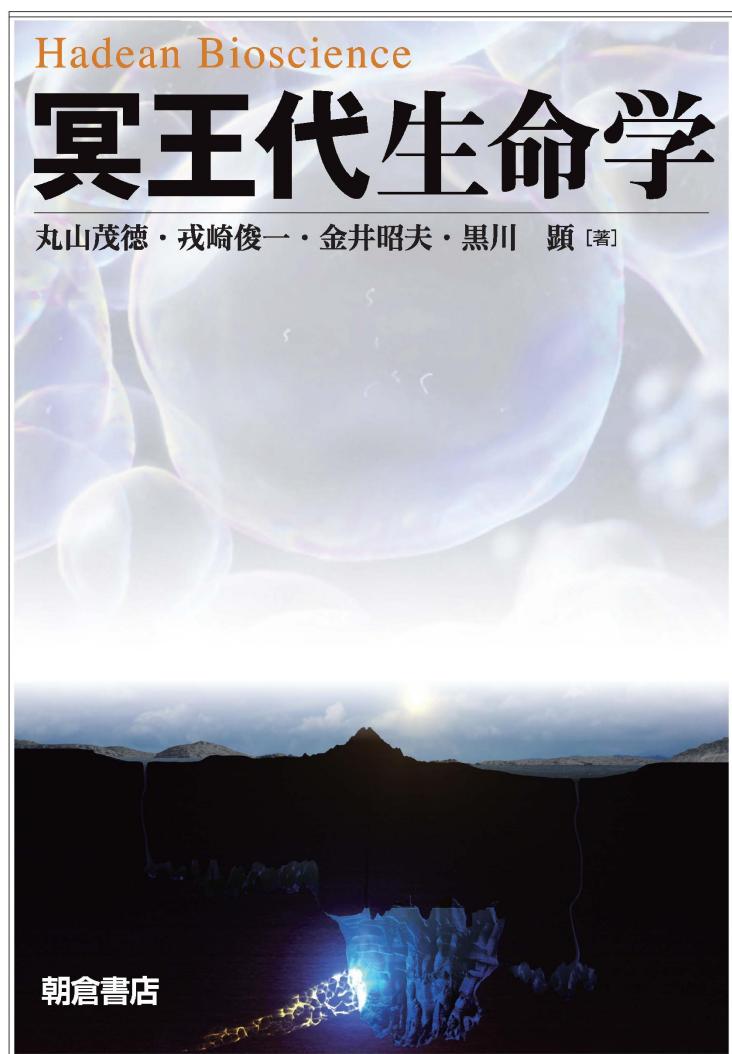


- 地球の自転軸の傾きはかなり不安定になる  
現在, 地球の自転軸の傾きは平均23.34度に保たれている(変動は5度以下). もし、月がなければ自転軸の傾きはかなり不安定になり、**地球の気候は極端に変動する**.
- 潮汐力によって, 生命の創造に必要な化学物質の混合がおきたと考えられるので, 月がなければ**大気の構成は変わる**だろう.
- 地球の自転は速く, 1日が8時間になる  
月の潮汐力は, 地球の自転速度を抑えるようにはたらく. 月がなければ**地球の自転速度が速まり, 大気の流れが速く, 生命環境には過酷になる**.

# 生命誕生場の環境9条件

表6-1 生命誕生場に必要な9条件 (Maruyama et al., 2019b)

環境条件	自然原子炉 間欠泉	熱水循環系	火星 <sup>3</sup>	宇宙空間 <sup>4</sup>
1 エネルギー源 (電離放射線+熱的エネルギー源)	○	×	○	○
2 栄養塩の供給 (リン, カリウムなど)	○	? <sup>1</sup>	○	×
3 生命主要構成元素の供給 (C, H, O, N)	○	? <sup>1</sup>	○	○
4 還元ガスの濃集	○	×	? <sup>2</sup>	×
5 乾湿サイクル	○	×	○	×
6 ナトリウムの少ない水	○	×	○	×
7 毒性のない淡水環境	○	×	? <sup>2</sup>	×
8 多様な環境 (海洋組成の多様性 (pH, 塩分濃度, 金属成分), 大気組成, 温度・圧力条件, 巨大大陸, 多様な地質環境など)	○	×	? <sup>2</sup>	×
9 周期性のある環境	○	×	×	×

<sup>1</sup> いくつかの要素については○だが、×のものもある<sup>2</sup> 物的証拠はないが、おそらく条件を満たしていたと考えられる<sup>3</sup> 火星は誕生後の約4億年間は海洋が存在していた<sup>4</sup> 宇宙空間には液体の水は存在しない

冥王代(めいおうだい、英: Hadean eon):地質時代の分類のひとつで、地球誕生から40億年前までの約5億年間

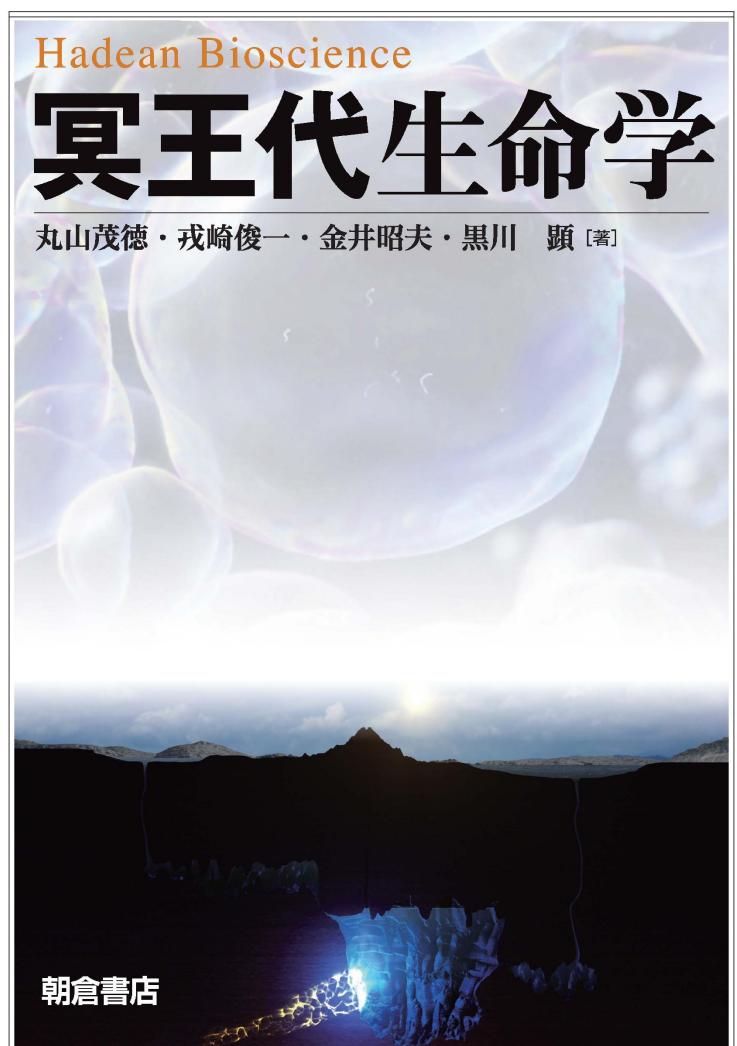
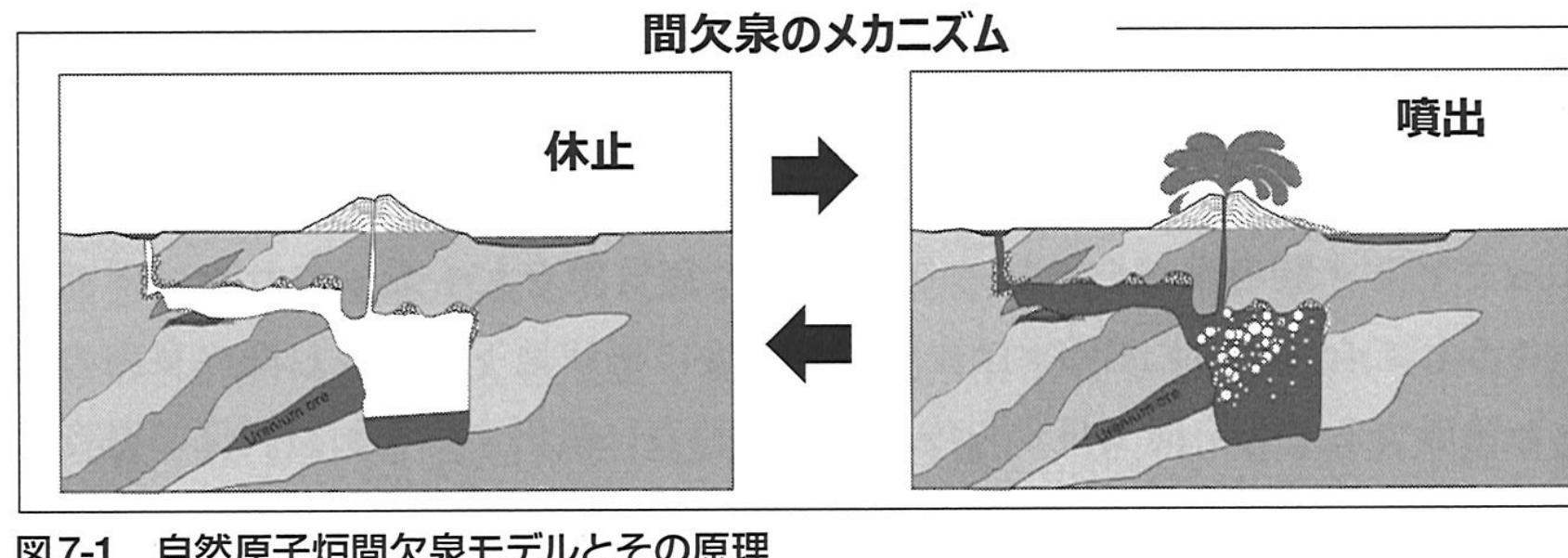
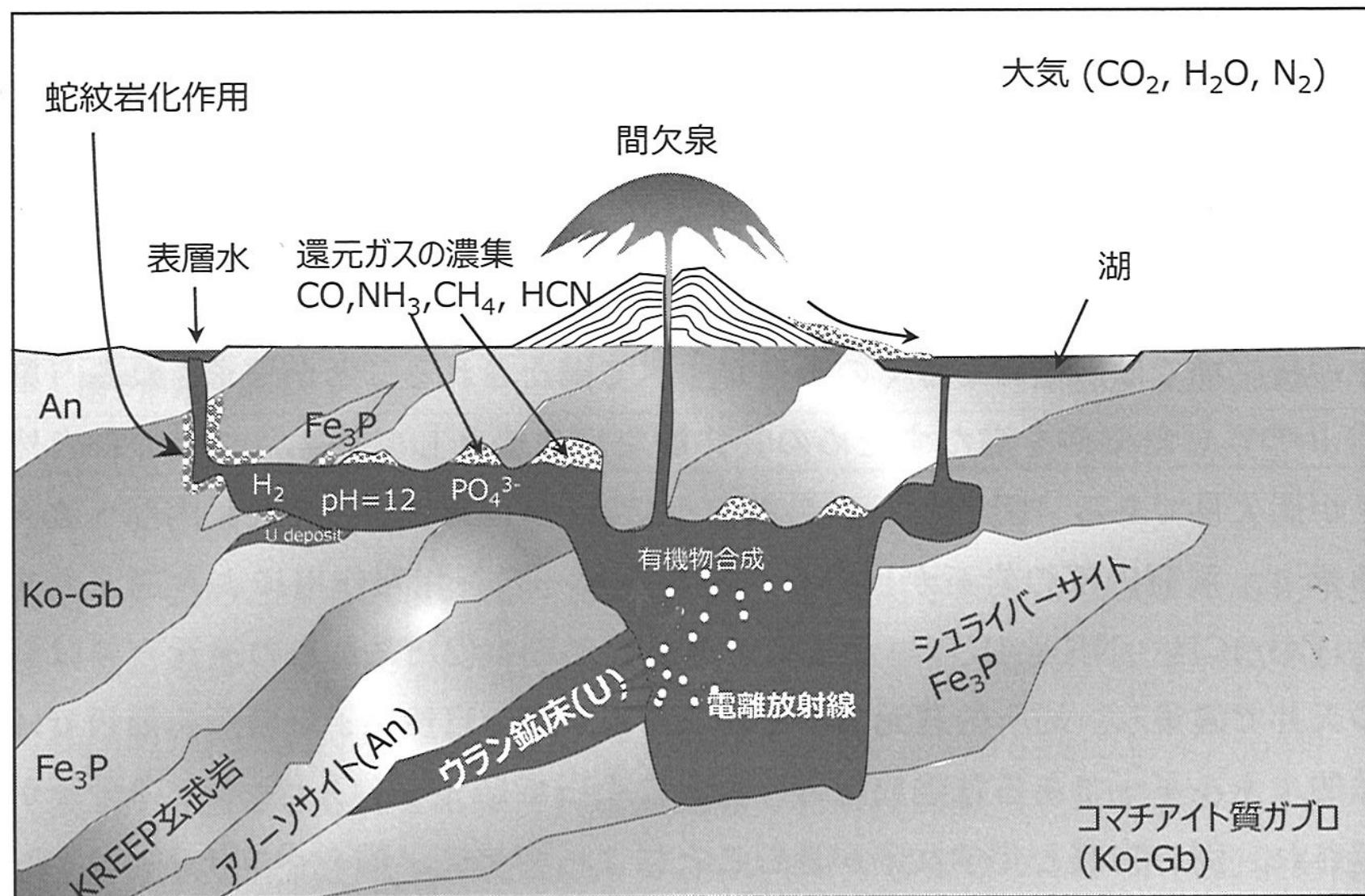
表6-2 生命誕生場の環境条件

Kitadai and Maruyama (2018) で抽出した化学的条件と Maruyama et al. (2019) で示した生命誕生場における9条件を考慮し、生命誕生場で担われるべき物理・化学的役割を洗い出し、それを可能にする環境条件と具体的な地質環境をまとめた。

条件No	条件項目	役割	必須の担い手	補足説明
1	太陽	ハビタブルトリニティをつくるための必須要素。太陽エネルギーのもとで、大気と海洋が地球表層の物質大循環を気象現象によって担い、風化・侵食・運搬によって陸地から栄養塩を供給する	岩石惑星上の物質環境	生命惑星誕生のために必要不可欠な惑星表層環境。これに加えて、プレートテクトニクスが機能することによって、固体地球と表層環境との間の物質大循環も可能になる。(6.1.1項)
2	大気			
3	海洋			
4	陸地			
5	前駆的化学進化のエネルギー源	前駆的化学進化を促進する	自然原子炉による電離放射線	雷放電、宇宙線、火山性マグマ、太陽紫外線もエネルギー源となりうるが、これらだけでは不十分である。(6.1.2項)
6	生命誕生場における物質循環のエネルギー源	物質循環によって、様々な物質を供給するとともに、多種多様な物質の混合を促進する	ウラン鉱床	火山性マグマや太陽紫外線もエネルギー源となりうるが、これらだけでは不十分である。(6.1.3項)
7	半閉鎖的環境	還元ガスの濃集を可能にする	地下の洞窟	ただし、還元ガスを生成するためには、地下空間にかんらん岩やコマチアイトが露出し、そこで岩石-水相互作用が進むという付帯条件が満たされなければならない。(6.1.4項)
8	大陸上の淡水環境	生命に必要な中性の水を提供し、乾湿サイクルの場を提供する。また、凍結環境も提供しうる	大陸上の湖沼	冥王代の海洋は猛毒(超酸性、超高塩分濃度、富重金属)のため、降雨によって淡水が大陸上に溜まることが極めて重要。また、月の公転によって潮の満ち引きや、湖沼における乾湿サイクルの場が出現する。(6.1.5項)
9	間欠泉	周期的に液滴、あるいは、始原的細胞を大量に生産する	ウラン鉱床	周期的な間欠泉の噴出によって、温度が上下し、DNAの自己複製機能確立を補助する。火山性マグマの熱でも間欠泉を駆動することは可能(たとえばイエローストーン)だが、生命誕生に向けたBBLs合成という点を考慮すると、不十分である。(6.1.6項, 6.1.7項)

# 諸説あり 生命の起源はどこか？ (3)自然原子炉 間欠泉説

Ebisuzaki, Maruyama (2017) GeoSci. Frontiers 8, 275-298



冥王代(めいおうだい、英: Hadean eon):地質時代の分類のひとつで、  
地球誕生から40億年前までの約5億年間

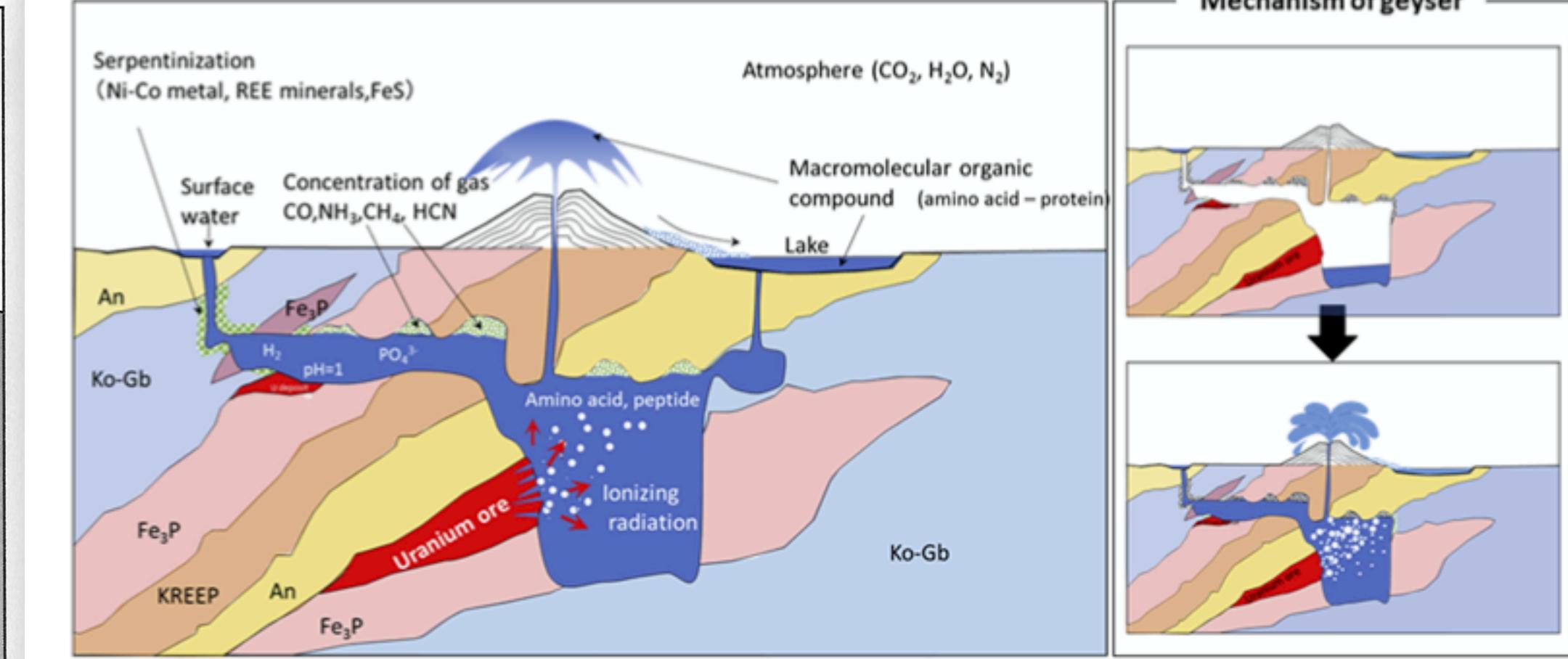


Figure 8. Nuclear geyser model.

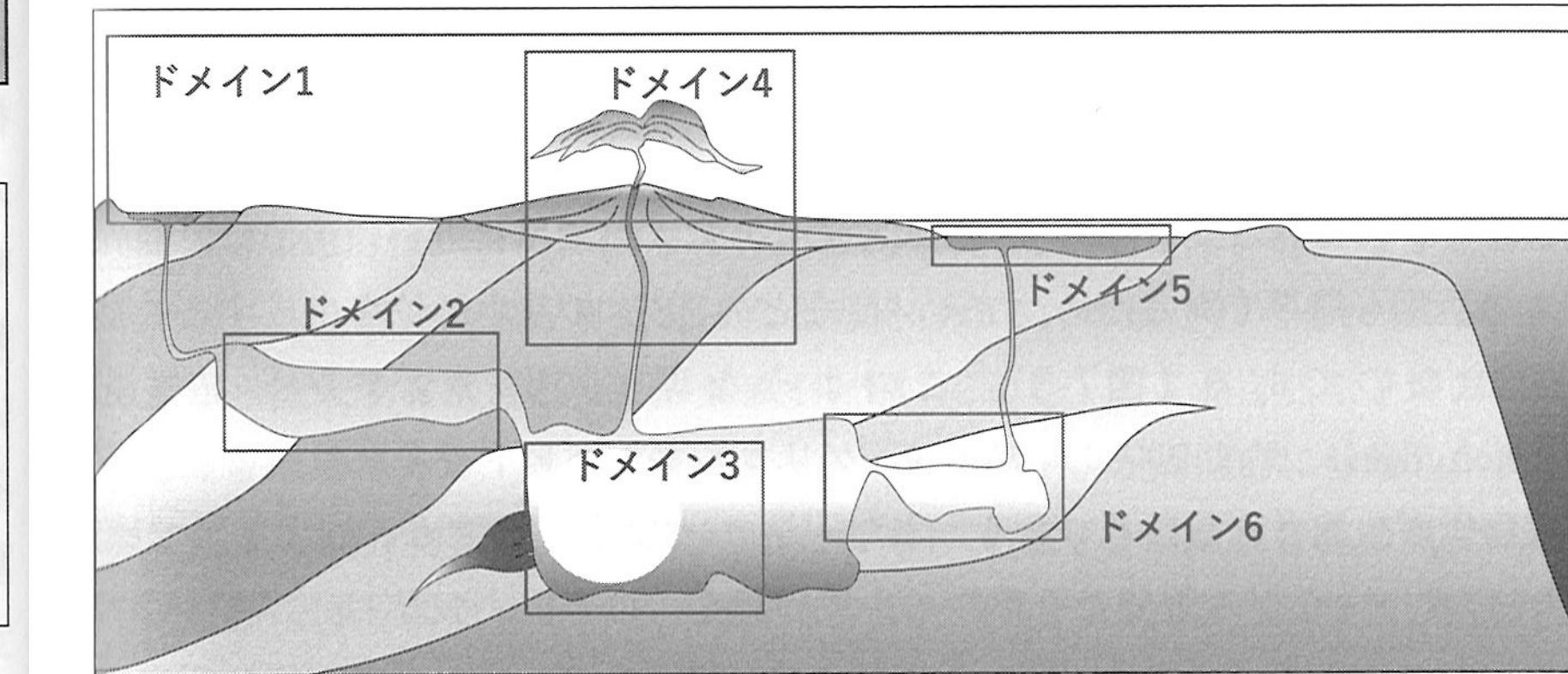


図 7-5 自然原子炉が駆動する物質循環エネルギー系  
ドメイン1:淡水と酸化大気(CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-N<sub>2</sub>)からなる表層環境  
ドメイン2:主に、コマチアイトやかんらん石が露出する地下空間  
ドメイン3:壁岩にシュライバーサイトやKREEP玄武岩、蛇紋岩が露出し、自然原子炉が駆動する間欠泉の地下空間  
ドメイン4:間欠泉内部から吹き上げられた水滴  
ドメイン5:間欠泉から放出された物質が溜まる乾湿サイクルのある湖水環境  
ドメイン6:初期生命誕生場

# 一步進んだ物理の理解

## 力学・熱・波

高校から大学初年度レベルの  
物理学を例題形式で学ぶ

花火の軌跡や工事現場のくい打ち、ジェットコースター、  
ふうせん、水飲み鳥、楽器、虹、蜃気楼…  
身のまわりの現象を物理法則を使って理解 朝倉書店

問題 2.3.1 吹き上がる間欠泉 (大分・龍巻地獄)  
提供: 浜田陽太郎



図 2.3.1 吹き上がる間欠泉 (大分・龍巻地獄)  
提供: 浜田陽太郎

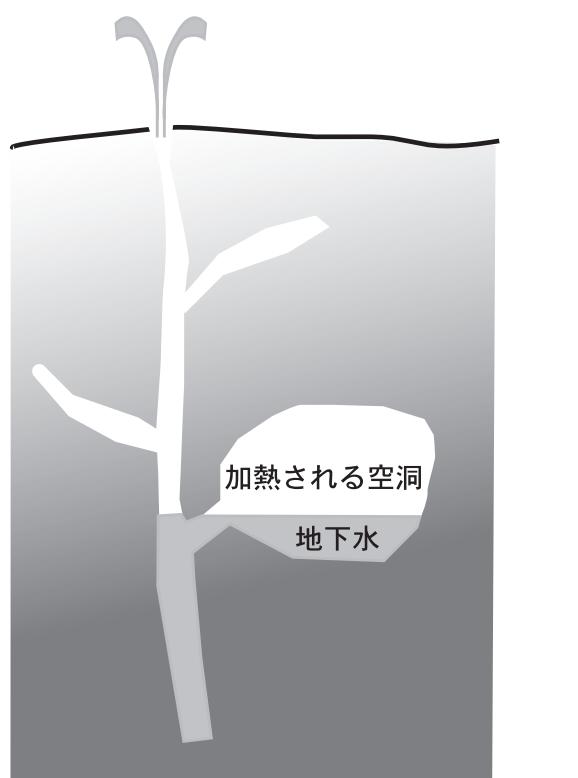


図 2.3.2 地中の想像図

#### ■別府温泉で見た間欠泉

温泉の近くなどで、数分から数時間おきに周期的に水や水蒸気が吹き出す「間欠泉」が名所になっている所がある。アメリカのイエローストーン国立公園にあるものが世界的に有名だが、日本にも多数存在する。筆者は別府温泉で、龍巻地獄と呼ばれる間欠泉を見たことがあるが、ほぼ 30 分おきに、5 分程度、10m を超える高さでお湯が吹き上げられていた（最近では安全のため、吹き出し口上部に屋根が取り付けられてしまった；図 2.3.1）。

間欠泉のしくみには諸説あるが、その中には水鉄砲のようなモデルもある。図 2.3.2 のように、間欠泉の吹き出し口から地下に長い管があり、管内には地下水が流入する。地下には空洞もあり、地熱によって常に加熱される。地下水によって空洞に閉じ込められた気体が熱膨張すると、やがて地下水を押し上げ、水は間欠泉として吹き上げられる。この現象が繰り返される、というモデルである。

高さ  $h = 10\text{ m}$  まで吹き上げられる間欠泉があったとする。この水鉄砲モデルで説明できるとして、地下の空洞がどれくらいの深さにあるのか、考えてみよう。まずは、一度に吹き上げられる水量を見積もることから始める。

#### ★★★

かんけつせん

- (1) 物体が高さ  $H = 10\text{ m}$  まで到達するとき、初速度  $v_0 [\text{m/s}]$  はいくらか。重力加速度の大きさは  $g = 9.8\text{ m/s}^2$  とする。  
(2) 高さ  $H = 10\text{ m}$  まで水が吹き上げられていたとする。吹き出し口の面積が  $S = 0.1\text{ m}^2$  だとして、吹き上げられた水の質量は毎秒どれだけか。また、5 分間では水の総量  $M [\text{kg}]$  はいくらか。  
(3) 吹き上げられた水のもっていたエネルギーの総量  $E [\text{J}]$  はいくらか。

▶ 解

(1) 力学的エネルギー保存則から

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgH \quad \text{すなわち} \quad v_0 = \sqrt{2gH}$$

となるから、

$$v_0 = \sqrt{2 \times 9.8 \times 10} = 14\text{ m/s}$$

- (2)  $\Delta T$  秒間に放出される水の体積は、 $Sv_0\Delta T [\text{m}^3]$  である（図 2.3.3）から、1 秒間では

$$m = 0.1\text{ m}^2 \times 14\text{ m/s} \times 1\text{ s} \times 10^3\text{ kg/m}^3 = 1.4 \times 10^3\text{ kg} \quad (2.3.1)$$

すなわち、 $1.4\text{ t}$  である。5 分間では、

$$M = 0.1\text{ m}^2 \times 14\text{ m/s} \times 300\text{ s} \times 10^3\text{ kg/m}^3 = 4.2 \times 10^5\text{ kg} \quad (2.3.2)$$

すなわち、 $420\text{ t}$  である。

- (3) 与えられた運動エネルギーの総量は、

$$E = \frac{1}{2}Mv_0^2 = 4.116 \times 10^8\text{ J} \quad \square$$

5 分間で、ジャンボジェット 1 機分の質量の水が噴き出していることになる。ちょっと驚きだ。

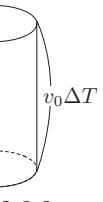


図 2.3.3

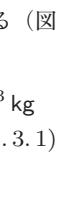


図 2.3.4

▶ 解

(7) 理想気体の状態方程式  $p_0V = nRT_0$  より  $T_0 = \frac{p_0V}{nR}$ 。

(8) 外部に仕事をしないので、加えられた熱  $Q$  はすべて内部エネルギーの増加に使われる。

1 秒当たりの温度上昇を  $\Delta T$  とする。 $Q = nC_V\Delta T$ 。したがって、 $\Delta T = \frac{Q}{nC_V}$ 。

(9) 上記の  $t$  倍だから、 $\frac{Q}{nC_V}t$ 。ボイル・シャルルの法則より、 $\frac{p_0V}{T_0} = \frac{p(t)V}{T(t)}$ 。これよ

り、 $\frac{T(t)}{T_0} = \frac{p(t)}{p_0}$ 。⑨のとき  $T(t_1) = xT_0$  となるので、 $p(t_1) = x p_0$ 。

問題 2.3.4

次に、弁から出た気体が、物体を押し出す過程を考えよう。図 2.3.4 のように、弁の上には断面積が  $S [\text{m}^2]$  の管が接続されており、その内部には上下に動く質量  $m [\text{kg}]$  のピストンが静止している。ピストンと管の間はなめらかであり、ピストンには摩擦ははたらかないものとする。

弁が開くと、ピストンには、弁から排出された気体による圧力が下部から新たに加わり、上向きに動き始める。そして、ピストンは、管の中を  $d [\text{m}]$  だけ押し上げられ

て打ち出された。この状態（瞬間）を ③ とする。

管の体積は容器の体積に比べて非常に小さく、また、② から ③ までの時間は短くて、この間に加えられた熱量は無視できるとしよう。そうであれば、② ～ ③ の過程では、ピストンに加わる下部からの気体の圧力は、 $p(t_1) = \boxed{\text{ウ}}$  のまま一定であると考えられる。

(10) ピストンに生じる加速度を  $a [\text{m/s}^2]$  として、重力加速度の大きさを  $g$  として、ピストンの運動方程式を立てよ。また、③ でのピストンの速さ  $v_0 [\text{m/s}]$  は、どう表されるか。

(11) 管から打ち出されたピストンは、鉛直上方に投げ出された重力のみによる運動をする。管の上端から測った最高点の高さ  $H [\text{m}]$  を、 $a$  と  $d$  と  $g$  を用いて表せ。

(12)  $p_0 = 1.0 \times 10^5\text{ Pa}$ ,  $S = 0.1\text{ m}^2$ ,  $m = 1.4 \times 10^3\text{ kg}$ ,  $H = 10\text{ m}$  のとき、 $d$  を用いて表せ。 $d = 100\text{ m}$  のとき、 $x$  はいくらになるか。

▶ 解

(10) 下向きに  $mg + p_0S$ 、上向きに  $xp_0S$  の力が加わるので、運動方程式は  $ma = xp_0S - (mg + p_0S) = (x - 1)p_0S = mg$

これより等加速度運動をするので、 $v_0^2 - 0^2 = 2da$ 。したがって、 $v_0 = \sqrt{2da}$ 。

(11)  $v_0$  で飛び出した後は、 $v_0^2 - 0^2 = 2Hg$  より、 $H = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{2da}{2g} = \frac{a}{g}$ 。

(12)  $d = \frac{g}{a}H = \frac{mg}{(x-1)p_0S - mg}H = \frac{1.4 \times 10^3 \times 9.8}{(x-1) \times 10^5 \times 0.1 - 1.4 \times 10^3 \times 9.8} \times 10 = \frac{13.7}{x-2.37}$   
すなわち、この式から、水を吹き上げる空気の圧力の大気圧に対する比  $x$  と、管の長さ  $d$  の関係がついた。 $d = 100\text{ m}$  のとき、 $x = 2.51$  である。

問題 2.3.5

管からピストンが飛び出す同時に、管からは気体の一部も飛び出す。管と容器の中が再び大気圧になるまでの時間は短く、この間に温度変化がないとすれば、はじめにあった  $n [\text{mol}]$  の気体のうち、 $\boxed{\text{エ}}$  % の気体が飛び出すことになる。

▶ 解

飛び出す直前は  $xp_0(V+Sd) = nRT'$ 、大気圧になったときは  $p_0(V+Sd) = n'RT'$  が成り立つから、 $n' = n/x$ 。したがって、 $n - n' = \frac{x-1}{x}n$  なので、 $\frac{x-1}{x} \times 100$  %

$x = 2.5$  とすれば、60% になる。

このように、空気鉄砲モデルで、間欠泉を考えてみたが、これはあくまでも簡略化したモデルである。例えば、問題 2.3.4 で下線を引いた部分（管の体積は容器の体積に比べて

非常に小さい）は仮定である。実際には地下の管の長さや大きさによっては、管の体積が無視できず、定圧変化でピストンが押し上げられるとして、押し上げる気体の温度は低下していくことだろう。したがって、問題 2.3.5 の推定も変わってくることになる。

- (1) 物体が高さ  $H = 10\text{ m}$  まで到達するとき、初速度  $v_0 [\text{m/s}]$  はいくらか。重力加速度の大きさは  $g = 9.8\text{ m/s}^2$  とする。  
(2) 高さ  $H = 10\text{ m}$  まで水が吹き上げられていたとする。吹き出し口の面積が  $S = 0.1\text{ m}^2$  だとして、吹き上げられた水の質量は毎秒どれだけか。また、5 分間では水の総量  $M [\text{kg}]$  はいくらか。  
(3) 吹き上げられた水のもっていたエネルギーの総量  $E [\text{J}]$  はいくらか。

▶ 解

(1) 力学的エネルギー保存則から

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgH \quad \text{すなわち} \quad v_0 = \sqrt{2gH}$$

となるから、

$$v_0 = \sqrt{2 \times 9.8 \times 10} = 14\text{ m/s}$$

- (2)  $\Delta T$  秒間に放出される水の体積は、 $Sv_0\Delta T [\text{m}^3]$  である（図 2.3.3）から、1 秒間では

$$m = 0.1\text{ m}^2 \times 14\text{ m/s} \times 1\text{ s} \times 10^3\text{ kg/m}^3 = 1.4 \times 10^3\text{ kg} \quad (2.3.1)$$

すなわち、 $1.4\text{ t}$  である。5 分間では、

$$M = 0.1\text{ m}^2 \times 14\text{ m/s} \times 300\text{ s} \times 10^3\text{ kg/m}^3 = 4.2 \times 10^5\text{ kg} \quad (2.3.2)$$

すなわち、 $420\text{ t}$  である。

- (3) 与えられた運動エネルギーの総量は、

$$E = \frac{1}{2}Mv_0^2 = 4.116 \times 10^8\text{ J} \quad \square$$

5 分間で、ジャンボジェット 1 機分の質量の水が噴き出していることになる。ちょっと驚きだ。

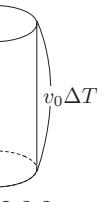


図 2.3.3

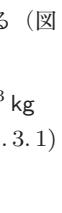


図 2.3.4

▶ 解

(7) 理想気体の状態方程式  $p_0V = nRT_0$  より  $T_0 = \frac{p_0V}{nR}$ 。

(8) 外部に仕事をしないので、加えられた熱  $Q$  はすべて内部エネルギーの増加に使われる。

1 秒当たりの温度上昇を  $\Delta T$  とする。 $Q = nC_V\Delta T$ 。したがって、 $\Delta T = \frac{Q}{nC_V}$ 。

(9) 上記の  $t$  倍だから、 $\frac{Q}{nC_V}t$ 。ボイル・シャルルの法則より、 $\frac{p_0V}{T_0} = \frac{p(t)V}{T(t)}$ 。これよ

り、 $\frac{T(t)}{T_0} = \frac{p(t)}{p_0}$ 。⑨のとき  $T(t_1) = xT_0$  となるので、 $p(t_1) = x p_0$ 。

問題 2.3.4

次に、弁から出た気体が、物体を押し出す過程を考えよう。図 2.3.4 のように、弁の上には断面積が  $S [\text{m}^2]$  の管が接続されており、その内部には上下に動く質量  $m [\text{kg}]$  のピストンが静止している。ピストンと管の間はなめらかであり、ピストンには摩擦ははたらかないものとする。

弁が開くと、ピストンには、弁から排出された気体による圧力が下部から新たに加わり、上向きに動き始める。そして、ピストンは、管の中を  $d [\text{m}]$  だけ押し上げられ

# 諸説あり 生命の起源はどこか？（3）自然原子炉 間欠泉説

Ebisuzaki, Maruyama (2017) GeoSci. Frontiers 8, 275-298

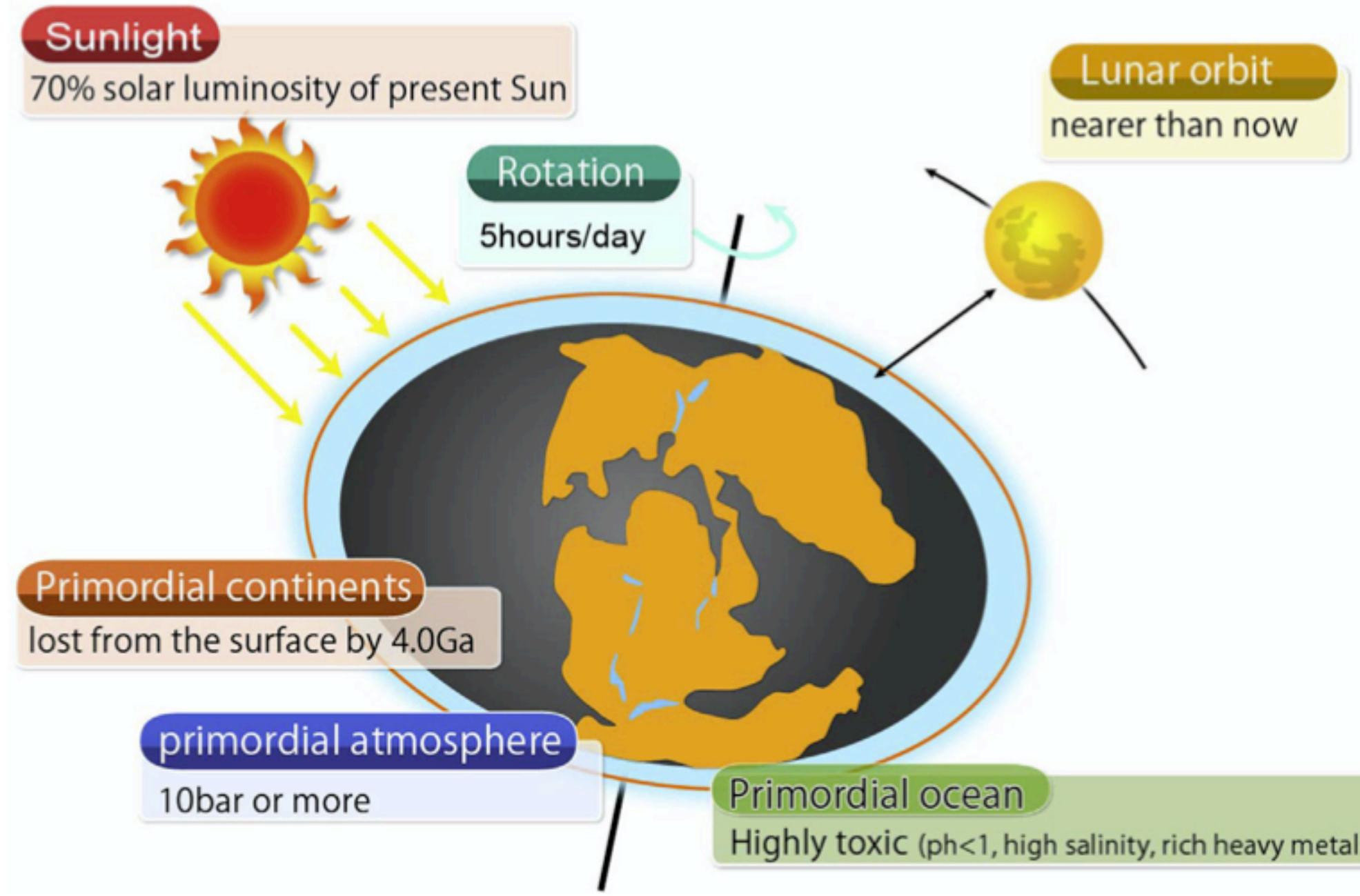


Figure 2. The environment of the Hadean Earth.

冥王代は月が近く、地球の自転は5時間で激しい潮汐があった。  
大気も薄く、宇宙からの放射線も強かった。

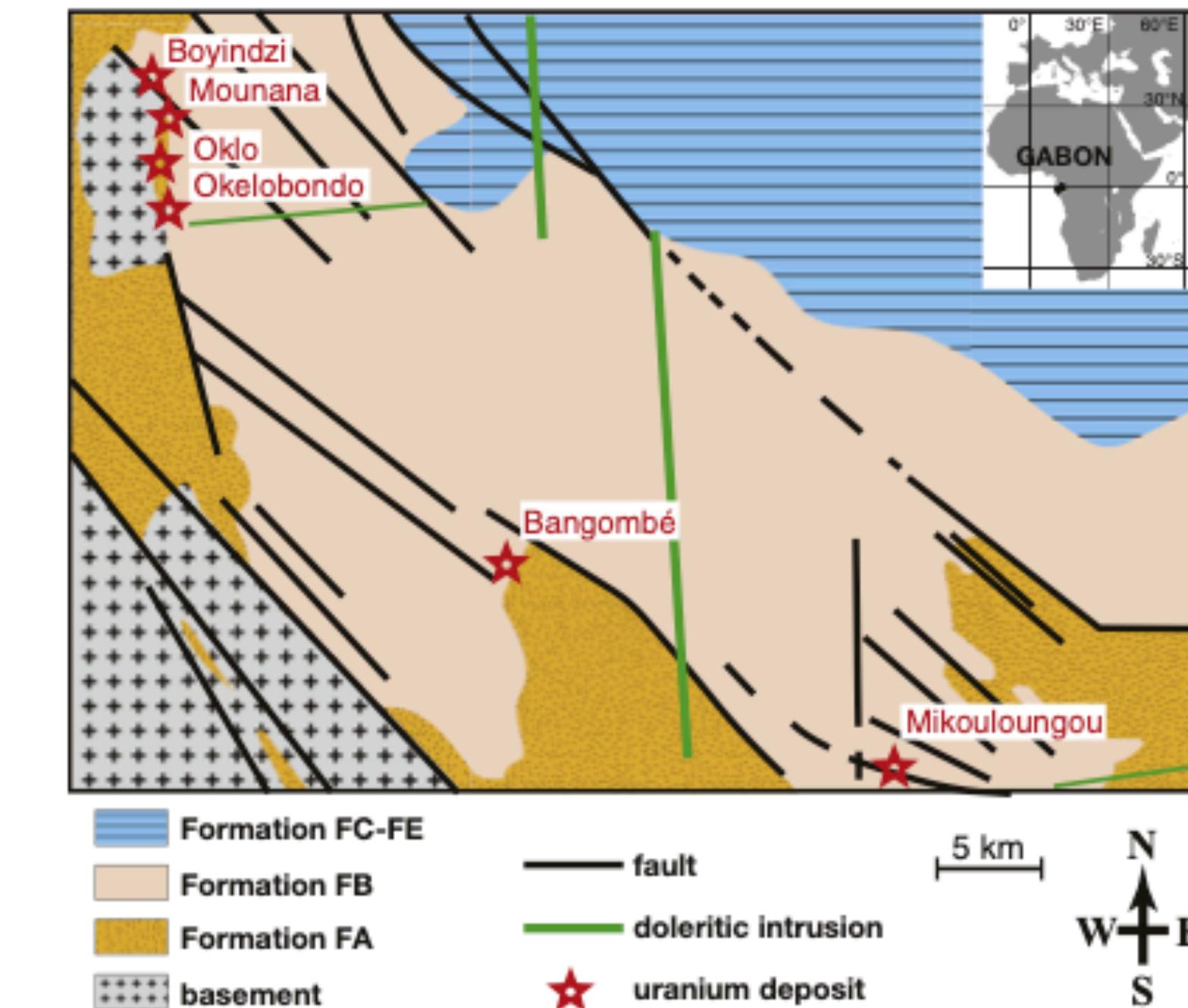
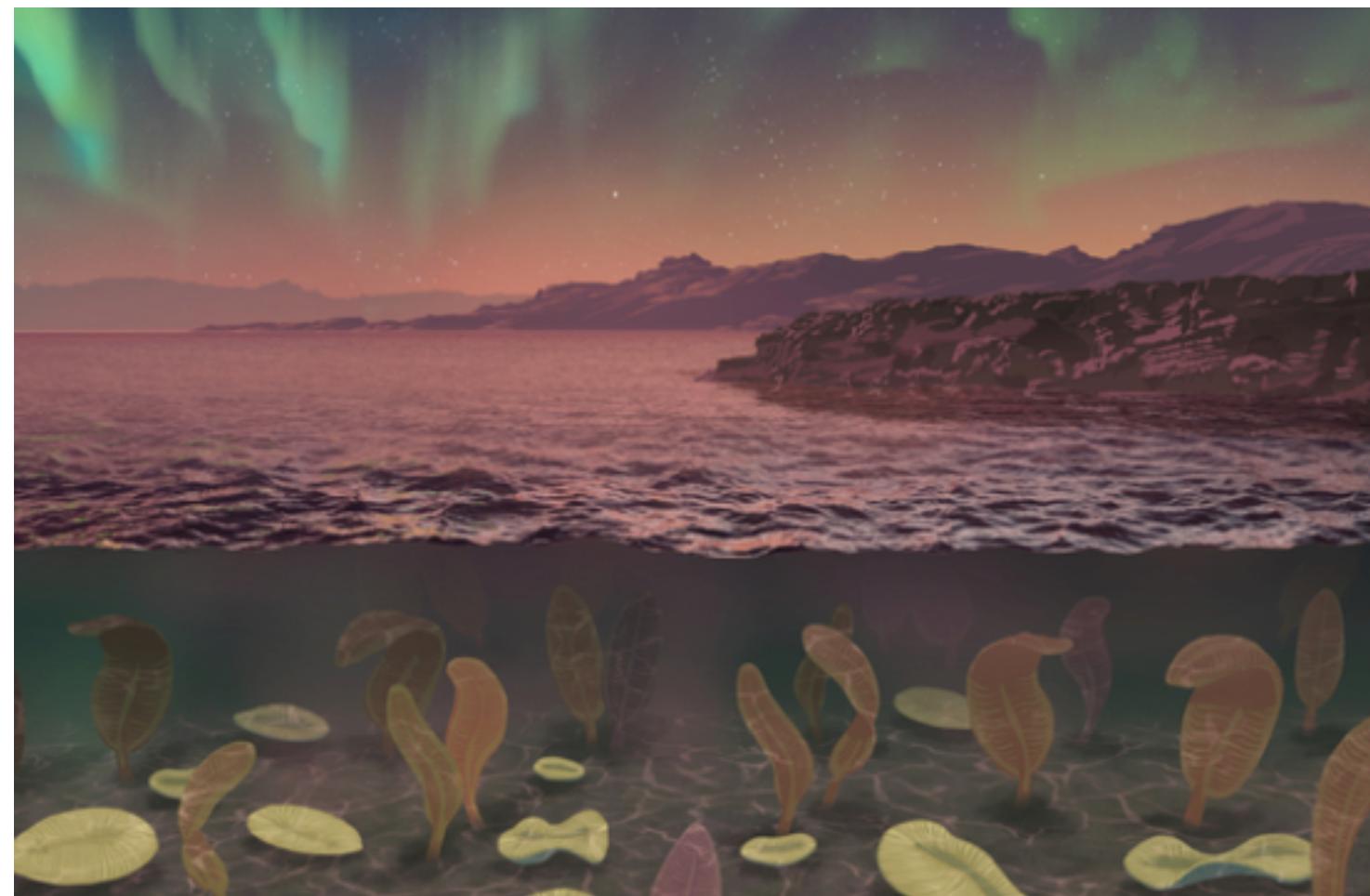


Figure 4. Geological map of Oklo area, Gabon, on the west coast of Central Africa. The map shows the locality of six major U-deposits. Note the ore-body occurs along the shear zones originally generated by high-angle normal faults made when basins were formed (after Bentridi et al., 2013).

自然原子炉の例  
23億年前～21億年前、ガボン共和国オクロには、  
自然原子炉が存在していた



米口チェスター大のグループは、ブラジルの岩石層にある斜長石の磁性鉱物から、地球の磁場の強さを過去にわたって分析した。その結果、5億9100万年前から2600万年間、地球の磁場は現在の30分の1程度の強さで、史上最底レベルだったことがわかった。

この時代は、骨や殻を持たない軟体生物が海を支配していて、酸素濃度が増え、生命の多様化が進んだ時代である。

生物進化の考えるシナリオは次のようなものだ。

太陽からのプラズマ粒子が地球に達し、オゾン層を破壊。降り注ぐ紫外線が大気中の水分子を分解し、軽い水素は宇宙に逃げ、重い酸素は地球に残った。

結果、数千万年間で酸素が増え、それまで単細胞を中心だった初期の生命が、多くの酸素を必要とする大きくて複雑で高度な生命に進化していった。地球の磁場はその後、強さが回復し、次に訪れたカンブリア紀で生物の種や数が爆発的に多様化し、今に至っている。

地球の核の動きが活発に戻ったことで磁場は復活した。地球の磁場が元に戻らなければ、水が失われ、地球は乾燥した惑星になりはてた可能性がある。

Article | [Open access](#) | Published: 02 May 2024

## Near-collapse of the geomagnetic field may have contributed to atmospheric oxygenation and animal radiation in the Ediacaran Period

[Wentao Huang](#), [John A. Tarduno](#)✉, [Tinghong Zhou](#), [Mauricio Ibañez-Mejía](#), [Laércio Dal Olmo-Barbosa](#), [Edinei Koester](#), [Eric G. Blackman](#), [Aleksey V. Smirnov](#), [Gabriel Ahrendt](#), [Rory D. Cottrell](#), [Kenneth P. Kodama](#), [Richard K. Bono](#), [David G. Sibeck](#), [Yong-Xiang Li](#), [Francis Nimmo](#), [Shuhai Xiao](#) & [Michael K. Watkeys](#)

[Communications Earth & Environment](#) 5, Article number: 207 (2024) | [Cite this article](#)

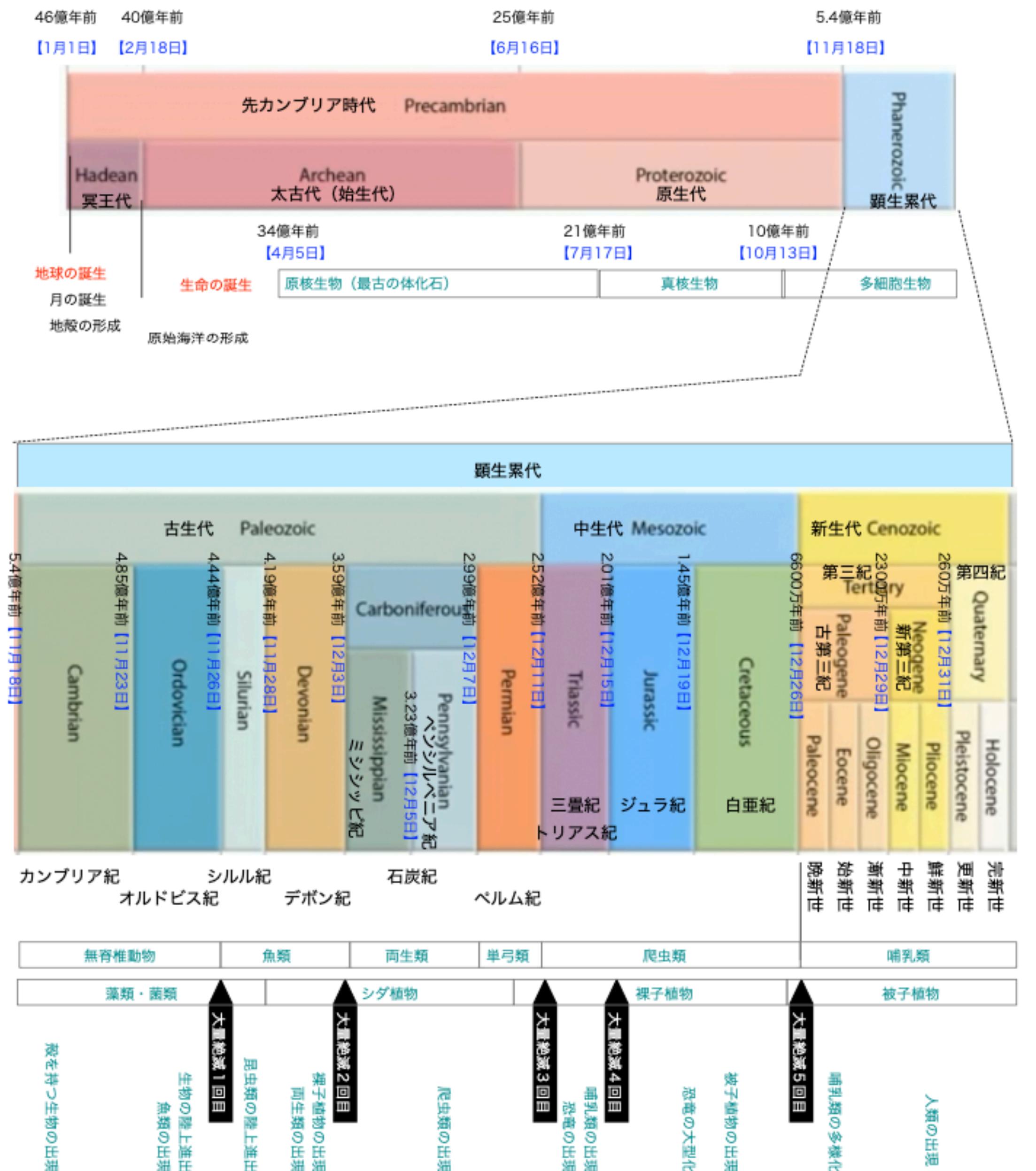
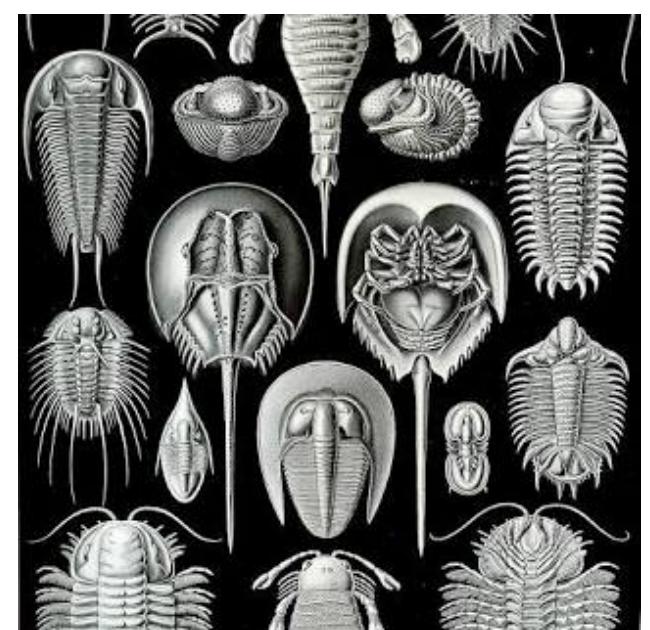


図 1.1: 地球史（地質年代と生物出現のおもなできごと）46 億年の  
図。46 億年を 1 年と見立てたときの日付も入れた。

## 左右相称動物 (Bilateria)



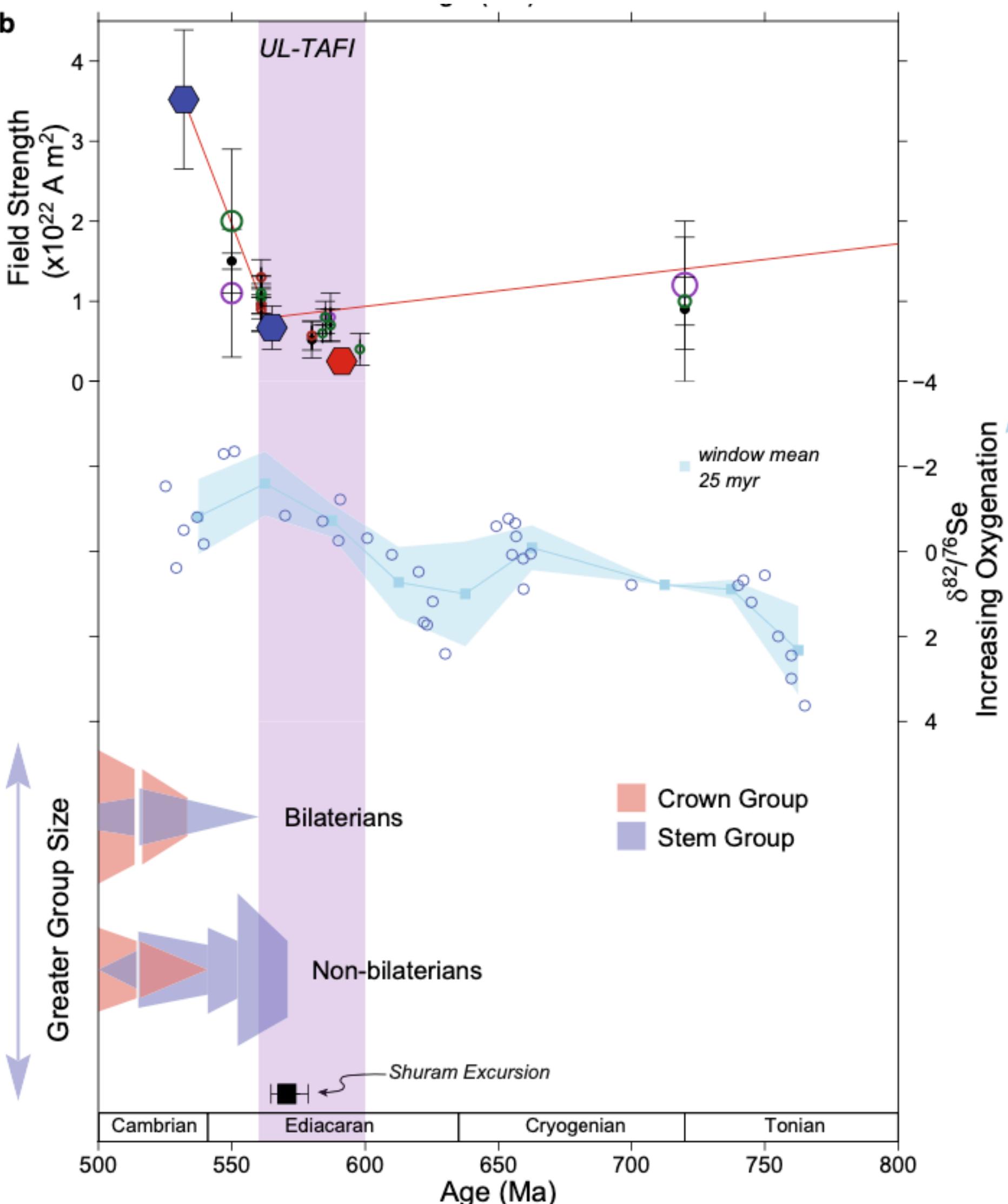
Article | [Open access](#) | Published: 02 May 2024

### Near-collapse of the geomagnetic field may have contributed to atmospheric oxygenation and animal radiation in the Ediacaran Period

Wentao Huang, John A. Tarduno, Tinghong Zhou, Mauricio Ibañez-Mejia, Laércio Dal Olmo-Barbosa, Edinei Koester, Eric G. Blackman, Aleksey V. Smirnov, Gabriel Ahrendt, Rory D. Cottrell, Kenneth P. Kodama, Richard K. Bono, David G. Sibeck, Yong-Xiang Li, Francis Nimmo, Shuhai Xiao & Michael K. Watkeys

[Communications Earth & Environment](#) 5, Article number: 207 (2024) | [Cite this article](#)

<https://www.nature.com/articles/s43247-024-01360-4>



**Fig. 3 | Paleointensity, oxygen and animal evolution.** **a** Field strength constrained from select Thellier (thermal) SCP studies (blue squares, hexagons) and bulk rock studies (gray squares) updated from Zhou et al.<sup>22</sup>, with new time-averaged SCP results (red hexagons) reported here. Large squares are time-averaged paleomagnetic dipole moments; small squares are virtual dipole moments (VDMs). Gray circles are select Phanerozoic VDMs from Bono et al.<sup>1</sup>. Field evolution model (3450 Ma to 565 Ma, red line) is weighted second-order polynomial regression of Precambrian field strength data from Bono et al.<sup>1</sup>; 565 to 532 Ma trend from Zhou et al.<sup>22</sup>. **b** Cryogenian to Cambrian field strength evolution corresponding to dashed rectangle in (a). Open circles are results from non-Thellier methods (non-thermal and thermal) and their sizes are weighted by the numbers of cooling units from Zhou et al.<sup>22</sup>. Key: green, microwave method; purple, Shaw method; black, Wilson method. Brown open circles are Thellier thermal results. Ultra-low time averaged field interval (UL-TAFI) highlighted by light purple rectangle. Also shown are selenium isotopic data (open symbols) and oxygenation interpretation from Pogge von Strandmann et al.<sup>20</sup> (shown here with a 25 myr window mean and  $1\sigma$  error), summary animal radiation of bilaterian and non-bilaterians from Zhuravlev and Wood<sup>65</sup>, Wood et al.<sup>3</sup>, Darroch et al.<sup>66</sup> and Muscente et al.<sup>67</sup>, and Shuram excursion ages from Rooney et al.<sup>42</sup>.

エディアカラ紀中期Shuramエクスカーションは地球史における最も顕著な負の炭素同位体シフトを示し、地球規模の炭素循環への著しい混乱の証拠と考えられ、エディアカラ紀層序細分と地球規模対比のための重要な化学層序マーカーとして提案されている。

# ドレークの式

1960年にアメリカの天文学者ドレークが発表した  
「地球外文明の数を推定する式」

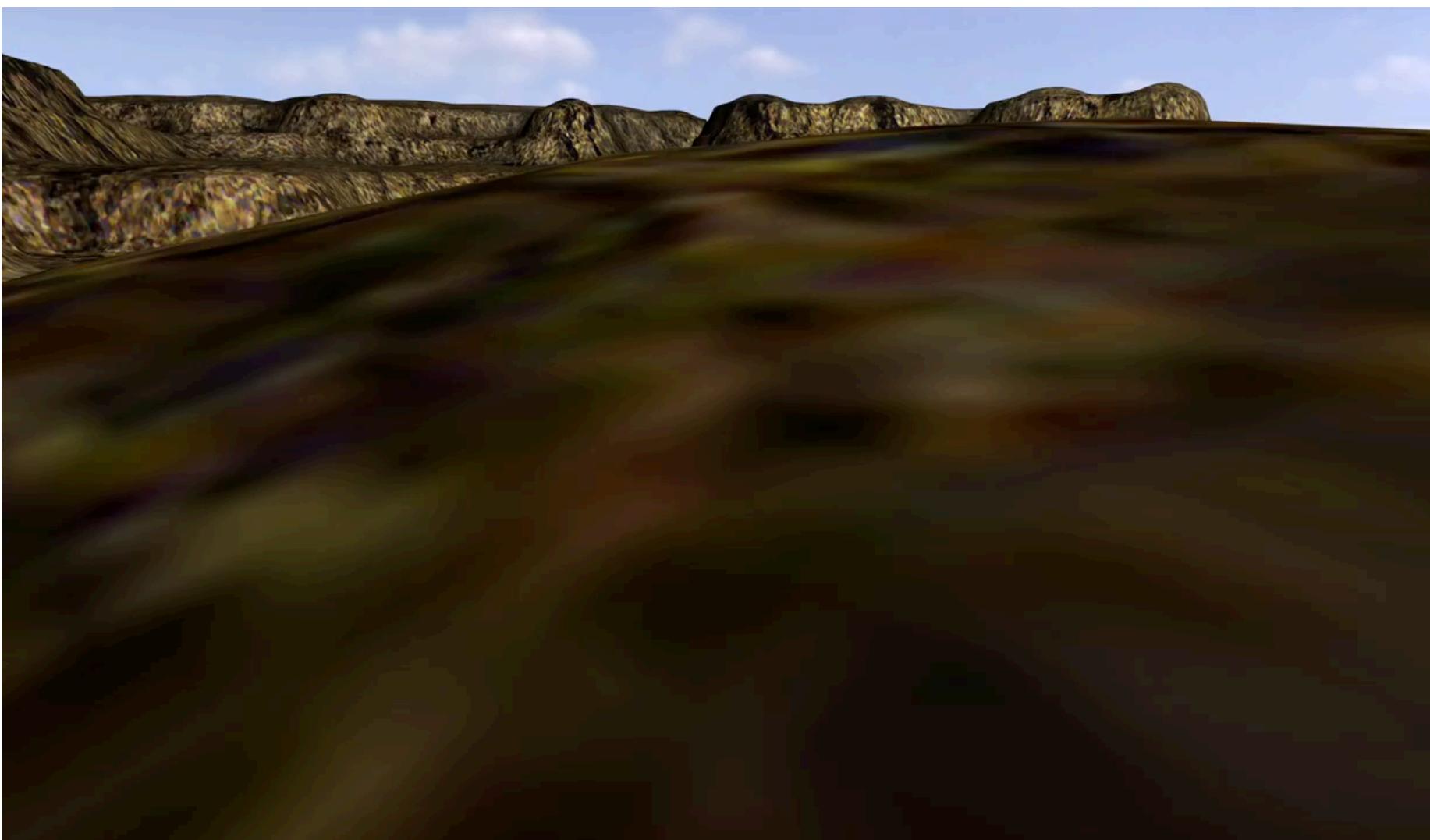


Frank D Drake  
1930-2022

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_\ell \times f_i \times f_c \times L$$

		楽観論	中間論	悲観論
$R_*$	銀河系で毎年生成される星の数（個/年）	50	20	1
$f_p$	生成される星のうち惑星系を持つ星の割合	1.0	0.5	極めて小
$n_e$	星の周りで生命にとって適当な環境を持つ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
$f_\ell$	そうした惑星上で生命が発生する確率	1.0	0.5	極めて小
$f_i$	生命が知的文明段階にまで進化する確率	1.0	0.1	極めて小
$f_c$	知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合	1.0	0.5	極めて小
$L$	そのような技術文明の平均寿命	$10^8$	$10^4$	100

# STARSHOT計画



20年後

数cm角の小さな衛星を  
アルファ・ケンタウリ(4.3光年先)  
に向けて光速の20%で飛ばす

20年かけて到達

映像取得

4年後、 地球に映像届く

<https://www.youtube.com>

<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

The story of humanity is a story of great leaps – out of Africa, across oceans, to the skies and into space. Since Apollo 11's 'moonshot' we have been sending our machines ahead of us – to planets, comets, even interstellar space.

But with current rocket propulsion technology, it would take tens or hundreds of millennia to reach our neighboring star system, Alpha Centauri. The stars, it seems, have set strict bounds on human destiny. Until now.

In the last decade and a half, rapid technological advances have opened up the possibility of light-powered space travel at a significant fraction of light speed. This involves a ground-based **light beamer** pushing ultra-light **nanocrafts** – miniature space probes attached to **lightsails** – to speeds of up to 100 million miles an hour. Such a system would allow a flyby mission to reach Alpha Centauri in just over 20 years from launch, beaming home images of its recently-discovered planet Proxima b, and any other planets that may lie in the system, as well as collecting other scientific data such as analysis of magnetic fields.

Breakthrough Starshot aims to demonstrate proof of concept for ultra-fast light-driven nanocrafts, and lay the foundations for a first launch to Alpha Centauri within the next generation. Along the way, the project could generate important supplementary benefits to astronomy, including solar system exploration and detection of Earth-crossing asteroids.

# 宇宙論研究のまとめ

- 1917年, アインシュタインは一般相対性理論を宇宙に適用し, 膨張する解を見出し, 混乱して宇宙項を導入. 静的なつりあい宇宙を考える. 膨張宇宙を考える科学者を批判するが, 後に宇宙が膨張していることが観測されると, 宇宙項の導入を取り下げる.
- 1946年, ガモフは宇宙が火の玉からはじまった, とする説を唱え, のちにビッグバン宇宙説と改称. 定常宇宙モデル派と長く論争が続いたが, 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の発見で決着がついた.
  - 1963年, CMBの発見.

▶▶ この業績でペンジアスとウィルソン, 1978年度ノーベル物理学賞受賞
  - 1992年, COBE衛星によるCMBの詳細観測で初期ゆらぎの存在を発見.

▶▶ この業績でマザーとスマート, 2006年度ノーベル物理学賞受賞
  - ビッグバン宇宙モデルの一連の理論的研究 ▶▶ ピーブルズ, 2019年度ノーベル物理学賞受賞

## 未解決問題

ダークマターの正体は何か. ダークエネルギーは必要か. 初代星の形成はいつ頃か(ダークエイジ問題).

- 1995年, 太陽系外惑星の発見▶▶ この業績でマイヨールとケロー, 2019年度ノーベル物理学賞受賞
- 今日までに5500を超える太陽系外惑星が発見されている. ハビタブルゾーンにある惑星も500以上.

## 未解決問題

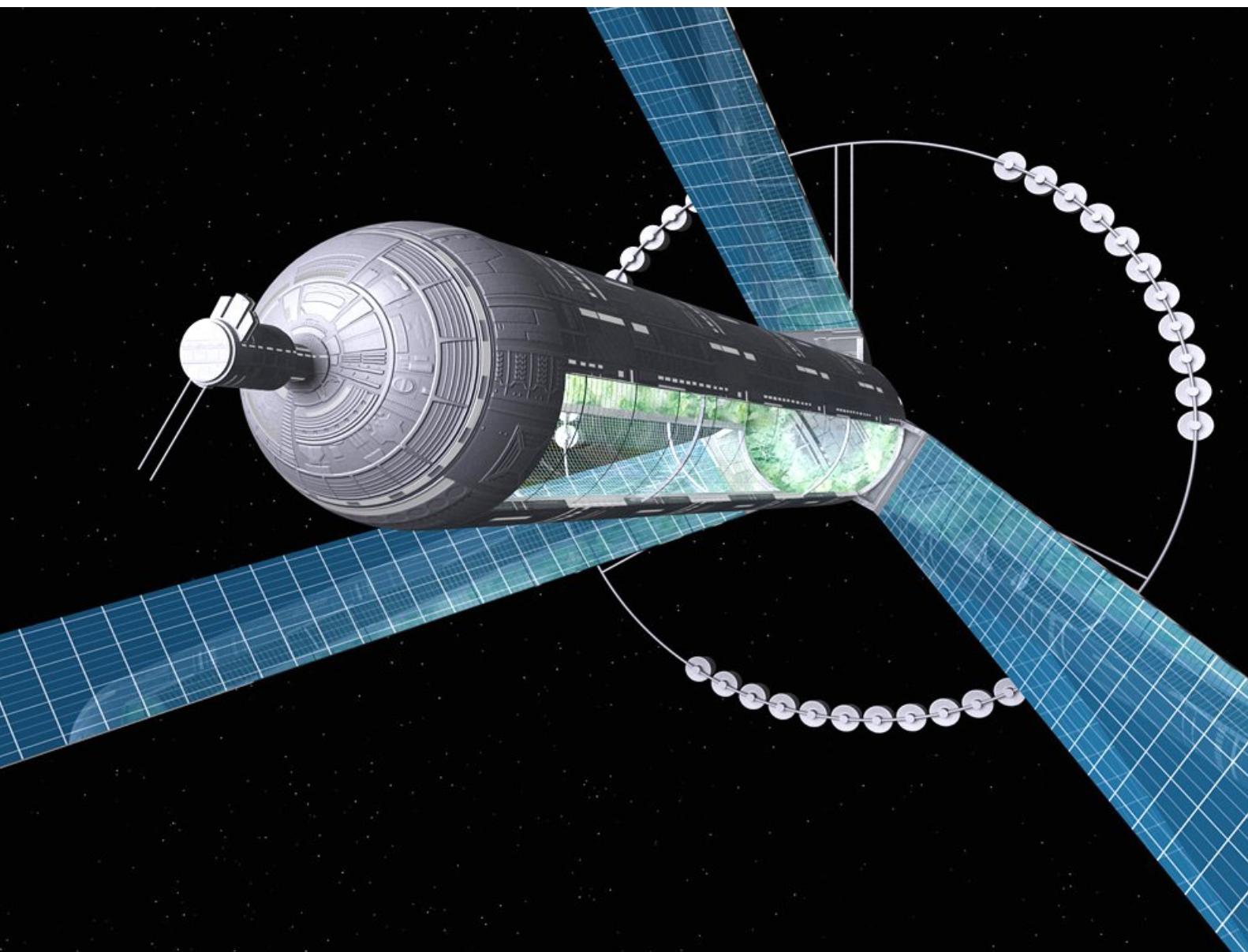
生命の痕跡は見られるか. 生命の起源は何か.

おこ何年あれば他の惑星に移り住みとと思ひますか

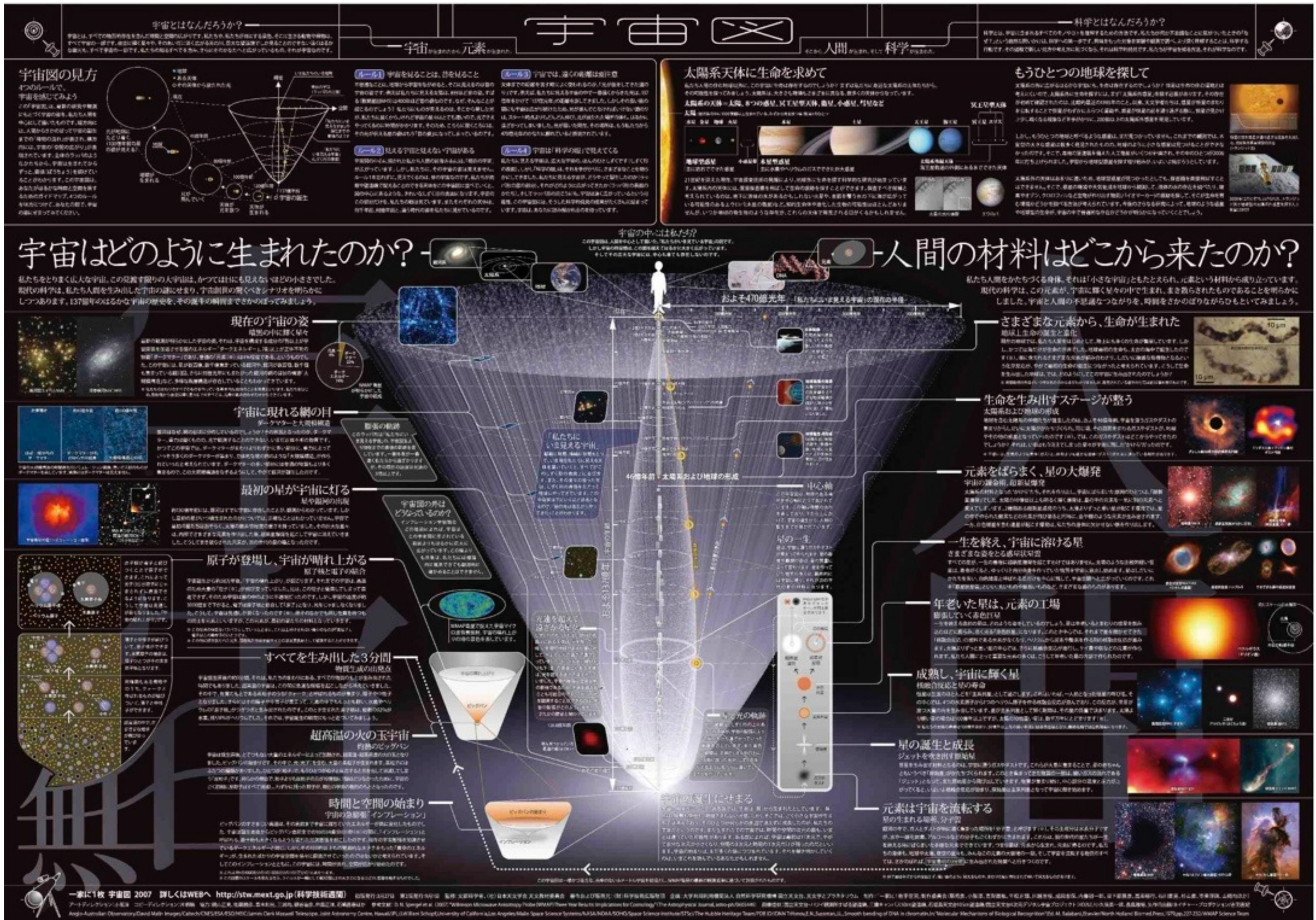
私たちが住めるようになる惑星についての話を聞きたい。

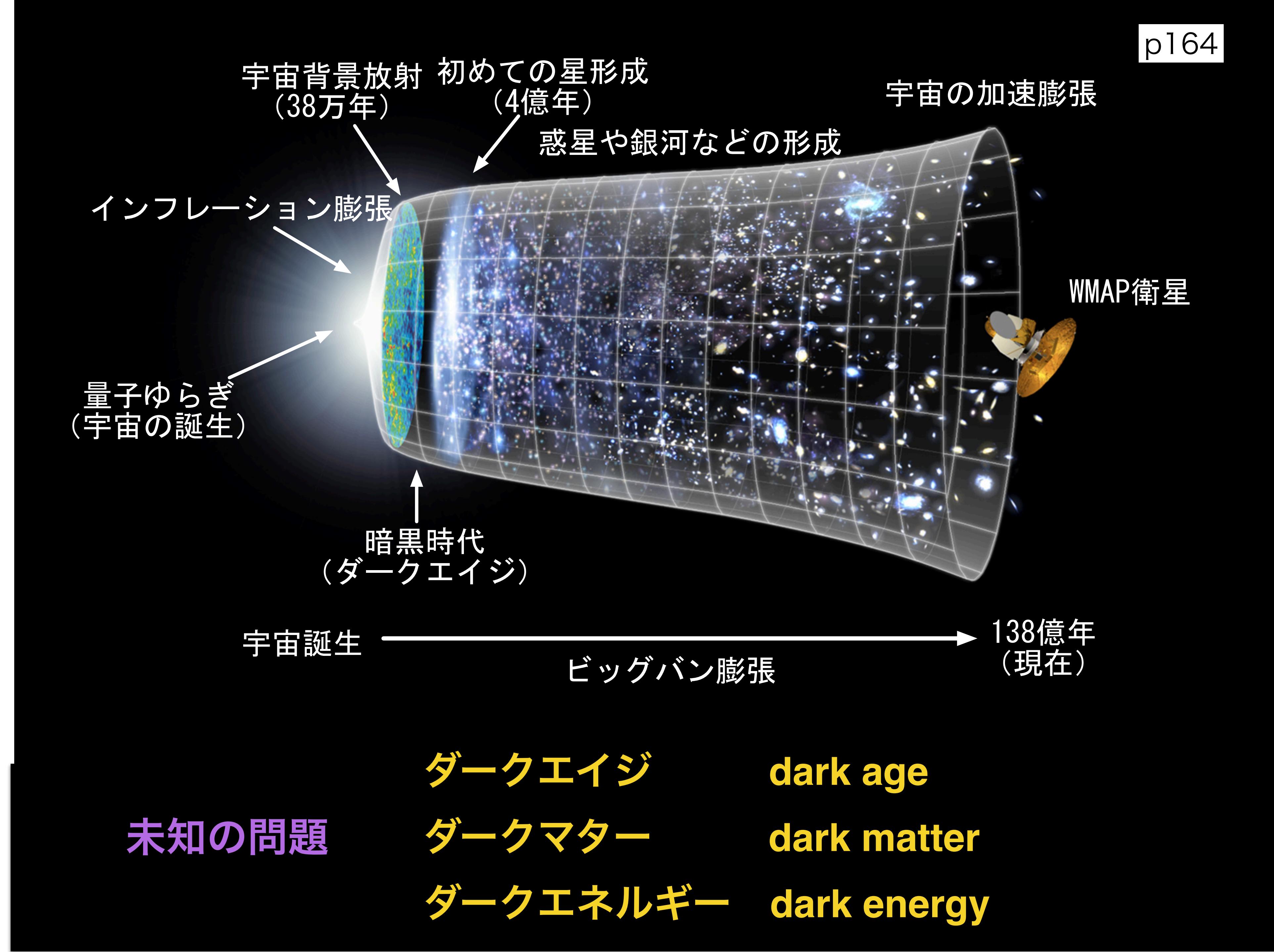
他の惑星に生命が存在する可能性はどのくらいありますか

移住するとしたら火星までが候補。放射線被曝の問題は未解決。  
スペースコロニー構想も夢の段階。



遠くの宇宙を見る = 過去の姿を見る





Full-hydro Large-scale structure simulations with All-sky Mapping for the Interpretation of Next Generation Observations.

<https://flamingo.strw.leidenuniv.nl>



## The FLAMINGO project

Key features:

- Three resolutions: high/m8 (baryonic particle mass  $m_g = 1.3 \times 10^8 M_\odot$ ), intermediate/m9 ( $m_g = 1.1 \times 10^9 M_\odot$ ), and low/m10 ( $m_g = 8.6 \times 10^9 M_\odot$ )
- Flagship simulations: 2.8 Gpc box size at m9 resolution (L2p8\_m9) and 1 Gpc at m8 resolution (L1\_m8)
- Up to  $3 \times 10^{11}$  particles ( $2 \times 5040^3 + 2800^3$ )
- Subgrid feedback is calibrated to the  $z=0$  galaxy stellar mass function and low- $z$  cluster gas fractions using Gaussian process emulation
- Massive neutrinos are modeled using particles with the '**δf**' method that was designed to reduce shot noise
- Twelve L1\_m9 variations: eight simulations varying the calibration data and four varying the cosmology
- Full-sky lightcone particle data and HEALPix maps for up to 8 different observer locations
- Run with the **Swift** code and **SPHENIX** smoothed particle hydrodynamics implementation
- 3-fluid initial conditions with separate transfer functions for CDM, baryons and neutrinos, perturbing particle masses rather than positions to suppress discreteness noise

## Full-hydro Large-scale structure simulations with All-sky Mapping for the Interpretation of Next Generation Observations.

<https://flamingo.strw.leidenuniv.nl>**The FLAMINGO project: cosmological hydrodynamical simulations for large-scale structure and galaxy cluster surveys**

Joop Schaye <sup>1</sup>, Roi Kugel <sup>1</sup>, Matthieu Schaller <sup>1,2</sup>, John C. Helly, <sup>3</sup> Joey Braspenning, <sup>1</sup>  
Willem Elbers <sup>1,3</sup>, Ian G. McCarthy <sup>1,4</sup>, Marcel P. van Daalen <sup>1</sup>, Bert Vandenbroucke <sup>1</sup>,  
Carlos S. Frenk, <sup>3</sup> Juliana Kwan, <sup>4</sup> Jaime Salcido <sup>1,4</sup>, Yannick M. Bahé <sup>1,5</sup>, Josh Borrow <sup>1,3,6</sup>,  
Evgenii Chaikin <sup>1</sup>, Oliver Hahn <sup>1,7,8</sup>, Filip Huško <sup>1</sup>, Adrian Jenkins <sup>1</sup>, Cedric G. Lacey <sup>1</sup>  
and Folkert S. J. Nobels <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Leiden Observatory, Leiden University, PO Box 9513, 2300 RA Leiden, the Netherlands<sup>2</sup>Lorentz Institute for Theoretical Physics, Leiden University, PO Box 9506, 2300 RA Leiden, the Netherlands<sup>3</sup>Institute for Computational Cosmology, Department of Physics, University of Durham, South Road, Durham, DH1 3LE, UK<sup>4</sup>Astrophysics Research Institute, Liverpool John Moores University, Liverpool L3 5RF, UK<sup>5</sup>Institute of Physics, Laboratory of Astrophysics, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Observatoire de Sauverny, 1290 Versoix, Switzerland<sup>6</sup>Department of Physics, Kavli Institute for Astrophysics and Space Research, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA<sup>7</sup>Department of Astrophysics, University of Vienna, Türkenschanzstrasse 17, 1180 Vienna, Austria<sup>8</sup>Department of Mathematics, University of Vienna, Oskar-Morgenstern-Platz 1, 1090 Vienna, Austria

Accepted 2023 August 4. Received 2023 July 29; in original form 2023 June 5

Monthly Notices  
of the  
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY  
MNRAS 526, 6103–6127 (2023)  
Advance Access publication 2023 October 5  
<https://doi.org/10.1093/mnras/stad2540>

## FLAMINGO: calibrating large cosmological hydrodynamical simulations with machine learning

Roi Kugel <sup>1</sup>, Joop Schaye <sup>1</sup>, Matthieu Schaller <sup>1,2</sup>, John C. Helly, <sup>3</sup> Joey Braspenning, <sup>1</sup>  
Willem Elbers <sup>1,3</sup>, Carlos S. Frenk, <sup>3</sup> Ian G. McCarthy <sup>1,4</sup>, Juliana Kwan, <sup>4</sup> Jaime Salcido <sup>1,4</sup>,  
Marcel P. van Daalen <sup>1</sup>, Bert Vandenbroucke <sup>1</sup>, Yannick M. Bahé <sup>1,5</sup>, Josh Borrow <sup>1,3,6</sup>,  
Evgenii Chaikin <sup>1</sup>, Filip Huško <sup>1</sup>, Adrian Jenkins <sup>1</sup>, Cedric G. Lacey <sup>1</sup>, Folkert S. J. Nobels <sup>1</sup>  
and Ian Vernon <sup>7</sup>

<sup>1</sup>Leiden Observatory, Leiden University, PO Box 9513, NL-2300 RA Leiden, the Netherlands  
<sup>2</sup>Lorentz Institute for Theoretical Physics, Leiden University, PO box 9506, NL-2300 RA Leiden, the Netherlands  
<sup>3</sup>Institute for Computational Cosmology, Department of Physics, University of Durham, South Road, Durham DH1 3LE, UK  
<sup>4</sup>Astrophysics Research Institute, Liverpool John Moores University, Liverpool L3 5RF, UK  
<sup>5</sup>Institute of Physics, Laboratory of Astrophysics, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Observatoire de Sauverny, CH-1290 Versoix, Switzerland  
<sup>6</sup>Department of Physics, Kavli Institute for Astrophysics and Space Research, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA  
<sup>7</sup>Department of Mathematical Sciences, Durham University, Stockton Road, DH1 3LE Durham, UK

Accepted 2023 August 12. Received 2023 August 8; in original form 2023 June 8

**The FLAMINGO project: revisiting the  $S_8$  tension and the role of baryonic physics**

Ian G. McCarthy <sup>1</sup>, Jaime Salcido <sup>1</sup>, Joop Schaye <sup>1,2</sup>, Juliana Kwan, <sup>1</sup> Willem Elbers <sup>1,3</sup>, Roi Kugel <sup>1,2</sup>,  
Matthieu Schaller <sup>1,2,4</sup>, John C. Helly, <sup>3</sup> Joey Braspenning, <sup>2</sup> Carlos S. Frenk, <sup>3</sup> Marcel P. van Daalen <sup>1,2</sup>,  
Bert Vandenbroucke <sup>1,2</sup>, Jonah T. Conley, <sup>1</sup> Andreea S. Font <sup>1</sup> and Amol Upadhye <sup>1</sup>

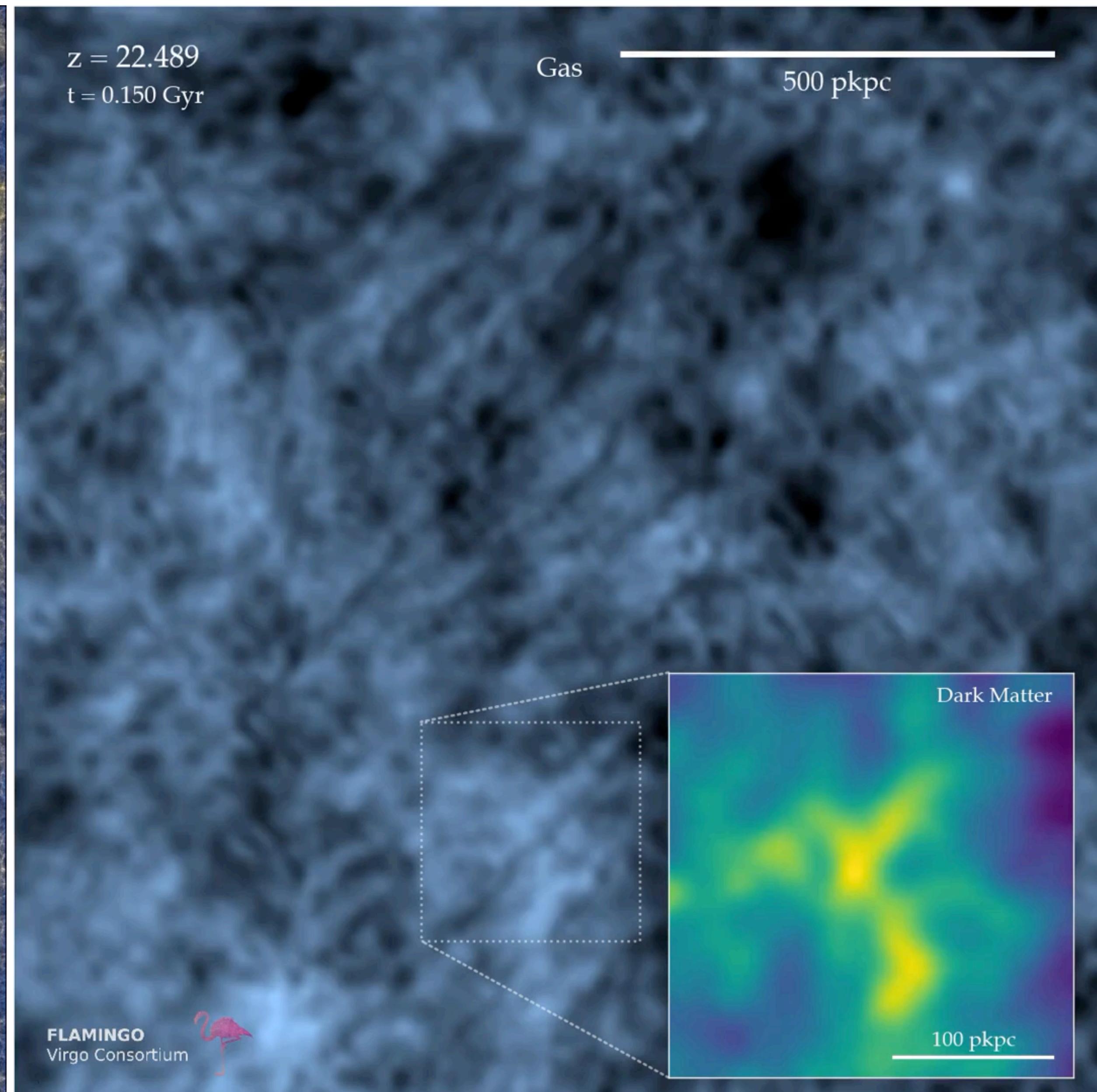
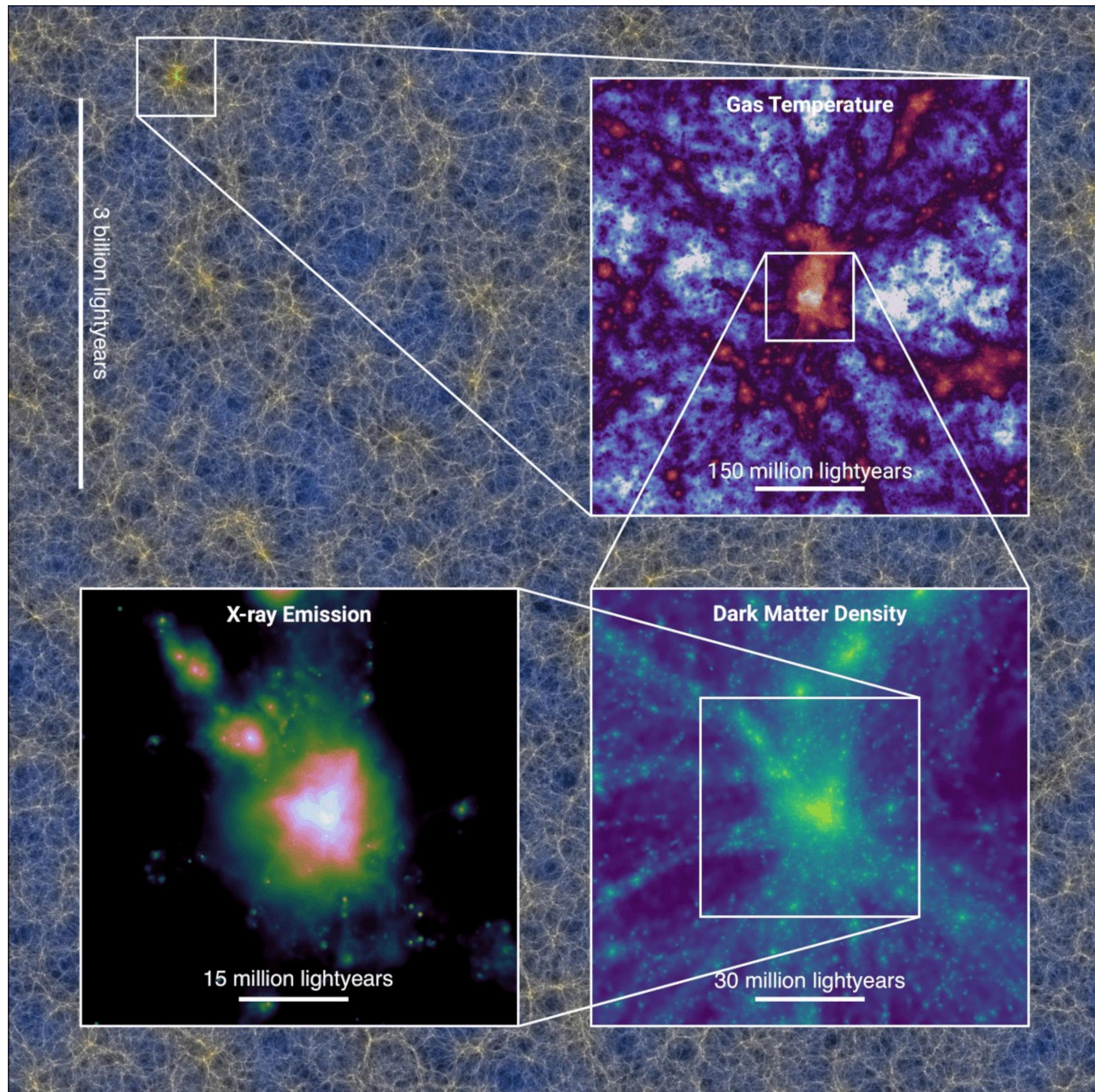
<sup>1</sup>Astrophysics Research Institute, Liverpool John Moores University, Liverpool, L3 5RF, UK<sup>2</sup>Leiden Observatory, Leiden University, PO Box 9513, NL-2300 RA Leiden, the Netherlands<sup>3</sup>Institute for Computational Cosmology, Department of Physics, University of Durham, South Road, Durham DH1 3LE, UK<sup>4</sup>Lorentz Institute for Theoretical Physics, Leiden University, PO box 9506, NL-2300 RA Leiden, the Netherlands

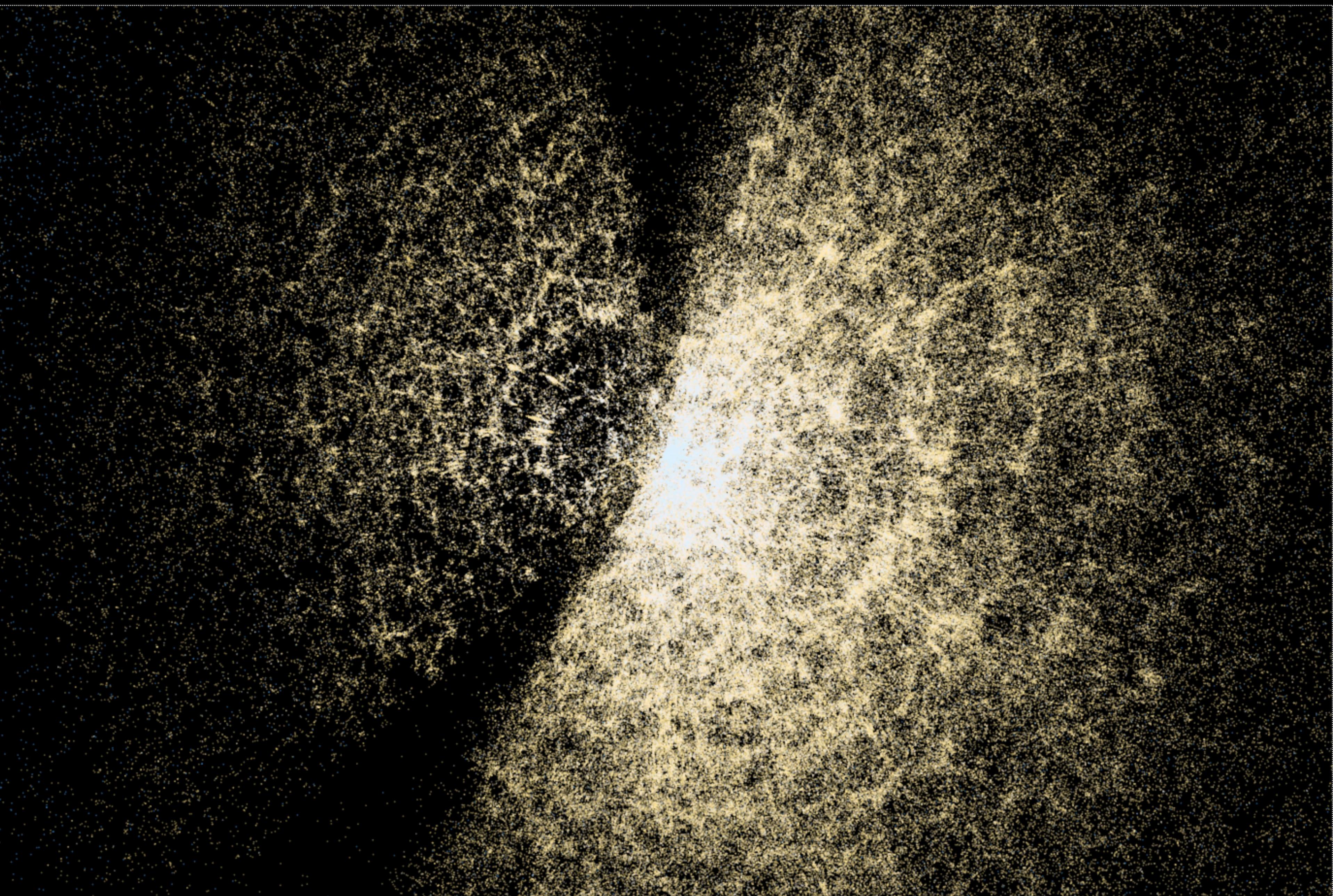
Accepted 2023 October 8. Received 2023 October 2; in original form 2023 September 12

<https://doi.org/10.1093/mnras/stad3107>  
<https://doi.org/10.1093/mnras/stad2540>  
<https://doi.org/10.1093/mnras/stad2419>

## バリオンとニュートリノも考慮した過去最大の宇宙論シミュレーション

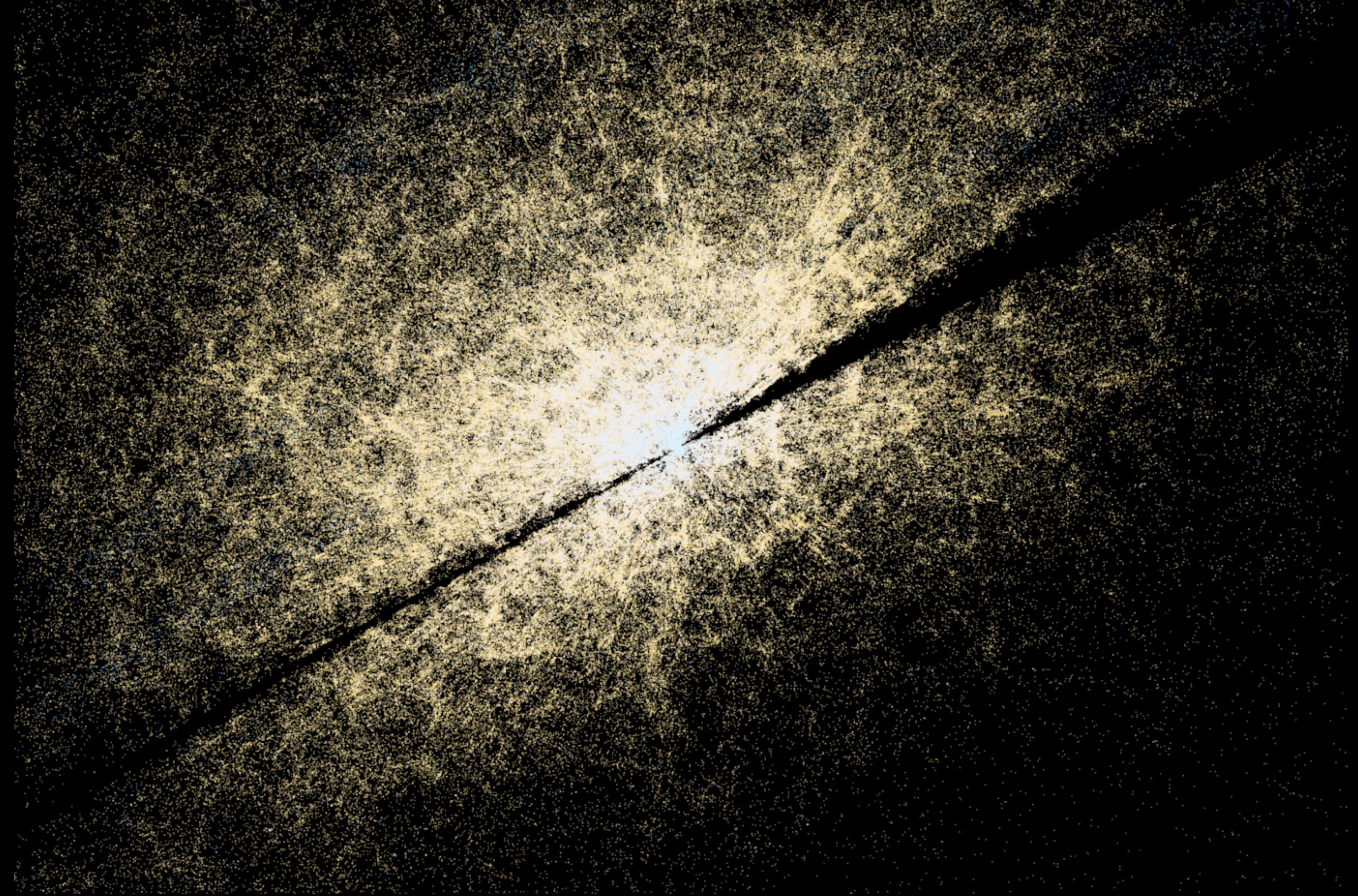
FLAMINGO: dark matter, ordinary matter, and neutrinos in the biggest cosmological simulation ever





～500 Mpcまでの銀河分布（SDSS観測データ）

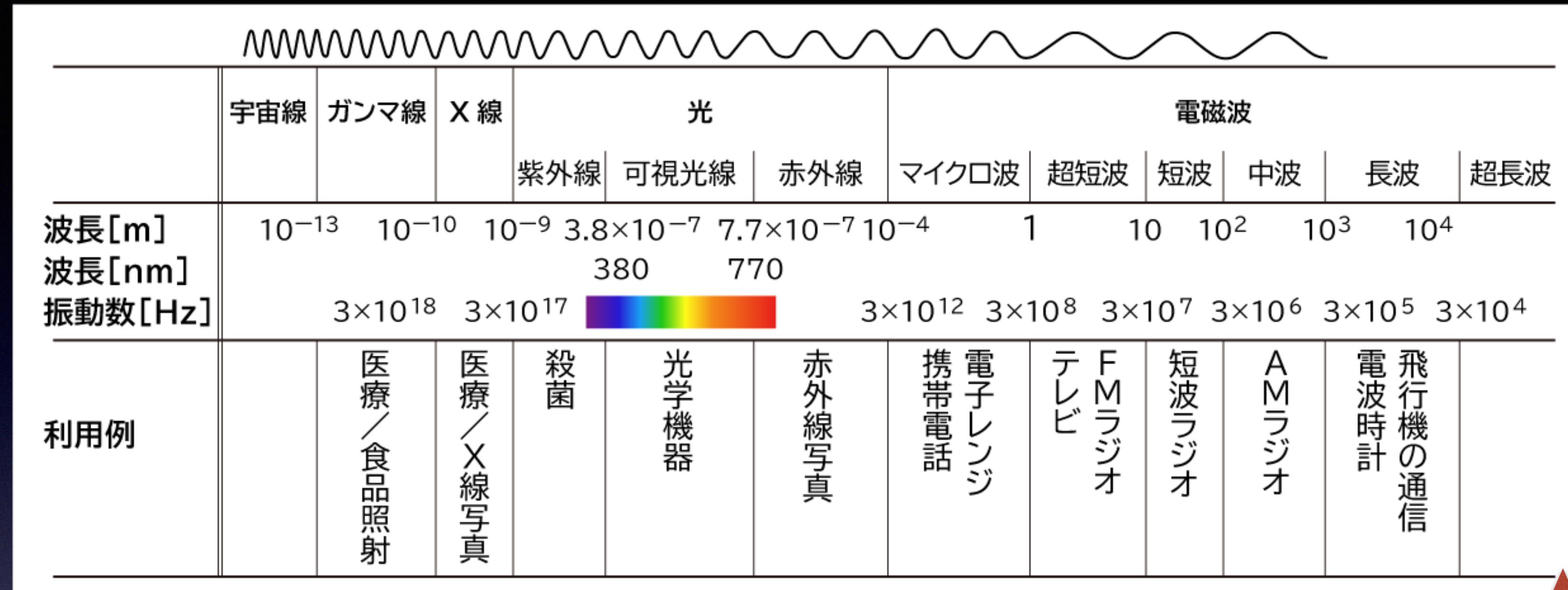
松原隆彦氏提供画像



～500 Mpcまでの銀河分布（SDSS観測データ）

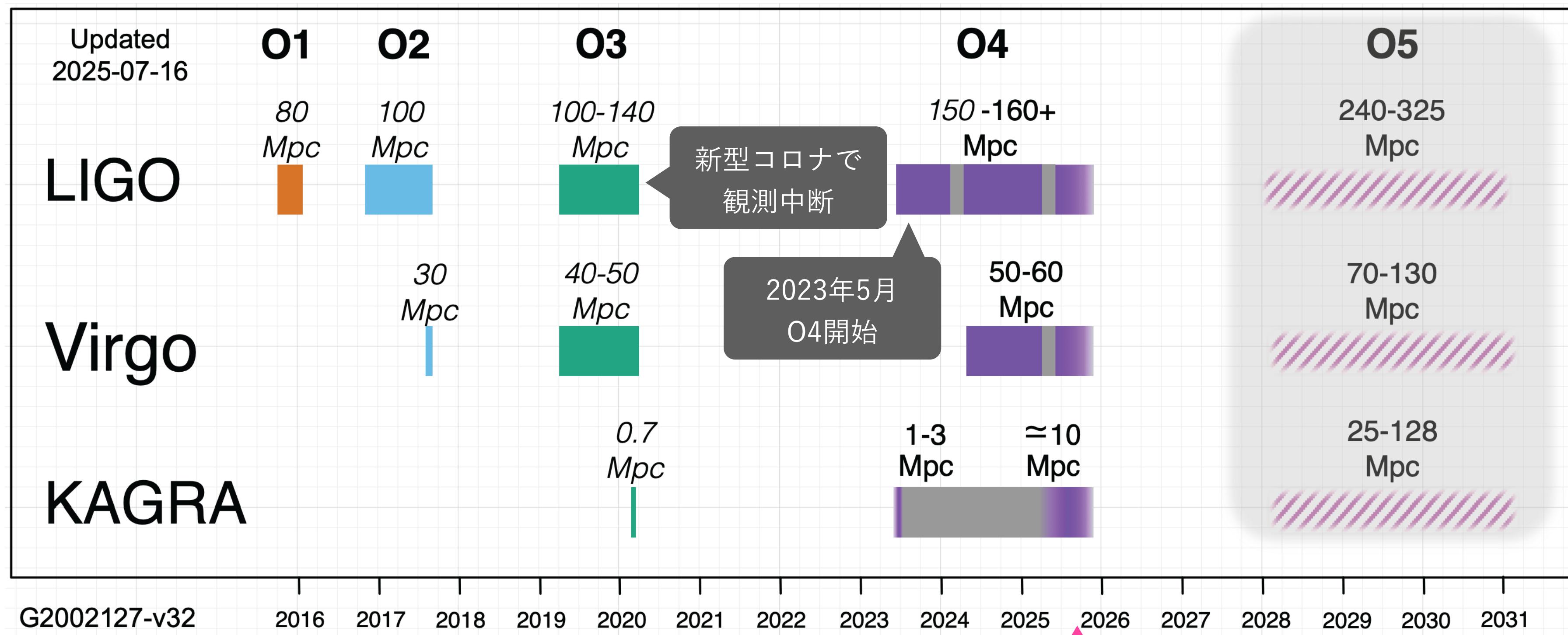
松原隆彦氏提供画像

# マルチ・メッセンジャー一天文学の誕生



# 星大波天文学 はじめました

## 観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b/4)



重力波のデータカタログ公開  
Gravitational Wave Transient Catalog

 Gravitational Wave Open Science Center

Data Software Online Tools About GWOSC

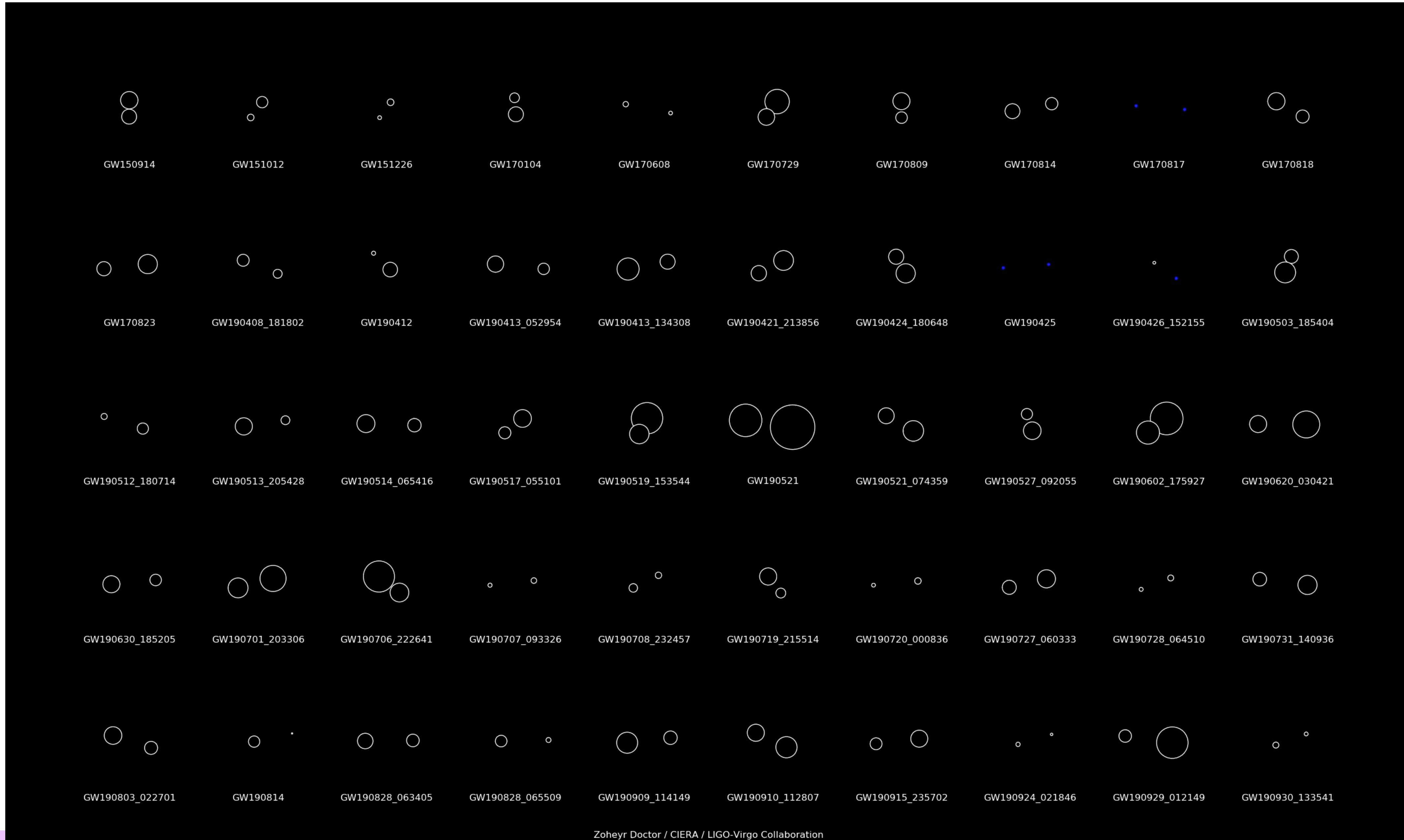
The Gravitational Wave Open Science Center provides data from gravitational-wave observatories, along with access to tutorials and software tools.

<https://www.gw-openscience.org>

<https://observing.docs.ligo.org/plan/>

O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b:GWTC3 (2021/11/7 released)



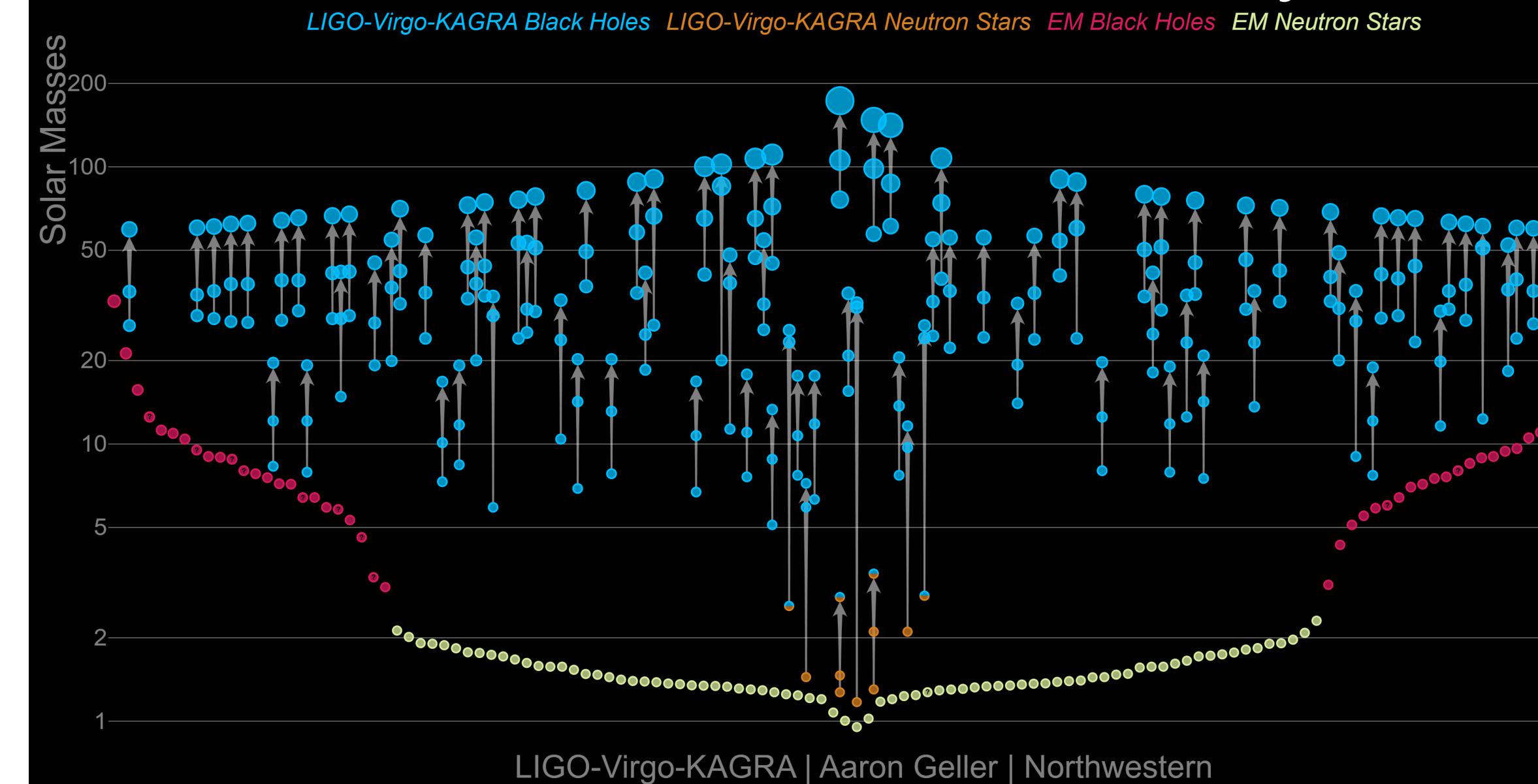
## 「突発性重力波カタログ4」発表

干渉計データを公開

O3までの観測結果

## Masses in the Stellar Graveyard

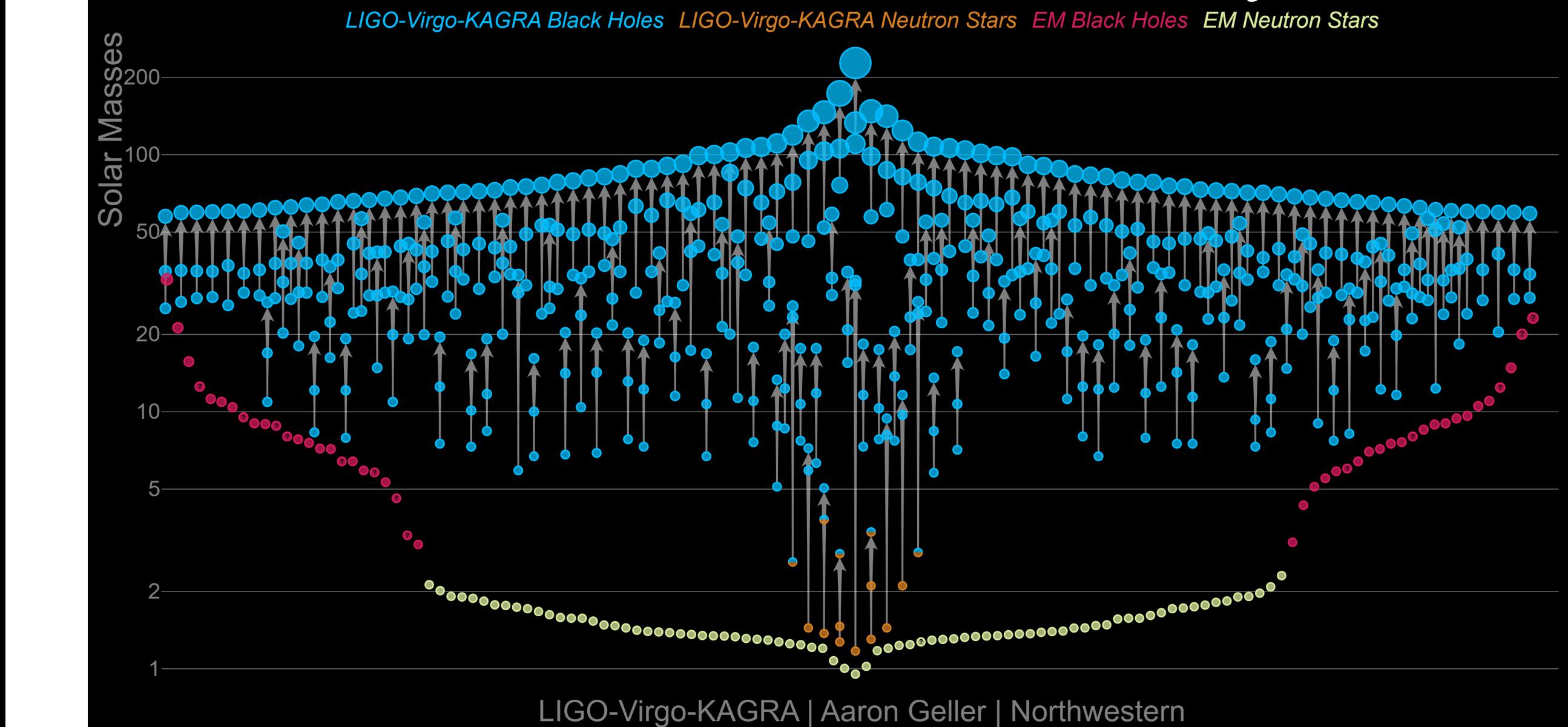
LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



O4aまでの観測結果

## Masses in the Stellar Graveyard

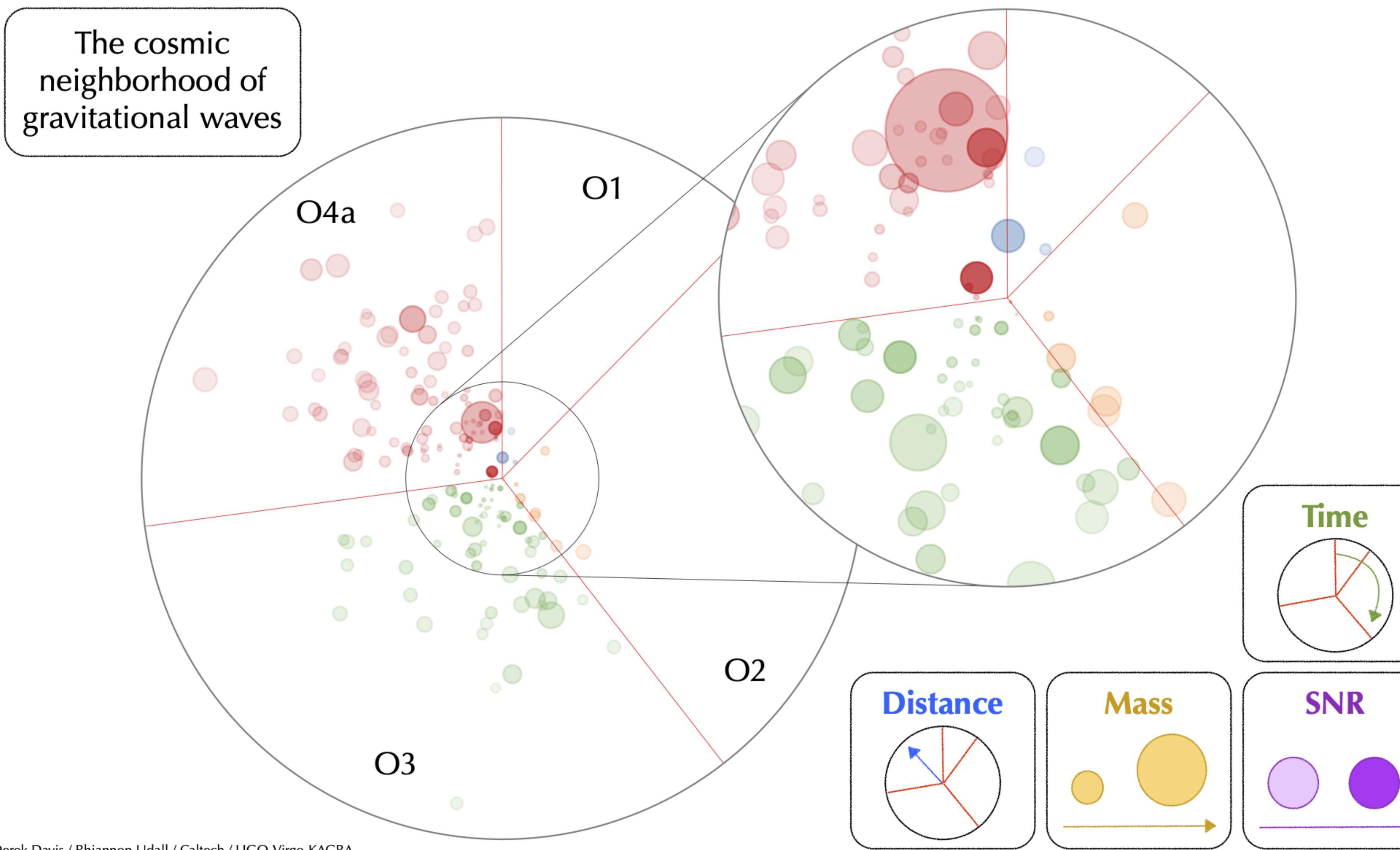
LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



連星合体の観測結果を質量（太陽の何倍か）を基準にして一覧にしたもの。青色の丸印が各ブラックホールに相当し、オレンジ色は中性子星に相当する。2つが合体してより大きな質量のブラックホールになったことを示す。赤丸は重力波以外で知られているブラックホール、黄色丸は重力波以外で知られている中性子星。横軸は対称になるように並べたもので意味はない。

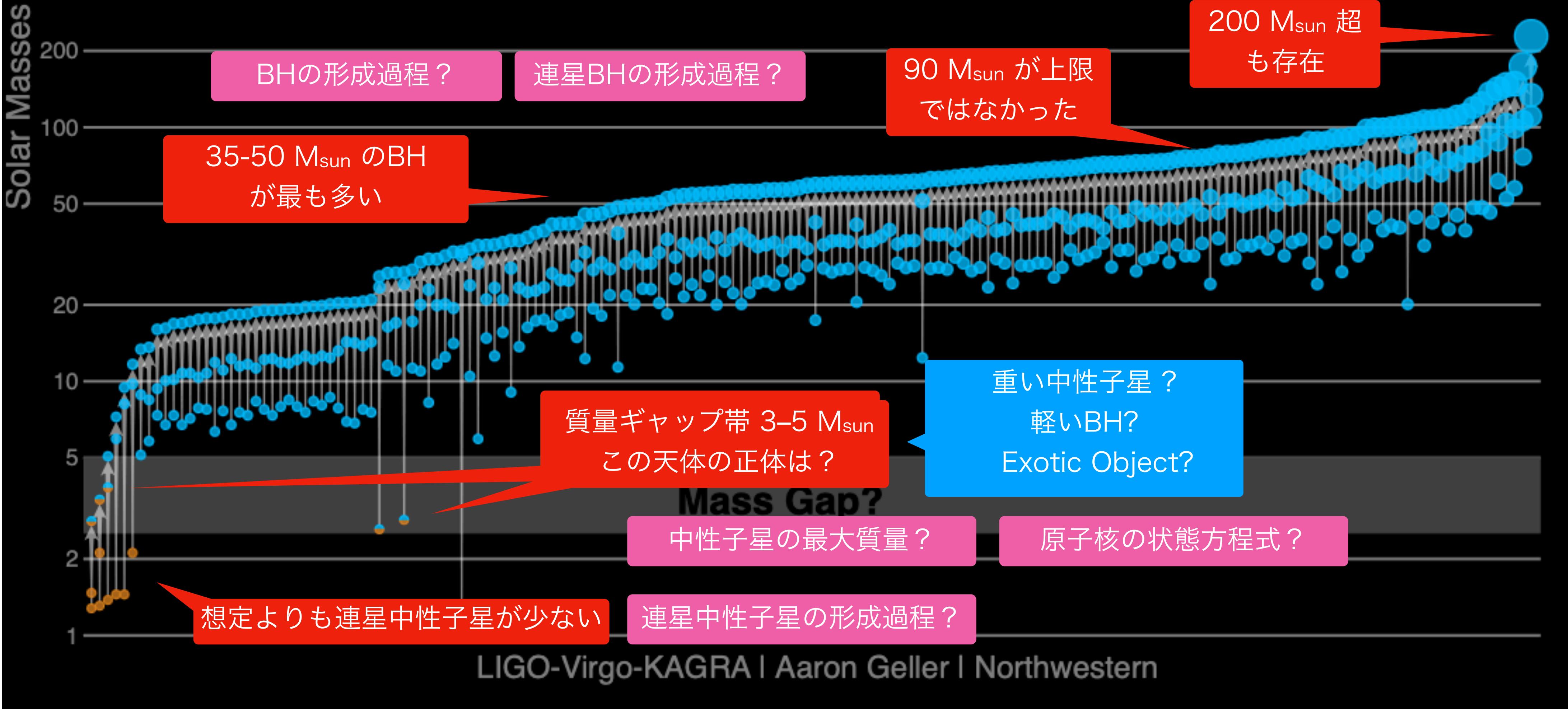
04a (2023/5/24 - 2024/1/16)

GWTC4 (2025/8/26 released)



# Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars



<https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O4/>

GraceDB Public Alerts ▾ Latest Search Documentation Login

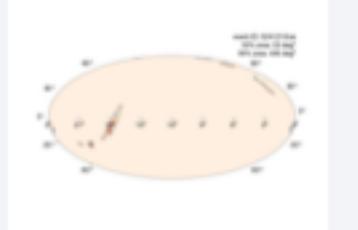
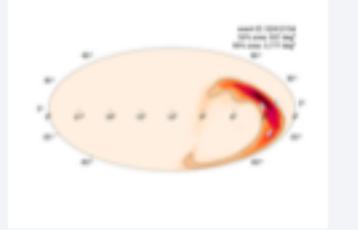
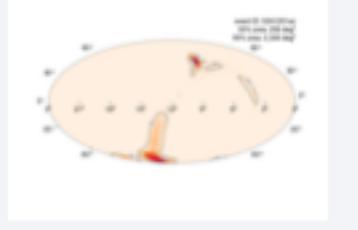
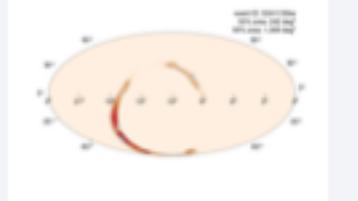
Please log in to view full database contents.

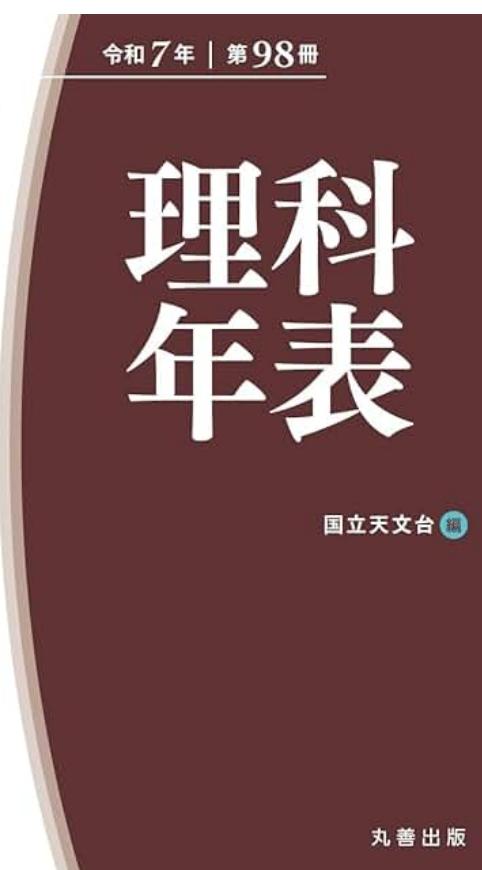
## LIGO/Virgo/KAGRA Public Alerts

- More details about public alerts are provided in the [LIGO/Virgo/KAGRA Alerts User Guide](#).
- Retractions are marked in red. Retraction means that the candidate was manually vetted and is no longer considered a candidate of interest.
- Less-significant events are marked in grey, and are not manually vetted. Consult the [LVK Alerts User Guide](#) for more information on significance in O4.
- Less-significant events are not shown by default. Press "Show All Public Events" to show significant and less-significant events.

O4 Significant Detection Candidates: 185 (205 Total - 20 Retracted)

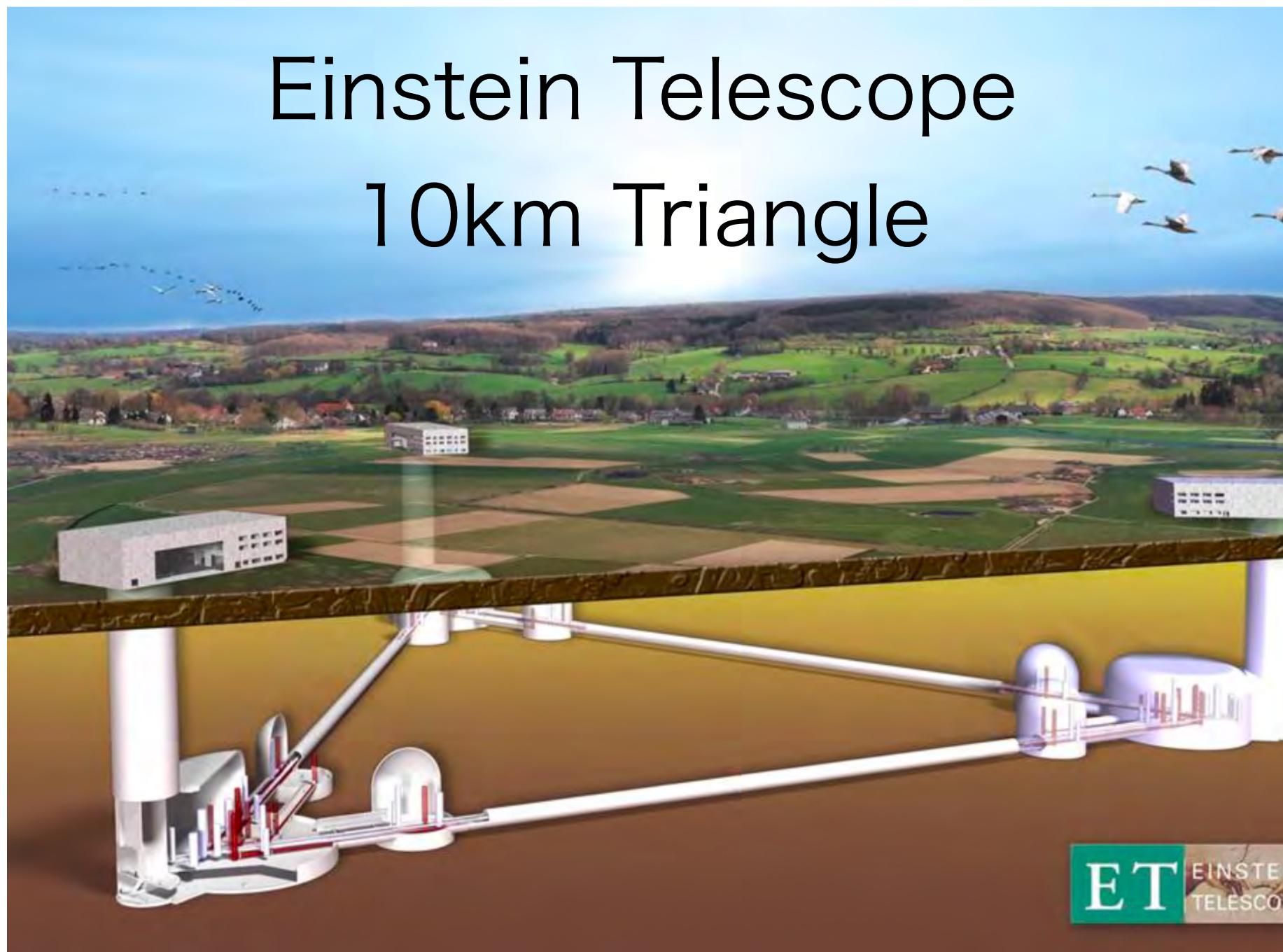
O4 Low Significance Detection Candidates: 3232 (Total)

Event ID	Possible Source (Probability)	Significant	UTC	GCN	Location	FAR	Comments
S241210fu	BBH (98%), Terrestrial (2%)	Yes	Dec. 10, 2024 12:09:00 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 1.1631 years	
S241210cw	BBH (>99%)	Yes	Dec. 10, 2024 06:06:06 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 50.02 years	
S241210d	BBH (97%), Terrestrial (3%)	Yes	Dec. 10, 2024 02:33:35 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1.3855 per year	
S241201ac	BBH (97%), Terrestrial (3%)	Yes	Dec. 1, 2024 05:57:58 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1.3638 per year	
S241130be	BBH (>99%)	Yes	Nov. 30, 2024 11:04:22 UTC	GCN Circular Query Notices   VOE		1 per 165.67 years	



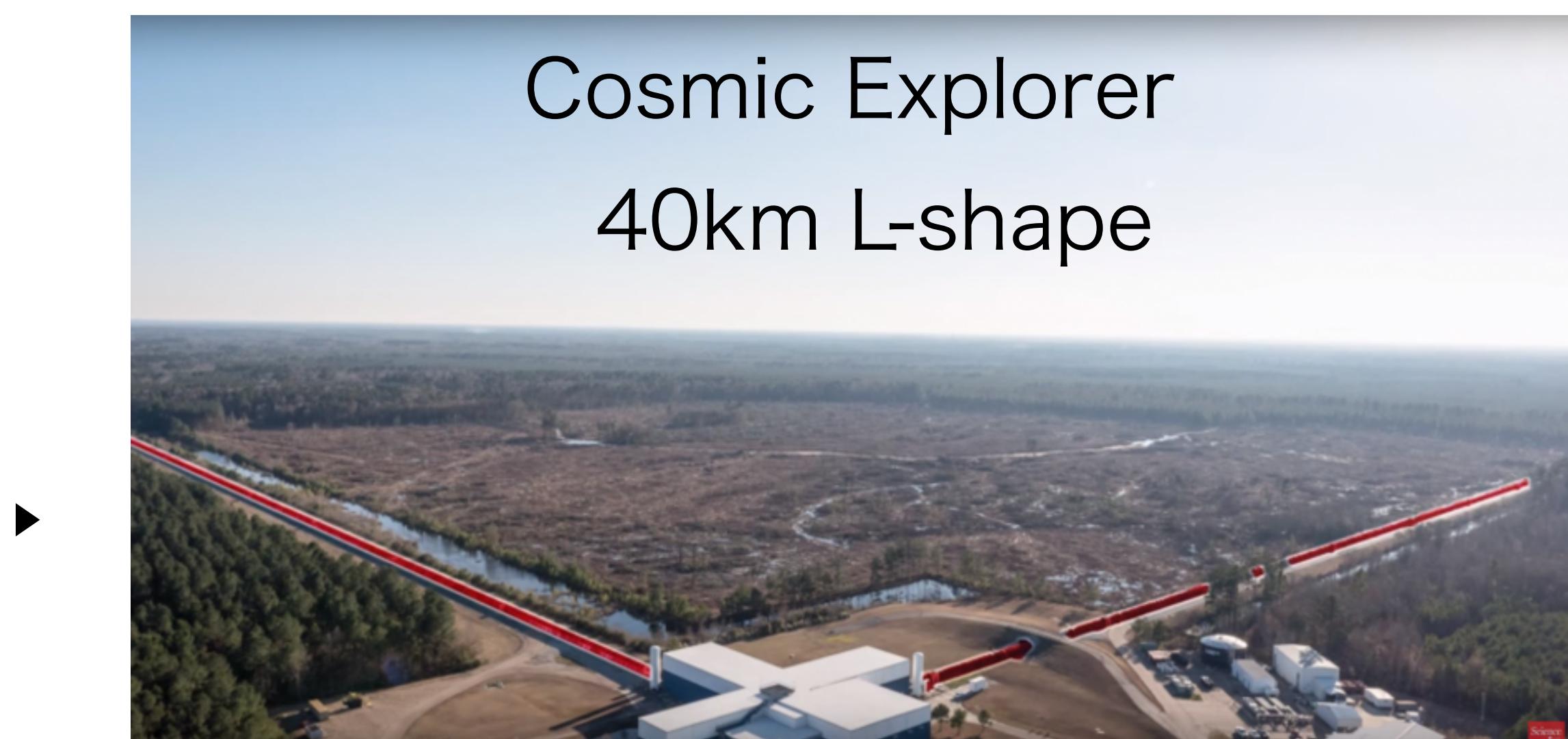
25年版から重力波の項が  
3ページへ増加

## 重力波観測装置(地上)の将来計画

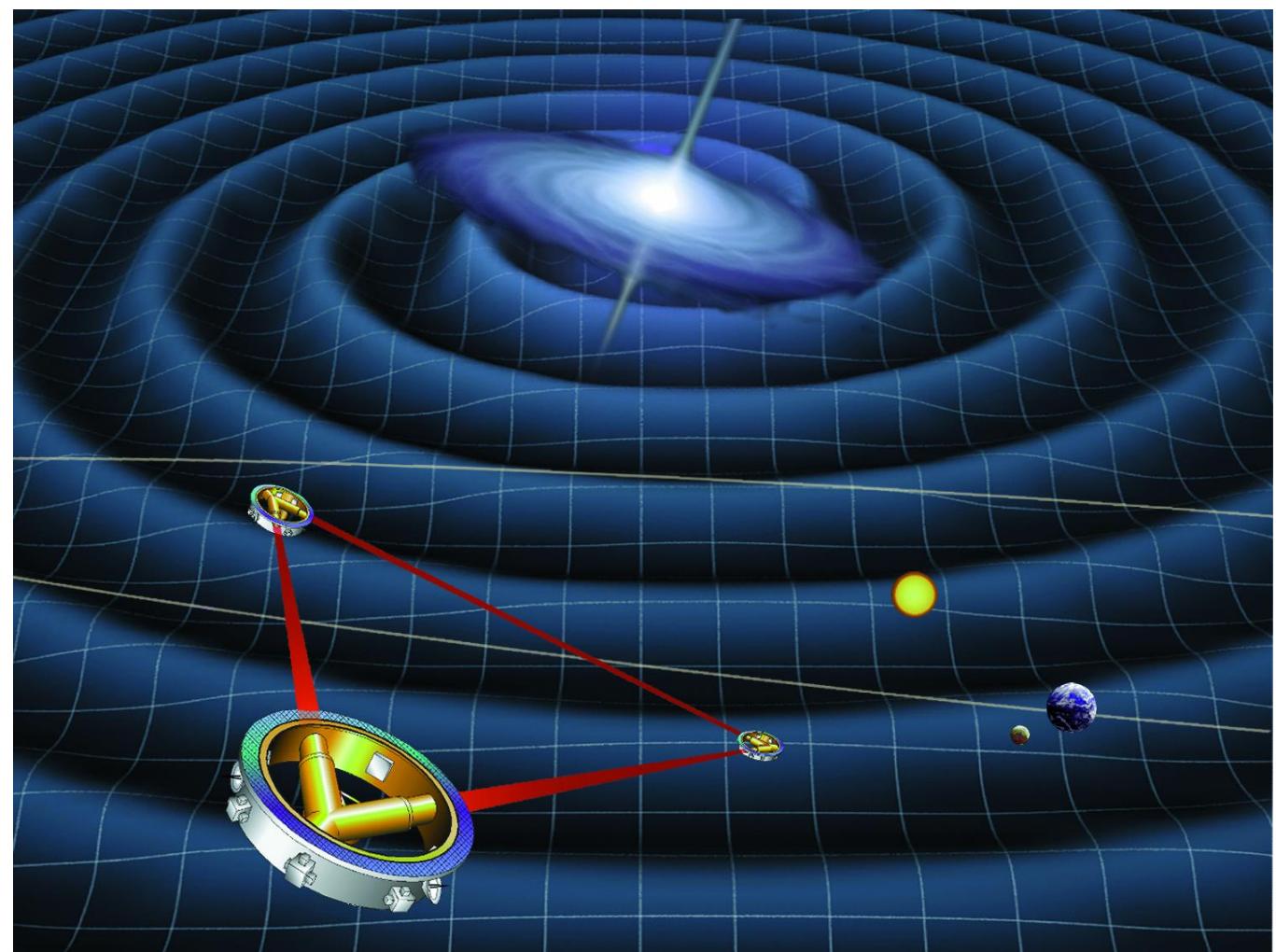


◀ ヨーロッパの計画  
予算承認  
建設地未定(候補地2つ)

アメリカの計画 ▶  
予算申請準備



# 重力波観測装置(宇宙空間)の将来計画



## ◀ ヨーロッパの計画

予算承認

2034年頃打ち上げ, 3年間稼働

250万kmの腕の長さ

地球の公転軌道のL4

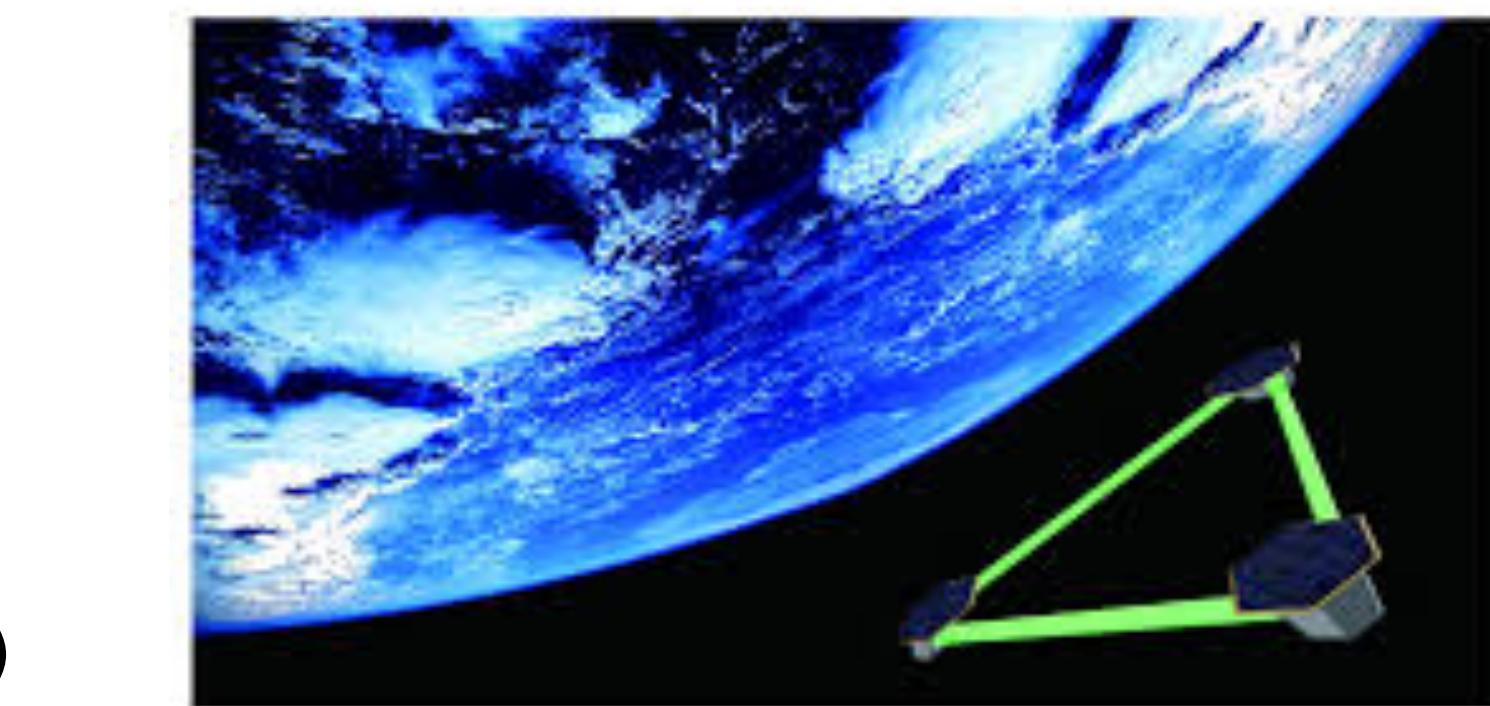
低周波数帯(mHzからHz帯)

## 日本の計画 ▶

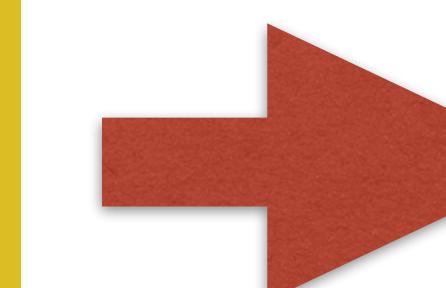
予算申請準備

1000kmの腕の長さ

低周波数帯(deciHzからHz帯)



宇宙全体スケールで  
巨大ブラックホール連星合体の  
重力波が検出できる



銀河中心の超巨大BH形成過程がわかる  
宇宙の膨張速度がわかる

# Sの科学 Yの科学

## Sの科学

physics 物理  
mathematics 数学  
statistics 統計学  
genetics 遺伝学

## Yの科学

astronomy 天文学  
economy 経済学  
biology 生物学  
archaeology 考古学  
anthropology 人類学  
sociology 社会学

体系化の学問

対象物の性質を理論で説明



発見の学問

対象物を分類し記載

相対性理論

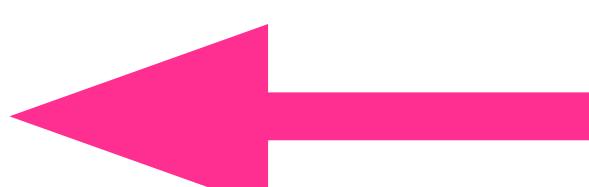


ブラックホール

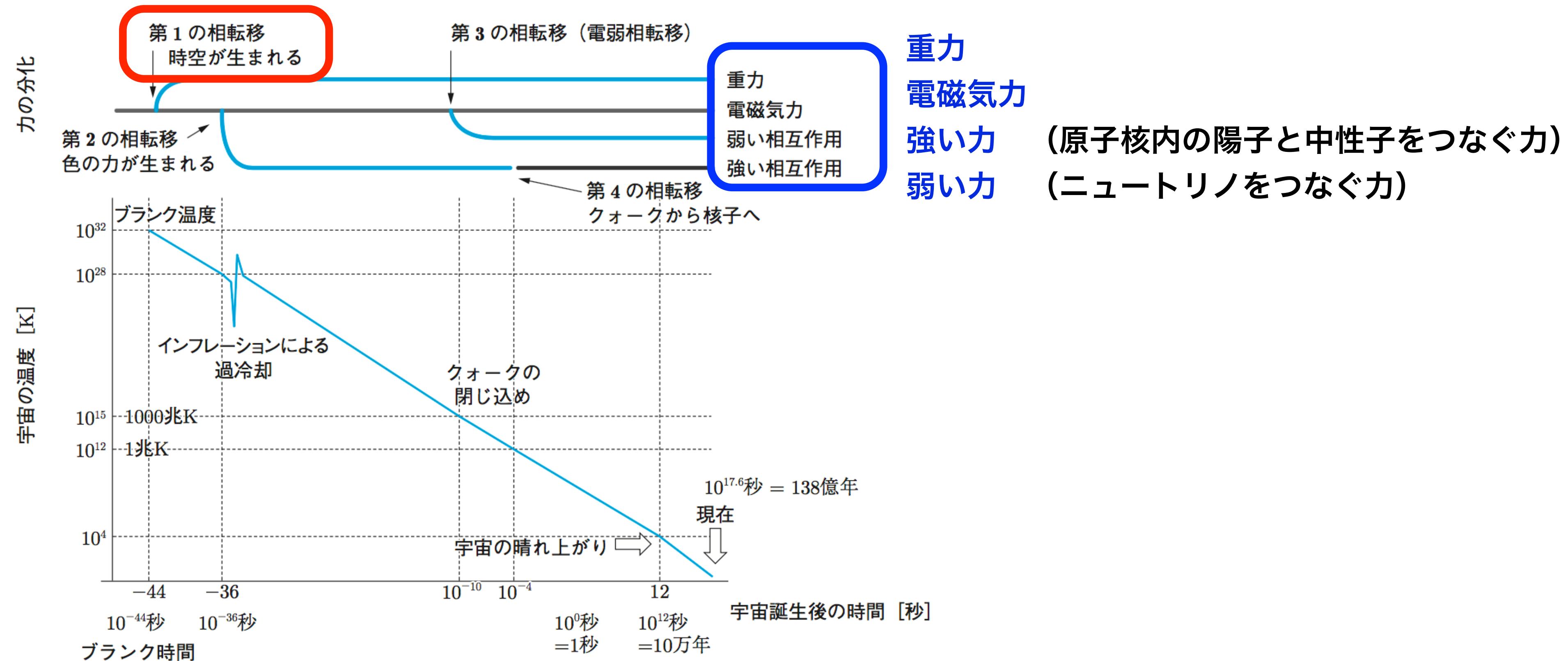
膨張宇宙

重力波

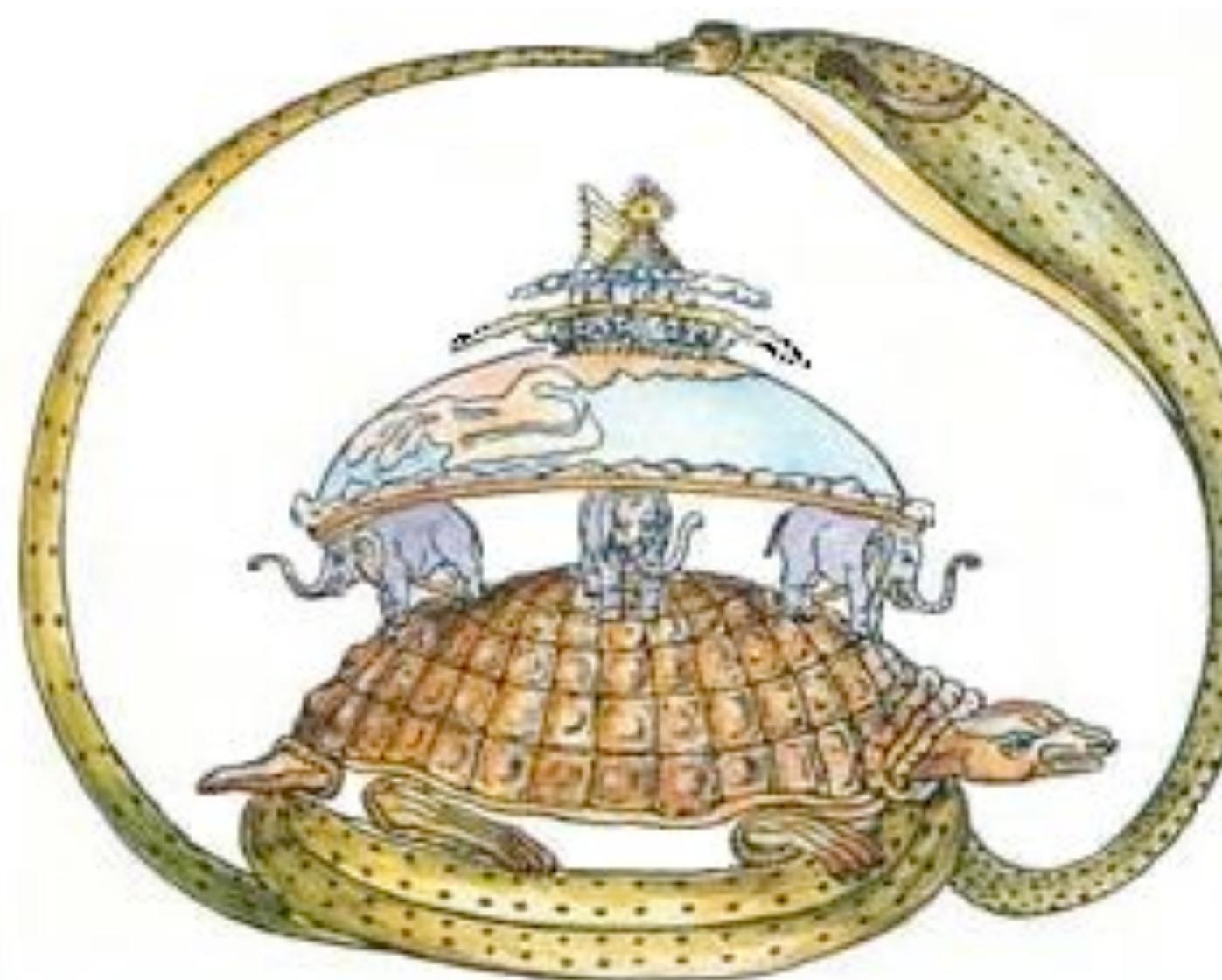
宇宙物理学



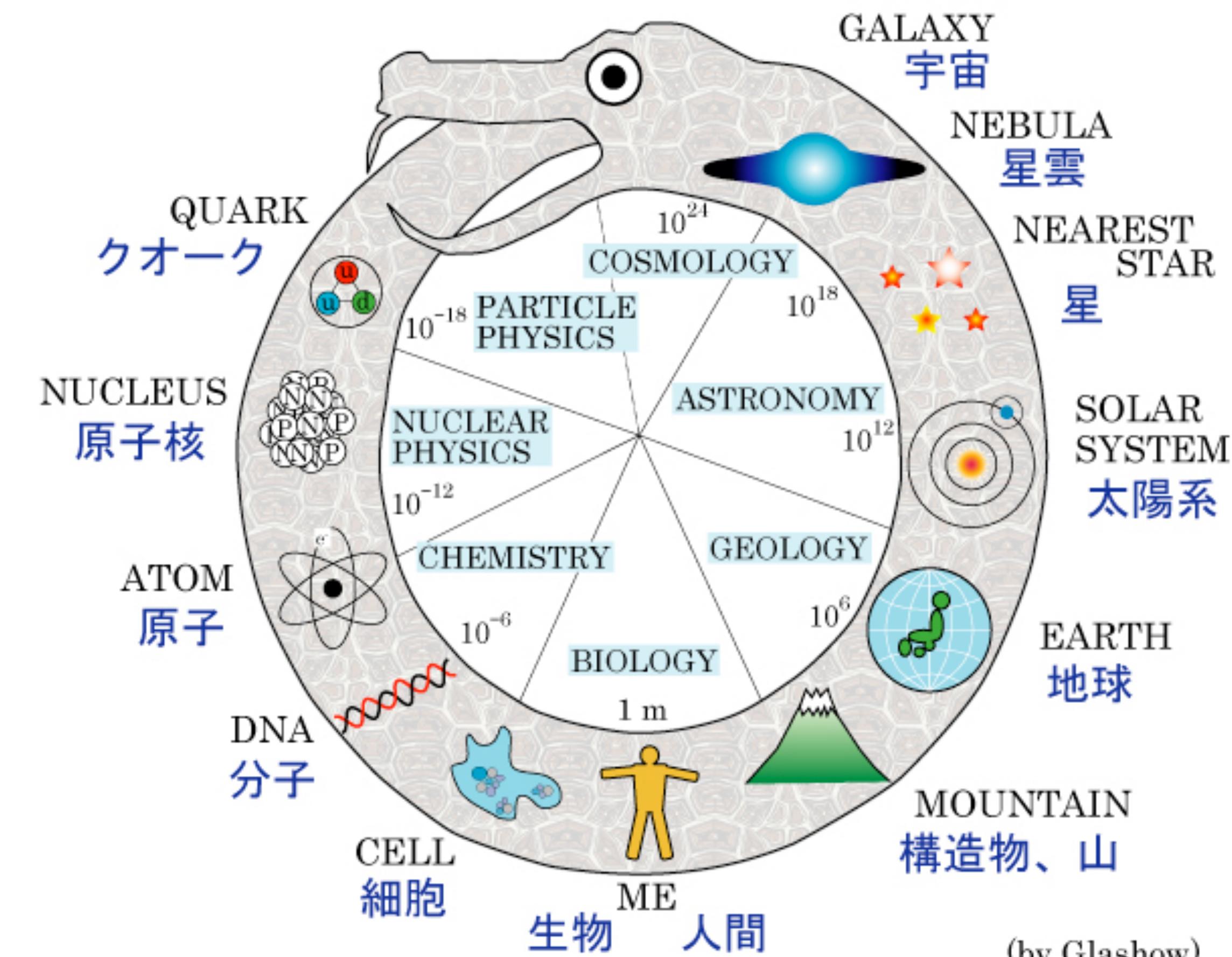
# 宇宙の始まりを知る = 素粒子論的な物理が必要



ウロボロス=尾を飲み込む



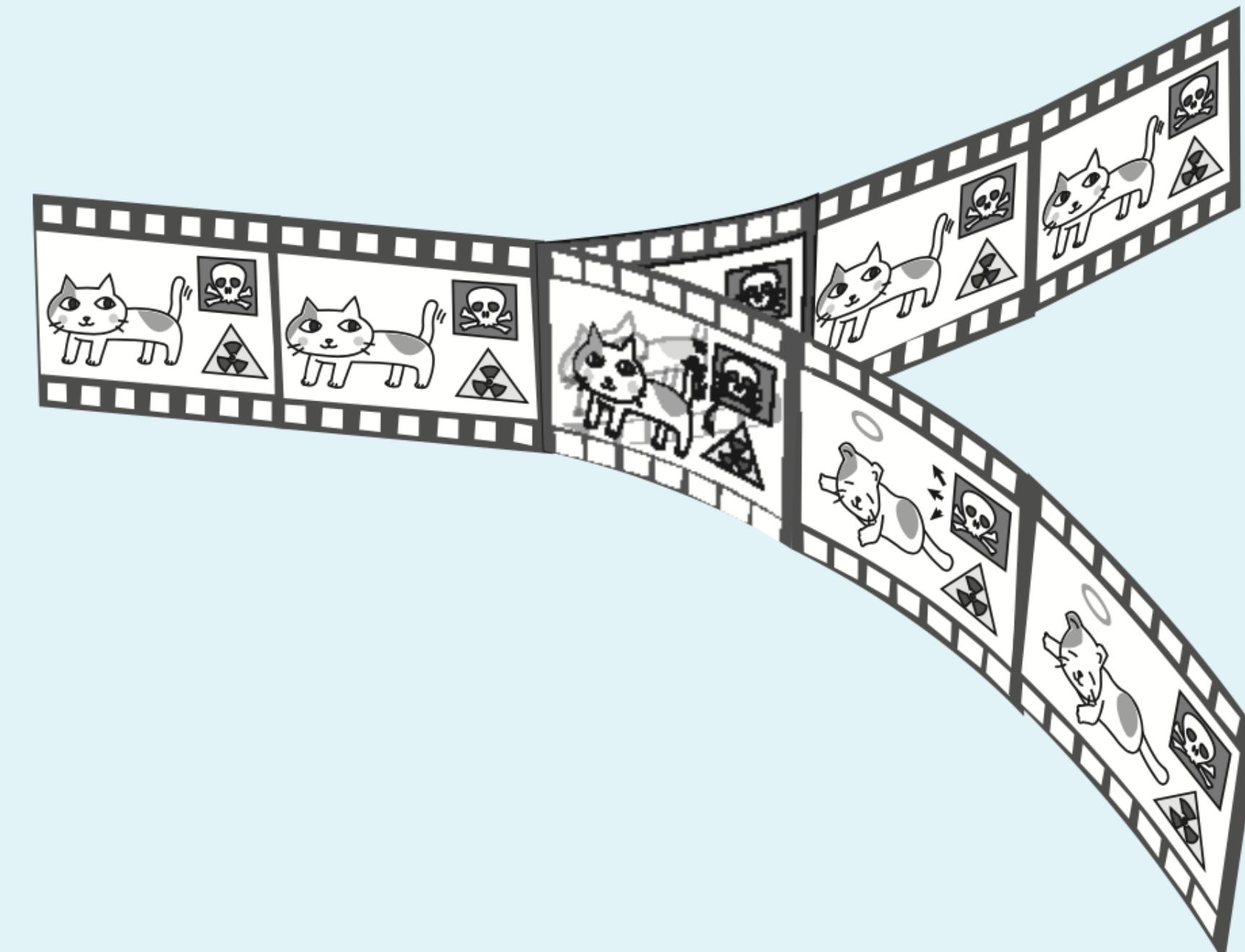
自然の階層性（ウロボロスの蛇）  
Layer Structure of Nature (Snake of Uroboros)



(by Glashow)



**図 5.27** プランク時間以前は、時空そのものが生成消滅を繰り返す量子宇宙であったと思われる。



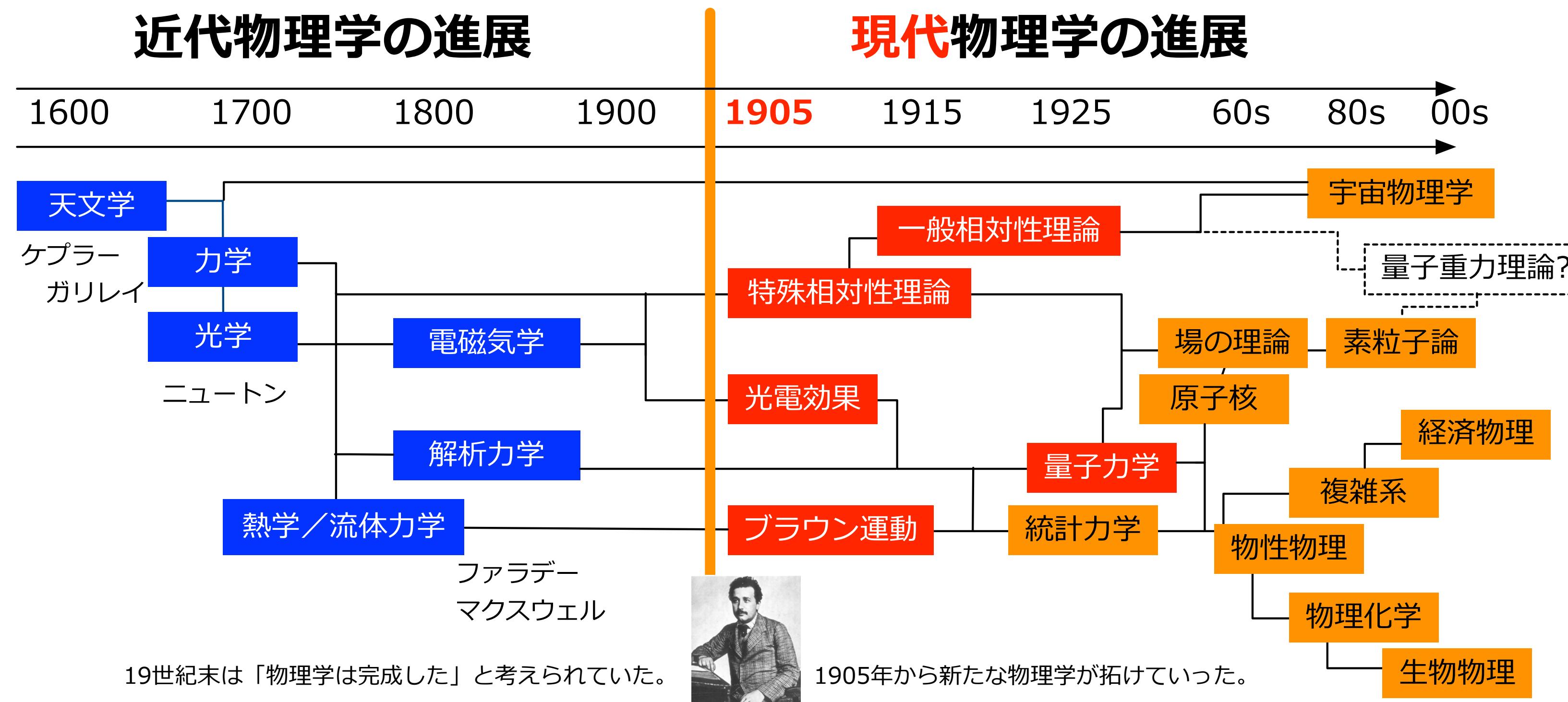
**図 4.35** 無数の世界が同時並行に存在していて、私たちはそのうちの 1 つを選択しながら時間が進む、とする解釈。

# ★この授業のまとめを

本書では、私たちが宇宙をどこまで理解できているのか、という点を主軸として、とくに宇宙全体の構造や歴史を知る宇宙論 (cosmology) の解説を目標にしました。宇宙論の語り方には、歴史的な側面と物理的な側面の 2 つがあります。本書では欲張って、そのどちらも取り込みました。

歴史的な側面

物理的な側面



# ★この授業のまとめを

## 歴史的な側面

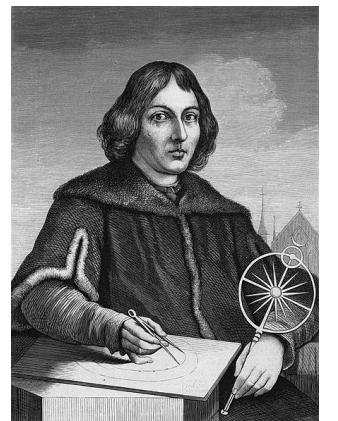
### 天動説 vs 地動説

2. 近代物理学の夜明け: 宇宙はどう理解されてきたのか

#### 近代物理学をつくりあげた登場人物たち

コペルニクス

Nicolaus Copernicus  
(1473-1543)



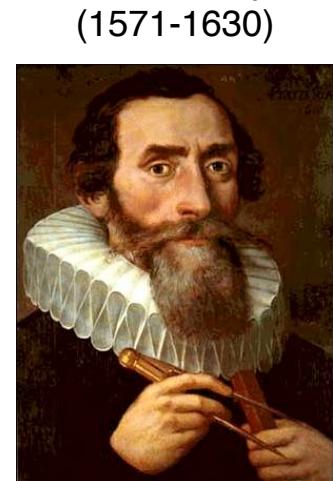
地動説

ブラー

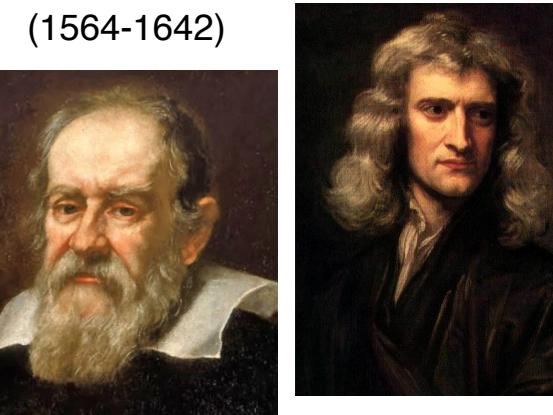
Tycho Brahe  
(1546-1601)



ケプラー  
Johannes Kepler  
(1571-1630)



ガリレイ  
Isaac Newton  
(1642-1727)



運動の法則  
万有引力

惑星運動の法則

慣性・自由落下運動  
地動説の物理的根拠

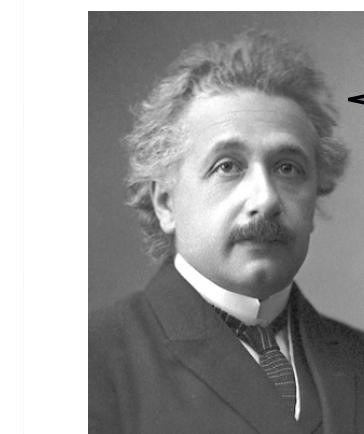
31

# ★この授業のまとめを

## 古典物理学 vs 現代物理学 アインシュタイン vs ボーア

### アインシュタイン・ボーア論争 まとめ (3)

アインシュタイン



1955年没(76歳)

光がどちらかのスリットを通過したのか、は測定できるはずだ。

確率でしか測定できない。  
波動関数は確率を表すのだ。

神はサイコロを振ったりしない。

ボーア  
(コペンハーゲン解釈)



1962年没(77歳)

#### EPRパラドックスを提案

不確定性原理を認める量子力学は誤っている

物理的実在が存在し、我々はそれを観測する

実在は重要ではなく、観測する現象を説明するのが物理学

ベルの不等式の破れが確認され、こちらが正しい

36

### 定常宇宙論 vs ビッグバン宇宙論

5. 宇宙論 >> 5.2 ビッグバン標準宇宙論

教科書 p159

#### 火の玉宇宙論 vs 定常宇宙論

#### ビッグバン宇宙論

「宇宙には始まりがあった」

宇宙誕生後、3分で軽元素の合成が  
された

「宇宙に始まりも終わりもない」

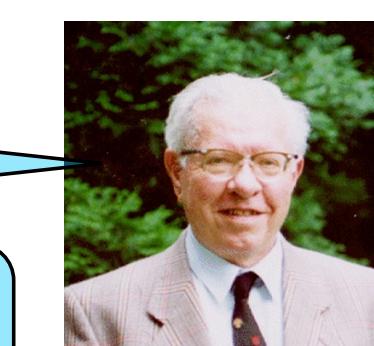
宇宙膨張をしていても新たに物質が  
生成していれば大丈夫



ガモフ

彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)  
から始まったと言っている

ビッグバン、いい名前だ。  
ビッグバン宇宙論、と呼ぶことにしよう



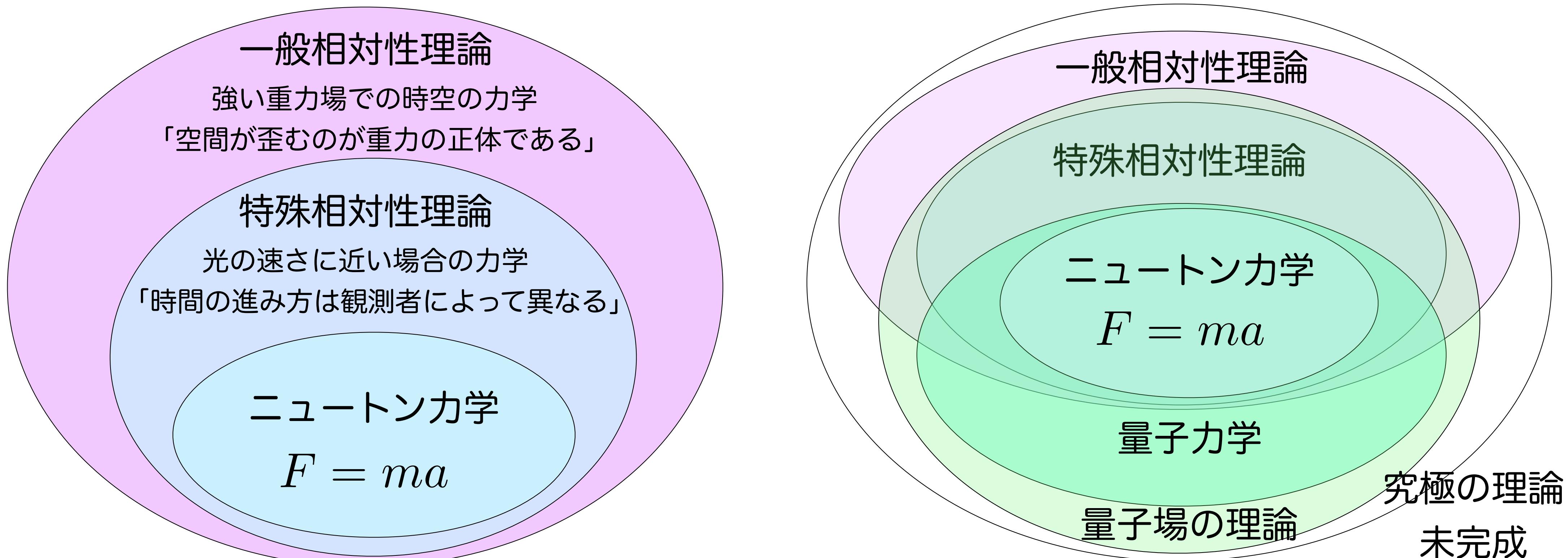
ホイル

100

## ★この授業のまとめを

本書では、私たちが宇宙をどこまで理解できているのか、という点を主軸として、とくに宇宙全体の構造や歴史を知る宇宙論 (cosmology) の解説を目標にしました。宇宙論の語り方には、歴史的な側面と物理的な側面の 2 つがあります。本書では欲張って、そのどちらも取り込みました。

### 物理的な側面



# アインシュタインの理論はどこまで正しいのか？

アインシュタインが相対性理論をつくって、100年。

相対性理論は、アインシュタインの想像をも越えた現象を予言してきた

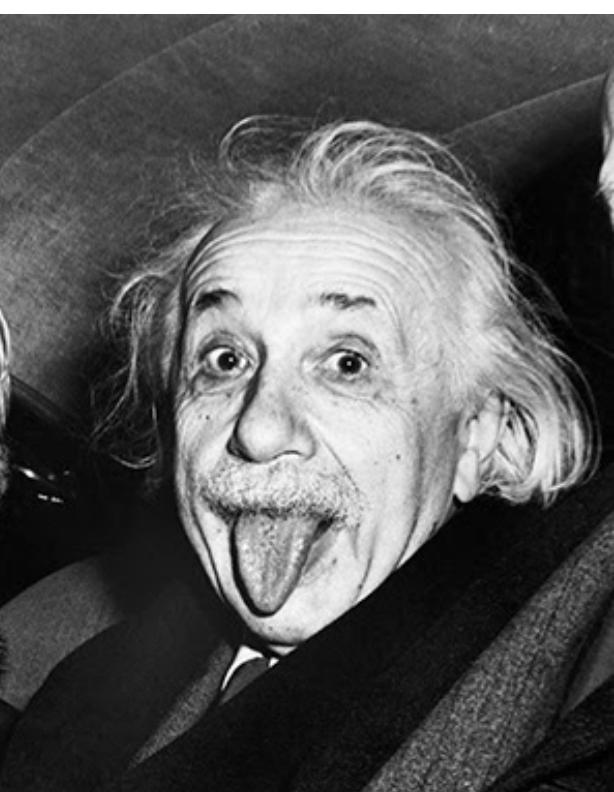


相対性理論は、これまで数々の検証実験・検証観測に耐えてきた。

他の重力理論は、どんどん棄却されている。

相対性理論は、他の重力理論よりもシンプルだ。

シンプルな理論が生き残るのは、物理学の深遠さを感じる。



だけど、どこかで相対性理論の破れが見つからないと、  
宇宙の始まりを議論できる次の理論へたどり着けない…

アインシュタインが正しくて、嬉しいような、残念なような…

ほらね！

## 前回のミニツツペーパーから

先生が一番宇宙について気になっていたことは何ですか

先生が宇宙に感じた一番の感動は何ですか？

④ 例題1. 宇宙のエネルギーを散れていたり、

[私は、だからな・ンと・・・・・は科学者の人たちは仮説を立てるのです]  
見つけが好きです!!

宇宙を知る = 未知への探求心（大昔から的人類の原動力）

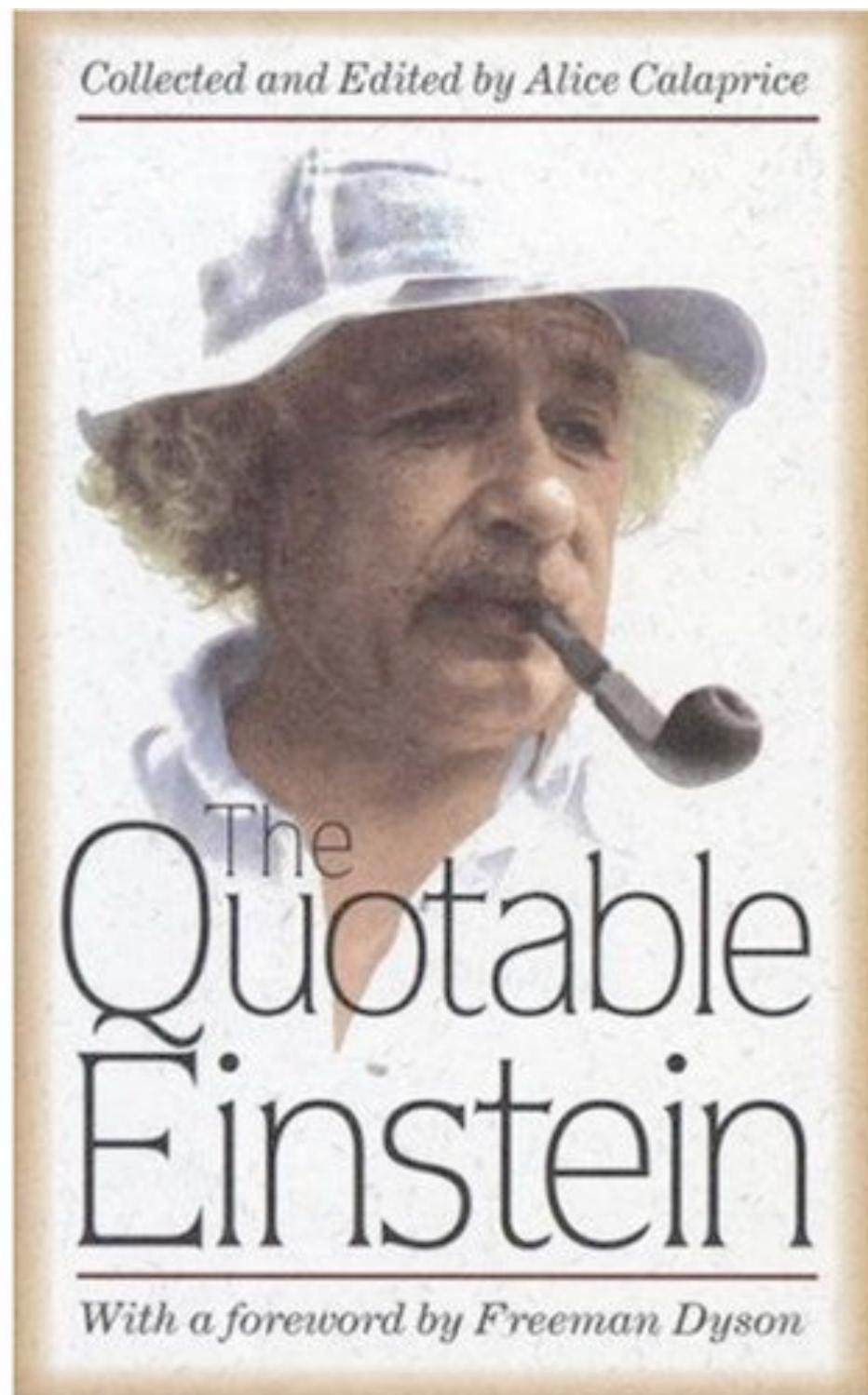
宇宙のはじまり、銀河の進化、生命の誕生・・・

理論物理としての挑戦、最終的な答えに近づく喜び

科学に対する人間の取り組み・文化交流の歴史も辿れる

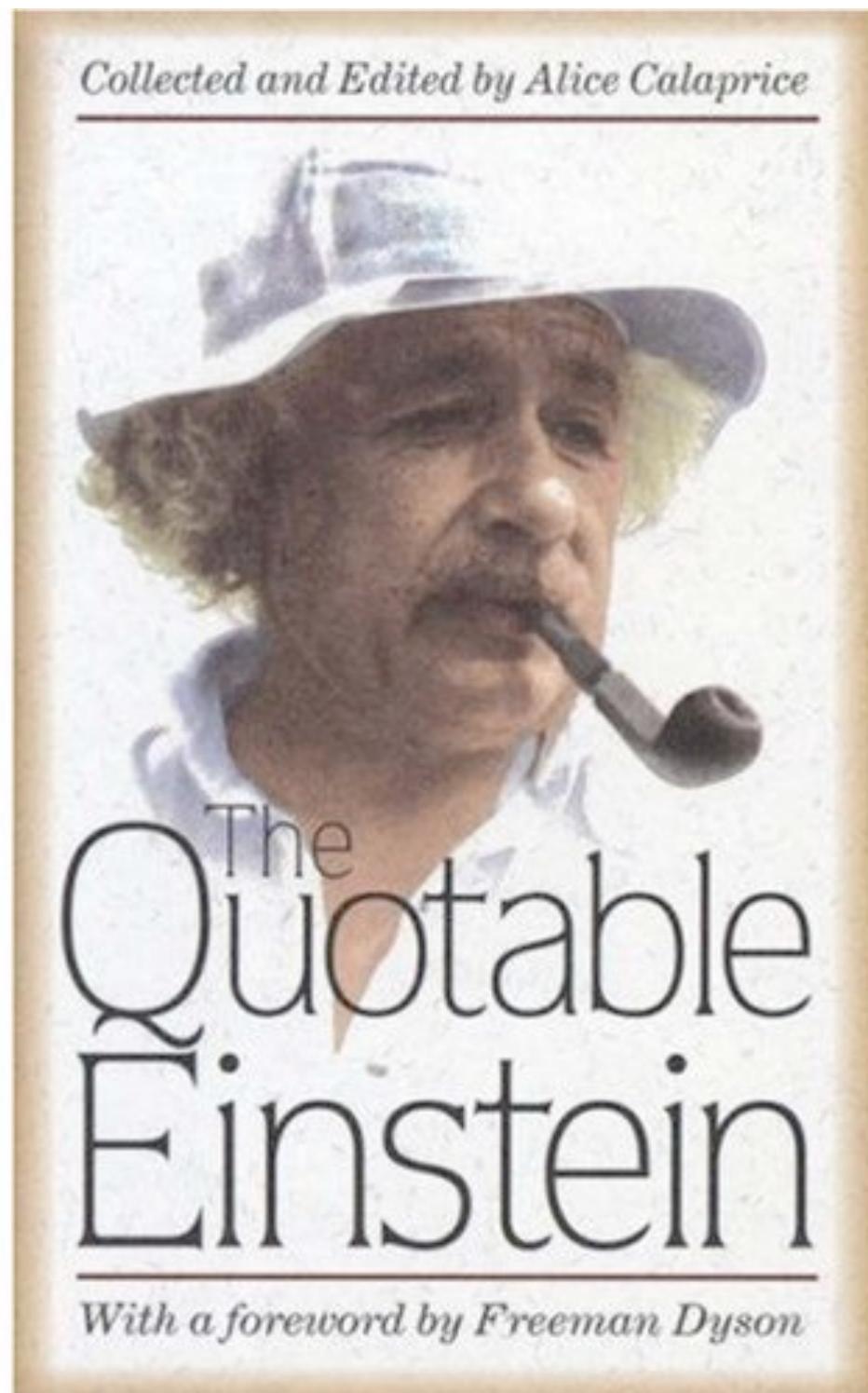
さらには「地球は唯一無二の存在」という認識を深める





The important thing is not to stop questioning. Curiosity has its own reason for existing. One cannot help but be in awe when he contemplates the mysteries of eternity, of life, of the marvelous structure of reality. It is enough if one tries merely to comprehend a little of this mystery every day. Never lose a holy curiosity.

大切なのは、疑問を持つことを止めないこと。好奇心は、それ自身に存在の意味を持っている。



Education is what remains after one has forgotten what one has learned in school.

教育とは、学校で学んだことをすべて忘れたその後に残っているものだ。

- 少数の法則による自然現象の理解
- 論理的な説明
- 原理や理由に対する疑問をもつこと

自然は美しい(数学的にも美しい).  
長い計算のあと美しい結果はたぶん正しい。



# 本日のミニツツペーパー記入項目

出席票を兼ねます。

【15-1】この講義を受けた感想をお願いします。

(いちばん印象深かったこと, 講義を受けて人生何か変わったこと, など)

【15-2】授業を進めるにあたって, 改善した方がよい点があれば, お願いします。

(来年度の講義の参考とさせていただきます)