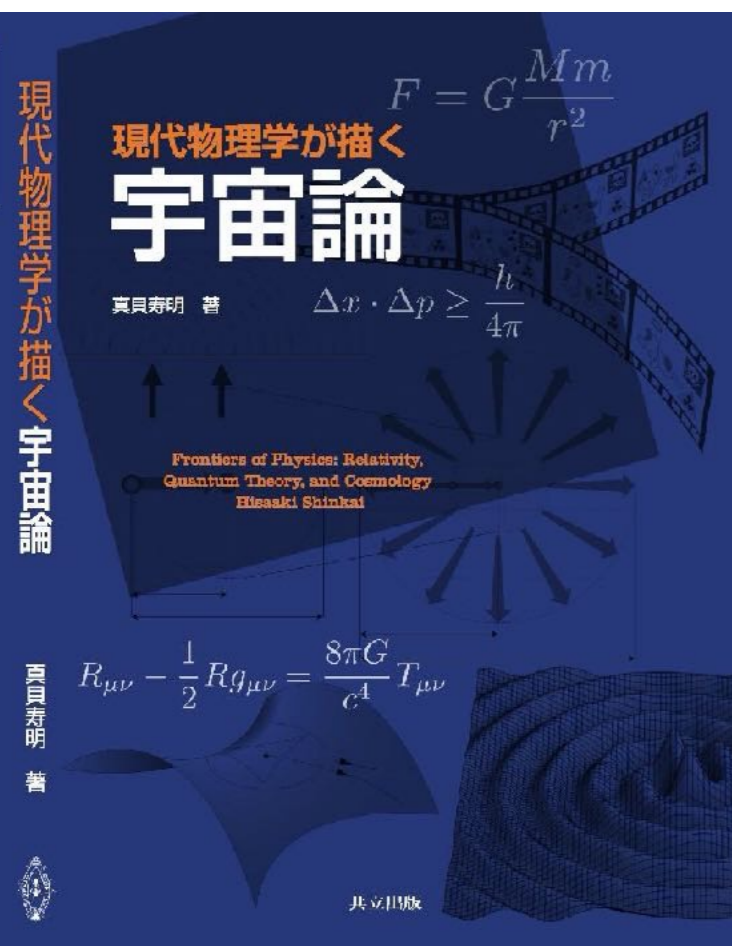


惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？

1. 太陽系を構成する天体
2. 惑星探査
3. 太陽系外惑星探査
4. 地球外生命探査



真貝寿明（しんかい ひさあき）
大阪工業大学 情報科学部 教授
武庫川女子大学 非常勤講師
理化学研究所 客員研究員



<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/nara2020/>



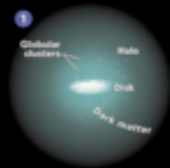
Copyright © 2019 Eri Yokoyama All Rights Reserved

写真提供 横山恵理先生, 奈良県川上村

THE MILKY WAY

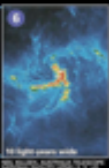
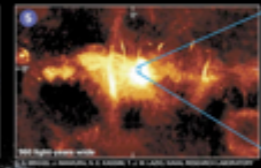
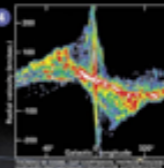
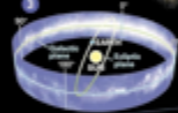
NATIONAL GEOGRAPHIC

Home galaxy of Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode or expel their outer layers as beautiful planetary nebulae, then fade away and die. A thick swarm of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may lie a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.



GUIDE TO THE GALAXY

- Far beyond the galactic disk, yet drawn by its gravity, some stars and globular clusters orbit the galaxy's halo. Regions of dark matter—masses but felt through its gravitational effects—extend beyond that.
- Wast clouds of interstellar dust block much of our night
- my view of the Milky Way, which from our position in the flat galactic disk appears as a fuzzy band of light. Infrared satellites can see through the dust to reveal the galaxy's structure.
- Earth's orbit around the sun lies at a severe angle to the galactic plane.



A TURBULENT HEART

A graph based on a radio survey reveals the whirlpool motion of molecular gas in the inner part of our galaxy. Gas moving away from Earth (top half) and toward Earth (bottom half). The densest gas appears white; less dense, blue. Massive amounts of energy are released near the center of the Milky Way, producing electrons that race along magnetic field lines, illuminating remnants of stellar explosions. Probing even deeper into the core, a radio image details a spiral of hot gas that is falling toward what may be a black hole some 2.6 million times as massive as the sun.

This computer-generated image of the Milky Way—our perspective of a 3-D model newly compiled for MERRILL GEORGE—incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulae.

- Globular star cluster
- Interstellar gas and dust
- Nebulae
- Younger star region
- Older star region
- Interstellar dust
- Galactic bulge or center
- Older star region

Reference numbers for galaxies, nebulae, and star clusters are found in the legend.

NGC (New General Catalog)

Coordinates system centered on Earth's center

PLANETARY NEBULA M2-9



Exact telescopes of the Milky Way, colorful nebulae and star clusters are found throughout Earth's galaxy. Even a patch of the most star may eventually give birth a nebula of surprising beauty.

Just as our sun will die in its death throes some five billion years from now, a dying star expanded into a red giant and was transformed into the nebula M2-9 (above). At its center shines

galaxy, including dark matter rich in antimatter dust that blocks our view of stars beyond. When a star releases a dark nebula, the dust particles reflect starlight and the black

refuses, becoming every star in the cluster is about the same age, billions of years older than our 4.6-billion-year-old sun.

Peering between dust clouds toward the central bulge of the Milky Way, the Hubble Space Telescope focused on a rare clear region in the Sagittarius star cloud (above right). These Sagittarius stars formed at different times, most are older

than the sun. They sparkle like an assortment of gems on a jeweler's velvet pad.

In some dark clouds lurk strange objects like OJ280, BB 1, 26, discovered by a European Southern Observatory near a star in Chile and snuggled in infrared light. A star 20 times as massive as the sun and 70,000 times brighter, it sports a disk of circumstellar dust, shown here in false color, about 20,000 times wider than Earth's

orbit. Light from the hot star is absorbed by and warms the dust, making it glow.

As stars like the sun die, they become factories for interstellar dust. Celestial soot—the remnants of its red-giant stage—surrounds the tiny hot central star of NGC 7527 (above right). If not for this remarkable composite image in infrared and

visible light from the Hubble Space Telescope.

Chords of interstellar dust (right), stream over huge regions along the galactic plane of the Milky Way, are not thick and smooth but seem as frothy as the head of a piece of beer. Supernova shock waves and stellar wind from

morning stars may have shaped this surprising pattern.

When a massive star comes to the end of its nuclear fuel supply, it collapses and then rebounds in a brief, powerful explosion, or supernova. The Chinese called these rare red fireworks "guest stars" and recorded one each every 100 years in the compilation *Shiji* in July 1054 that was done in broad daylight.

In that location today astronomers find the Crab-supernova remnant. At its heart lies a pulsar—a collapsed star—spinning 30 times a second.

Satellite galaxies of the Milky Way meet nearby remarkable celestial phenomena. In the Large Magellanic Cloud (above right), 300,000

light-years long Earth, dusty elementary clouds of dark-green gas reveal their steady march in a radio image from the Australia Telescope Compact Array. The lower half of the cloud (below) is heading toward the Earth while the top (red) turns away.

Combing along the spiral arms of the galaxy, bright emission nebulae mark regions where new stars are forming. The Lagoon Nebula (below), part of 5,000 light-years distant, is partly obscured with the naked eye as a fuzzy spot in the southern constellation Sagittarius. Water-bath images show that it covers more of

the eye than does the full moon. Where dark is once only a vast dark cloud, radiation from the brightest and most massive young star in the nebula, Herschel 36, heats and ionizes the gas across a wide region. Despite the language of the Lagoon Nebula and similar objects has the famous Orion Nebula, such areas are usually little more than hot bricks on the banks of great interstellar clouds.

With new tools, astronomers are unraveling the nature of the Milky Way and measuring distances to stars and nebulae with greater accuracy. Still, they ask, how did the Milky Way form in the first place? How and when did the arms form? How many stars already exist nearby stars besides the 100 already discovered? And the biggest question of all: Do any of them harbor life?

LAGOON NEBULA



With new tools, astronomers are unraveling the nature of the Milky Way and measuring distances to stars and nebulae with greater accuracy. Still, they ask, how did the Milky Way form in the first place? How and when did the arms form? How many stars already exist nearby stars besides the 100 already discovered? And the biggest question of all: Do any of them harbor life?

ロンドン
新しい時代へ

体ひとつで
巨大な岩を登る

暴力が巣くう
エルサルバドル

不思議な昆虫
ツノゼミ

NATIONAL GEOGRAPHIC

ナショナル ジオグラフィック 日本版

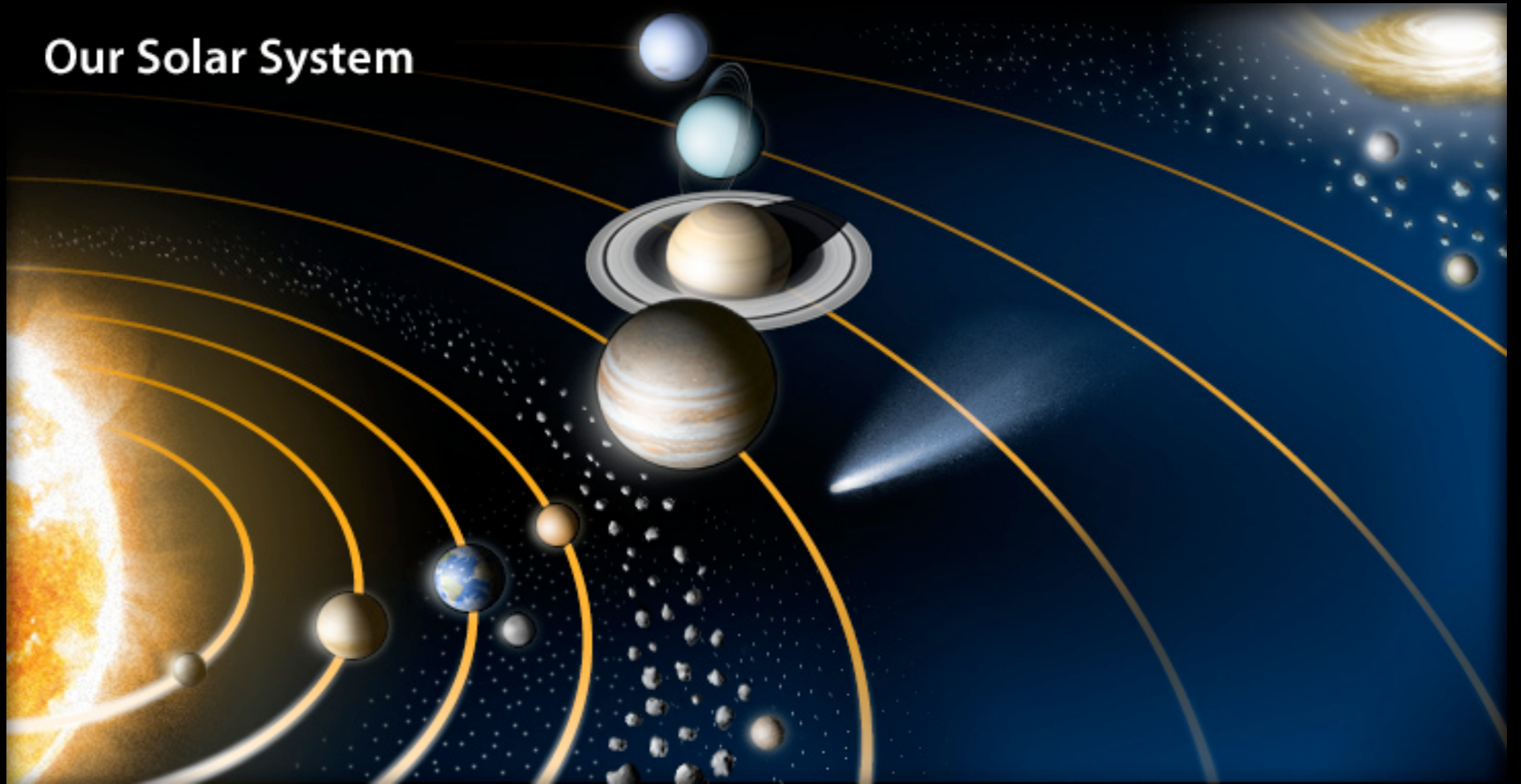
誰か、いますよね？

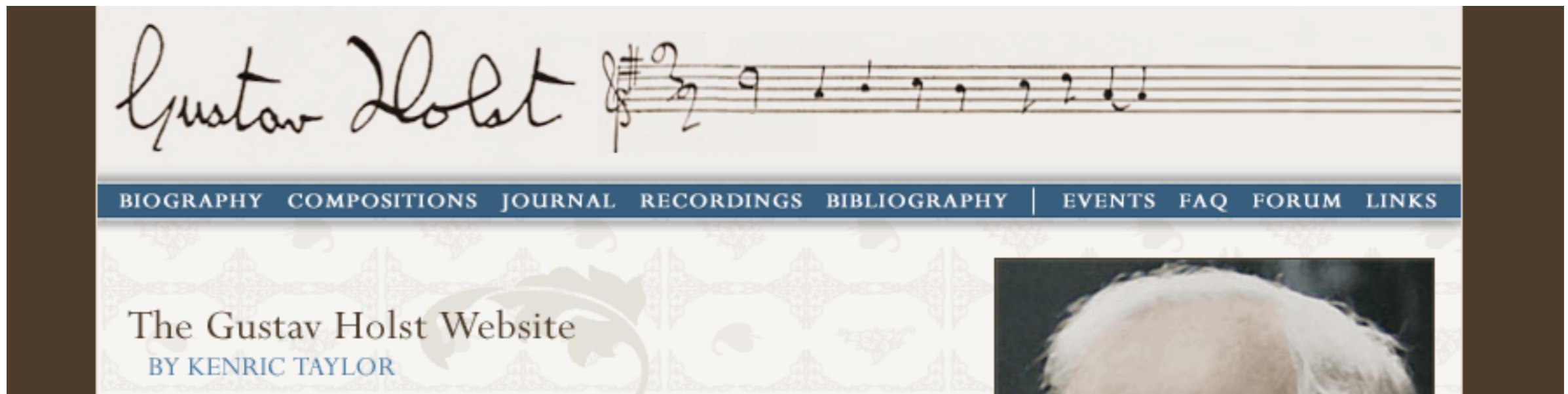
地球の外にも生命が存在することがほぼ確実になってきた。
それを証明しようと、さまざまな探査計画が進められている。



太陽系

Our Solar System



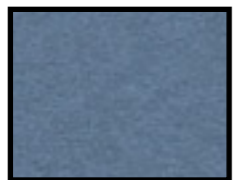


大管弦楽のための組曲「惑星」 (The Planets)
(1914-1916年作曲)

- 1 火星、戦争をもたらす者
- 2 金星、平和をもたらす者
- 3 水星、翼のある使者
- 4 **木星、快樂をもたらす者**
- 5 土星、老いをもたらす者
- 6 天王星、魔術師
- 7 海王星、神秘主義者



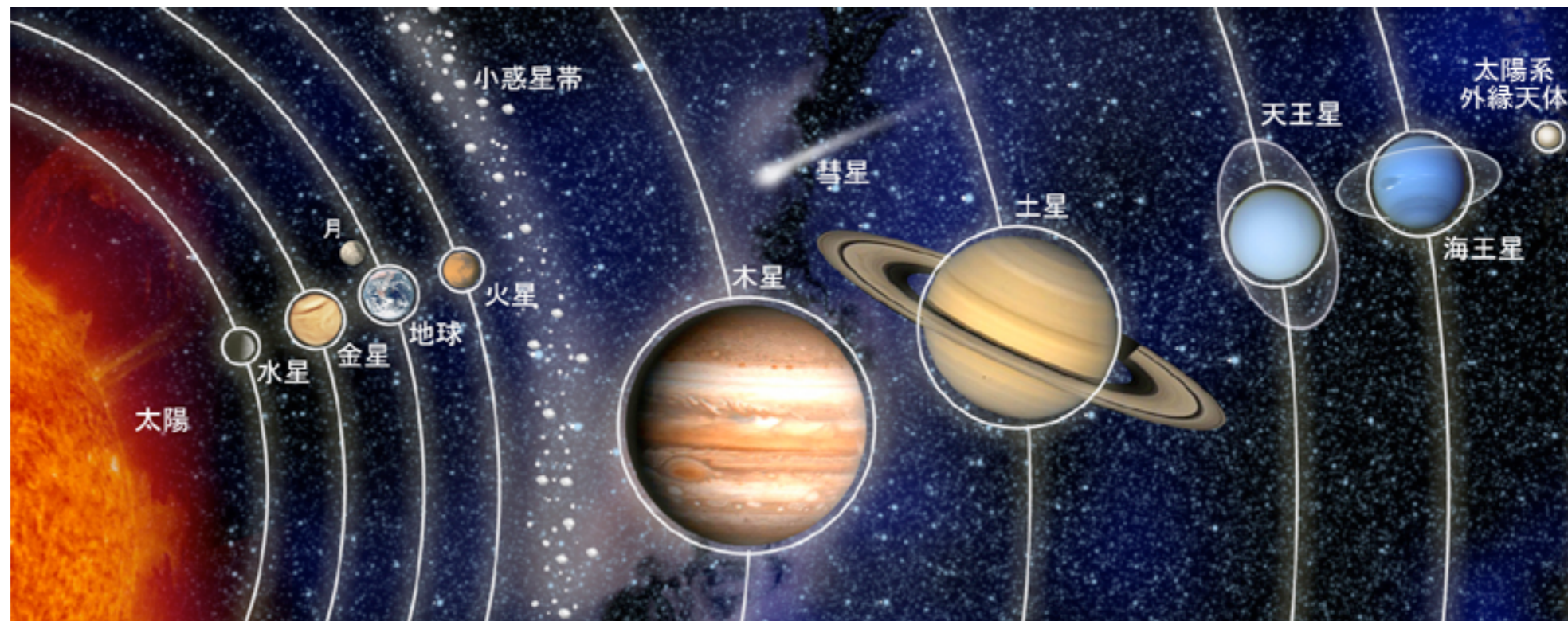
Gustav Holst
1874–1934



Leonard Slatkin: Philharmonia Orchestra

【2006年】

冥王星は、なぜ惑星から外されたか？

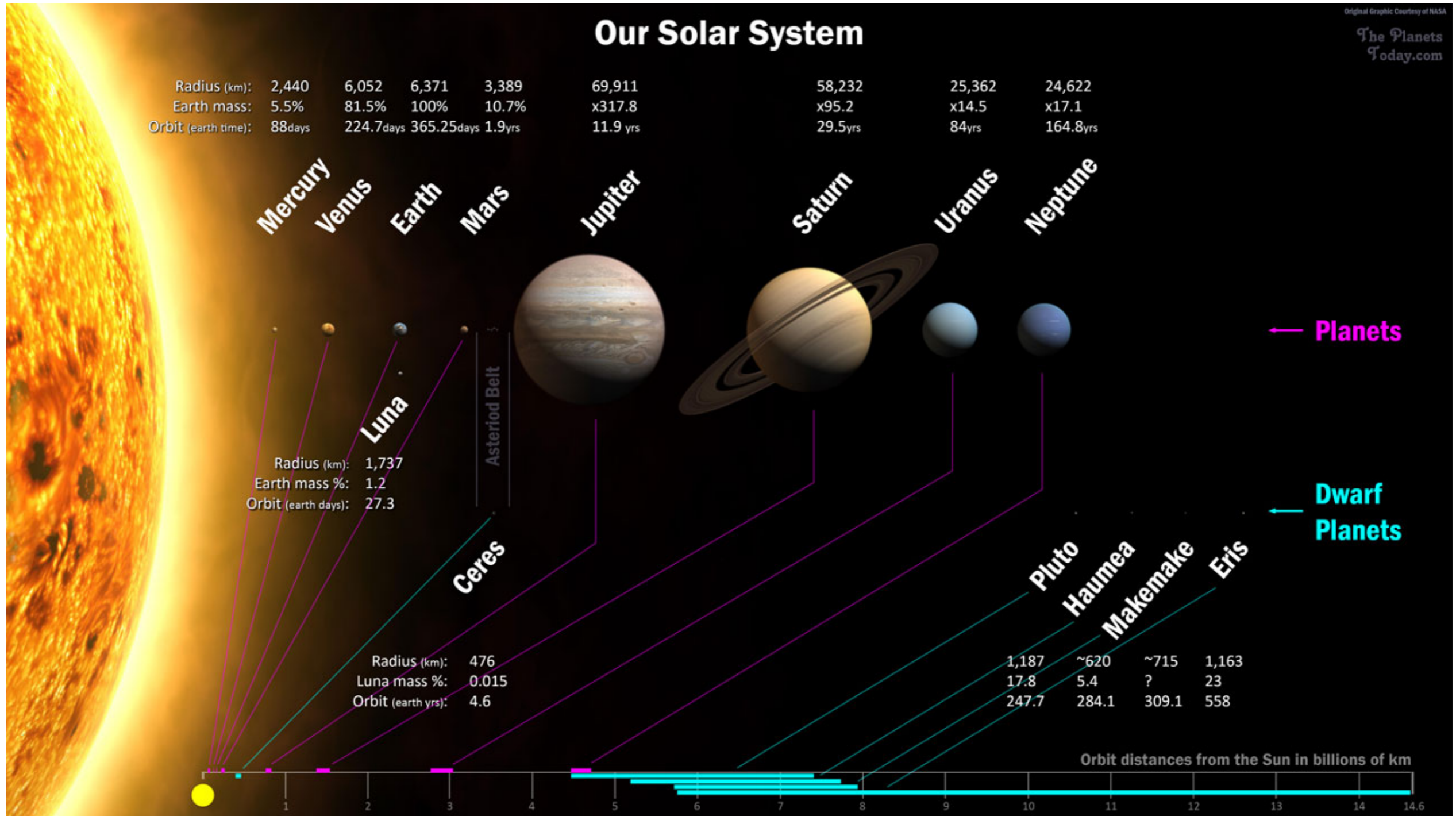


水，金，地，火，木，土，天，海，冥



2006年8月に行われた国際天文学連合 (IAU) の総会で、惑星についての新しい定義が採択。冥王星は惑星ではなくなり「準惑星」に分類されることになった。

太陽系 惑星・準惑星



水金地火ヶ 木 土 天海冥ハマエ

https://www.theplanetstoday.com/solar_system_map.html

太陽系を回る天体の分類

表 1.5 太陽系を回る天体の分類

	定義
惑星	(1) 十分な質量があってほぼ球形の天体である, (2) 太陽を周回する軌道である, (3) その軌道上では他の天体を一掃してしまっている, の 3 条件をみたす天体
準惑星	惑星の定義の (1)(2) をみたし, かつ (3) その軌道近傍では他の天体が存在する (4) 衛星ではない天体.
太陽系小天体	冥王星型天体以外の太陽系外縁天体, 小惑星, 彗星, 惑星間塵など.

惑星

planet

準惑星

dwarf planet

太陽系小天体

small solar system bodies

コラム5 冥王星の降格に反対したアメリカ

惑星の定義を議論した2006年8月の国際天文連合総会において、冥王星を惑星から準惑星へ降格させることに最後まで反対したのはアメリカだった。理由は単純で、冥王星を発見したのがアメリカ人のトンボー (Clyde W. Tombaugh, 1906–97) だったからである。

トンボーは、1930年、複数の天体写真を比較する手法で、移動している天体を発見した。新しい惑星の命名にはさまざまな提案がされたが、ローマ神話で冥府の王の名前 Pluto を最初に提案したのは、当時11歳の少女だったという。ディズニーのアニメに登場するミッキーマウスのペットの犬は、1930年に誕生し、この冥王星の名前にあやかってプルート (Pluto) と名づけられた。

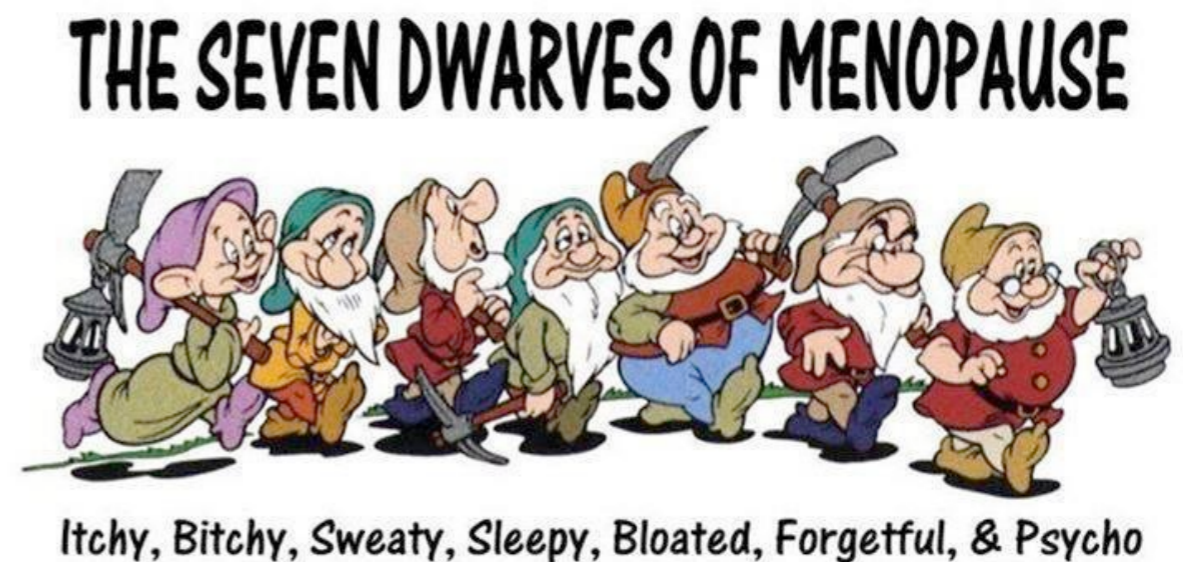
冥王星はアメリカ人にとって親しみのある惑星だったのである。しかし、学問的な議論には心理的な反対はかなわなかった。冥王星が準惑星 (dwarf) に降格することが決まると、ディズニー社は「プルートは白雪姫の『七人の小人 (dwarf)』たちとともにがんばる」との声明をだした。



1928年



1930年

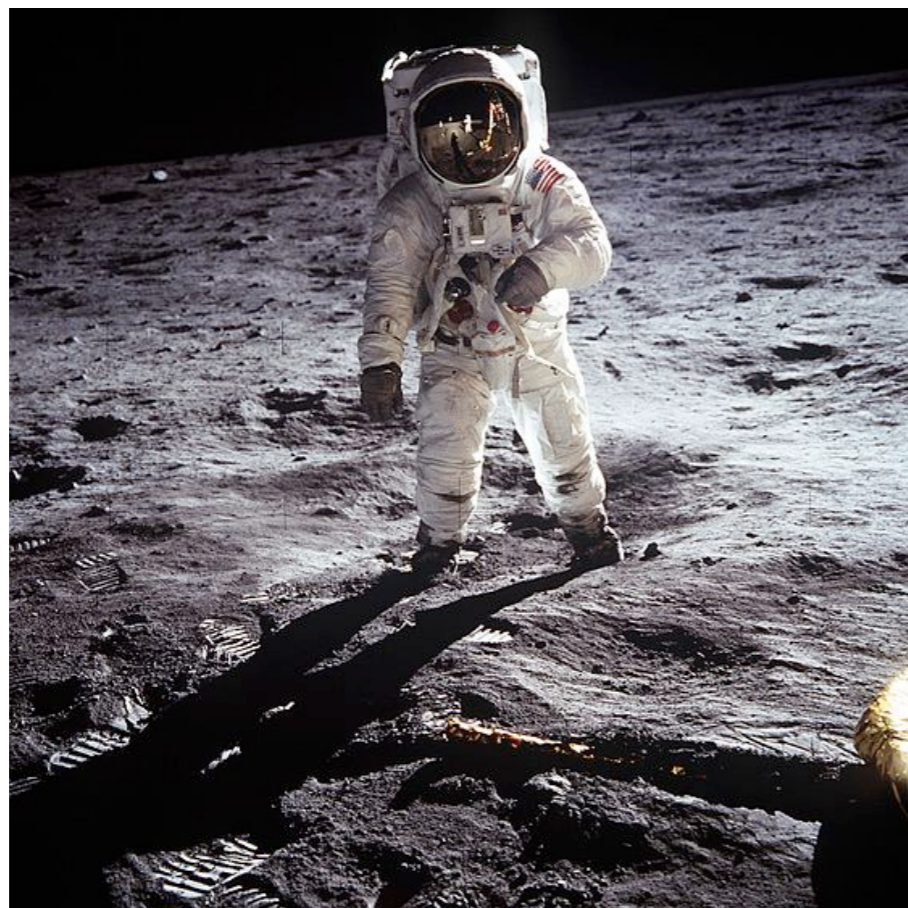


太陽系の惑星と準惑星

表 1.6 太陽系の惑星と準惑星. a は軌道長半径. 離心率はどれだけ円軌道からずれているかを示す (§2.2.2 参照). ハウメアの楕円体の大きさは $1960 \times 1518 \times 996$ km.

天体名	a [AU]	周期 [年]	離心率	半径 [km]	質量 [kg]	分類	
太陽	Sun	–	–	–	696000	1.99×10^{30}	–
水星	Mercury	0.39	0.24	0.21	2440	3.3×10^{23}	岩石惑星
金星	Venus	0.72	0.62	0.007	6052	4.9×10^{24}	岩石惑星
地球	Earth	1.00	1.00	0.02	6378	6.0×10^{24}	岩石惑星
火星	Mars	1.52	1.88	0.09	3396	6.4×10^{23}	岩石惑星
木星	Jupiter	5.20	11.86	0.05	71492	1.9×10^{27}	ガス惑星
土星	Saturn	9.55	29.46	0.06	60268	5.7×10^{26}	ガス惑星
天王星	Uranus	19.22	84.02	0.05	25559	8.7×10^{25}	ガス惑星
海王星	Neptune	30.11	164.77	0.009	24764	1.0×10^{26}	氷惑星
ケレス	Ceres	2.77	4.6	0.08	474	9.5×10^{20}	
冥王星	Pluto	39.54	247.80	0.25	1151	1.3×10^{22}	
ハウメア	Haumea	43.03	282.29	0.197	楕円体	4.0×10^{21}	
マケマケ	Makemake	45.35	305.45	0.163	??	$4.0 \times 10^{21}?$	
エリス	Eris	68.05	305.45	0.163	??	$1.66 \times 10^{22}?$	

太陽系惑星探査：NASAによる月・火星探査



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。

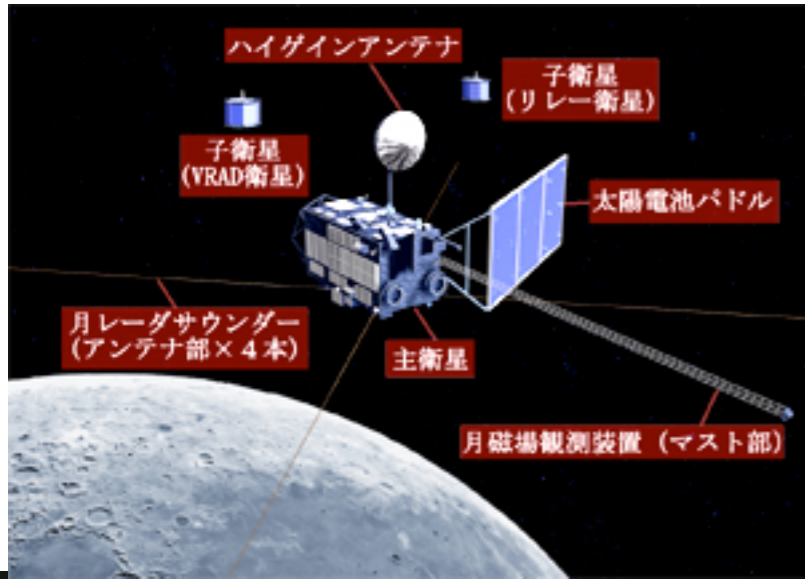
I'm going to step off the LM now.
これより着陸船から足を踏み降ろす。

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。



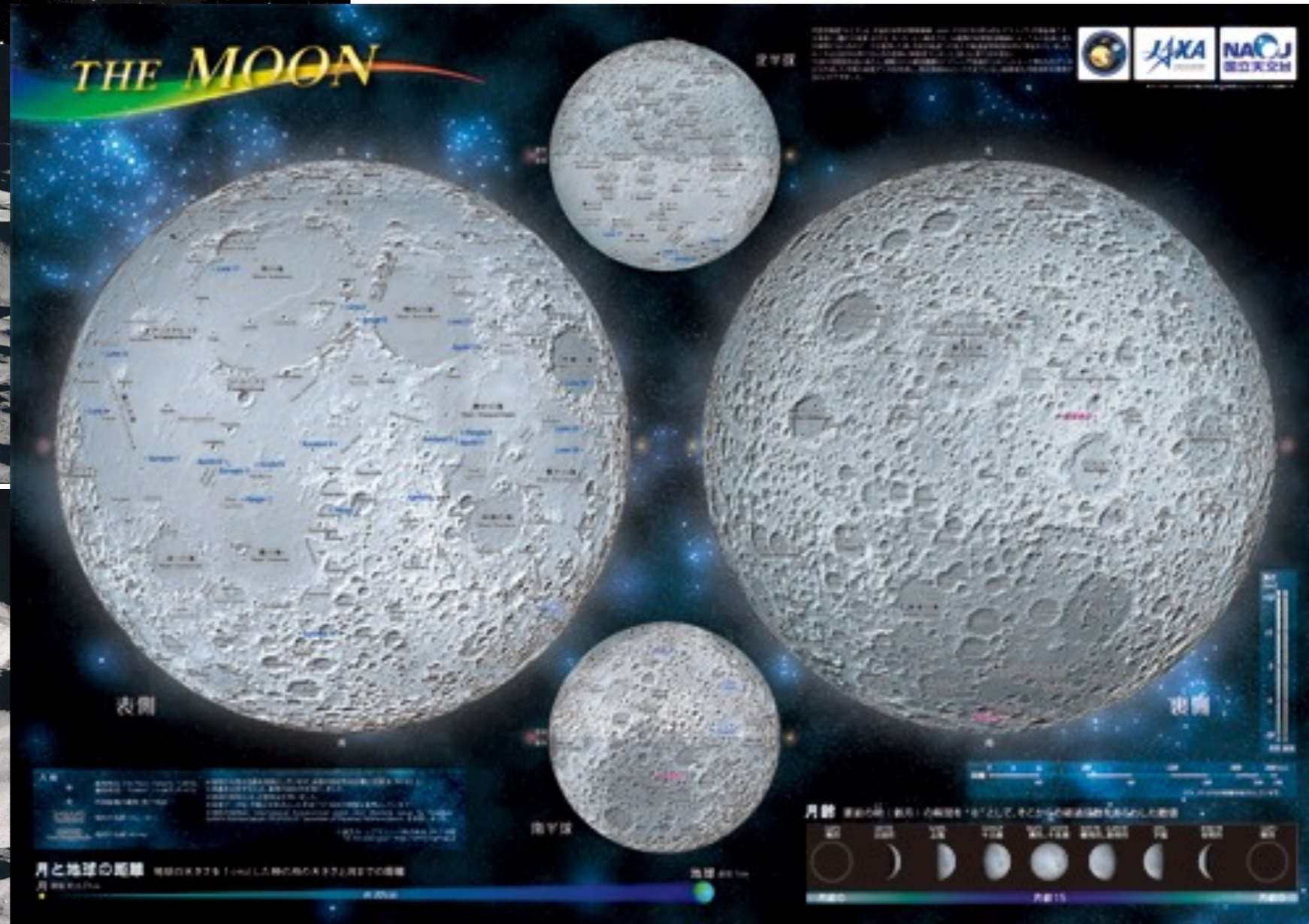
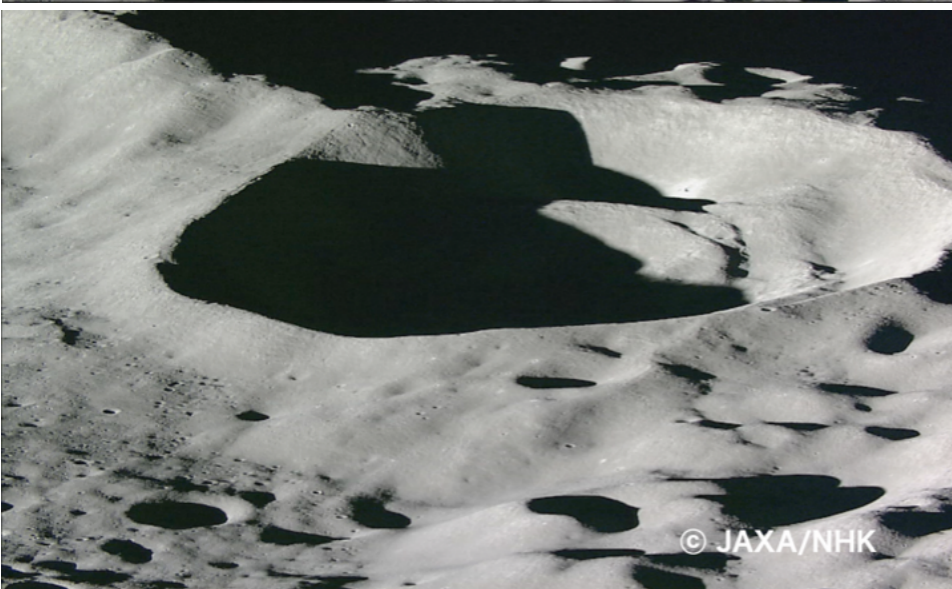
月探査機かぐや (2007-2009) による月面撮影



<http://wms2.wms.selene.darts.isas.jaxa.jp/>

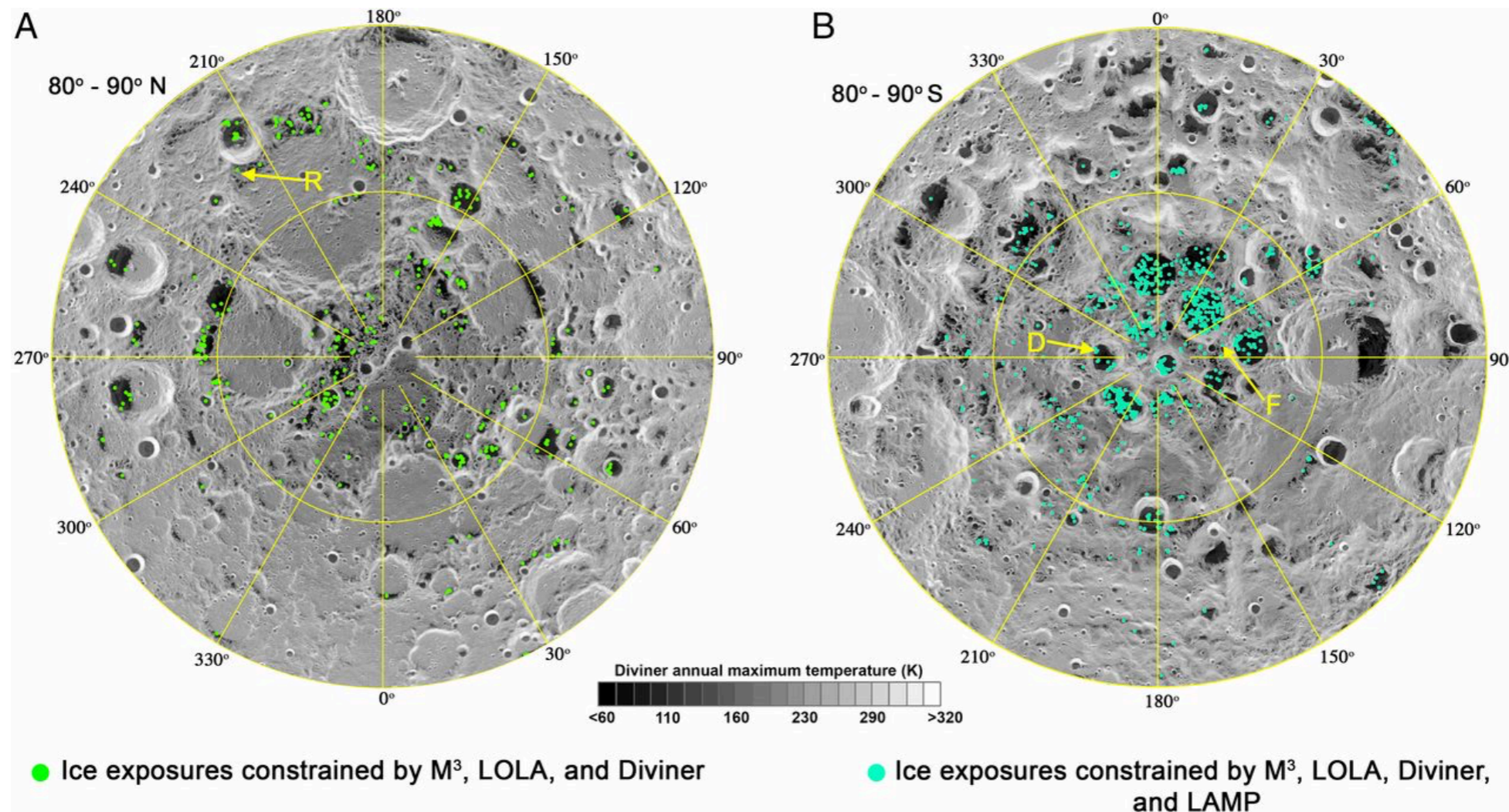
<http://www.kaguya.jaxa.jp>

月の裏側はでこぼこ。
「海」がない。



月に水がある！

2018/8/29



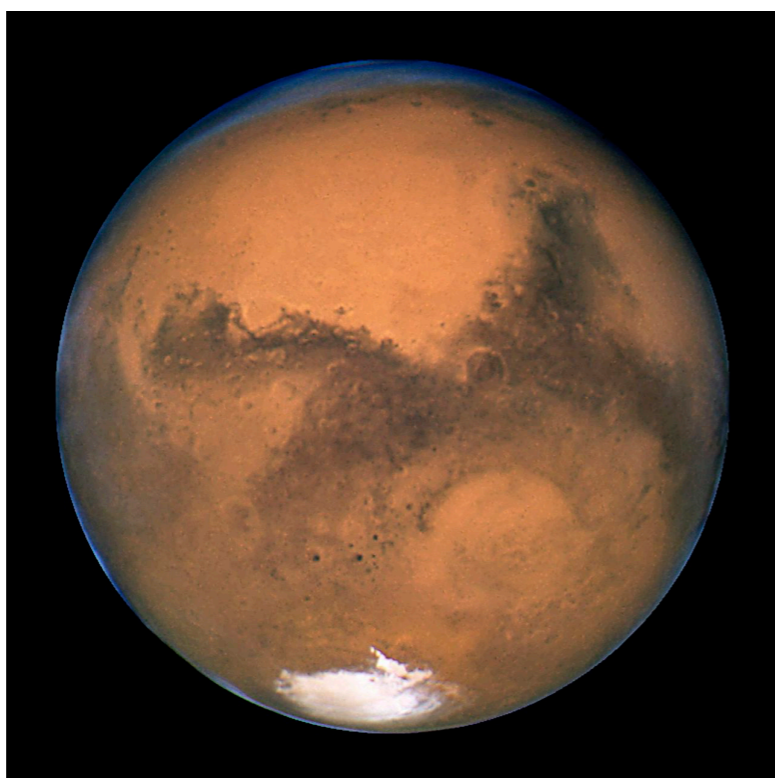
2008年から2009年の間に運用されていたインドの月周回機「チャンドラヤーン1号」に搭載されたNASAのレーダー「Moon Mineralogy Mapper (M3)」が取得した観測データの分析により、月面の極域に水が氷の状態で存在する証拠が直接観測された。

氷が観測されたのは、極域のクレーター内にある「永久影」と呼ばれる常に日陰となる領域で、氷は地表数ミリメートルの深さにある、という。マイナス170°Cの領域なので、真空でも水が蒸発しない状態だという。

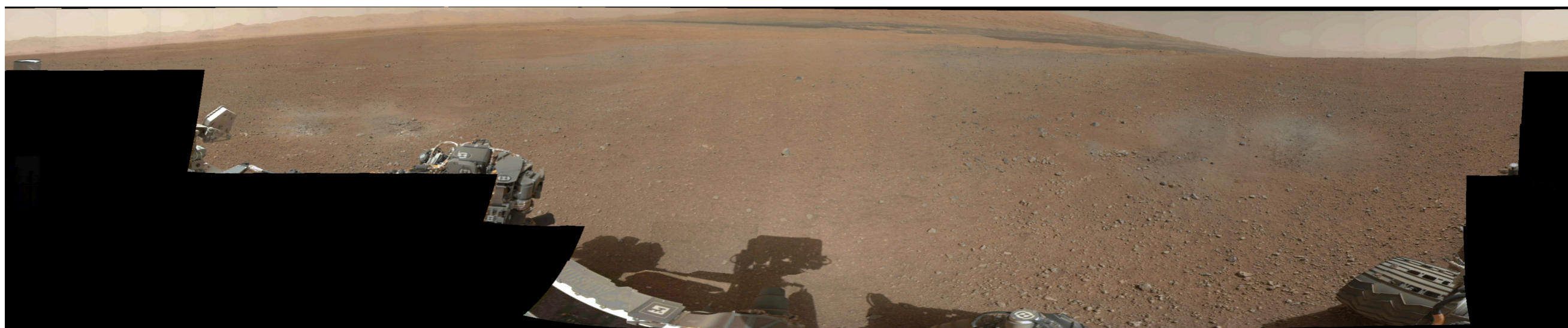
<https://doi.org/10.1073/pnas.1802345115>

<https://wired.jp/2018/08/29/moon-water-evidence/>

太陽系惑星探査：NASAによる火星探査



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

太陽系惑星探査：NASAによる火星探査

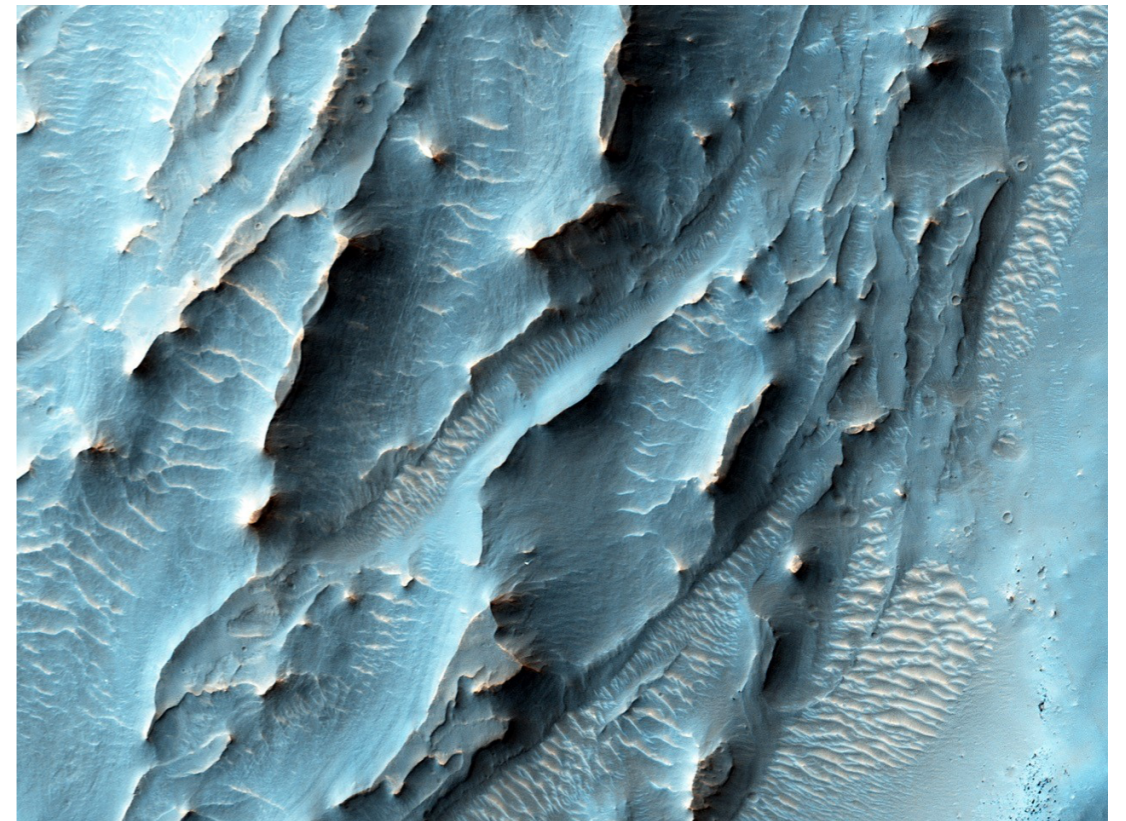
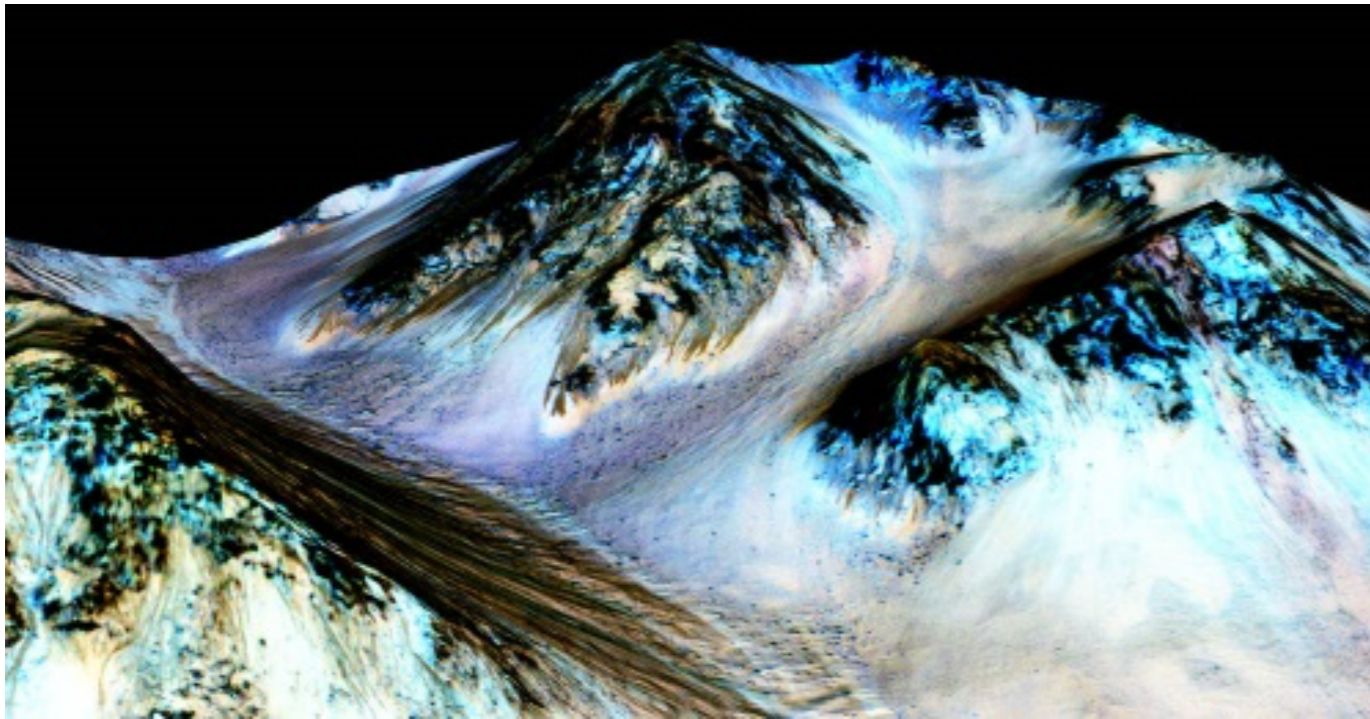
探査機名称	打ち上げ	
2001 マーズ・オデッセイ (2001 Mars Odyssey)	2001年4月	10月24日に火星周回軌道。南極と北極を覆う二酸化炭素の氷の下に大量の水が存在する可能性を報告。現在も観測を継続。
マーズ・エクスプロレーション・ローバー A (Mars Exploration Rover: MER) /スピリット (Spirit)	2003年6月	2004年1月3日に火星表面に着陸。クレーターの岩石の丘、ハズバンド・ヒル (Husband Hill) に登頂。2011年4月にミッション終了。
マーズ・エクスプロレーション・ローバー B /オポチュニティ (Opportunity)	2003年7月	2004年1月24日に火星表面に着陸。流水の痕跡を示す階層パターンを発見。現在も観測を継続。
マーズ・リコネッサンス・オービター (Mars Reconnaissance Orbiter)	2005年8月	2006年3月10日に火星周回軌道。水の存在を示す証拠として火星の表面で水和鉱物の一つである「過塩素酸塩」を検出。現在も観測を継続。
フェニックス (Phoenix)	2007年8月	2008年5月25日に火星の北極に着陸。火星の冬の到来の影響でバッテリー機能が低下、2008年11月2日を最後に通信途絶。
マーズ・サイエンス・ラボラトリー (Mars Science Laboratory) / キュリオシティ (Curiosity)	2011年11月	2012年8月6日に火星表面着陸。火星の土壌・生命が保持できるかどうかの可能性を調査。現在も観測を継続。
メイブレン (Mars Atmosphere and Volatile Evolution, MAVEN)	2013年11月	2014年9月21日に火星周回軌道。火星周回軌道から火星の大気、太陽風との関連について調査。現在も観測を継続。

火星に水がある!

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 の長さにと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。

火星の鉱物採集調査

NASA Perseverance

2020年7月30日打ち上げ, 2021年2月19日着陸



微生物生息可能性の探索

土壌サンプルの収集、火星の表面に保存

火星の大気から酸素生産を試行

中国 天問1号 Tianwen-1

2020年7月打ち上げ,

2021年2月火星軌道到達.

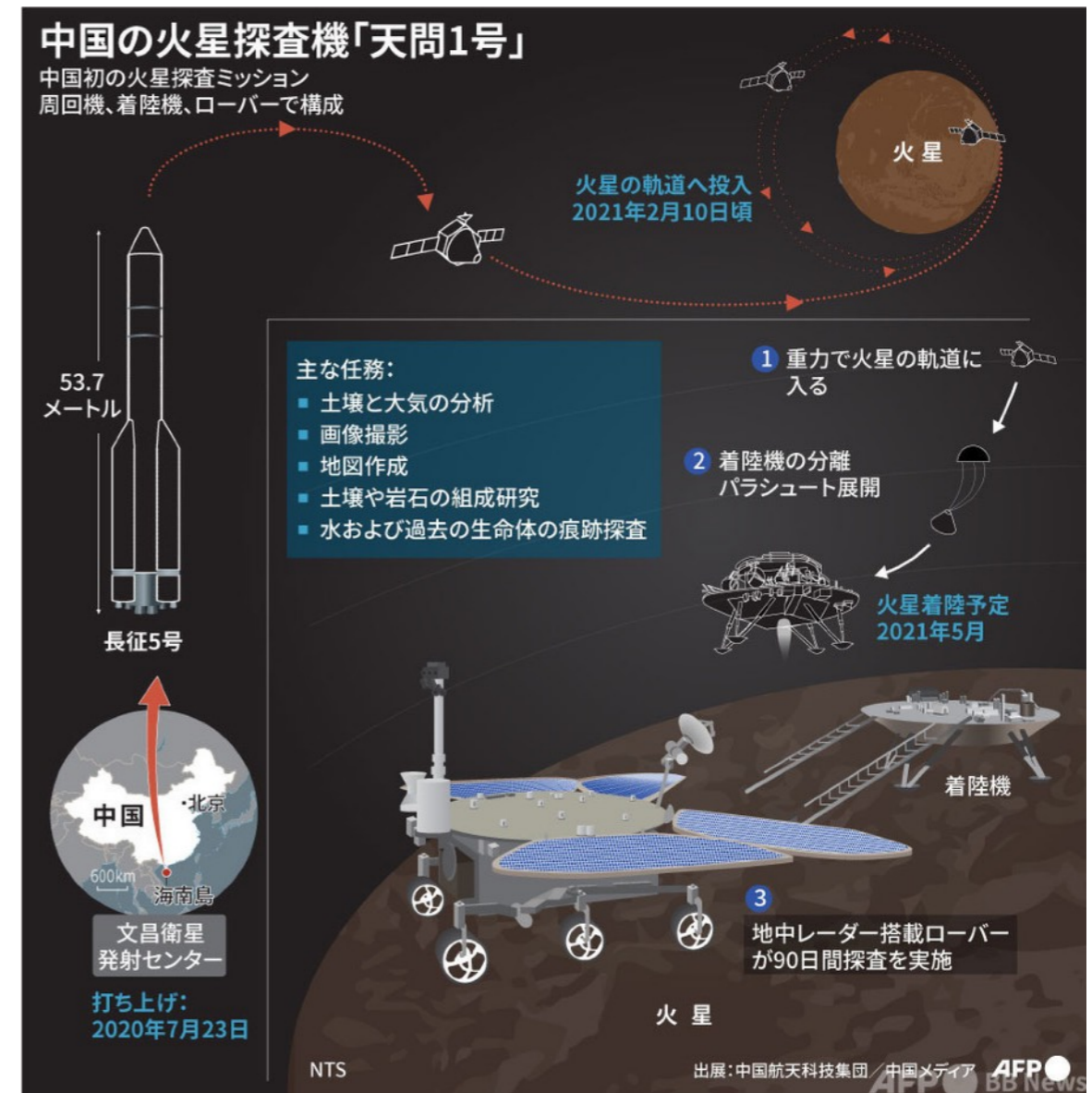
5月着陸予定, 90日間調査.

UAE Hope

2020年7月打ち上げ (JAXA打ち上げ)

2021年2月火星軌道到達.

2年間周回して大気など調査.



太陽系の小惑星

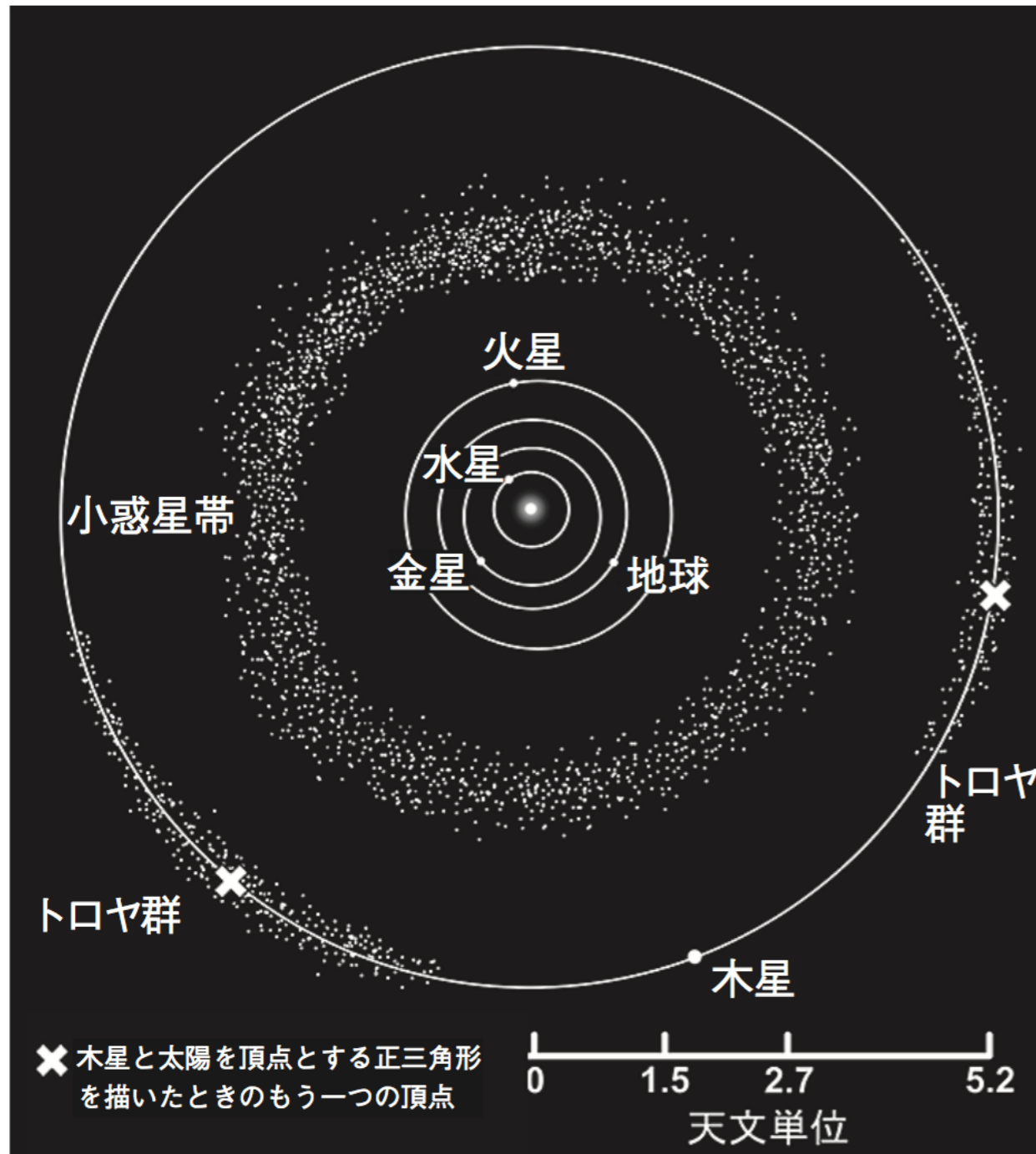
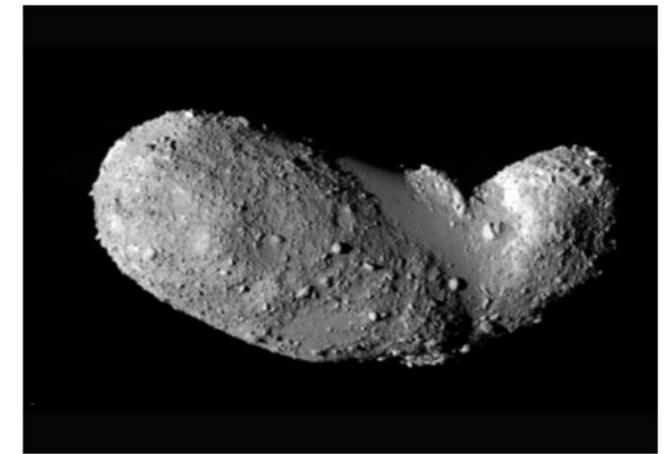
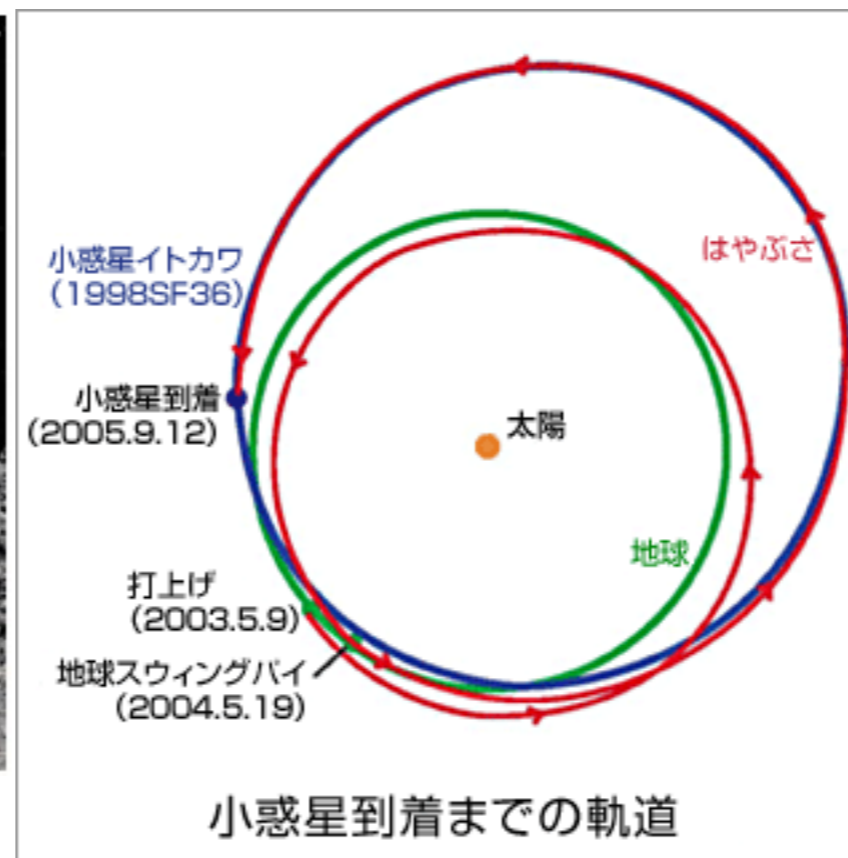


図 1.20 小惑星帯は火星と木星軌道の間にある。また、木星軌道にはトロヤ群と呼ばれる小惑星帯もある。トロヤ群は太陽と木星を2つの頂点として正三角形を描いたときの3つ目の頂点付近にある。

小惑星探査機 はやぶさ (2003年打ち上げ-2010年帰還)



- 2003年5月9日 M-Vロケット5号機によって打ち上げ
- 2004年5月19日 地球スウィングバイ
- 2005年9月12日 小惑星イトカワに到着
- 2005年11月 史上初の小惑星への着陸を成功
- 2006年1月 通信途絶, 燃料漏れなどのトラブル
- 2010年6月 地球に帰還 (予定より3年遅れ)



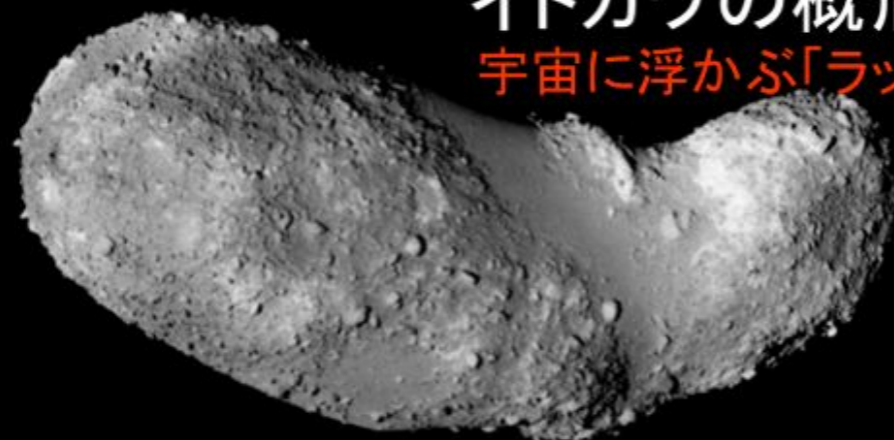
糸川英夫 (1912-1999)

「日本の宇宙開発・ロケット開発の父」

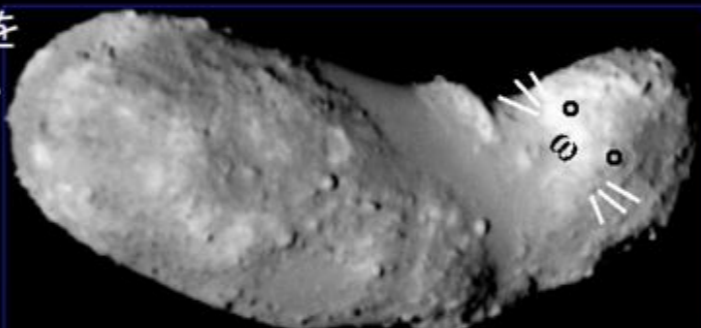
小惑星探査機 はやぶさ (2003年打ち上げ-2010年帰還)



イトカワの概形
宇宙に浮かぶ「ラッコ」



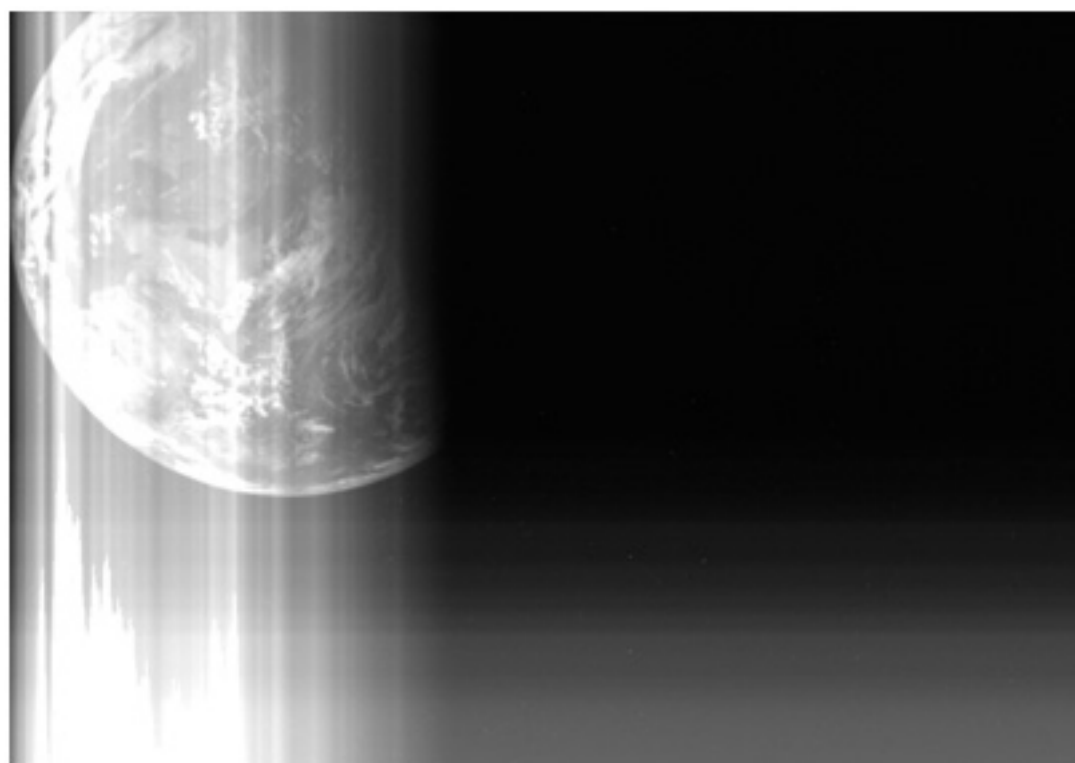
太陽系黄道面を海面、小惑星をそこに浮くラッコに見立てた。頭部と胴体、くびれた首、腹から両脇に掛けてと背に滑らかな表面が見える。右は、運用中の関係者に出回ったアスキーアート。



+315 deg / 2005-09-14T16:10:09.98 / 2376966803



小惑星探査機 はやぶさ (2003年打ち上げ-2010年帰還)



はやぶさが最後に撮影した写真 (地球)



大西浩次氏



2010年6月カプセル回収

小惑星探査機 はやぶさ2 (2014年12月打ち上げ)

太陽系の起源・進化を解明し、生命の原材料物質を調べるため、小惑星に着陸し、地球に岩石を持ち帰る2回目のプロジェクト小惑星探査機「はやぶさ2」が、いよいよ打ち上げられる。

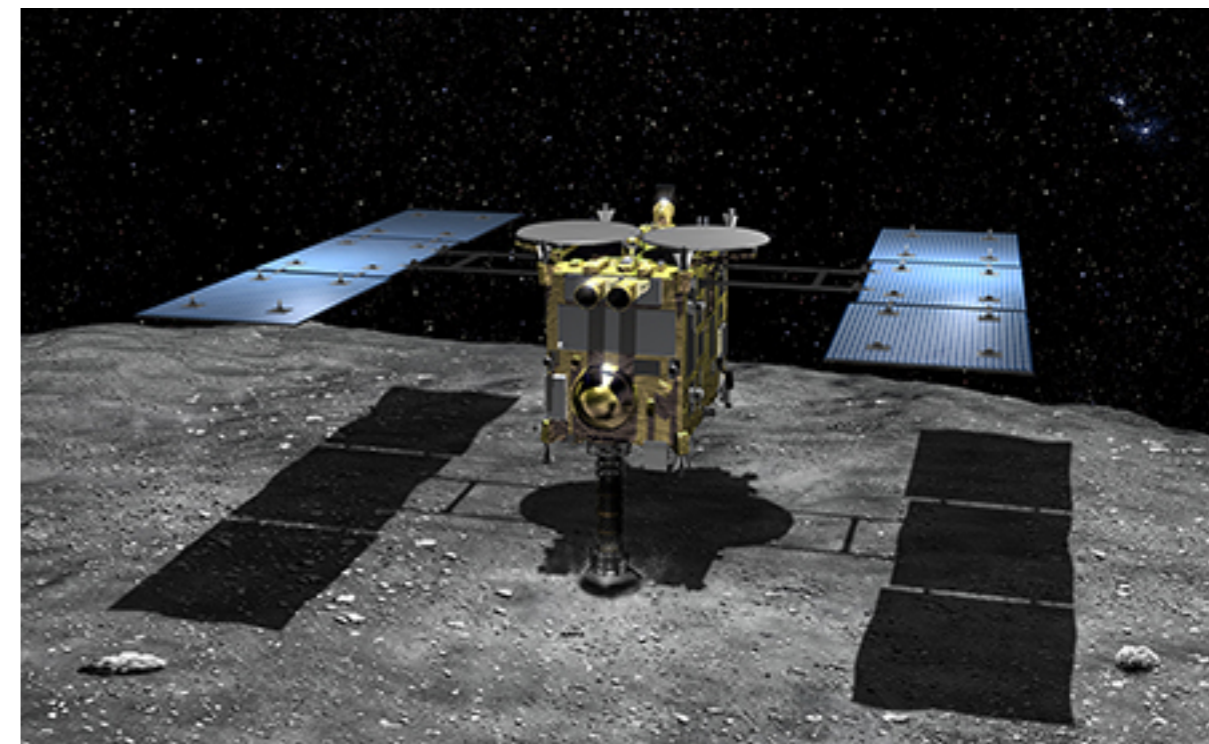
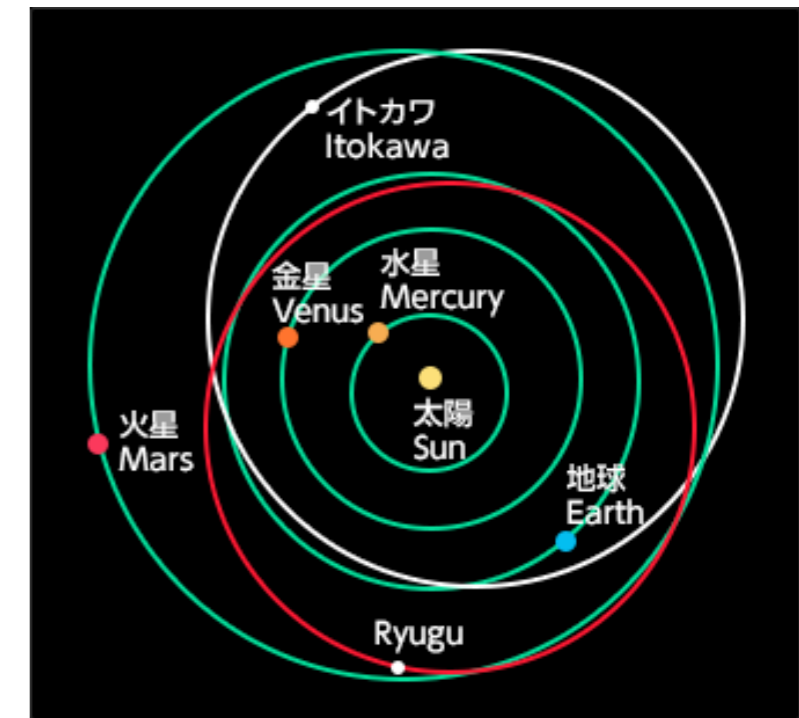
探査の候補となっているのは「1999 JU3」という小惑星で、地球に接近する軌道を持つ地球接近小惑星(NEO)のひとつ。大きさは900m程度。

鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにし、小惑星の再集積過程、内部構造、地下物質を調査することにより、小惑星の形成過程を調べる。

2018年小惑星着陸, 2020年地球へ帰還予定。

リュウグウ
と命名

リュウグウへ

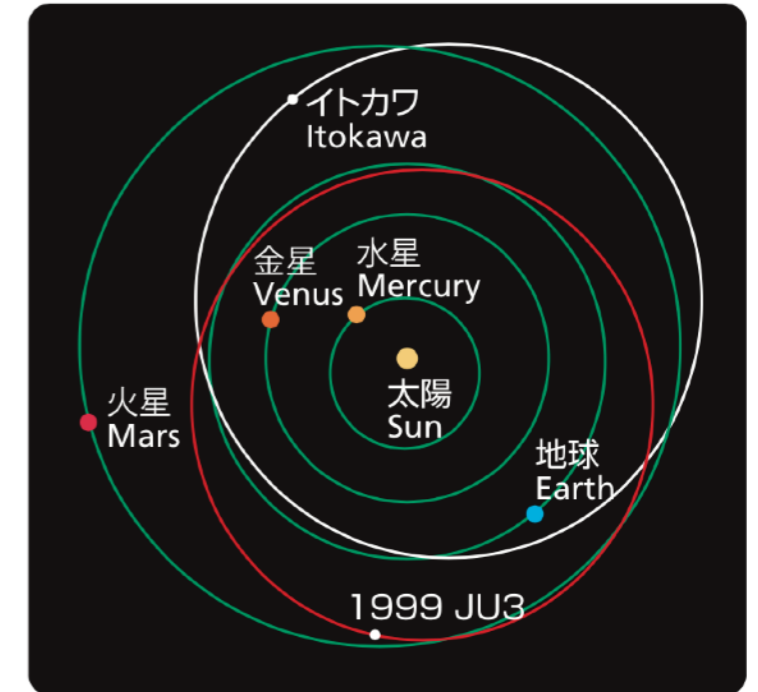
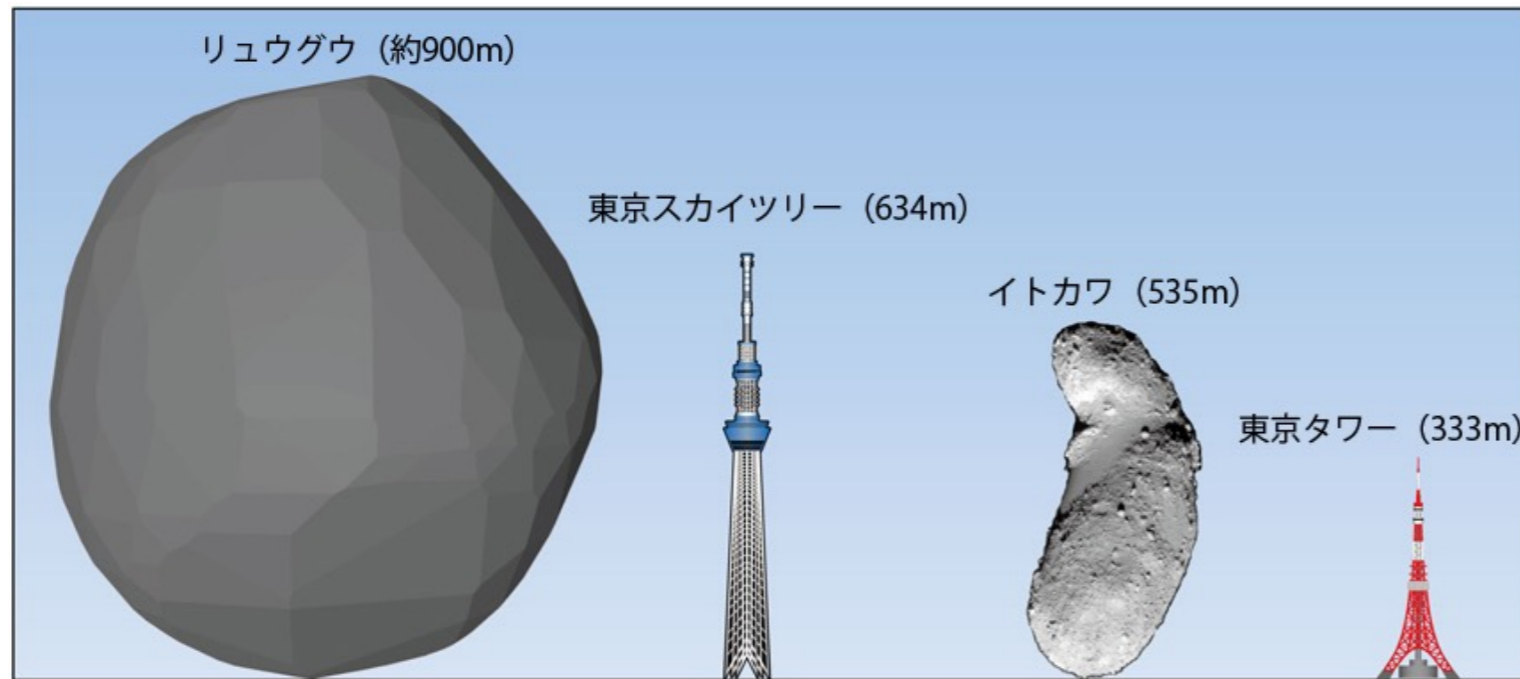


12月6日帰還
ほぼ予定どおり

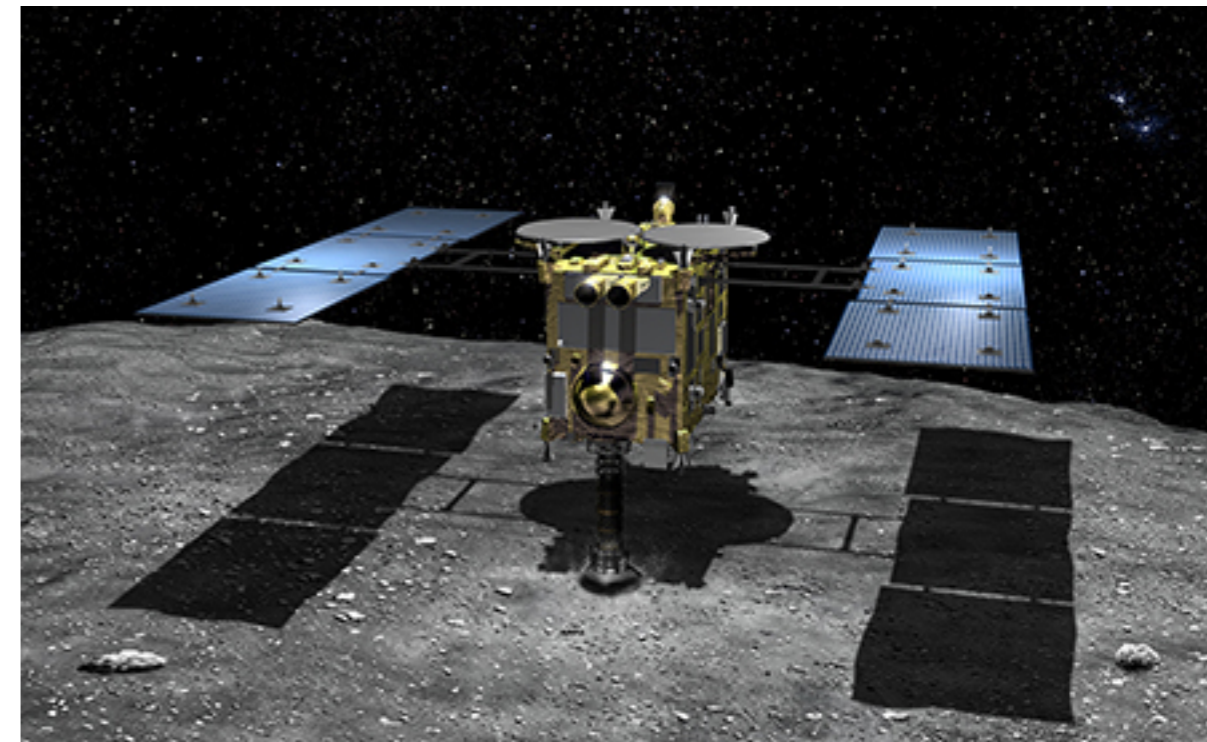
2014/11/30

小惑星探査機 はやぶさ2 (2014年12月打ち上げ)

リュウグウへ

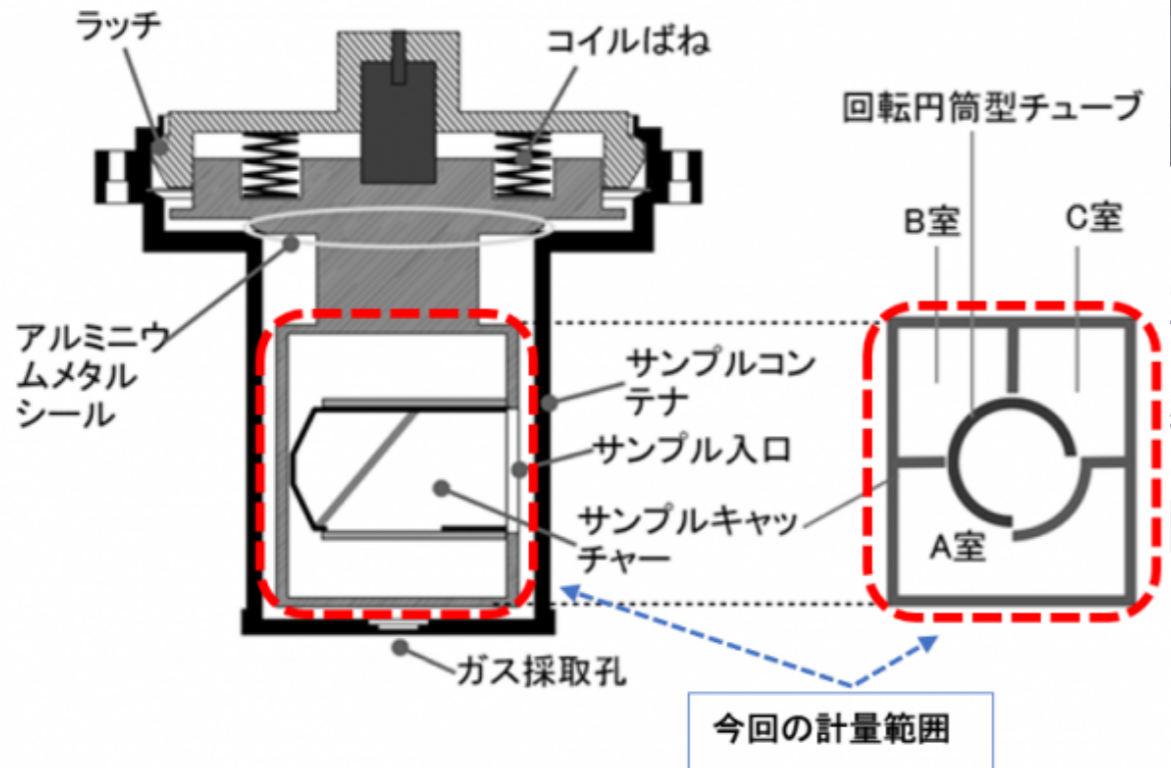


<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180323/>





小惑星探査機 はやぶさ2 (小惑星からの試料回収成功！)



2020年12月18日

小惑星探査機「はやぶさ2」が採取した小惑星 Ryugu (リュウグウ) サンプルは約5.4グラム

小惑星探査機「はやぶさ2」再突入カプセルにより地球帰還した小惑星Ryugu(リュウグウ)サンプルの重量が約5.4グラムであることがわかりました。

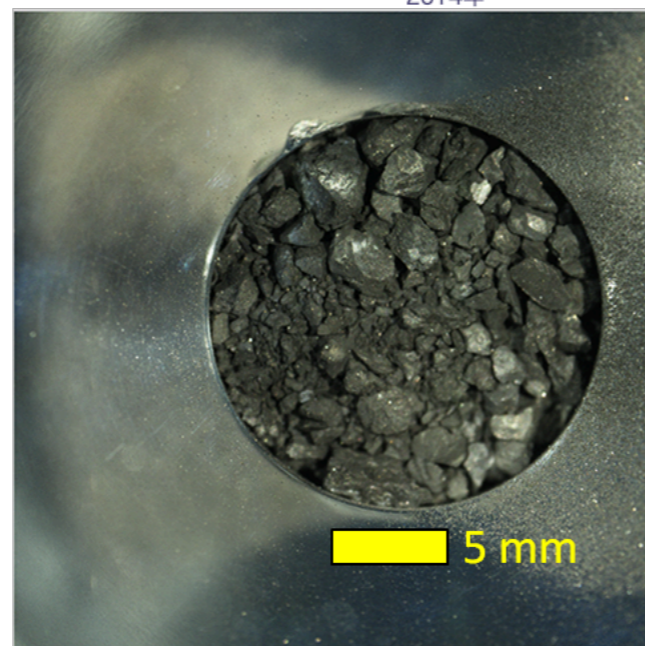
これは、2020年12月18日にJAXA相模原キャンパス内地球外試料キュレーションセンターにて、小惑星探査機「はやぶさ2」再突入カプセルより取り出したサンプルコンテナ内の「サンプルキャッチャー」全体としてサンプル込みで秤量することにより、打上げ前の「サンプルキャッチャー」重量との差分から、採取したサンプルのおおよその総重量(A、B、C室内サンプルの合計)を算出しました。これには12月14日にサンプルコンテナの底面に確認した「サンプルキャッチャー」外のサンプル量は含まれません。

「はやぶさ2」設計時の目標サンプル収量として、初期分析に必要な科学分析を実施できるだけの量としていた0.1グラムを大きく超えるサンプル量が採取できていたこととなります。

<http://www.isas.jaxa.jp/topics/002526.html>



A室開封後の画像



http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20201225_samples/index.html

ドレークによる地球外文明の推定

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」は、太陽系が属する銀河系内に現存する文明の数 N を推定する式である。

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L \quad (5.11)$$

式の右辺の記号の意味と推定値を表 5.5 に示すが、楽観的に考えるか悲観的に考えるかで、ずいぶんと最後の値が違ってくる。



図 5.46 Frank Drake (1930–)

表 5.5 ドレークの式 [(5.11) 式] にいれるべき値はどれだろうか。天の川銀河にある恒星は約 2000 億個といわれているが、はたして知的生命体の存在する星の数はいくつだろうか。

	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もつ星の割合	1.0	0.5	極めて小
n_e 星のまわりで生命にとって適当な環境をもつ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
f_l 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

ハビタブルゾーン

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

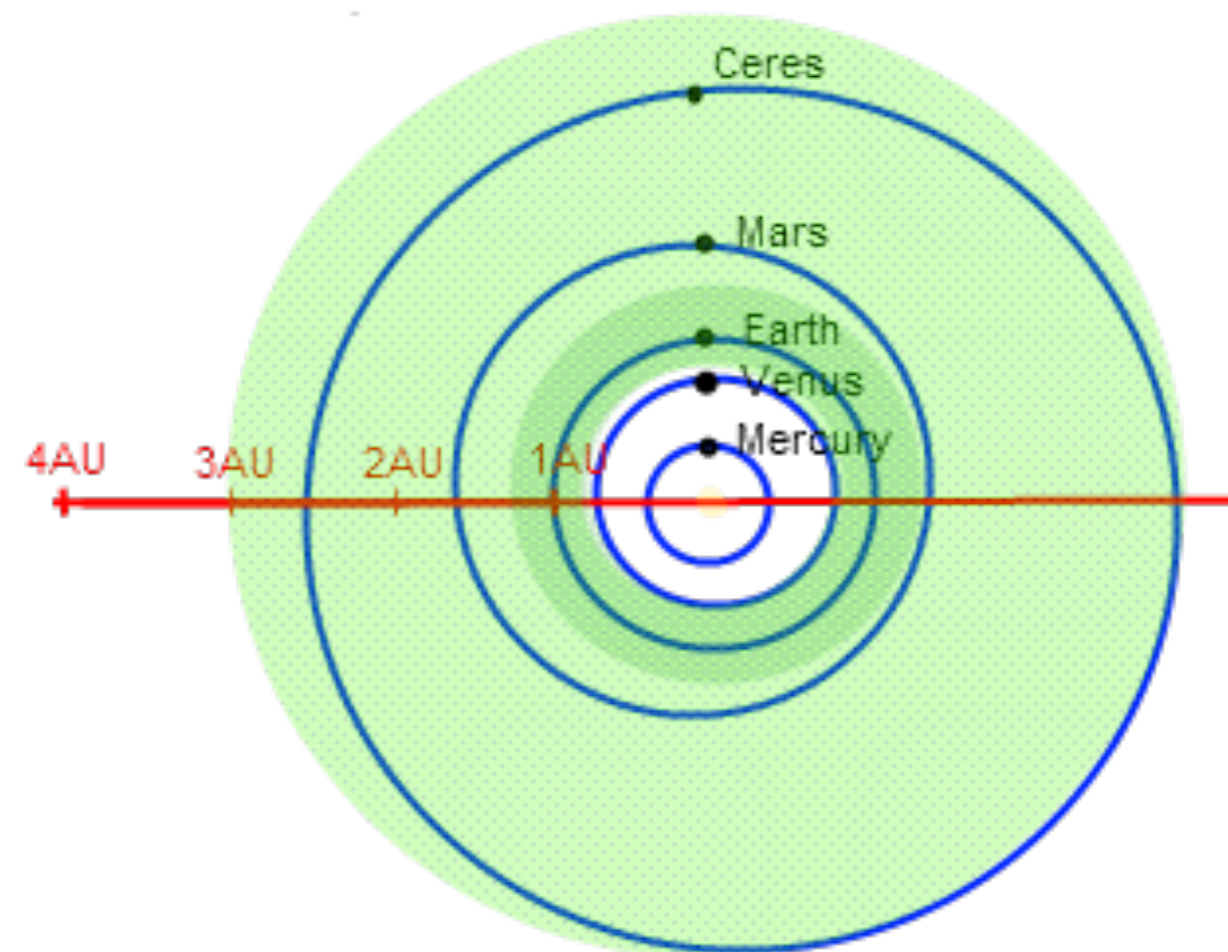
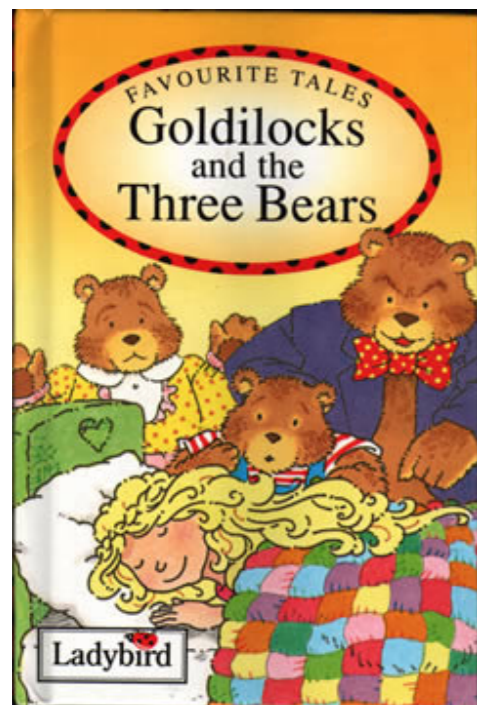
条件1：水が液体として存在できる位置に惑星があること

= **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)



探査の方法

★直接観測

惑星からの光を直接観測する方法。 (2008年から発見)

★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により精密観測する方法。 (2009年から発見)

★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方法。 (2009年までは最多)

★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る方法。
(2011年よりKepler衛星が大量発見中)

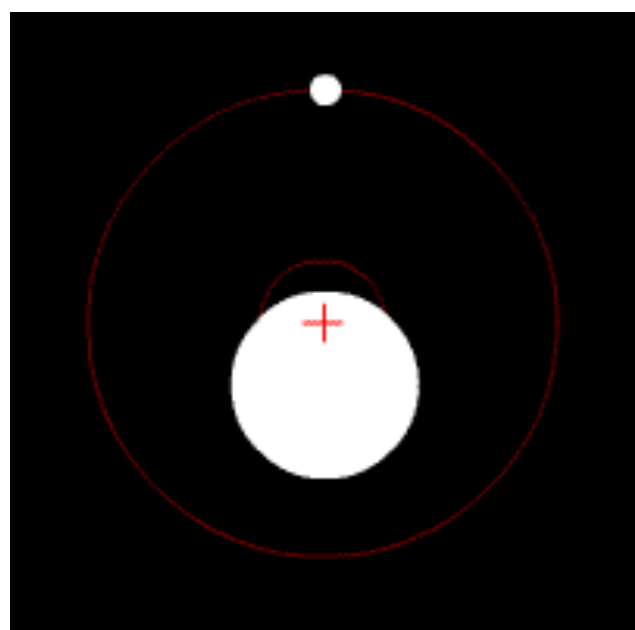
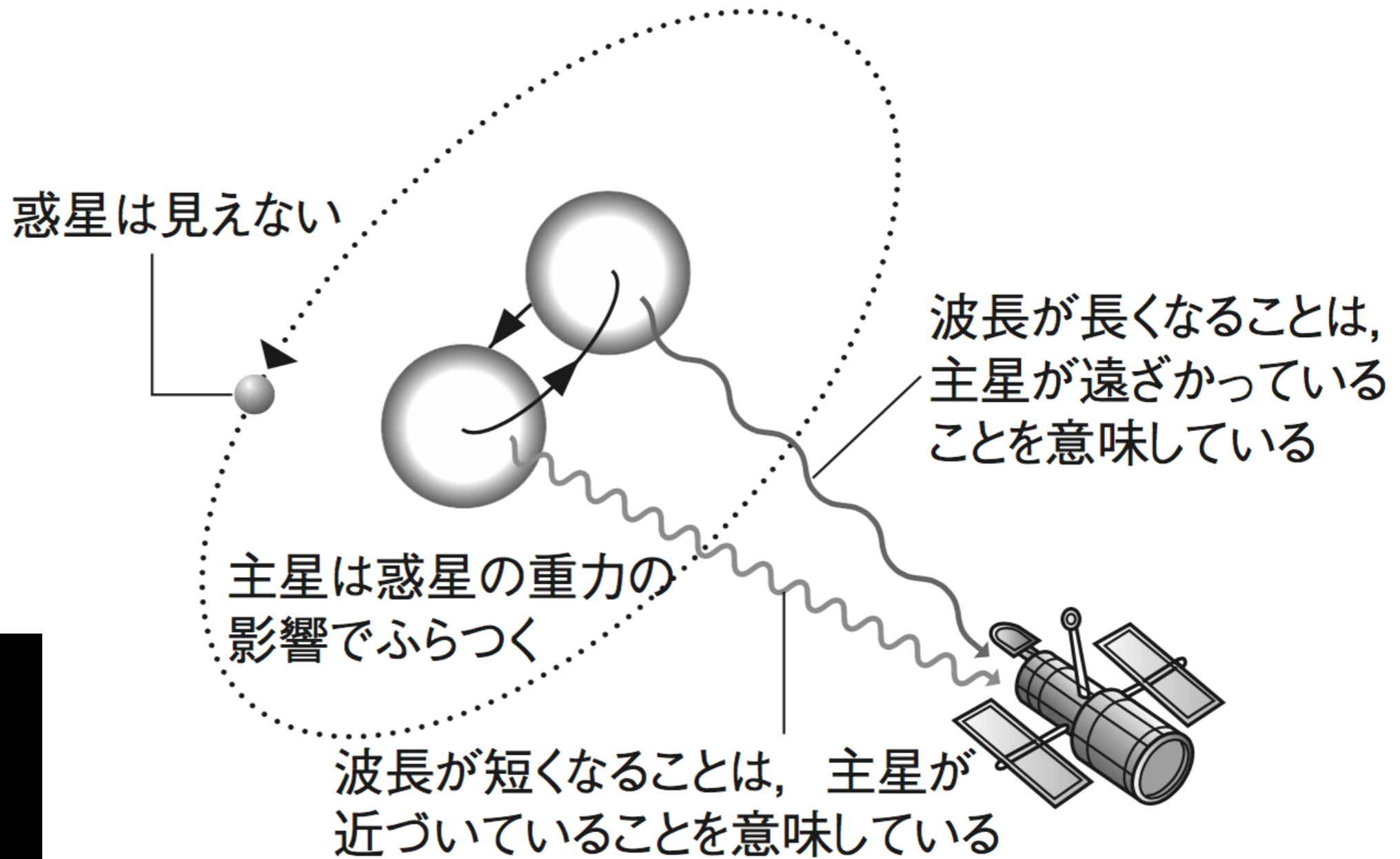
★重力レンズ法 (micro lensing法)

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

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、パルスに周期的なズレが見られることを利用する方法。 (初めて発見された系外惑星)

視線速度法（ドップラー法）

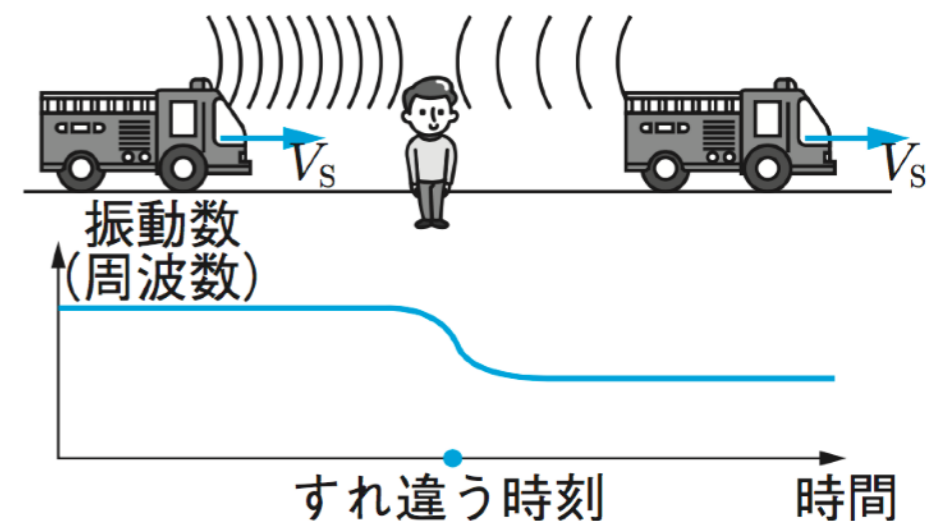
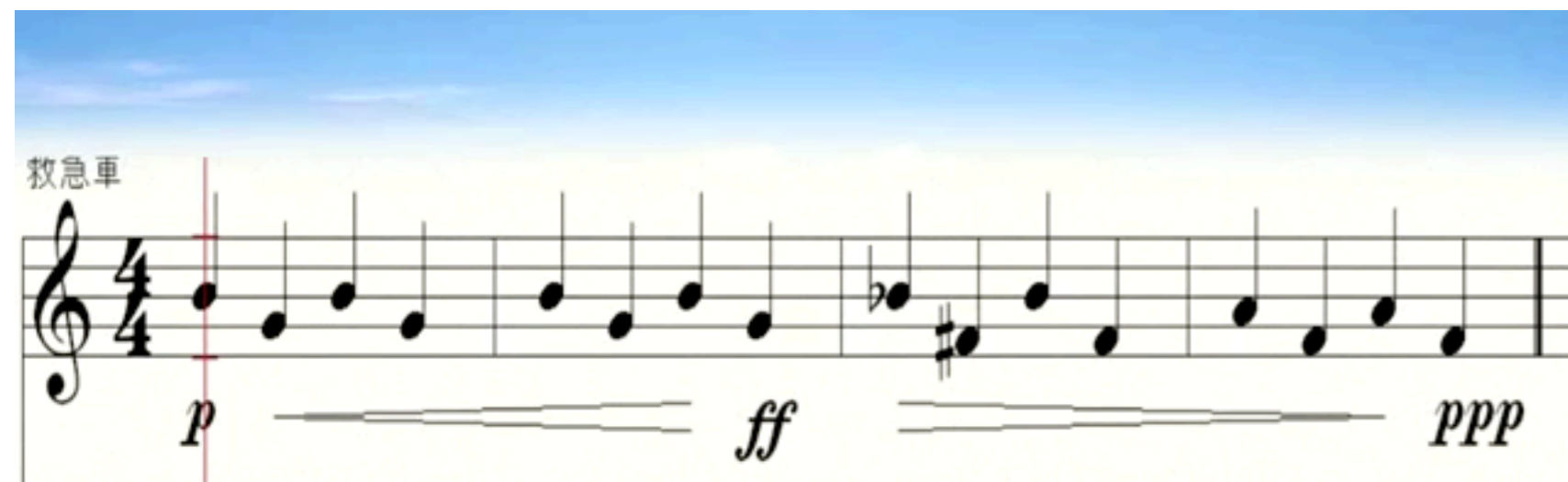


ドップラー効果



近づくとき
高い音
大きい音に

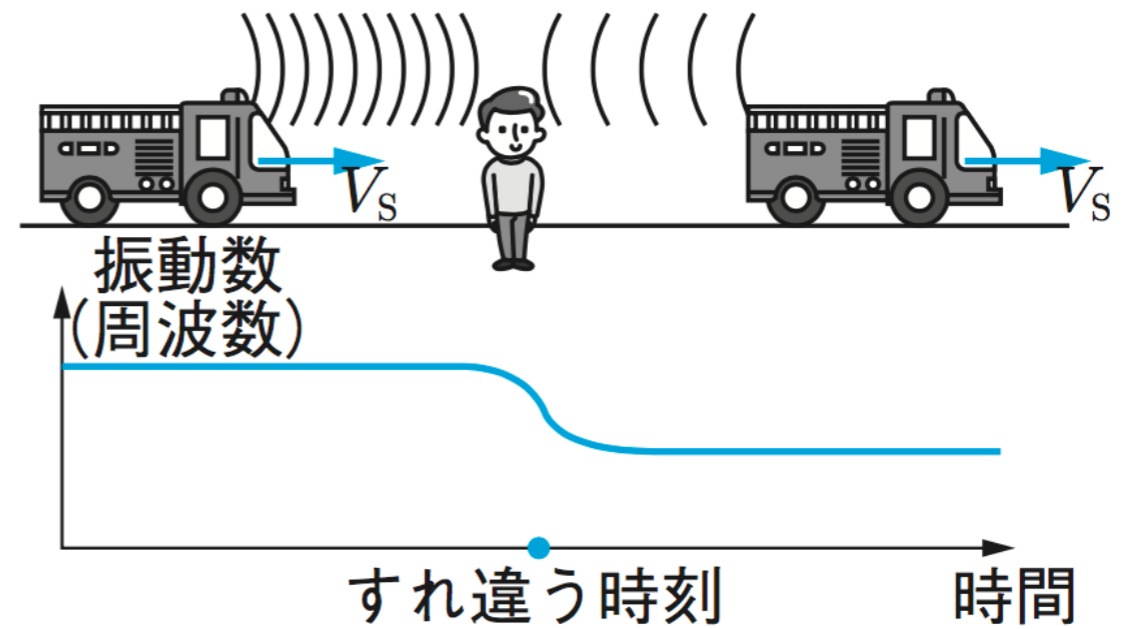
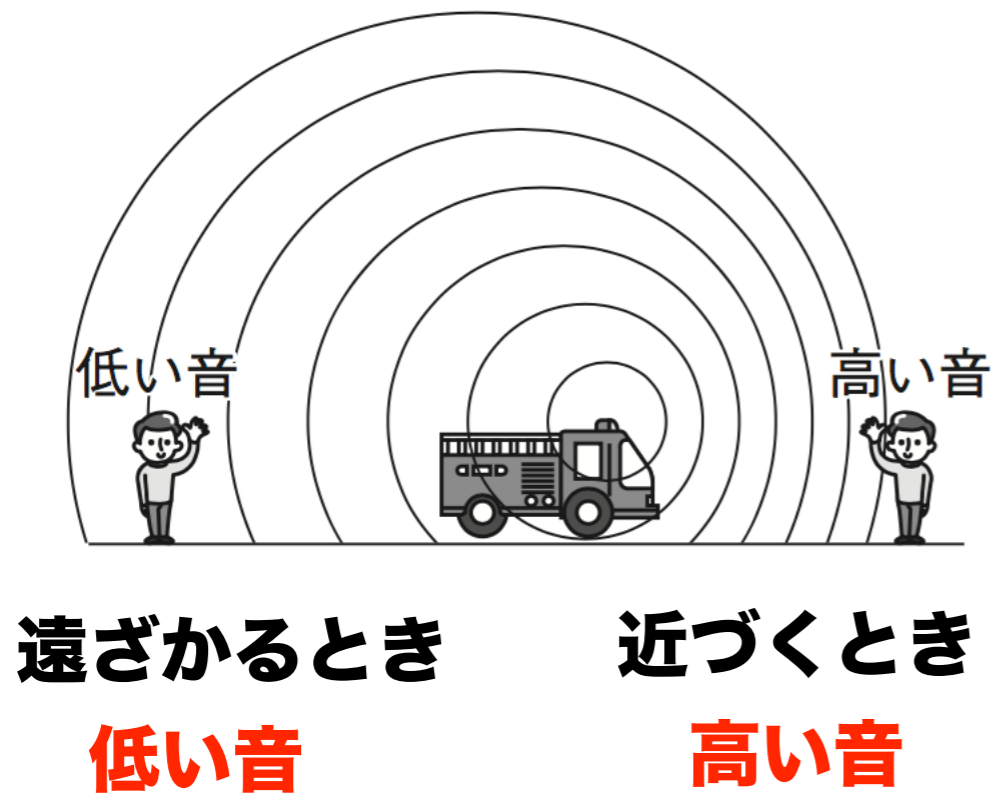
遠ざかるとき
低い音
小さい音に



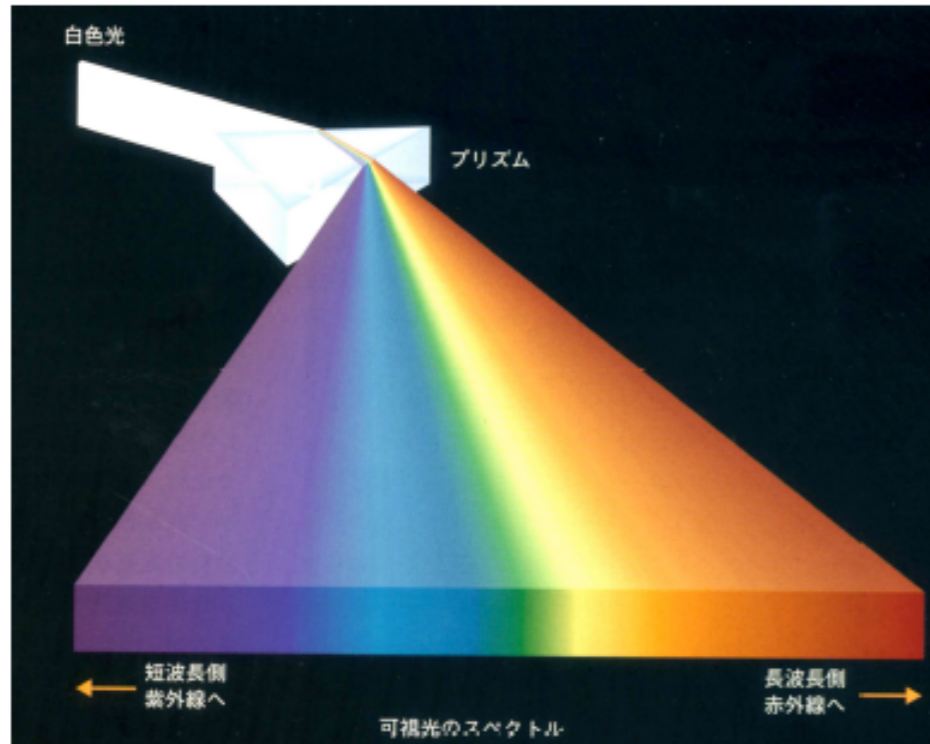
ドップラー効果

救急車が近づくときや遠ざかるときに、聞こえる振動数が変化する。

また、電車に乗っていると踏み切りの音が近づくときと遠ざかるときで変化する。このように、音源や観測者が移動することによって、本来伝わる音が高くなったり、低くなったりする現象（振動数・周波数が変化する現象）をドップラー効果という。

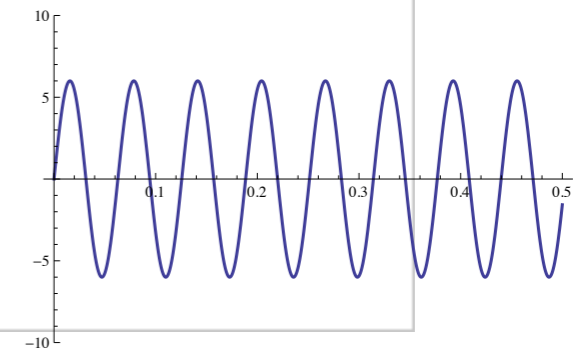
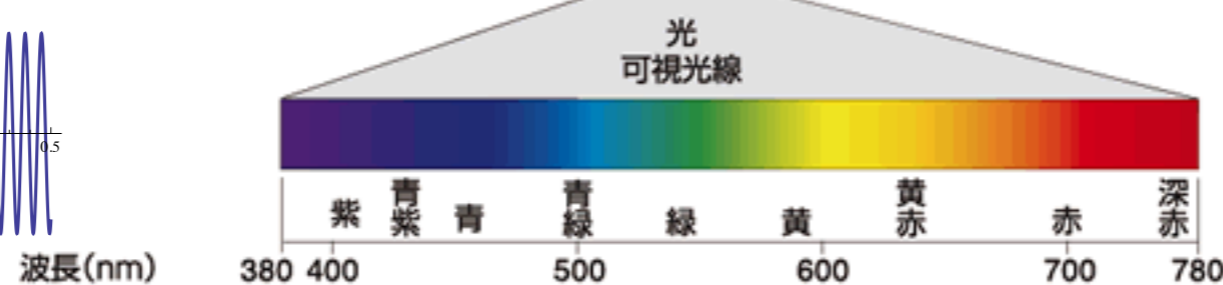
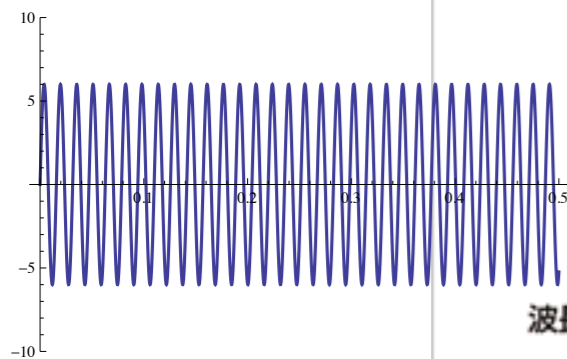
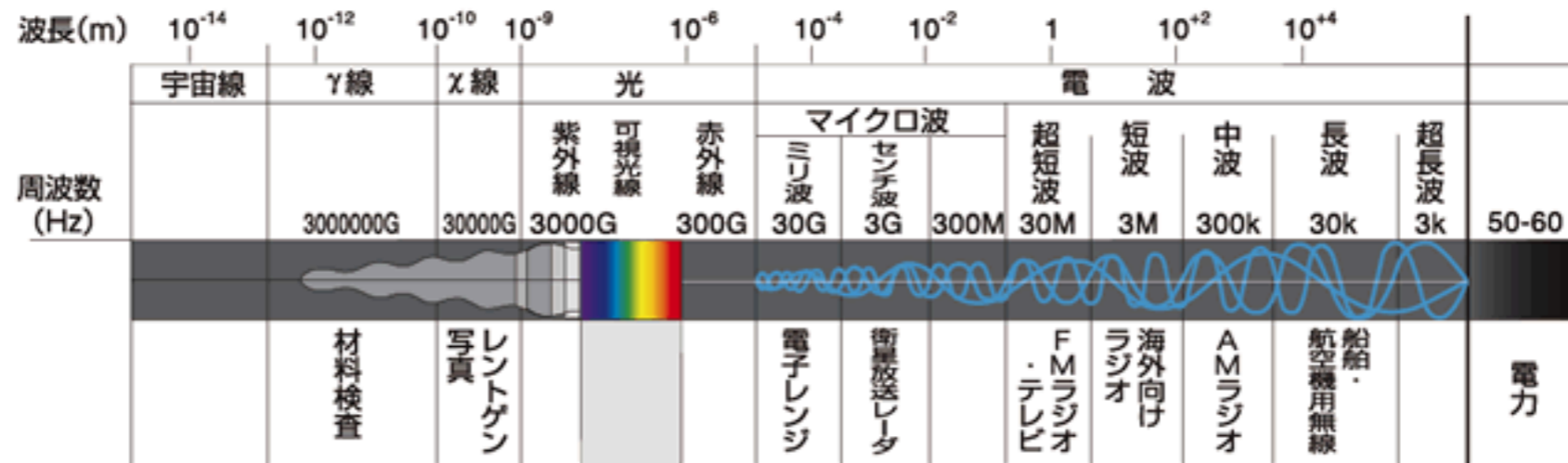


光の色=振動数



●電磁波の分類

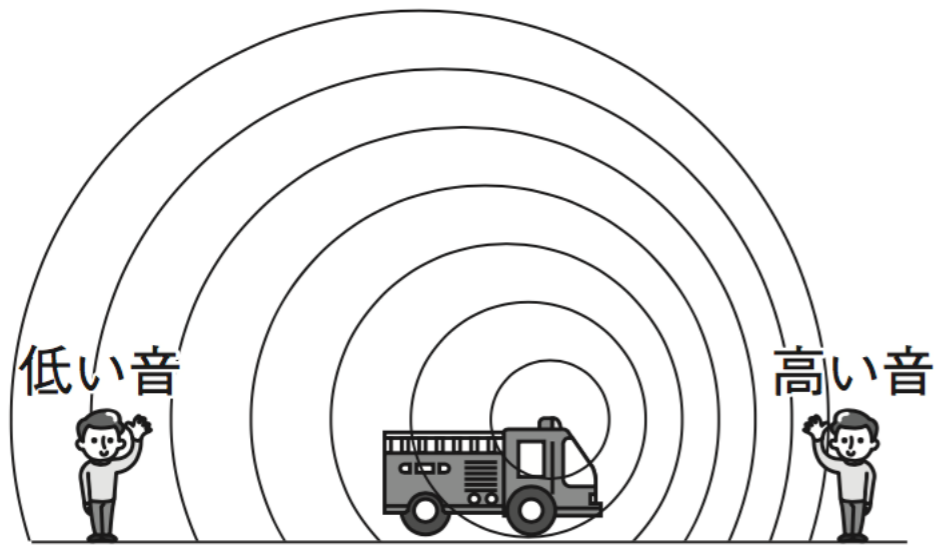
名称	波長(振動数)	おもな利用例	
γ線	$1 \times 10^{-10} \text{m}$ 以下	食品照射, 医療	
X線	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-8} \text{m}$	X線写真, 医療	
紫外線	$1 \times 10^{-9} \sim 3.8 \times 10^{-7} \text{m}$	殺菌, 化学作用の利用	
可視光線	$3.8 \times 10^{-7} \sim 7.7 \times 10^{-7} \text{m}$	光学器械	
赤外線	$7.7 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-3} \text{m}$	赤外線写真, 暖房	
電波	マイクロ波	$10^{-4} \sim 1 \text{m}$ ($3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{12} \text{Hz}$)	携帯電話, 電子レンジ
	超短波	$1 \sim 10 \text{m}$ ($3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^8 \text{Hz}$)	FMラジオ放送, テレビ放送
	短波	$10 \sim 10^2 \text{m}$ ($3 \times 10^6 \sim 3 \times 10^7 \text{Hz}$)	短波ラジオ放送
	中波	$10^2 \sim 10^3 \text{m}$ ($3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6 \text{Hz}$)	AMラジオ放送
	長波	$10^3 \sim 10^4 \text{m}$ ($3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5 \text{Hz}$)	飛行機の通信, 電波時計
	超長波	$10^4 \sim 10^5 \text{m}$ ($3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4 \text{Hz}$)	



ドップラー効果

救急車が近づくときや遠ざかるときに、聞こえる振動数が変化する。

また、電車に乗っていると踏み切りの音が近づくときと遠ざかるときで変化する。このように、音源や観測者が移動することによって、本来伝わる音が高くなったり、低くなったりする現象（振動数・周波数が変化する現象）をドップラー効果という。



遠ざかるとき

低い音

音

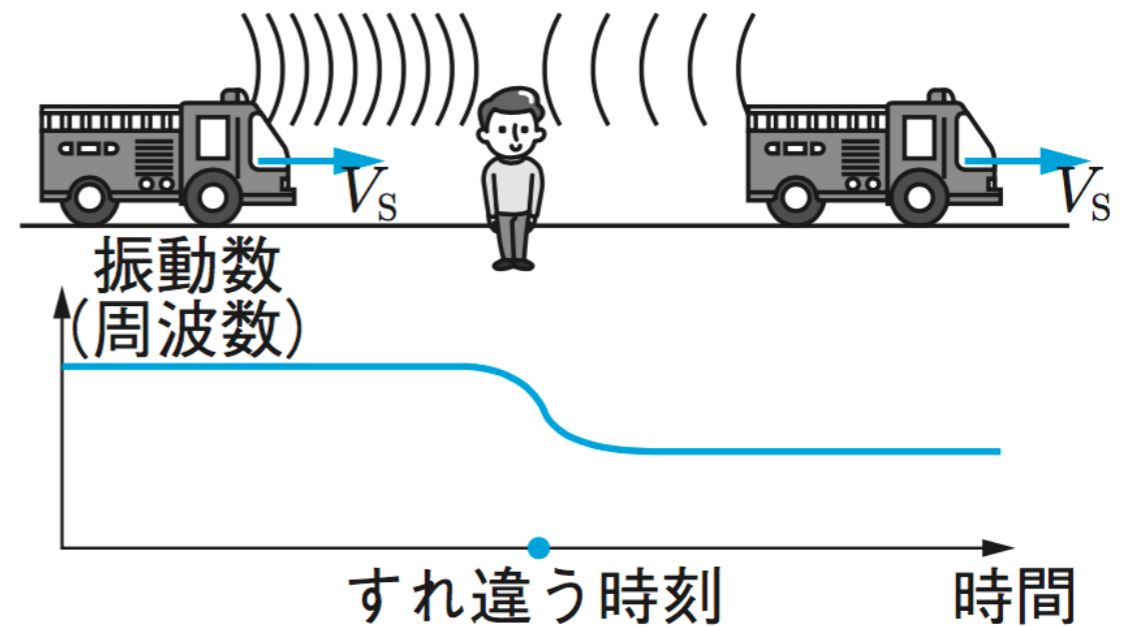
近づくとき

高い音

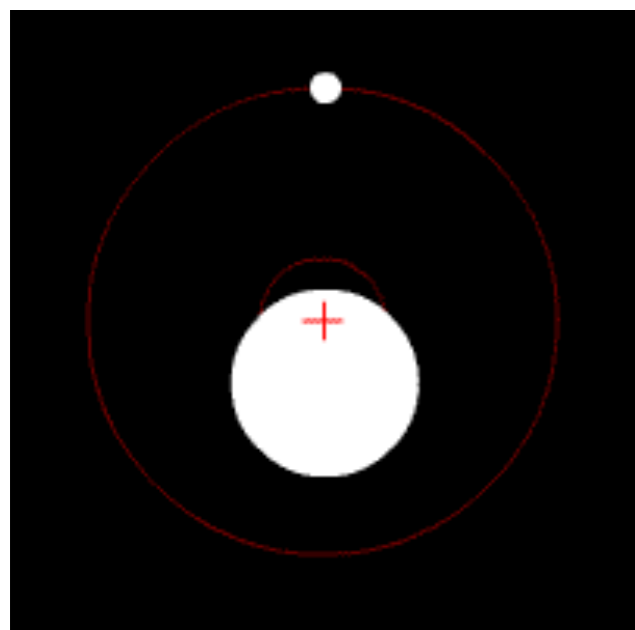
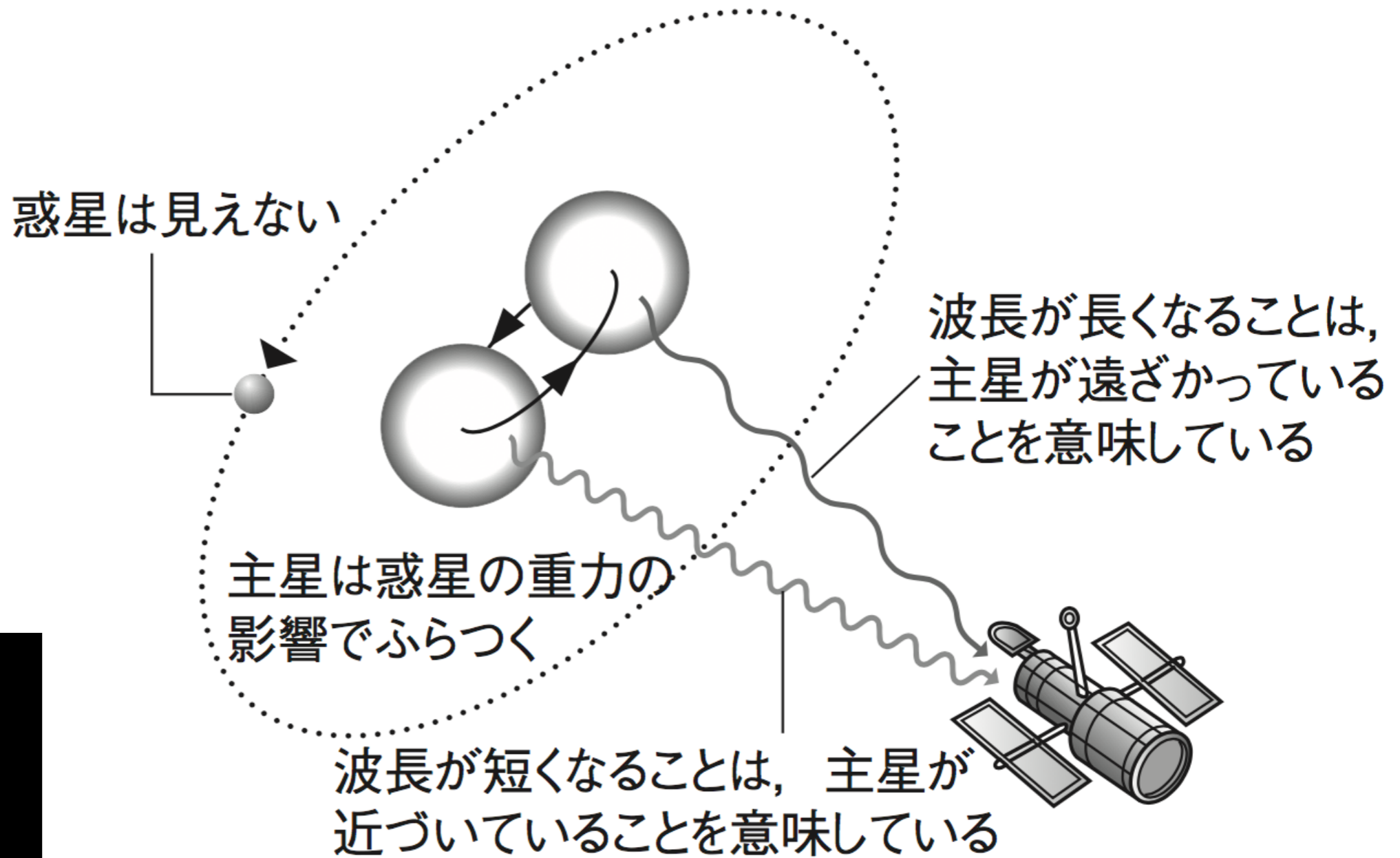
赤方偏移

光

青方偏移



視線速度法（ドップラー法）



1995年10月， 太陽系外惑星の発見

1995年10月6日

ジュネーブ天文台の

ミシェル・マイヨールとディディエ・ケロー

ペガサス座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

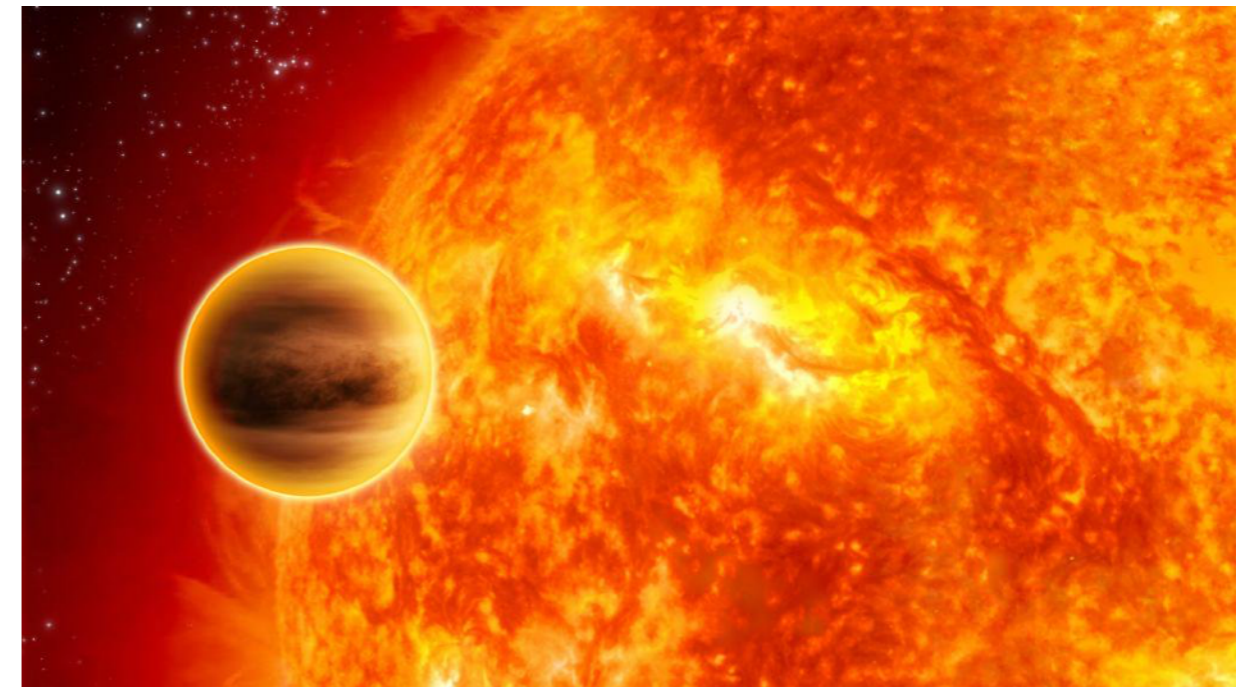
(太陽-水星の距離の1/6)

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
ペガサス座51番星b (想像図)

2019年のノーベル賞 受賞者

物理学賞



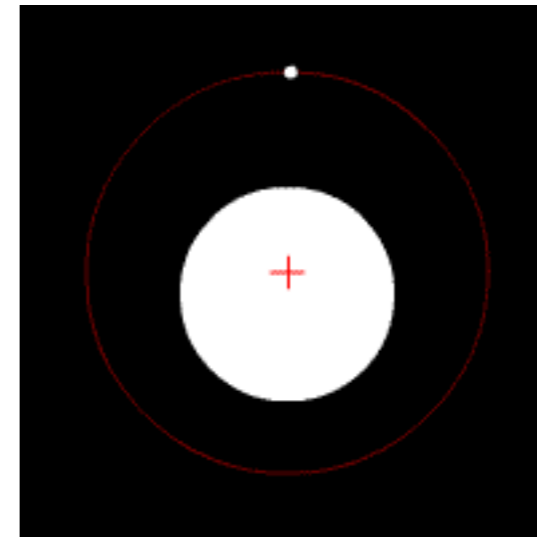
James Peebles, Michel Mayor, Didier Queloz

ピーブルズ

ビッグバン宇宙論の基礎理論の確立に大きな貢献をした。宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度非等方性を定量的に計算する方法論、宇宙誕生約3分後に形成されたヘリウムの存在量、約38万年後に起こった宇宙の再結合（電離水素が中性化する過程）、膨張宇宙における密度揺らぎの線型成長とその後の非線形成長モデル、相関関数を用いた銀河分布の統計的記述などなど。

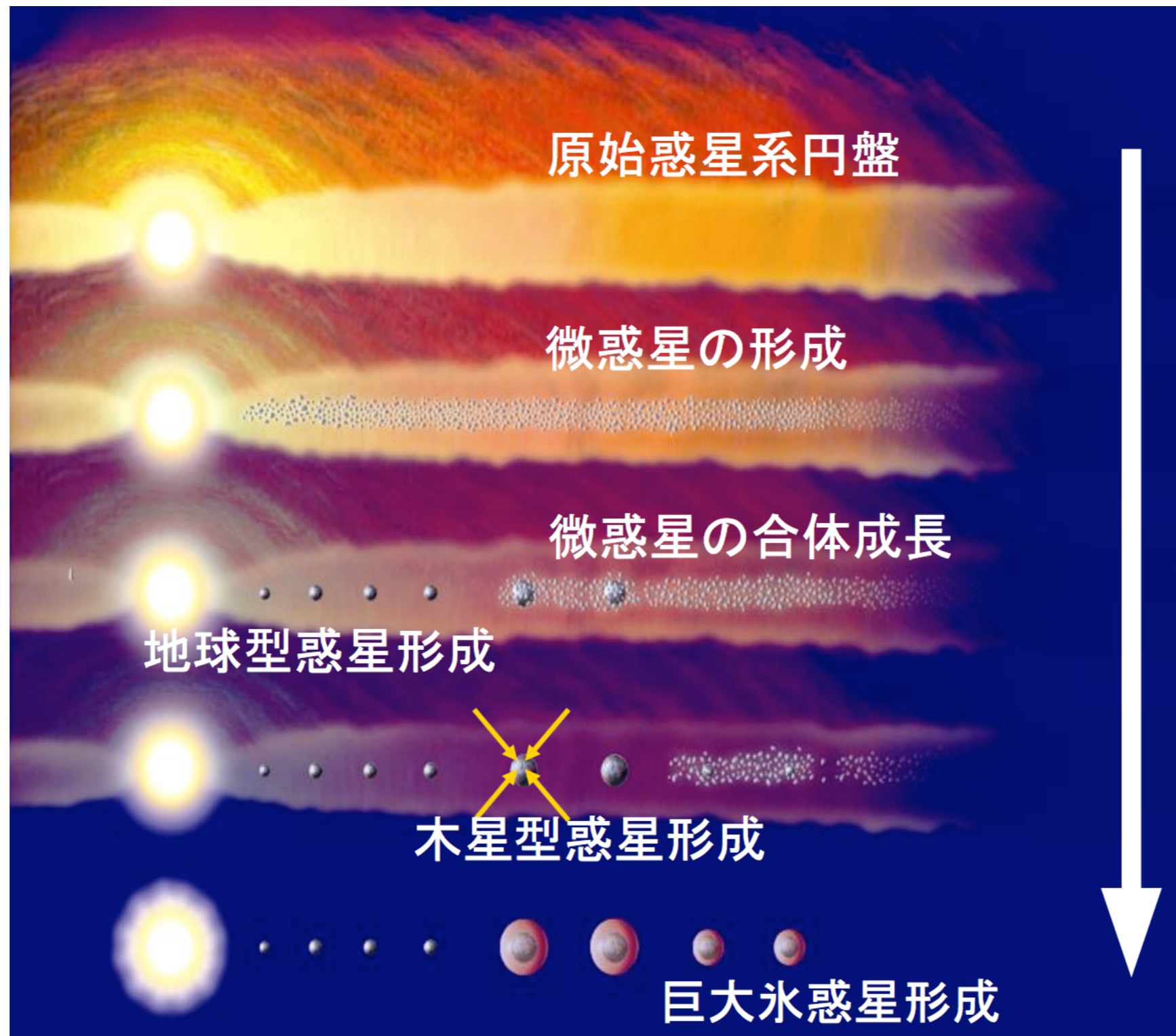
宇宙の進化、宇宙における地球の位置づけについて
理解を改めた貢献

"for contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth's place in the cosmos."



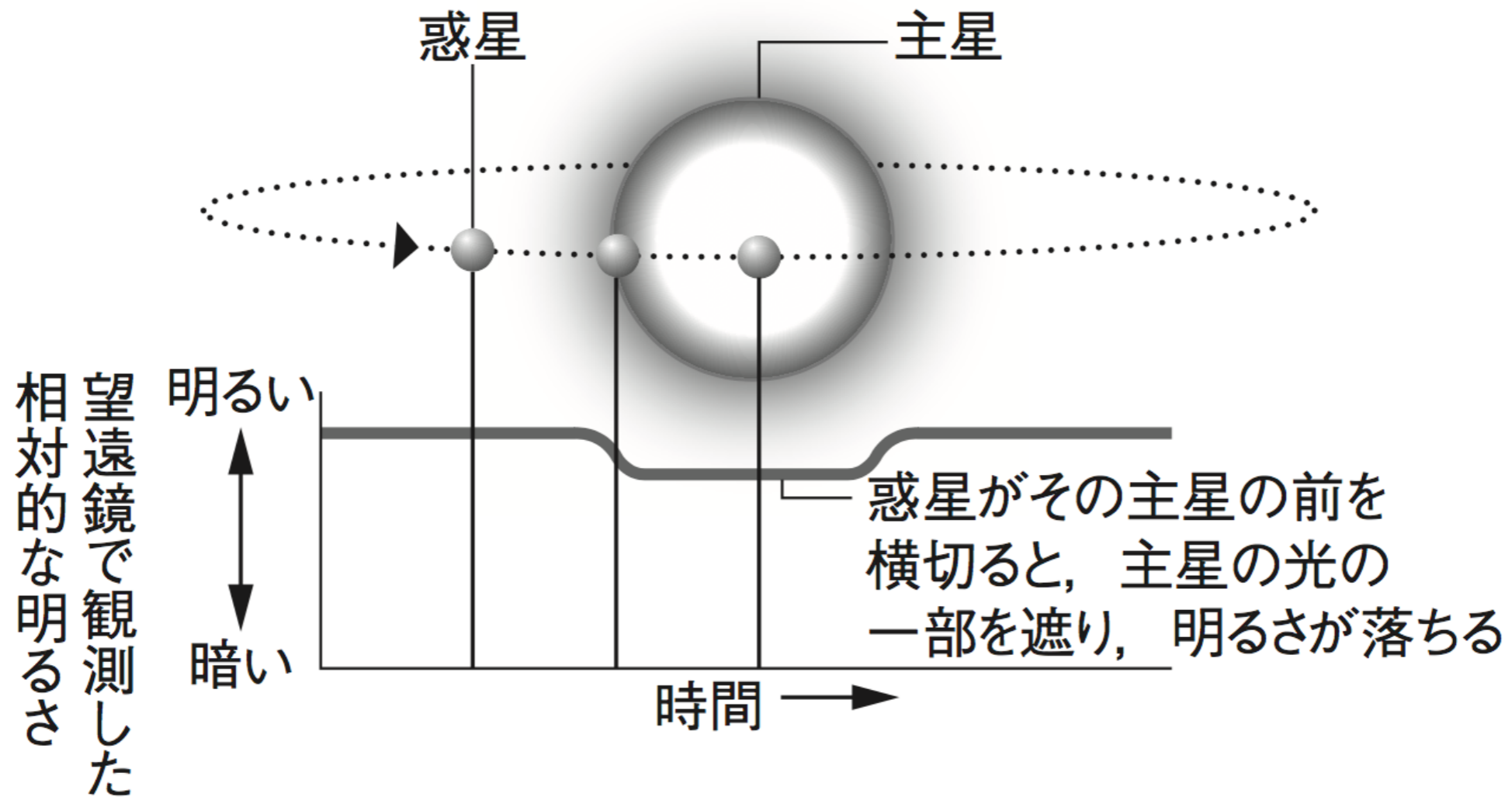
マイヨールとケロー、ペガサス座51番星のドップラー効果から、太陽系外惑星を初めて発見。

原始惑星円盤内： 塵 → 微惑星 → 原始惑星 → 惑星

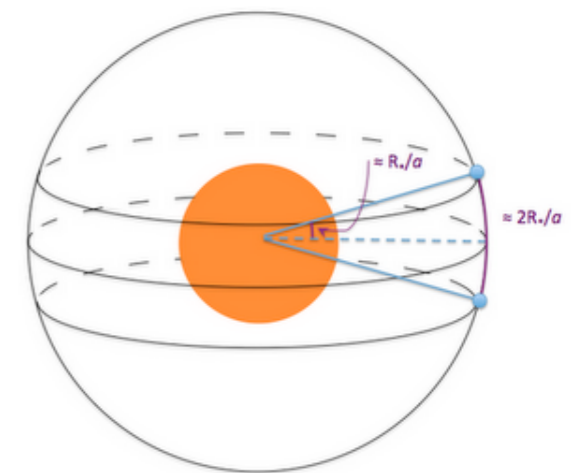


これまでの太陽系形成モデルに修正が迫られる

食検出法（トランジット法）

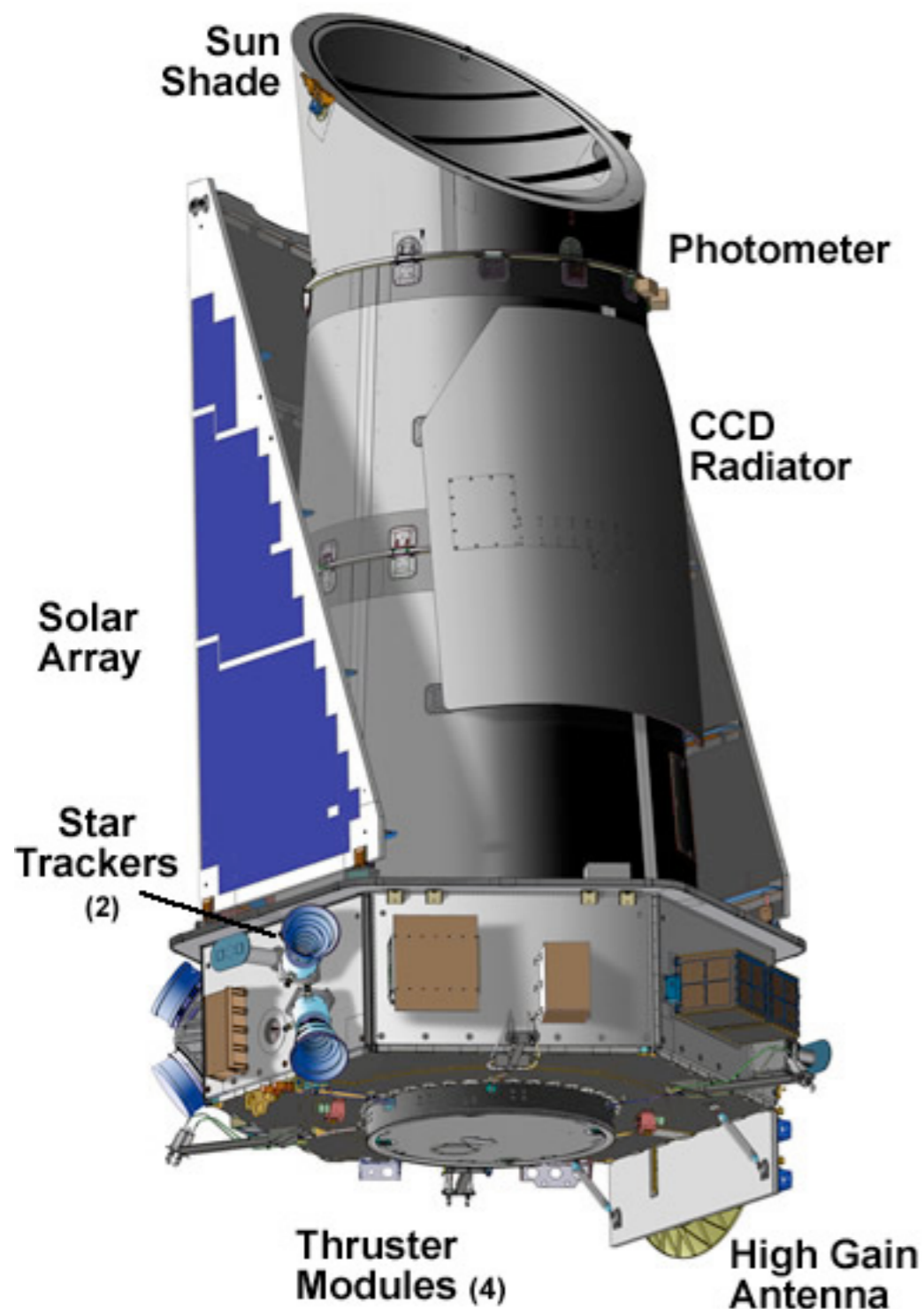


	公転周期 P(yr)	公転長半径 a (AU)	トランジット時間 (hr)	トランジット深度 (%)	幾何学的確率(%)	発生見込み角度 (deg)
	orbital period	semi-major axis	transit duration	transit depth	geometric probabi	inclination invarian
Mercury	0.241	0.39	8.1	0.0012	1.19	6.33
Venus	0.615	0.72	11.0	0.0076	0.65	2.16
Earth	1.00	1.00	13.0	0.0084	0.47	1.65
Mars	1.88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



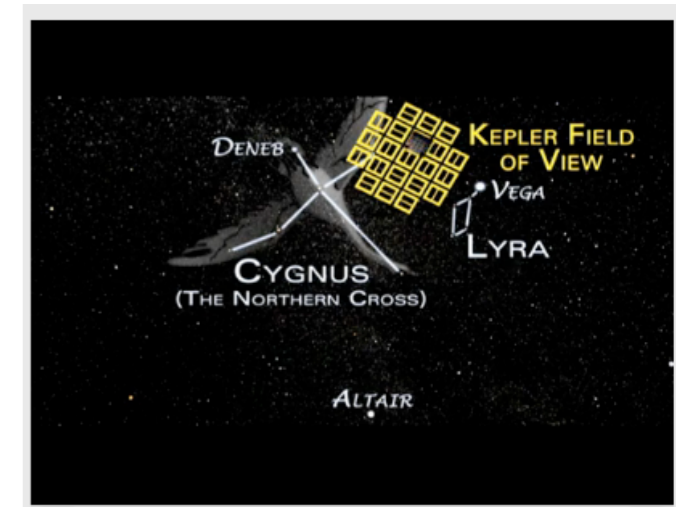
http://certificate.ucl.ac.uk/modules/year_one/NASA_Kepler/character.html

ケプラー衛星



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

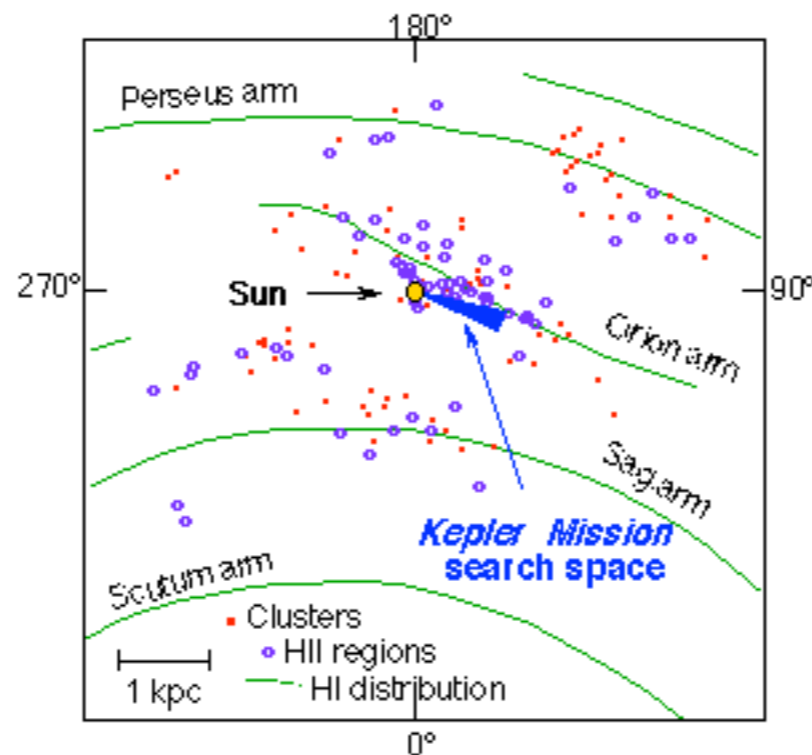
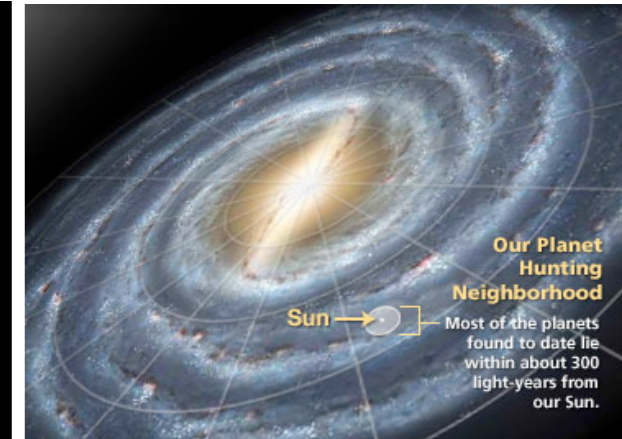
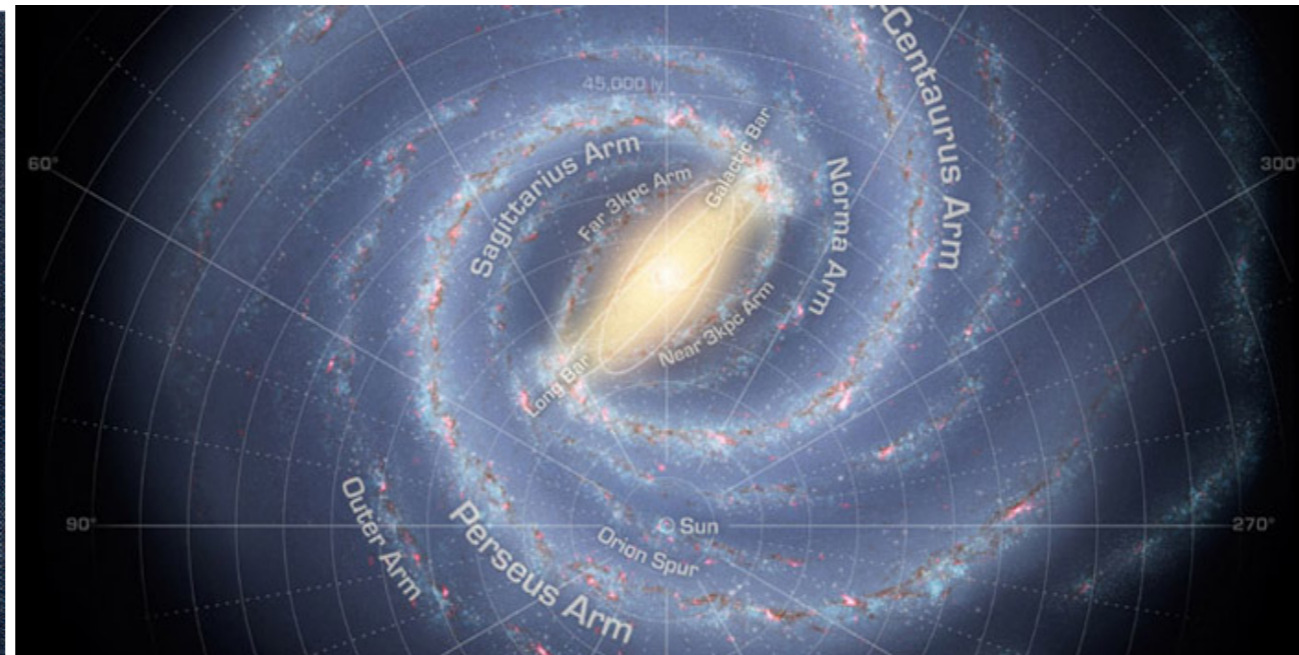
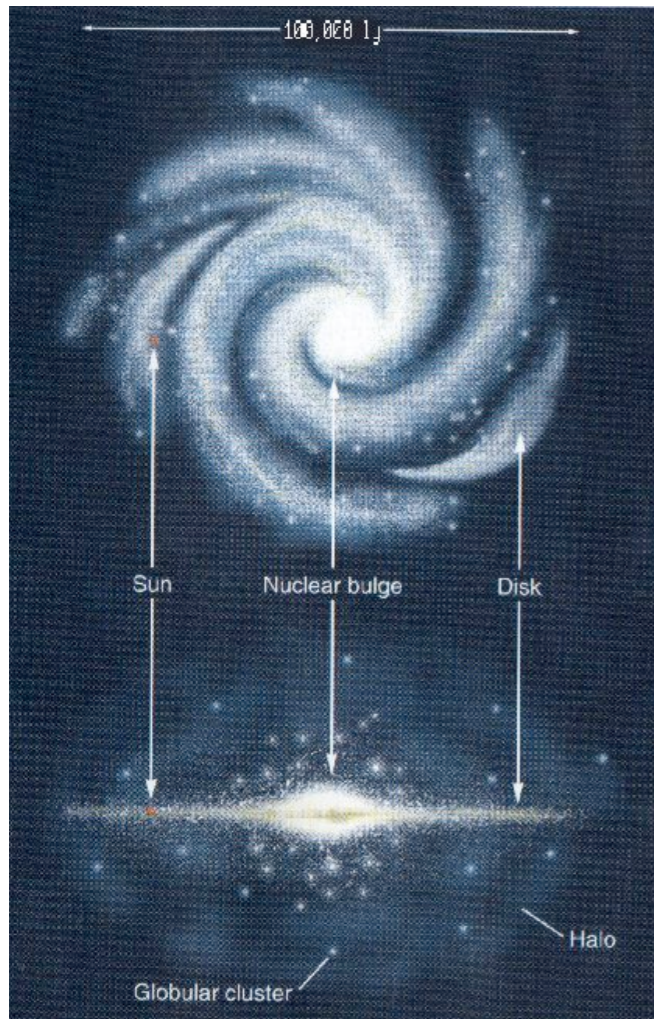
はくちょう座の方向,
常時15万個の恒星観測



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

<http://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/>

ケプラー衛星の探査範囲



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.

1 kpc = 326 光年
= 2×10^8 AU

ケプラー衛星ミッション, 結果リリース

2010年1月

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.

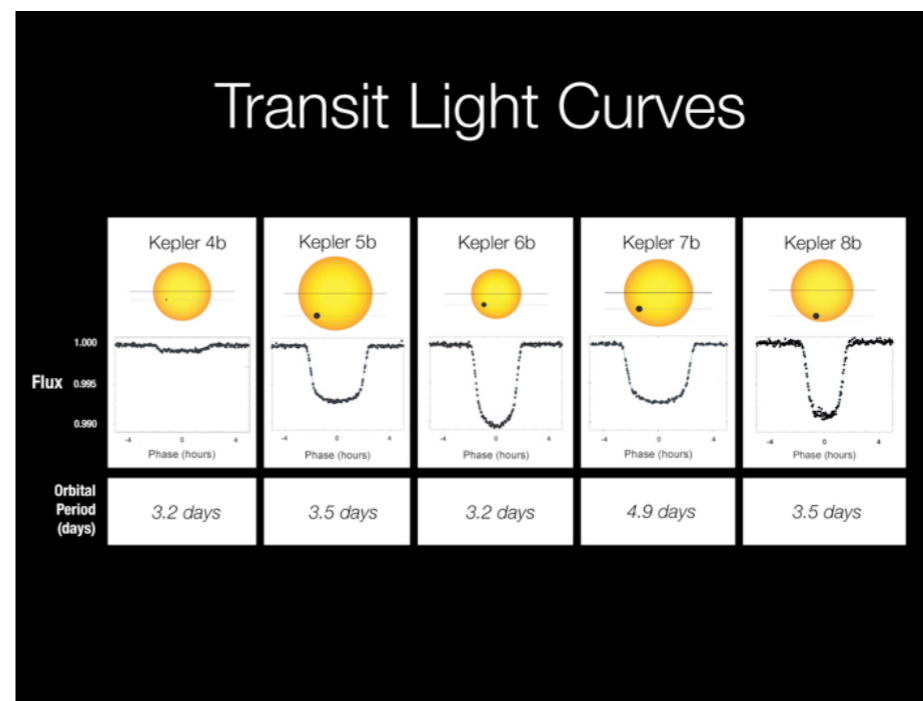
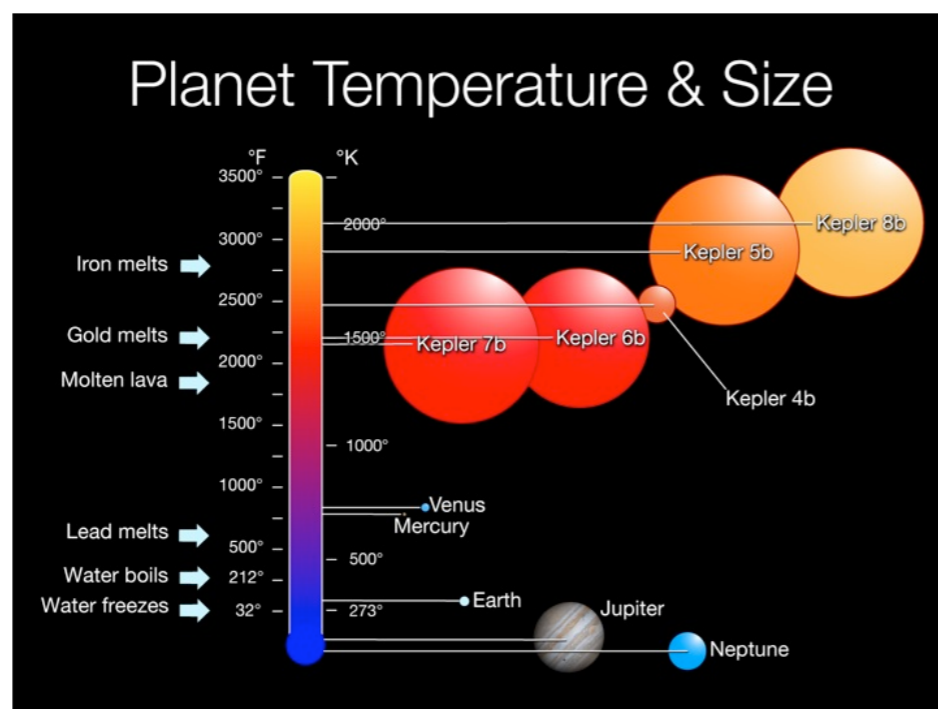
Named Kepler 4b, 5b, 6b, 7b and 8b, the planets were announced Monday, Jan. 4, by the members of the Kepler science team during a [news briefing](#) → at the American Astronomical Society meeting in Washington.

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



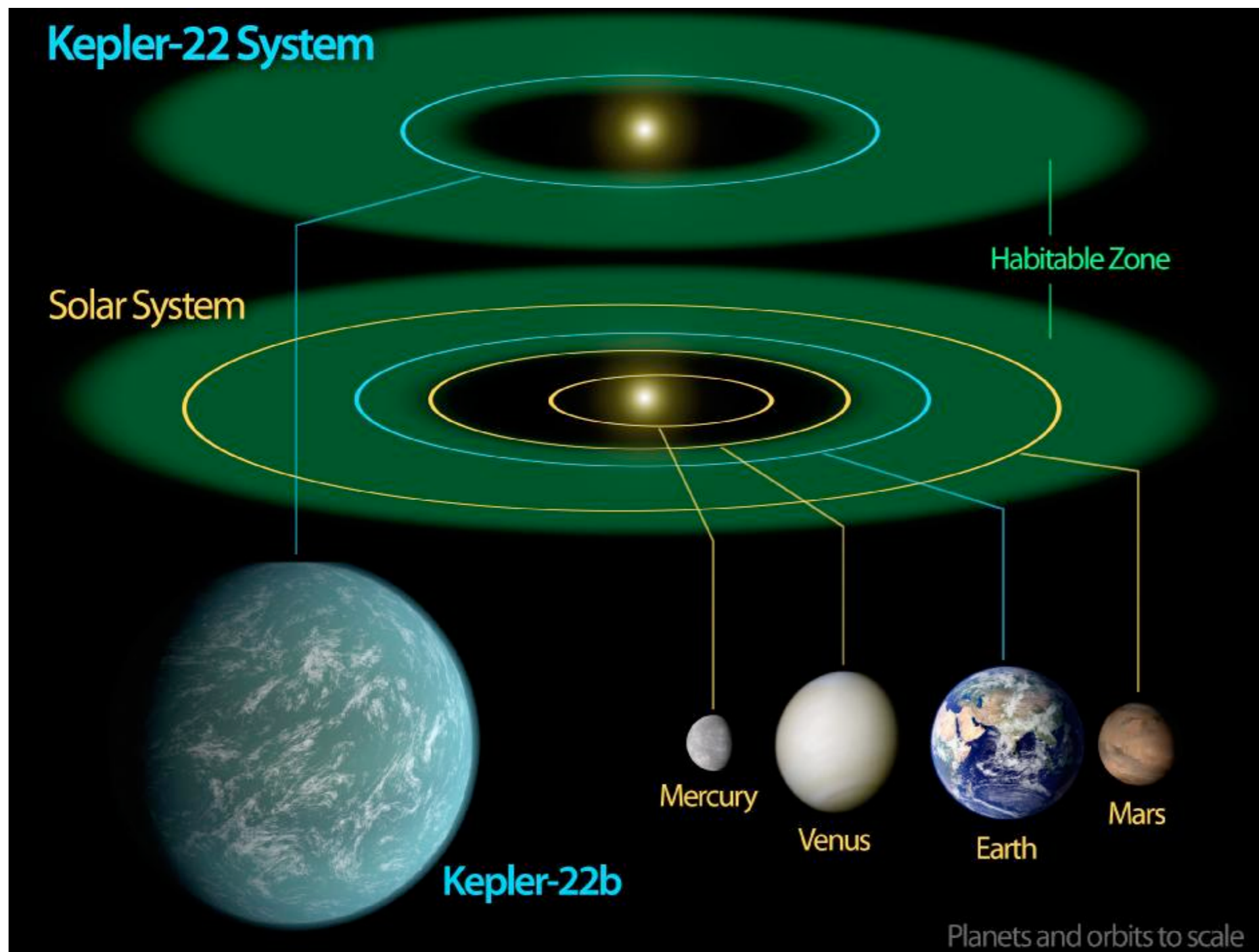
"The discoveries show that our science instrument is working well," says William Borucki of NASA's Ames Research Center in Moffett Field, Calif. Borucki is the mission's science principal investigator. "Indications are that Kepler will meet all its science goals."

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.



ケプラー衛星、ハビタブル惑星を発見

2011年12月



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

http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/multimedia/images/kepler-22b-diagram.html

ケプラー衛星ミッション, 結果リリース

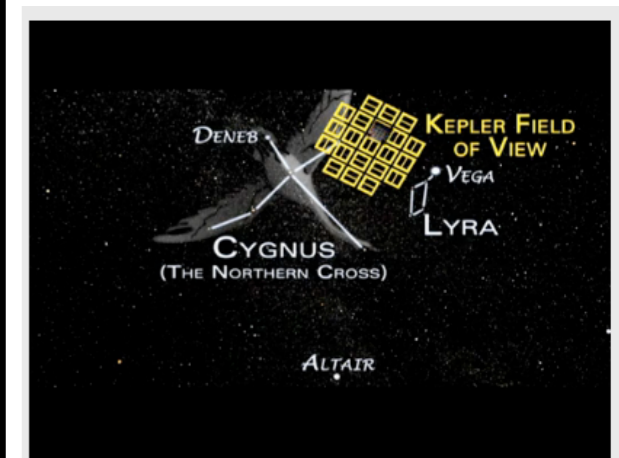
2013年

Kepler planet candidates discovered in the first 22 months

- Earth size
- Super-Earth size
- Neptune size
- Jupiter size

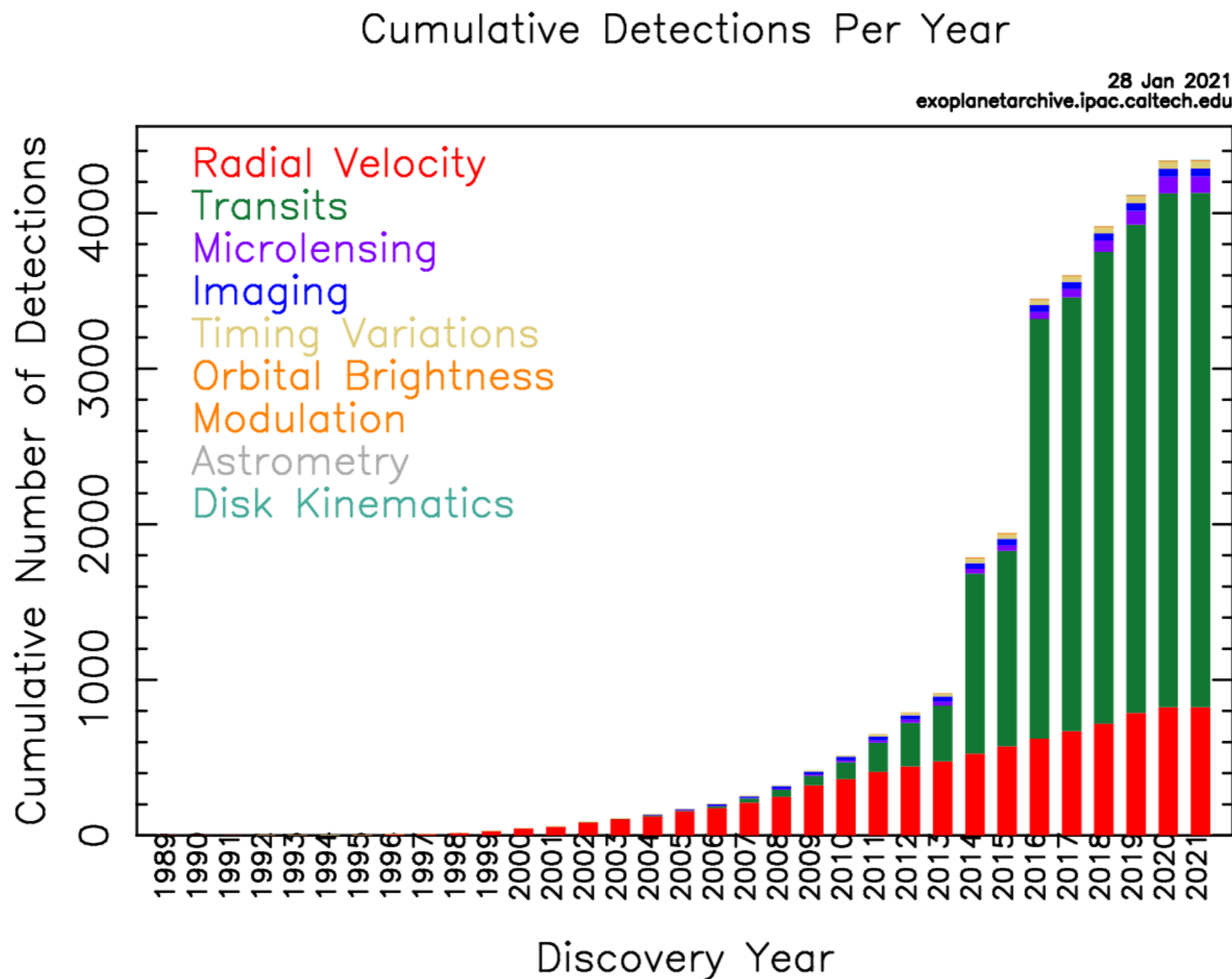


2740 Kepler planet candidates (122 confirmed) Batalha+2013



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.

太陽系外惑星 発見数 (累積)



2021年2月14日現在 4341個.

恒星の 1/3 には惑星が発見されている.

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

太陽系外惑星 発見数

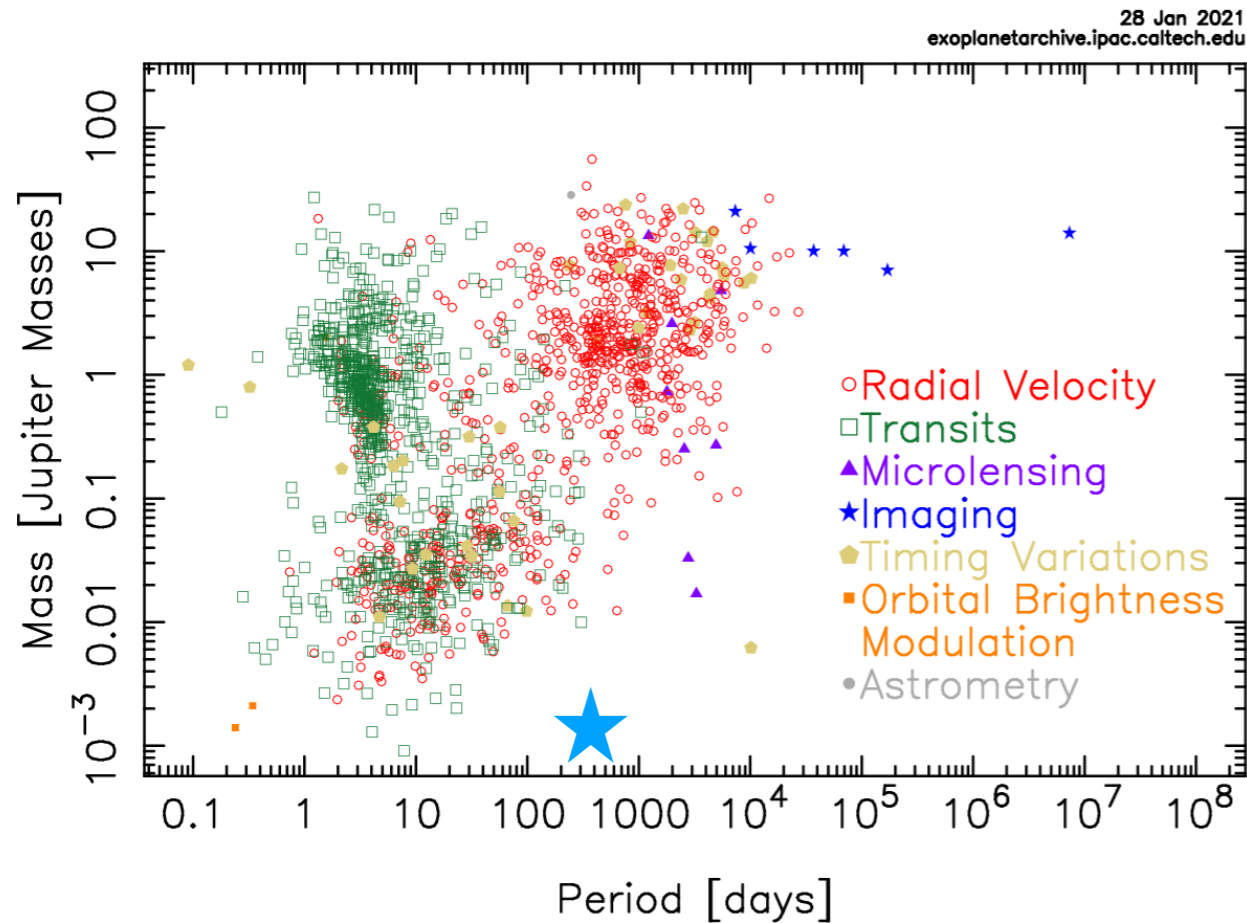
2021年2月14日現在

	全観測	Kepler	K2	TESS
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)	4341	2394	450	107
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	1864			
ハビタブルゾーンにある 星 (確定+候補天体)		361		
候補天体 (Kepler/K2 Candidates)		2366	889	1396

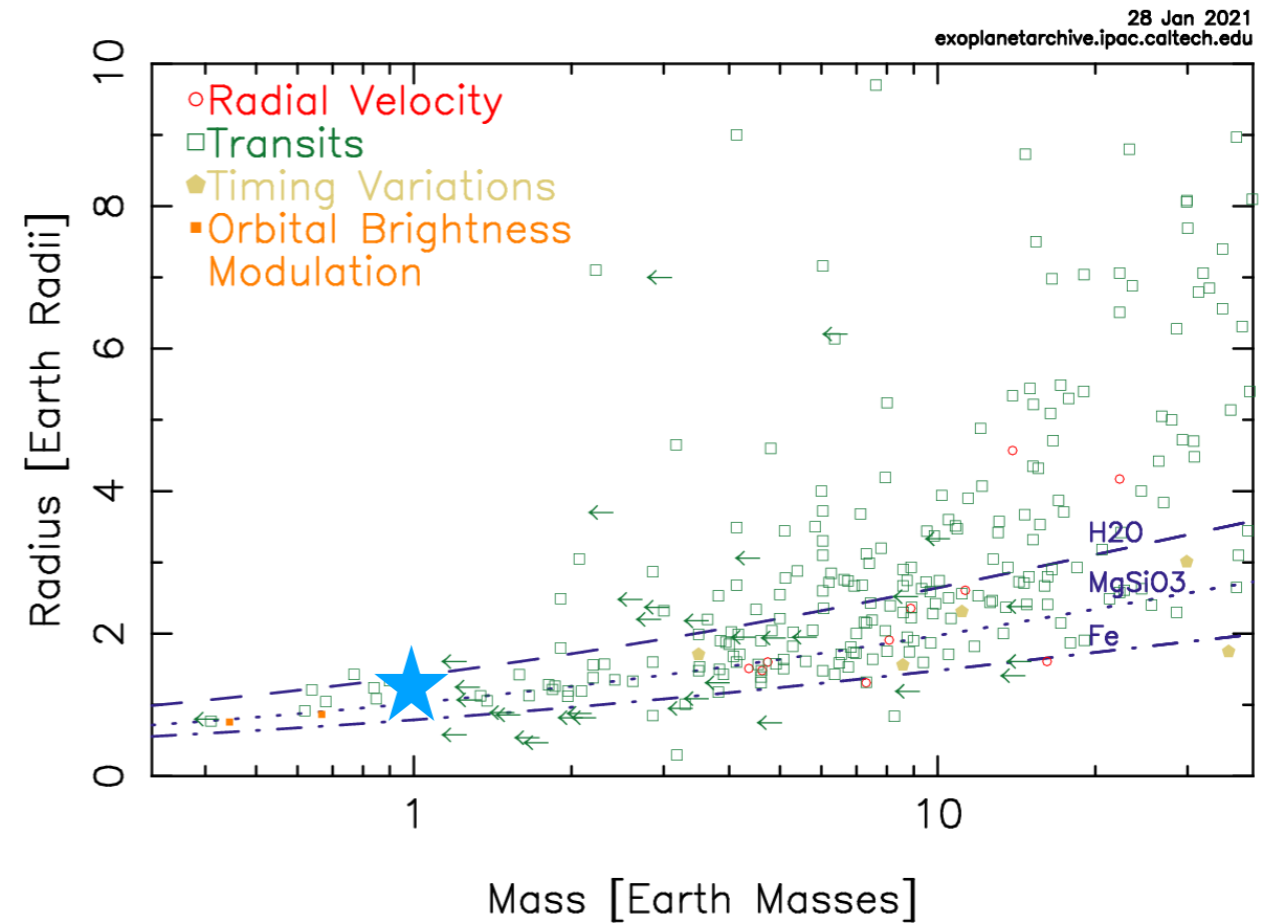
<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

太陽系外惑星 公転周期と質量分布

Mass – Period Distribution



Mass – Radius Distribution



2021年2月14日現在 4341個.

恒星の 1/3 には惑星が発見されている.

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

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。

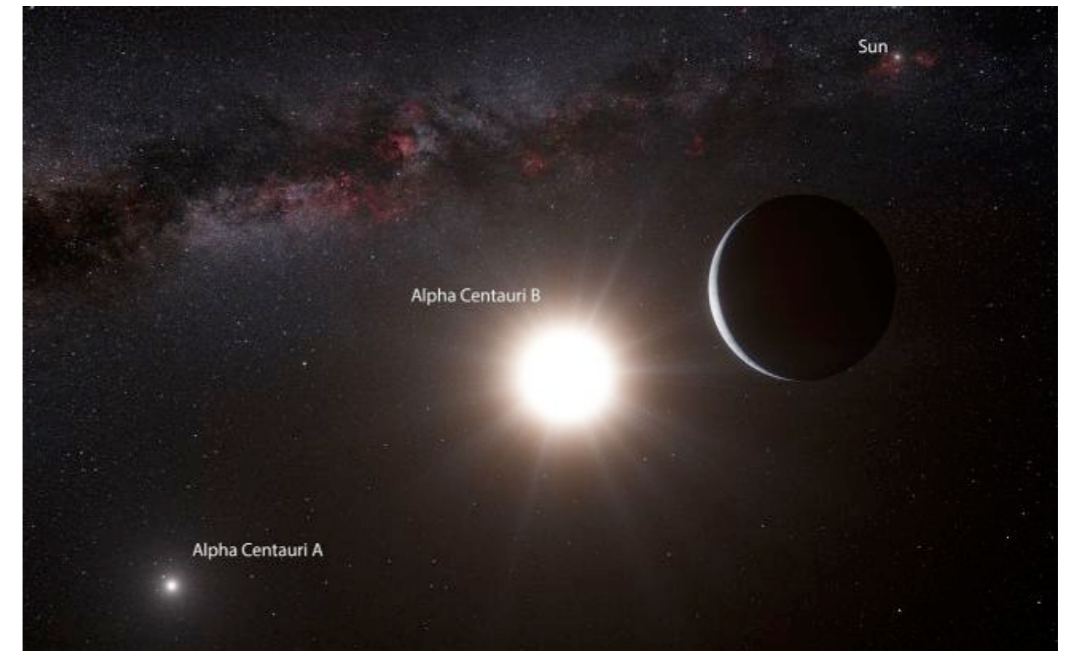
視線速度法（ドップラーシフト法）によって観測されたものだが、今回は、秒速51cm（時速1.8km）という極めて小さい動きを検出したもので、視線速度観測としては史上最高精度の観測。

<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 ± 0.17 Earth radii planet orbits outside the 20-day orbit of an eclipsing binary consisting of an F dwarf (1.734 ± 0.044 Solar radii, 1.528 ± 0.087 Solar masses) and M dwarf (0.378 ± 0.023 Solar radii, 0.408 ± 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.



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

太陽系から一番近い星にハビタブル惑星を発見



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.

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

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

At a distance of 1.295 parsecs, the red dwarf Proxima Centauri (α 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

ドレークによる地球外文明の推定

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」は、太陽系が属する銀河系内に現存する文明の数 N を推定する式である。

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L \quad (5.11)$$

式の右辺の記号の意味と推定値を表 5.5 に示すが、楽観的に考えるか悲観的に考えるかで、ずいぶんと最後の値が違ってくる。



図 5.46 Frank Drake (1930–)

表 5.5 ドレークの式 [(5.11) 式] にいれるべき値はどれだろうか。天の川銀河にある恒星は約 2000 億個といわれているが、はたして知的生命体の存在する星の数はいくつだろうか。

	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もつ星の割合	1.0	0.5	極めて小
n_e 星のまわりで生命にとって適当な環境をもつ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
f_l 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	?	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

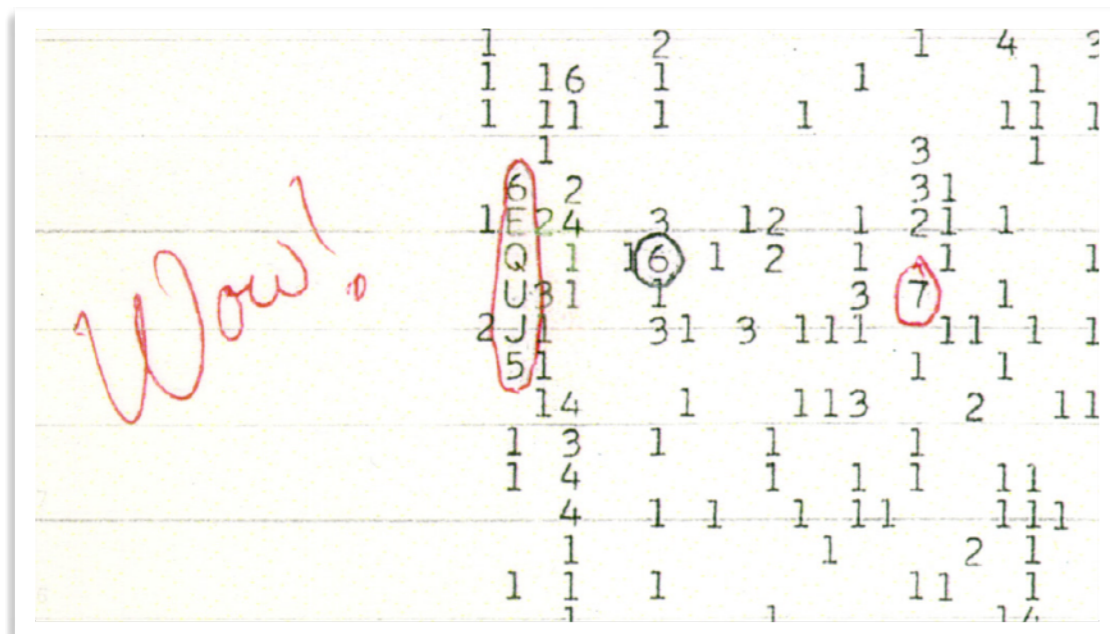
SETI (search for extraterrestrial intelligence)



Big Ear
(オハイオ州立大の電波望遠鏡)

103m x 33 m
(半径53mの円相当)

<http://www.bigear.org>



The Wow! Signal 1977年8月15日

Thus, the "6EQUJ5" code in channel 2 means successive intensities as follows:

- 6 --> the range 6.0 - 6.999...
- E --> the range 14.0 - 14.999...
- Q --> the range 26.0 - 26.999...
- U --> the range 30.0 - 30.999...
- J --> the range 19.0 - 19.999...
- 5 --> the range 5.0 - 5.999...

電波望遠鏡 口径が大きいほど集光力高い, 分解能高い

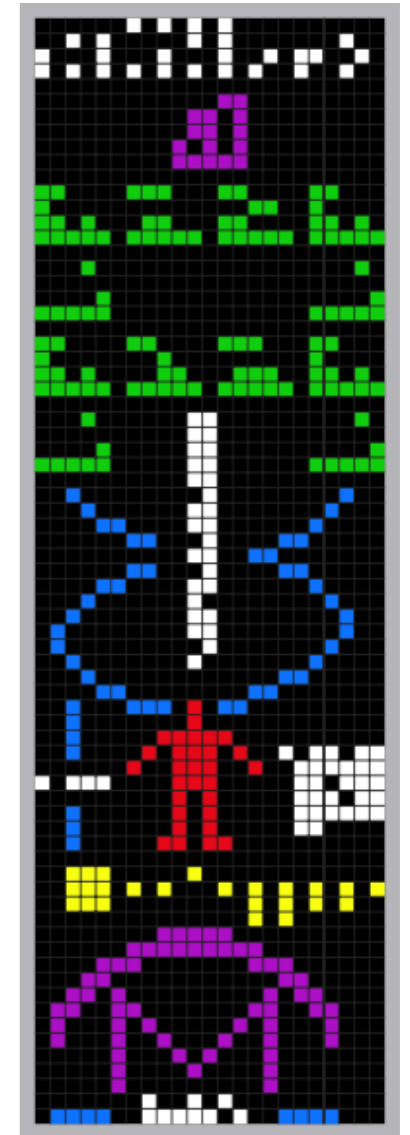


$$\text{分解能} = \text{波長} / \text{口径}$$

野辺山45m望遠鏡

アレシボ電波望遠鏡 305メートル球面電波望遠鏡 (1963—2020)

(Arecibo Observatory, プエルトリコ)



- 1964 水星の自転周期55日の発見
- 1968 かにパルサー中心に中性子星発見
- 1974 連星中性子星発見
- 1989 小惑星カスターリア直接観測
- 1992 パルサーを公転する太陽系外惑星発見

アレシボ・メッセージ (1974)
SETI (1999—)

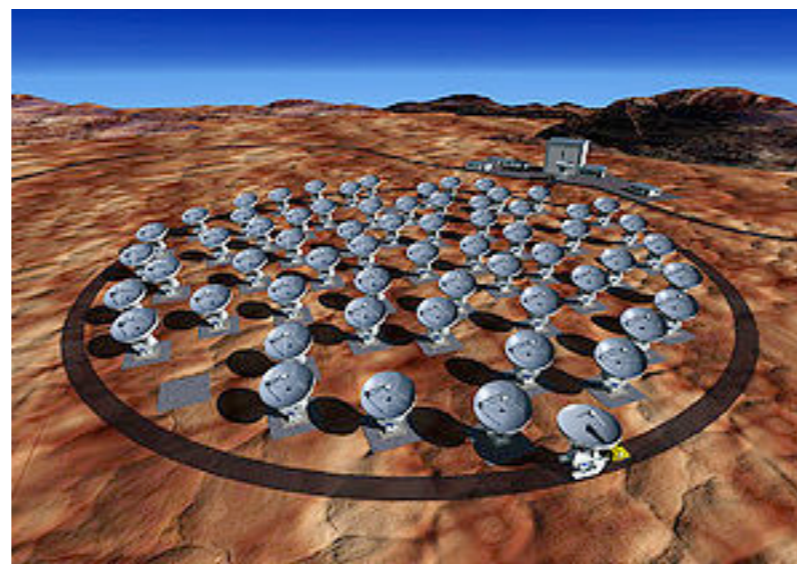
アルマ望遠鏡 Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

全66台のアンテナが設置され、日本は16台を担当。「いざよい」と命名。
標高5000m地点に設置されている。

直径12メートルのアンテナを50台組み合わせるアンテナ群と、直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台からなる。最大18.5キロメートルまでアンテナ間隔を広げることができ、最大の空間分解能は、0.05 マイクロラジアン。

「大阪にある一円玉を東京から見分けられるほどの高い解像度」



中国「天眼（FAST）」 500メートル球面電波望遠鏡（2016一）

(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope: FAST)



中国南西部の貴州省， 185億円， 天頂から40度の範囲を観測可能，
1万人強制移住， 半径5 km以内携帯電話禁止

http://japanese.china.org.cn/business/txt/2016-07/04/content_38806293.htm

"Contact" Theatrical Trailer (1997)



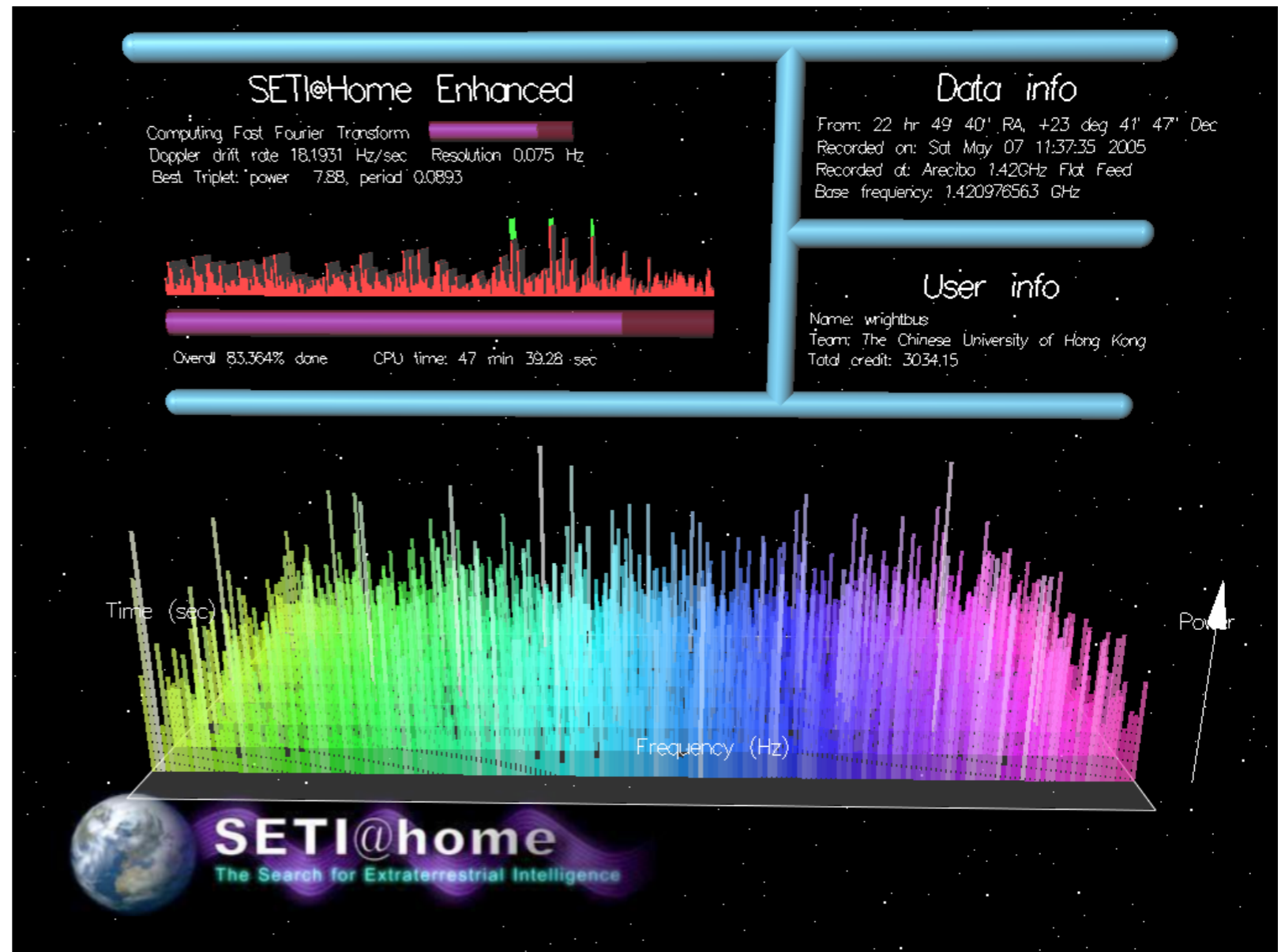
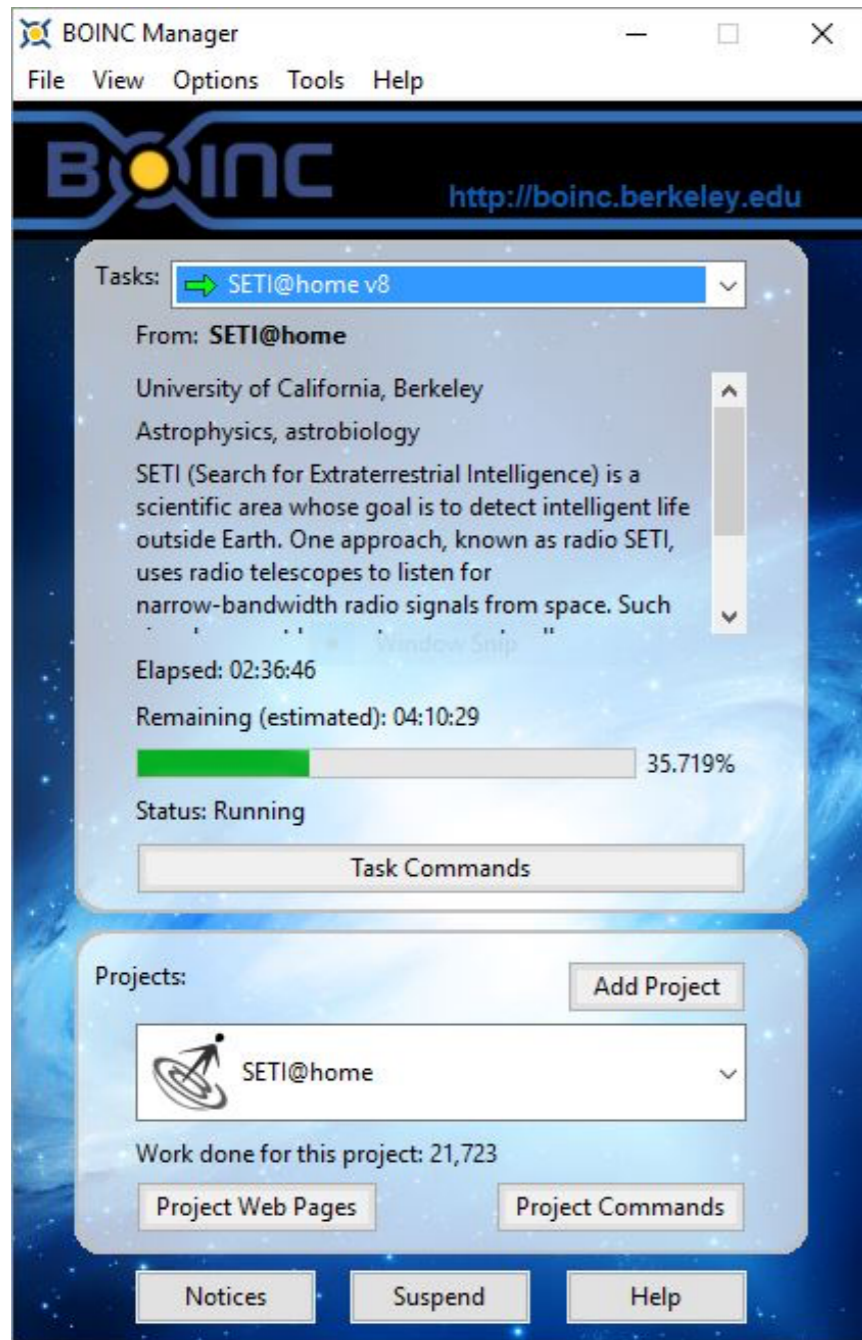
CONTACT



(2:27)

<http://www.youtube.com/watch?v=SRoj3jK37Vc>

SETI@home



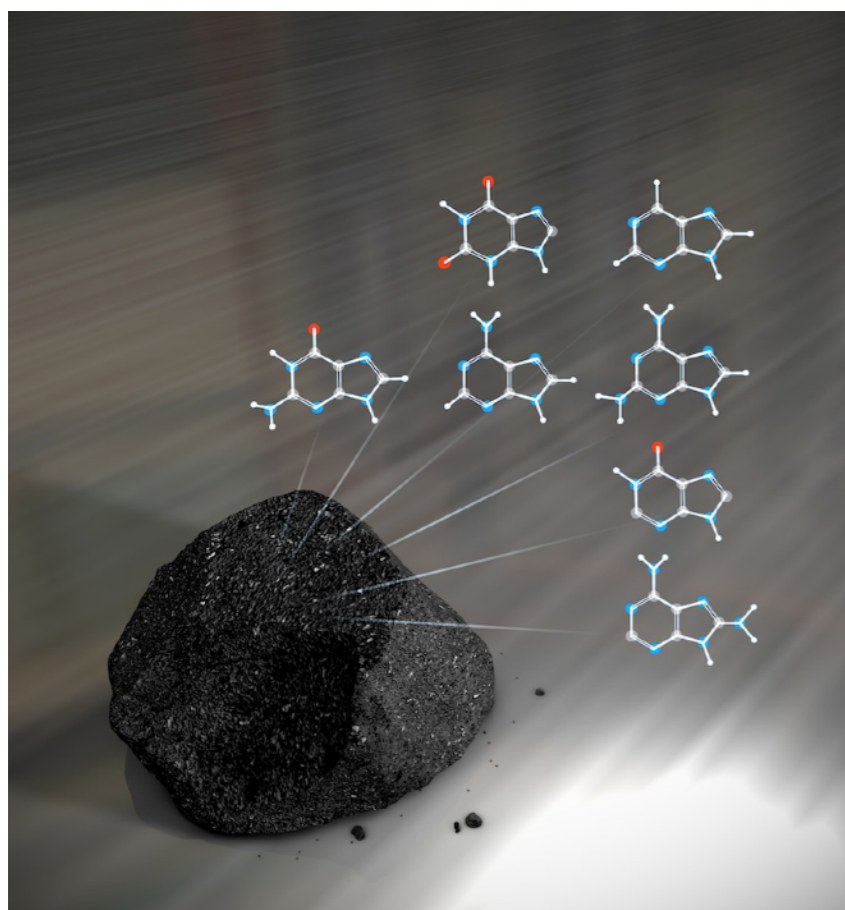
各家庭のPCが眠っている時間に宇宙人探しに協力できる
分散コンピューティング

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。

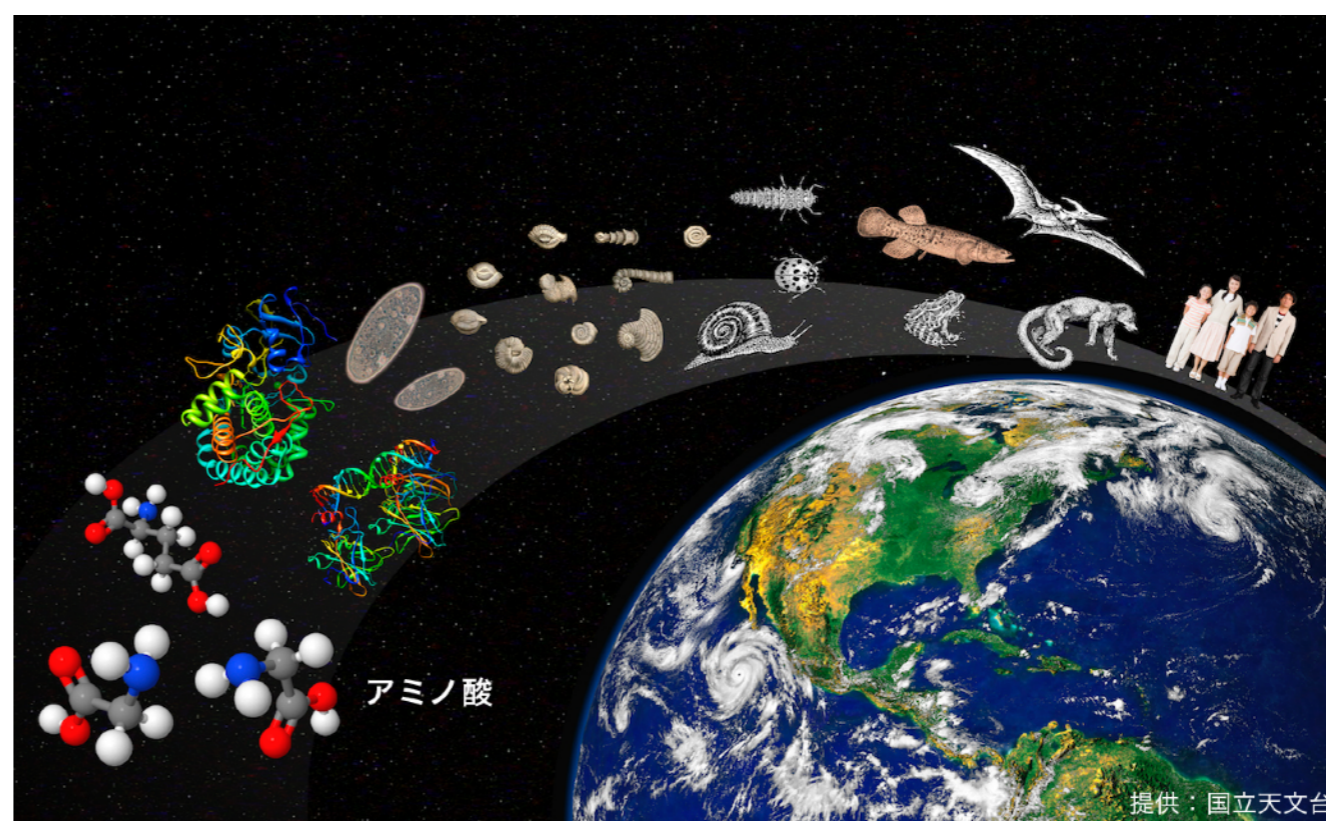
DNAを構成する塩基の一部と地球上で天然に作られることのない生命に関連した有機物（2011年NASA）

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



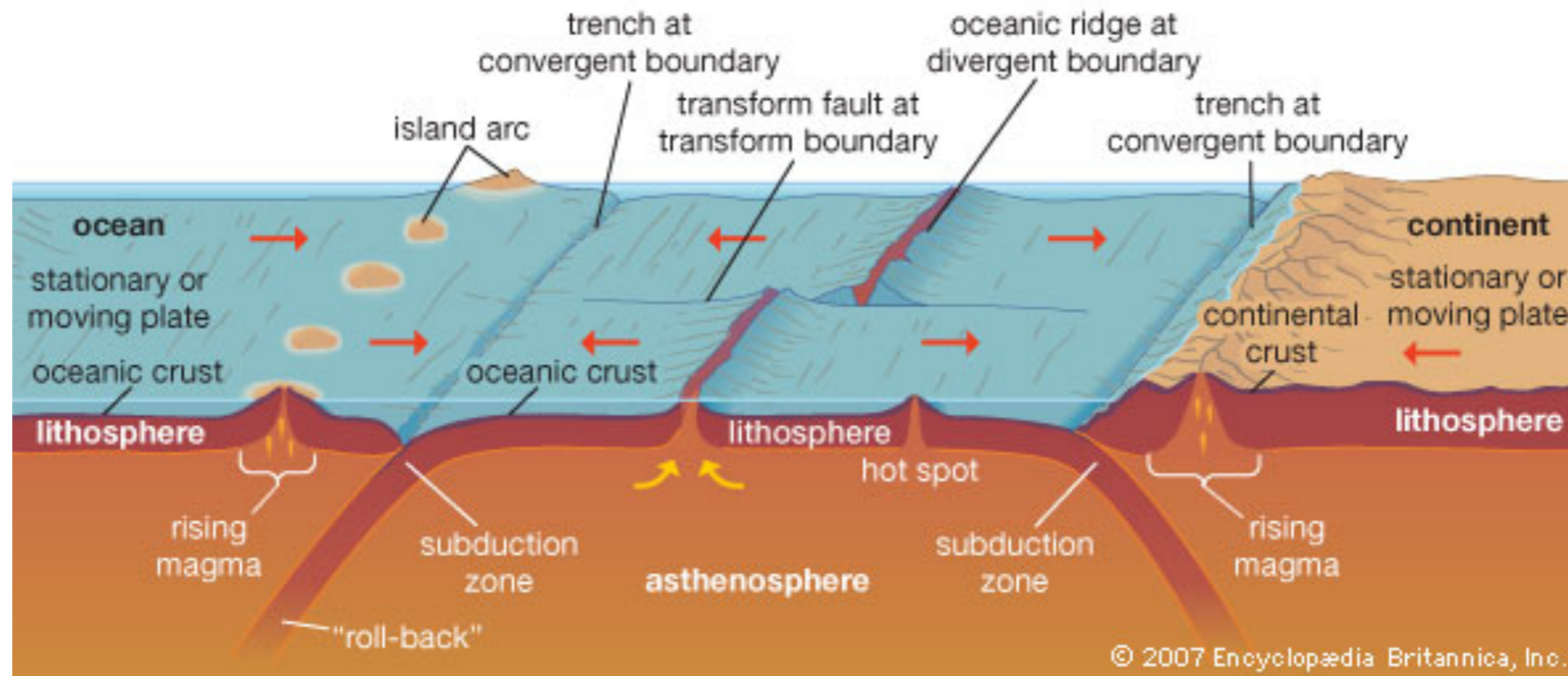
星形成領域に有機物の存在が確認される。

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>

生命の起源はどこか？ (1) 熱水噴出孔説



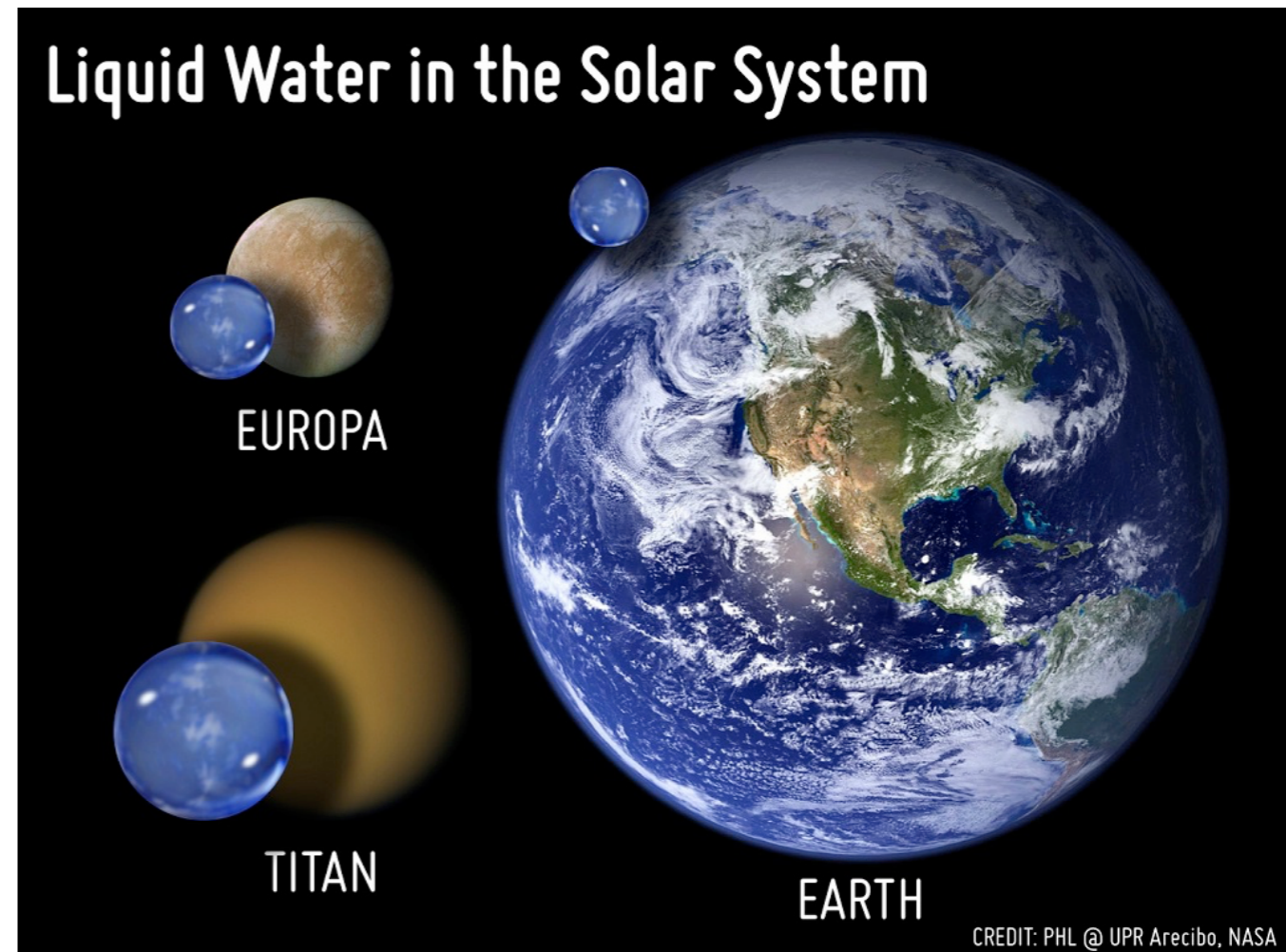
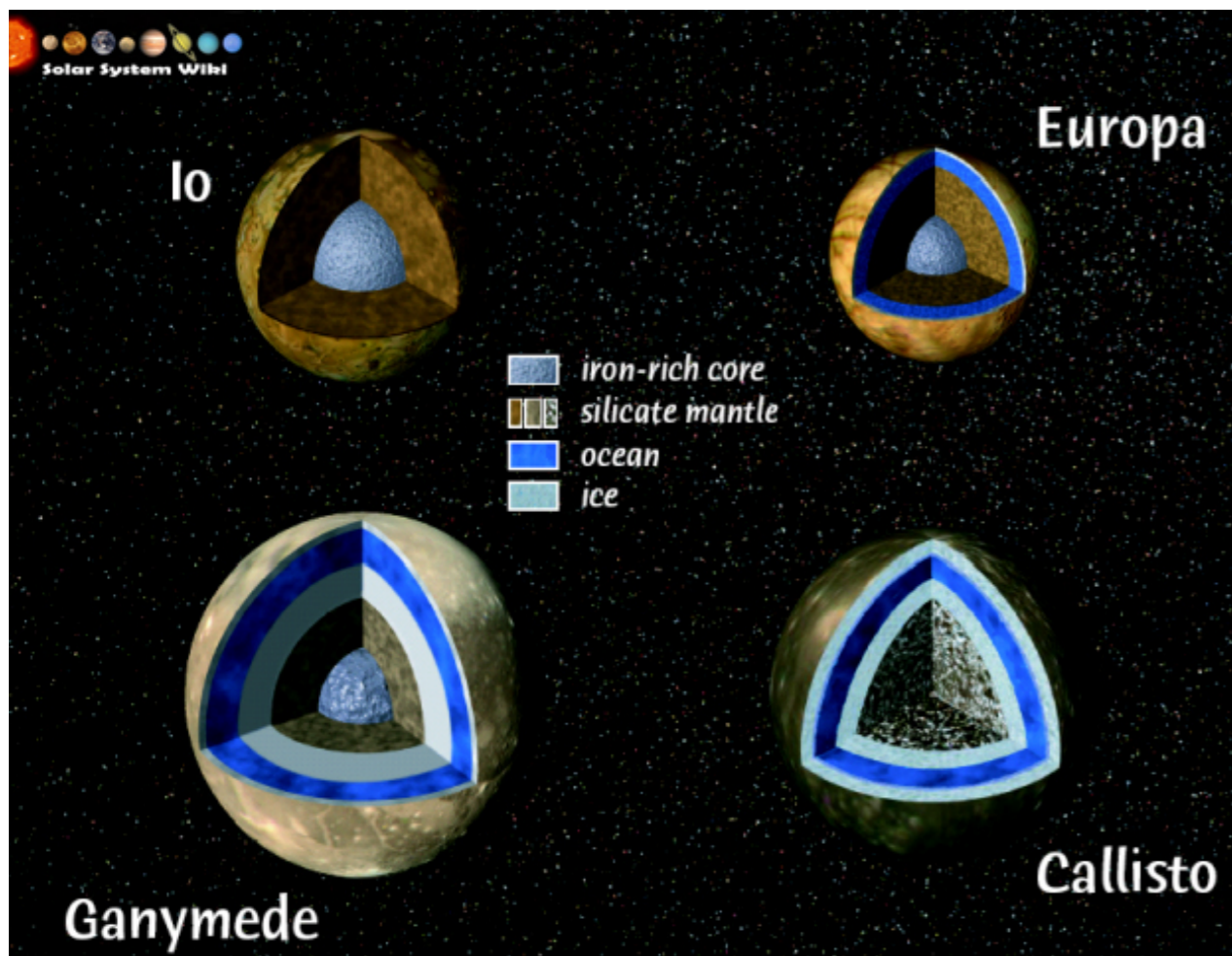
原始地球ではメタン，硫化水素，アンモニア，水素などの還元的物質が豊富に存在し，それらが**高温・高圧下**で反応して生体分子がつくられ，鉱物表面で重合して高分子化し，紫外線が遮断された環境で細胞化した。**地球生命は熱水噴出孔で生まれた。**

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。

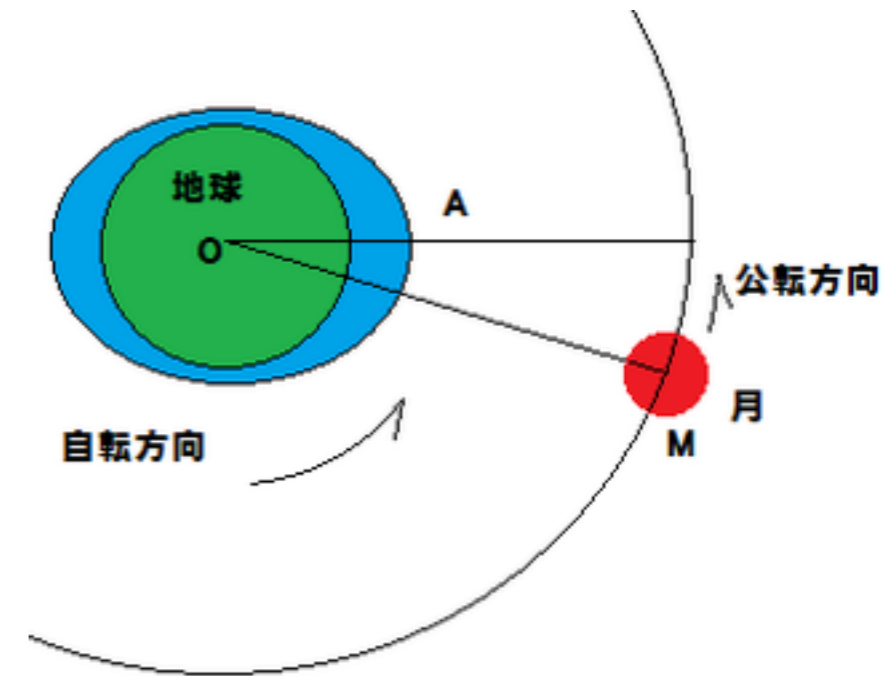
木星の第2衛星エウロパ (Europa) は、表面を覆う厚い氷殻の下に、海と熱水噴出孔が存在する可能性が高い。



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。**

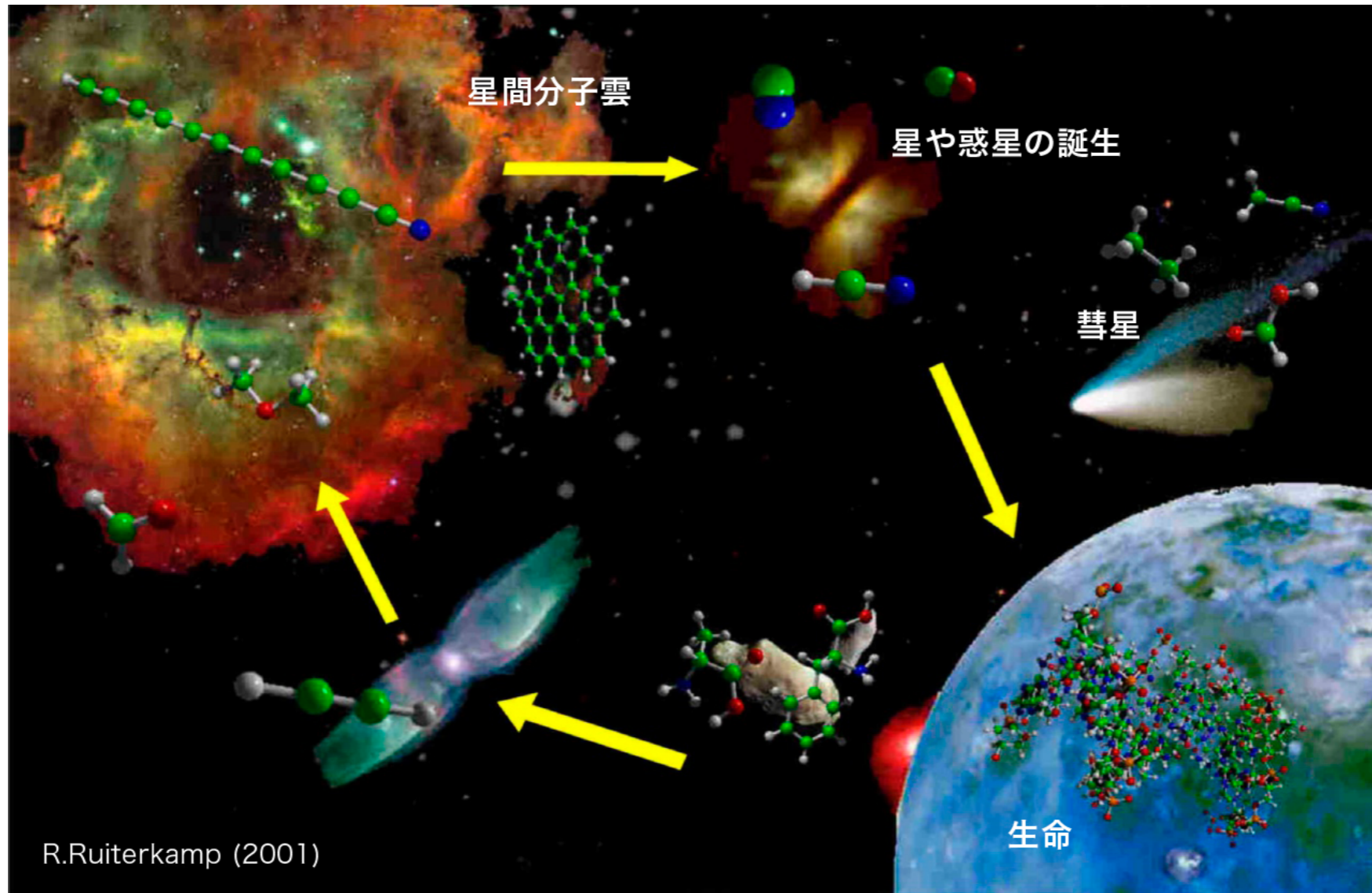
かつての地球の自転ははやく1日は6時間。**3時間ごとに巨大な津波が押し寄せたり引いたりしていた。** こうして陸地の水たまりで水が濃縮され、**強い太陽光が化学反応を促進し、** 脂肪酸（炭素・酸素・水素原子の鎖）やタンパク質のようなこれまでになかった複雑な有機化合物を作り出した。

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。**

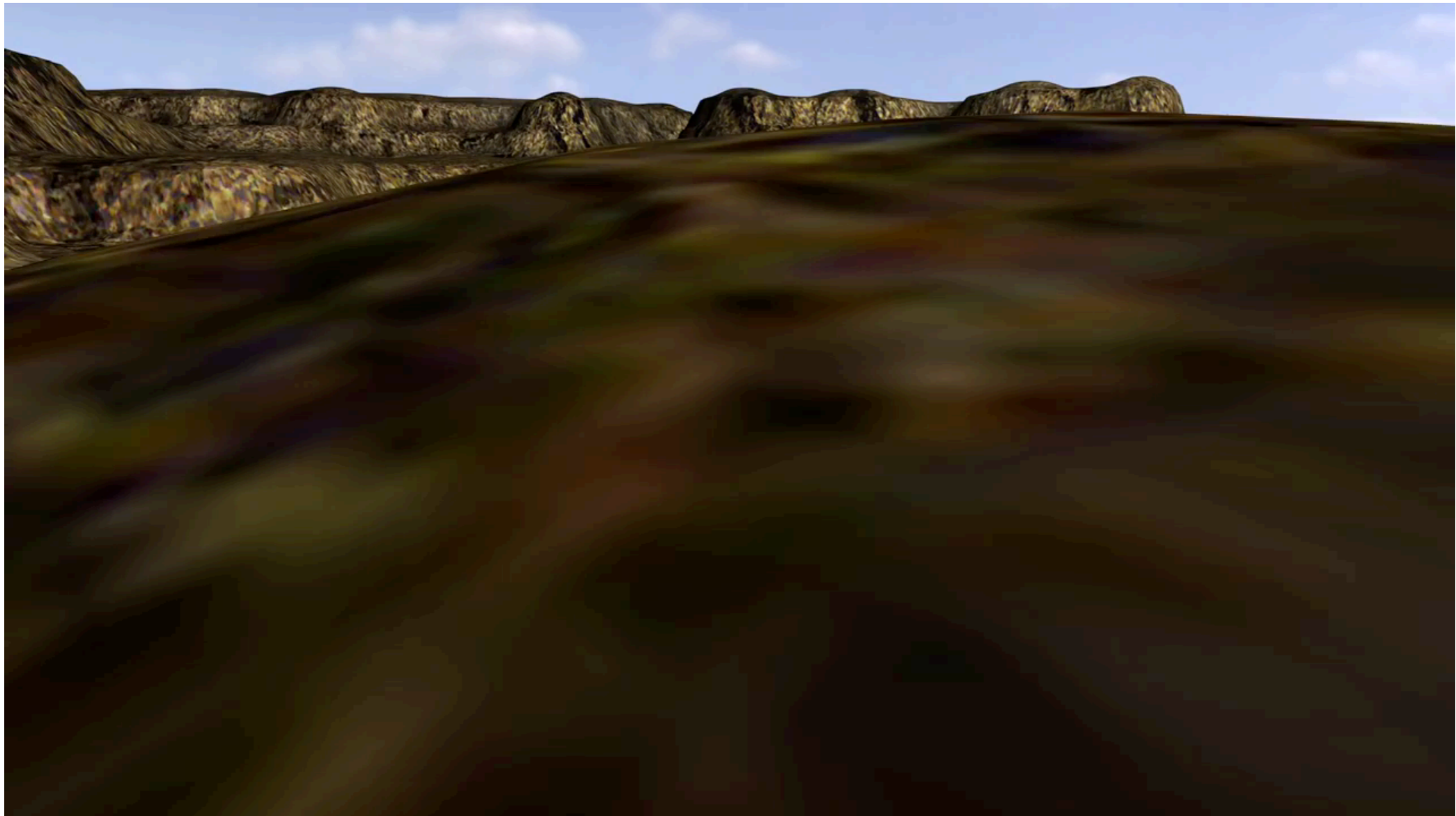
生命の起源はどこか？ (3) パンスペルミア説



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がある。

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

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

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

2019年3月号

ナショナル ジオグラフィック 日本版 2019年2月28日発行・発売（毎月1回30日発行・発売）第25巻第3号（1995年7月3日第3種郵便物認可）

ロンドン
新しい時代へ

体ひとつで
巨大な岩を登る

暴力が巣くう
エルサルバドル

不思議な昆虫
ツノゼミ

NATIONAL GEOGRAPHIC

ナショナル ジオグラフィック 日本版

誰か、いますよね？

地球の外にも生命が存在することがほぼ確実になってきた。
それを証明しようと、さまざまな探査計画が進められている。



地球外生命体はあるだろう。
地球外知的生命体がいるかどうかはわからない。
我々の近くにいないくても、宇宙全体にはいるはずだ。

たとえ知的生命体がいたとしても、
宇宙は広すぎて、互いに会うことはできないだろう。