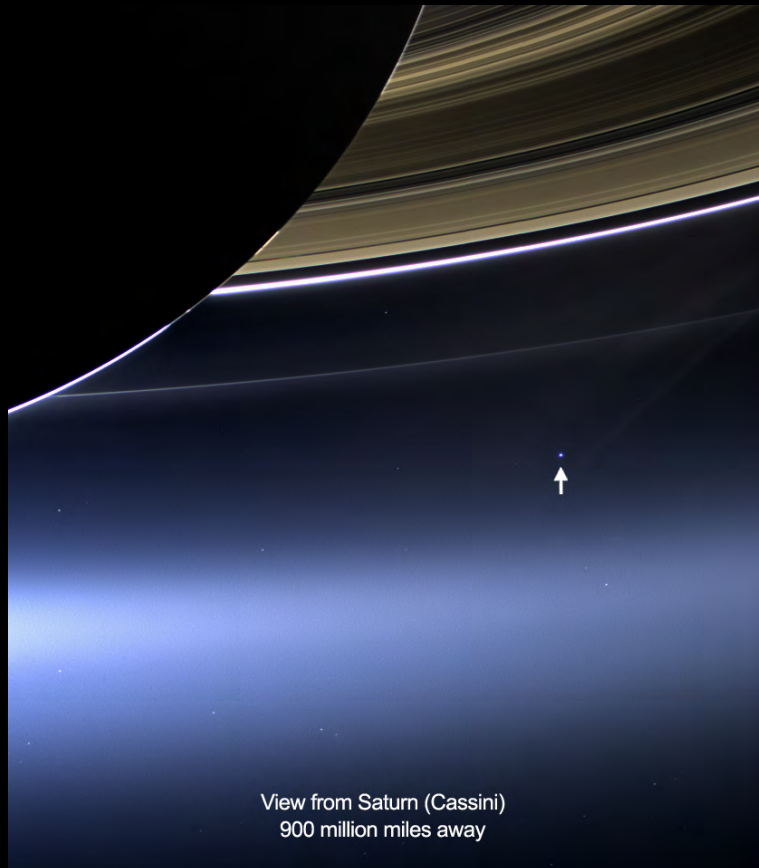


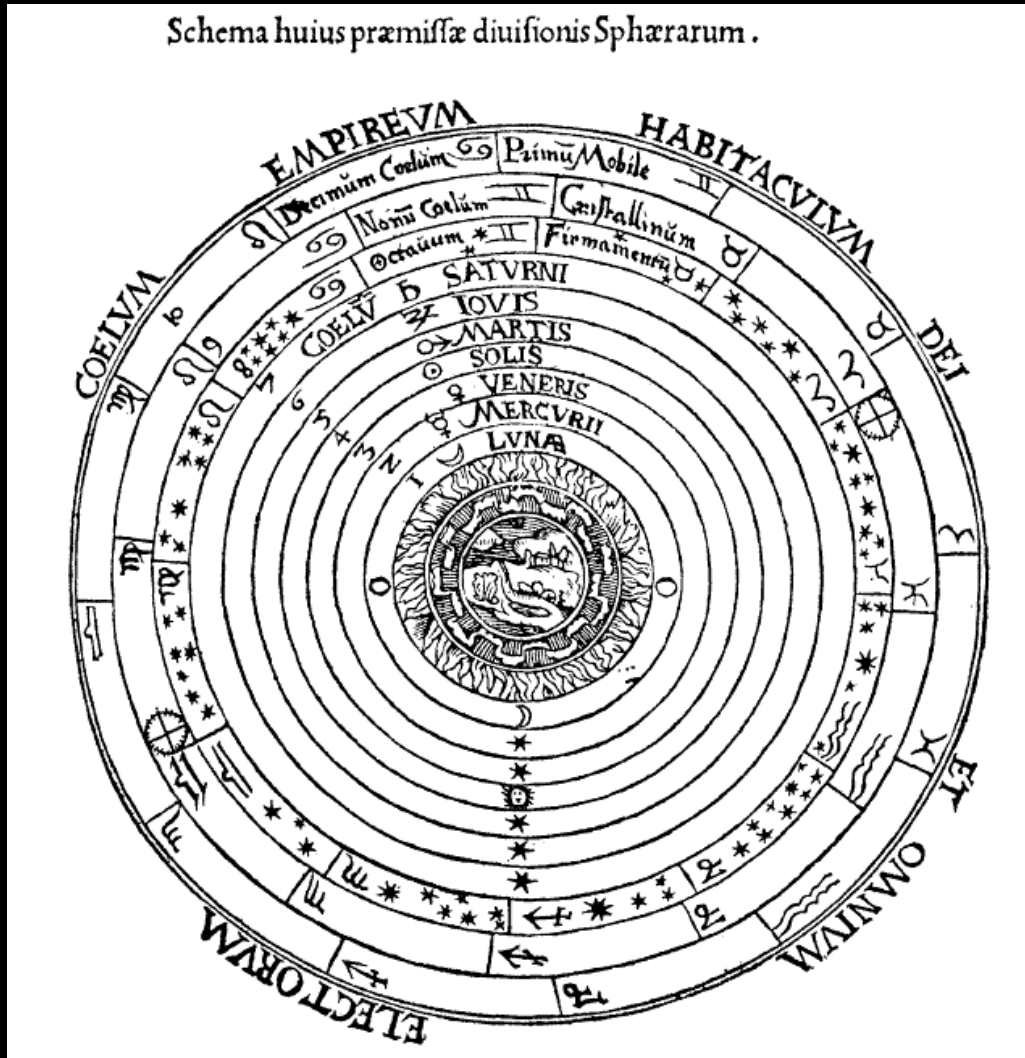
系外惑星の物理とバイオシグニチャー



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖
京都大学オンライン集中講義 2020年10月26, 28, 29, 30日

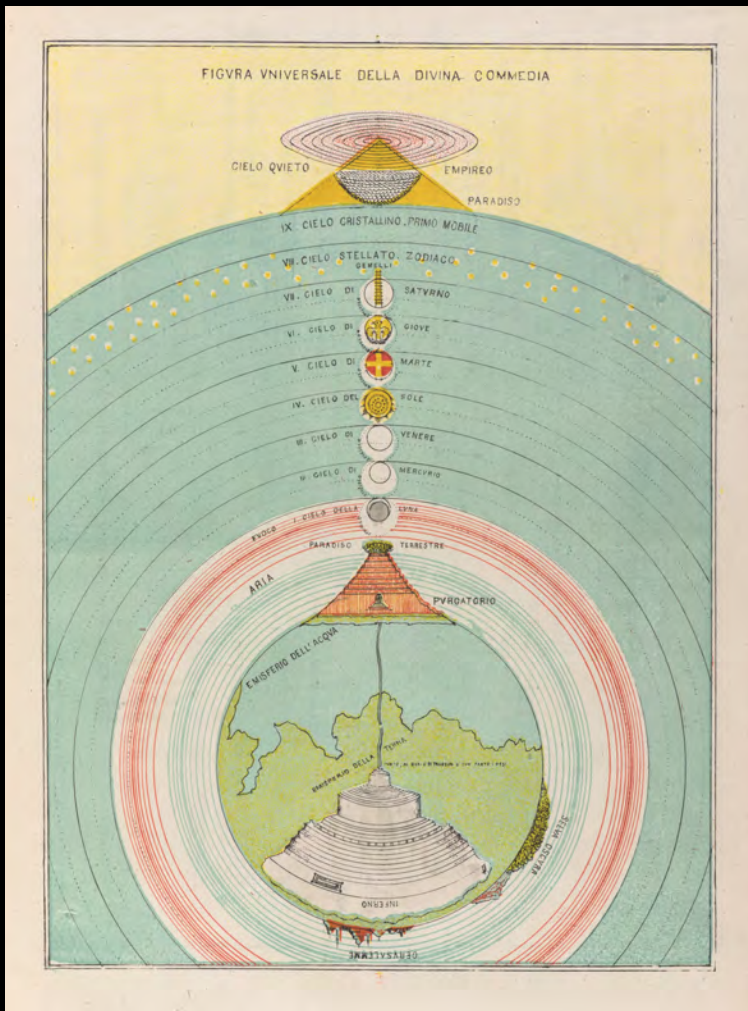
1 太陽系と世界観

古代ギリシャの世界観

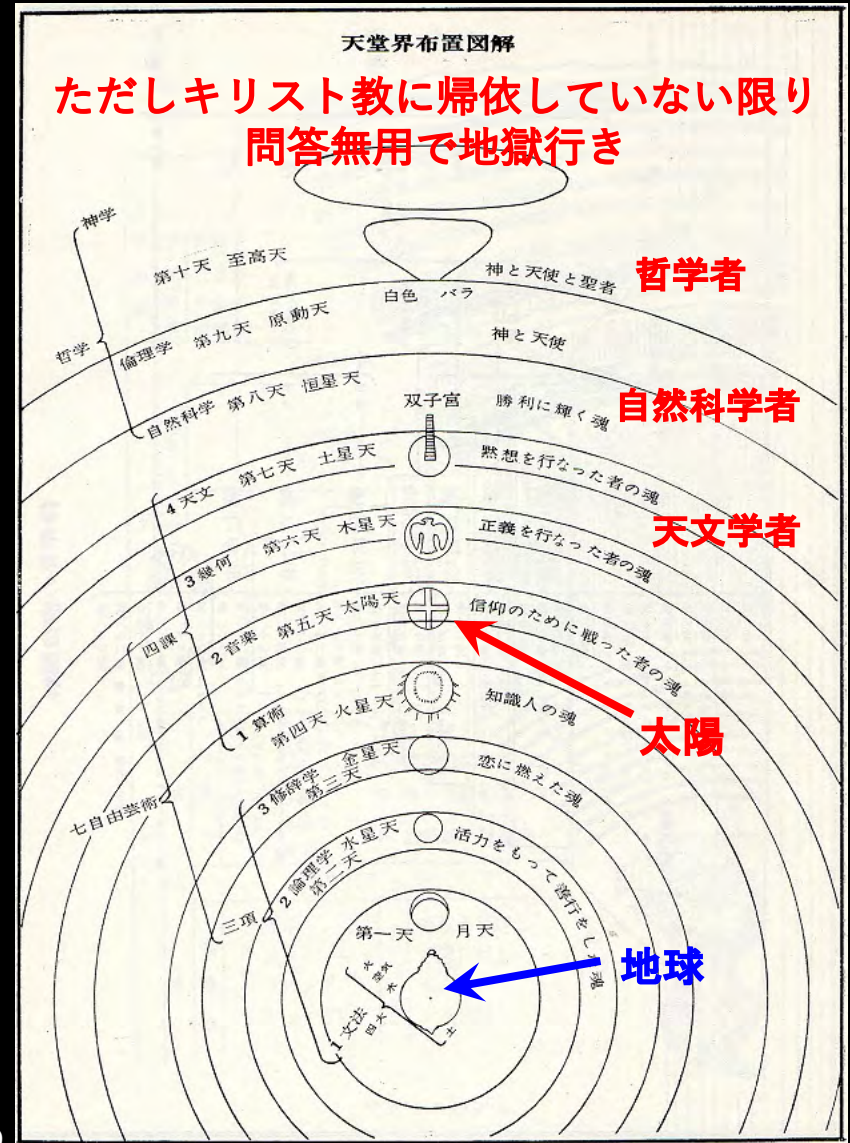


- プトレマイオス「アルマゲスト」(紀元150年頃)
- 古代ギリシャ天文学の集大成
- アリストテレス的宇宙観
- その後10世紀以上にわたって大きな影響を与え続けた

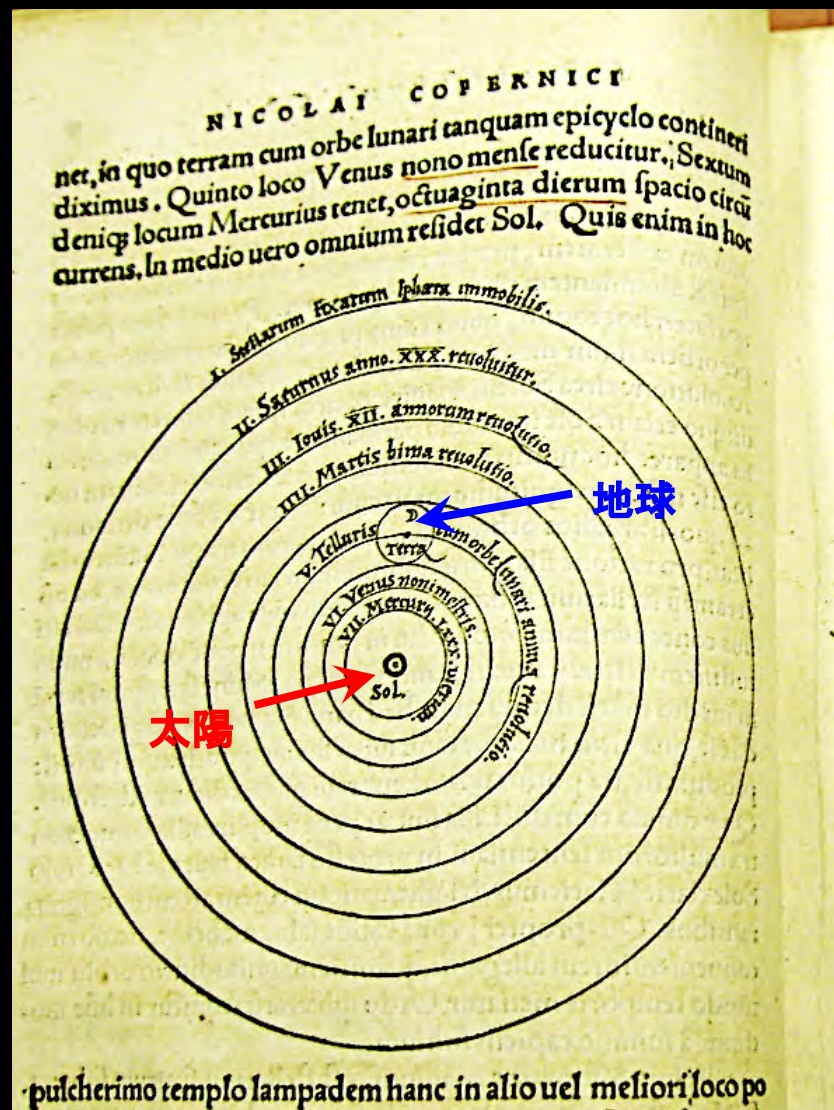
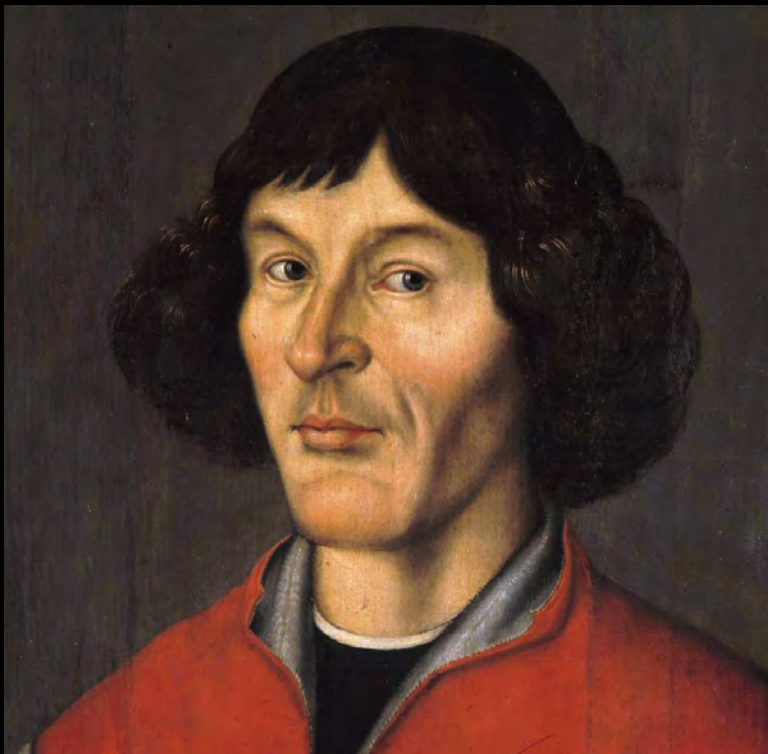
ダンテ「神曲」 (1304-1321)



La materia della Divina commedia di Dante Alighieri, dichiarata in VI tavole, by Michelangelo Caetani (1804–1882) from Wikipedia



ニコラウス・コペルニクス 「天球の回転について」(1543)



2007年10月24日

日本学術振興会先端拠点形成プログラム
「ダークエネルギーネットワーク」
国際会議@エジンバラ王立天文台
の際に特別公開中の図書館で撮影

我々の世界の外にも世界はあるのか？

- 哲学的に考えればすべては1あるいは ∞ のどちらか
 - この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在
(エピキュラス： 紀元前341年～270年)
 - 我々以外の宇宙は存在し得ない
(アリストテレス： 紀元前384年～322年)
 - 宇宙は無限であり、太陽系以外にも無数の惑星がある
(ジョルダーノ・ブルーノ： 1548－1600)



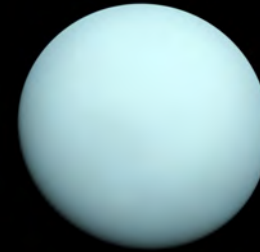
ブルーノは異端審問で死刑判決を受け公開火刑
(1600年)



世が世なら、現在の宇宙論研究者はノーベル賞どころか、間違いなくほぼ全員公開処刑されている

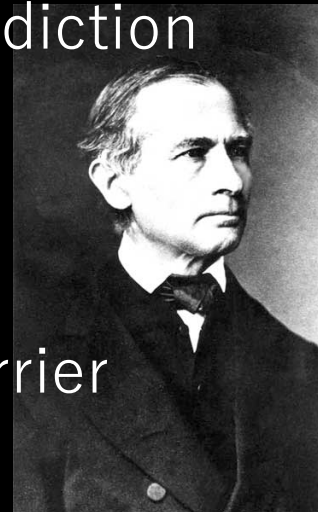
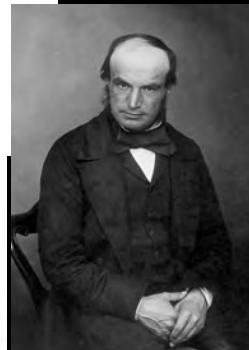
Bronze relief by Ettore Ferrari (Wikipedia)

Discovery of Neptune



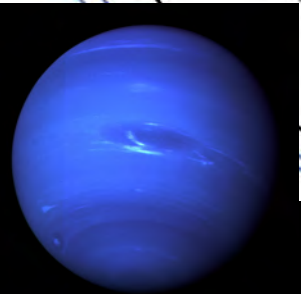
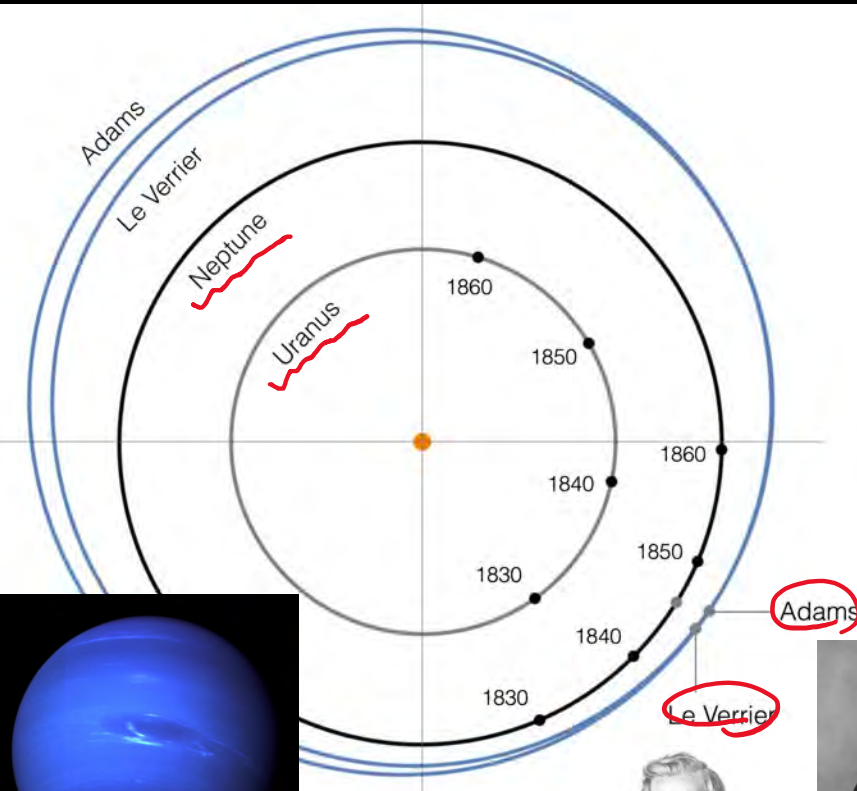
■ Uranus

- discovered in March 1781 by William Herschel
- its orbit is not fully consistent with Newtonian prediction



■ Neptune

- independently predicted by Adams and Le Verrier
- discovered in September 1846 by J.G. Galle



Mercury's precession and Vulcan

■ Vulcan



- Le Verrier recognized the precession of Mercury is inconsistent with Newtonian theory (if 7 planets alone)
- predicted an unknown planet inside Mercury's orbit in 1859 and named it Vulcan
- Lescarbault “discovered” its transit over the Sun on March 26, 1859, and was awarded the Légion d'honneur

Mercury's perihelion shift (532" per century)

$$= 276.38(\text{Venus}) + 91.41(\text{Earth}) + 2.48(\text{Mars}) + 153.98(\text{Jupiter}) + 7.31(\text{Saturn}) + 0.14(\text{Uranus}) + 0.04(\text{Neptune}) + \mathbf{43(\text{GR})}$$

Planet X and discovery of Pluto

■ Percival L. Lowell (1855-1916)

- Born in a very rich family, and founded the Lowell observatory by himself
- Believed intelligent life forms exist on Mars
 - *Mars (1895), Mars and Its Canals (1906), and Mars As the Abode of Life (1908)*
- Predicted Planet X that disturbs the orbits of Uranus and Neptune

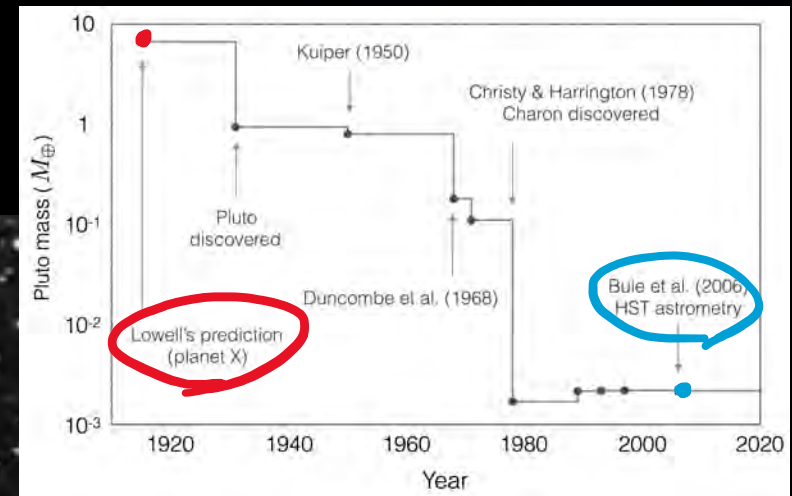


■ Elizabeth Langdon Williams (1879-1981)

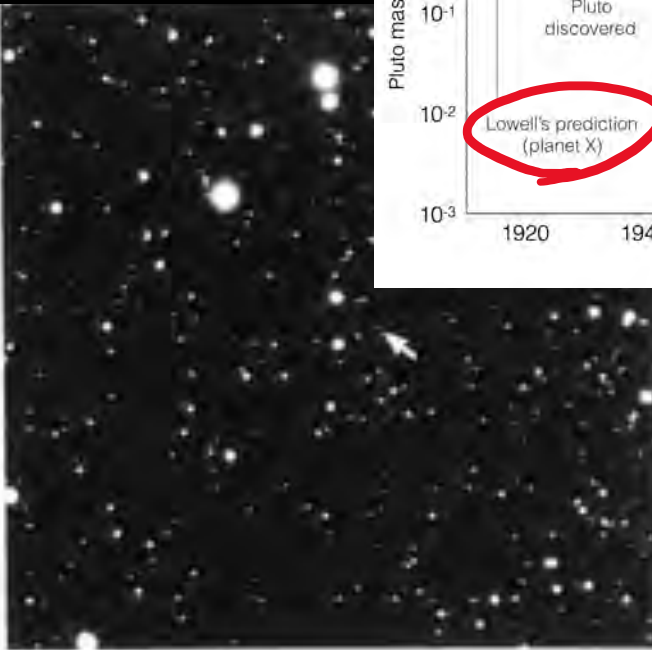
- a human computer and astronomer hired by Lowell
- Her calculations led to Lowell's prediction for the location of Planet X that **Clyde Tombaugh** used to locate an image in a region of the sky photographed in 1915. He discovered a new "planet" named **PLuto** in 1930

History of Pluto

- A great success story
 - but Lowell's prediction was totally wrong
 - the discovery was just accidental !
 - Walt Disney's Pluto in 1931
 - Plutonium in 1941



January 23, 1930

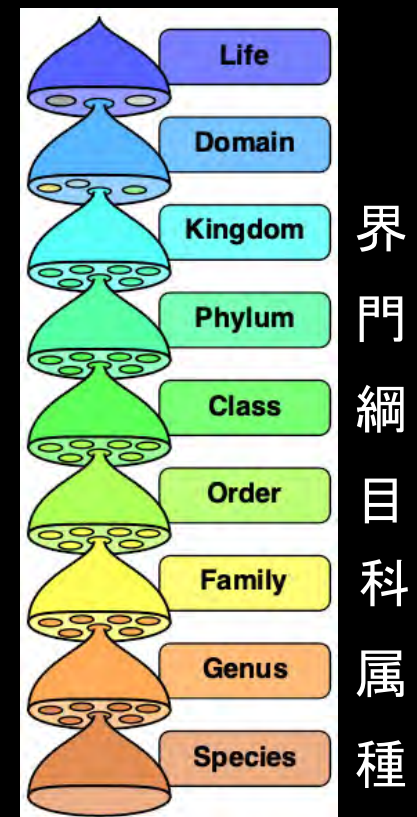
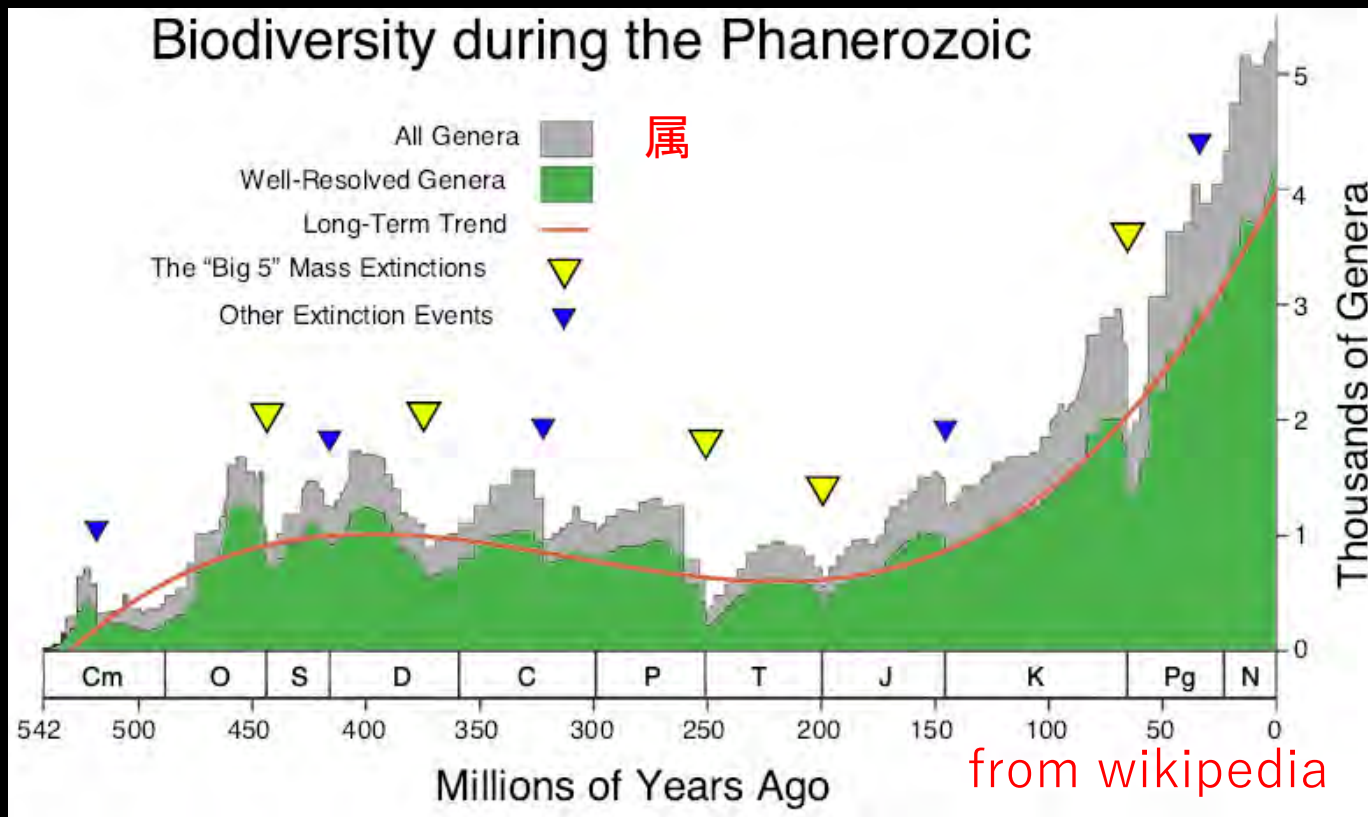


January 24, 1930

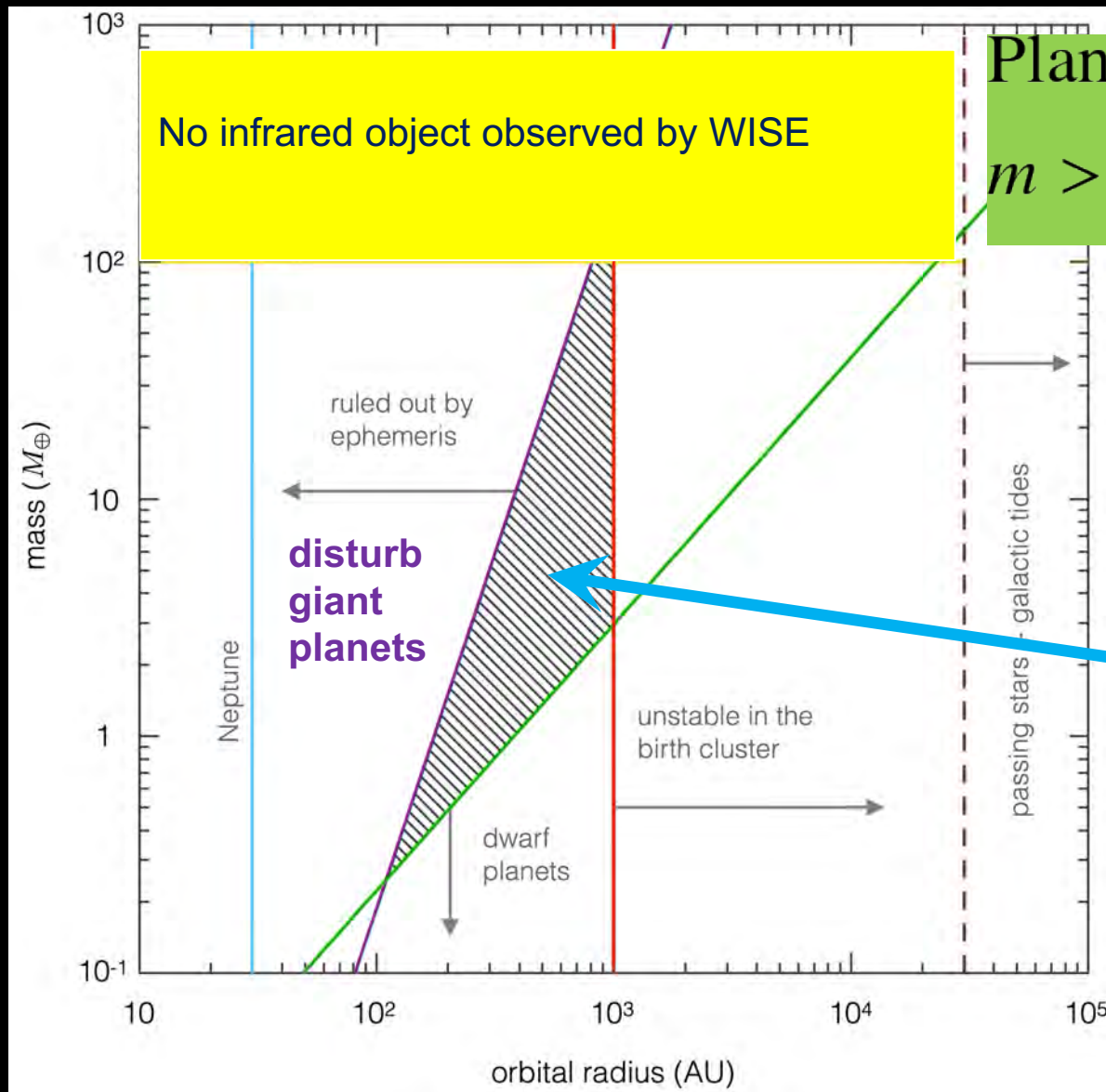


Extinction events and Nemesis

- Dinosaur's extinction 65Myr ago
 - KT boundary: collision of a (10-15)km asteroid (Alvarez et al. 1980)
- 12 extinction events over 250Myr (?)
 - **Nemesis**: an eccentric brown dwarf companion of the Sun: 26Myr period and semi-major axis of 88,000 au (Davis, Hut and Muller 1984)



Allowed region for Planet Nine



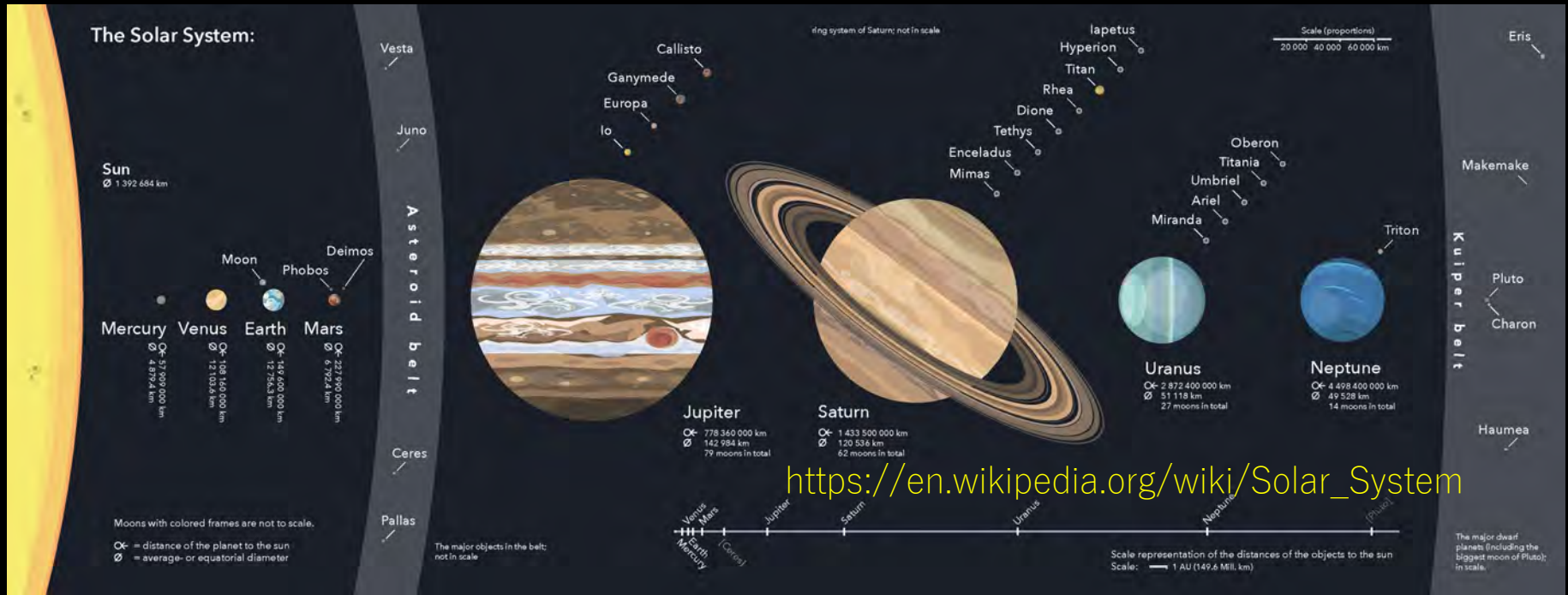
Planet

$$m > 1 M_{\oplus} \left(\frac{a}{380 \text{ au}} \right)^{9/8}$$

The possible Planet Nine may reside somewhere in this shaded region

2 系外惑星系発見史

太陽系は必然か偶然か



■ 太陽系は平凡なのか、それとも例外なのか？

- ほぼ同一平面上の円軌道をなす 8 重惑星系
- 内側に岩石惑星、外側に巨大ガス惑星
- 力学的に極めて安定（約100億年程度は安定）
- ハビタブル惑星（地球）を持つ
- 惑星の多くは複数の衛星と環を持つ

太陽系以外に惑星は存在しない(1991)？

Multiplicity among solar type stars in the solar neighbourhood. I. CORAVEL radial velocity observations of 291 stars*

A. Duquennoy¹, **M. Mayor¹** and J.-L. Halbwachs²

¹ Observatoire de Genève, 51 chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

² Observatoire de Strasbourg, URA 1280, 11 rue de l'Université, F67000 Strasbourg, France

Received October 3; accepted November 15, 1990

Duquennoy, Mayor & Halbwachs
Astronomy & Astrophysics
Supplement
88 (1991) 281-324

1977年から13年
間モニターし続け
て発見なし

Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood★

II. Distribution of the orbital elements in an unbiased sample

A. Duquennoy and **M. Mayor**

Geneva Observatory, 51 chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

Received December 4, 1990; accepted January 30, 1991

Duquennoy & Mayor
Astronomy & Astrophysics
248 (1991) 485-524

Finally, we ask the question if orbits of companions in the mass range $0.001\text{--}0.010 M_{\odot}$ can be found around G-dwarf primaries, and if yes, whether their eccentricities are different from zero. The latter could be information about their formation process and could become a test to distinguish if we deal with stars (or brown dwarfs) or real extra solar system planets.

太陽系以外に惑星は存在しない(1995) ?

- カナダのグループが、恒星21個の視線速度を12年間モニターし続ける
 - 惑星のものと思われる周期的変動は何も発見できなかった(と判断) ……
- 1994年に投稿、1995年8月に否定的結論をまとめた論文を出版

A Search for Jupiter-Mass Companions to Nearby Stars

GORDON A. H. WALKER¹ AND ANDREW R. WALKER

Geophysics and Astronomy Department, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia V6T 1Z4, Canada
E-mail: walker@astro.ubc.ca

ALAN W. IRWIN,¹ ANA M. LARSON, AND STEPHENSON L. S. YANG¹

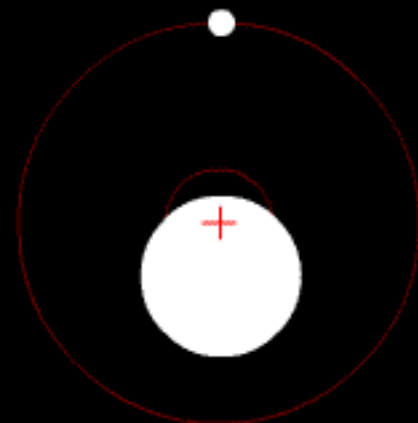
Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, P.O. Box 3055, Victoria, British Columbia V8W 3P6, Canada

Walker et al. *Icarus* 116(1995) 359-375
AND

DEREK C. RICHARDSON

Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, University of Toronto, 60, St. George Street, Toronto, Ontario M5S 1A7, Canada

Received September 30, 1994; revised February 6, 1995



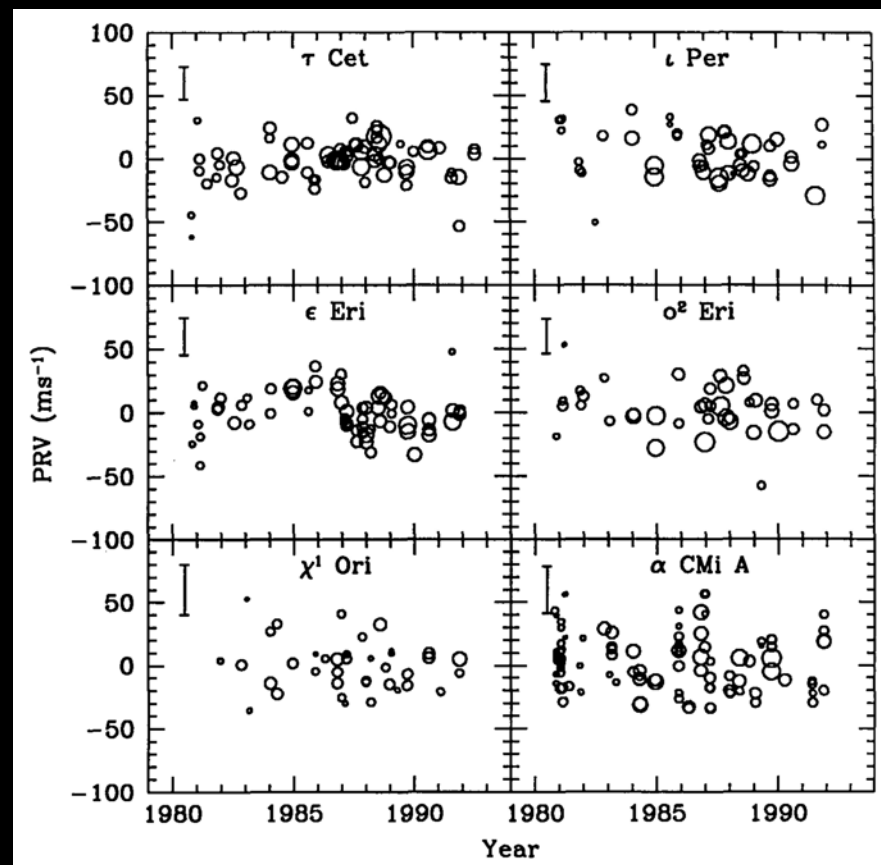
When we began this program over 14 years ago, we fully expected that, with sufficient precision, we would find several candidate giant planets. Not only is the Solar System dominated dynamically by Jupiter, but simulations such as those of Isaacman and Sagan (1977) suggested that a Solar System-like distribution of planetary masses and Bode's Law orbits would arise naturally around single stars. Very recently, Boss (1995) has predicted that Jupiter-mass planets will tend to form at distances of 4 to 5 AU around low-mass (0.1 to $1 M_{\odot}$) stars.

We have carefully monitored the radial velocities of 21 bright, solar-type stars for 12 years. None has shown any reflex motion due to a substellar companion to an upper limit of between 1 and 3 Jupiter masses ($\times \sin i$) for orbital periods less than 15 years. We can also rule out companions of more than 3 to 10 Jupiter masses ($\times \sin i$) at much longer periods based on long-term trends in the radial velocities, limits imposed by astrometry and zones of orbital stability in wide binaries.

“木星”（公転周期12年）の発見を念頭 においた極めて正しい観測戦略だった

Date	HJD	RV	ϵ_1	N	Observers
da-mo-yr	-2440000	km/s	km/s		
HD 190360					
		20:02.4	+29:49		
11-08-77	3367.440	-46.30	0.23	1	IMBE PROV
12-08-77	3368.462	-46.11	0.25	1	IMBE PROV
18-08-77	3374.360	-46.17	0.20	1	IMBE PROV
29-05-83	5484.618	-46.01	0.27	1	HALB
14-07-83	5530.521	-46.11	0.27	1	BENZ
30-07-84	5912.518	-45.54	0.27	1	MAYO
06-06-85	6223.580	-45.80	0.27	1	DUQU
25-09-85	6334.404	-45.92	0.27	1	CARQ
26-09-85	6335.354	-45.73	0.37	1	CARQ
08-10-86	6712.392	-45.41	0.27	1	DUQU
17-10-86	6721.385	-45.60	0.29	1	CARQ
10-08-87	7018.364	-45.68	0.31	1	DE M
14-08-88	7388.468	-46.32	0.27	1	PERN
02-09-88	7407.397	-45.82	0.27	1	DE M
27-07-89	7735.535	-45.94	0.26	1	DUQU
03-08-89	7742.522	-45.86	0.26	1	MAYO
05-10-89	7805.325	-45.91	0.26	1	MERM

Duquennoy, Mayor & Halbwachs (1991)



Walker et al. (1995)

「我々は何も知らなかった」 ホットジュピターの発見 (1995)

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

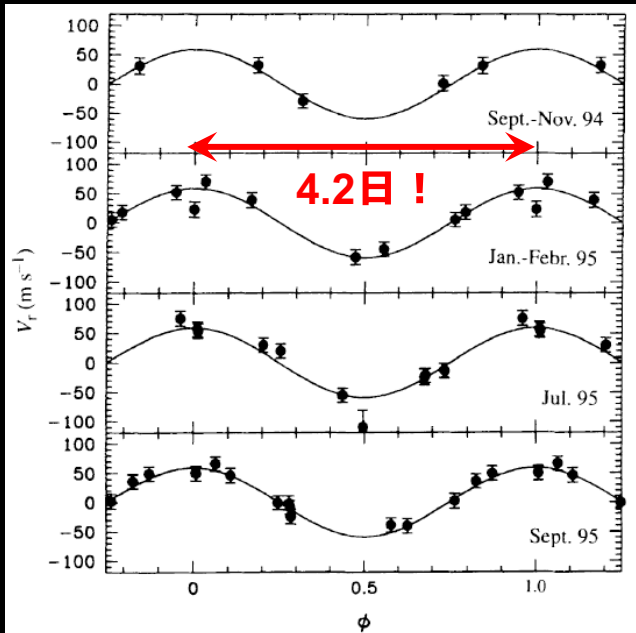
Michel Mayor & Didier Queloz

Nature 378(1995)355

Geneva Observatory, 51. Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

(太陽に似た恒星の周りの) 系外惑星の初発見：51Peg b
4.2日というとんでもない短周期で公転していた！ (ホットジュピター)



2019年ノーベル物理学賞受賞
ディディエ・ケローとミシェル・マイヨール

高波長分解能分光器ELODIEの開発

ELODIE: A spectrograph for accurate radial velocity measurements

A. Baranne¹, D. Queloz², M. Mayor², G. Adrianzyk³, G. Knispel³, D. Kohler³, D. Lacroix³, J.-P. Meunier³, G. Rimbaud³ and A. Vin³

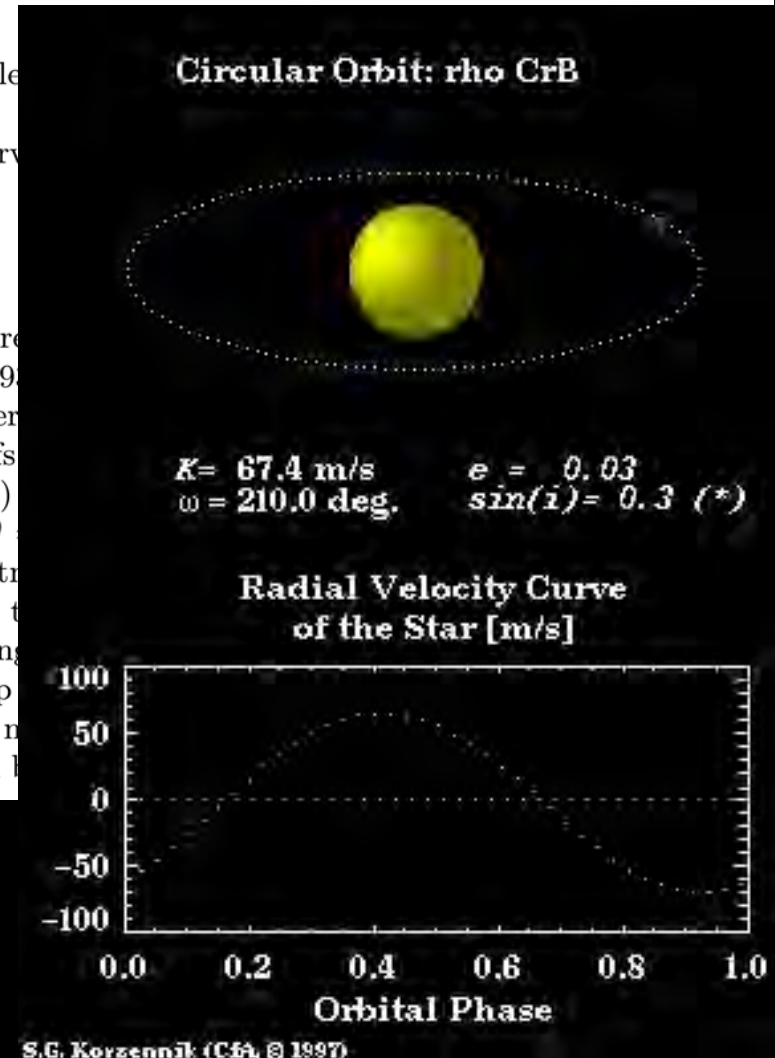
¹ Observatoire de Marseille, 2 Place Le Verrier, F-13248 Marseille

² Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny, Switzerland

³ Observatoire de Haute-Provence, F-04870 Saint Michel l'Observatoire

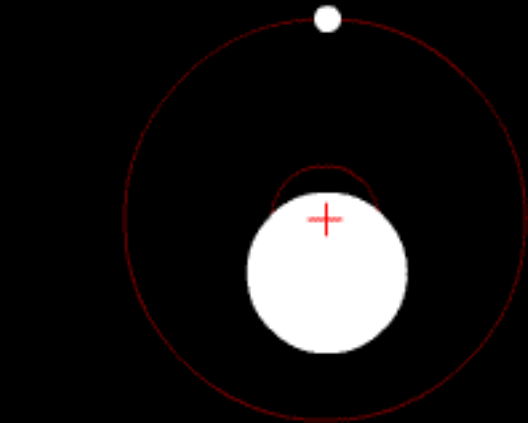
Received September 28, 1995; accepted February 15, 1996

Abstract. — The fibre-fed echelle spectrograph of Observatoire de Marseille instrument has been in operation since the end of 1993 on the 1.9 m telescope. It is a version of the cross-correlation spectrometer CORAVEL, to perform measurements such as needed in the search, by Doppler shift, for brown-dwarfs. In one single exposure a spectrum at a resolution of 42000 ($\lambda/\Delta\lambda$) is recorded on a 1024×1024 CCD. This performance is achieved by using a tan θ grating and a grism as cross-disperser. An automatic on-line data treatment software computes cross-correlation functions. The instrument design and the results of the paper. The efficiency and accuracy of the instrument and its long-term stability for radial velocities with an accuracy better than 15 m s⁻¹ for stars up to 16th magnitude. Observations of 16th magnitude stars are also possible to make classic spectroscopic studies ($S/N > 100$) 9th magnitude stars can be observed.



大発見の裏には、優れた装置開発と長年の(報われない)観測の積み重ねがあった

系外惑星検出方法

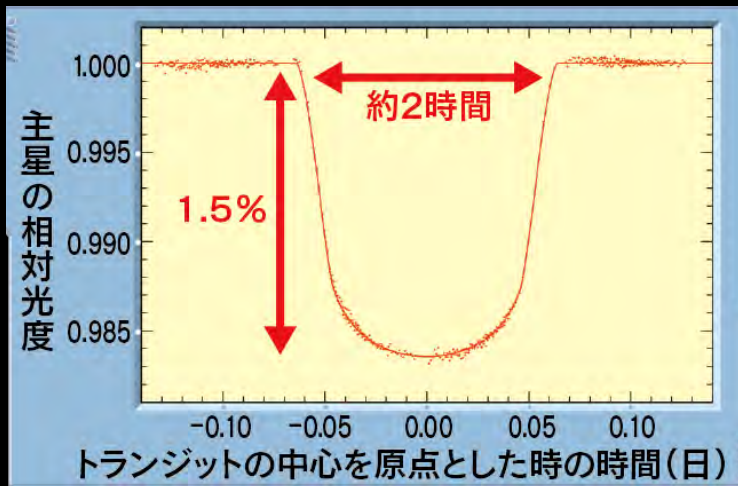


■ 視線速度法

- 惑星の公転に同期して中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

■ トランジット法

- 中心星の正面を惑星が横切ることによって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる



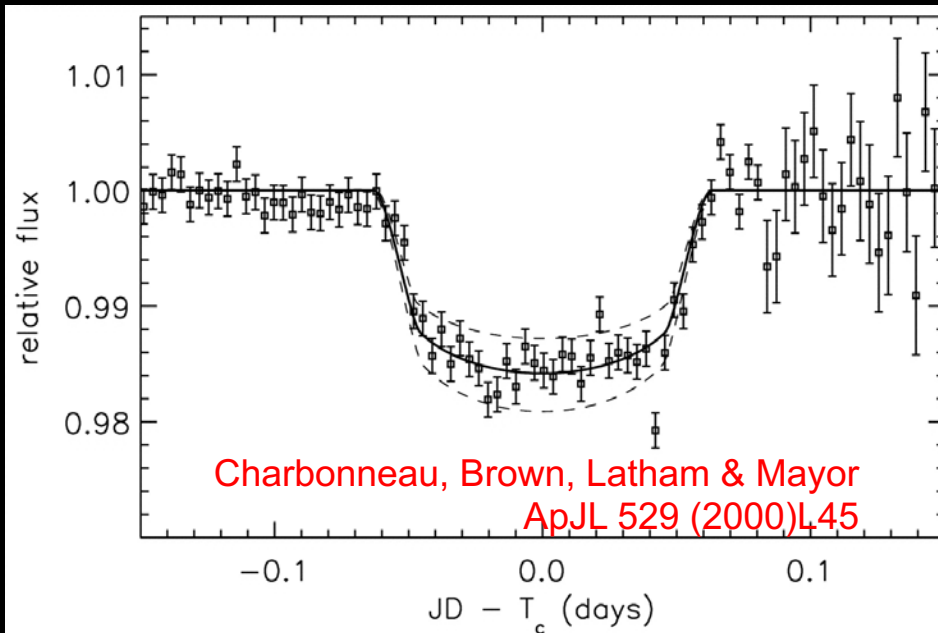
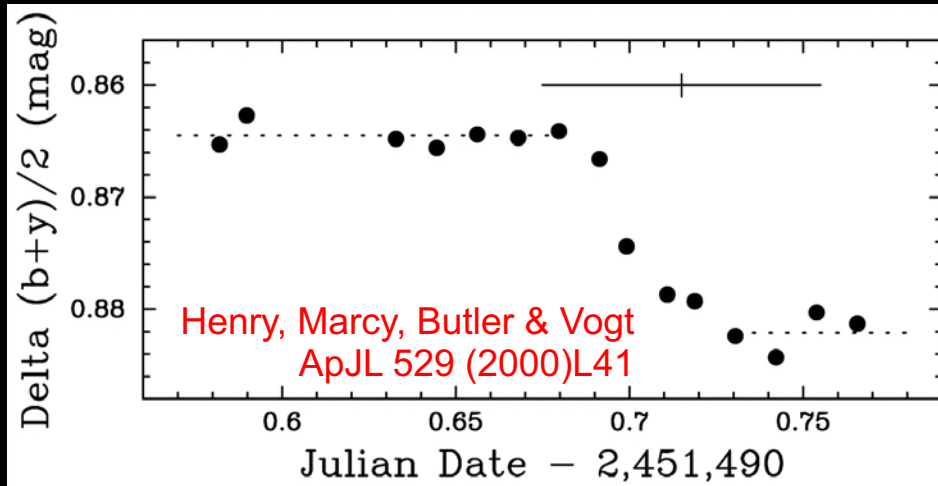
■ 直接撮像

- 中心星の光を隠して惑星の光を分離

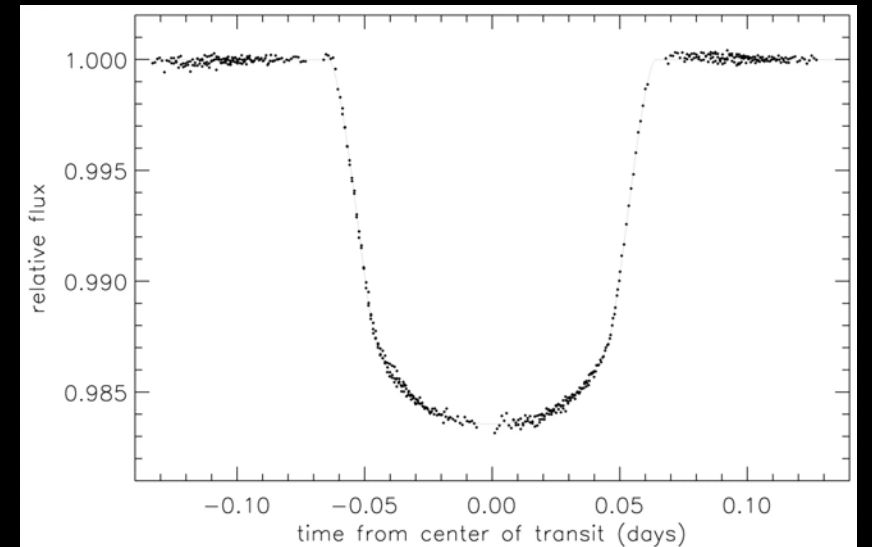
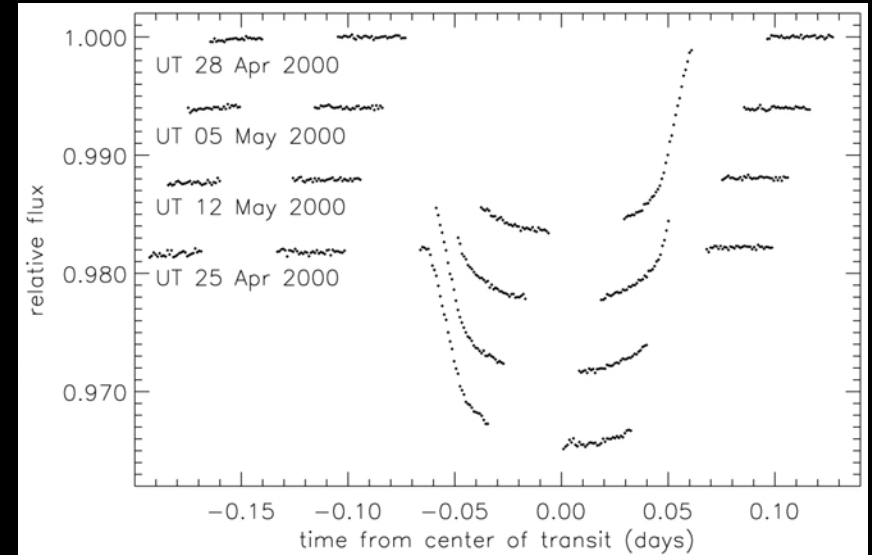
■ 重力レンズ

最初のトランジット惑星: HD209458b

地上望遠鏡

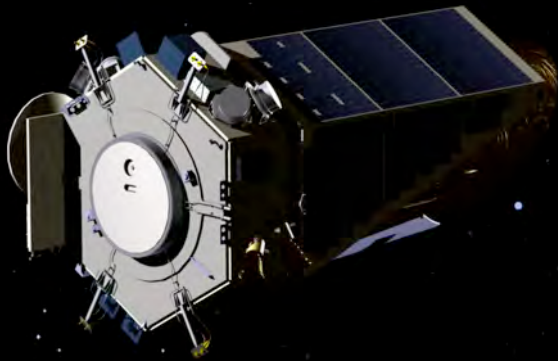


ハッブル宇宙望遠鏡



宇宙は惑星で満ちていた

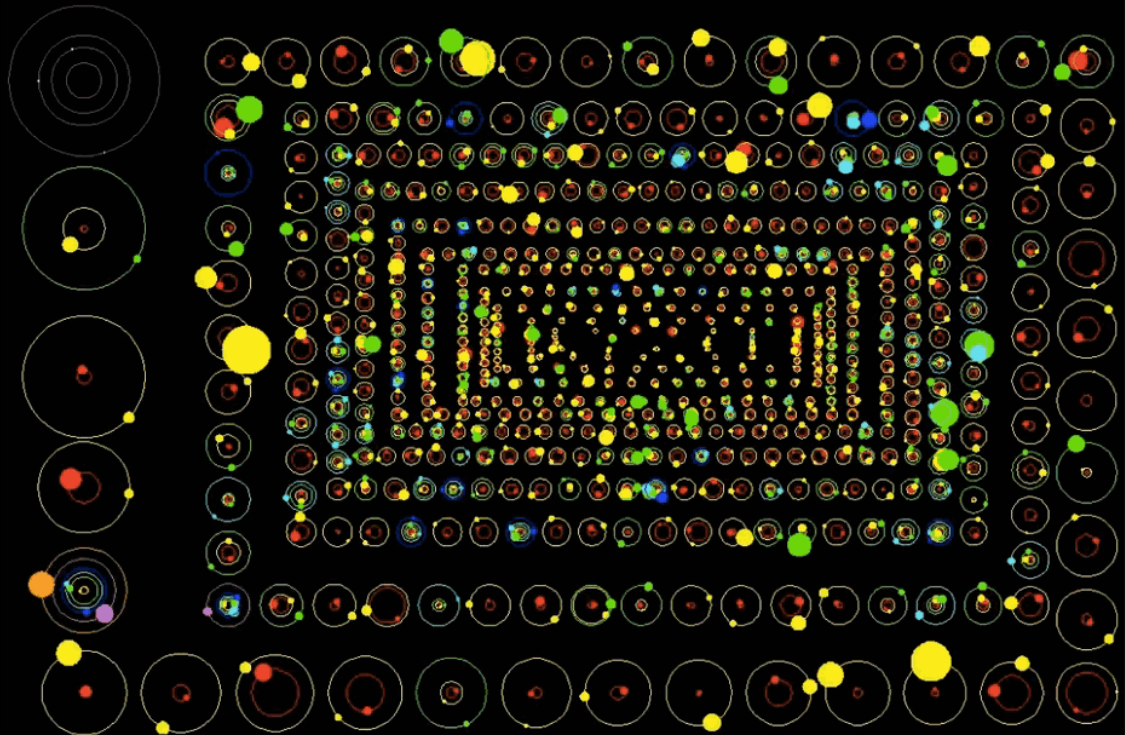
トランジット専用観測衛星ケプラー
(2009年打ち上げ)が、系外惑星観測
データに革命をもたらした



Kepler planets (August 3, 2015)
©NASA/Daniel Fabrycky

The Kepler Orrery III

$t[\text{BJD}] = 2455215$



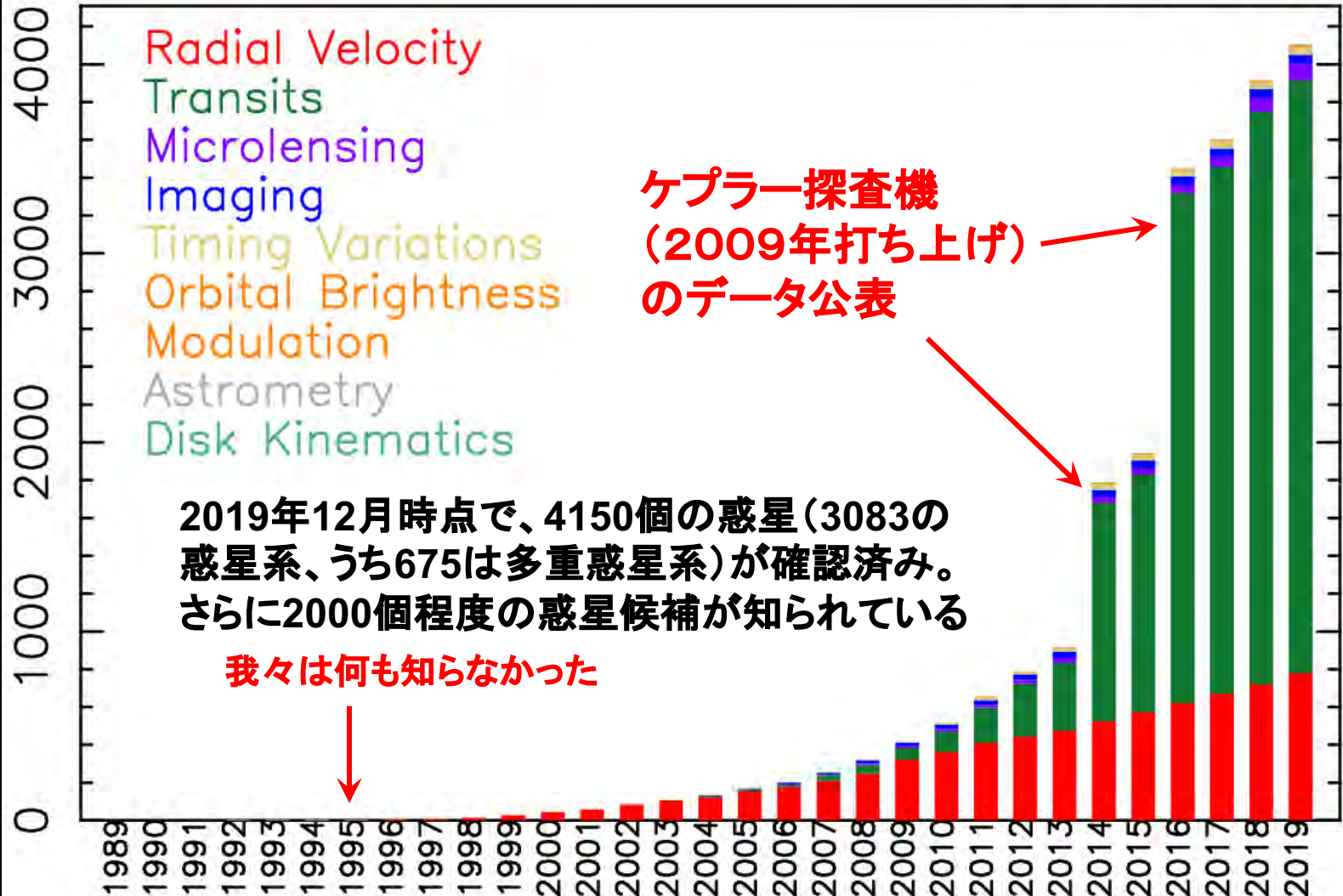
[https://solarsystem.nasa.gov
/resources/311/kepler-
orrery-iii/](https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/)

系外惑星の発見年表

05 Dec 2019

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数



西暦

「初めての」 太陽系外惑星発見

■ Wolszczan & Frail (1992)

A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12

A. Wolszczan* & D. A. Frail†

* National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, Arecibo, Puerto Rico 00613, USA

† National Radio Astronomy Observatory, Socorro, New Mexico 87801, USA

MILLISECOND radio pulsars, which are old ($\sim 10^9$ yr), rapidly rotating neutron stars believed to be spun up by accretion of matter from their stellar companions, are usually found in binary systems with other degenerate stars¹. Using the 305-m Arecibo radiotelescope to make precise timing measurements of pulses from the recently discovered 6.2-ms pulsar PSR1257+12 (ref. 2), we demonstrate that, rather than being associated with a stellar object, the pulsar is orbited by two or more planet-sized bodies. The planets detected so far have masses of at least $2.8 M_{\oplus}$ and $3.4 M_{\oplus}$, where $M_{\oplus}$ is the mass of the Earth. Their respective distances from the pulsar are 0.47 AU and 0.36 AU, and they move in almost circular orbits with periods of 98.2 and 66.6 days. Observations indicate that at least one more planet may be present in this system. The detection of a planetary system around a nearby (~ 500 pc), old neutron star, together with the recent report on a planetary companion to the pulsar PSR1829-10 (ref. 3) raises the tantalizing possibility that a non-negligible fraction of neutron stars observable as radio pulsars may be orbited by planet-like bodies.

The 6.2-ms pulsar PSR1257+12 (Fig. 1) was discovered during the search at high galactic latitudes for millisecond pulsars conducted in February 1990 with the 305-m Arecibo radiotelescope at a frequency of 430 MHz (ref. 2). The characteristics of this survey and the details of data analysis are described else-

NATURE · VOL 355 · 9 JANUARY 1992

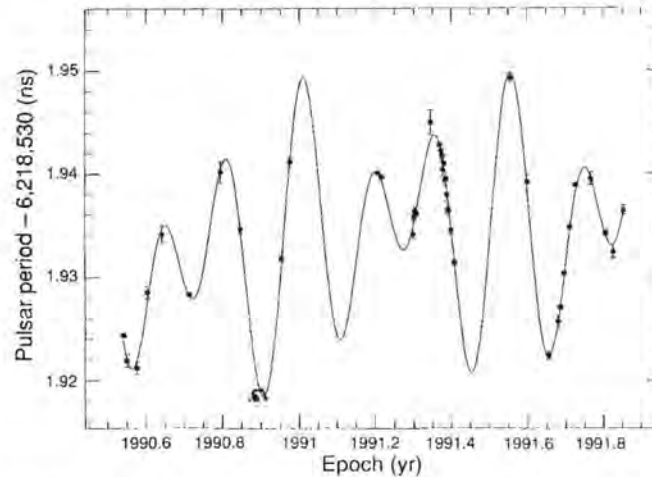


FIG. 3 Period variations of PSR1257+12. Each period measurement is based on observations made on at least two consecutive days. The solid line denotes changes in period predicted by a two-planet model of the 1257+12 system.

■ パルサープラネット

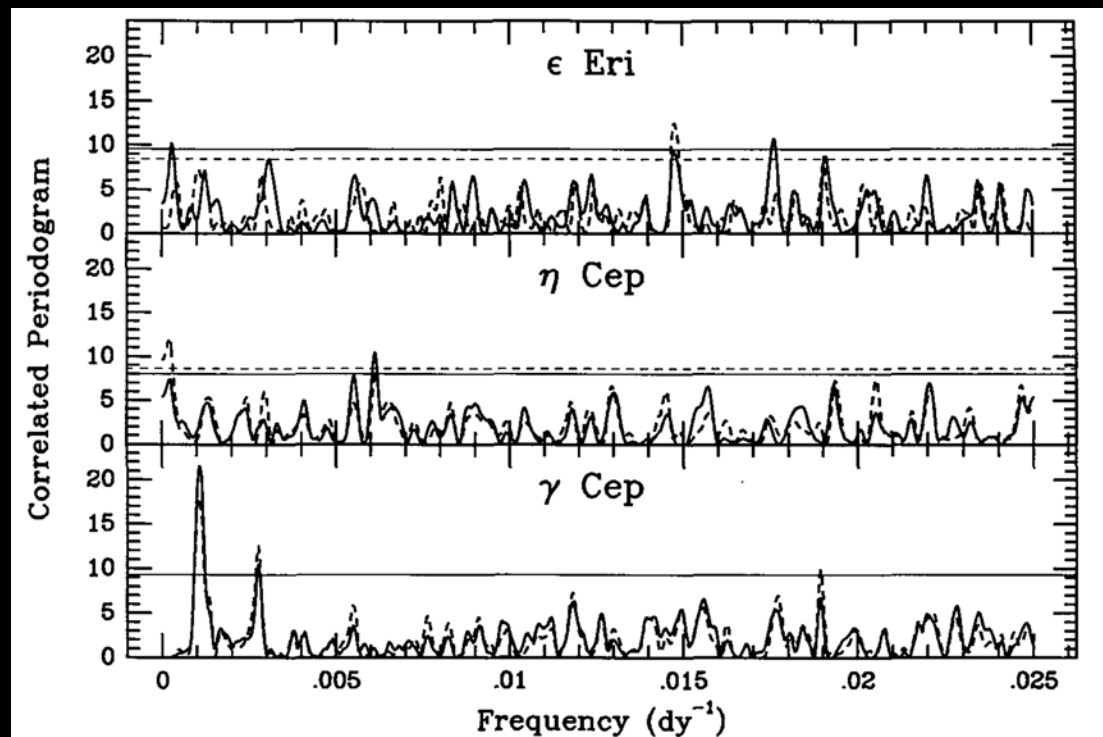
■ $3.4 M_{\text{地球}}$ (周期66.6日)

■ $2.8 M_{\text{地球}}$ (周期98.2日)

■ パルスの到着時刻変動

Walker et al. (1995) の定量的結論

Fig3. in Walker et al. (1995)



In contrast to the results for γ Cep, the values of the periodogram peaks for ϵ Eri and η Cep in Fig. 3 depend on our run corrections. We feel that these results are too marginal to qualify as a convincing periodicity. These periodogram analyses are the basis for our conclusion that we have detected no unequivocal planetary companion signatures in our data but, rather, can set interesting mass limits to any such companions.

Walker et al.は慎重過ぎた？

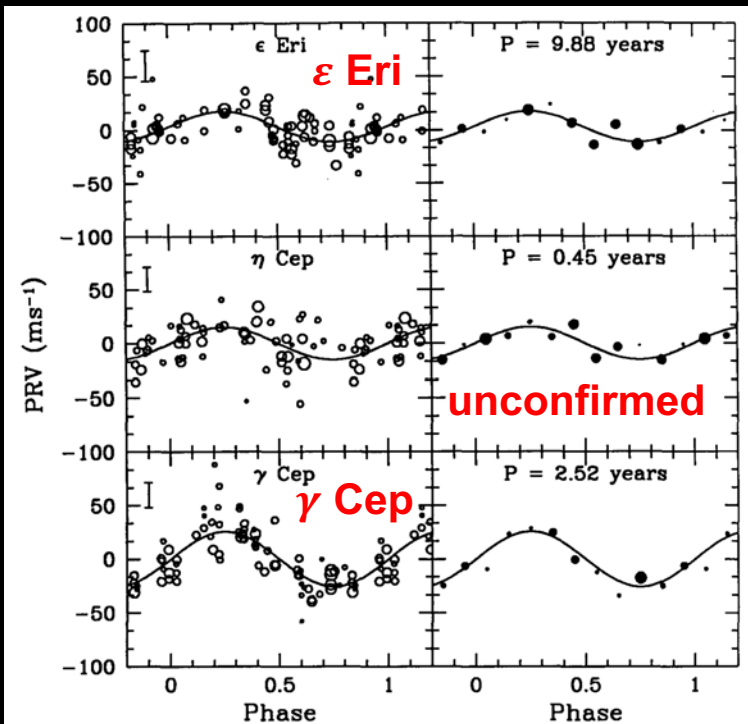
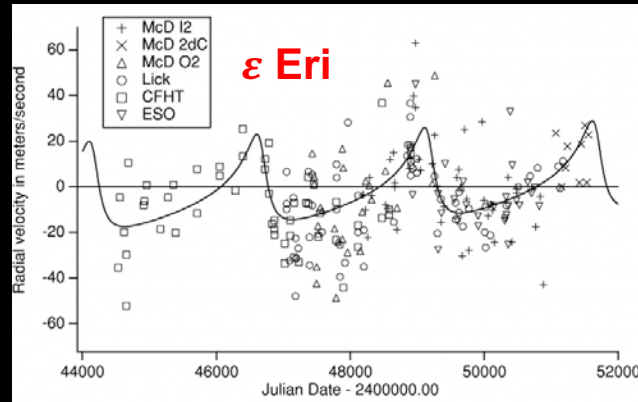
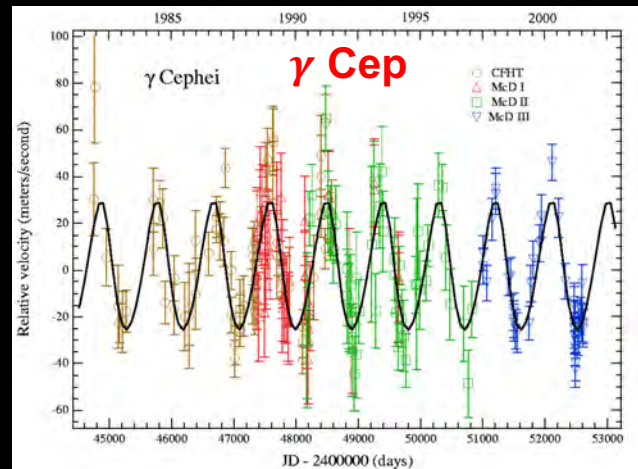


Fig4. in Walker et al. (1995)



Hatzes et al. (2000)
(including Walker)
0.86M_J planet;
 $P = 6.9$ yr, $e = 0.6$



Hatzes et al. (2003)
(including Walker)
1.7M_J planet;
 $P = 2.5$ yr, $e = 0.1$

- なぜ possible candidatesとしておかなかったのか、無念… (もちろん研究者としては尊敬すべきだが)

惑星系の普遍性と多様性

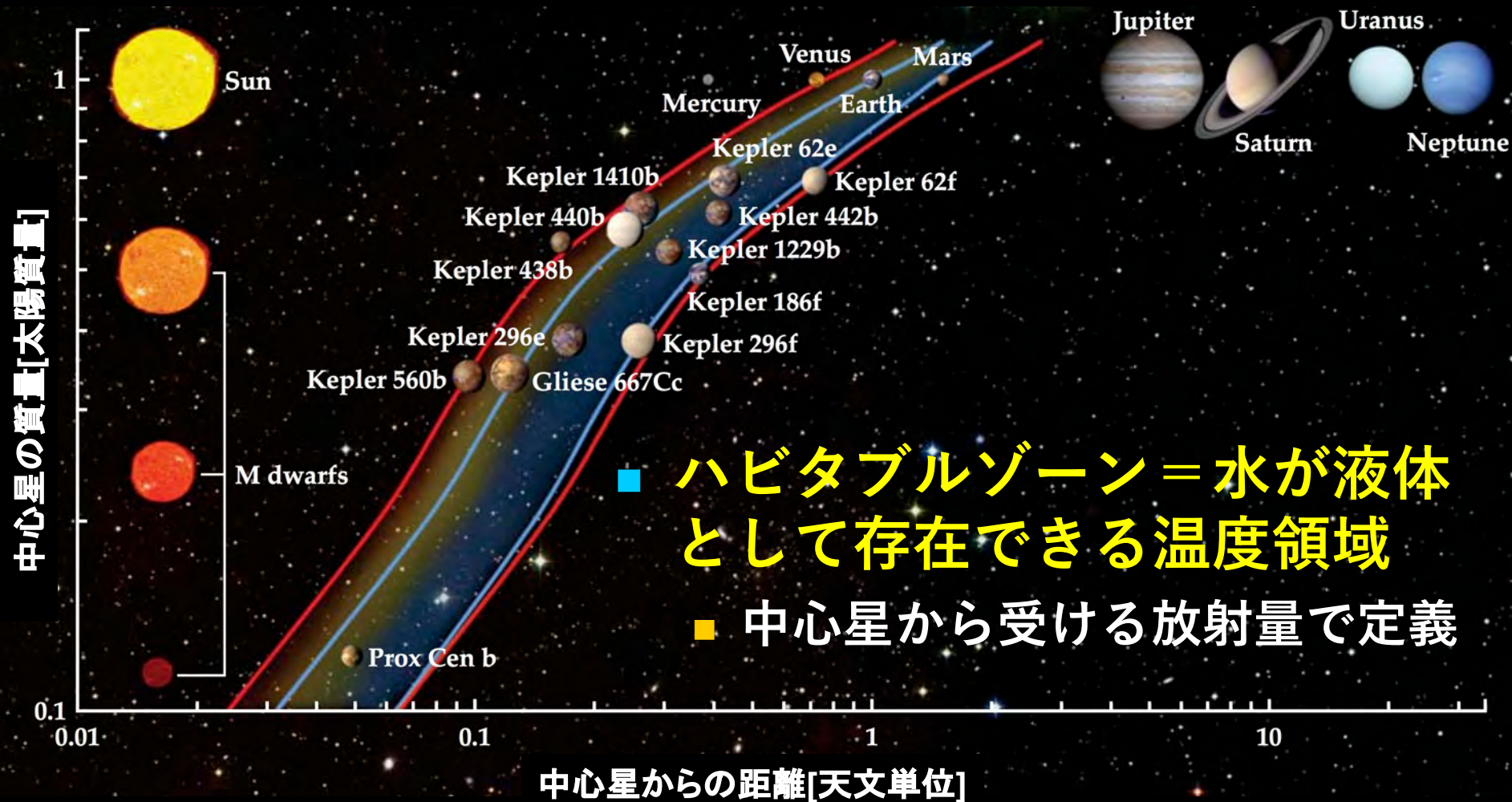
- 惑星系はフツーに存在する
 - 太陽と似た恒星の7割以上が惑星を持ち、2割以上は複数の惑星を持つと推定されている
- 太陽系と似た系もちょーかけ離れた系も存在
 - 恒星を数日で公転する巨大ガス惑星（ホットジュピター）
 - 大きな離心率の惑星（エキセントリック プラネット）
 - 地球程度の岩石惑星（スーパーアース）
 - 水が液体として存在できる温度のハビタブル惑星
- 普遍性と多様性の起源と進化⇒物理学
- 我々の地球以外に生命が存在するか？⇒宇宙生物学

3 宇宙は「地球」で満ちている

There's hundreds of billions of stars in the Galaxy. You've looked at only a handful. Wouldn't you say it's a little premature to give up? You've done one-billionth of the problem. Probably much less than that, if you consider other frequencies

— Carl Sagan, “Contact”

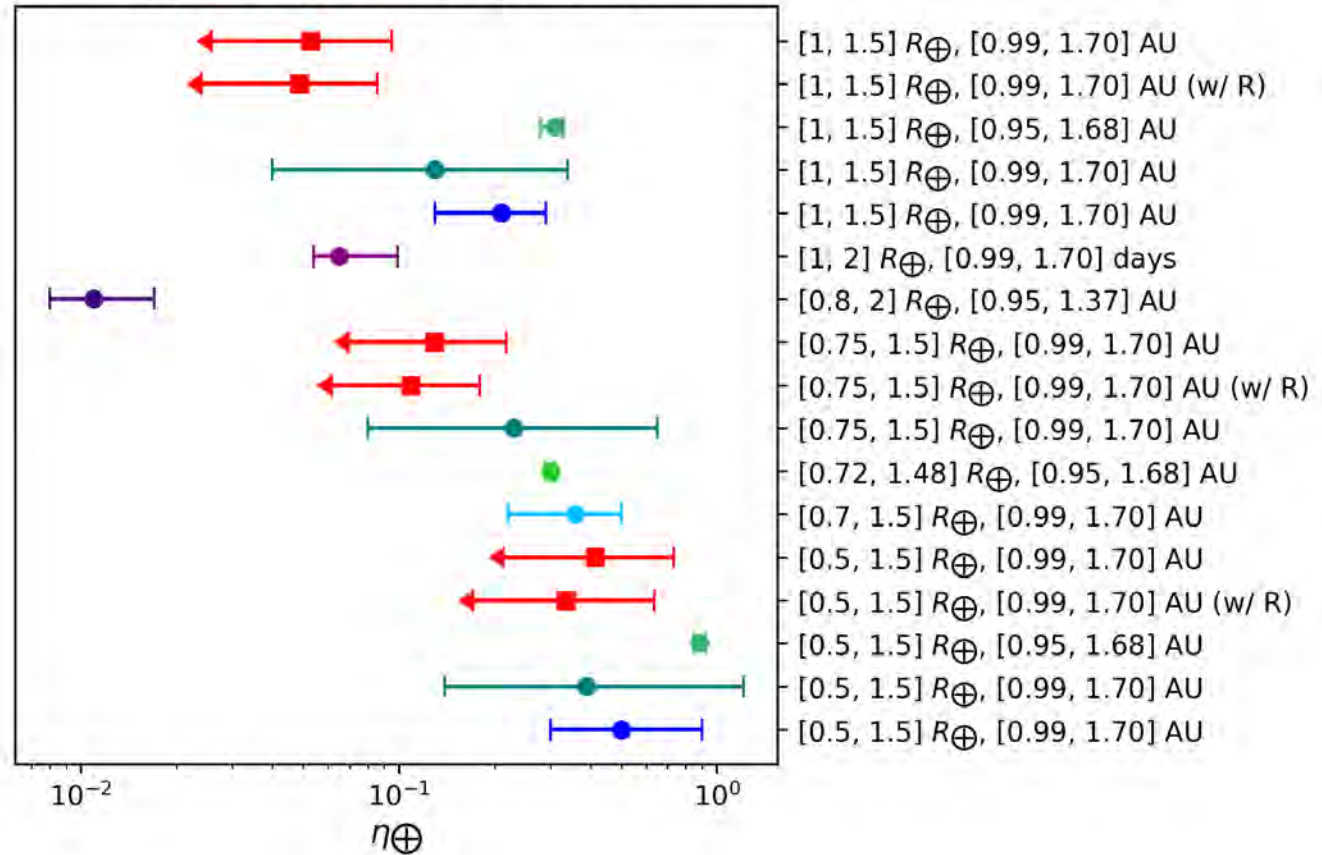
ハビタブル惑星候補



ハビタブル“地球”の存在率

Conservative HZ Estimates

- This Work
- Zink & Hansen (2019)
- Garret et al. (2018)
- ExoPAG SAG13
- Mulders et al. (2018)
- Burke et al. (2015)
- Silburt et al. (2015)
- Catanzarite & Shao (2011)



Kunimoto and Matthews, AJ 159, 2020, 248

G 型星 ($5300 < T_{\text{eff}} [\text{K}] < 6000$) 39,173 個
 (惑星 1276 個)の Kepler サンプルより

宇宙は「地球」で満ちている？

- 天の川銀河系内の恒星の数= 10^{11} 個
 - その10%の 10^{10} 個が太陽と似た恒星（G型星）
 - さらにG型星の10%がハビタブル惑星を持つと仮定
- 天の川銀河系内のハビタブル惑星の数= 10^9 個
 - 観測できる範囲の宇宙内の銀河の数= 10^{11} 個
- 宇宙内のハビタブル惑星の数= 10^{20} 個
 - ハビタブル惑星に生命が存在する保証は全くない
 - 本当に生命を宿すための条件は未だ知られていない（適度な割合の海と陸＋偶然？）
 - しかしこのなかで「この地球」だけが生命をもつと考える方がはるかに不自然では？

宇宙における生命探査

- 30年前まではSFでしかなかった
 - 科学者ではない一般人がむしろ強い興味をもつ
- 今では科学の一分野として認められつつある
 - サンプルリターン（小天体、火星、木星の衛星に直接探査機を送る）
 - リモートセンシング（遠方の太陽系外惑星を望遠鏡で観測）
 - SETI（地球外知的文明からの信号を検出）
- 人類の究極の科学目標であることは確実
 - ただし少なくとも今後10年から100年は必要

4 宇宙植物学と火星

the origin of life now seemed to be so easy--and there were so many planetary systems, so many worlds and so many billions of years available for biological evolution--that it was hard to believe the Galaxy was not teeming with life and intelligence

— Carl Sagan, "Contact"

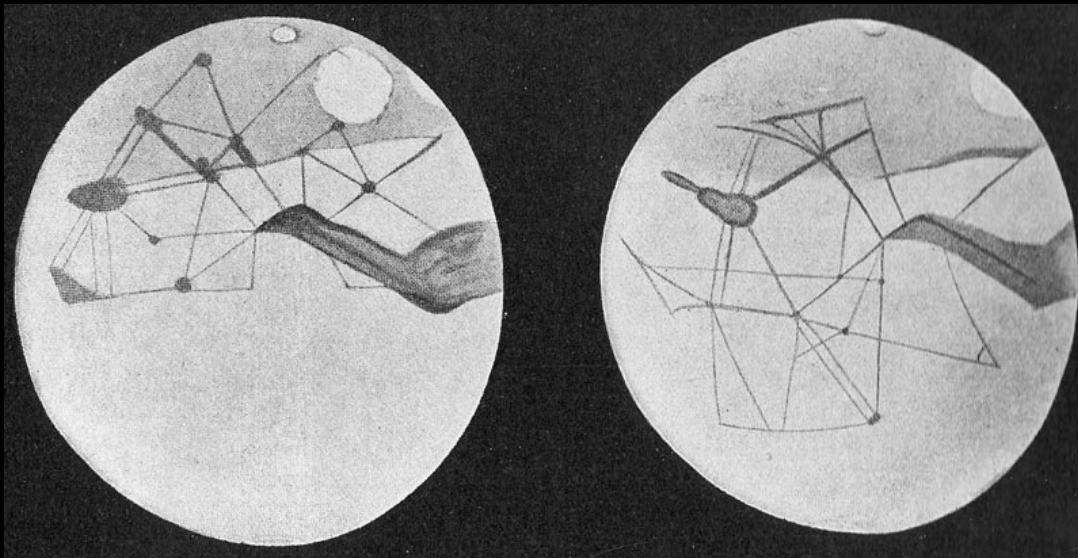
火星に生物はいるか？

- 1895年 P.L.ローウェル 火星人の存在を主張（大富豪であり、私財でローウェル天文台を設立）
- 1897年 H.G.ウェルズ SF小説『宇宙戦争』
- 1914年 G.A.Tikhov 宇宙から見た地球はレイリー散乱のためにpale-blueに見えることを示唆
- 1924年 スライファース（ローウェル天文台長）
 - 火星の表面にクロロフィルがある証拠は見出せなかった
- 1938年 オーソン・ウェルズ 『宇宙戦争』
- 1945年 G.A.Tikhov 火星表面上の植物探査、地上の植物の反射スペクトルを研究、astrobotanyと呼ぶ
- 1957年 W.シントン 火星の赤外線観測より植物の存在を主張

Life on Mars ?

■ Percival L. Lowell

- Came from a very rich family, and founded the Lowell observatory
- *Mars (1895)*, *Mars and Its Canals (1906)*, and *Mars As the Abode of Life (1908)*
- Mars sustained intelligent life forms



Martian canals depicted by Percival Lowell



The War of the Worlds

- 1897 H.G.Wells Science Fiction: The War of the Worlds
- 1938 Orson Welles radio drama: The War of the Worlds by H.G.Wells

October 11, 1938: The New York Times



Astrobotany on Mars

- Gavriil Adrianovich Tikhov (1875-1960)

- Studied earthshine in 1914, and concluded that Earth should be seen as a pale blue dot due to the Rayleigh scattering
- Studied optical properties of terrestrial plants and particularly spectra of plants growing in conditions similar to those of Mars, looking for plants without chlorophyll, or with unusual chlorophyll spectra
- Created the word **astrobotany** in 1945

(D. Briot, J. Schneider, and L. Arnold in *Extrasolar planets : Today and Tomorrow* ASP Conference Series, Vol. 321, 2004)

- 1924 E.C.Slipher and V.N.Slipher at the Lowell Observatory

- Photometric and spectroscopic observations of Mars

- 1957 William M.Sinton

- Evidence of vegetation on Mars

ヴェスト・スライファー

- 遠方の“spiral nebulae”（今で言う銀河）の大半が我々から遠ざかっていることを発見
- ハッブルもルメートルも、スライファーの観測した速度データから宇宙膨張を発見した



“Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars”

PASP 36(1924)261



In the case of *Mars*, of course, we are dealing with the reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

アール・スライファース (弟)

OBSERVATIONS OF MARS IN 1924 MADE AT THE LOWELL OBSERVATORY

I. VISUAL AND PHOTOGRAPHIC OBSERVATIONS OF THE SURFACE

By E. C. SLIPHER **PASP 36(1924)255**

From the long series of observations made here, both visual and photographic, it is strongly evidenced that the dark markings of the planet, except the dark border that accompanies the melting cap, are due to the same cause and obey the same law of change. The seasonal date that these dark markings make their appearance, the rate and behavior in their development, the seasonal date at which they mount to the highest intensity which is the summer solstice and thereafter, their color and appearance, and in turn the time of their fading out again, all obey the law of change that we should expect of vegetation.

William M. Sinton
ApJ 126(1957)231

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME 126

SEPTEMBER 1957

NUMBER 2

SPECTROSCOPIC EVIDENCE FOR VEGETATION ON MARS

WILLIAM M. SINTON

Smithsonian Astrophysical Observatory

Received May 6, 1957

ABSTRACT

A new test for the presence of vegetation on Mars depends on the fact that all organic molecules have absorption bands in the vicinity of $3.4\ \mu$. These bands have been studied in the reflection spectrum of terrestrial plants, and it is found that for most plants a doublet band appears which has a separation of about $0.1\ \mu$ and is centered about $3.46\ \mu$. Spectra of Mars taken during the 1956 opposition indicate the probable presence of this band. This evidence and the well-known seasonal changes of the dark areas make it extremely probable that vegetation in some form is present.

William M. Sinton

ApJ 126(1957)231

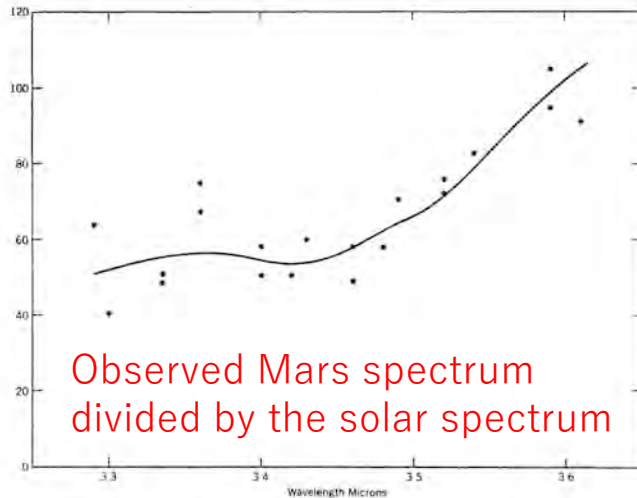


FIG. 3.—Observations of the spectrum of Mars obtained on four nights and after division by the solar spectrum (solid curve of Fig. 2).

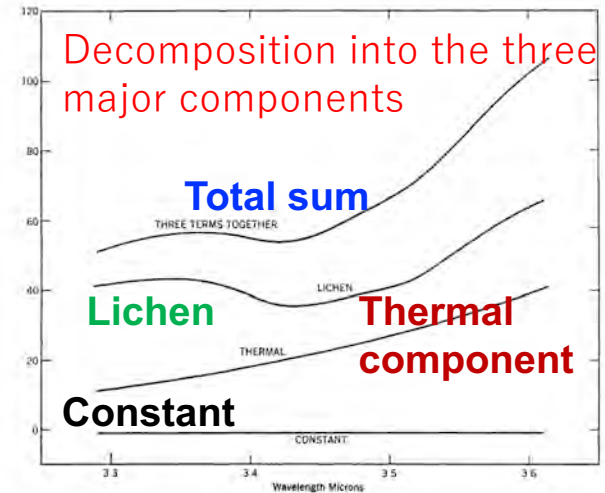


FIG. 4.—Least-squares adjustment of three terms to the observed spectrum. The large "lichen-term" significantly indicates the presence of organic molecules. The constant term, although slightly negative, is not significantly so.

■ Lichen (地衣類)

- 陸上性でごく背の低い光合成生物。その点でコケ植物に共通点があり、多くの言語において同一視され、実際に地衣類の和名の多くに「○○ゴケ」といったものがあたえられている。しかし地衣類の構造を作っているのは菌類



LOWELL OBSERVATORY

BULLETIN No. 103

Vol. IV

No. 15

Bulletin of Lowell Observatory 4(1959)252

FURTHER EVIDENCE OF VEGETATION ON MARS

William M. Sinton

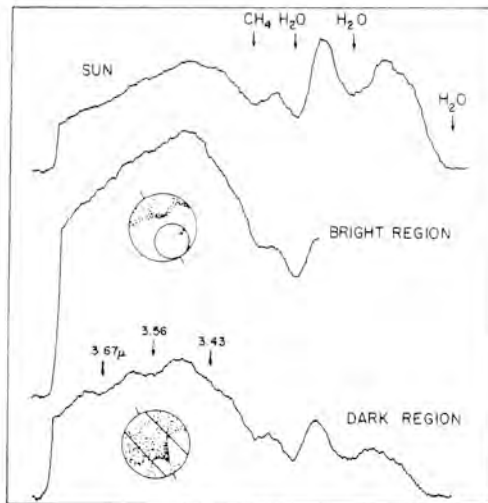


Figure 1. Infrared spectra of Mars and the sun. The upper curve shows the spectrum of the sun with absorptions produced by water and methane in the earth's atmosphere. The middle curve is the spectrum of basalt, the desert region within the circle in the sketch. The bottom curve shows the spectrum of a strip across Mars as shown in the sketch and Labeled by the Major. The last spectrum shows the absorptions supposedly due to organic molecules.

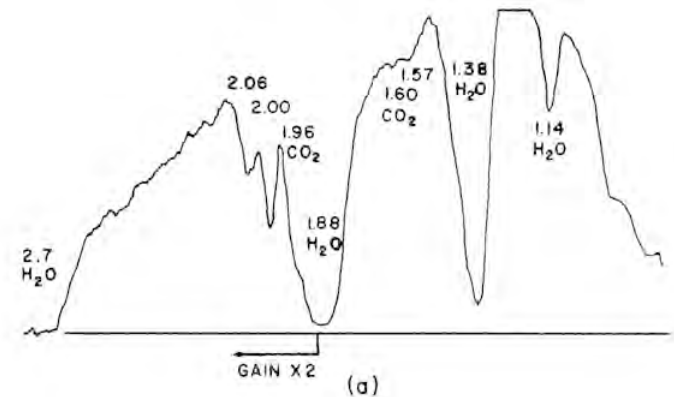
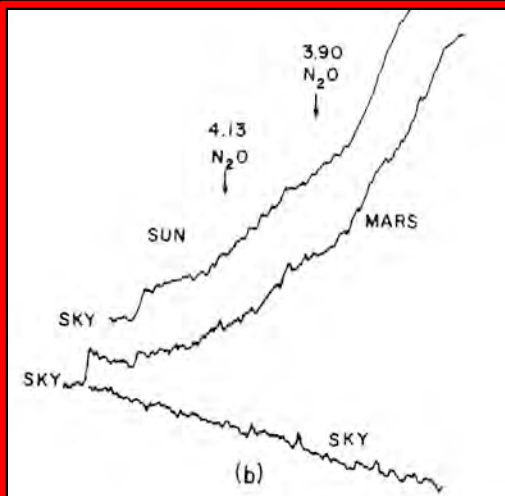
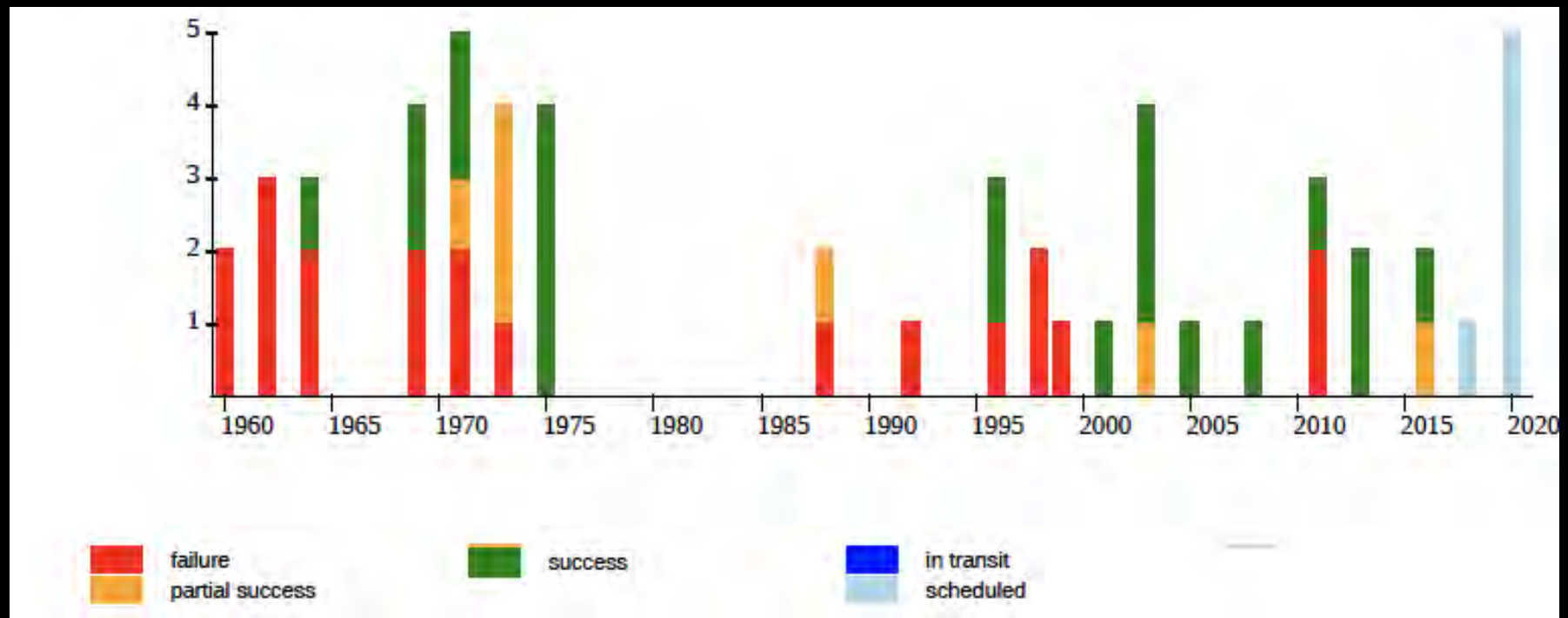


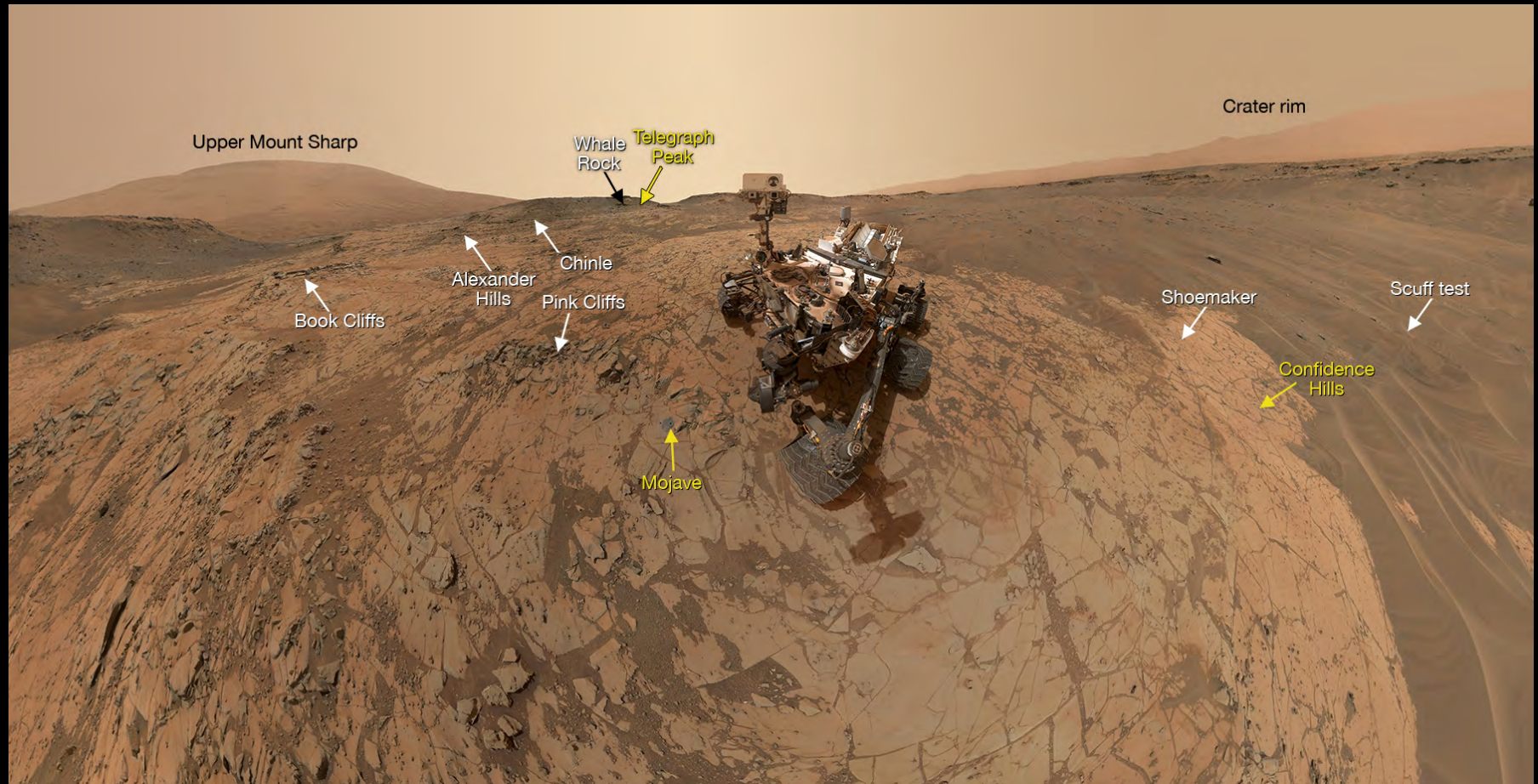
Figure 3. Spectra of Mars in the regions 1 - 2.7 μ (a) and 3.8 - 4.2 μ (b). In (a) the ordinates of the portion of the curve to the left of the 1.88 μ absorption have been amplified by two fold. In (b) the spectrum of the sun is shown for comparison. The lowest curve marked "sky" is to be taken as the zero for the Mars spectrum. The nitrous oxide bands are equally strong in the spectra of the sun and Mars.

火星探査史：火星の呪い

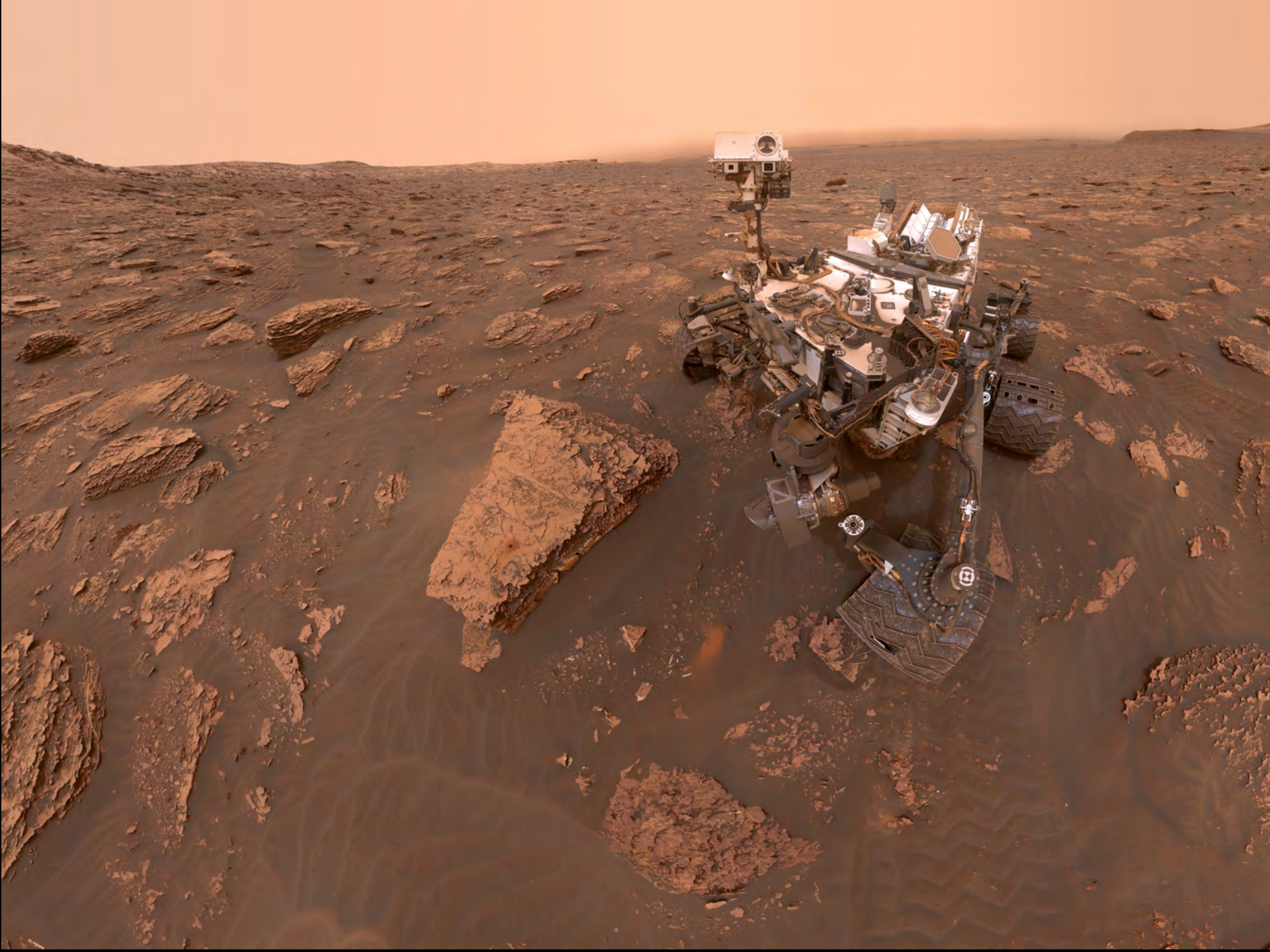
- 1960年代以降、多くの無人探査機が火星をめざした
- 約3分の2が任務完了後・開始前に何らかのトラブル
- 明確な原因が不明なまま失敗したり通信を絶ったものも多く、「火星の呪い」として知られている



火星着陸探査機 キュリオシティ



Curiosity (Mars Science Laboratory) 2011年11月26日 打ち上げ
2012年8月6日 火星軟着陸 <https://mars.jpl.nasa.gov/msl/>



火星の表面

<https://eyes.nasa.gov/curiosity/>

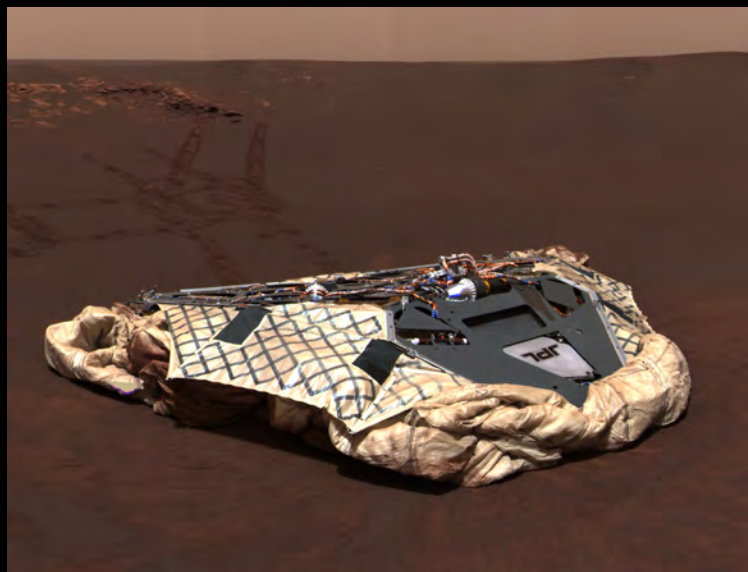




[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Correa-Martians vs. Thunder Child.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Correa-Martians_vs._Thunder_Child.jpg)
Henrique Alvim Corrêa (1876–1910)

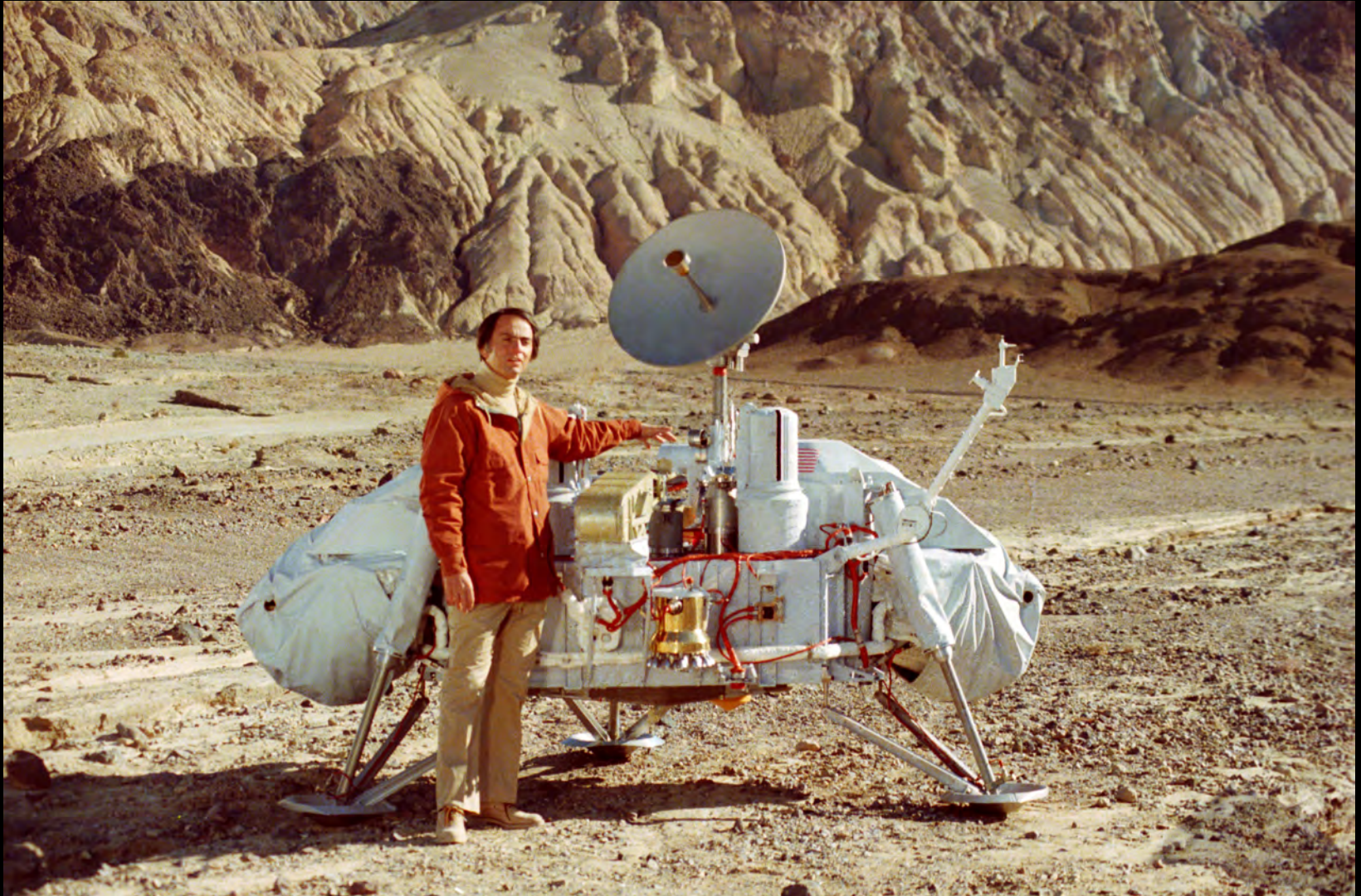
<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA19912>





カール・セーガンとバイキング1号のランダー模型

この写真を見ると、火星表面の写真もまた地球のどこかで撮影されたのではないかという疑惑を与えてしまうほど、火星は地球と似ている



火星と地球は似過ぎている！



アイオリス山(標高5500m) 2015年9月



チコ山（標高5150m）とオナール山（標高5400m） 2003年



アイオリス山麓の盆地 2015年10月



アスペロ山（標高5262m） 2002年2月

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA19912>

土居守・河野孝太郎氏撮影

<https://mars.nasa.gov/resources/7505/strata-at-base-of-mount-sharp/>

5 リモートセンシング

-わが地球の観測-

Adolf Hitler! It makes me furious. Forty million people die to defeat that megalomaniac, and he's the star of the first broadcast to another civilization? He's representing us. And them. It's that madman's dream come true

— Carl Sagan, “Contact”

カール・セーガン (1934-1996)

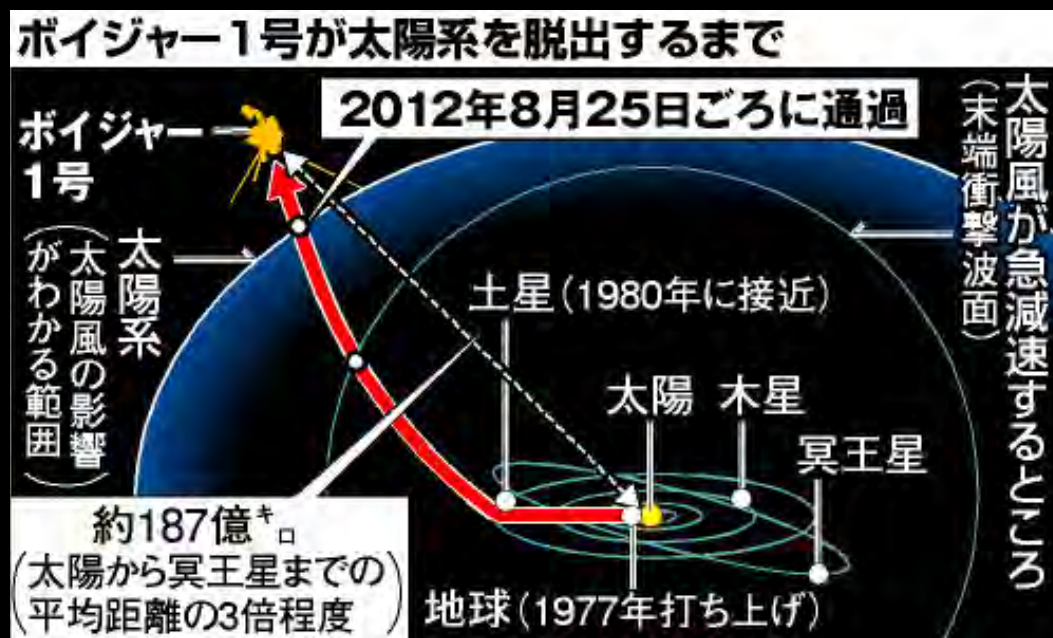
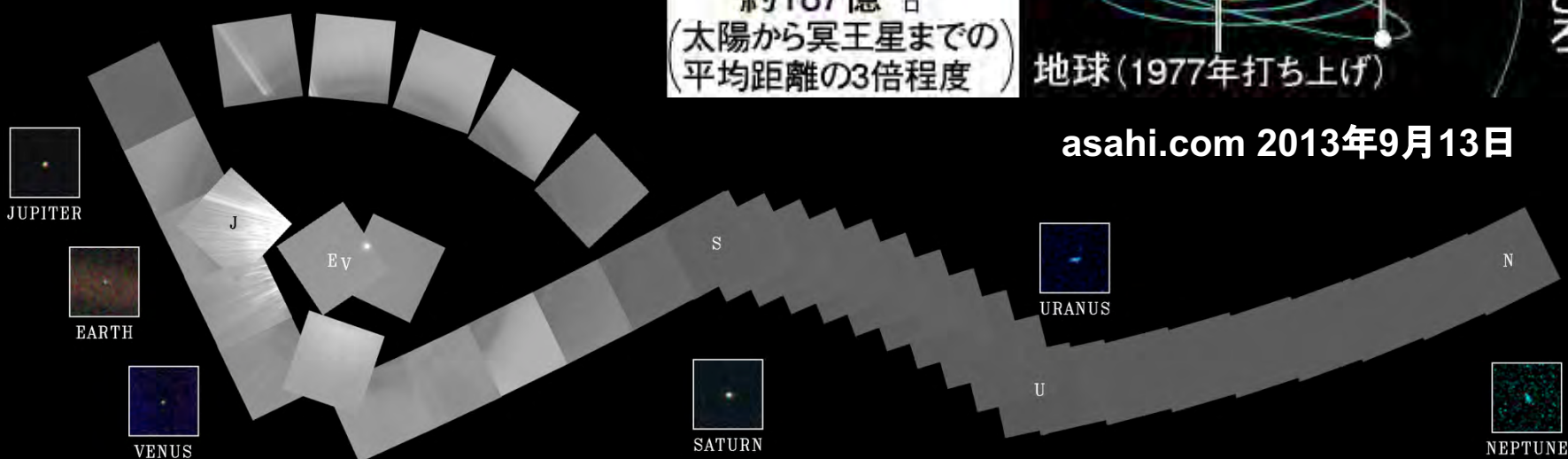


- 米国の惑星科学者
 - NASAの惑星探査プロジェクトの多くを主導
 - 「核の冬」、「われわれは星くずからできた星の子供」など多くの言葉を残し、社会に大きな影響を与えた
 - TVシリーズコスモス(1980)
 - 映画コンタクト(1997)
 - 「地球人だけじゃこの広い宇宙がもったいない」 “The universe is a pretty big place. If it's just us, seems like an awful waste of space”

ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

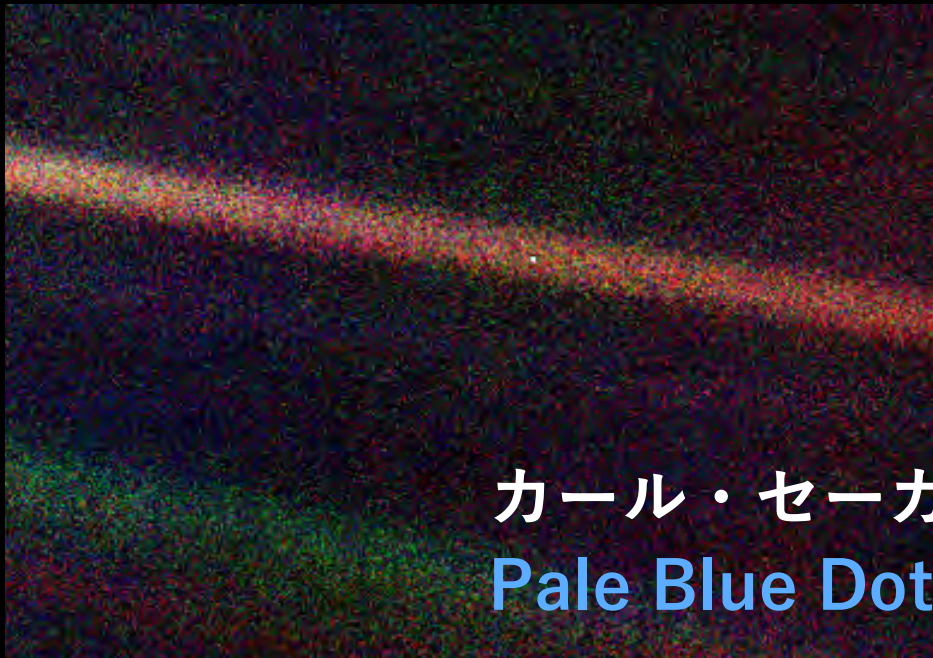
■ 1990年2月14日
@40AU

■ カール・セーガンが地球の画像を **Pale Blue Dot** と命名

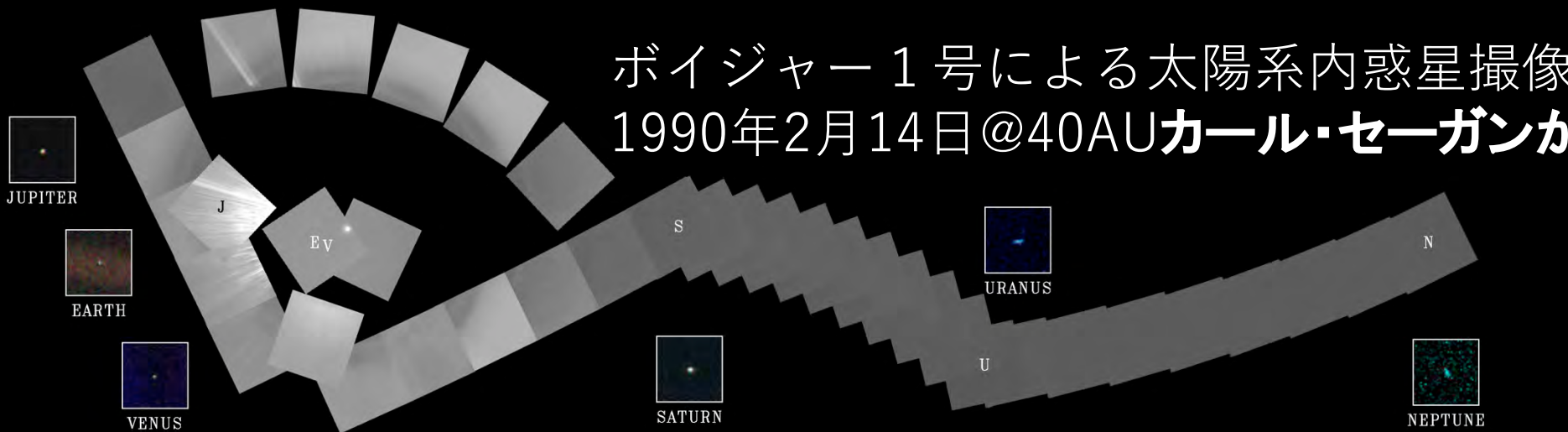
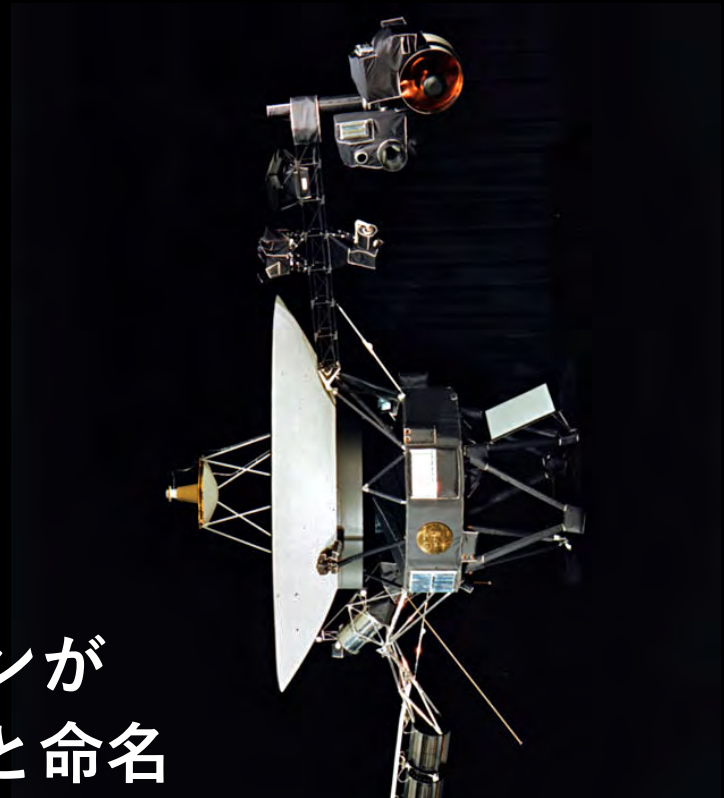


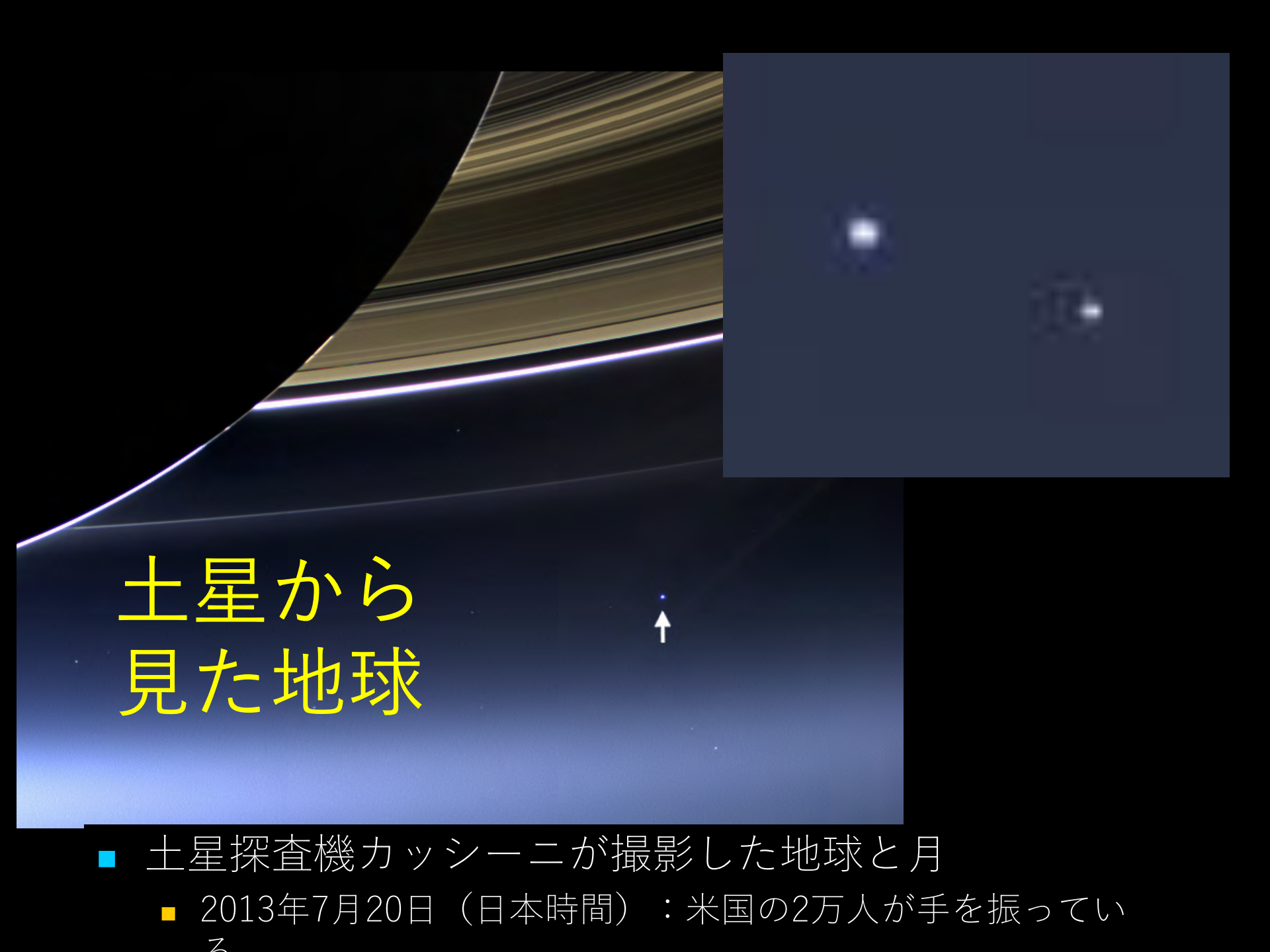
asahi.com 2013年9月13日

ペイル・ブルー・ドット



カール・セーガンが
Pale Blue Dot と命名



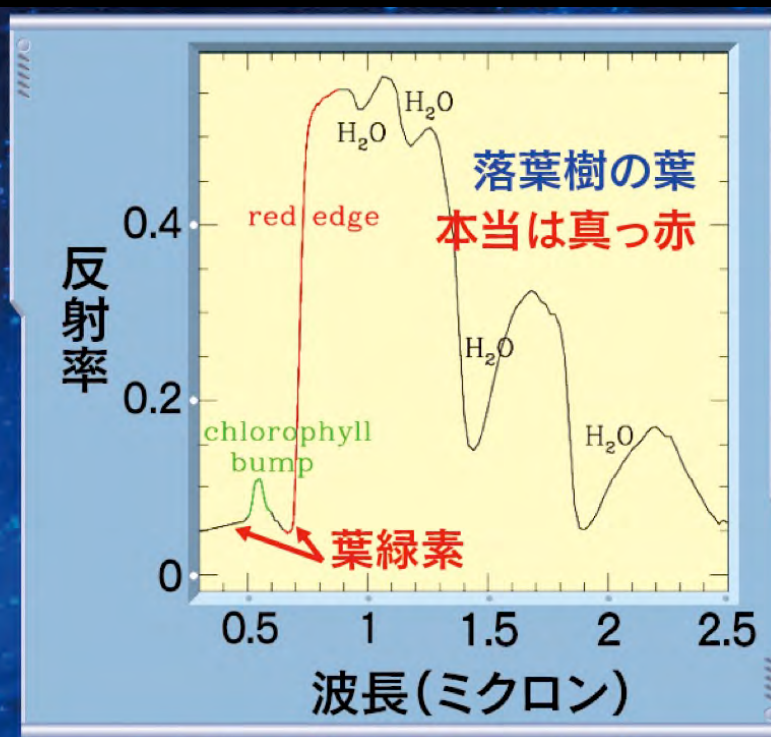
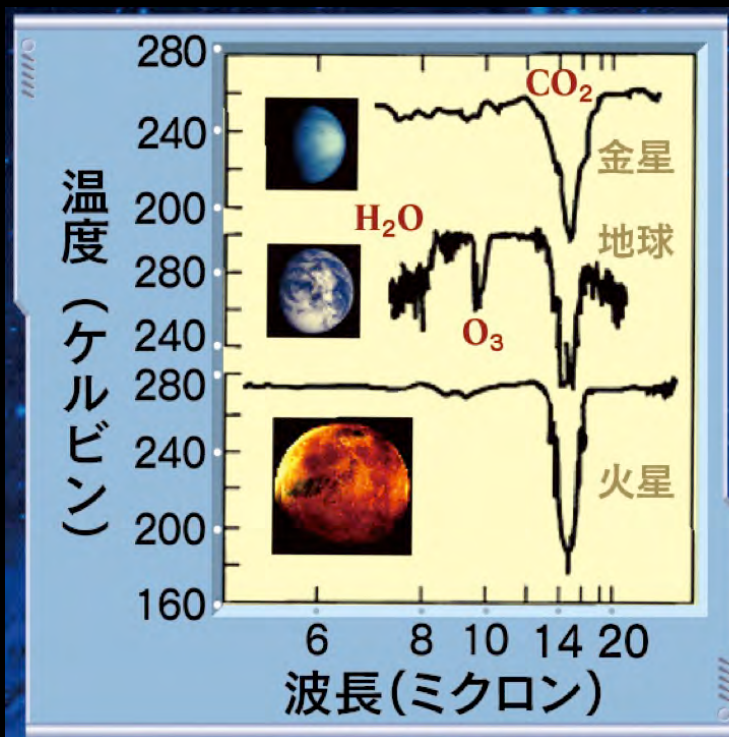


土星から 見た地球

- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
 - 2013年7月20日（日本時間）：米国の2万人が手を振っている

バイオシグニチャー：生物が存在する兆候

- 何を見れば生命があると考えられるのか？
 - 生物由来の大気成分（酸素、オゾン、メタン）
 - 植物のレッドエッジ (astrobotany)
 - 知的生命体からの電磁波
- 天文学観測(リモートセンシング)が唯一の手段



ガリレオ探査機による地球上の生命探査

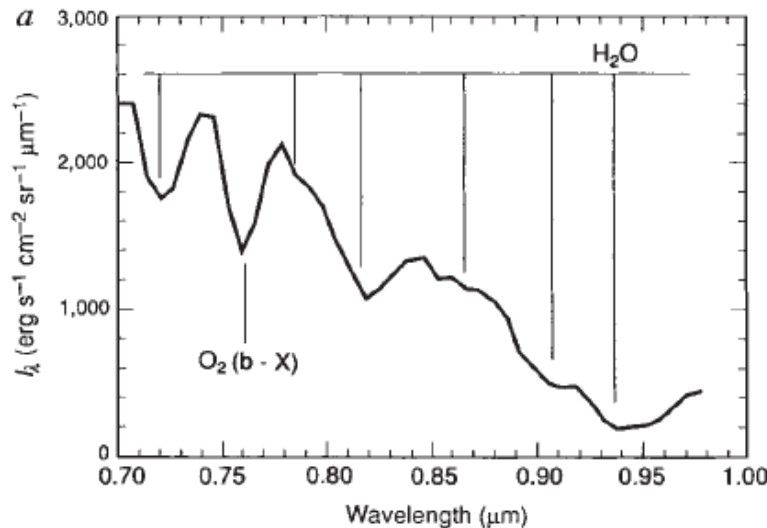
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- 地球には生命がいるらしい!
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する”不自然な”パルス状電波(通信信号)



Sagan, Thompson,
Carlson, Gurnett &
Hord: Nature
365(1993)715

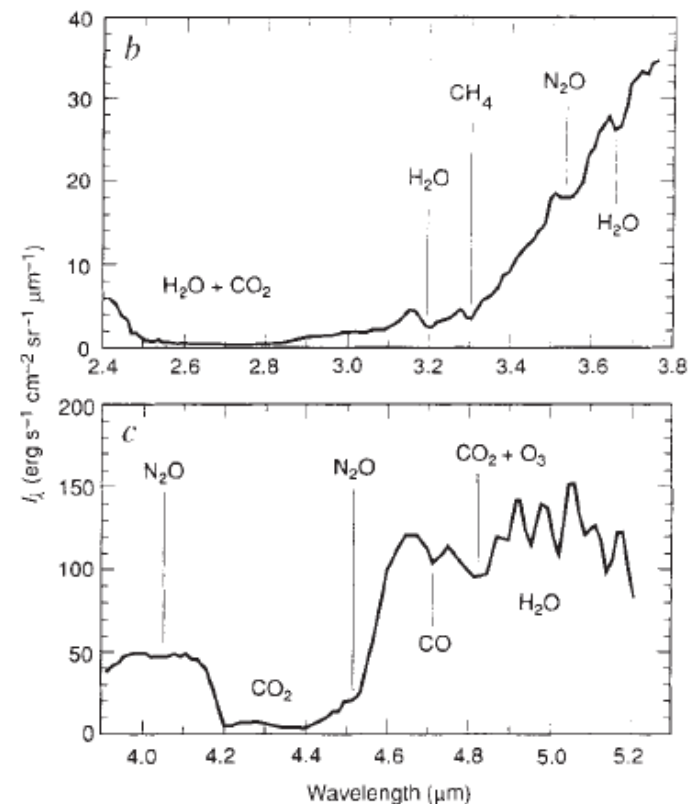
Sagan et al. (1993): 大気分光

ガリレオ探査機の観測した地球の可視光-近赤外スペクトル



酸素分子の吸収@Aバンド (0.76μm)

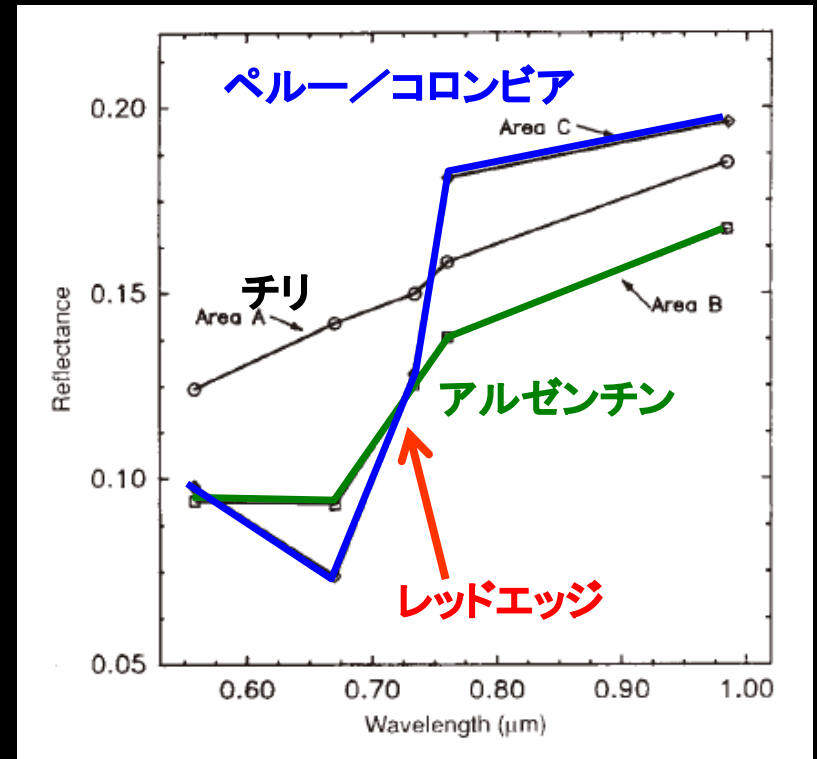
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a uniformly cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b'\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ O-O band of O₂ at 0.76 μm is evident, along with a number of H₂O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O₂ vertical column density of 1.5 km-amagat $\pm$ 25%. b and c, Infrared spectra of the Earth in the 2.4–5.2 μm region. The strong ν_3 CO₂ band is seen at the 4.3 μm , and water vapour bands are found, but not indicated, in the 3.0 μm region. The ν_3 band of nitrous oxide, N₂O, is apparent at the edge of the CO₂ band near 4.5 μm , and N₂O combination bands are also seen near 4.0 μm . The



methane (0010) vibrational transition is evident at 3.31 μm . A crude estimate¹⁰ of the CH₄ and N₂O column abundances is, for both species, of the order of 1 cm-amagat ($\equiv$ 1 cm path at STP).

Sagan et al. (1993): 撮像

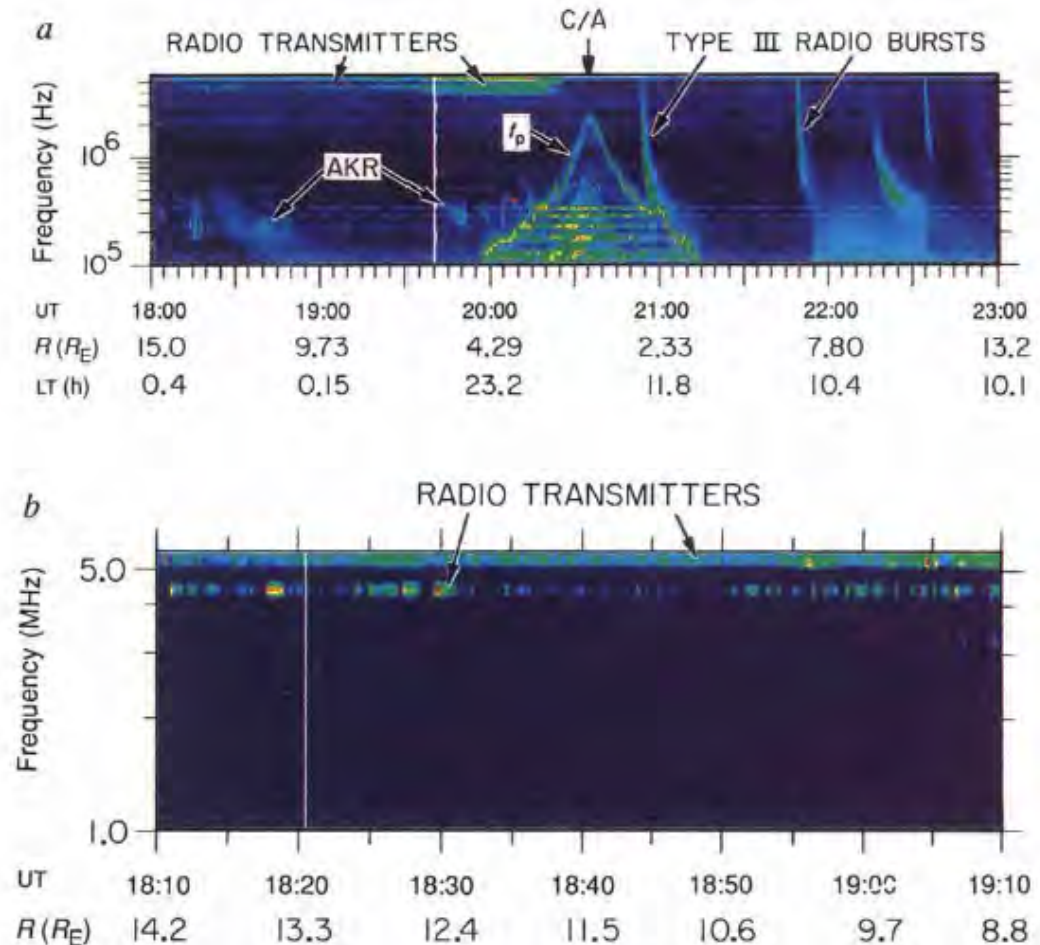
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



Sagan et al. (1993): 電波観測

ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

FIG. 4 A frequency–time spectrogram of the radio signals detected by the Galileo plasma wave instrument. The intensities are coded in the sequence blue–green–yellow–red, with blue lowest and red highest. Several natural sources of radio emission are shown in *a*, including auroral kilometric radiation (AKR). Modulated emission at $f > 4$ MHz is shown with an expanded time scale in *b*. Modulated patterns of this type are characteristic of the transmission of information, and would be highly unusual for a naturally occurring radio source. (UT, universal time; R is distance of Galileo from Earth in units of Earth's radius, R_E ; LT, local time.)



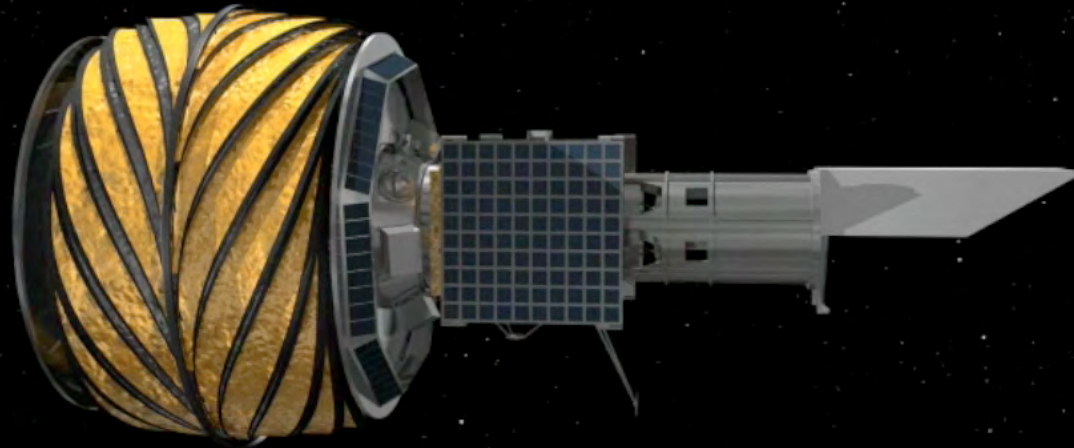
6 リモートセンシング

-第二の地球の模擬観測-

*This is the first time when
anybody's been able to look for
extraterrestrial intelligence*

— *Carl Sagan “Contact”*

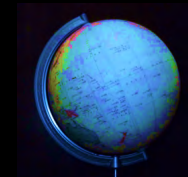
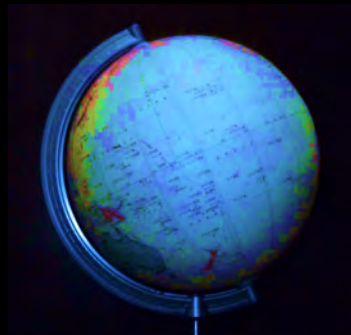
Starshade project : 地球型惑星を直接見る



- 宇宙望遠鏡の5万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおき惑星を直接撮像（プリンストン大学 J.Kasdinらのグループ）

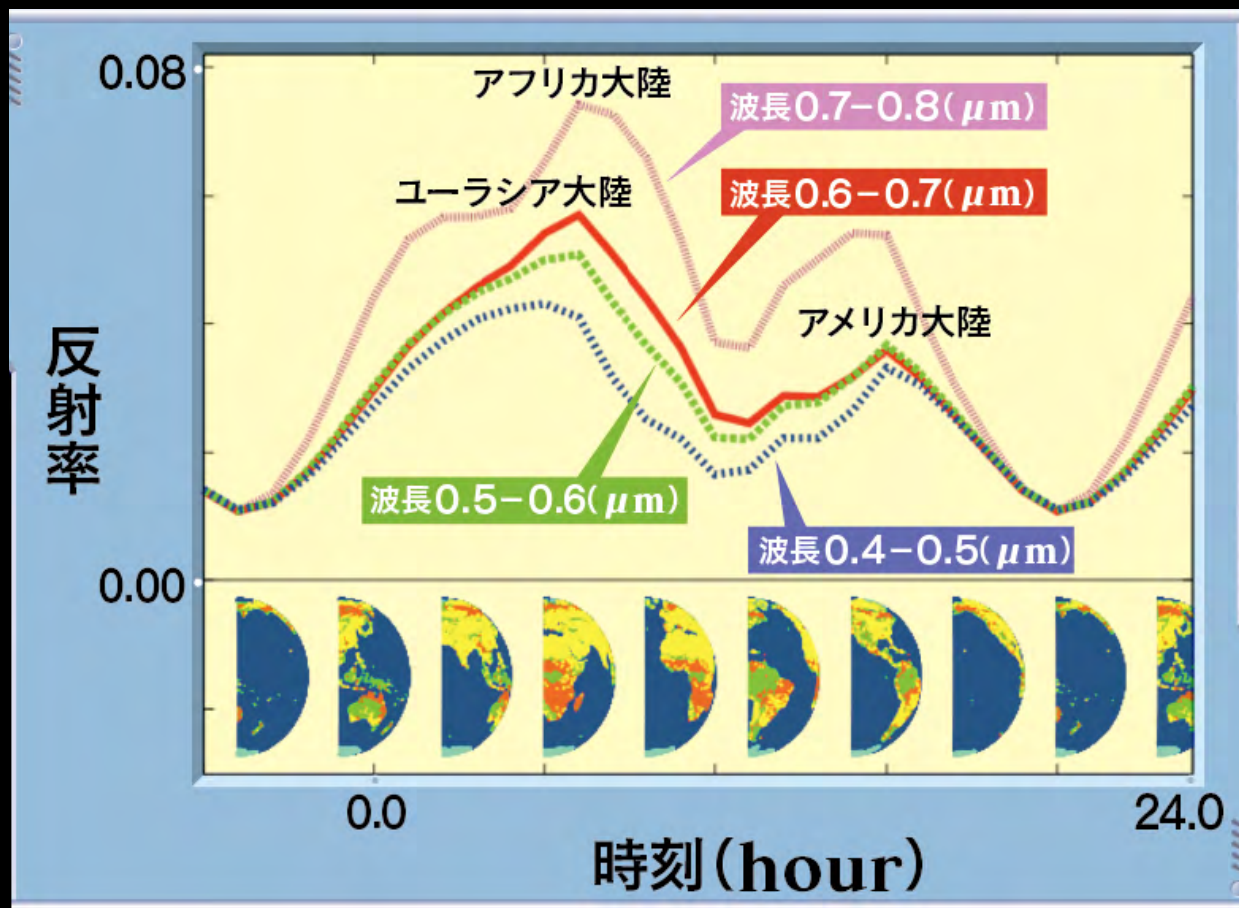
ペイルブルードットを超えて

- 系外惑星は「点＝ドット」としか見えない
- 表面を直接分解する解像度はない
- 自転周期による微妙な色の変化は観測可能



もうひとつの地球の色

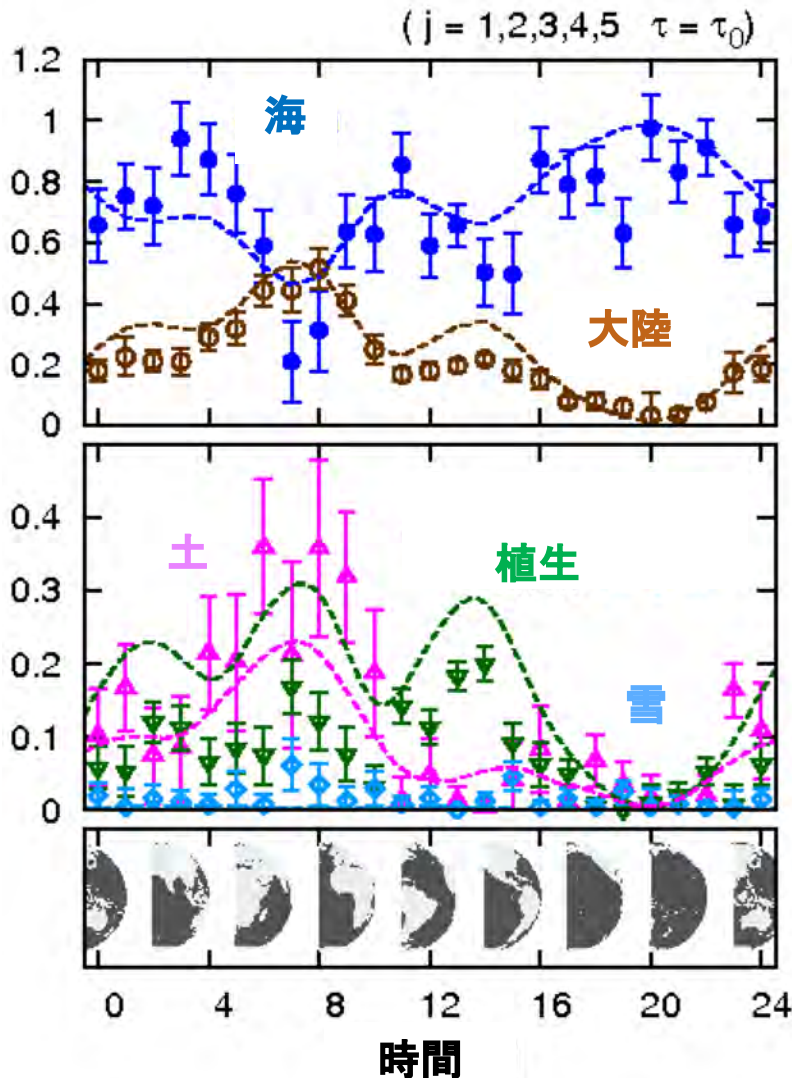
- 自転にともなう地球の反射光の色の時間変化のシミュレーション



藤井友香+(2010)

もう一つの地球の色を解読する

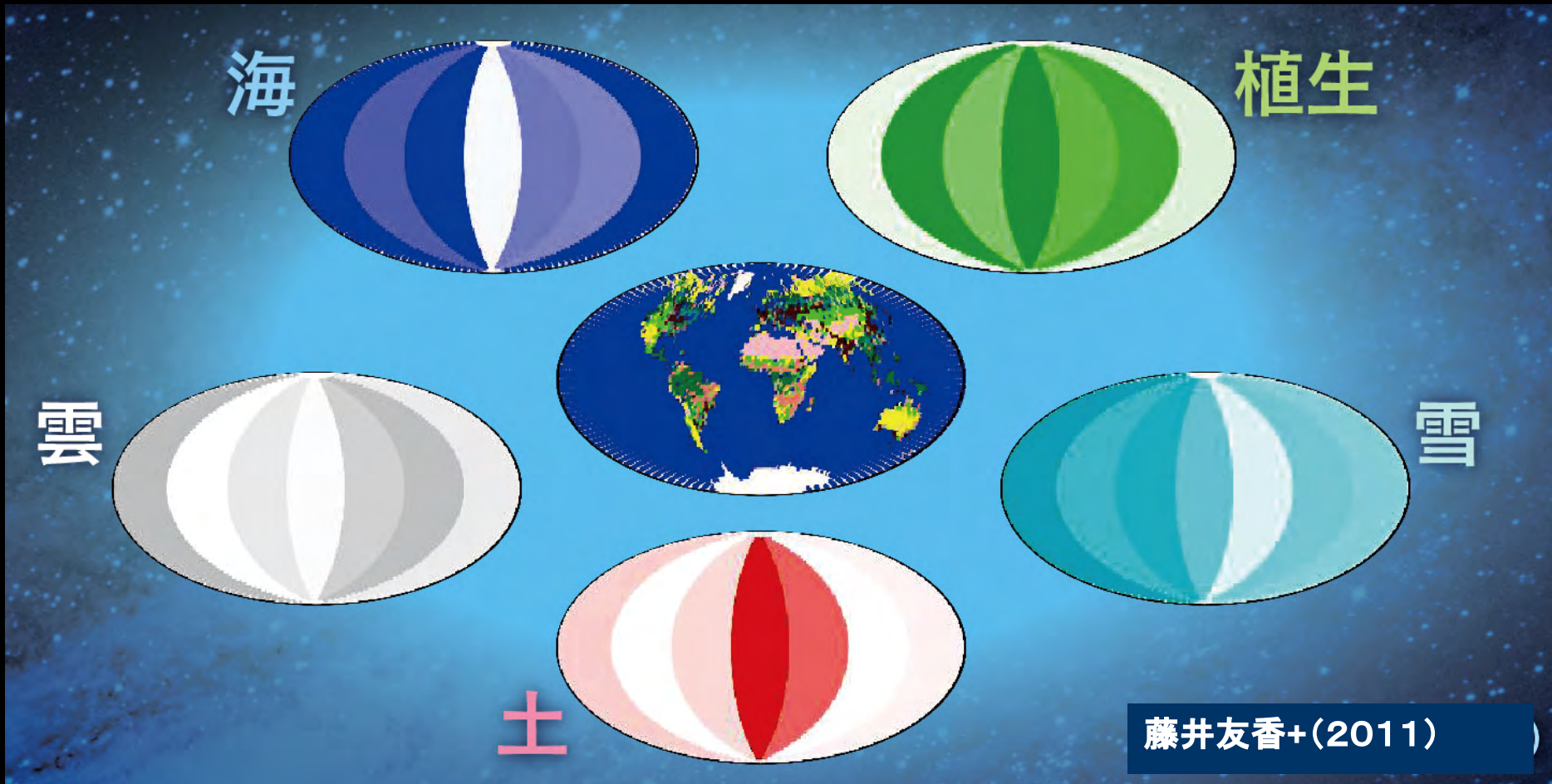
(重みつき) 表面積比



藤井友香+(2010)

- 雲は無視
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 30光年先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 雲がなければ、海や植物の存在が検出可能！
 - 雲を考慮した計算では、海や雲は検出できるが、植物の検出までは難しいという結論

地球測光観測データから推定された地 表面成分の経度分布地図



藤井友香+(2011)

系外惑星上の植物の色を予想する

古いM型星



若いM型星



G型星



F型星



日経サイエンス2008年7月号
Nancy Y. Kiang

7 知的文明探查

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

We're just beginning SETI. You know how many possibilities there are. This is the time to leave every option open. This is the time to be optimistic.

— Carl Sagan, "Contact"

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- バイオシグニチャーとして最も決定的なのは知的文明からの電磁波信号
 - 1GHzから20GHzの電波が適している（低周波数は銀河系のシンクロトロン放射、高周波数は地球大気が雑音となるため）
- オズマ計画 (1960)
 - フランク・ドレイクは、4ヶ月間にわたり毎日6時間、口径26mの電波望遠鏡を、くじら座タウ星とエリダヌス座イプシロン星の方向に向け、中性水素の放射する波長21cm(周波数1.42GHz)帯に、文明の証拠となりうる規則的な電波信号の探査を試みた

地球外知的文明はあるか？：ドレイクの式

$$N = (N_s / L_s) \times f_p \times n_e \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

銀河系内にあ
る交信可能な
知的文明の数



フランク ドレイク博士

銀河系内の（生命に適した）恒星の数

その恒星の寿命

その恒星が惑星を伴っている確率

その惑星の中で、生物が存在可能な環境にある地球型惑星の期待値

その惑星に生物が発生する確率

その生物が知的生命に進化する確率

その知的生命が他の文明と交信を行う確率

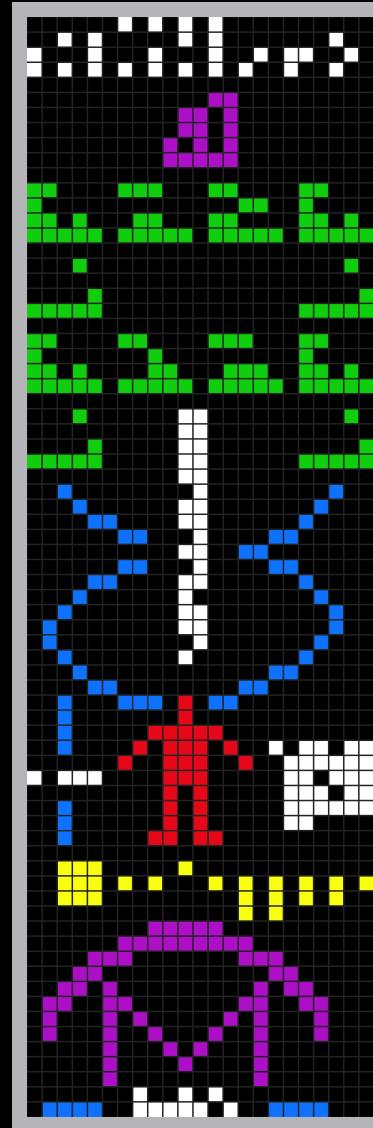
その文明の継続時間

Nの値は良くわかっていない。0.003個（つまり、我々の地球以外には存在し得ない！）と推定する研究者から200万個と推定する研究者までいる。ドレイク博士自身は1万個程度であると考えた。

アレシボ・メッセージ

■ ドレイクは、1974年11月16日にプエルトリコにあるアレシボ電波望遠鏡から、約2万5千光年離れた球状星団M13に向けて電波信号を送った

■ それを解読して並べたとすれば0と1の信号列が右図のようになる



1から10までの数(2進法)

DNAを構成する水素、炭素、窒素、酸素、リンの原子番号(2進法)

DNAのヌクレオチドに含まれる糖と塩基、計12種の化学式

DNAの二重螺旋

人間

太陽系(左端が太陽で、一行上になっているのが地球)

アレシボ電波望遠鏡

可視光SETI

- 100光年先の惑星の住人が地球を狙って100Wのレーザーを発していたら検出可能
 - レーザーポインターは1mW
 - 天文観測の補償光学用のレーザーガイド星は数Wのレーザーを放射してつくっている
 - 機械加工用レーザーは数10kWのものがある
- もちろん今のところ検出されていないが、「もしあちらが我々に向けて発信しているならば」十分検出可能な時代になっている

8 プロキシマ ケンタウリ b



JODIE FOSTER

MATTHEW McCONAUGHEY

Alpha Centauri was a triple system, two suns tightly orbiting one another, and a third, more remote, circling them both.

What would it be like to live on a world with three suns in the sky?

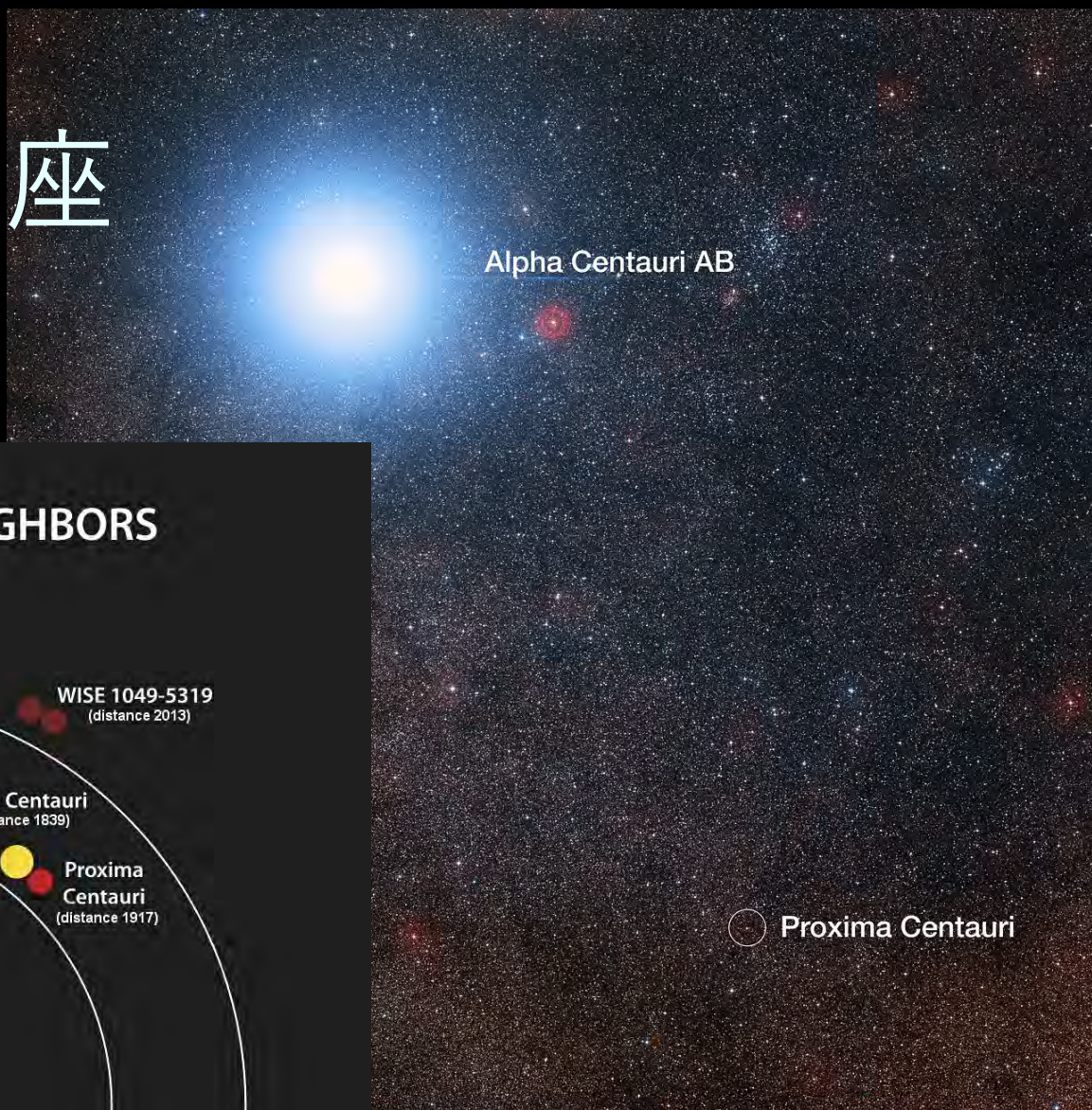
— Carl Sagan, “Contact”

CONTACT

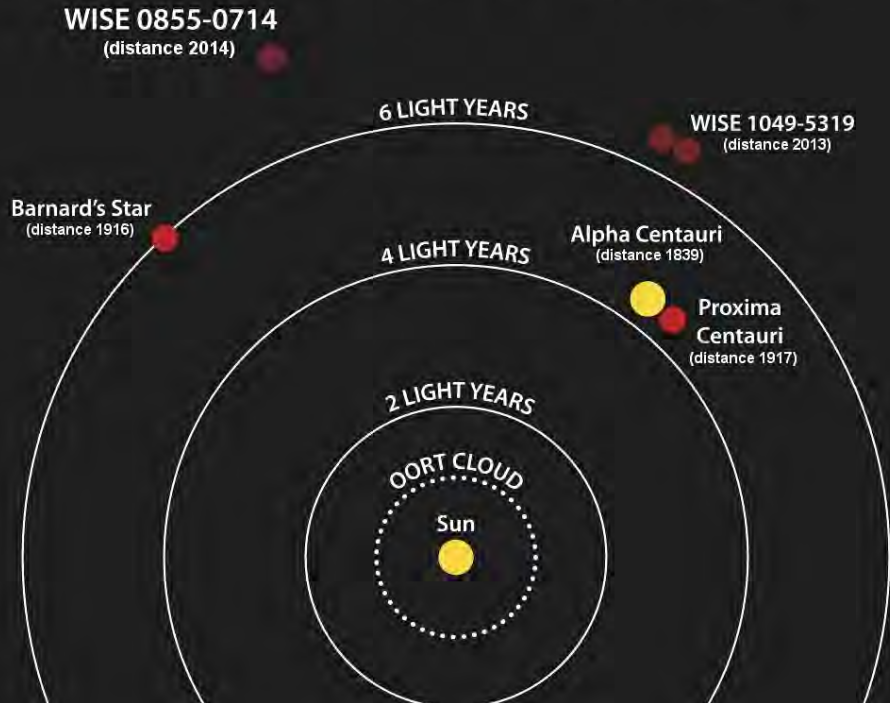


ケンタウルス座

α 星



THE SUN'S CLOSEST NEIGHBORS



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

地球文明の存在を知った三体人

- 高度知的文明は友好的か排他的か
- 光速の1%で航行する宇宙艦隊を地球に派遣
- 400年後に3体艦隊が来ることを知った地球人はどうするか



プロキシマ ケンタウリb

- ケンタウルス座アルファ星は、太陽に最も近い3重連星系で、その一つが α Cen C = プロキシマ ケンタウリ (4 光年先)
- その周りに、水が液体として存在できる可能性のある惑星 (プロキシマ ケンタウリ b) が発見された (2016年8月26日)
- そこへ直接超ミニ探査機を送るスターショット計画が検討されている

Alpha Centauri AB

Proxima Centauri

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

ブレイクスルー イニシャティブ

<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative>

- **IT投資家ユリ・ミルナー**（素粒子理論で学位取得、資産4000億円）が地球外知的生命探査のため、2015年7月20日設立
 - **ブレイクスルーリッスン**：地球外文明の電波あるいはレーザーによる信号を受信
 - **ブレイクスルーメッセージ**：宇宙空間へ送るメッセージとして最適なものを提案するとともにその行為の哲学的倫理的妥当性を検討
 - **ブレイクスルースターショット**：ケンタウルス座アルファ星へ探査機群を送るための概念設計

ブレイクスルースターショット

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

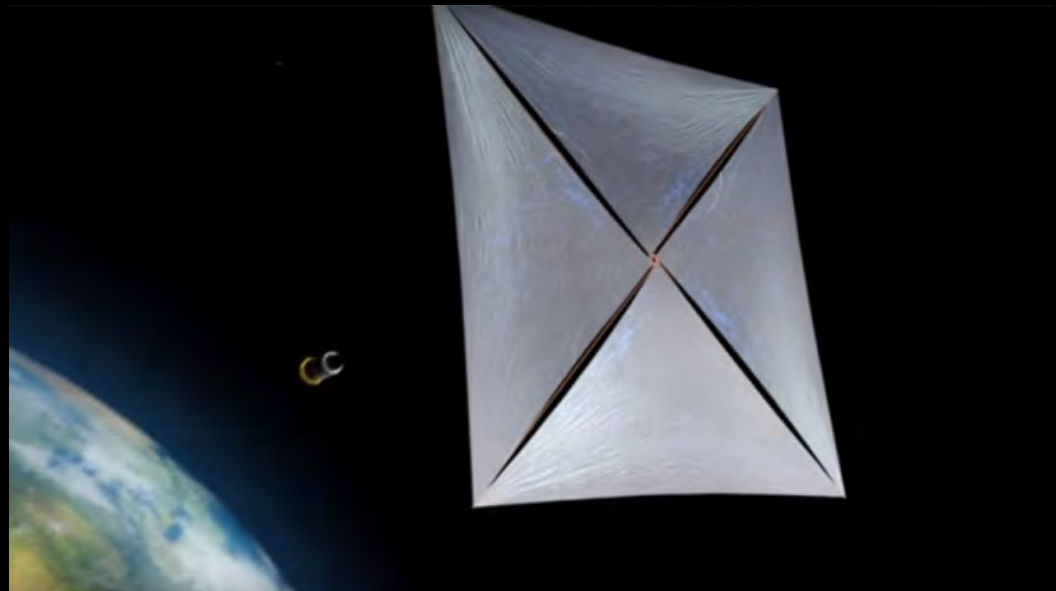
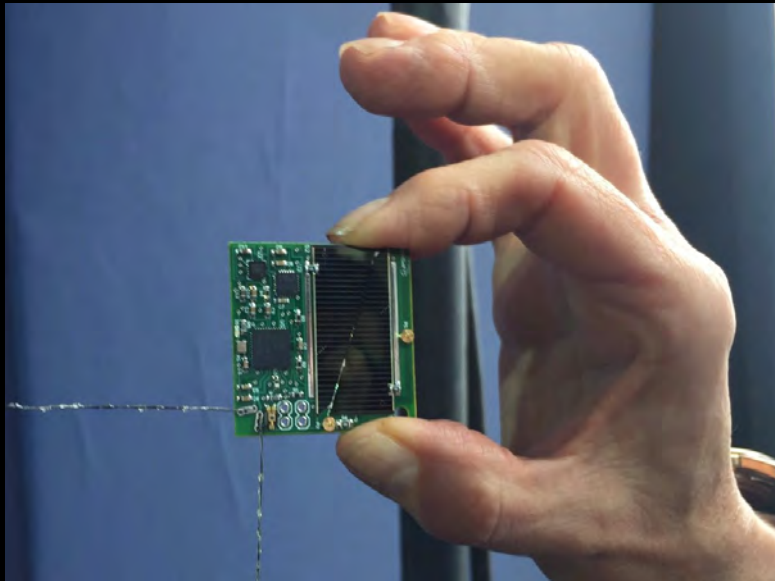
■ スターチップ

- 2cm x 2cm、数グラムで、カメラ、コンピュータ、通信用レーザー、燃料装置を搭載したチップ
- 4m x 4m の帆に結びつけられ、それが地上からのレーザー光を受けて、約10分で光の20%の速度にまで加速される

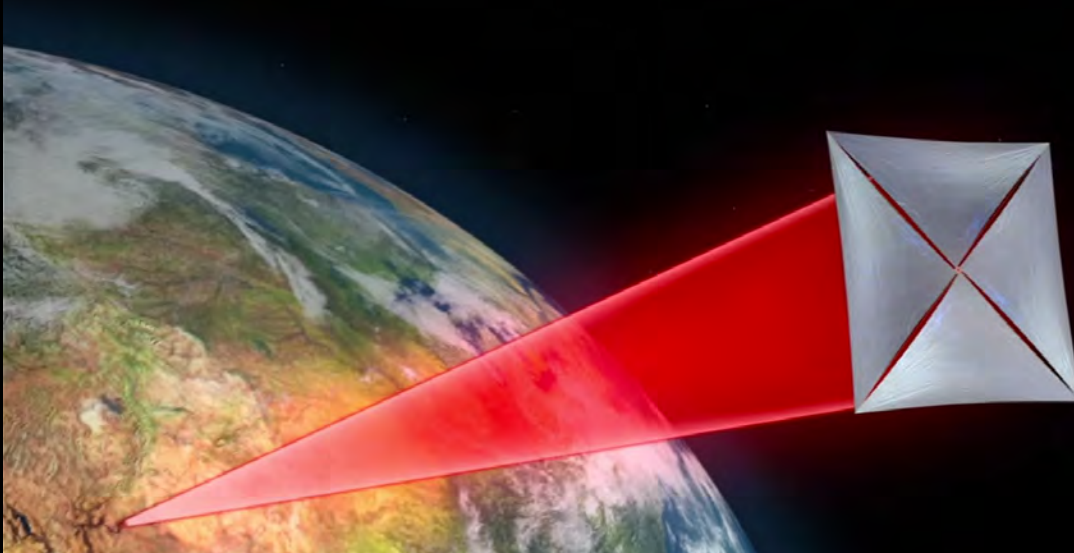
■ プロキシマ ケンタウリに1000個のスターチップを次々と飛ばす。約20年で到着する

■ ただしこの技術はまだ存在しておらず、完成までに少なくとも今後20年の研究開発が必要

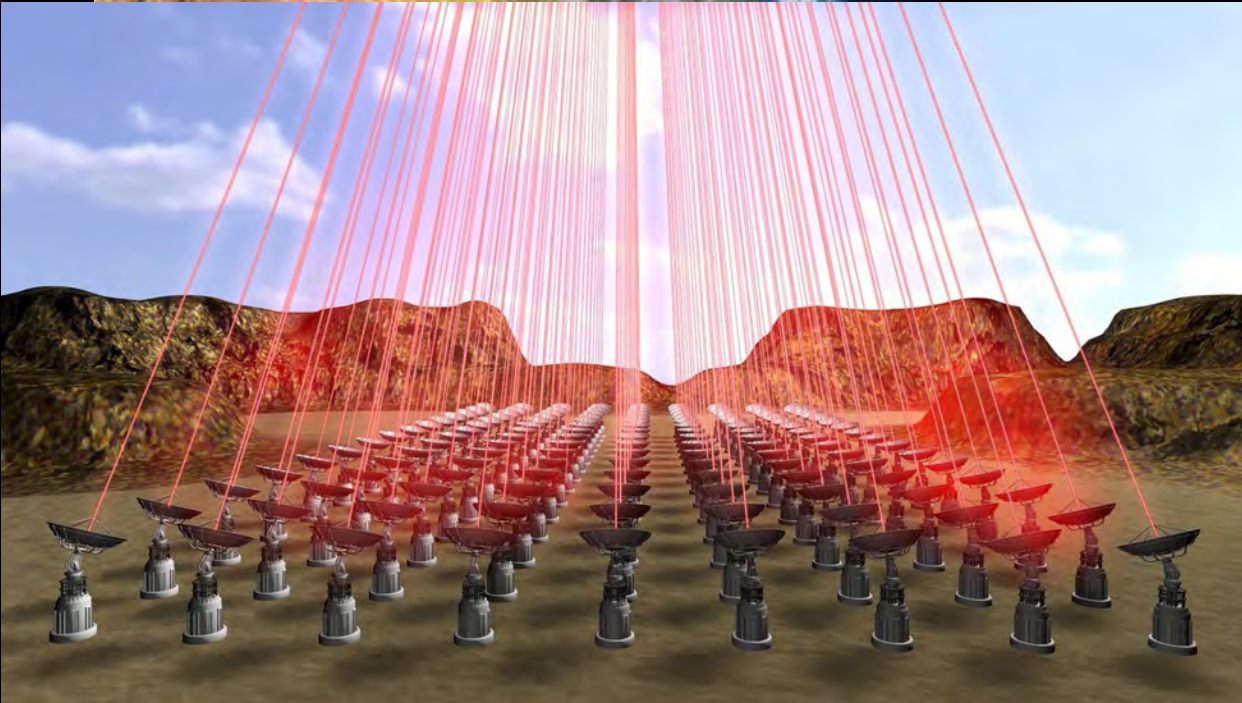
スターチップ



地上のレーザーで光速の20%に加速



- 今から20年後に打ち上げ、さらに20年かけてプロキシマケンタウリに到達しデータを取得。その4年後には地球にデータが届く。そこには何が写っているのか？



9 まとめ

***Everything not forbidden by the laws
of nature is mandatory***

— Carl Sagan “Contact”

天文学から宇宙生物学へ

- **太陽系外惑星研究の革命的進歩**
 - 水が液体として存在し得る地球型惑星
 - プロキシマケンタウリ（4 光年先）
 - 稼働中・計画中の系外惑星探査機がさらなる候補を
 - いずれハビタブル惑星の直接撮像・分光が可能となる
- **その先には宇宙の生命探査という究極の目標が！**
 - リモートセンシングによる検出可能性から考えるバイオシグニチャーの同定（酸素、水、オゾン、メタン、植物、核爆発）
 - ただし最も確実なのは高度文明からの（電磁波）信号
- **本当に受信したときどうするか考慮しておくべき**

Sagan's conclusion

Nobody's guaranteeing success. But can you think of a more important question? Imagine them out there sending us signals, and nobody on Earth is listening. That would be a joke, a travesty. Wouldn't you be ashamed of your civilization if we were able to listen and didn't have the gumption to do it?