

太陽系外惑星の先にある“worlds”

東京大学大学院理学系研究科
物理学専攻・ビッグバン宇宙国際研究センター 須藤 靖

日本物理学会四国支部講演会

2022年8月29日 14:00- @高知大学朝倉キャンパス

今回の話の内容

- 1 太陽系中心世界観
- 2 太陽系外惑星発見史
- 3 ハビタブル惑星
- 4 US decadal survey “Astro2020”
- 5 地球外文明探査
- 6 まとめ

1 太陽系中心世界觀

宇宙 (universe) と 世界 (world)

■ 宇宙=space-time (淮南子)

- 宇=天地四方上下(三次元空間全体)
- 宙=往古来今(過去・現在・未来の時間全体)

■ 世界=時空 (サンスクリット⇒漢語)

- 世=過去・現在・未来の三世(時間)
- 界=東西南北上下(空間)

英語のworlds(複数)には、「生命が存在するかもしれない地球以外の天体」といったニュアンスがあるらしい

私がイメージする(広義の)世界

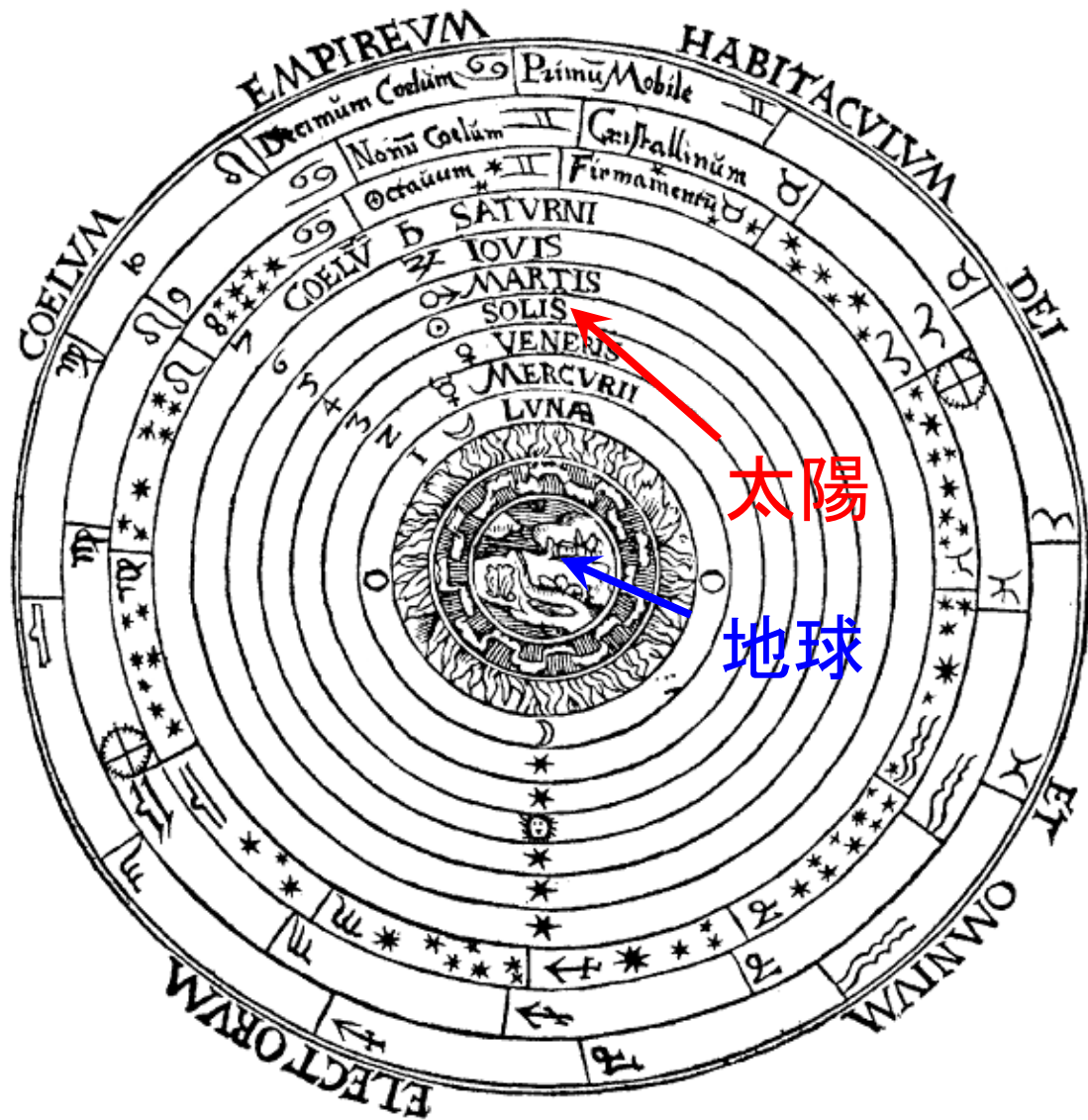


(我々が観測できる)宇宙
our universe



(狭義の)世界=地球=globe

古代ギリシャの世界観

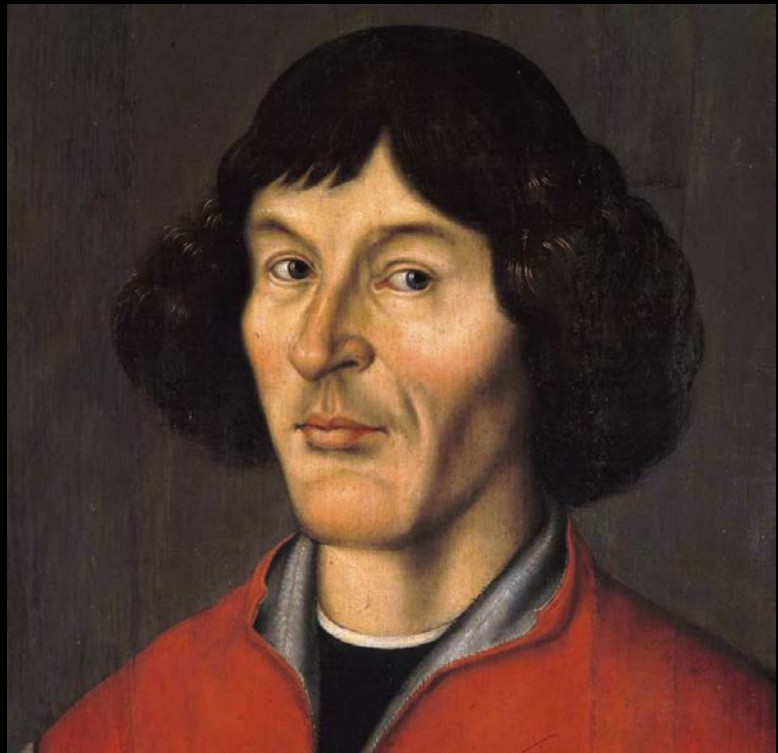


■ プトレマイオス「アルマゲスト」 (紀元150年頃)

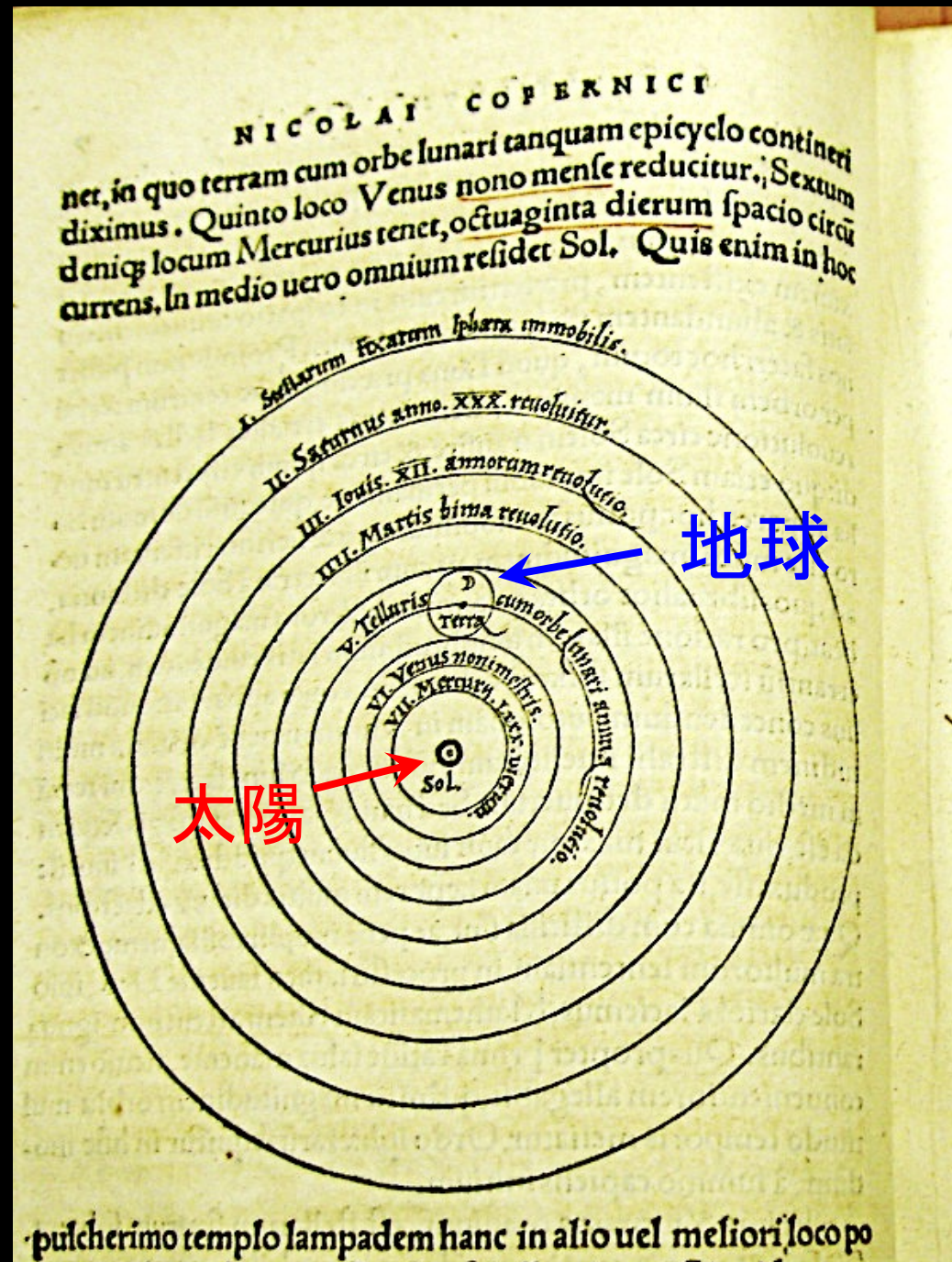
- 古代ギリシャ天文学の集大成
- アリストテレス的宇宙観
- 天動説
- その後10世紀以上にわたって大きな影響を与え続けた

ペトルス・アピアヌス Cosmographia (1539年)
Wikipediaより

ニコラウス・コペルニクス 「天球の回転について」(1543)

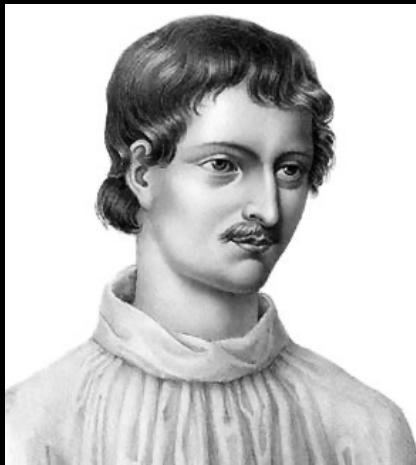


2007年10月24日 日本学術振興会先端拠点形成プログラム
「ダークエネルギーネットワーク」国際会議
@エジンバラ王立天文台の際に特別公開中の図書館で撮影



「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 ∞ のどちらかになりそう
 - 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ほぼ全員公開処刑されている

Bronze relief by Ettore Ferrari (Wikipedia)

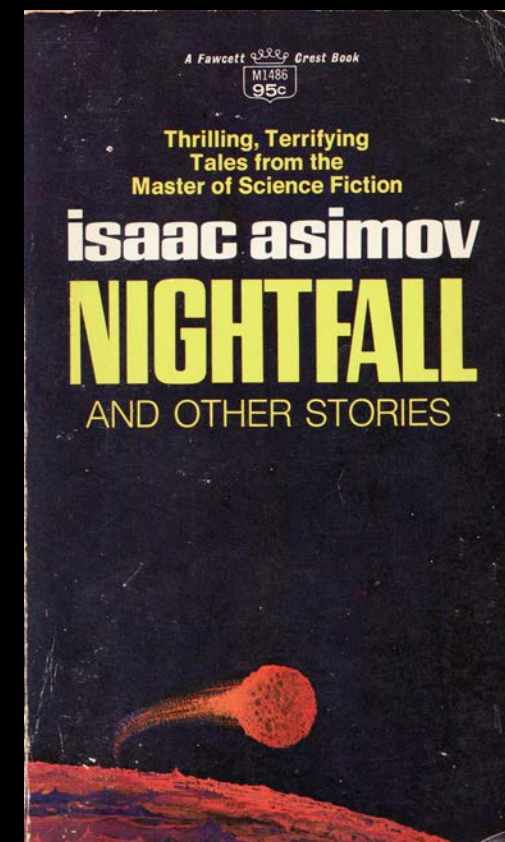
50年前の私にとっての「世界」 @高知県安芸市

「子供の頃、海を見て育っちょらん人間は
信用できん」 (西原理恵子)

- この水平線は世界の果てなのか？
- その先に別の世界があるのか？
- もしあるならそこに広がる風景はこの世界と同じなのか？

アイザック・アシモフの短編SF小説 「Nightfall (夜来たる)」

- 6つの太陽を持ち「夜」のない惑星ラガッシュ
 - 空に複数の太陽が昇っているためいつも「昼」
- 古来からの伝説によると、約2000年に一度だけラガッシュに「夜」が訪れるという
 - これは、たまたま空に一つしか太陽が昇っていない時に、ラガッシュの内側の惑星が起こす皆既日食
 - 物語はこれから数時間で「夜」が訪れる時から始まる
 - 初めて「夜」を見た瞬間、ラガッシュの住民は何を知ったのか



「我々は何も知らなかった」



イラスト：羽馬有紗

- その瞬間に彼らの世界観が一変した
- ホライズンの先を見て自分の住む「世界」を知る=科学

この青空はこの世界の果てなのか？
その先にも、(見えない)別の世界が
広がっているのか？

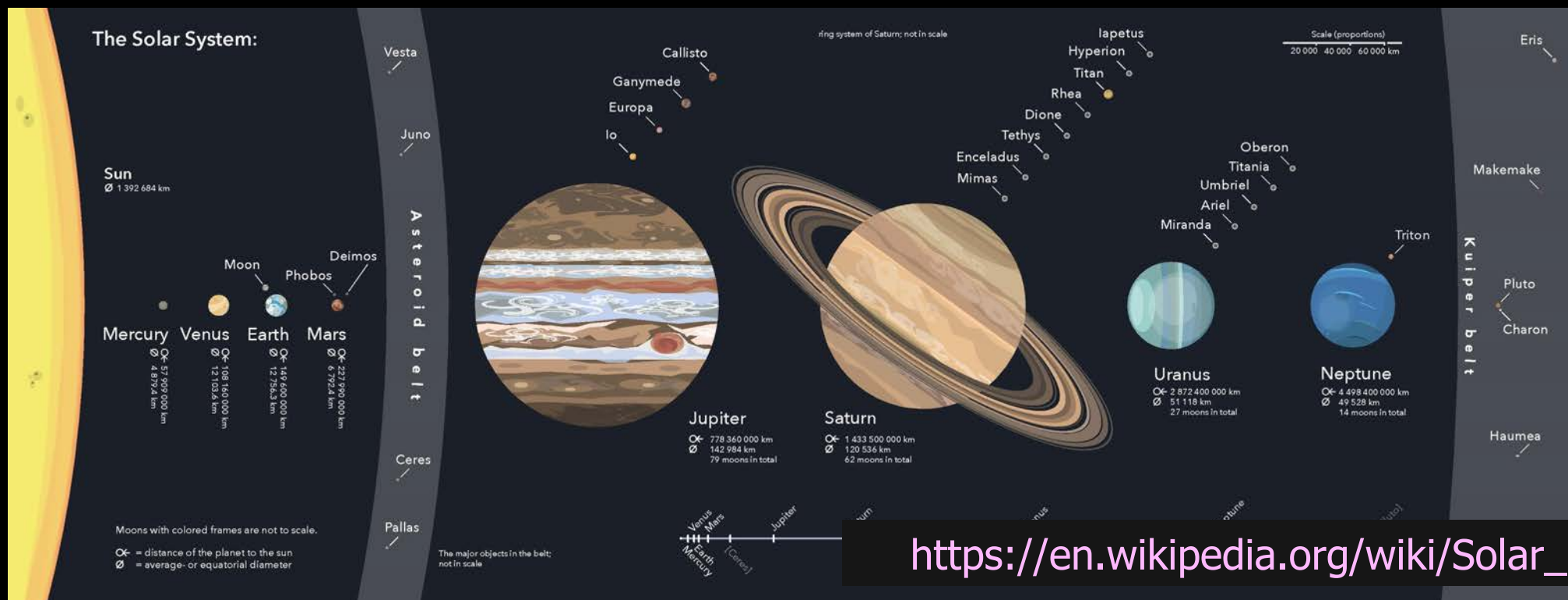


この星空の先には
別の世界が広がっているのか？



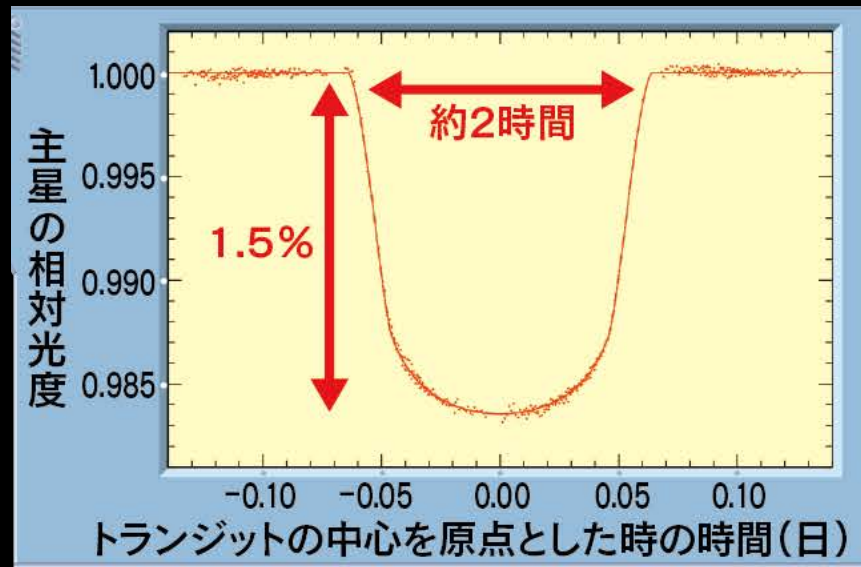
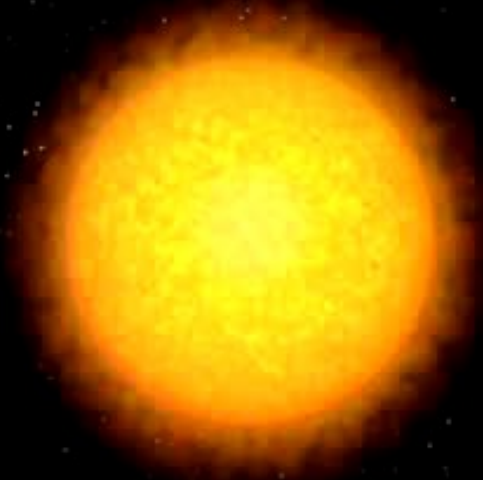
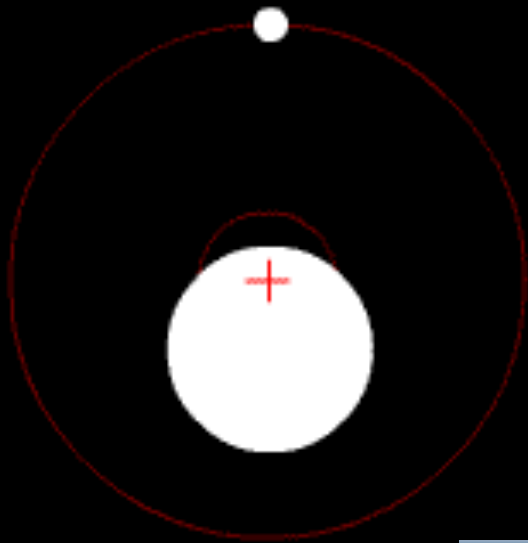
2 太陽系外惑星発見史

この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、さらに生命の存在する惑星(地球)がある
 - 力学的に極めて安定(約100億年程度は安定)、惑星の多くは複数の衛星と環を持つ

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

- 中心星を増光させる

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

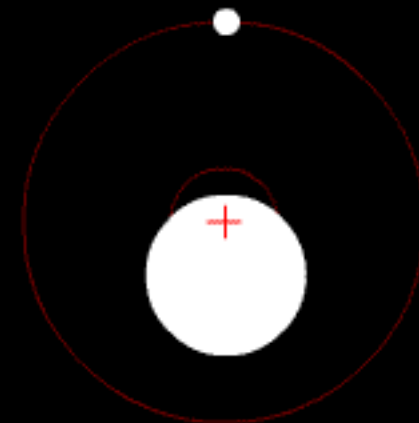
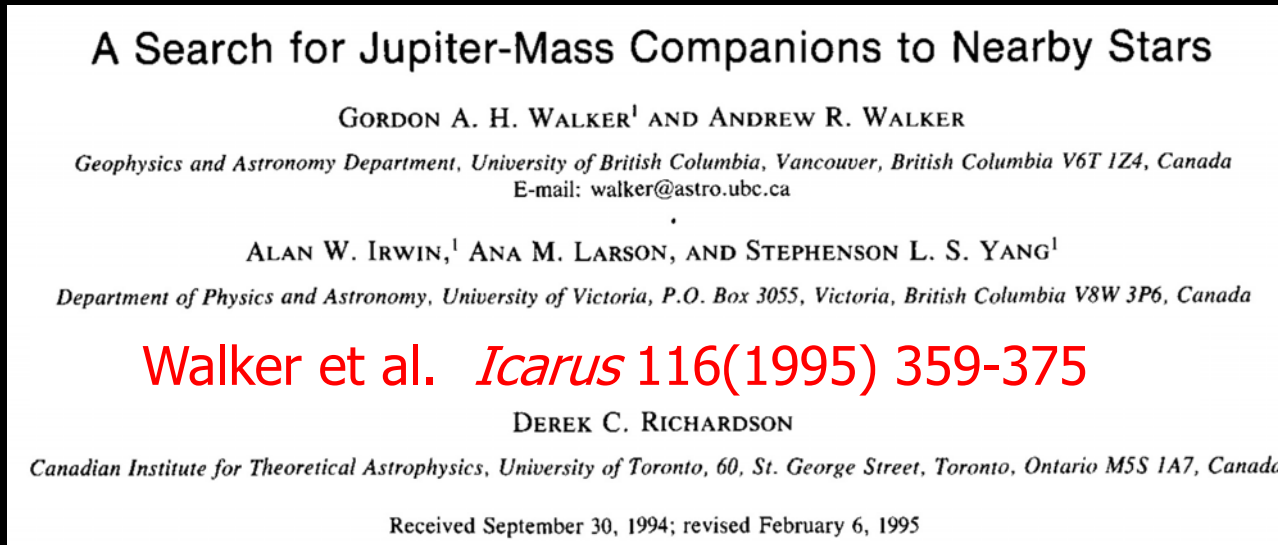
Received December 4, 1990; accepted January 30, 1991

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

Finally, we ask the question if orbits of companions in the mass range $0.001-0.010 M_{\odot}$ 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.

系外惑星は存在しない(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(?)。。。
- 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



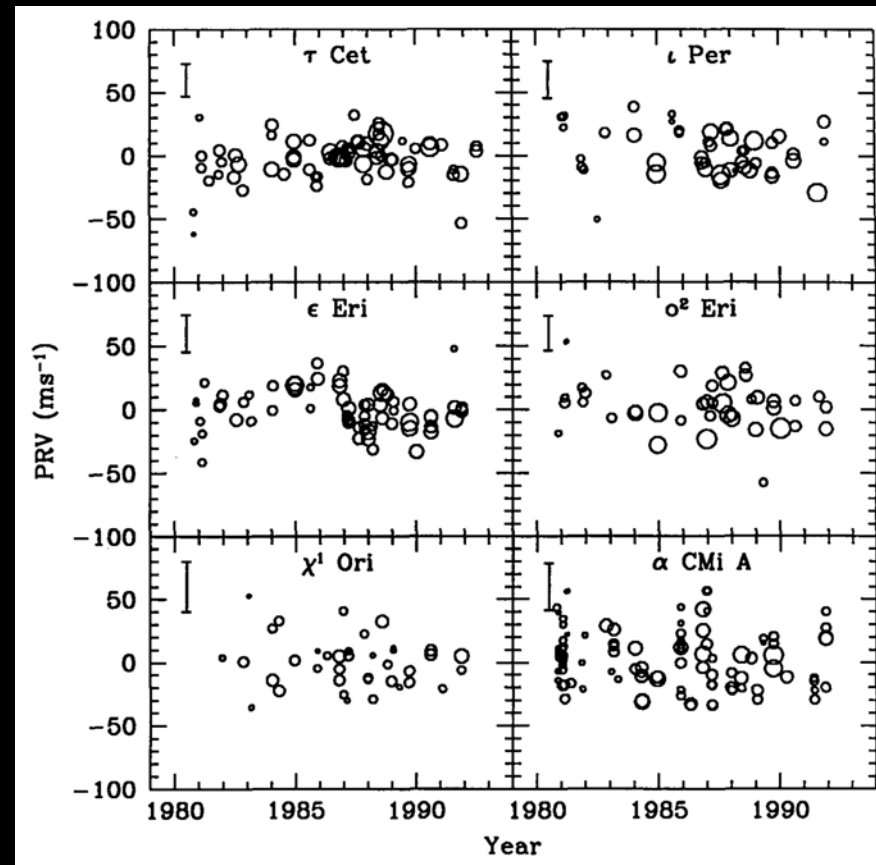
When we began this program over 14 years ago, we fully expected that, with sufficient precision, we would find several candidate giant planets. Not only is the Solar System dominated dynamically by Jupiter, but simulations such as those of Isaacman and Sagan (1977) suggested that a Solar System-like 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

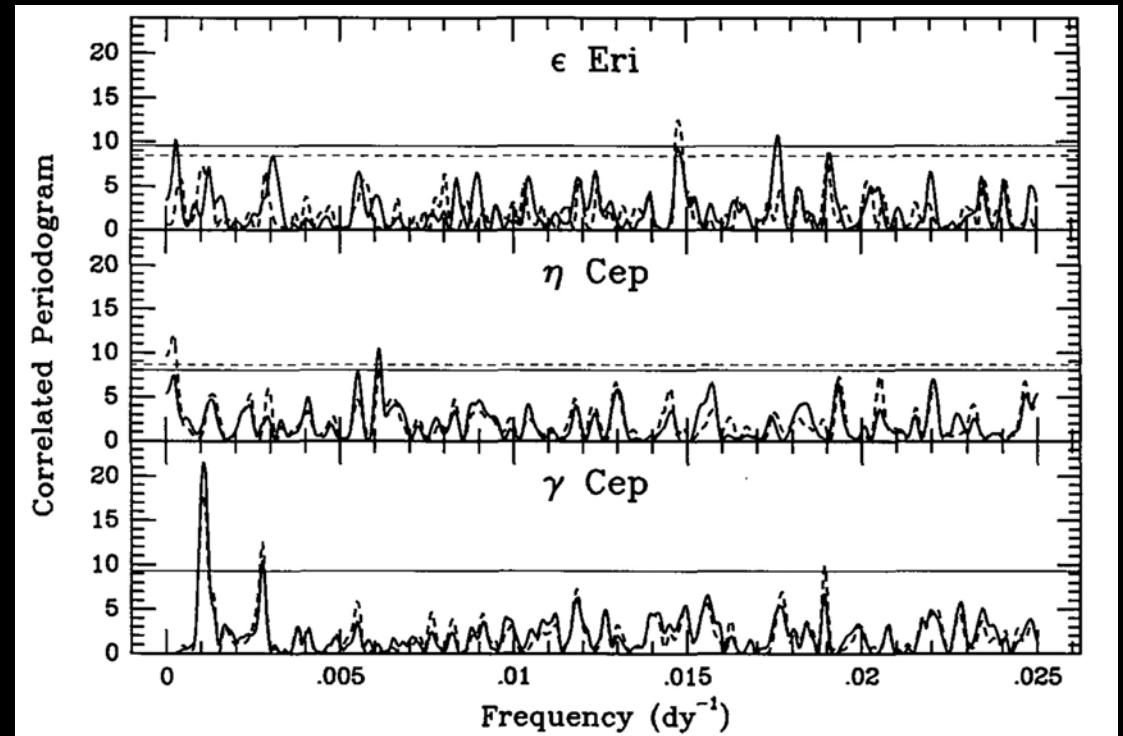
Duquennoy, Mayor & Halbwachs (1991)



Walker et al. (1995)

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？

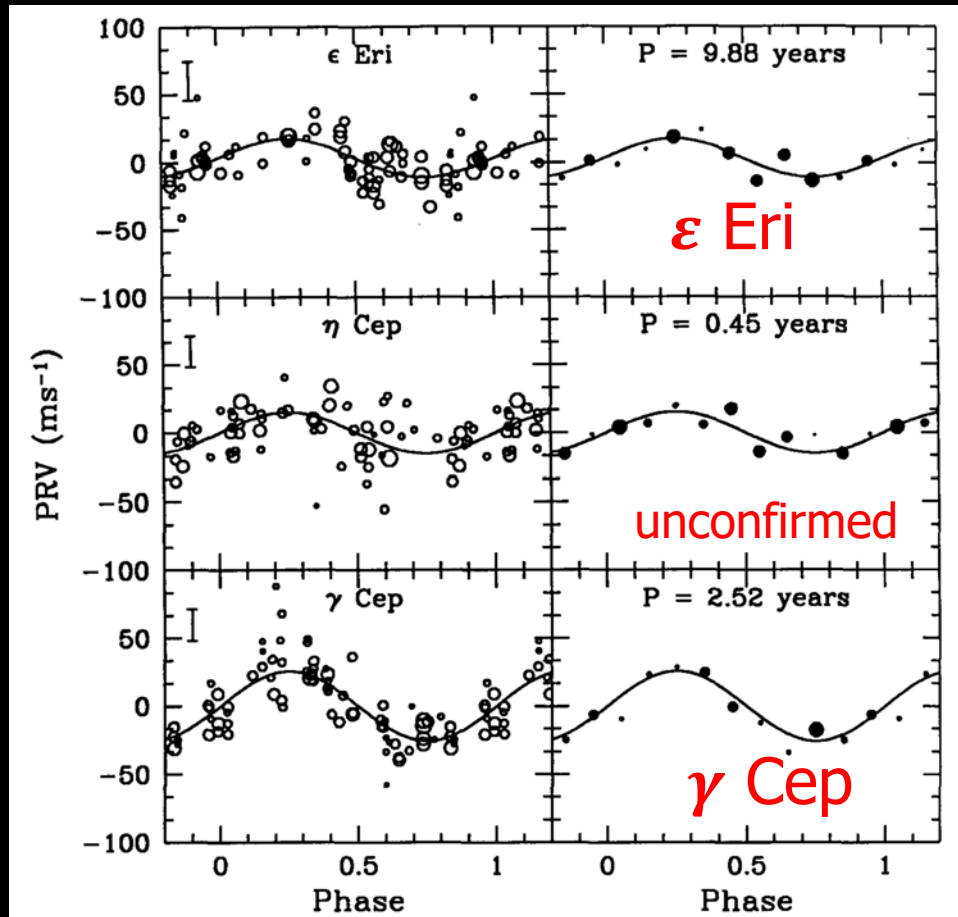
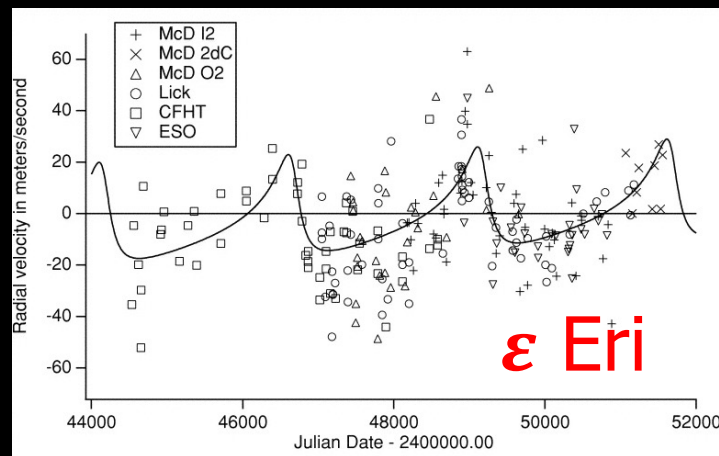
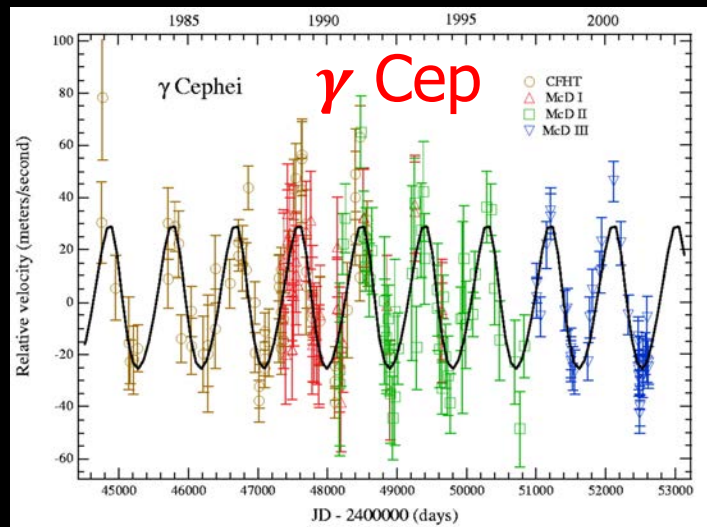


Fig4. in Walker et al. (1995)



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



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

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. Adrianszyk³, G. Knispel³, D. Kohler³, D. Lacroix³, G. Rimbaud³ and A. Vin³

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

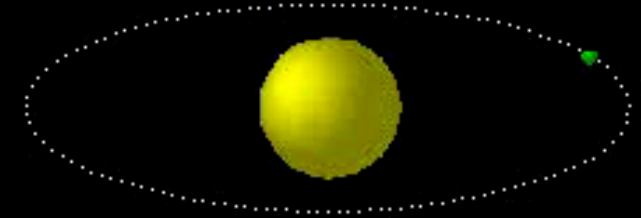
² Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny, Switzerland

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

Received September 28, 1995; accepted February 15, 1996

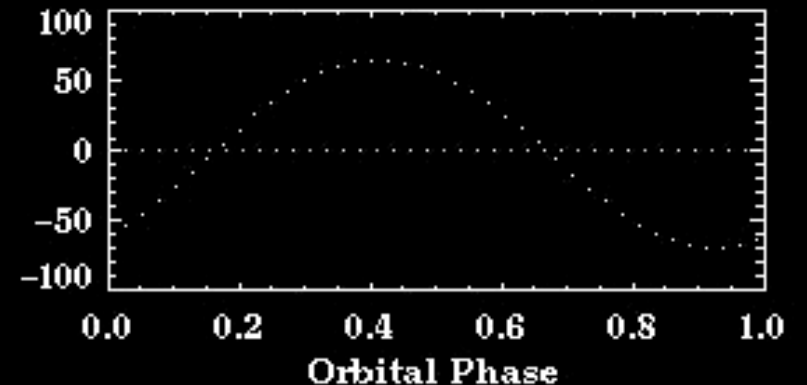
Abstract. — The fibre-fed echelle spectrograph of Observatoire de Haute-Provence, ELODIE, is an instrument has been in operation since the end of 1993 on the 1.93 m telescope. ELODIE is designed as a version of the cross-correlation spectrometer CORAVEL, to perform very accurate radial velocity measurements such as needed in the search, by Doppler shift, for brown-dwarfs or giant planets orbiting around stars. In one single exposure a spectrum at a resolution of 42000 ($\lambda/\Delta\lambda$) ranging from 3906 Å to 6811 Å is recorded on a 1024×1024 CCD. This performance is achieved by using a $\tan\theta = 4$ echelle grating and a combination of a grism as cross-disperser. An automatic on-line data treatment reduces all the ELODIE echelle spectra and computes cross-correlation functions. The instrument design and the data reduction algorithms are described in this paper. The efficiency and accuracy of the instrument and its long term instrumental stability allow the measurement of radial velocities with an accuracy better than 15 m s^{-1} for stars up to 9th magnitude in less than 30 minutes. Observations of 16th magnitude stars are also possible to measure velocities at about 1 km s^{-1} . In classic spectroscopic studies ($S/N > 100$) 9th magnitude stars can be observed in one hour exposure time.

Circular Orbit: rho CrB



$K = 67.4 \text{ m/s}$ $e = 0.03$
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3 (*)$

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



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

太陽以外の主系列星の周りの惑星の初発見 (1995)

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

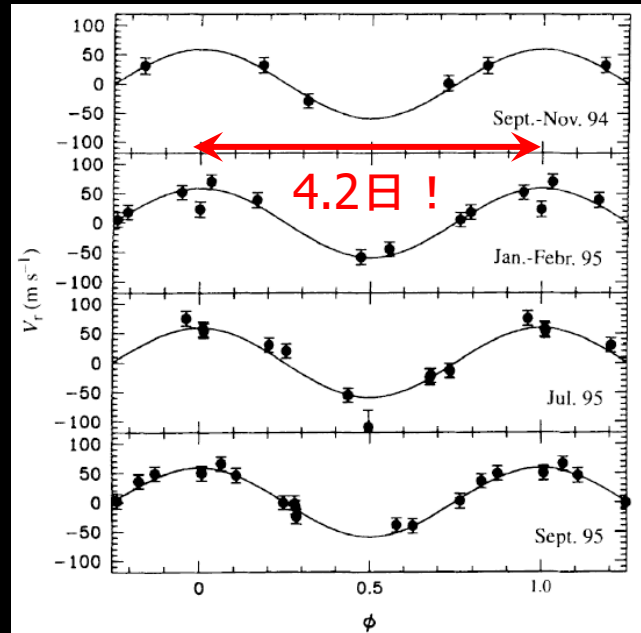
Michel Mayor & Didier Queloz

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

Nature 378(1995)355

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

「初めて」発見された系外惑星は中性子星の周り

A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12

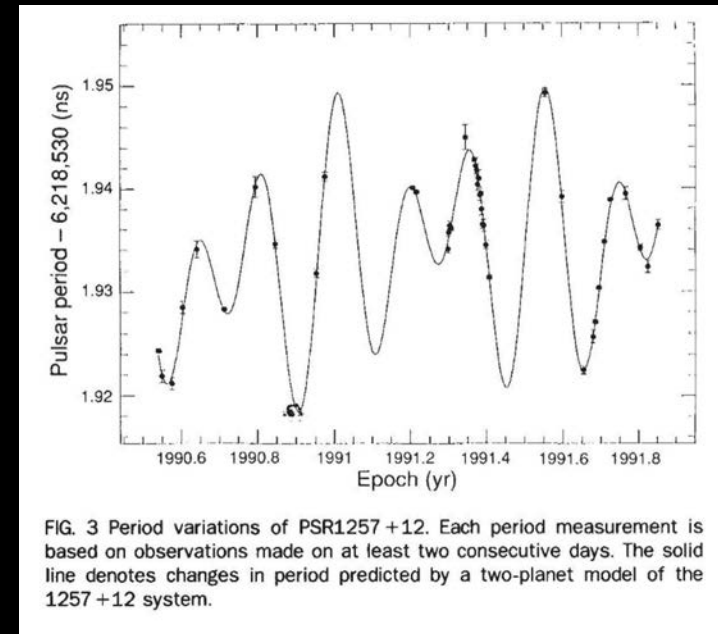
A. Wolszczan* & D. A. Frail†

* 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.

■ Wolszczan & Frail (1992)



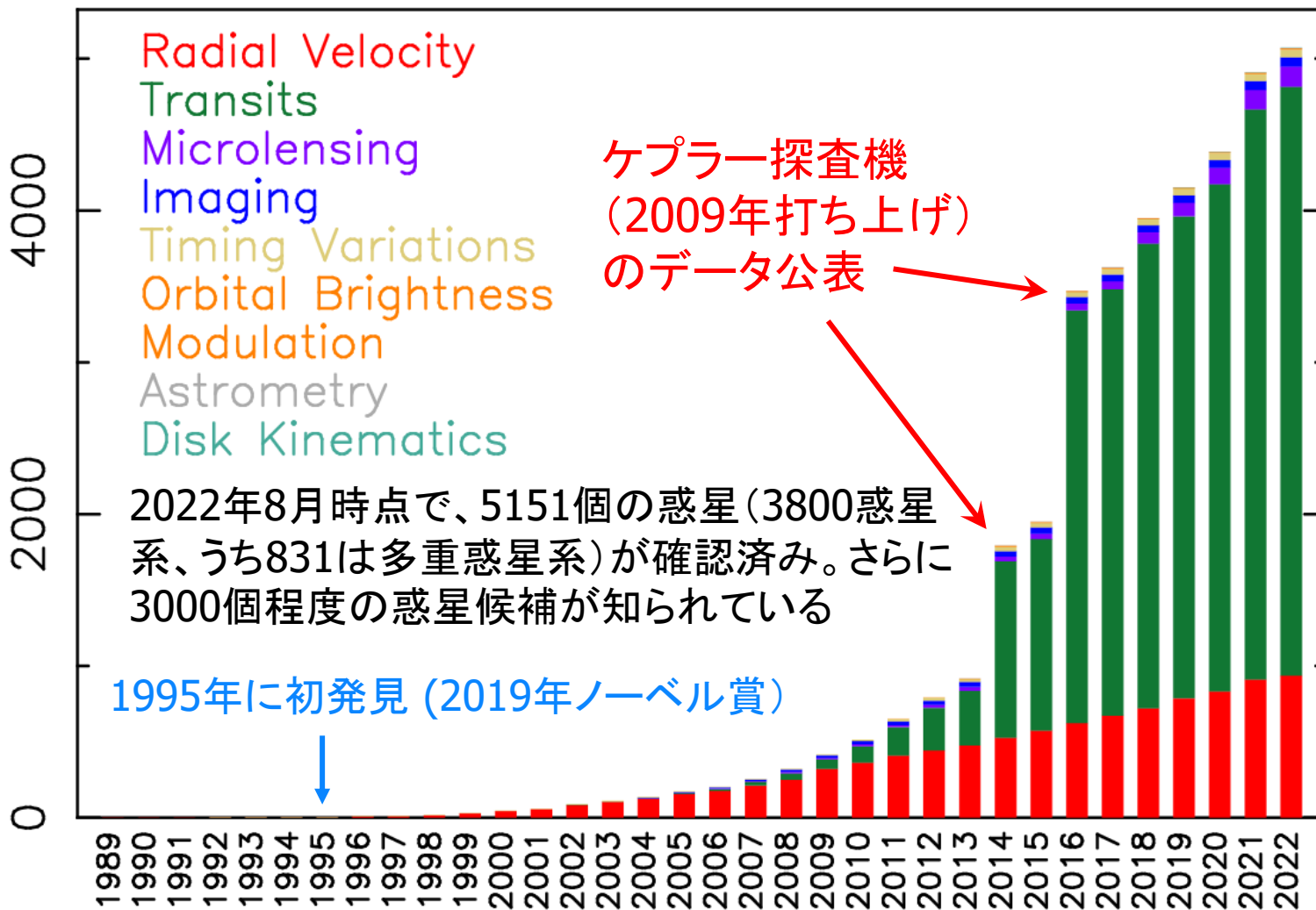
■ パルサープラネット

- $3.4M_{\text{地球}}$ (周期66.6日)
- $2.8M_{\text{地球}}$ (周期98.2日)
- パルスの到着時刻変動

太陽系外惑星の発見年表

18 Aug 2022
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数

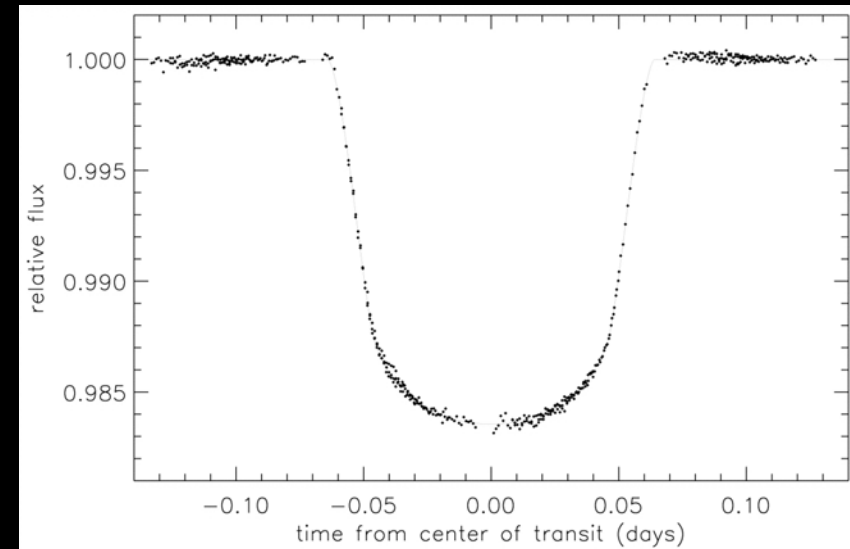
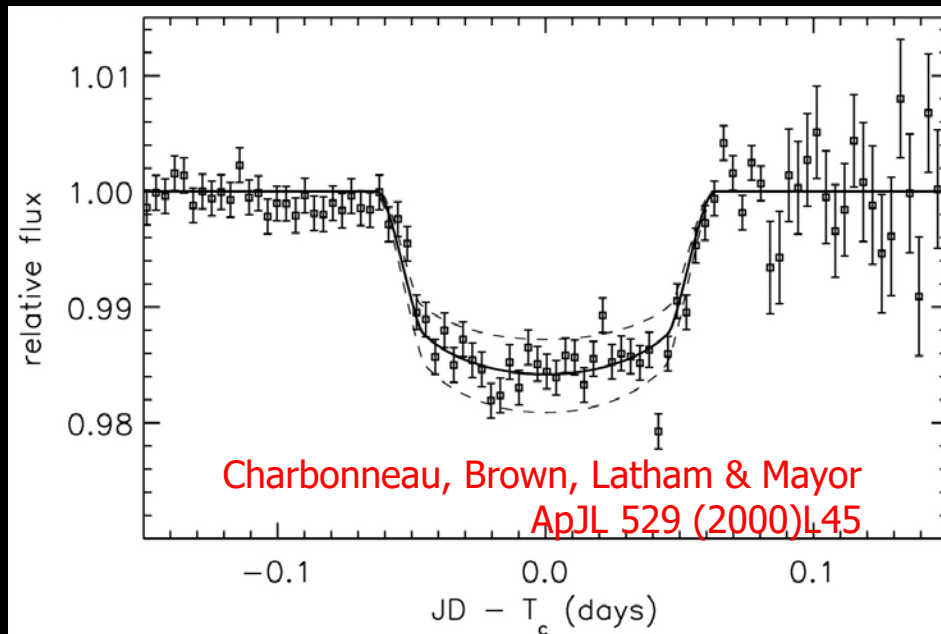
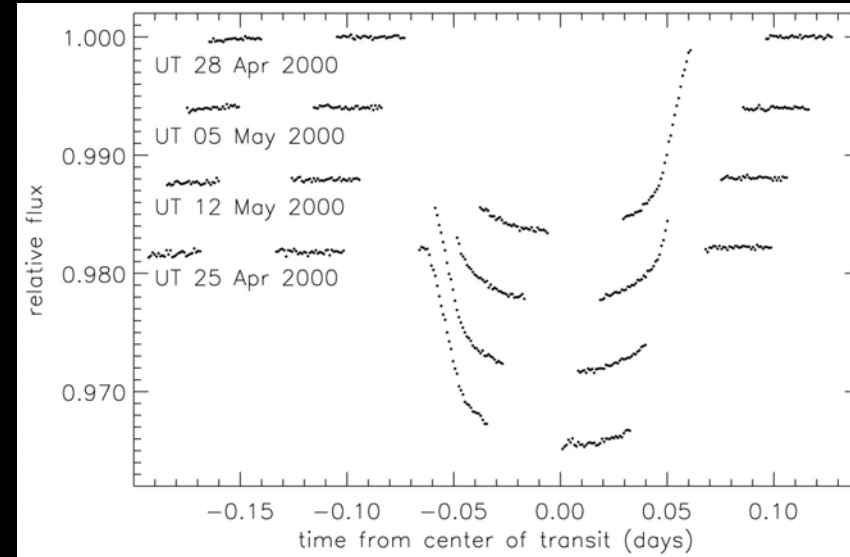
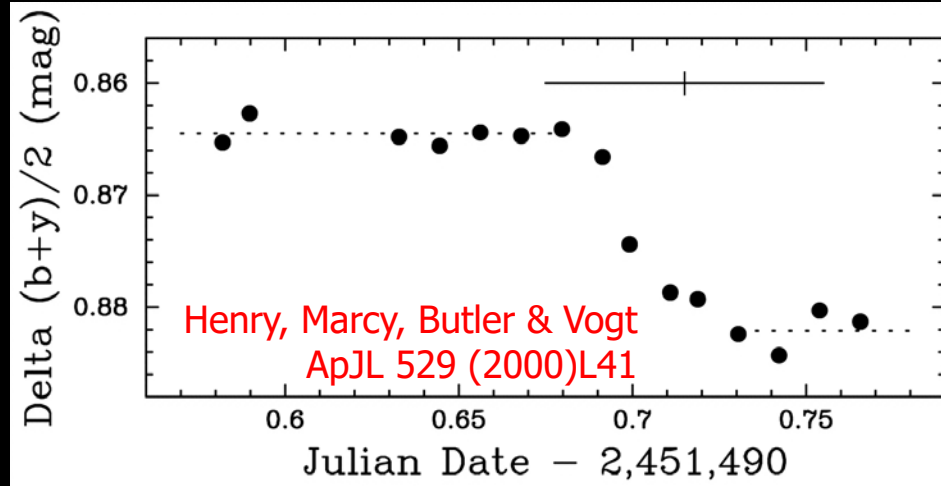


西暦

初めてのトランジット惑星(主星を隠す影): HD209458b

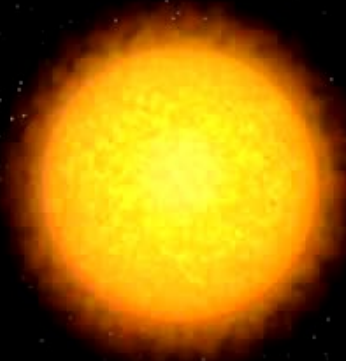
地上望遠鏡

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、系外惑星観測に革命をもたらした

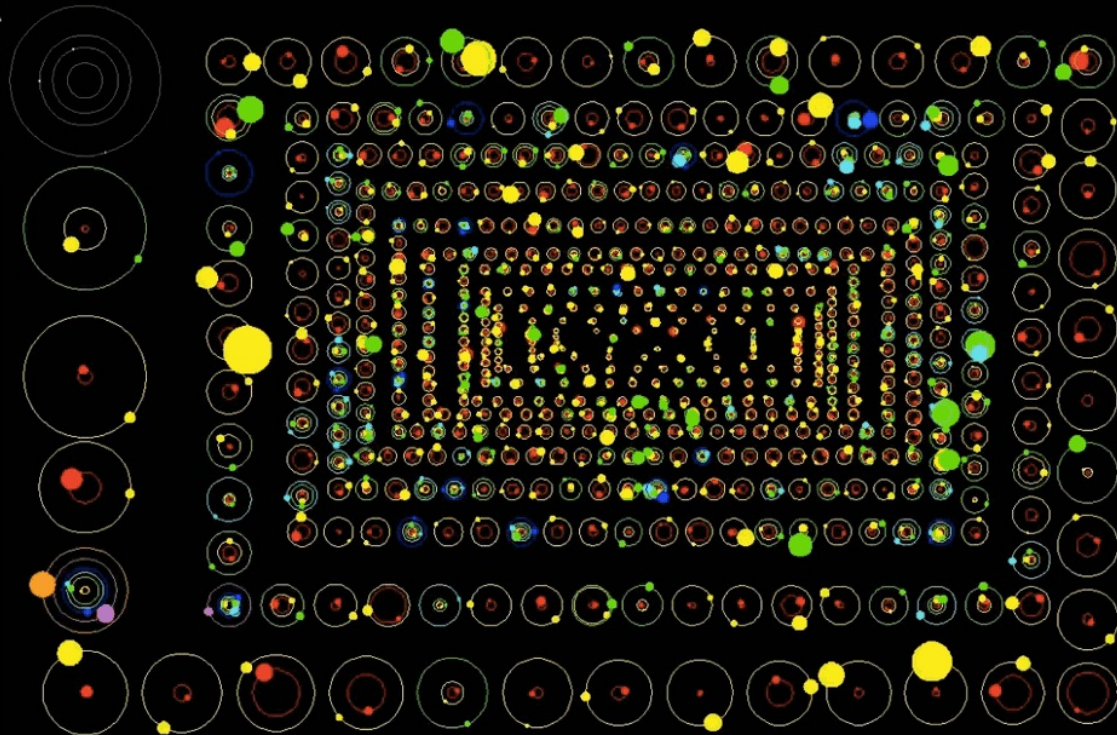


Kepler planets (as of August 3, 2015)

©NASA/Daniel Fabrycky

The Kepler Orrery III

t[BJD] = 2455215



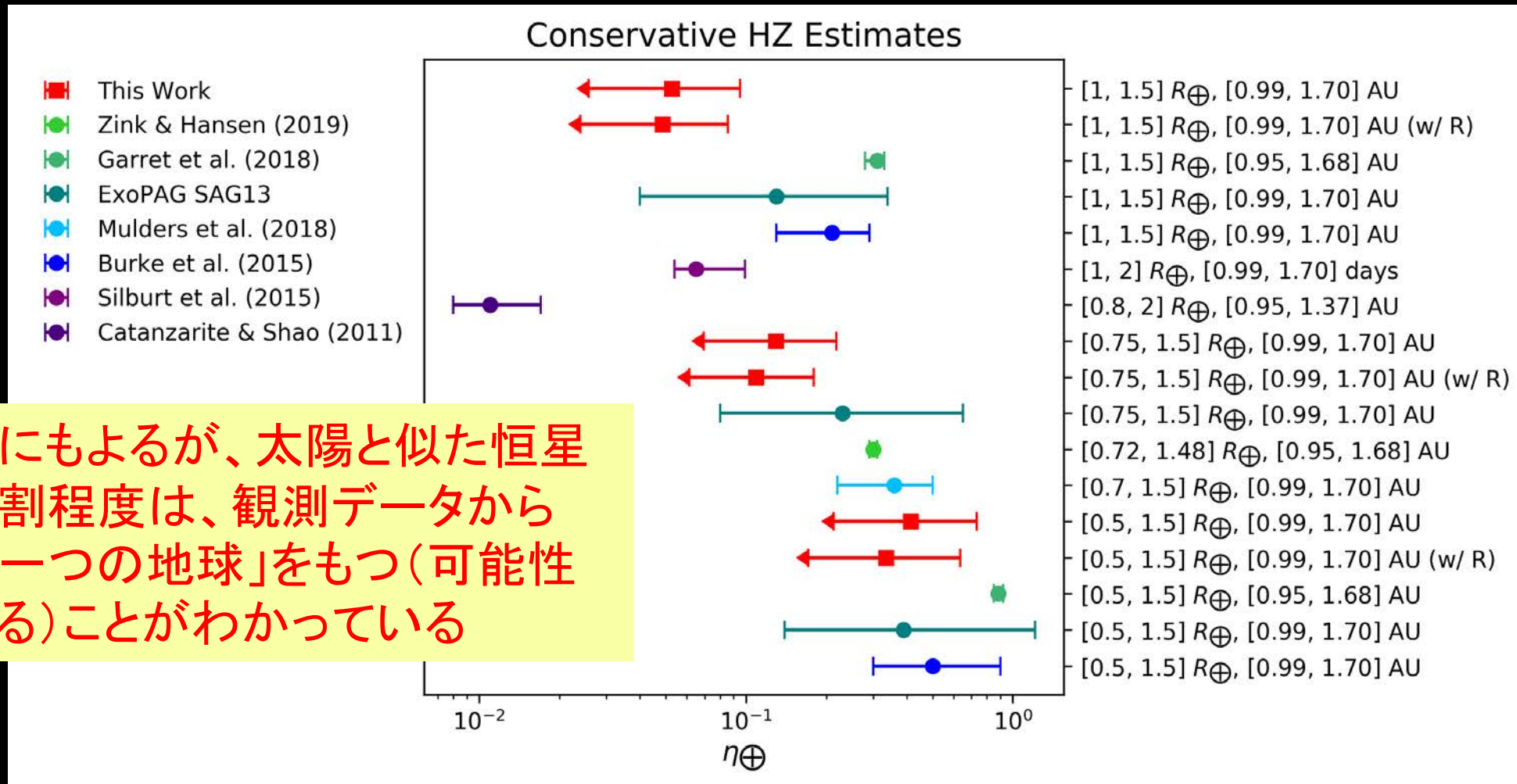
<https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>

3 ハビタブル惑星

生命がいるかもしれない惑星候補



ハビタブル惑星(定義は曖昧)の存在率



定義にもよるが、太陽と似た恒星の数割程度は、観測データから「もう一つの地球」をもつ(可能性がある)ことがわかっている

Kunimoto and Matthews, AJ 159, 2020, 248

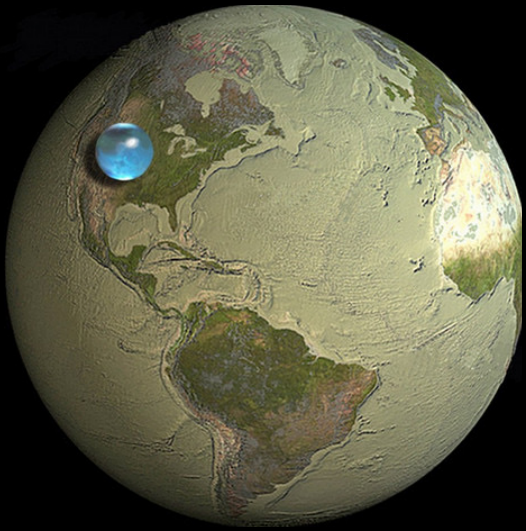
G 型星 ($5300 < T_{\text{eff}} [\text{K}] < 6000$) 39,173 個 (惑星 1276 個)の Kepler サンプルより

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(千億個)
 - その1割の 10^{10} 個が太陽と似た恒星
 - さらに太陽に似た恒星の1割がハビタブル惑星を持つ
- 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(1垓個)
 - ハビタブル惑星に生命が存在する保証は全くない
 - 本当に生命が生まれるための条件は知られていない(適度な割合の海と陸+数多くの偶然?)
 - しかしこれほど膨大な数の惑星がある以上、この地球だけに生命がある考えるのはかなり不自然(傲慢)では？

バイオシグニチャーの同定が鍵： 水は必須なのか？ハビタブル惑星の誤解

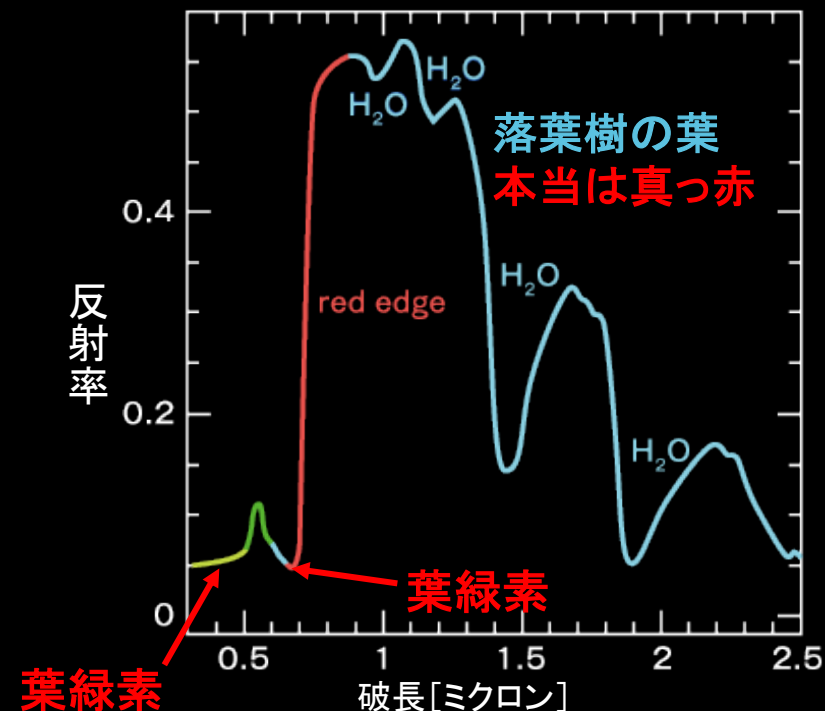
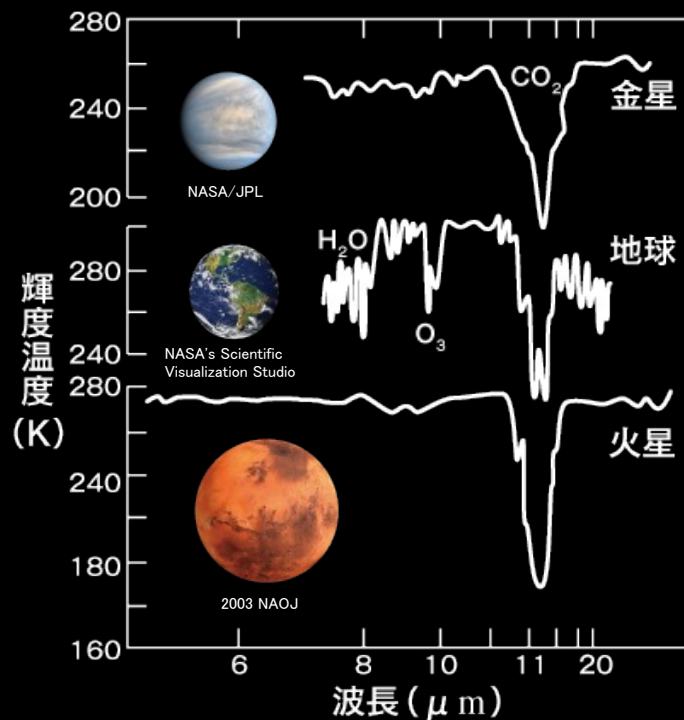
- 地球の生命誕生に水は必須であったらしいが、、、
 - 水が他の天体でも必須である理由はない
 - しかもそれが表面に存在していなくてはならないわけでもない
 - にもかかわらず、(大量の水が存在しているとわかっているわけでもないのに)表面温度が(0-100) °Cだと推定される惑星をハビタブル惑星と呼んでその発見を喧伝する業界関係者の科学者倫理観は糾弾されるべき
 - とはいえ、水という条件を外してしまうと、何でもありになってしまうのもまた事実
- 何がバイオシグニチャーなのかは、宇宙における生命の普遍性とその定義に依存する(つまりわからない)



バイオシグニチャー：生物が存在する兆候

■ 地球上生命の指標

- 生物由来と考えられる大気成分（酸素、オゾン、メタン）
- 植物のレッドエッジ地上の植物のほとんどは700nmより長波長で反射率が急激に増加する



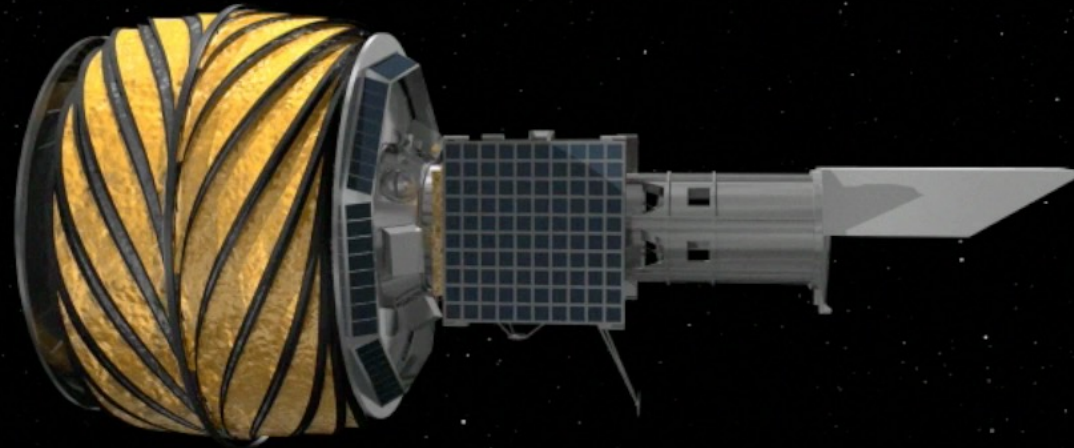
土星から見た地球



- 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



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)

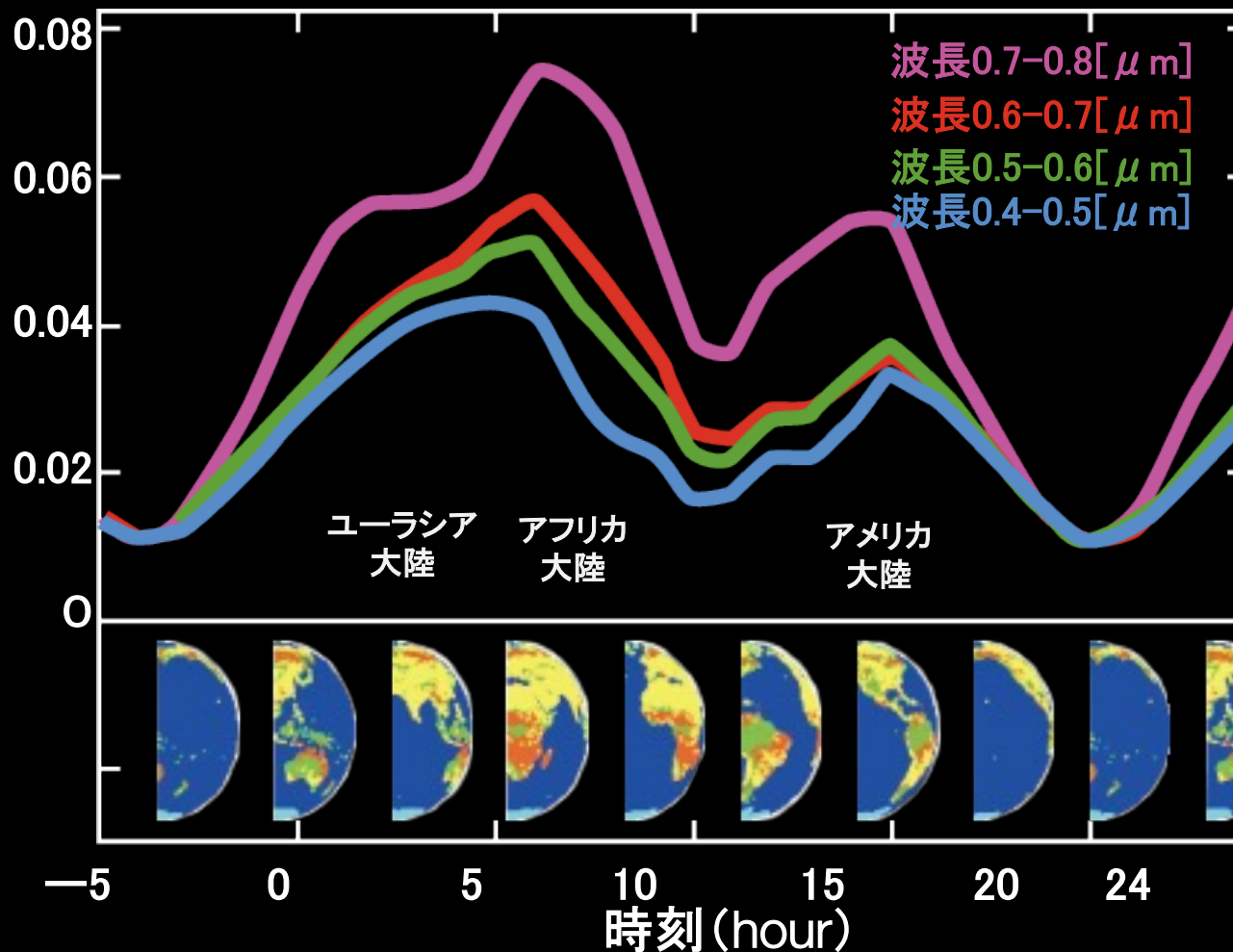
もうひとつの地球の色

地球の自転にともなう反射光の色変化シミュレーション

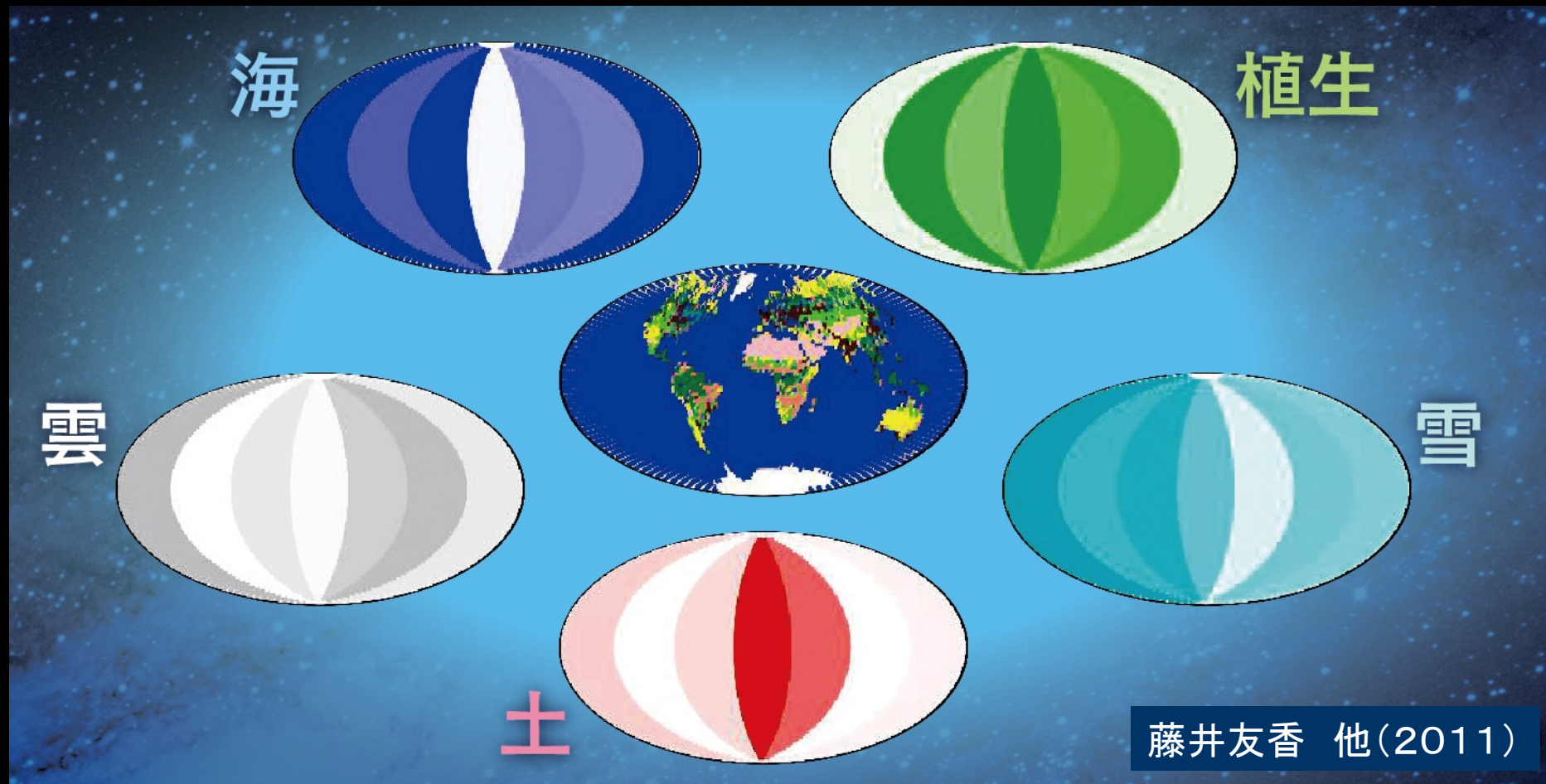
藤井友香 他 (2010)



反射率

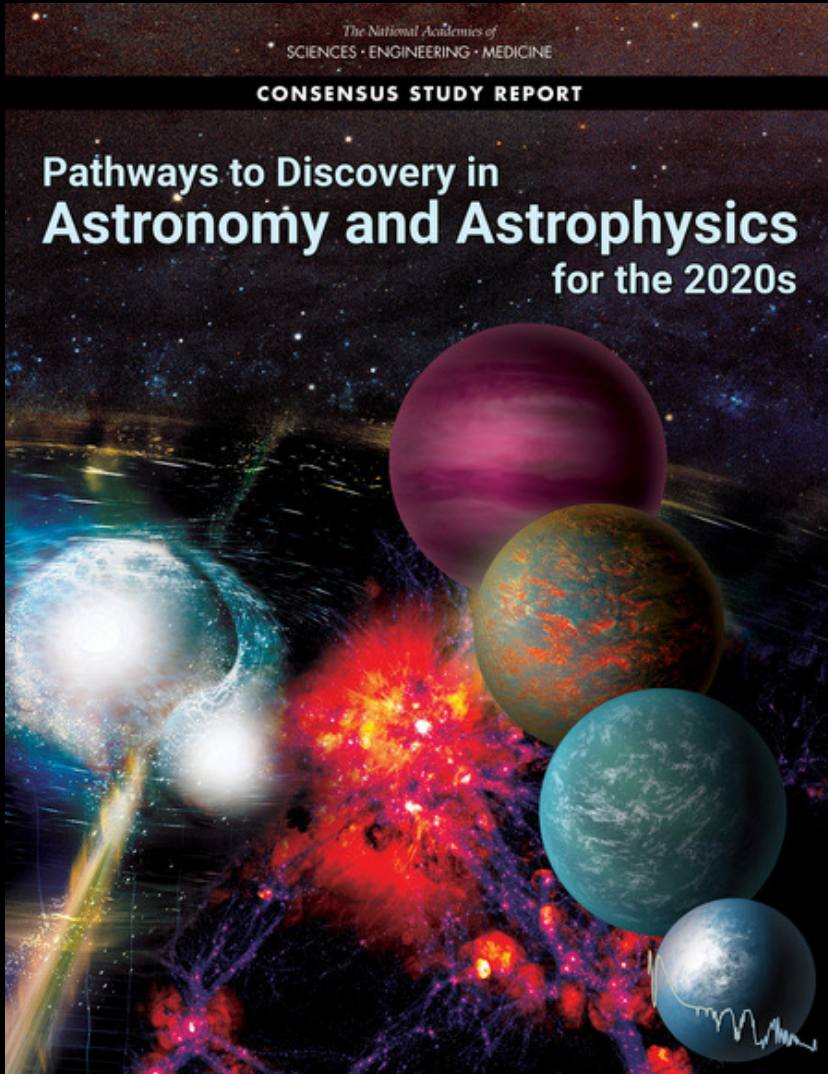


地球測光観測データから推定された地 表面成分の経度分布地図



4 US decadal survey "Astro2020"

Astro2020: Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s



- **Worlds and Suns in Context**
 - Pathways to Habitable Worlds
- **New Messengers and New Physics**
 - New Windows on the Dynamic Universe
- **Cosmic Ecosystems**
 - Unveiling the Drivers of Galaxy Growth

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

Highest Priority: an IR/Optical/UV space telescope optimized for observing habitable exoplanets and general astrophysics

- **Recommendation:** After a successful mission and technology maturation program, NASA should embark on a program to realize a mission to **search for biosignatures from a robust number of about ~25 habitable zone planets** and to be a transformative facility for general astrophysics. If mission and technology maturation are successful, as determined by an independent review, implementation should start in the latter part of the decade, **with a target launch in the first half of the 2040's**

Exoplanet spectroscopy and evolution of the reflectivity spectrum of Earth

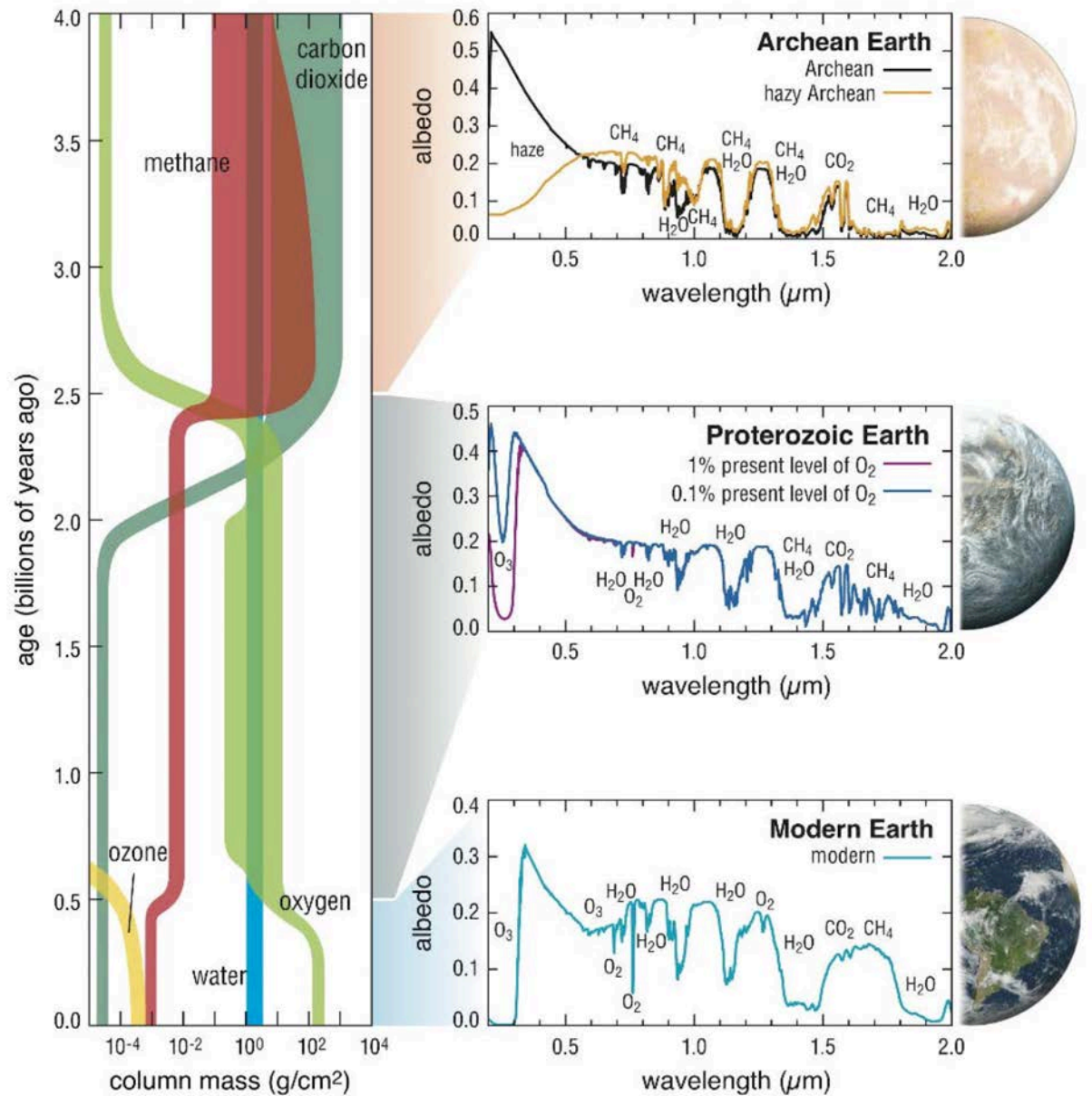
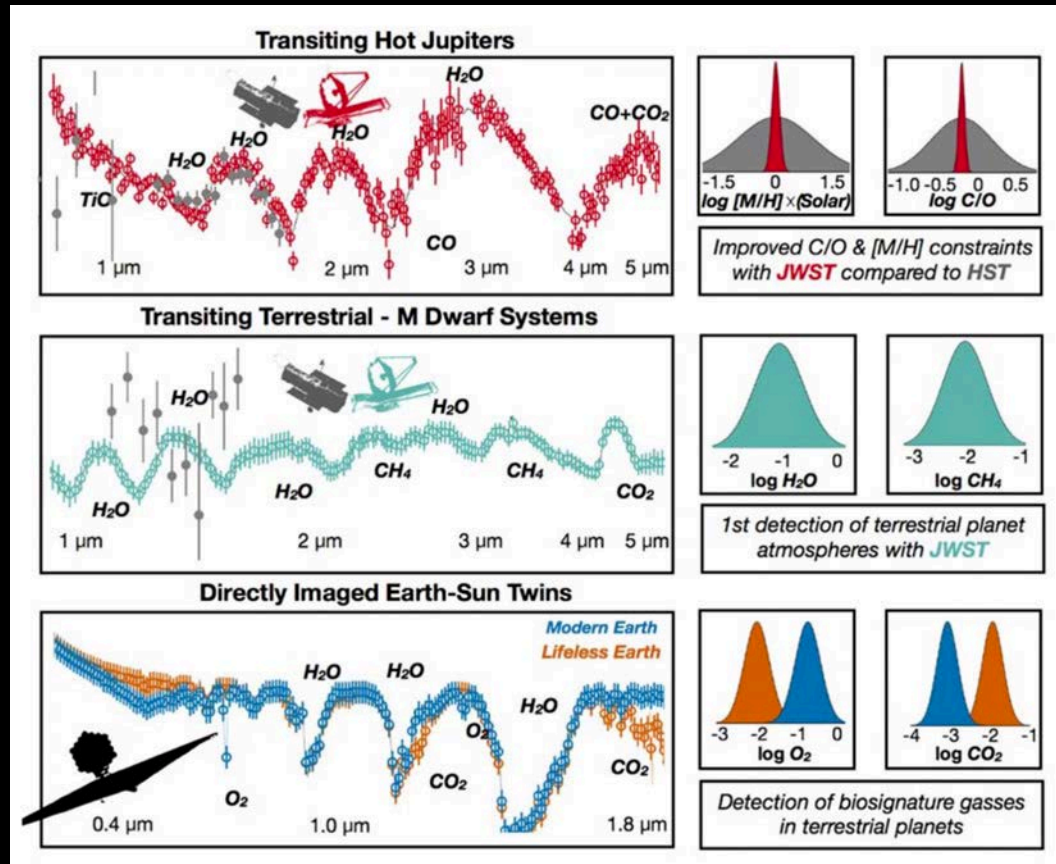
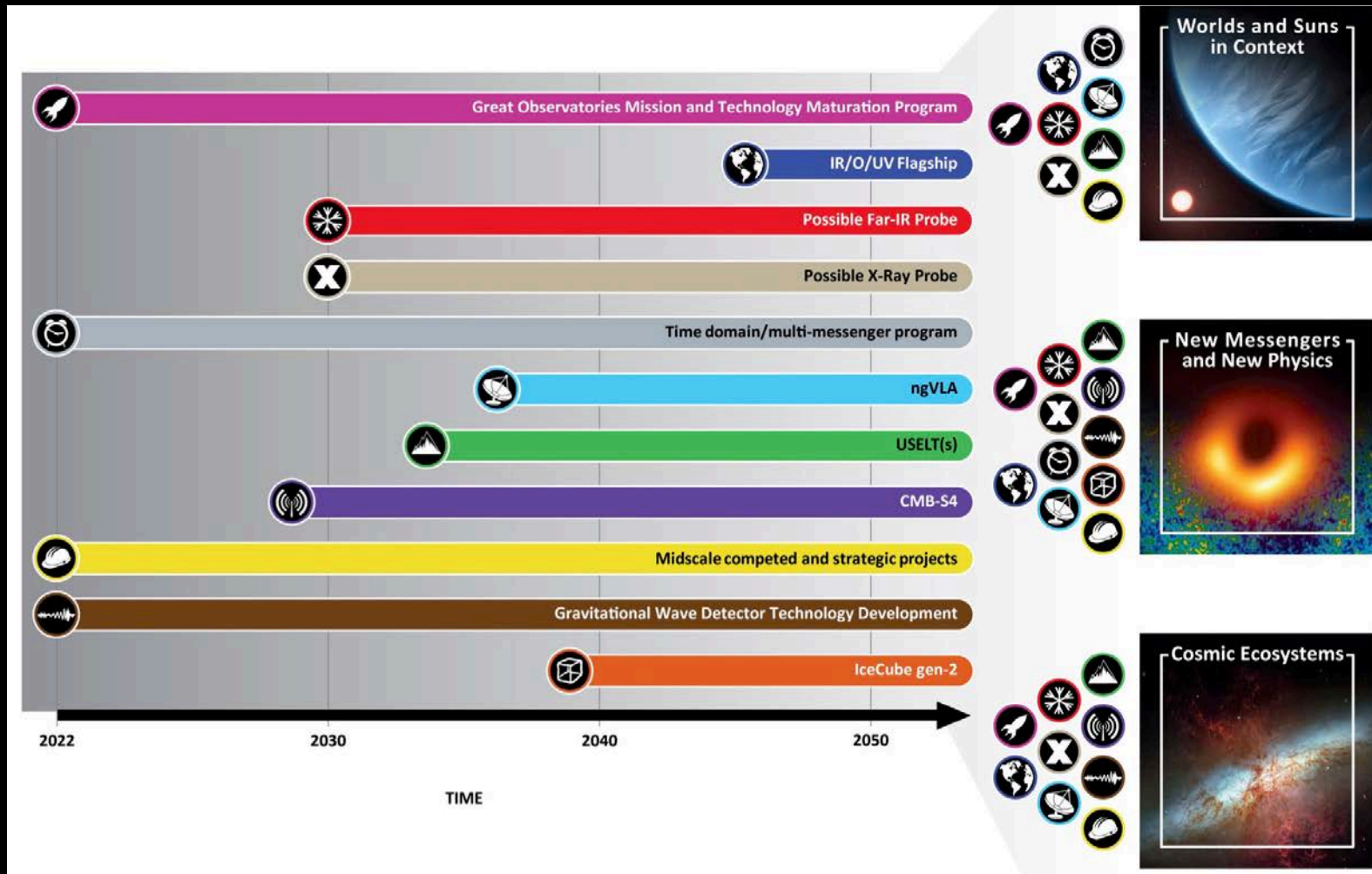


FIGURE 1.1 Evolution of the reflectivity spectrum of Earth. Simulated spectra of Earth before life had significantly altered its atmosphere (top, Archean era 2.5 to 5 Gyr ago), before the development of complex life (middle, Proterozoic era from 0.54 to 2.5 Gyr ago), and the modern oxygen-bearing Earth (bottom). SOURCE: LUVUOIR Report; G. Arney, S. Domagal-Goldman, T. B. Griswold (NASA GSFC).

Timeline for the recommended medium and large programs and projects



■ Priority Area: Pathways to Habitable Worlds

We are on a path to exploring worlds resembling Earth and answering the question: "Are we alone?"

The task for the next decades will be finding the easiest of such planets to characterize, and then studying them in detail, searching for signatures of life.

5 地球外文明探查

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(低周波数側は銀河系のシンクロトン放射、高周波数側では地球大気が雑音となる)
- 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

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

今、銀河系内にある交
信可能な知的文明の数



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

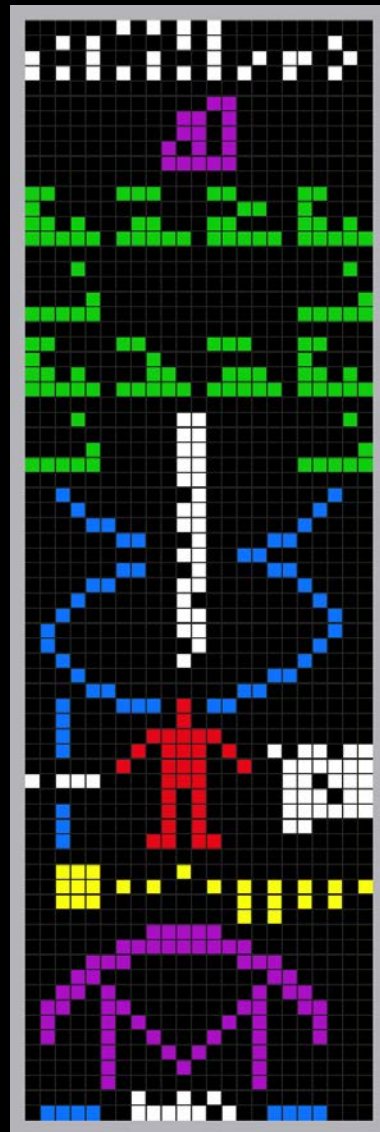
その知的生命が他の文明と交信を行う確率

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。

アレンボ・メッセージ

- ドレイクは、1974年11月16日にプエルト・リコにあるアレンボ電波望遠鏡から、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の信号列が右図のパターンになる



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

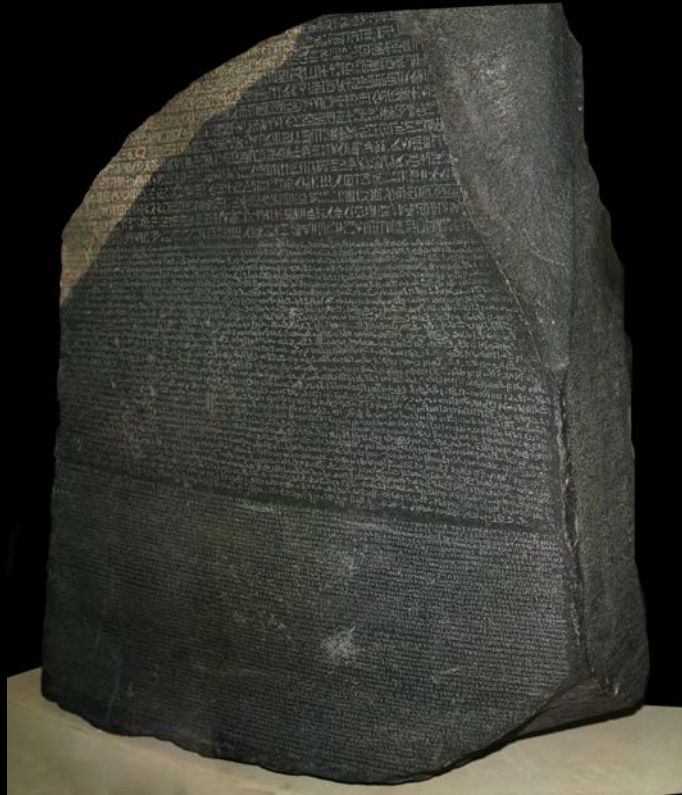
DNAの二重螺旋

人間

太陽系(左端が太陽で、一行上になっているのが地球)

アレンボ電波望遠鏡

天文学的ロゼッタ・ストーンとチューリングテスト



- 明らかな人工信号を受信したとして解読できるか
 - 地球上の異なる言語が理解できるのは対面して意思疎通できたおかげ
 - ロゼッタストーンなしに古代エジプト文字を解読できたのか？
 - 日本語以外のみで訓練されたAIに、膨大な量の日本語文書を与えたとして、解読できるようになるのか？
 - 原理的にであれ、遠隔で相互理解を可能とする方法論は存在するのか？
- 地球外文明との交信は不可能
 - もっとも近い地球外文明までの距離であれ（天の川銀河のサイズは数万光年程度）、返信したときには生命や文明が滅亡している可能性が高い
 - 生命同士ではなくAI同士の交信が主流かも（天文学的チューリングテスト）

6 まとめ

天文学の進歩：惑星系の多様性と普遍性

- 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

宇宙物理学発、系外惑星乗り継ぎ、宇宙生物学着の旅

■ 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惑星の表層(大陸、海洋、植生)検出と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)信号かもしれない

■ 本当に受信したときどうするか考慮しておくべき

- ビッグデータから言語を抽出する非学習的アルゴリズムは可能か？

宇宙を学び世界を問う

- 果てのないホライズンの拡大
 - 高いところに登る＝「学」
 - 遠くを眺めてその先を考える＝「問」
- 天文学・宇宙物理学の進歩 ⇔ 新たな世界観
 - 宇宙と生命の誕生・進化
- 偶然と必然の間
 - 世界は普遍性と多様性をあわせもつ

Everything not forbidden by the laws of nature is mandatory
— Carl Sagan, *Contact*