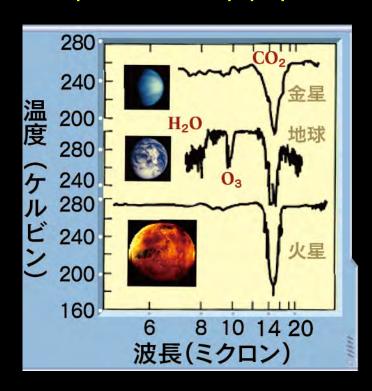
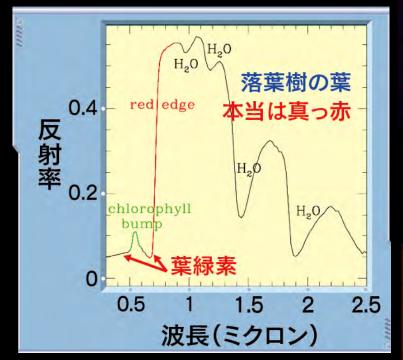
太陽系外惑星の世界

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2016j.html







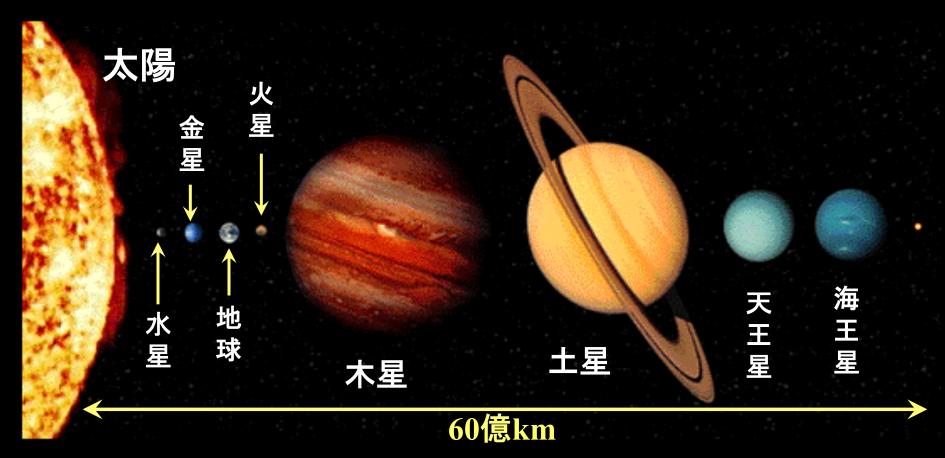
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

東京大学理学部オープンキャンパス 2016年8月4日



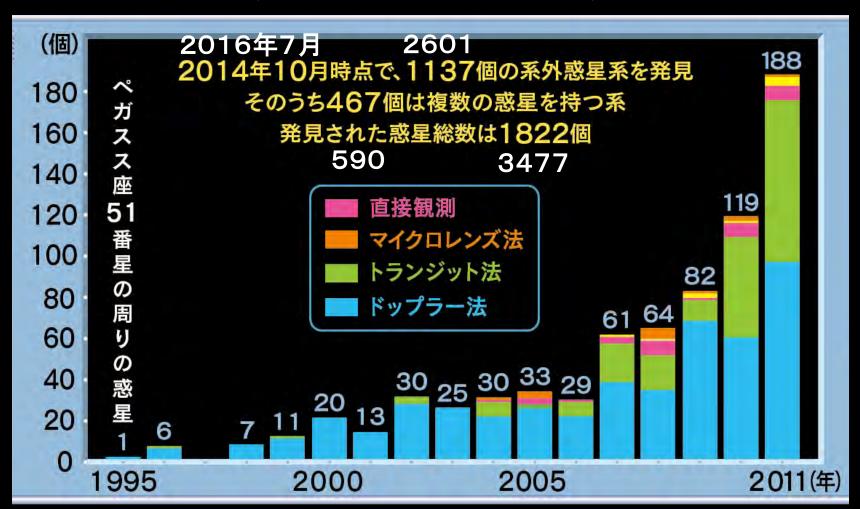
太陽系外惑星の発見

八つの惑星:我が太陽系



(太陽からの距離は別として、惑星の相対的な大きさはほぼ実際の比の通り) http://www.solarviews.com/eng/homepage.htm © Calvin J. Hamilton

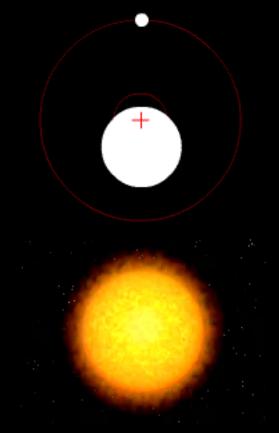
太陽系外惑星発見史



2016年6月時点では

8重惑星系:太陽系のみ、7重惑星系:3、6重惑星系:2、5重惑星系:15、

4重惑星系: 49、3重惑星系: 99、2重惑星系 300個以上



系外惑星検出方法

■ ドップラー法

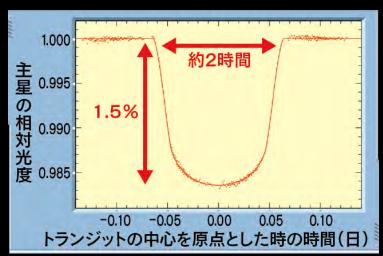
■ 惑星の公転に同期して中 心星の速度が毎秒数十メ ートル程度、周期的に変動

トランジット法

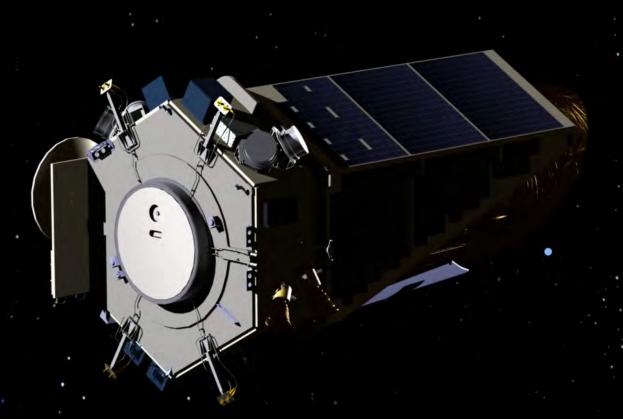
中心星の正面を惑星が横切ることで星の明るさが1 パーセント程度周期的に暗くなる

■直接撮像

■ 中心星の光を隠して惑星 の光を分離



ケプラー探査機 (2009年3月6日打ち上げ) トランジット惑星専用測光モニター観測 地球型ハビタブル惑星を探す



http://kepler.nasa.gov/

系外惑星系についてわかってきたこと

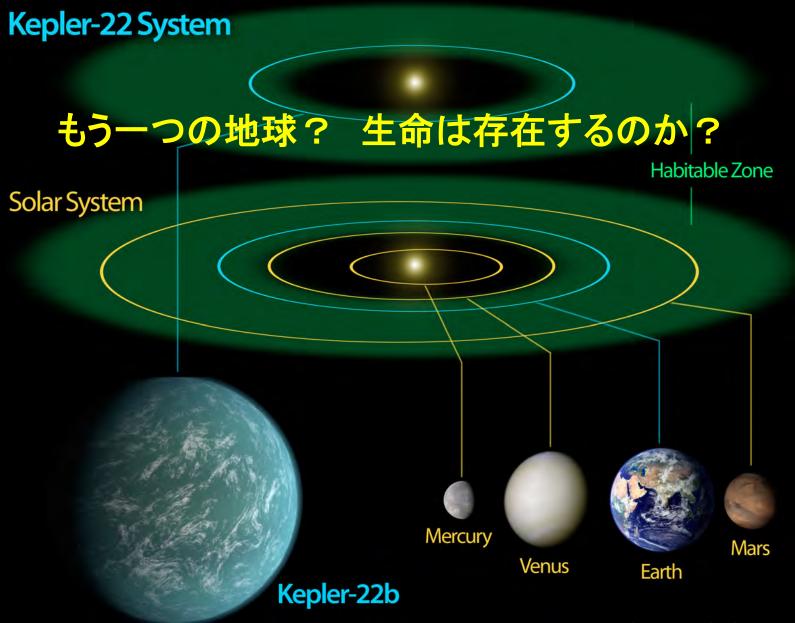
- 惑星系はまれではなくあたりまえの存在
 - 太陽と似た恒星の3割以上が惑星を持ち、2割以上は複数 の惑星を持つ
- 太陽系と良く似た系もかけ離れた系も存在
 - 太陽の周りを数日で公転する巨大ガス惑星(ホットジュピター)
 - 大きな離心率を持つ楕円軌道の惑星
 - ハビタブル(水が液体として存在する適温の)惑星候補
 - (2-3)地球質量の岩石惑星?(スーパーアース)
- 我々の地球以外に生命が存在するか?

ハビタブル惑星候補



Kasting, Kopparapu, Raminez & Harman (2013)

ハビタブル惑星候補の例



地球サイズのハビタブル惑星の存在確率

- GK型星を公転する地球半径の1~2倍の惑星
 - ケプラーのトランジット惑星検出数から、観測的選択効果 を補正して推定
 - 11±4 % (地球上での太陽フラックスの1~4倍のもの)
 - 5.7+2.2_{-1.7}% (公転周期が200~400日のもの)

Table 1.	Occurrence	of small	planets in	the habitable zone

HZ definition	$a_{\rm inner}$	a _{outer}	F _{P,inner}	$F_{P,\text{outer}}$	f_{HZ} (%)
Simple	0.5	2	4	0.25	22
Kasting (1993)	0.95	1.37	1.11	0.53	5.8
Kopparapu et al. (2013)	0.99	1.70	1.02	0.35	8.6
Zsom et al. (2013)	0.38		6.92		26*
Pierrehumbert and Gaidos (2011)		10		0.01	$\sim 50^{\dagger}$

Petigura, Howard & Marcy: arXiv:1311.6806

リモートセンシング

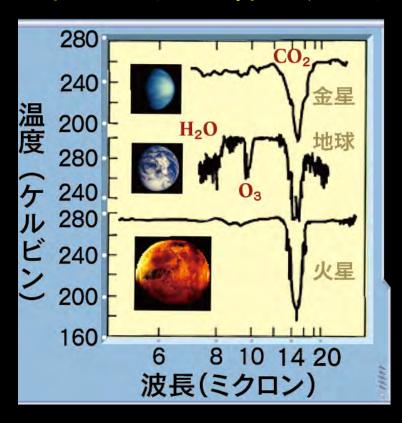
我が地球の観測

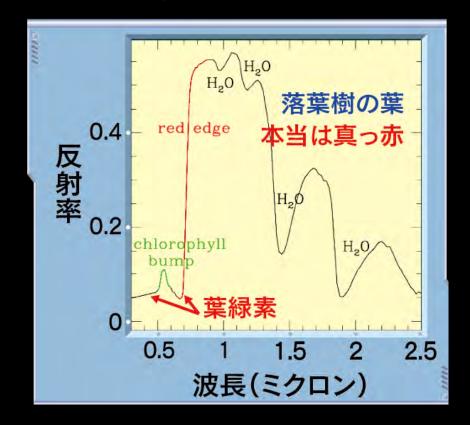
バイオシグニチャー: 生物が存在する兆候

- 何が決定的バイオシグニチャーなのかは不明
 - 地球外での生命の定義?
 - ■地球上での生命の指標
 - ■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
 - ■知的生命体からの電磁波
- ■いずれにせよ検出は天文学観測しかない
 - 天文学で検出可能な限界は何か
 - どのような検出器・望遠鏡を作るべきか

天文学から宇宙生物学へ <u>ハビタブル惑星に生命の兆</u>候を探す

- 水とオゾンの吸収が観測されるのは地球のみ
- 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(レッドエッジ)





ガリレオ探査機による地球上の生命探査

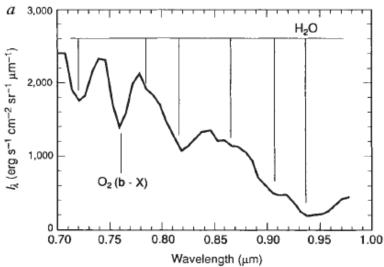
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の 地球スイングバイ時に地球 上の"生命探査"
- 地球には生命がいるらしい!
 - ▶大量の気体酸素
 - ■植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大 気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する"不 自然な"パルス状電波



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

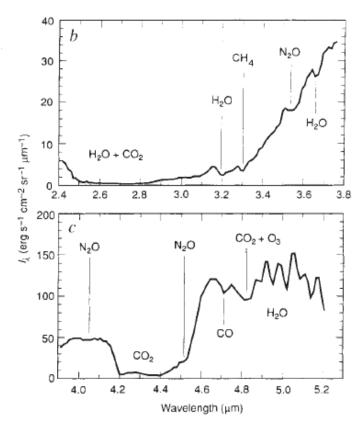
Sagan et al. (1993): 大気分光

ガリレオ探査機の観測した地球の可視光一近赤外スペクトル



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 relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b'\sum_g^+-X^3\sum_g^-)$ 0–0 band of O_2 at 0.76 μm is evident, along with a number of H_2O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O_2 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 v_3 CO $_2$ band is seen at the 4.3 μm , and water vapour bands are found, but not indicated, in the 3.0 μm region. The v_3 band of nitrous oxide, N_2O , is apparent at the edge of the CO $_2$ band near 4.5 μm , and N_2O combination bands are also seen near 4.0 μm . The

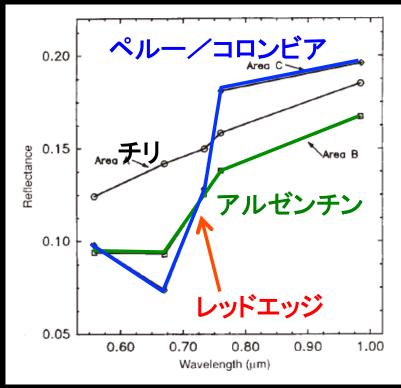


methane (0010) vibrational transition is evident at 3.31 μ m. A crude estimate¹⁰ of the CH₄ and N₂O column abundances is, for both species, of the order of 1 cm-amagate (\equiv 1 cm path at STP).

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

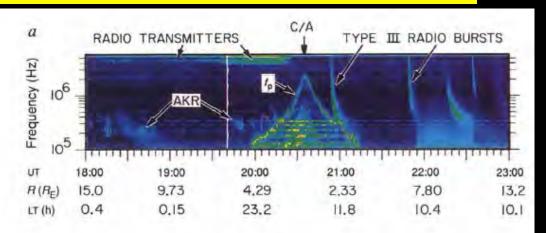


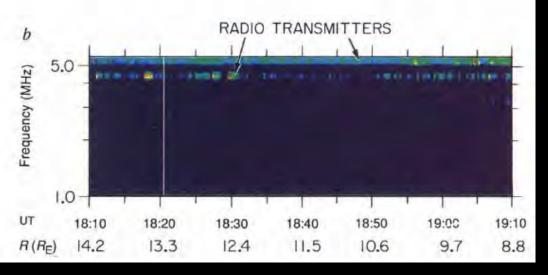


Sagan et al. (1993): 電波観測

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 $f>4\,\mathrm{MHz}$ 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.)





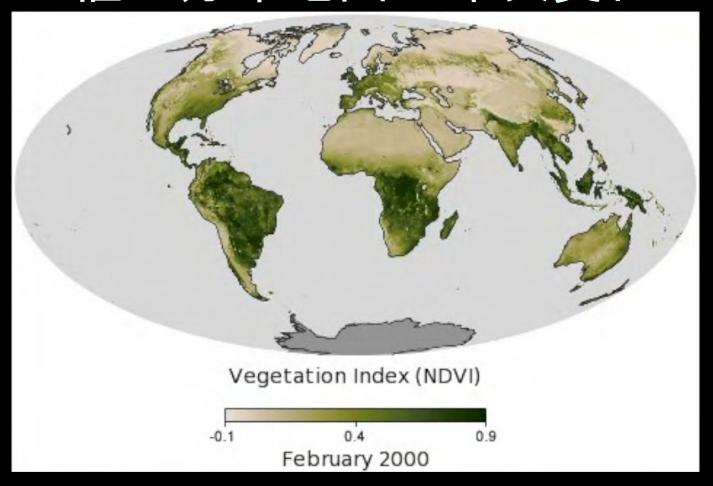
もうひとつの地球の観測

Earth at Night 2012



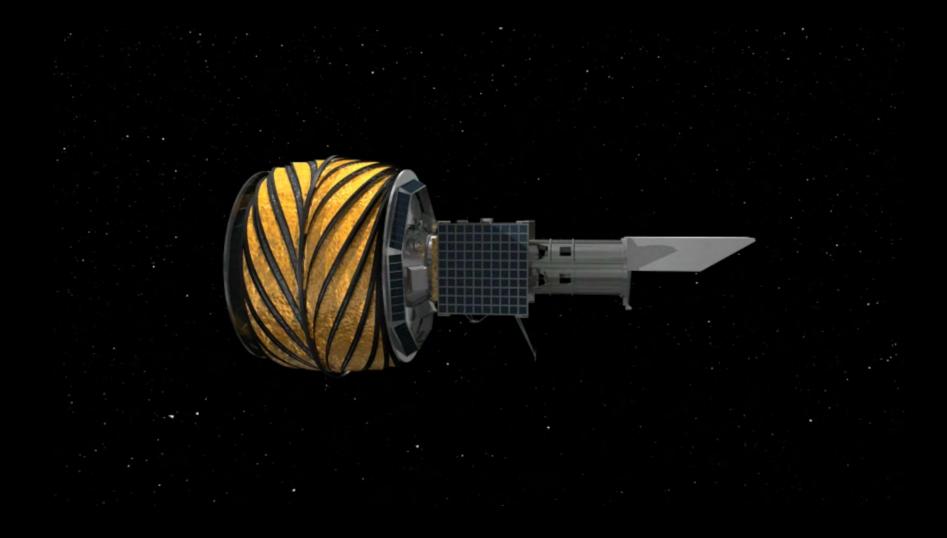
http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php

地球観測衛星Terraによる 植生分布地図の年次変化



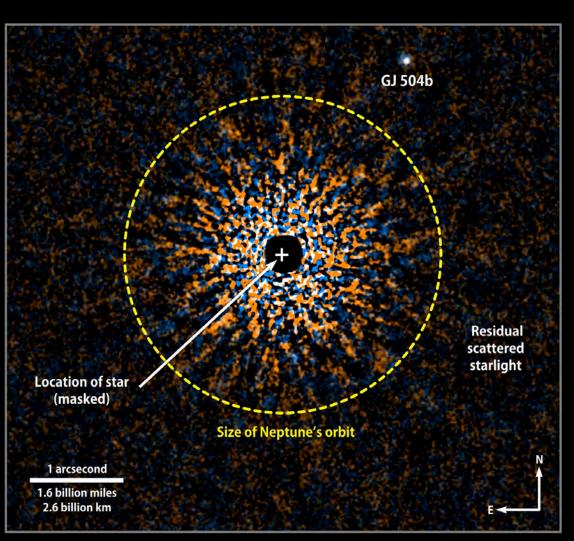
http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/

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)

すばる望遠鏡によるガス惑星GJ504b の直接撮像:コロナグラフ技術の進歩



- 57光年先にある 4木星質量の惑 星の初直接撮像
- Kuzuhara et al.ApJ 774(2013)11
- すばる望遠鏡SEEDSサーベイの成果
- 地球型惑星直接 撮像への第一歩

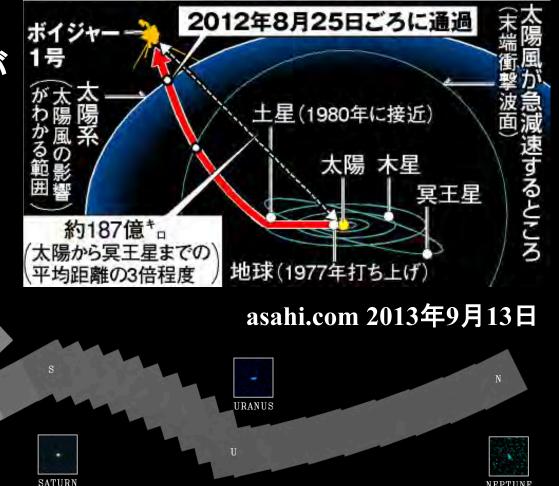
ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像

- 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

JUPITER

EARTH

VENUS



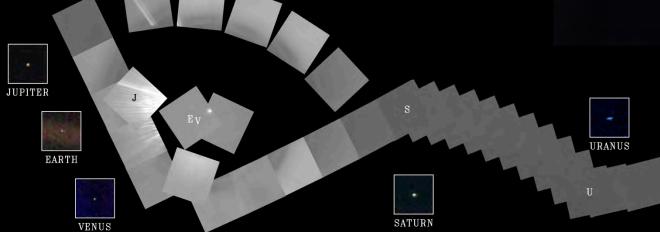
ボイジャー1号が太陽系を脱出するまで

ペイル・ブルー・ドット





NEPTUNE



ろ、この質問の正解は誰も知りませすか?」です。残念ながら今のとこ

私を含めて「実際に発見で

ばしば尋ねられるのが「宇宙人はいま

私が宇宙に関する講演をした後にし

ばからない人間は危なそうだ、 堂々と「宇宙人がいる」と言っては と答える天文学者はかなり多いこ と考え

に来ている」といった類いの話は、いよく耳にする「宇宙人はすでに地球 理学的な理由でそう思い込むことはあ 学的にはあり得ません(もちろん、 いった主張とは全く意味が違います。 ことがある」や「幽霊がいる」などと るでしょうし、信じること自体は個人 科学とは明らかに矛盾しています 長い歴史にわたって築かれてきた現代 た例は(少なくとも現時点では)何 ません。でもこれは、「宇宙人を見たのは当然です。むやみに信じてはな も曖昧で、科学的な事実に基づ ん。また、幽霊の存在は、

のことです

対して、宇宙人(すなわ

に発見できるかどうかは別の話です に宇宙人がいるとしても、それを実際 がその一例なのですから。ただし、本当 くありません。そもそもわれわれ人類命体)の存在自体は、科学的にはおかし ち、自分の星を飛び出して宇宙に進出 できるほどの高度な文明を持つ知的生 わが地球は、太陽と共に今から約46 ります

すことができるだけの高度な科学文明 年ほど前。さらに宇宙へ探査機を飛ば その祖先)が誕生したのは今から加万 を手にしたのは、わずかここm年以内 かしそれらが進化し、人類(あるいは約10億年後だと考えられています。し 原始的な生命が生まれたのはそれから 億年前に生まれました。地球で最初の とすれば、太陽系と全く同じ惑星系

わかりません。地球上の資源の枯渇程度安定に生き延びられるのかもまた (石油は今から⑪年以内に掘り尽くさ)は、宇宙人が存在する惑星系は発見で、直なところかなり不正確ですが1千兆わかりません。地球上の資源の枯渇、惑星系を1千方側以上も観測しなくて せん。ここで紹介した単純な推定は正 しかもこの現代文明がこれからどの

家が引き起こすかも知れない核戦争、えたくもないですが一部の愚かな政治 ような)高度な文明は必ず数百年程度 などなど。これらを考慮して、(地球の の病原菌による大量絶滅、さらには考 れてしまうという説もあります)、未知 しか存続しないとの悲観的な推定もあ 能です。

た1千万分の1に過ぎません。もちろは、46億年中の数百年、すなわちたったまたま高度な文明が栄えている確率 味深い二つの結論が得られます。 なのですが、ある意味では正反対の興んこの推定は単純すぎて極めて大雑把 が存在したとしても、この瞬間そこに 宇宙人の存在を確認するの

陽系のように生命を宿す条件を満たす は極めて難しいとの悲観的な見方。

土星から見た地球

きないというわけです。 発達した惑星」があってもよいことに 星系だとすれば、1千億個の1千万分 仮にそれらがすべて太陽系のような感 河には、約1千億個の恒星があります。能です。われわれが住むこの天の川縄 ところが全く逆の楽観的な解釈も可 すなわち1万個の「高度文明が

うな銀河が約1千億個あると考えられ 光年以内の宇宙には、天の川と同じよ かどうはさておき、この宇宙全体までています。とすれば、実際に観測できる さらに、われわれが観測できる路億 方文

目を奪われることでし

個は存在していることになります。 河系のどこかに「もう一つの地球」が1 倍楽観的過ぎたとしても、この瞬間、銀 なります。したがって、この推定が一

せん。ここで紹介した単純な推定は正独立な知的文明が存在するかもしれま 北個もの

> に宇宙人はいるでしょうか」との問い ってもらえるのではないで たくなる天文学者の気持ちが少しわか のように考えれば、この宇宙のどこか 個が口になることはなざそうです。こ していると思います」と答え

発見できる」とは全く違います。 太陽の光によって木澗れ日のように照星(の影)なのですが、それよりも、 が、太陽が土星に隠れて見えない位置 らし出された土星の輪の美しさの方に 図の左上にある4分の1の黒い円が土 困難さを教えてくれるのが上 から土星を向いて撮影したも といっても、「存在する」と「実際に 土星探査機カッ

した左下の図には、地球だけでなくそちわが地球なのです。その領域を拡大 の周りを回っている月までもがはっき しかしここで注目して欲しいのは、 います。

20日午前6時ごろに撮影されました 難であるかもまた明らかでしょう。 生命の証拠を見いだすことがいかに困か、この白い点上になんらかの文明や ですね)。とい カらしく茶目っ気溢れたキャンペ けて手を振っていたようです(アメリ **力人を超えるアメリカ人が、** 時間ほどかかる距離にあります) の瞬間(ただし地球と土星は光でも 航空宇宙局(NASA)が事前にこの これは、日本時間の20 のことを呼びかけたおかげで、 二探査機を運用して っても彼らの存在はおろ 土星に向 3年7月 いる米国 2

の太陽系外感星系は、いずれもこの土現在までに発見されている数千個も 見は、さらに桁違いに困難だと言わざ ます。したがって、宇宙人の観測的発距離(数十光年から数百光年)にあり 星から見た地球に比べて桁違いに遠いの大関系外見星系は、いずれもこの土

巡らせるだけでも十分楽しめることで そして文明が存在する「もうひとつ 言えません。多くの天文学者が、 像をじっくり眺めつつ、自由な想像を 変革が控えています。 は言えないでしょう。 っています。しばらくはまだ現実的と 地球」を発見するために日夜知恵を絞 ルの先には、途方もない世界観の大 とはいえ、「困難」は「不可能」とは 労は、 しかし 生命

(宇宙物理学者、東京大学教授)

HJM···http://www.jpl.nasa.gov/news/news.ph p?release=2013-229 http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details .php?id=PIAI7171

カッシーニ探査機が撮影した土星の輸と地球 ※写真左辺と下辺の矢印延長線が交差するあたりが地球

©NASA/JPL-Caltech =第2土曜掲載 と月 地球 (左)

新 聞 六年5月3日

土星から見た地球

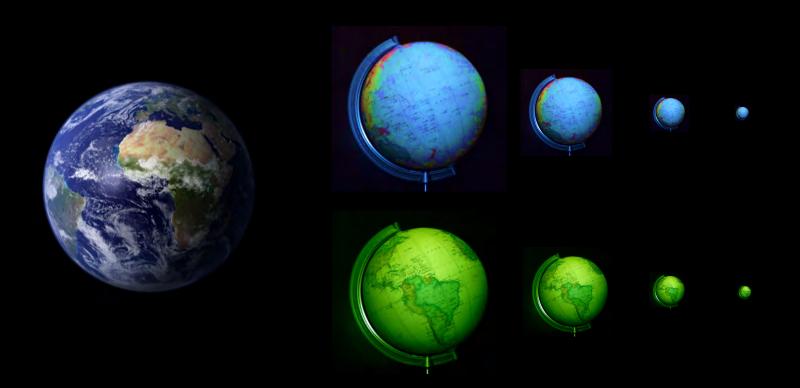
土星探査機力ッシーニが撮影した地球と月

■ 2013年7月20日(日本時間):2万人がこちらに手を振っている

View from Saturn (Cassini) 900 million miles away

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
- 表面を直接分解できない
- ■自転周期による微妙な色の変化は観測可能

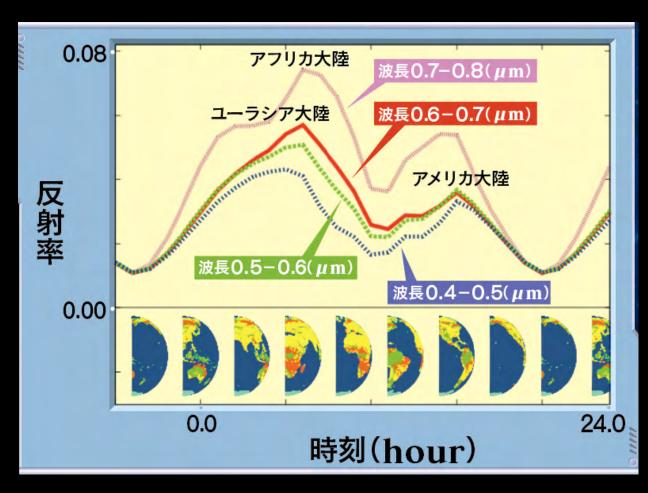


もうひとつの地球の色

■ 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

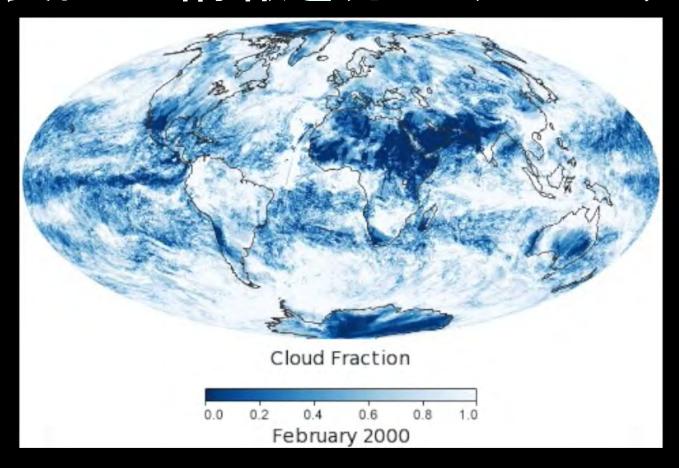


藤井友香 他(2010)





さらに厄介なことに雲の存在が地表面の情報を分かりにくくする



http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/

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



地球外文明はあるのか?: ドレイクの式

 $\mathbf{N} = (\mathbf{N}_{s} / \mathbf{L}_{s}) \times \mathbf{f}_{p} \times \mathbf{n}_{e} \times \mathbf{f}_{L} \times \mathbf{f}_{I} \times \mathbf{f}_{C} \times \mathbf{L}$

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

こある也求型惑星の胡寺直惑星の中で、生物が存在可能な

その知的生命が他の文明と交信をに



フランク ドレイク博士

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。

恒星の数

信を行う確率

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

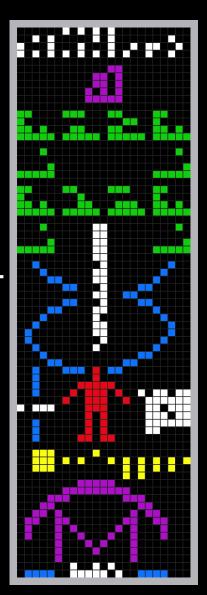
- バイオマーカーとして最も確実なのは、知的文明からの信号
- 1GHzから20GHzの電波(低周波数では銀河系のシンクロトロン放射、高周波数では地球大気が雑音)

■オズマ計画

■ 1960年、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

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

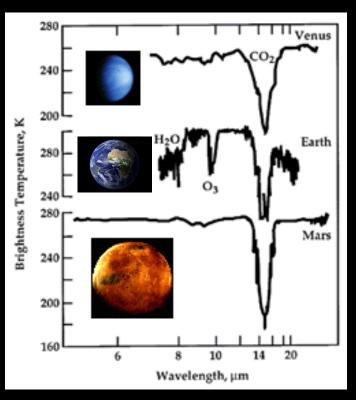
人間

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

まとめ

太陽系外惑星: そのさきにあるもの 一天文学から宇宙生物学へ一

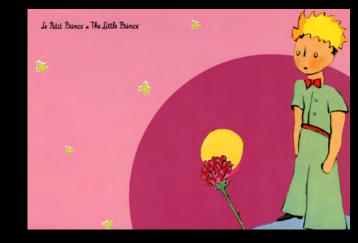


- ハビタブル惑星の発見
 - ■水が液体として存在する地球型惑星
- バイオシグニチャーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、植物、核爆発、、
- リモートセンシングの成否が鍵!
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトル を中心星から分離する
- 直接見に行くことができない系外惑星の表面組成・分布 を天文観測だけでどこまで推定できるか
 - レッドエッジは宇宙生物学に至る一つの道か?

予想もできない展開が待っているはず

- ■最初に起こるのはどれだろう
 - ■地球外生物の痕跡の天文学的検出
 - ■実験室での人工生物の誕生
 - ■地球外文明からの交信の検出
 - 地球文明の破滅(いったん発達した文明は、 自然災害、疫病、核戦争、資源の枯渇などの 要因で不安定)
- 交信できるレベルまで安定に持続した地球 外文明の有無を知ることは、我々の未来を 知ることに等しい

宇宙生物学の心「星の王子様」より



夜空を埋め尽くす無数の星々のどれかに咲く たった一つの花が好きになれたなら

夜空を見上げるだけで

とっても幸せな気持ちになれる

「僕の花がこの夜空のどこかにあるんだ」

と信じられるだけで