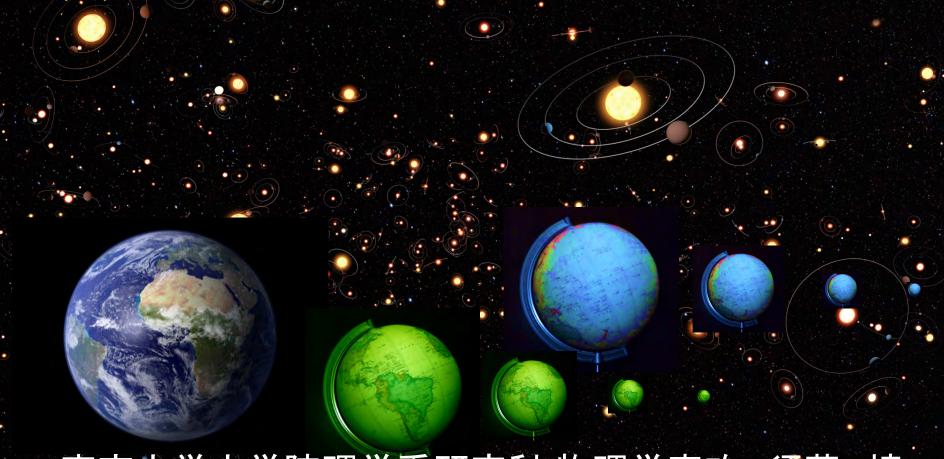
系外惑星系が拓く新たな宇宙観



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖 第82期 高知市民の大学「宙を見上げて一最新・宇宙を知る一」 @ 高知市文化プラザかるぽーと 18:30-20:00、2017年12月19日 ESO/M. Kornmesser http://www.eso.org/public/images/eso1204a/

自己紹介

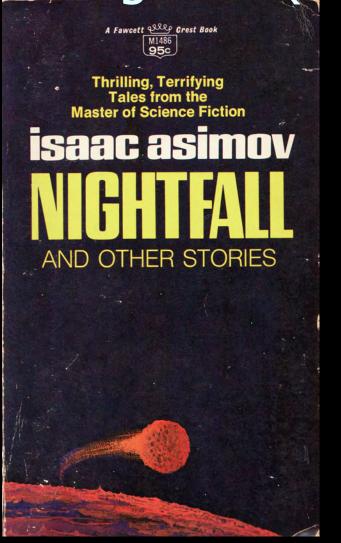
- 1958年 安芸病院で生まれる
- 吉良川保育園、吉良川小学校、伊尾木小学校、清水ヶ丘 中学校、土佐高校
- 1977—86年 東京大学理科一類、理学部物理学科、 大学院理学系研究科物理学専攻修士・博士課程
- 1986—89年 カリフォルニア大学博士研究員
- 1989— 茨城大学物理学科助手、広島大学理論物理 学研究所助教授、京都大学基礎物理学研究所助教授
- 1993—2006年 東京大学大学院物理学専攻助教授
- 2006年一現在 東京大学大学院物理学専攻教授
- 2009年-13年 プリンストン大学客員教授

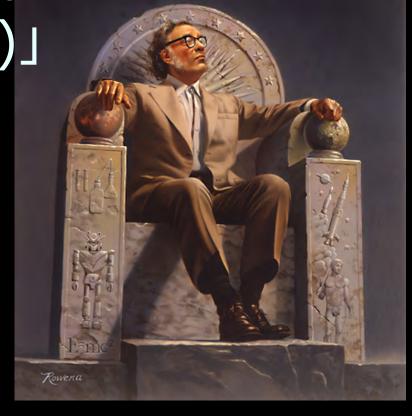
本日の話の概略

- 1995年、太陽以外の恒星に惑星があること が初めて観測的に証明された
 - それ以来、現在まで膨大な数の太陽系外惑星系 が発見されてきた
- つまり、この地球は宇宙においてとりたてて特別な存在ではない
 - とすれば、この地球以外にも、生物、さらには知的 文明を宿す惑星が、しかも無数、存在するのでは ないだろうか
- それらの存在を科学的に解明できるのか?

天文学と世界観

アイザック・アシモフ 著「Nightfall (夜来たる)」





Stars -- all the Stars -- we didn't know at all.
We didn't know anything.

「Nightfall (夜来たる)」の設定

- 6つの太陽を持つ惑星ラガッシュには「夜」がない
 - 空にはいつも一つ以上の太陽が昇っているため、いつも「昼」の明るさ
- 古来からの伝説によると、2049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のためであることがわかる
 - これから数時間で「夜」が訪れる時から物語が始まる
 - 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

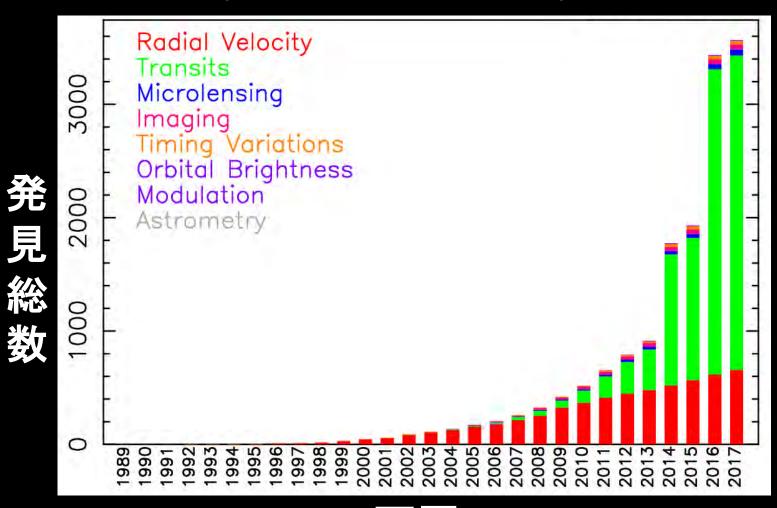
「我々は何も知らなかった」



その瞬間に彼らの世界観が一変した イラスト: 羽馬有紗 「我々は何も知らなかった」に気づくことこそ科学の本質

太陽系外惑星の発見

太陽系外惑星発見史



2016年6月時点では

西暦

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

系外惑星系についてわかってきたこと

- 惑星系の存在は珍しくなくあたりまえ
 - 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
 - ハビタブル惑星候補(水が液体として存在できる温度)
 - 地球よりやや大きい岩石惑星(スーパーアース)が多数
- 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



Livio & Silk: Physics Today, 2016 March

7名で集まり、

久しぶりのミニ同窓会

3月に帰省した際、中学校の同級生

光年離れたトラビスト

と名付けられ

地球は太陽の周りを一

靖 り来たる。亦た楽しからずや」 上経ちますが、お互いの顔を見るとあを楽しみました。 卒業後すでに40年以 他には代えがたいものです。遠くに住持ちになります。故郷、そして友達は っという間に昔に戻り、ほっとした気 んでいる私の立場から言うのは変では

か、もしそうならば実際に会ってみたれわれ地球人の朋が存在しているの さて同じく「広い宇宙のどこかにわ

地球は宇宙で稀な存在なのか、あるい回はその話題を通じて、私たちの住む そのような好奇心を満たすべく夜な夜 ず普遍的なものだと思います。 在なのかを考えてみましょう は全く逆に、ごくありふれた平凡な存 地球は宇宙で稀な存在なの な研究している怪しい人種の代表が天 という好奇心は、古今東西を問わ 年2月22日に発表されました。

今回発表されたのは、地球から約39

正確です(が区別せず使っている場合 食は、 星の名前なので、その惑星系をさす場 道院で作られたビー すが、実はベルギ もあります) の惑星系の中心星であることを意味 もかけているようです。 研究グループ その望遠鏡で見つかった第1番目 トラピスト 太陽と太陽系とでは意味が違う ル(もともとはトラピスト会修 トルの望遠鏡のニックネ トラピストーはあくまで中 トラビストとはベルギ が使っている口径60セン ルをさす名称)に で有名なトラピス トラビスト 場合 ています。その平面上に住んで

れて暗く見えるはずです。

ん。しかし、これはあくまで「大量の囲内にあってもおかしくはありませ

いずれも水が液体として存在しうる範

水が存在したとすれば」との仮定の上

かは全くわかっていません。さらに、の話で、それらに水が存在するかどう

期で太陽の前を通過(トラン っと観測し続けたと仮定します。

、遠方よ

が存在していることが結論されまし 明るさしかない小さく暗い星ですが、べて質量が12分の1で、2千分の1つ その周りに地球質量程度の七つの惑星 トラビストーは、私たちの太陽に比

できます

れぞれの惑星の公転周期と半径が推定 り返し周期と暗くなる度合いから、そるのです。このトランジット現象の繰 とで、この現象が起こったことがわ が、太陽がほんの少しだけ暗くなるこが直接検出できるわけではありません

ンジット現象と呼びます。左下図は2 するたびに、少しだけ太陽の光が隠さ 八つの惑星はほぼ同じ平面内を公転 「宇宙人」がはるか遠くから太陽をず 八つの惑星がそれぞれの公転周 また、地球に限らず太陽系の 年で公転して これをト いる と考えられています と同じく固体を主成分とする岩石惑星 日、20日となっています。 にこの方法で発見されました。それら らの半径はいずれも地球の〇・7倍か の系は太陽系に比べてはるかにコンパ の公転周期は、1・5日、 (地球型惑星とも呼ばれます)だろう このトラピスト1感星系をわが太陽 ・2倍の範囲内にあるため、地球 9・2日 2.4日 また、 つまり、こ

のです

それをさしてしばしばハビタ

ただしこれはかなり誤解を生む単語

確かにごく大雑把に推定す

素のフ

(居住可能) と呼ばれます。

液体の海として存在できる環境に またま水が蒸発もせず凍ることもなく いかと考えられていますが、少なくと

も現在は寒いため液体の水は存在

この地球だけ

惑星系の場合にはこのように惑星の影 トランジットした際の写真です。 系外 海王星の軌道が地球軌道の30倍もあり て内側からトラピスト16、 系と比較したものが上図です。 とてもこの紙面上にはおさまらないこ て、さらに、太陽系で最も遠くにある ています。太陽系の岩石惑星である水 金星、地球、 惑星系では、七つの惑星に対 トラピスト1hと名づけられ トラピスト 火星の軌道に比 トラピス

トラピストーの周りの惑星は、まさとを考えれば、

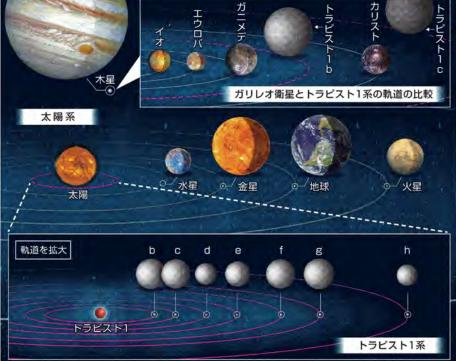
うな役割をして、惑星の表面温度が上 酸化炭素を持つと、それらが毛布のよ 布や布団を重ねると中は暖かくなりま 困難です。例えば、冬になるときに毛 惑星温度は正確に推定するのが極めて

同じく、惑星の大気が大量の一

七つの「地球」を宿す星

成によっては温度はずっと高いかもし ています。つまり、系外惑星の大気組で、地球の温暖化問題と密接に関係し がります。これがいわゆる温室効果

実際4月に発表された論文によれ



ガス惑星で、 人ではなく固体が主成分です。 オ・ガリレイが発見した四つで、 が、木星は自分自身では光つ 地球の卵分の

ル(全球凍結)状態になると報告され

ます。ど真ん中に位置している。

も寒すぎて惑星全体が凍るス

あったとしてもすべて蒸発する。 dでは温室効果が暴走的に起こり水は

ションを行なった結果、 それらの惑星における気象シミュ

f、 B、 hは温室効果を考慮して

☎太陽面を通過していく金星 (2004年6月8日午後3時35分ごろ、高知市の高知新聞放送会館屋上で撮影)

ピスト1惑星系と太陽系の比較

系外惑星、さらにはそこに生命が存在さて、このように続々と発見される

そこに水がある証拠は何もありません はハビタブルであり得るようです

まだ早合点は禁物です。

ます。そしてさらに特筆すべきは、陽系とはかなり異なる性質を持って 水があったとしても蒸発してしま 合、水星と金星は温度が高すぎるため のは液体の水の存在です。 命を宿しうる可能性で、その鍵となる 火星はかつて海があったのではな

です。木星の半径は太陽の10パーセンその衛星からなる系のほうに近いほど あることがわかります。むしろ木星と 系よりもずっとコンパクトな惑星系で ストと名付けられています。まとめて からイオ、エウロバ、ガニメデ、 見されていますが、有名なのはガリ せん。木星の周りには行個の衛星が発 トで、トラピスト1星とほぼ同じです カリレオ衛星と呼ばれるこれらの衛星 程度の質量で、 いない

系はわが太 ラストを数多く使用して説明する。 いった類です。私も同僚の先生から とするあまり、行き過ぎた表現が目立 ちがその発見をわかりやすく伝えようニュースです。その一方で、研究者た すね」と言われて、 「海をもつ惑星が発見されたら うる可能性はとてもワクワクする大 地球」が発見されたと記者会見を行 ような気がします。例えば 海や山がある惑星の表面の想像イ 1系では七つのハビタブ

このト

と、それから想像されることとは明確 これらは善意とはいえ、やはり科学 実際に確認されたこと

やないんですよ」と訂正したこともあ

大急ぎで

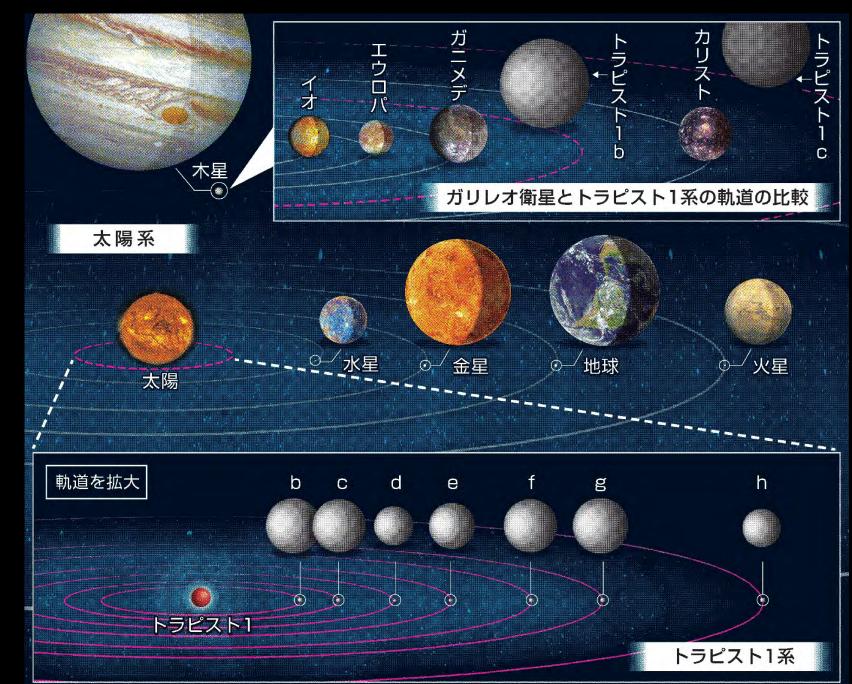
うかご安心を。 聞のこの連載は信用できますから、 にしてくださいね。ちなみに、高度に誇張された報道に騙されない はならないと思います 誤解を与えない努力を怠っ 書さ

宇宙物理学者、東京大教授、安芸

=第2土曜掲載

知 新 聞 年5月

ラピ



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	of small	planets in	the habitable zone
CONTRACTOR OF THE PROPERTY OF		7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	20 C G 2 C C C C C C C C C C C C C C C C C	THE PARTY OF THE PROPERTY OF THE PARTY OF THE PARTY OF THE PARTY.

HZ definition	a _{inner}	a _{outer}	$F_{P,inner}$	$F_{P,outer}$	f_{HZ} (%)
Simple	0.5	2	4	0.25	22
Kasting (1993)		1.37	1.11	0.53	5.8
Kopparapu et al. (2013)		1.70	1.02	0.35	8.6
Zsom et al. (2013)	0.38		6.92		26*
Pierrehumbert and Gaidos (2011)		10	1114	0.01	~50 [†]

Petigura, Howard & Marcy: arXiv:1311.6806

宇宙は地球で満ちている?

- 天の川銀河系内の恒星の数=1011個
 - その10%の10¹⁰個が太陽と似た恒星(G型星)
 - G型星の10%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=10⁹個
 - 観測できる範囲の宇宙内の銀河の数=1011個
- 宇宙内のハビタブル惑星の数=10²⁰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年前は完全なSF物語
 - 科学者よりも一般人が興味をもつ
- 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

リモートセンシング

我が地球の観測

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

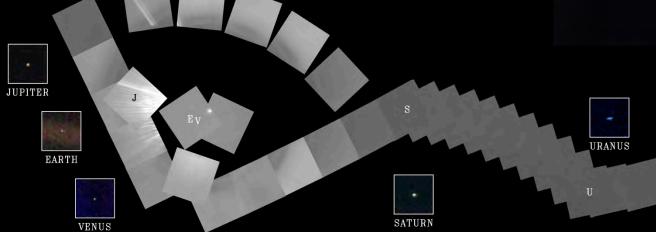
VENUS



ペイル・ブルー・ドット











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

靖

宙のどこかには存在していると思い きるかどうかは別として、この広い宇

ことがある」や「幽霊がいる」などと ばからない人間は危なそうだ、 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 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。 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 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 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

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 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 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、直など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 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。 宇宙人の存在を確認するの

能です。 きないというわけです。 なります。したがって、この推定が一 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

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 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1

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 に、存在 といっても、「存在する」と「実際に していると思います」と答え

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 北個もの 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 目を奪われることでし 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 の周りを回っている月までもがはっき 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 しかしここで注目して欲しいのは、 土星探査機カッ

20日午前6時ごろに撮影されました 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 います。 っても彼らの存在はおろ 土星に向 3年7月 いる米国 12

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 難であるかもまた明らかでしょう。 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

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

言えません。多くの天文学者が、生命とはいえ、「困難」は「不可能」とは 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 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 労は、 しかし

(宇宙物理学者、東京大学教授)

=第2土曜掲載 と月

土星から見た地球



※写真左辺と下辺の矢印延長線が交差するあたりが地球

地球 (左)

新 聞 六年5月

土星から見た地球

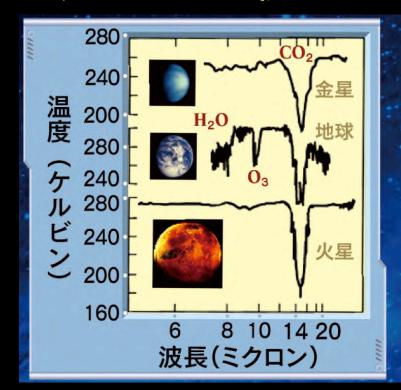
土星探査機力ッシーニが撮影した地球と月

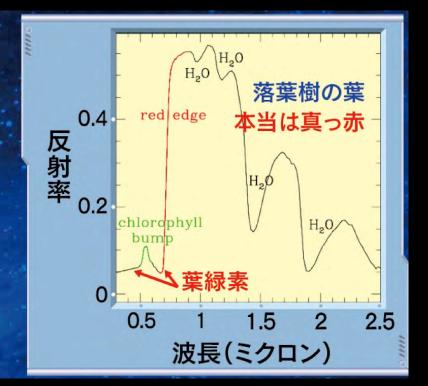
- 2013年7月20日(日本時間):2万人がこちらに手を振っている

View from Saturn (Cassini) 900 million miles away

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
 - ■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





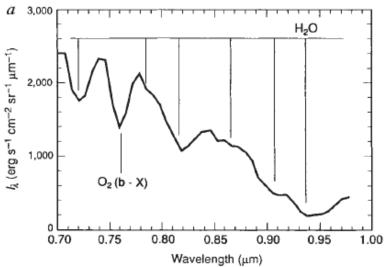
ガリレオ探査機による地球上の生命探査

- 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 Sagan, Thompson,中のメタンの存在量 Carlson, Gurnett & Hord:
 - 狭帯域で振幅が変化する"不自Nature 365(1993)715 然な"パルス状電波



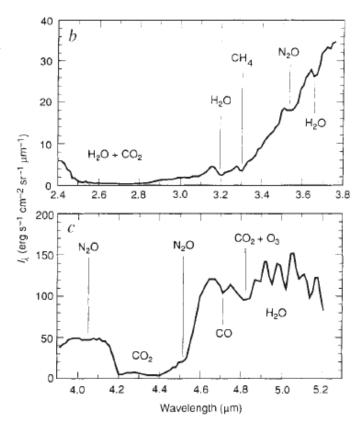
Sagan et al. (1993): 大気分光

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

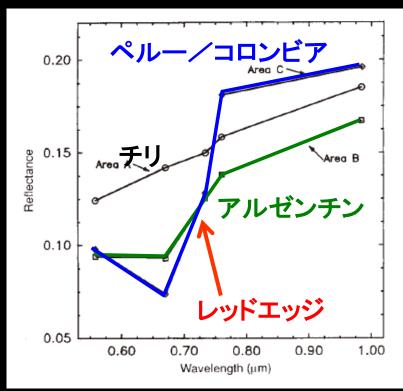


methane (0010) vibrational transition is evident at 3.31 μ m. A crude estimate¹⁰ of the CH₄ and N₂O column abundances is, for both species, of the order of 1 cm-amagate (\equiv 1 cm path at STP).

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

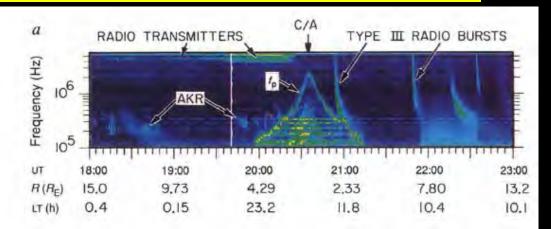


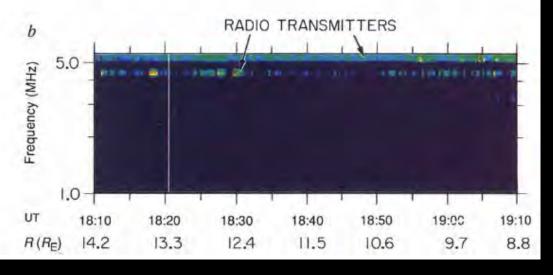


Sagan et al. (1993): 電波観測

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.)





リモートセンシング

もうひとつの地球の観測

Earth at Night 2012



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

以上の太陽が昇っており、人々ガッシュ」。おかげで空にはいつもて から伝わる神話によれば、ラガッシュ

す。天文学者たち(夜のない惑星にな入り「夜」を迎えることになっていま は約2千年ごとに真っ暗な洞窟の中に

フ 美しい青空です。その先に自分たちが 人々になったと想像してみてください。ラガッシュの空は、いつも明るく なっさて、ここで皆さんもラガッシュの 小説の始まりです。

夢にも思いつけません。つまり、自分知らない何かが存在しているなどとは のです。これから1時間後に訪れる たちは宇宙の中心にいる特別な存在な

の 「日食」は、ラガッシュを真っ暗間に するだけの恐ろしい出来事なのです。 するだけの恐ろしい出来事なのです。 されたのは、夜空を埋めだくす数方の量 されたのは、夜空を埋めだくす数方の量 たちがこの世界を今まで何も理解して 「星」というものを知り、直ちに自分

ッシュも、またそこに住む自分たちいなかったことに気づきました。ラガ も、この宇宙において特別な存在とこ

の割合はたかだか数パーセント程度で どこなのかわかりません。 安芸市はよほど注意して眺めなくて 高知市に集中しており、 ています。高知県もその光の大部分が 夜でも光って見える面積

積との比率と似て、 めたとしても宇宙の全質量の5 らは宇宙の全質量のわずかり で光り輝いているのは星ですが、 成り立つことが知られています 通の物質ではないのです。 からできている普通の物質をすべて集 の元素が星と同じく光り輝いているわ じく元素からできていますが、 ト程度でしかないこともわかって 以下に過ぎません。星はわ 全く同じことがこの宇宙についても 全面積と夜に光を出している面 つまり宇宙の5パーセントは普 いる地球上のすべての物質と同じ過ぎません。星はわれわれが

知らなかった」とつぶやきます。そしに。最後に主人公が「われわれは何も

ろか、全く平凡な存在に過ぎないこと

てそこで物語は終わります。

つまり続きはすべて読者の想像に任

定数」(宇宙全体を一様に満たして 働く未知の素粒子、ダークエネルで(元素)と同じく万有引力(重力) は光を出さないけれども普通の物質付け加えておくならば、ダークマター 拠です。ただし研究者の名誉のために からない名前がついている 思われた方も、どうぞご安心くださ はアインシュタインが提唱した「宇宙 人は今のところ世界中どこにもいませ この95 それらが何であるのか知って なんだか難しくなってきたなあと ーセントを占めているのが となり クエネルギー った訳の

に宇宙からみた夜の地球の姿を紹介したの連載では、地球から眺める夜空の

あることは実に幸運なことなのです

するための実験や観測が世界中で精力 はたまた全く間違っているのかを検証 そしてこの予想が正しいのか、 一)であろうと予想されて

天文学は明るく輝く天体を観測するに行われているところです。

か

いつもよく目にする世界地図と、こ

りかけてくれるのではないでしょう

ると、皆さんに様々なことを語

の画像です。この図もまたじつ

タから作成された夜の地球が

米国の気象衛星が、20

いと思いませ

然です。まばゆいばかりに輝いて見え地域がいかに偏っているのかが一目瞭 中国などの内陸部にはほとんど光 を消費している った」の顕著な例そのものと言えまった」の顕著な例そのものと言えまり、おわれは何も知らなかく、天文観測では直接検出できないダ 宇宙の主役は光っている天体ではな しかしその結果、

り深い基本的な謎が潜んで り自分は何も知らなかった われわれ人類は少しずつ賢くなって あらゆる科学に共通しています。 見えてくる。これは、天文学に限らず てその果てしなき繰り返しを通じて いた上で楽しく逝きたいものだと考え ある謎を解いた途端に、その先によ ることが

した。り、今年はいる。 いお年をお迎えください。 さて、 少し早いですが、皆様どうぞ良 今年の連載はこれで最後で

引き続きどうぞよろしくお願い (宇宙物理学者、 第2土曜把載 東京大教授

海にも広がっている光の大半は漁船

をは、

に夜がなかったら?」とまで考えたこ にそれを主題とした美しい短編小説で 舞台は、六つの太陽をもつ惑星「ラ 人はいないでしょう。アイザ 一年に発表し が皆既日食を起こす周期と一致してい ガッシュの内側にあるもう一つの惑星に一つの太陽だけが昇っている時にラ ぜ天文学者がいたのかは謎なのですが ることに気づきます。この予想が正し 世界を支配するダ あと1時間ほどで日食が始ま この言い伝えが、たまたま空







けを与えてくれるからで

というわけで、

わが地球に「夜」が

れるのは、まさにそれに気づくきっか

この小説が深い感動を与えて

の底に、本質的な謎や深い真理が隠れ ぎており疑問に思うことすらない事実 されているのです。あまりにも慣れ

ることがあります。直接見えて

四国近辺 鮮半島の北と南でこれだけ夜の明るさ 示しておきましょう。38度線を境に朝 が違うこと、韓国の南側かつ九州の西 るものだそうです。 ただしこの画像 気がつきますが、 これらは山火事によ リア内陸部に光が点在していることに リカ大陸、南米大陸、オーストバ、日本、中国の東側に対して、 の夜の世界地図とを比べてみると、 経済格差や漁業権の違いを如実に表 さらに四国付近を拡大したものを下 いうのもまた驚きですね)。 がありません(よくみるとオー る米国の西海岸と東海岸、 の地球上でエネルギ

22日間の観測デー

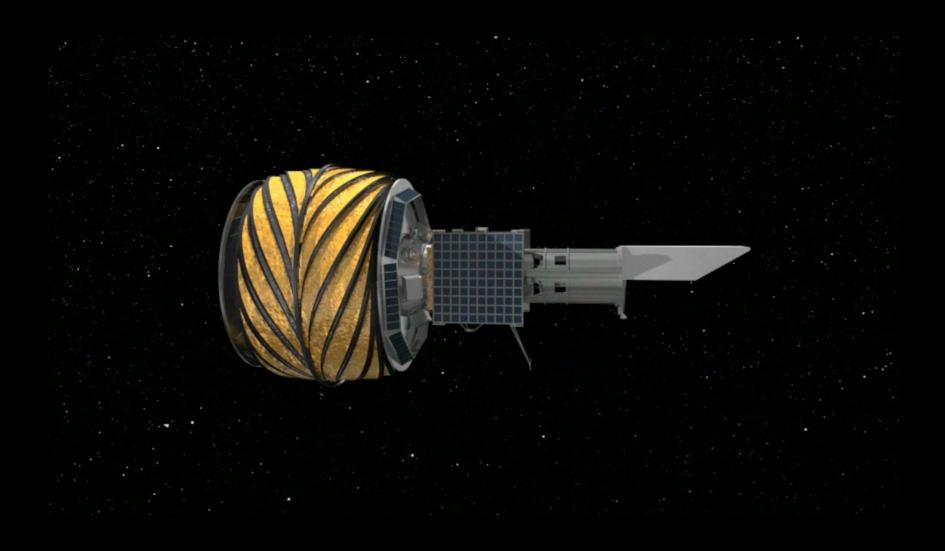
います。それにしても、

日本の感

別の日の山火事が同時に見

この図の日本付近を拡大したもの、

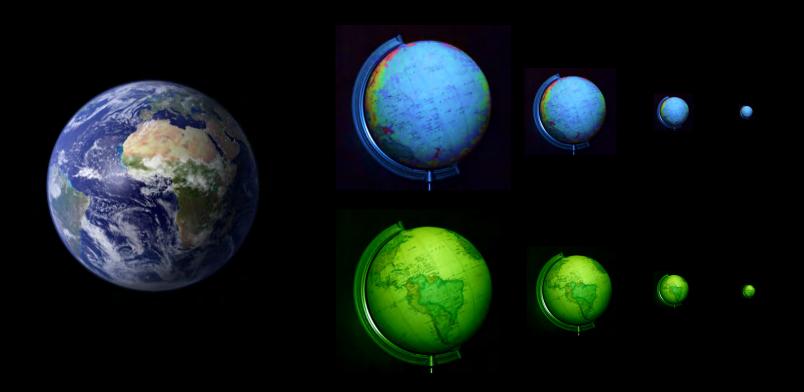
Starshade project: 地球型惑星を直接見る



■ 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

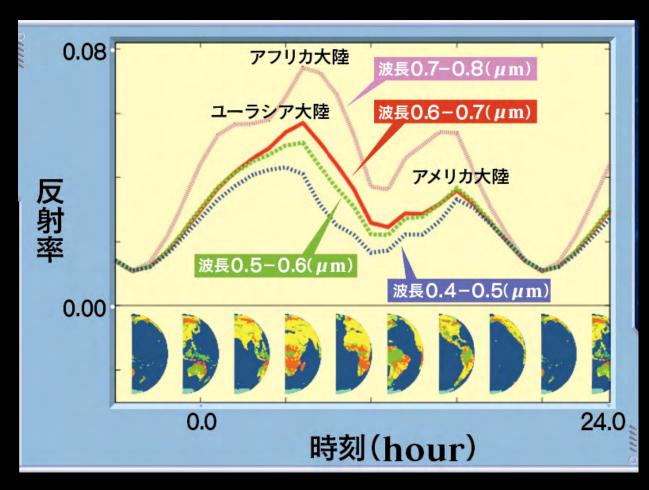


もうひとつの地球の色

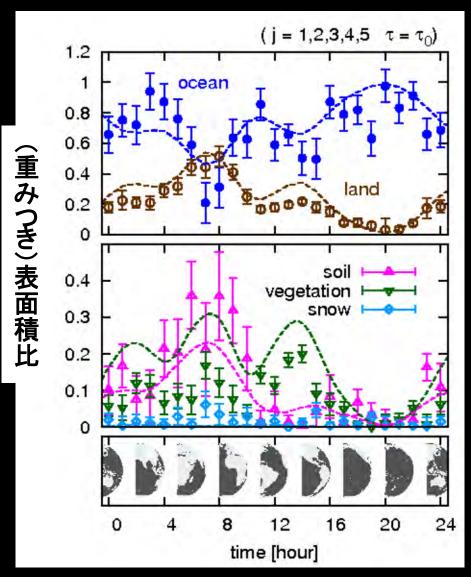
■ 自転にともなう地球の反射光の色の時間変化のシミュレーション



藤井友香 他(2010)



もう一つの地球の色を解読する

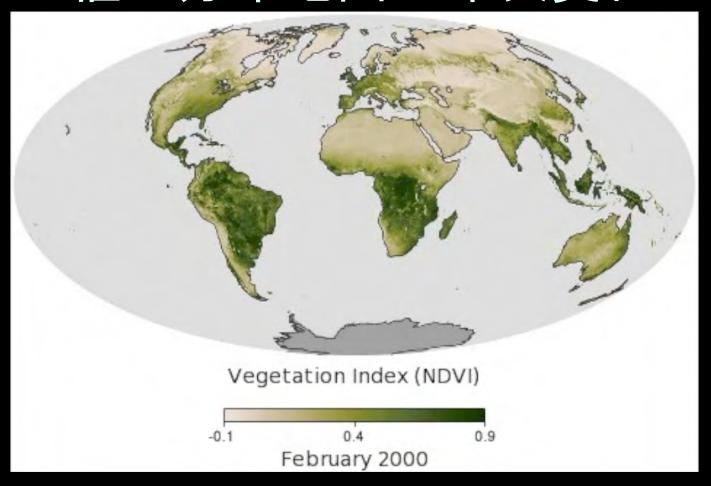


藤井友香ほか(2010)

- ■雲は無視
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc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、植物は難 しいという結論

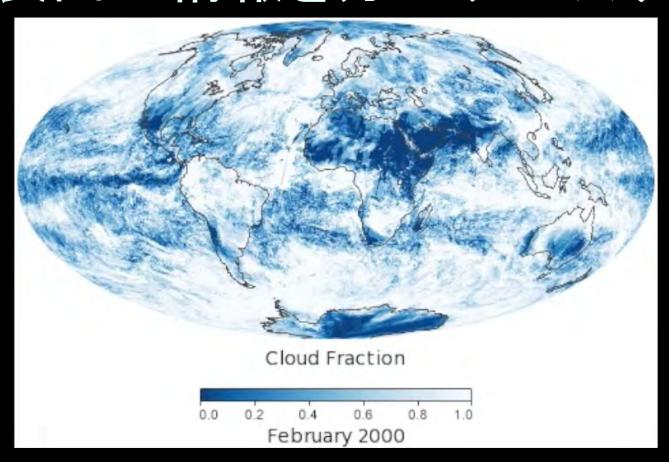


地球観測衛星Terraによる 植生分布地図の年次変化



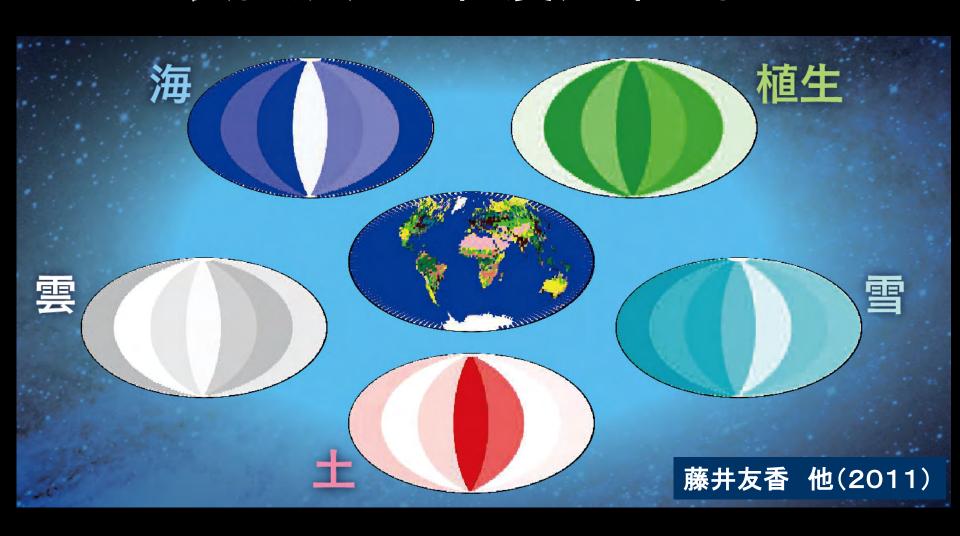
http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/

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



知的生命体探查

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- 実は、バイオシグニチャーとして最も決定的なのは、知的文明からの信号
- 1GHzから20GHzの電波(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)

■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

地球外文明はあるのか?: ドレイクの式

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

銀河系内(2あ) る交信可能な 知的文明の数

その恒星の寿命

ででは、一般を表現を作ってした。

その惑星の中で、生物が存在での惑星に生物が発生する強

その知的生命が他の文明-



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。

の数

(明の継続時間

うわけで、今回は、怪しい香りがプンくて読みたくないことでしょう。とい なくてはならない話など、 のはず。汗だくになりながら頭を使わされる今日は、よさこい祭りの最終日 目な科学的話題をお届けしましょう するものの、本当はとっても真面けで、今回は、怪しい香りがプン うっとう

じような生命、さらには高度な知的文いるならば、そのなかには、地球と同 いるならば、そのなかには、地球と同外惑星系がこれほど普遍的に存在して 程度の惑星系が発見されています。 995年の初発見以来現在に至る われわれの太陽系の外に5千個

バイオニア探査機に搭載された金属板

ボイジャー探査機に搭載されたレコード監

明を宿す惑星が存在すると考えても決

宇宙人

しておかしくはありません(ただし

易に信じてその話に耳を傾けることは お勧めしませ と鼻高々に語る人がいたとしても、 「自分は宇宙人と会ったことがある」 遠くの天体に に何らかの生物の兆候を

しには説明が難しい

毎日アツイですね。この配事が掲載

のも確かです 探すことは、天文学者が秘めた野望の が出ない可能性が高い)テーマである で、研究者にとってハイリスク・ハイ つです。 ンな(言い換えると、 ただしそれは極めて挑戦的 全く成果

酸素が存在します。これは生物の光合例えばこの地球の大気には、大量の 成の結果だと考えられています。

> の発酵によるものです。つまり生物な 大気中のメタンのほとんどは、微生物 は私は系外惑星の表面を大量に覆う植 大量の酸素やメタンが検出されたなら 遠くの惑星の大気成分を詳しく調べ 物の葉っぱの存在を検出できない いる可能性が高いと結論できます。実は、そこになんらかの生物が存在して のです。 同様に 野心的というか、超ハイリスク・ 同じく緑色であるかどうかもわかりまし、系外惑星の植物の葉っぱが地球と 生物由来である厳密な証明は困難です 交信信号を検出しようという、さらに 法ではなく せん。そのため、このような地味な方 ーンな試みも古くからなされてい

がもう少し進歩すれば実現可能な方法

これらはいずれも、現在の観測技術

ではあるものの、

信によって飛躍的に この地球の文明は電磁波を用いた交 進歩しました。

されたとしても、地球と同じく本当に 酸素やメタンが検出 磁波は周波数が低いほど物質に邪魔さ

数範囲の電波を用いています。このた はロ・7から3・5ギガヘルツの周波 皆さんがお世話になっている携帯電話 く電波を用いることでしょう。実際 へ信号を送るとすれば、可視光ではなす。そのため、仮に地球外生命が地球 れず遠方まで届くという性質がありま 地球外知的生命体探査)は、電波天文 60 ATTR いわゆるSET 米国電波天文台にいたフラン Terrestrial Intelli (Search for

たものの大きな反響をよびま 号が紛れ込んでいないかを調べまし文明の証拠となりうる規則的な電波信 鏡を、 日6時間、口径26メ ク・ドレイクは、4カ月にわたって毎 (もちろん) 信号の検出はできなかっ 波数1・42ギガヘルツ)帯に、高度な イプシロン星の方向に向け、中性水素 これはオズマ計画と名付けられ くじら座タウ星とエリダヌス座 マス・ピアソンは、 研究を添

より最近では、20

5年2月、

いて議論さ

ビッド・パッカー から2004年まで公的研究費に頼ら たちから多額の個人献金を得て、 クロ・ソフトの創始者の一人であるポ の一人であるゴードン・ムーア、 反対運動の結果、米国航空宇宙局は893年に一部の科学者たちからの激しい 行できる機関として非営利団体SET と共同しつつ独立にSET した。そのためピアソンは、 研究所を設立しました。ところが、 ル・アレンたちに代表される著名 研究 それにインテルの創始者 に対する研究費を中止しま -ドの創始者であるデイ

は

将来の地球文明を滅亡させかねな の存在をわざわざ教えてしまう

い極めて軽率で危険な行動だというわ

事をもらう方が手っ取り早いのでは、 ではなく、地球から四万八方に信号を 額3千万ドル近い寄付をしました。 ずフェニックス計画を遂行 アレンはSET 特定の天体からの信号を探査するの それを受信し トで考えて約3億円にな た知的文明から返 研究所に対して総 たさいね に気がつ

高度な地球外文明からの たものです 宙への初めてのメッセージを絵で表した=右上図。これは地球の人類から宇 ア10号・11号に金属板を取り付けまし 国の惑星科学者カール・セーガンは、 と考える人もいるかもしれません。 に打ち上げられた宇宙探査機パイオニ の左上 レイクとともに、72年と73年 の方にあるのは、中性水素

になっています。 太陽系が描かれ、パイオニア探査機が線として描かれています。最下部には 男女の後ろにパイオニア探査機の板 が放射する21センチメー 地球から木星を超えて太陽系を脱出す (この説明は難解なので省略します さらに当時知られていた14個の ションであることがわかるよう (中性子星) の位置が放射状の ル線を表

音、音楽、55カ国語の挨拶などが収めれ、そこには15枚の画像、多くの自然 レイクは、74年11月16日、プエル し打ち上げられたポイジャ 同様にレコー **车**図。 - ド盤が搭載さ

科学者も多く 知的文明が存在することを訴えたも 太陽系、望遠鏡に関する情報が含まれ 13に向けて電波信号を送りました。こら、約2万5千光年離れた球状星団M から10までの数字、DNA、 はアレシボ・メッセージと リコにあるア ただし当時からこれに反対する 左図。これは、 レシボ電波望遠鏡か

友好的である保証など全くありませば、「彼ら」がこの地球文明に対して 害であるとはいえ、同時に無意味でも 存在しなければ、そのような試みは無めました。そもそも地球外知的文明が なされるべきだという意見が大勢を占 な、 れ、地球外文明へ向けて信国科学振興協会会合にお 地球外文明へ向けて信号を送る行 とすれば、「彼ら」に「善良な地球 十分議論を尽くした上で慎重に 仮に本当に存在したとすれ

よっちょれよ、 よっとして今晩のよさこい祭りにも 存在する証明はできませんが、 研究に真剣に取り組んでいる研究者が 画のなかだけの話だと思われるでし れ込んでいるかも。 いたとしても全く不思議ではありません。 ひょうとしても全く不思議ではありません。 ひょうしん いるのも事実です。さらに、「彼ら」 しく踊りまくる「彼ら」がこっそり SET すでに50年以上も前から、 是非とも親睦を深めてあげてく いたら、この地球の将来のた はあくまでもSF小説や映 よっちょれよ そんな怪しい団体

(宇宙物理学者、東大教授、安芸市出身) 第2土曜掲載



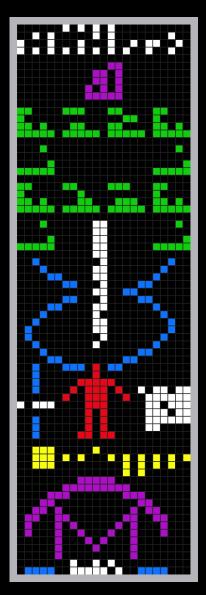


) から10までの数 (2進法)

新 聞

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、 「もしあれば十分検出可能」な時代になって いる

プロキシマ ケンタウリ b

それを実際に確かめることは極め

- 大の第2回「土星から見

ロキシマ・ケンタウリの周りのハビタ っとするとあまりに悲観的すぎたかも ブル惑星の発見です。 科学雑誌ネイチャーで発表され 違っているとまでは言えずとも、ひょ しれません。そう思わせてくれたの 2016年8月25日にイギリスの ンタウルス座アルファ星という名

るもっとも明るい星で、地球からもっれません。これはケンタウルス座にあ ばそう見えなくもないのですが、 昔の 読みだそうです。 確かにそう言われれ 想像上の動物ケンタウロスのラテン ケンタウルスは、ギリシャ神話に登場 前を聞いたことがある人がいるかもし とも近い恒星として知られて 人たちは想像力が豊かだったのでしょ 人間で下半身が馬に似た

> 5倍の明るさの伴星Bは、お互いに約陽の1・5倍の明るさの半星Aと、0・ 80年の周期で公転しています。これら 異なる星が重なって見えています。太実際には、このアルファ星は三つの は肉眼でも見える明るさなのですが いに近すぎるので双眼鏡あるいは ます ロキシマは「もっとも近い」 では観測できません すなわちプロキシマがわれわれからも 味のラテン語で、まさにこの伴星で、 単にプロキシマと呼ばれています。 っとも近い星であることに対応して ただしプロキシマは、太陽の 以下の明るさでしかなく という意

在プロキシマ・ケンタウリ、あるいは の伴星Cを発見しました。これは、現の周期でゆっくりと公転するもろ一つ がら高知からは見えません)。 することはできません(ちなみに、ケ望遠鏡でなければ二つを分離して観測 このAとBの周りを約00万年 南アフリカの に興味を持って観測を続けてきまし 惑星があるかどうか、天文学者も大い然、このケンタウルス座アルファ星に 約4・32光年、プロキシマは約4・25 主星Aと伴星Bはいずれも地球から ら数百光年先にありますから、 4年間で行き来できます。 現在知られ 光年の距離にありますから、 比べると圧倒的に近いのです。当 る太陽系外感星系の多くは数十か 光なら約 それら

ネスが、

天文台で観測をして

いたロバ

り年に、

たと考えられています たため、現在ではその発見は誤りだっかしその後の追観測で確認できなかっ 報告がなされたことがありました、 と同程度の質量の惑星を発見したとの た。2013年に伴星Bの周りに地球

う意味ですが、木星探査機ポイジャーう意味ですが、木星探査機ポイジャー イル・ブルー・ドット」にちなんでい 1号が撮影した地球の有名な画像「ペ ぶ観測を続けてきました。 プロジェクトを立ち上げ、数年間に及 ル・レッド・ドットという名前の共同 でした。そこで研究グループは、 発見したと断定することはできませ まず13年にその兆候が見つかりまし 今回のプロキシマの周りの惑星は しかし、その信号はとても小さく

タブル惑星はいずれも大量の液体の水 学者が取り組んでいる難問です。 いません。天文観測から遠方の惑星 測ができるようになるかもしれないの ロキシマトの場合、 表面に海があるかどうかを知る方法は といっても、プロキシマものみなら 現在知られて われわれにもっとも近いこのプ これは私を含めて多くの天文 もっと直接的な観

ていますが、本当かどうかは不明で 学者になることをあきらめたと言われ 理論物理学の博士号を取得しま. が与えられるプレイクスル 富豪として知られている、ユー に偉大な貢献をした研究者達に対 基礎物理学、生命科学、数学 (そこで周りにいる秀才たちを見ず ロシア出身のベンチャ それぞれ毎年総額3億円もの賞金 ずれにせよ、彼は積極的に科学 は、カリフォルニア工科大学で しています。例えば 投資家で大 賞を設立

ングとフェイスブック創立者のマ 計画です。その計画の理事には、 ス座アルファ星に超ミニ探査機を送る のうちの一つがプレイクスルー 科学的・技術的検討を目的としたプ リスの物理学者ステ ロジェクトを立ち上げました。 ・ザッカーバーグも名前を連ねていま ショット計画と呼ばれ、 彼はさらに15年、地球外生命探査の のテーマからなっていますが、 ・イニシャティブというブ ラン・ホ ケンタウル

星のすぐ近くまで到達し、 ×4 Mの帆に結びつけ、地上の施設か 修の探査機の主要部です ル四方のサイズにカメラ、コンピュー bなどを撮影した写真を地球に向けて - 速度にまで加速します。 スターチップとは、2センチメー 約20年でケンタウルス座ア ザーなどを搭載 それを45 プロキシマ した数

そのようなほどよ その結果を直接見られるかもしれませ マbを撮影、さらにその4年後には地後に打ち上げ、その20年後にプロキシ だと考えられています。 のために、ミルナ の開発期間と1兆円以上の経費が必要 だ存在していません。その検討と開発 んでいる中学生、高校生の皆さんは とはいえ、これはすべてあくまで理 べてが順調に進めば、 の話で、それを実現する技術はま いますが、最終的な完成には20年 タが届きます。この記事を読 今から20年

天文学者たちは、

のでしょうか。 (宇宙物理学者、東京大学教授) =第2土曜掲載

ん。果たしてそこには何が写っている

番近い星に生命が?



チリにあるヨーロ " パ南天天文台から見るケンタウルス座アルファ星 出典…http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629

> あることを突き止めるのです。 の速度が周期的に変化していることか 果という現象の応用です)。そして、 す(詳しくは説明しませんが、 るのか陸があるのか観測することは不にしか見えません。その表面に海があ の量はその大きさがわからない に近づいてくるときと遠ざかるときと に対して動く速度を測ることはできま この名前からもわかるように、遠方 この方法で発見されたプロキシマb その星の周りを回っている惑星が ただし、 の音が異なるドップラー その星がわれわり

度(つまり蒸発もせず、また氷でもな在するならば液体でいられる適度な温 くであってもプロキシマbは、水が存 度の明るさしかないため、 れていません。しかし、すでに述べ 陽の距離のわずか20分の1 で、主星とプロキシマbは、 質量をもつ岩石惑星だと考えられて 惑星がある場合には、c、d:をつけて名づけられます。もし さっにプロキシマは太陽の50分の (惑星はその主星の名前の後に にあるものと推定されて さらに公転周期は約 地球の1・3倍程度の 程度しか離 もし複数の

むことができる」だろう、というわけ保っていられる温度をもつ惑星は「住 考えられています。そのために、海を たのかはわかって の大部分を液体の水である海に覆わ ル惑星と呼びます。これは「住むこと い温度をもつ惑星のことを、 し地球のあらゆる場所に広がった ます。地球の生命がどこで誕生 われわれの地球は、 ませんが、 その表面 ハビタブ

プロキシマケンタウリ

Alpha Centauri AB

THE SUN'S CLOSEST NEIGHBORS

WISE 0855-0714 (distance 2014)



Proxima Centauri

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

Alpha Centauri AB

- ► 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a 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)

そこへ直接超ミ二探査機を送るスターショット計画が検討されている

) 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

- ■ロシア出身のIT投資家ユリ・ミルナー(素粒子理論が学位取得)が地球外知的生命を探査するために、2015年7月20日に立ち上げた
 - 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検討

ブレイクスルースターショット

http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3

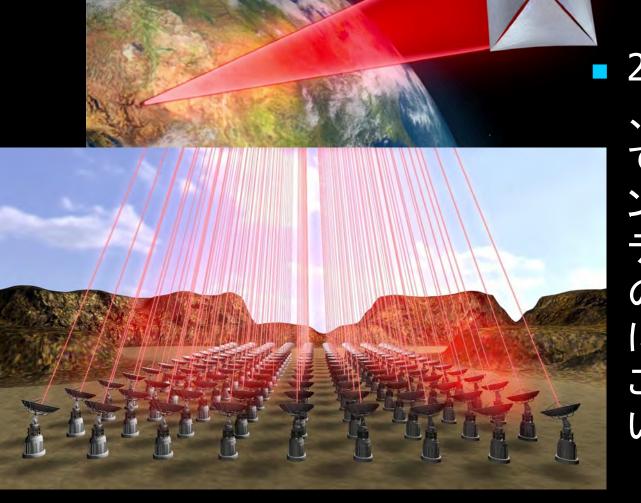
- **■** スターチップ
 - 2cm x 2cm、数グラムで、カメラ、コンピュータ、通信 用レーザー、燃料装置を搭載したチップ
 - 4m×4m の帆に結びつけられ、それが地上からのレーザー光を受けて、約10分で光の20%の速度にまで加速される
- プロキシマ ケンタウリに1000個のスターチップ を次々と飛ばす。約20年で到着する
- ただしこの技術はまだ存在しておらず、完成まで に今から20年の研究開発が必要

スターチップ





地上のレーザーで光速の20%に加速



20年後に打ち上げ 、さらに20年かけ てでプロキシマケ 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?

まとめ

今から50年後の世界?

- 科学・技術は驚くべきスピードで世界を変える
 - 子供の頃には、スマホ、インターネット、ロボット、自 動運転などはSFどころか、想像すらできなかった
- 今から50年後には、今の我々が決して予想できない世界が確実に実現する
 - 自動翻訳(外国語教育は不要)、労働の完全AI/機械化、天災の制圧、脳とコンピュータの完全接続、不老不死、地球外知的文明との遭遇
 - 高知県の消滅、核戦争や未知のウイルスによる人 類絶滅、ホモサピエンスに代わる新人類の台頭
- 現在の倫理観、価値観、世界観が一変する

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