

宇宙はどこまで解明されたか

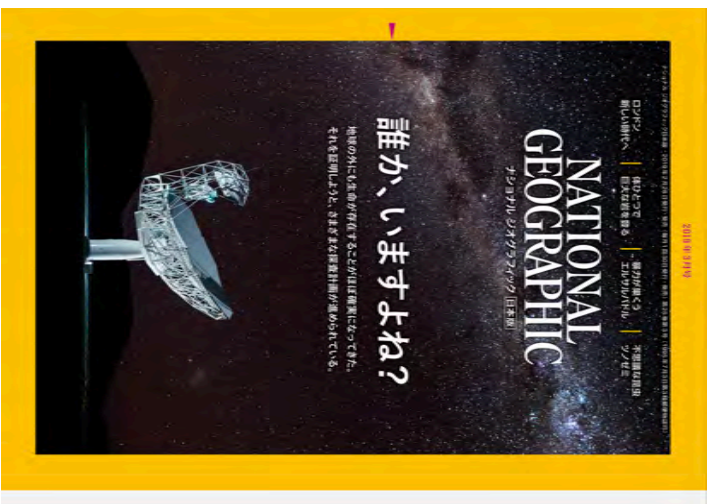
4月25日 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何か先か？
 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？

真貝寿明 (しんかい ひさあき)

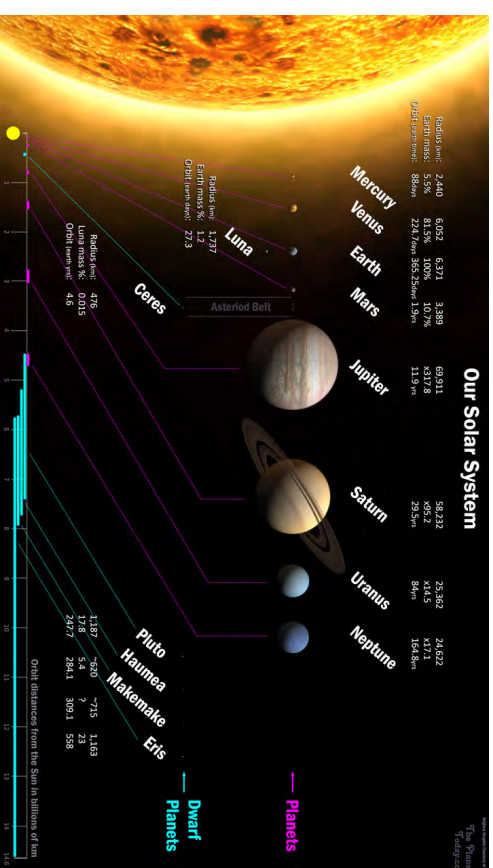
大阪工業大学 情報科学部 教授
 武庫川女子大学 非常勤講師
 理化学研究所 客員研究員



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



太陽系 惑星・準惑星



水金地火ケ 木 土 天海冥ハロエ

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」 第2回 | 太陽系外惑星探査 https://www.theplanetstoday.com/solar_system_map.html 3

太陽系の惑星と準惑星

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

天体名	Sun	a[AU]	周期 [年]	離心率	半径 [km]	質量 [kg]	分類
太陽	Sum	-	-	-	696000	-	-
水星	Mercury	0.39	0.24	0.21	2440	3.3×10^{23}	岩石惑星
金星	Venus	0.72	0.62	0.007	6052	4.9×10^{24}	岩石惑星
地球	Earth	1.00	1.00	0.02	6378	6.0×10^{24}	岩石惑星
火星	Mars	1.52	1.88	0.09	3396	6.4×10^{23}	岩石惑星
木星	Jupiter	5.20	11.86	0.05	71492	1.9×10^{27}	ガス惑星
土星	Saturn	9.55	29.46	0.06	60208	5.7×10^{26}	ガス惑星
天王星	Uranus	19.22	84.02	0.05	25599	8.7×10^{25}	ガス惑星
海王星	Neptune	30.11	164.77	0.009	24764	1.0×10^{26}	氷惑星
ケレス	Ceres	2.77	4.6	0.08	474	9.5×10^{20}	-
冥王星	Pluto	39.54	247.80	0.25	1151	1.3×10^{22}	-
ハウメア	Haumea	43.03	282.29	0.197	楕円体	4.0×10^{21}	-
マケマケ	Makemake	45.35	305.45	0.163	??	$4.0 \times 10^{21}?$	-
エリス	Eris	68.05	305.45	0.163	??	$1.66 \times 10^{22}?$	-

今年も、月面着陸から50年
太陽系惑星探査：NASAによる月・火星探査



1960年代半ばから1970年代半ばにかけて、65回の月面着陸
 初めての月面着陸は1969年7月20日で、アポロ11号のNeil Armstrong (1930-2012) と
 Buzz Aldrin (1930-)、
 最後に月面を歩いたのは、1972年12月に月に到着したアポロ17号のEugene Cernan
 (1934-2017) とHarrison Schmitt (1935-)。

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第2回】太陽系外惑星探査 2019/5/23 毎日文化センター(株) 5

That's one small step for (a) man, one giant leap for mankind.



I'm, ah... at the foot of the ladder. The LM footpads are only, ah... ah... depressed in the surface about, ah.... 1 or 2 inches, although the surface appears to be, ah... very, very fine grained, as you get close to it. It's almost like a powder. (The) ground mass, ah... is very fine. いま着陸船の脚の上に立っている。脚は月面に1インチか2インチほど沈んでいるが、月の表面は近づいて見るとかなり...、かなりなめらかだ。(ほとんど)粉のように見える。月面ははつきりと見えている。

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

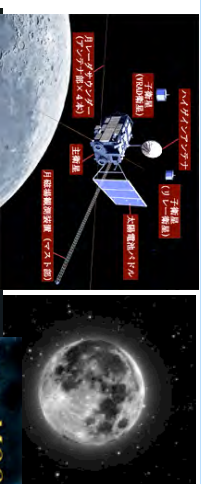
That's one small step for (a) man, one giant leap for mankind.

これは一人の人間にとつては小さな一歩だが、人類にとつては偉大な飛躍である。

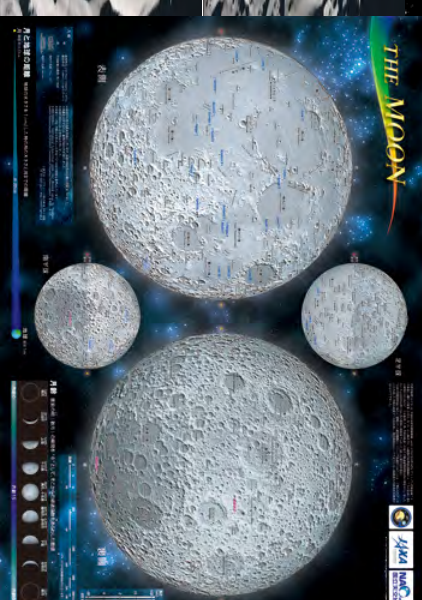
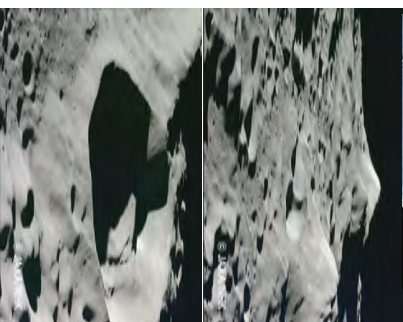


真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第2回】太陽系外惑星探査 2019/5/23 毎日文化センター(株) 6

月探査機かぐや (2007-2009) による月面撮影



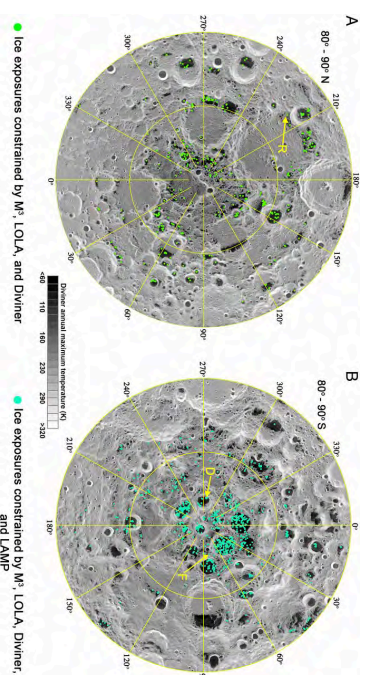
<http://wms2.wms.selenedarts.isas.jaxa.jp/>
<http://www.kaguyajaxa.jp>
 月の裏側はでこぼこ。
 「海」がない。



真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第2回】太陽系外惑星探査 2019/5/23 毎日文化センター(株) 7

**【ニューズ報道から】 Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions
 月に水がある!**

2018/8/29



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

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

<https://doi.org/10.1073/pnas.1802345115> <https://wired.jp/2018/08/29/moon-water-evidence/>

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第2回】太陽系外惑星探査 2019/5/23 毎日文化センター(株) 8

太陽系惑星探査：NASAによる火星探査



火星の大気は 95% が二酸化炭素。大気圧は地球の 0.75%。気温は最高 20°C。重力は地球の 40%。



キュリオシティが着陸直後に撮影した火星表面の(ペ)ロラ写真。
2012年8月13日 NASA

真田寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第26回】太陽系外惑星探査

2019/9/23 毎日文化センター(編印)

9

太陽系惑星探査：NASAによる火星探査

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

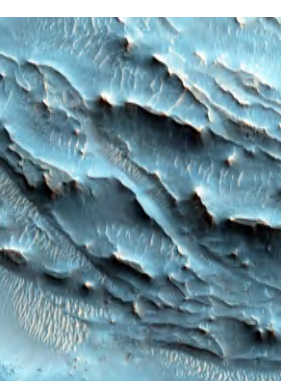
真田寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第26回】太陽系外惑星探査

2019/9/23 毎日文化センター(編印)

10

火星に水がある！

火星には過去に液体の水が存在した (2004年発表)
極地方では現在も水が存在している可能性 (2015年9月29日発表)
火星の大気は太陽から吹き出したガラスエラ流(太陽風)によって剥ぎ取られた



斜面上を約 100m の長さにわたって伸びる暗い筋模様が液体の水の存在を示している。
山の斜面と上空からの写真。

真田寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第26回】太陽系外惑星探査

2019/9/23 毎日文化センター(編印)

11

【ニューズ報道から】

Herschel links Jupiter's water to comet impact

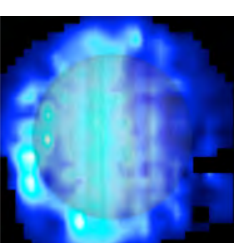
2013/4/25

木星の水はシユーマーカー・レヴィ彗星がもたらした

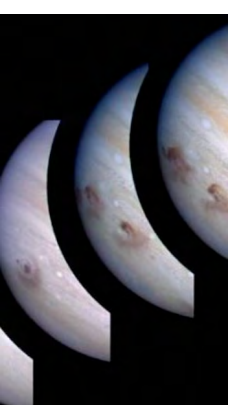
シユーマーカー・レヴィ彗星 (D/1993 F2) は1993年3月に発見され、20個以上に分裂した彗星核が1994年7月17日から数日間わたって木星の南半球に次々と衝突した。その規模は予想以上に大きく、衝突の瞬間の発光が地上からちと見えられた。

この翌1995年、ESAが打ち上げた赤外線宇宙望遠鏡 (ISO) の観測により、初めて木星の大気から水が発見された。シユーマーカー・レヴィ彗星で運ばれたものと考えられるという見方が広まったものの、直接の証拠はない。水が見つかった成層圏の底に、低温で水蒸気を通さない天然の「コールドトラップ」があることから、天体内部ではなく外部からやってきたことだけはわかっていった。

今回、ESAの赤外線天文衛星「ハーシェル」が木星の水の分布を調べたところ、彗星が衝突した南半球には北半球の2、3倍もの水があり、しかもほとんどが彗星の衝突位置に集中していることがわかった。木星の成層圏に存在する水の95%がシユーマーカー・レヴィ彗星の衝突で運ばれたものと見積もられるという。



木星大気中の水分布
(注: Water map: ESA/Herschel/TL 'Coville', et al.; Jupiter image: NASA/JPL/Space Science Institute)
彗星衝突の影響は予想以上に大きく、衝突痕は数週間も残った。(提供: R. Evans, J. Trauger, H. Hammel and the HST Comet Science Team)



http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/Herschel_links_Jupiter_s_water_to_comet_impact
<http://www.astroarts.co.jp/news/2013/04/25jupiter/index-j.shtml>
Cavalité+, A&A 553, A21 (2013)

真田寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第26回】太陽系外惑星探査

2019/9/23 毎日文化センター(編印)

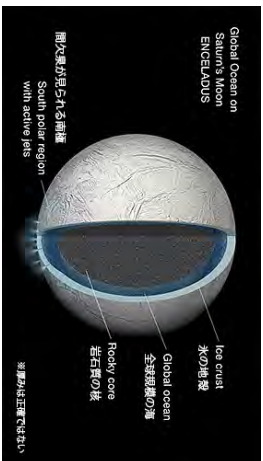
12

土星の衛星エンケラドスの地表下に全球規模の海

土星の衛星エンケラドスの南極からは水蒸気や氷が間欠的に噴き出ししており、氷の地殻の下に水が存在することを示している。NASAの探査機「カッシーニ」による長年にわたる観測の結果、エンケラドス全球に広がる地下海があるらしいことが明らかになった。

エンケラドス又は土星を公転する際に、ぶらぶらぶらぶら動きを見せる。研究チームは、エンケラドスの動きを正確に測定し、内部構造のモデルを様々な角度から見て調べた。その結果、氷の地殻と核とが固く結びついていて、その間を液体の層が全球的に存在している、という結論に至ったという。

エンケラドスの地下海が凍らない理由は謎だが、土星の重力による潮汐作用でこれまで考えられていた以上の熱が発生しているのではないかと推測などが考えられている。



エンケラドスの内部を示した図



Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean
P.C. Thomas¹, R. Tiegelding¹, M.S. Tiscareno², J.A. Burns³, J. Joseph⁴, T.J. Loreq⁵, P. Helfenstein¹, C. Porco¹

<http://www.jpl.nasa.gov/news/2015/09/17enceladus/index.j.shtml>

真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第2回】大腸系外衛星探査

ニューホライズンが冥王星に最接近

準惑星に分類されている冥王星に、探査機ニューホライズンが接近している。7月14日には、冥王星（半径2300km）の表面から12500kmの距離に近づいて観測を行う予定だ。

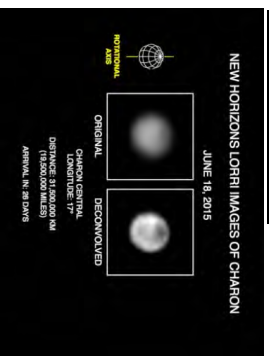
冥王星は1930年に発見され、1978年にカロン(Charon)という伴星を伴う連星であることが発見された。カロンは冥王星の約1/7の質量を持つが、詳しいことは不明だ。今回、初めて探査機が接近することで多くの成果が得られると期待されている。

カロンの発見で、冥王星自体の質量が小さいことが判明し、2003年に冥王星より大きな天体が発見されたことから、冥王星は2006年に惑星から準惑星へ降格した。

NASAは、6月20日に、カロンが初めてカラー写真で撮影された、と報告した。



冥王星とカロンの初のカラー動画。冥王星を中央に固定した望遠系（提供：NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute、以下同）

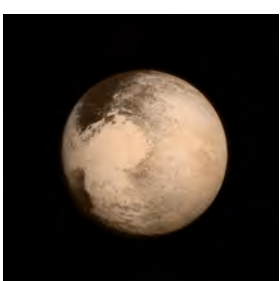


<https://www.nasa.gov/feature/goddard/new-horizons-approaches-during-anniversary-of-charon-s-discovery>
<http://www.jpl.nasa.gov/news/2015/06/30pluto/index.j.shtml>

真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第2回】大腸系外衛星探査

冥王星へ最接近、ニューホライズン機からの画像公開

冥王星に最接近したNASAの探査機ニューホライズンの画像が次々と公開されている。全データを受信するのは6ヶ月後になるそうだ。



Pluto is Dominated by the Feature Informally Named the "Heart"



http://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/main/index.html

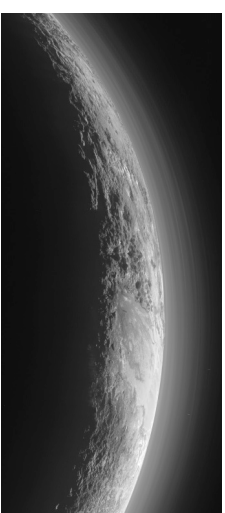
真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第2回】大腸系外衛星探査

逆光でとらえた冥王星に見られる窒素の循環

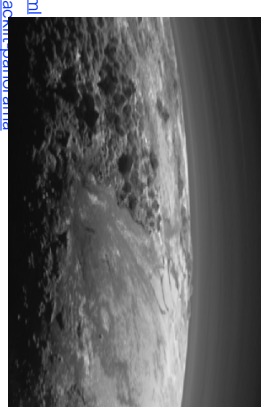
探査機「ニューホライズンズ」の冥王星最接近から15分後に撮影された高解像度の画像が公開された。最接近は7月14日だったが、9月13日に地球に届いたデータから作成された。

凍った山々や窒素の氷河、地表付近から100km以上の上空まで10層以上にも分かれている層状の「ちやちや」が映されていて、地球の水循環に似た現象が冥王星でも起こっていることがわかる。

巨大なスノーニク氷原の東側にある明るい領域は、窒素の氷で覆われていると考えられている。スノーニク氷原の表面から氷が蒸発し、それが蓄積したようだ。氷河のように流れ込んでいることも明らかになっており、その流れ方はグリーンランドや南極大陸の氷冠の縁に見られるものに似ているという。



ニューホライズンズの最接近から15分後に約1万8000kmの距離から撮影された冥王星、右側がスノーニク平原でその西（左）側に3500m級の山々（リルゲイ山地）が見える（共に名称は非公的）



<http://www.jpl.nasa.gov/news/2015/09/18pluto/index.j.shtml>
<http://www.nasa.gov/feature/pluto-wows-in-spectacular-new-backlit-panorama>

真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第2回】大腸系外衛星探査

太陽系の小惑星

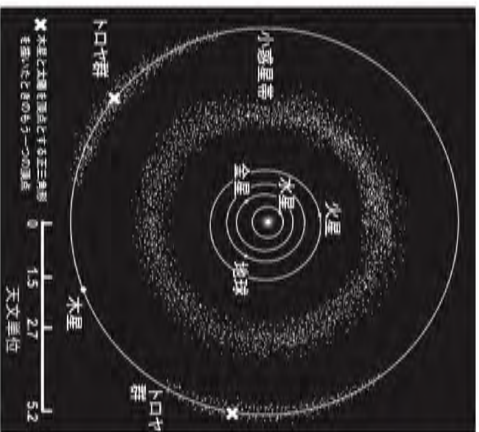


図1.20 小惑星帯は火星と木星軌道の間にある。また、木星軌道にはトロヤ群と呼ばれる小惑星帯もある。トロヤ群は太陽と木星を2つの頂点として正三角形を描いたときの3つ目の頂点付近にある。

真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】太陽系外惑星探査 2019/9/23 毎日文化センター(編田)

17

小惑星探査機 はやぶさ2 (2003年打ち上げ-2010年帰還)



大西浩次氏



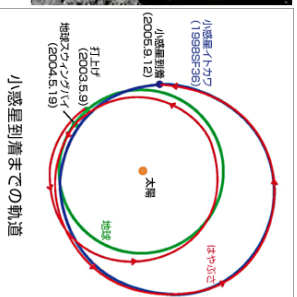
はやぶさ2が最後に撮影した写真(地球)

2010年6月カプセル回収

真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】太陽系外惑星探査 2019/9/23 毎日文化センター(編田)

20

小惑星探査機 はやぶさ (2003年打ち上げ-2010年帰還)



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



糸川英夫 (1912-1999)

「日本の宇宙開発・ロケット開発の文

小惑星探査機 はやぶさ2 (2014年12月打ち上げ)

リュウグウへ



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

探査の候補となっているのは「1999 JU3」という小惑星で、地球に接近する軌道を持つ地球接近小惑星(NEO)のひとつ、大きさは900m程度。鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにし、小惑星の再集積過程、内部構造、地下物質を調査することにより、小惑星の形成過程を調べる。

2014/1/30



真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】太陽系外惑星探査 2019/9/23 毎日文化センター(編田)

18

真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第3回】太陽系外惑星探査 2019/9/23 毎日文化センター(編田)

21

ドレークによる地球外文明の推定

1960年にアメリカの天文学者ドレークが発表した「地球外文明の数を推定する式」は、太陽系が属する銀河系内に現存する文明の数 N を推定する式である。

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

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

図 5.46 Frank Drake (1930-)



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

変数	楽観論	中間論	悲観論
R_* 銀河系で毎年生成される星の数 (個/年)	50	20	1
f_p 生成される星のうち惑星系をもつ星の割合	1.0	0.5	極めて小
n_e 星のまわりで生命にとって適当な環境をもつ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
f_l そうした惑星上で生命が発生する確率	1.0	0.5	極めて小
f_i 生命が知的文明段階にまで進化する確率	1.0	0.1	極めて小
f_c 知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合	1.0	0.5	極めて小
L そのような技術文明の平均寿命	10^8	10^4	100

23

ハビタブルゾーン

ハビタブルゾーン(habitable zone, 生命居住可能ゾーン)

宇宙の中で生命が誕生するのに適した環境となる領域

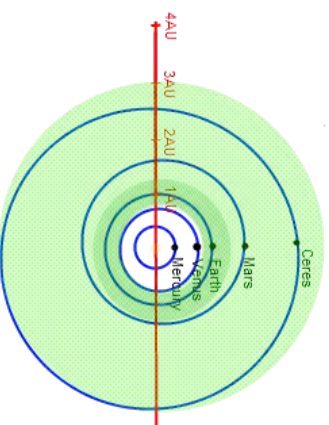
条件 1 : 水が液体として存在できる位置に惑星があること

= ゴルディアロックスゾーン(Goldilocks zone)

条件 2 : 岩石惑星であること

180 K < Equilibrium (T) < 310 K

(ガス惑星ではないこと)



24

太陽系外惑星探査

探査の方法

★直接観測

恒星からの光を直接観測する方法。 (2008年から発見)

★位置天文学法 (Astrometry法)

巨大な惑星によって恒星がふらつく様子を位置天文学的手法により精密観測する方法。 (2009年から発見)

★視線速度法 (Doppler法)

惑星によって恒星が視線方向にふらついた時に起こるドップラー効果によるスペクトル変化を調べる方法。 (2009年までは最多)

★食検出法 (transit法)

惑星が恒星の前を横切る時の明るさの変化によって惑星を探す方法。 (2011年よりKepler衛星が大量発見中)

★重力レンズ法 (micro lensing法)

惑星による背後の天体からの光の集光現象を利用する方法。 (2005年から発見)

★パルサー・タイミング法

周期的に電磁波を放出するパルサーに惑星が存在する場合、パルスに周期的なズレが見られることを利用する方法。 (初めて発見された系外惑星)

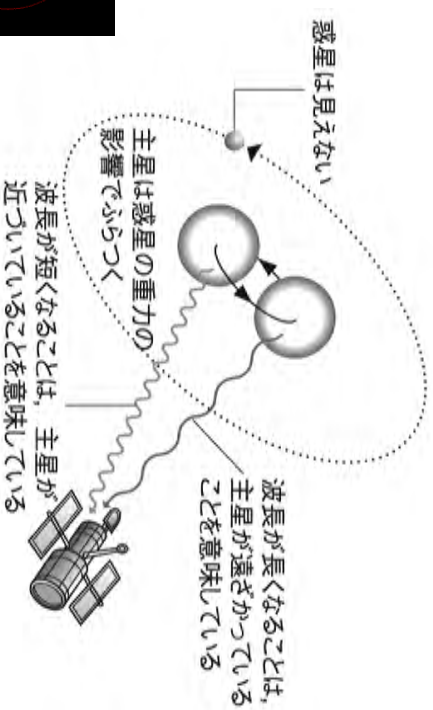
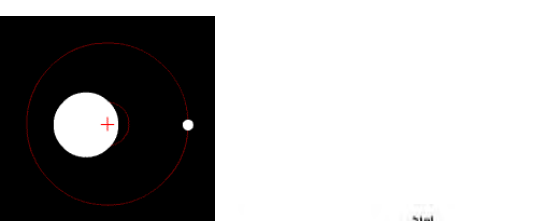
真田寿明 「宇宙はとこまで解明されたか」 [第32回] 太陽系外惑星探査

2019/9/23 毎日文化センター(編)

25

太陽系外惑星探査

視線速度法 (ドップラー法)



真田寿明 「宇宙はとこまで解明されたか」 [第32回] 太陽系外惑星探査

2019/9/23 毎日文化センター(編)

26

1995年10月、太陽系外惑星の発見

1995年10月6日
 ジュネーブ天文台のミシェル・マイヨール(Michel Mayor)とディダイエ・クロ(Didier Queloz)

ペガス座51番星 (51 Pegasi) = 地球から50光年先
 木星クラスの質量を持った惑星の存在を確認
 トリプラー法

主星から0.05天文単位
 (太陽-水星の距離の1/6)

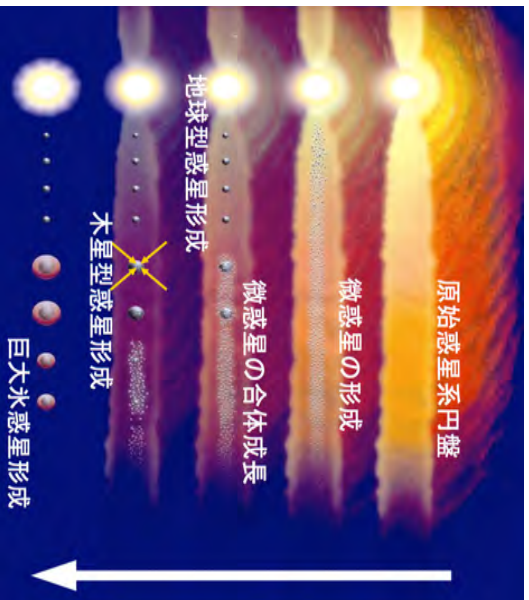
4.2日で公転
 質量は木星の半分
 表面は1000℃

「ホット・ジュピター」(熱い木星)



太陽系外惑星としては初めて発見された
 ペガス座51番星b (想像図)

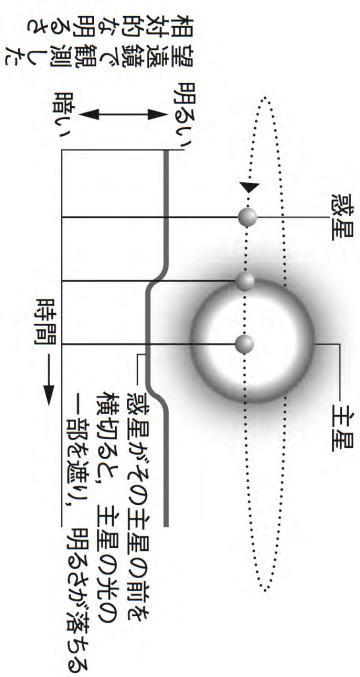
原始惑星円盤内: 塵 → 微惑星 → 原始惑星 → 惑星



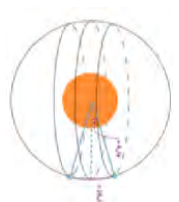
@Newton

これまでの太陽系形成モデルに修正が迫られる

食検出法 (トランジット法)



公転距離 (AU)	トランジット期間 (h)	トランジット深さ (%)	食発生確率 (%)
Mercury	0.241	0.29	0.0012
Venus	0.615	0.72	0.0076
Earth	1.00	1.10	0.0084
Mars	1.52	1.30	0.0084
Jupiter	5.20	1.80	0.0024
Saturn	9.5	2.5	0.0019
Uranus	19.2	4.0	0.0019
Neptune	30.1	7.3	0.0015



ケプラー衛星

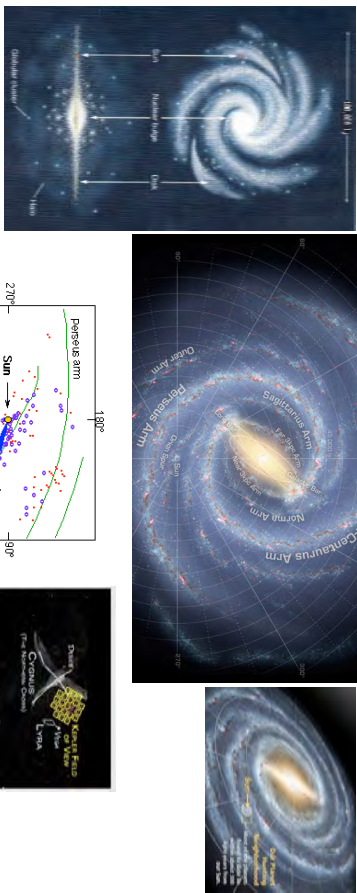
NASA
 地球型の太陽系外惑星探査
 2009年3月9日打ち上げ
 太陽周回軌道、主鏡口径1.4m

はくちよう座の方向、
 常時15万個の恒星観測

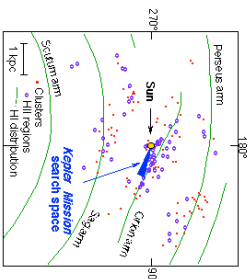


トランジット法
 主星を隠す時に生じる周期的な明るさの変動を検出すること

ケプラー衛星の探査範囲



1 kpc = 326 光年
= 2 x 10⁵ AU



The figure shows what we believe to be the local structure of our Galaxy, the Milky Way. The stars sampled are similar to the immediate solar neighborhood, and the distribution of neutral hydrogen (HI) defines the arms of the Galaxy.



ケプラー衛星ミッション、結果リリース

2010年1月

KEPLER DISCOVERS FIVE EXOPLANETS

—Peter Adamis | [Dorland/Adamis | Underwriting Ltd.](#)

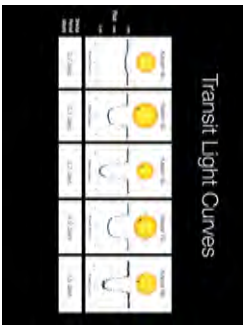
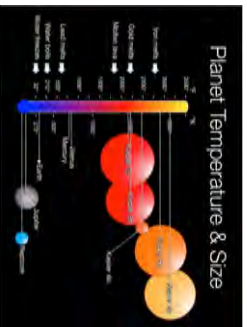
January 4, 2010: NASA's Kepler space telescope, designed to find Earth-size planets in the habitable zone of solar-type stars, has discovered the first five new exoplanets.

Named Kepler-4b, 5b, 6b, 7b and 8b, the planets were discovered during the first 4 months of the Kepler science team during a "road briefing" — at the American Astronomical Society meeting in Washington.

Right: An artist's concept of the Kepler space telescope on a mission to discover habitable planets outside our own Solar System. (Esox -)

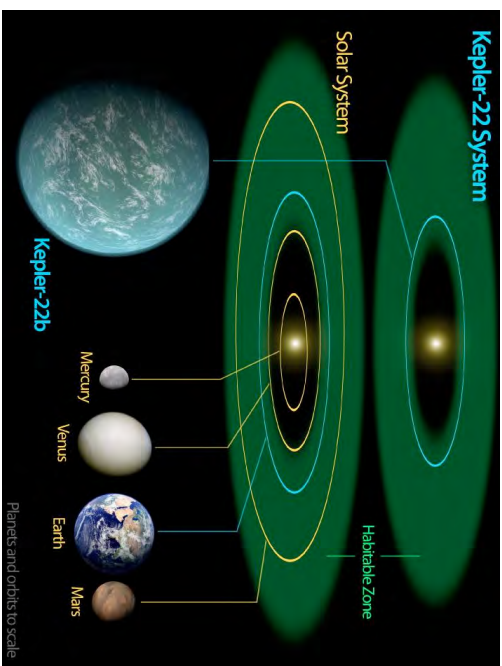
—The discoveries show that our science instrument is working as planned. The Kepler team will continue to search for more planets. The Center for Exoplanets and Habitable Worlds, led by William Borucki, will lead all its science goals.

The five planets are quite a bit larger than Earth. Known as "hot Jupiters" because of their high masses and extreme temperatures, the new exoplanets range in size from similar to Neptune to larger than Saturn. They are all orbiting very close to their stars, ranging from 0.05 to 0.35 AU from their stars, compared to Earth's 1 AU. The distance from the Sun to the edge of the habitable zone is 1.9 AU.



ケプラー衛星、ハビタブル惑星を発見

2011年12月



This diagram compares our own solar system to Kepler-22, a star system containing the first habitable zone planet discovered by NASA's Kepler mission. The habitable zone is the sweet spot around a star where temperatures are right for water to exist in its liquid form. Liquid water is essential for life on Earth.

Kepler-22's star is a bit smaller than our sun, so its habitable zone is slightly closer in. The diagram shows an artist's rendering of the planet comfortably orbiting within the habitable zone, similar to where Earth circles the sun. Kepler-22b has a yearly orbit of 289 days. The planet is the smallest known to orbit in the middle of the habitable zone of a sun-like star. It's about 2.4 times the size of Earth.

Image credit: NASA/JPL-Caltech

http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/ultimedia/images/kepler22b-diagram.html

ケプラー衛星ミッション、結果リリース

2013年

Kepler planet candidates discovered in the first 22 months

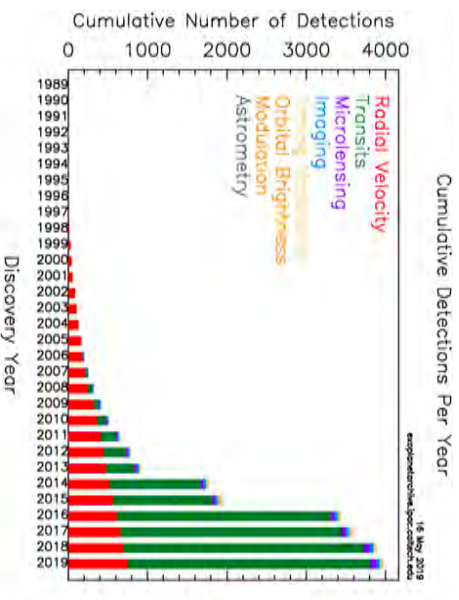
● Earth size
● Super-Earth size
● Neptune size
● Jupiter size

2740 Kepler planet candidates (122 confirmed) Batalha+2013

The figure shows what we believe to be the local structure of our Galaxy, the Milky Way. The stars sampled are similar to the immediate solar neighborhood, and the distribution of neutral hydrogen (HI) defines the arms of the Galaxy.



太陽系外惑星 発見数 (累積)



2019年5月16日現在 3970個。
恒星の1/3には惑星が発見されている。

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

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」 第2回 太陽系外惑星探査 2019/5/23 毎日文化センター(株田)

35

太陽系外惑星 発見数

表 5.4

これまでに発見された太陽系外惑星の数 (2018年3月10日現在).

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

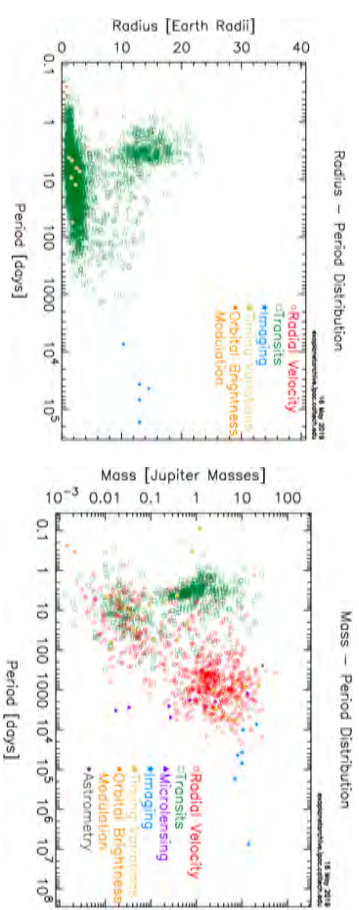
	全観測	Kepler	K2	発見された方法	発見数
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)*	3706	2342	307	Astrometry	1
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	3970	2343	393	Imaging	44
ハビタブルゾーンにある星 (確定+候補天体)	612	647		Radial Velocity	669
候補天体				Transit	2900
				Transit timing variations	15
				Eclipse timing variations	9
				Microlensing	54
				Pulsar timing variations	6
				Pulsation timing variations	6
				Orbital brightness modulations	2

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

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」 第2回 太陽系外惑星探査 2019/5/23 毎日文化センター(株田)

36

太陽系外惑星 公転周期と質量分布



2019年5月16日現在 確定惑星3970個、候補天体2900個以上。
恒星の1/3には惑星が発見されている。

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

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」 第2回 太陽系外惑星探査 2019/5/23 毎日文化センター(株田)

37

Planet Found in Nearest Star System to Earth

太陽系から一番近い星に系外惑星を発見

2012/10/17

太陽系にもっとも近い4.3光年先の恒星系トリアルタウルス(プロクセンタウル)に、地球と同じくらいの質量の惑星が発見された。また、4連星の中にある惑星の発見も発表されている。

トリアルタウルスに惑星が存在するかどうかは19世紀から議論されてきたが、最近まで確認できなかった。今回初めて、チリにあるヨーロッパ南緯天文台のHARPS (高精度視線速度系外惑星探査装置) と3.6m望遠鏡を用いた観測で、トリアルタウルスAの周りを回る惑星が発見された。この惑星は、主星からは600万km程度離れている、3.2日の周期で公転している。太陽系で言えば、水星よりも内側の軌道を回っていて、生命が存在するには熱すぎると考えられる。

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



トリアルタウルス又は南半球ではよく見える明るい星(視線図)

<http://www.eso.org/public/news/eso1241/>

http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/news/kepler-ph1.html

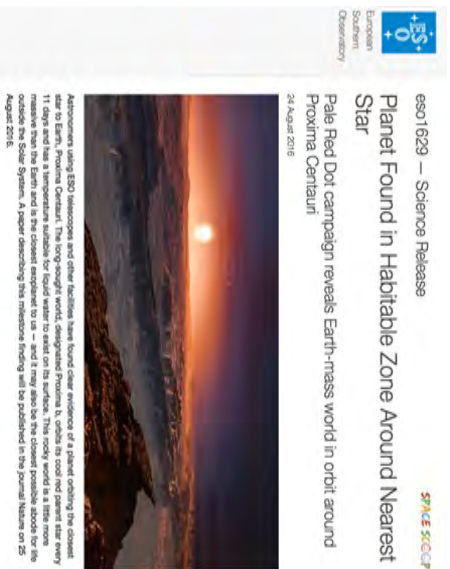
<http://jap.arxiv.org/abs/1210.3612>

Planet Hunters: A Transiting Circumbinary Planet in a Quadruple Star System

Kevin E. Schorn, Josema A. Lopez, Joshua A. Carter, William J. Welsh, Debra A. Fischer, Guillermo Torres, Andrew W. Howard, Jason R. Crepp, William C. Keel, Chad L. Lamm, Nathan A. Kaib, Dirk Tiedt, Robert Clavelino, Kim J. Lee, Michael Peirani, Alison M. Smith, Stuart Lane, Robert J. Simpson, Matthew J. Griese, Kevin Schawinski (Submitted on 12 Oct 2012)
We report the discovery and confirmation of a transiting circumbinary planet (PH1) around KIC 8626925, an eclipsing binary in the Kepler field. The planet was discovered by volunteers searching the Kepler data. PH1 is the first circumbinary planet discovered in a quadruple star system. The host system consists of two main-sequence stars in a hierarchical quadruple system, with the inner pair in a circumbinary orbit around the center of mass of the inner pair, and the outer pair in a circumbinary orbit around the center of mass of the outer pair. The planet is in a circumbinary orbit around the center of mass of the inner pair, and is the first circumbinary planet discovered in a quadruple star system with a transiting planet.

38

太陽系から一番近い星にハビタブル惑星を発見



eso1629 — Science Release
 Planet Found in Habitable Zone Around Nearest Star

Pale Red Dot campaign reveals Earth-mass world in orbit around Proxima Centauri
 24 August 2016

Researchers using ESO telescopes and other facilities have found clear evidence of a planet orbiting the closest star to Earth, Proxima Centauri. The new planet, which orbits Proxima, is only 4.2 light years away every 11 days and has a temperature suitable for liquid water to exist on its surface. This study would be a little more optimistic than the Earth and is the closest (excepted to us — and it may also be the closest possible) habitable world outside the Solar System. A paper describing this milestone finding will be published in the journal Nature on 25 August 2016.

プロキシマ・ケンタウリ
 4.25光年
 プロキシマ・ケンタウリb
 0.05 au (約750万 km) の距離
 を11.2日で公転
 地球質量の1.3倍
 ハビタブルゾーン内
 液体の水を有する可能性

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

At a distance of 1,295 parsecs, the red dwarf Proxima Centauri (α Centauri C, Gl. 551, HIP 70890 or simply Proxima) is the Sun's closest stellar neighbour and one of the best-studied low-mass stars. It has an effective temperature of only around 3,050 Kelvin, a luminosity of 0.15 per cent of that of the Sun, a measured radius of 14 per cent of the radius of the Sun and a mass of about 12 per cent of the mass of the Sun. Although Proxima is considered a moderately active star, its rotation period is about 88 days (the minimum mass of about 1.3 Earth masses orbiting Proxima with a period of approximately 11.2 days at a semi-major-axis distance of around 0.05 astronomical units. Its equilibrium temperature is within the range where water could be liquid on its surface. Nature, 2016, vol. 536, p. 437-440

ドレークによる地球外文明の推定

1960年にアメリカの天文学者ドレークが発表した「地球外文明の数を推定する式」は、太陽系が属する銀河系内に現存する文明の数 N を推定する式である。

$$N = R_p \times f_p \times n_p \times f_e \times f_i \times f_c \times L \quad (5.11)$$

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

表 5.46 Frank Drake (1930-)



表 5.5 ドレークの式 (5.11) に入れらるべき値はどれだろうか。天の川銀河にある星は約 2000 億個といわれているが、はたして知覚生命体の存在する星の数はいくつだろうか。

R_p	銀河系で毎年生成される星の数 (個/年)	素銀論	中間論	悲観論
f_p <td>生成される星のうち惑星系をもつ星の割合</td> <td>1.0</td> <td>0.5</td> <td>極めて小</td>	生成される星のうち惑星系をもつ星の割合	1.0	0.5	極めて小
n_p <td>星のまわりで生命にとって適当な環境をもつ惑星の数</td> <td>1.0</td> <td>0.1</td> <td>極めて小</td>	星のまわりで生命にとって適当な環境をもつ惑星の数	1.0	0.1	極めて小
f_i <td>そうした惑星上で生命が発生する確率</td> <td>1.0</td> <td>0.5</td> <td>極めて小</td>	そうした惑星上で生命が発生する確率	1.0	0.5	極めて小
f_e <td>生命が知的文明段階にまで進化する確率</td> <td>1.0</td> <td>0.1</td> <td>極めて小</td>	生命が知的文明段階にまで進化する確率	1.0	0.1	極めて小
f_c <td>知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合</td> <td>1.0</td> <td>0.5</td> <td>極めて小</td>	知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合	1.0	0.5	極めて小
L <td>そのような技術文明の平均寿命</td> <td>10^8</td> <td>10^4</td> <td>100</td>	そのような技術文明の平均寿命	10^8	10^4	100

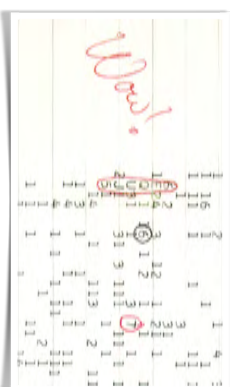
SETI (search for extraterrestrial intelligence)



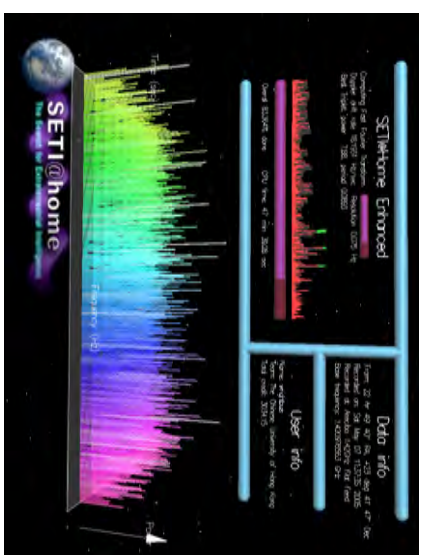
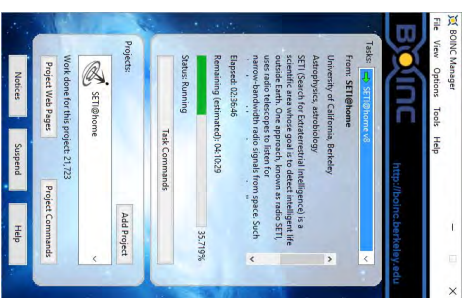
Big Ear
 (オハイオ州立大の電波望遠鏡)
 103m x 33 m
 (半径53mの円相当)
<http://www.bigear.org>

The Wow! Signal 1977年8月15日

Thus, the "6EQUJ5" code in channel 2 means successive intensities as follows:
 6 --> the range 6.0 - 6.999...
 E --> the range 14.0 - 14.999...
 Q --> the range 26.0 - 26.999...
 U --> the range 30.0 - 30.999...
 J --> the range 19.0 - 19.999...
 5 --> the range 5.0 - 5.999...



SETI@home



各家庭のPCが眠っている時間に宇宙人探しに協力できる分散コンピュータクラウド

生命をつくる材料は宇宙から？

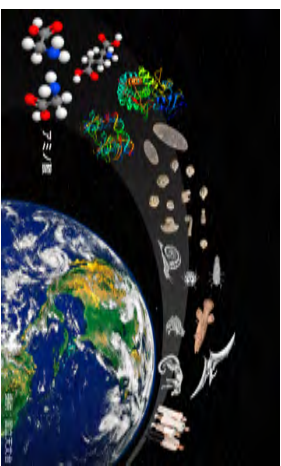
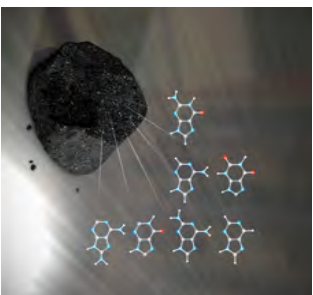
隕石中に有機物の存在が確認される。

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

<http://www.astroarts.co.jp/news/2011/108/22/meteorite/index-1>

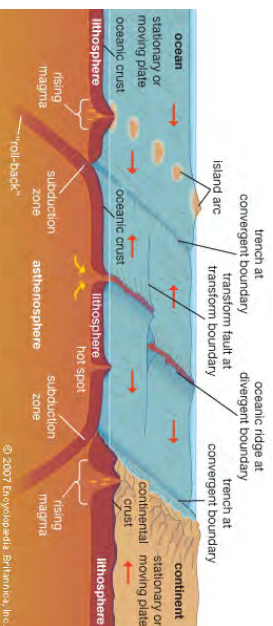
星形成領域に有機物の存在が確認される。

タンパク質の構成要素であるアミノ酸は普通に存在する (2014年国立天文台)



<http://www.nro.nao.ac.jp/news/2014>

生命の起源はどこか？ (1) 熱水噴出孔説

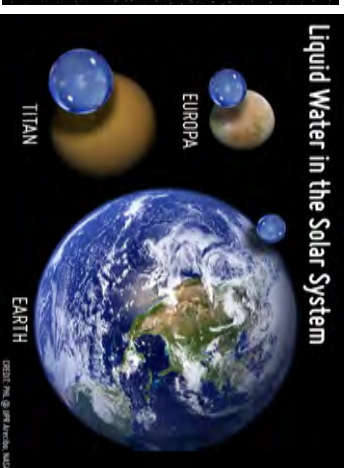
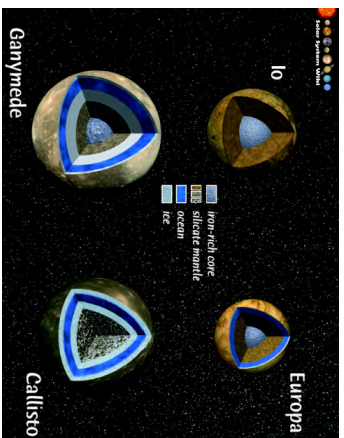


原始地球ではメタン、硫化水素、アンモニア、水素などの還元物質が豊富に存在し、それらが**高温・高圧下**で反応して生体分子がつくられ、鉱物表面で重合して高分子化し、紫外線が遮断された環境で細胞化した。**地球生命は熱水噴出孔で生まれた。**

宇宙に熱水噴出孔はあるか？

海と火山活動があればよい。原始火星には大量の水と熱水活動があった。

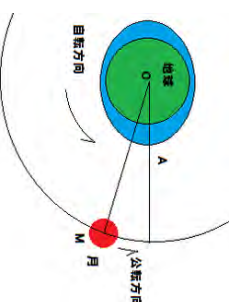
木星の第2衛星エウロパ(Europa)は、表面を覆う厚い氷殻の下に、海と熱水噴出孔が存在する可能性が高い。



生命の起源はどこか？ (2) 月の潮汐力説



<http://www.ipmu.jp/en/node/1974>



月の重力が引き起こす絶え間ない潮の流れによって、生命体が出現した、という説。原始の月は今より地球に近く月の潮汐力はとて大きく、初期の地球は今の**1000倍の高さの潮の干満が発生**していた。かつての地球の自転ははやく1日は6時間。3時間ごとに**巨大な津波**が押し寄せたり引いたりしていた。こうして陸地の水たまりで水が濃縮され、**強い太陽光が化学反応を促進**し、脂肪酸(炭素・酸素・水素原子の鎖)やタンパク質のようなこれまでになかった複雑な有機化合物を作り出した。

もし月がなかったら？



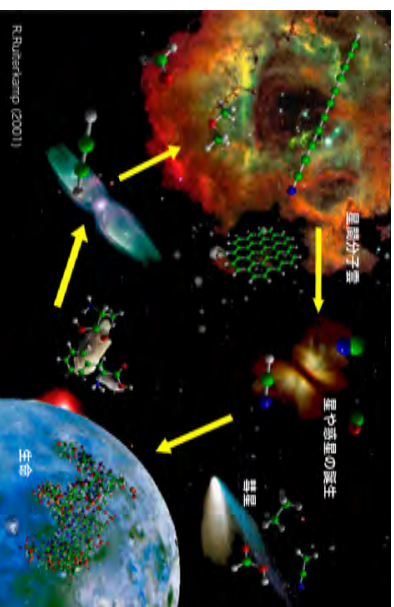
- 地球の自転軸の傾きはかなり不安定になる
現在、地球の自転軸の傾きは平均23.34度に保たれている（変動は5度以下）。もし、月がなければ自転軸の傾きはかなり不安定になり、**地球の気候は極端に変動する**。
- 潮汐力によって、生命の創造に必要な化学物質の混合がおきたと考えられるので、月がなければ**大気の構成は変わるだろう**。
- 地球の自転は速く、1日が8時間になる
月の潮汐力は、地球の自転速度を抑えるようにはたらく。月がなければ地球の自転速度が速まり、大気の流れが速く、**生命環境は過酷になる**。

真田寿明 「宇宙はとこまで解明されたか」【第2回】太陽系外惑星探査 2019/9/23 毎日文化センター(編田)

48

第2の地球はあるのか

生命の起源はどこか？ (3) パンスペルミア説



生命発生に関する仮説として、分子雲中に含まれていた生命材料物質の一部は彗星や隕石によって運搬されて惑星に降り積もり、さらに複雑な化学進化を経て最初の生命に至ったという考えがある。

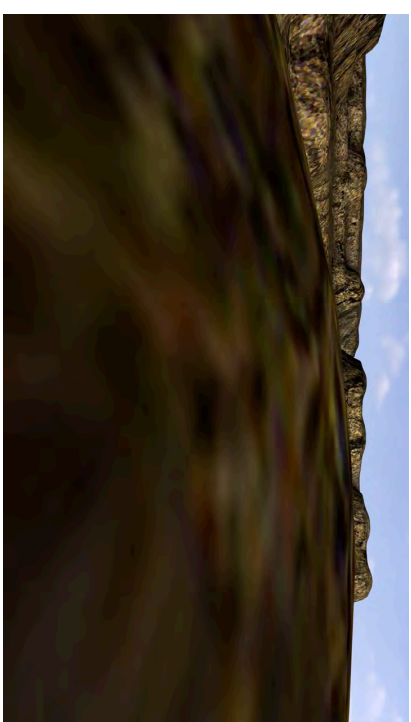
<http://www.mro.nao.ac.jp/news/2014/f>

真田寿明 「宇宙はとこまで解明されたか」【第2回】太陽系外惑星探査 2019/9/23 毎日文化センター(編田)

49

将来計画

STARSHOT計画



20年後 数cm角の小さな衛星を
アルファ・ケンタウリ(4.3光年先) に向けて光速の20%で飛ばす
20年かけて到達、映像取得、4年後、地球に映像届く

<http://breakthroughinitiativ.es.org/initiative/3>

真田寿明 「宇宙はとこまで解明されたか」【第2回】太陽系外惑星探査 2019/9/23 毎日文化センター(編田)

50



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