

宇宙生物学 生命の起源と進化

Vassilissa Vinogradoff, Beatriz García, Rosa M. Ros

International Astronomical Union

CNRS, Aix-Marseille Université, PIIM laboratory, Marseille, France.

CONICET/Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina

Universidad Politécnica de Cataluña, Spain



アストロバイオロジーの定義

アストロバイオロジーは特定の学問分野ではなく、地球上の生命の起源と進化、そして宇宙の他の場所における生命の存在の可能性をめぐる学際的なものです。天文学から生物学、地質学や化学、歴史学、科学哲学まで、この問題に関心を持つすべての分野を含んでいます。



用語：エクソバイオロジーとアストロバイオロジー

宇宙開発競争、そして月探査と火星探査ミッションでは、まず生物学的汚染のリスクが現れます。

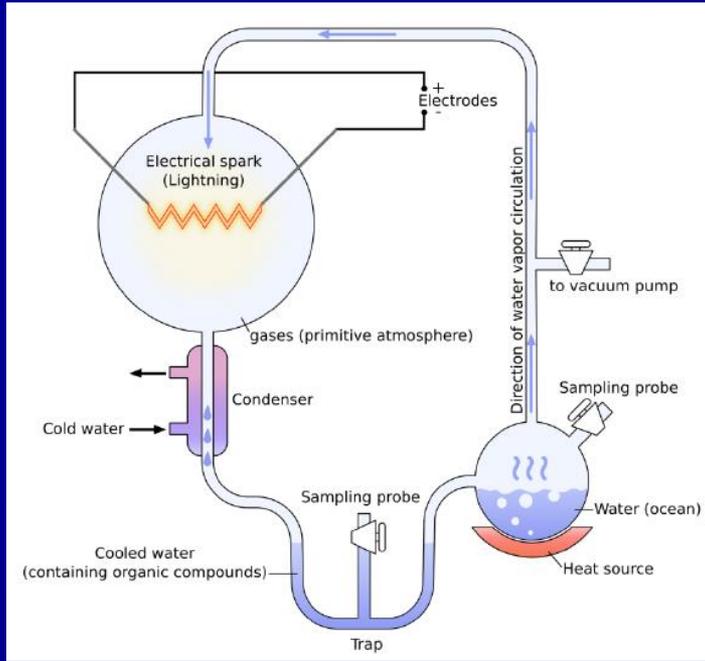
当初科学者たちは、微生物が宇宙環境下に耐えられる可能性は低いと想像していました。

今日、私たちはこれが当てはまらないことを知っています、例えば、クマムシは宇宙環境を含む極端な条件に耐えることができます。他にも例があります。



クマムシ *Hypsibius exemplaris* の電子顕微鏡スキャン (Bob Goldstein と Vicky Maddenによる)

用語：エクソバイオロジーとアストロバイオロジー



ユーリーとミラーの実験の
模式図（Stéphane La Barreの
ご厚意による）

ユーリーとミラーの先駆的な実験により、実験室で最初の前生物学的分子を合成するための化学研究が始まりました。

宇宙探査を通じて生命の起源を探るための新しい重要な学問分野として、1960年にジョシュア・レーダーバーグによって提唱されたエクソバイオロジーという用語が登場しました。

「アストロバイオロジー」という用語は、2015年にIAUによって採用されました。

アストロバイオロジーの目的

- 生命とは何かを定義する。
- 生命の起源を突き止める。
- 最古の生命の足跡を探す。
- 地球上での進化のメカニズムを理解する。
- 宇宙での生命を探す。



地球上の生物の多様性

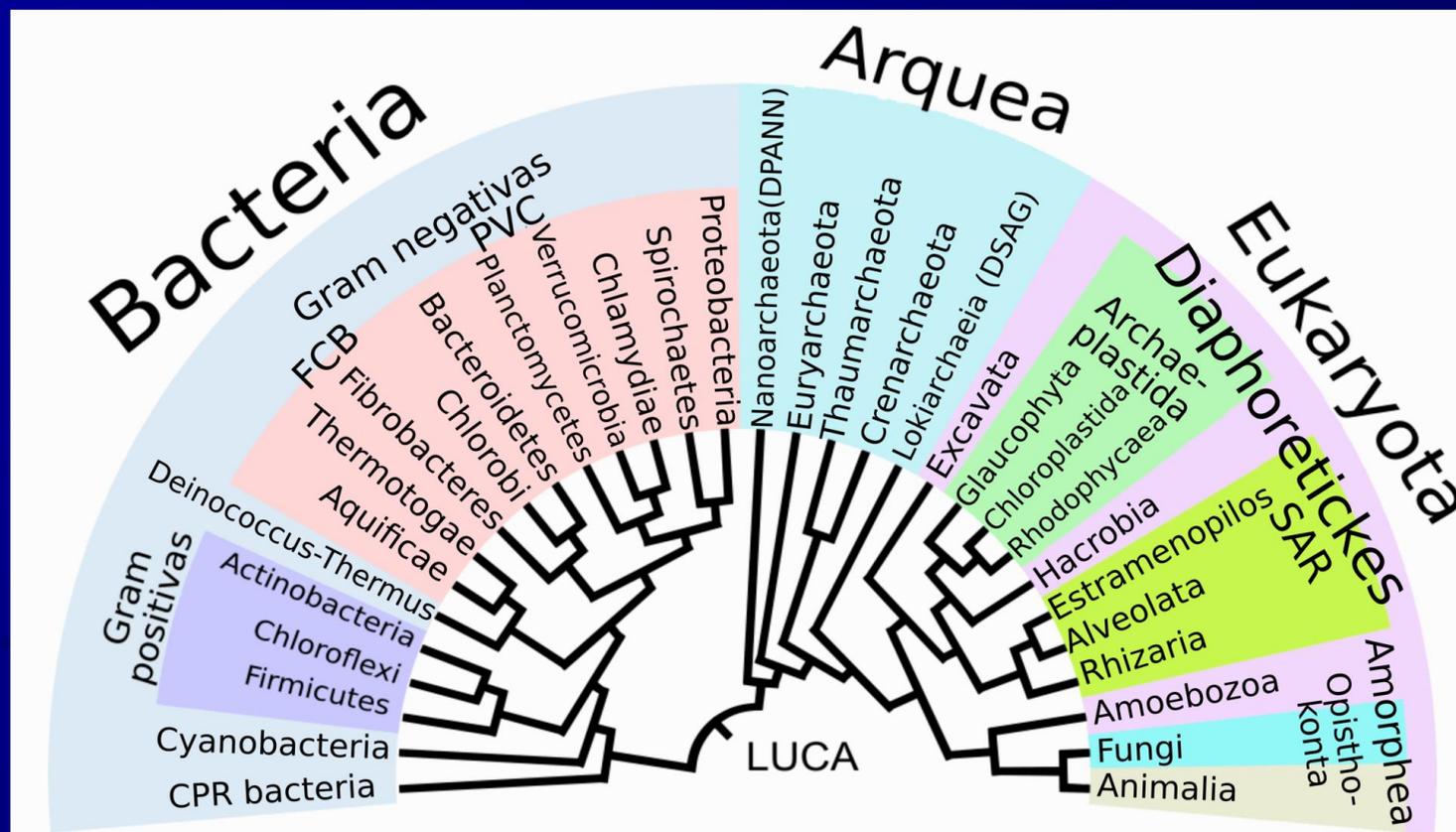
生命の唯一既知の例は、地球生命です。

アストロバイオロジーでは、あらゆる環境、特に水中熱水泉、塩水湖、氷結地など、最も過酷な環境における地球上の生物の研究に多くの努力が割かれています。

この種の環境は、地球外生命体が存在する場所を模したものになっている可能性があります。

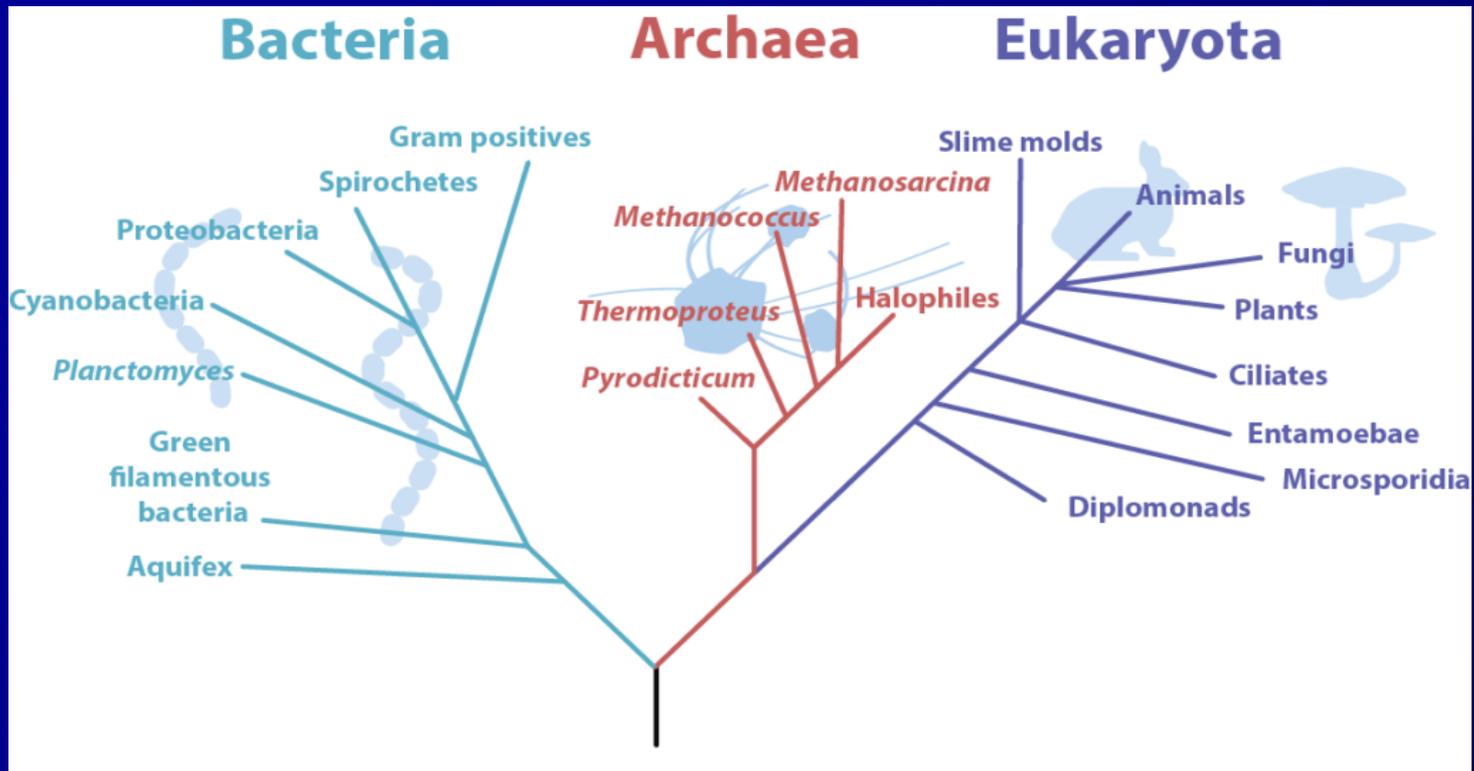


どこまでが生物かということや、極限環境で働くメカニズムをより理解するために、科学者は生物の系統発生および代謝の多様性を研究しています。



(ウィキペディア https://es.wikipedia.org/wiki/Filogenia_bacteriana より)





(<https://open.oregonstate.edu/generalmicrobiology/chapter/archaea/> より)

特に興味深い生命の系統樹のひとつは古細菌 (archaea) であり、リボソーム RNA 配列が原核生物細菌とは異なり、特に極端な環境 (圧力、温度、塩分、栄養素など) に適応しています。



地球上で最古の生命の痕跡を探す：困難

- 1)地球は「生きている」惑星（テクトニクス、侵食）であるため、45億年前の形成以来、大きく進化してきました。種の系譜に基づけば、最初の生物はバクテリアに似た単細胞生物であったに違いありません。
- 2)原始的な生物は微視的なものだったでしょう。地球上の最古の生命の確実な痕跡は34億8000万年前にさかのぼり、オーストラリアで発見されました。
- 3)生物学的特徴や形態として、似たものを形成しうる非生物的のものとはどう区別するのか、その解釈と比較は難しいでしょう。

前生物学的化学と非生物から生物への移行

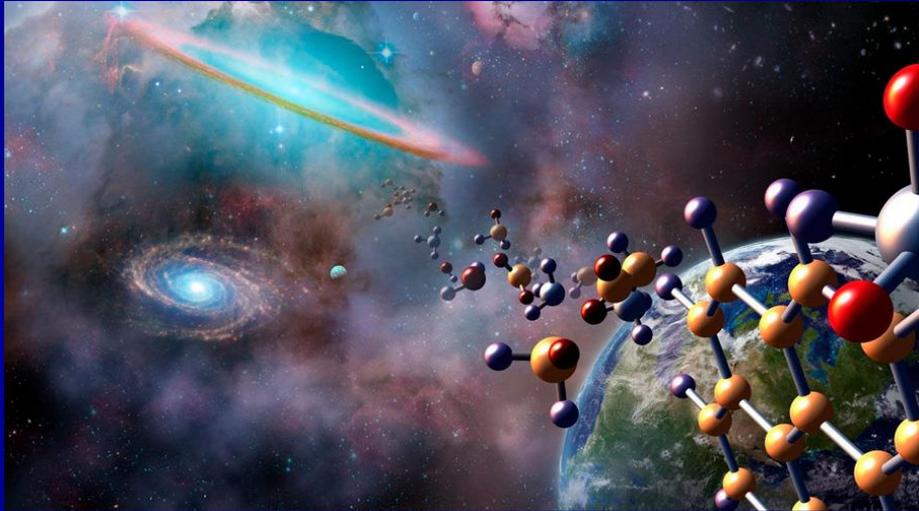
今日、地球上のすべての生物種は大変多様ですが、C、H、N、Oで作られた基本的な構成要素があります。

これらの構成要素とは、複製の基盤となるタンパク質、遺伝情報を運ぶDNA（デオキシリボ核酸）、および外界と区別のための細胞壁を構成する両親媒性物質です。

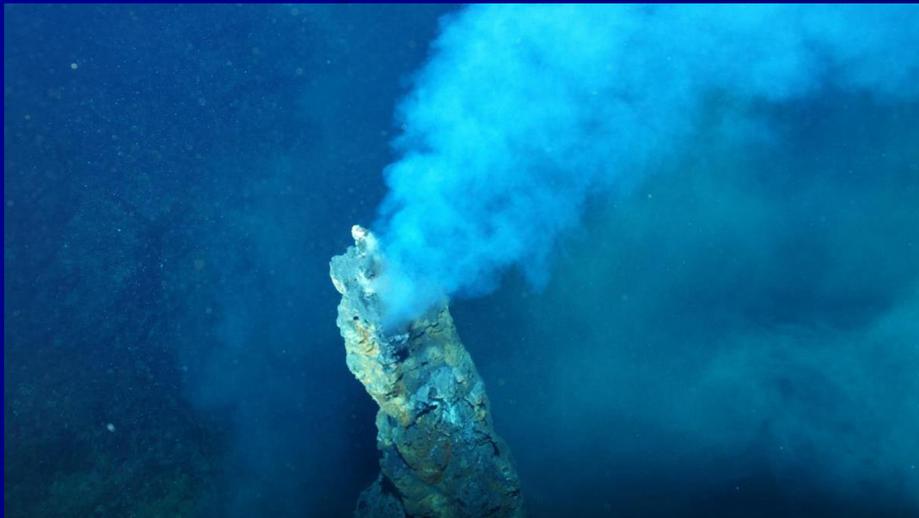
したがって、地球上のすべての生物種が持っている基本的な構成要素材料は、5種類の分子（生命のレンガと呼ばれることもあります）、アミノ酸、窒素含有塩基、糖、リン、脂質（または脂肪酸）です。



前生物的化学と非生物から生物への移行



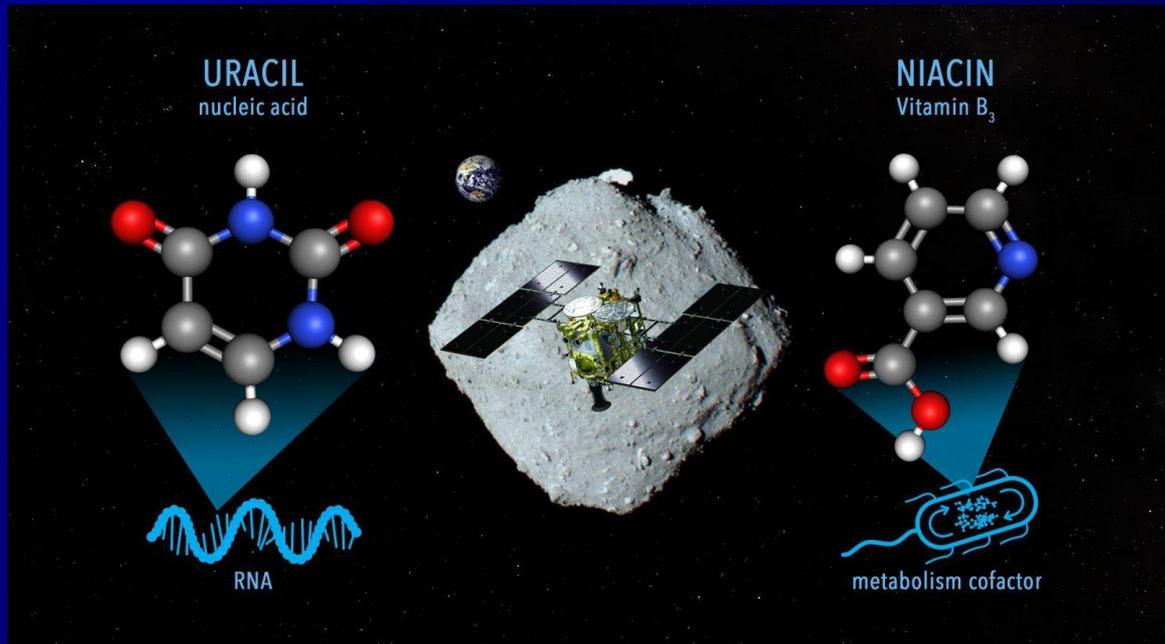
これらの構成要素材料は地球生命にとって不可欠であり、その起源を研究することで生命自体の起源により迫ることができるでしょう。



これらの分子は地球の大気中だけでなく、熱水噴出孔でも、非生物的に形成された可能性があります。

前生物的化学と非生物から生物への移行

別の仮説では、これらの分子は小惑星や彗星からやってくる天体（隕石）によってもたらされた可能性があります。隕石からは複雑な有機物が見つかっています。



小惑星リュウグウと2019年採取のサンプルから見つかった物質

(NASA Goddard/JAXA/Dan Gallagher のご厚意による)



前生物学的化学と非生物から生物への移行

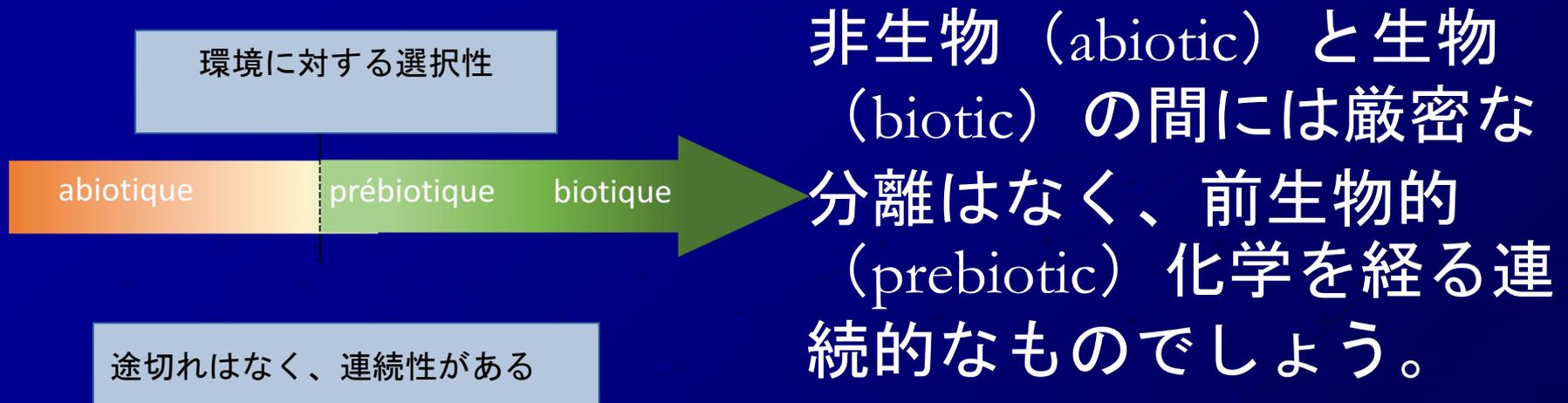


隕石が地球に落下した際、45億年前に分化を経験した隕石の表面にあった水と親鉄元素の一部を地球に輸送した可能性があります。



これらの天体からはまだ生命体は見つかっていませんが、有機的な合成が必要と思われる何千もの多種多様な分子が含まれています。

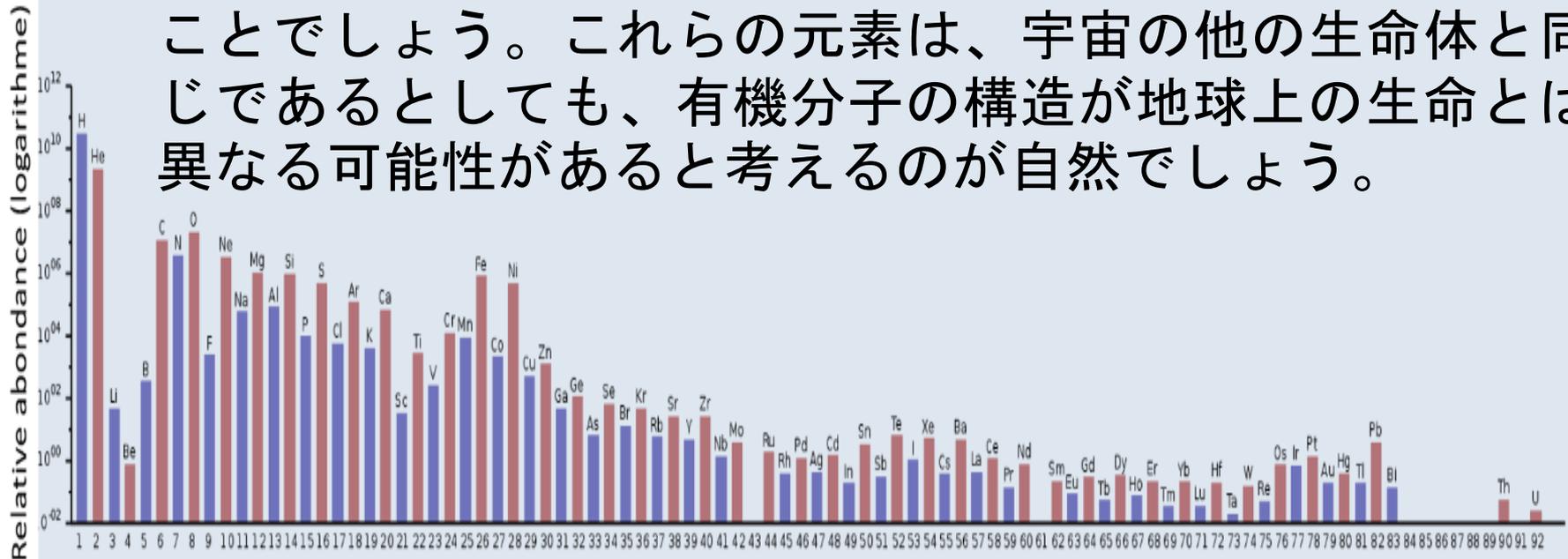
前生物学的化学と非生物から生物への移行



地球上で生命がどこでどのように発生したかは、依然として最も複雑な、生物学を越えた問題であり、考えられる化学経路は非常に多いため、いつの日か答えが見つかるかどうかさえ明らかではありません。

あらゆる場所での生命探査

地球上の生命が主に炭素、窒素、酸素により構成されているということは、宇宙の元素組成が反映されたということでしょう。これらの元素は、宇宙の他の生命体と同じであるとしても、有機分子の構造が地球上の生命とは異なる可能性があると考えるのが自然でしょう。

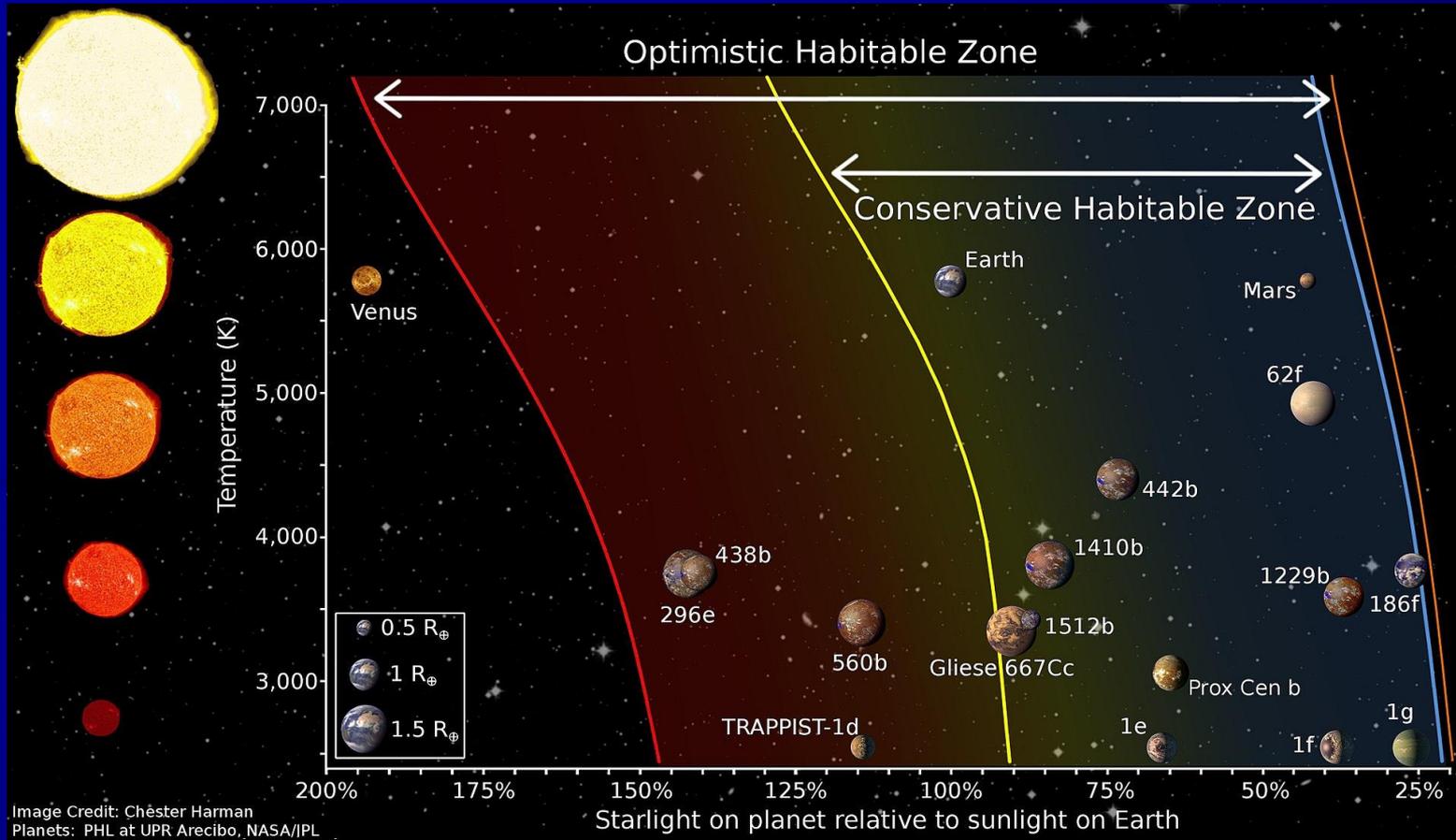


Nombre atomique Z

他の場所で生命を探するには、何を探すべきかを知る必要があります。それは、アストロバイオロジーの基盤のひとつであると同時に、その弱点は、生物学的に私たちと類似した生命の探索になってしまうことです。



あらゆる場所での生命探査

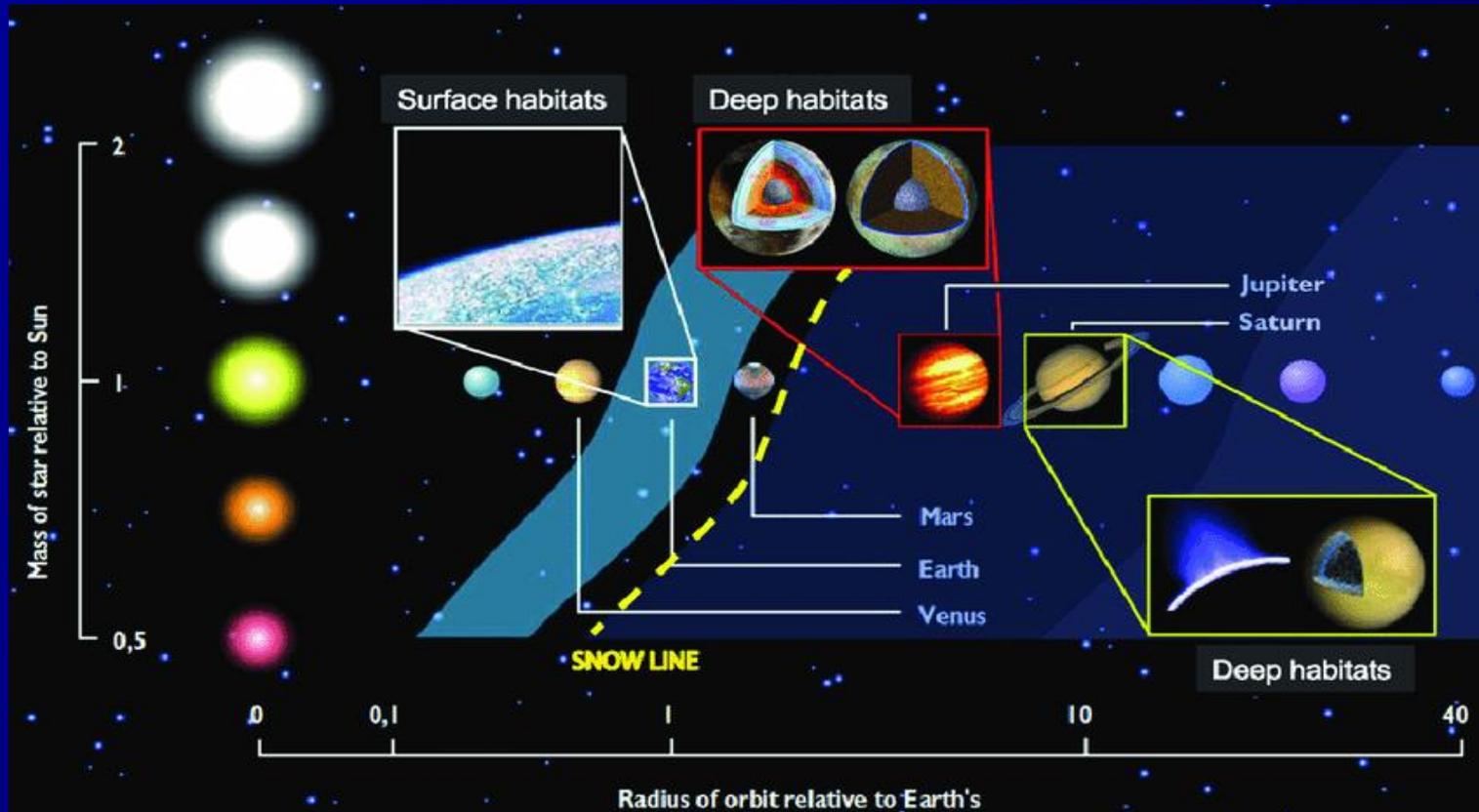


居住可能性の概念は議論の的のひとつです。その定義は、私たちが知っている唯一の（地球）生命の出現と進化を可能にした条件に関連したものです。



あらゆる場所での生命探査

ハビタブルゾーンを地下環境にまで広げることは、太陽系のこうした環境における生命の可能性を探る研究の一例です。

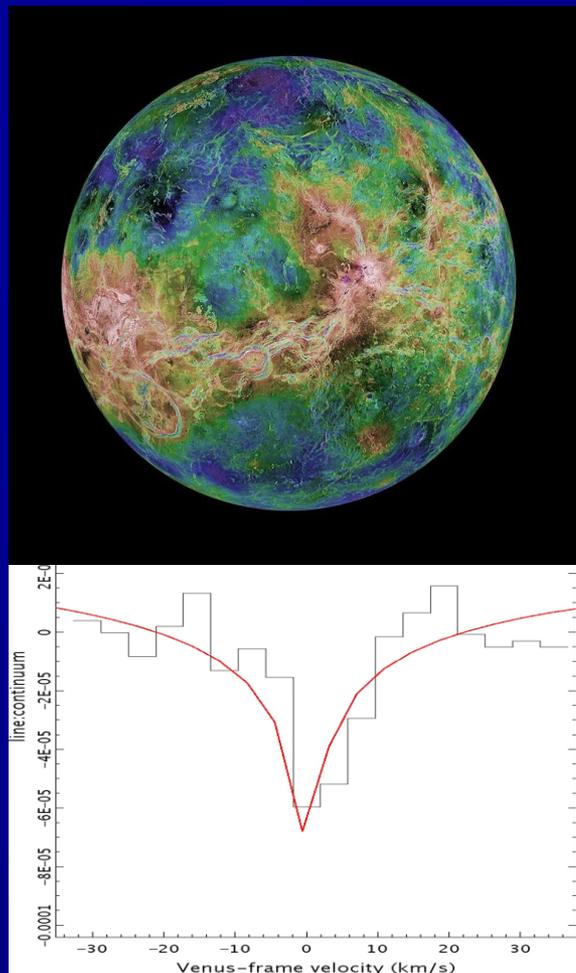


太陽系の天体とその宇宙生物学的関心

アストロバイオロジーの研究は、居住可能と定義されている地球以外の環境で生命が出現する可能性に注目しています。



太陽系の惑星とその宇宙生物学的関心： 金星



私たちの「姉妹惑星」は、96%以上の CO_2 からなる非常に高密度の大気中に硫黄とリンの分子があり、比較的複雑な有機物を持っています。

金星は太陽系のハビタブルゾーンに位置せず、表面に水という本質的な要素が欠けています。

ALMA データで示された重水素を含む水 (HDO) の検出 (Greaves, J.S., Richards, A.M.S., Bains, W. et al. Phosphine gas in the cloud decks of Venus. Nat Astron 5, 655-664, 2021)



太陽系の惑星とその宇宙生物学的関心： 金星

金星はその形成後しばらくは地球と同様に（彗星の落下などによる）惑星外からの水の恩恵を受けてるなどしており、45億年前からしばらくの間、表面に液体の水があり、水が豊富な大気があった可能性があります。

現在では表面は約460°Cと高温で、火山が活動する世界です。

しかし金星誕生初期の生命発生にとって適した時期に生命が発生・発展していた場合、現在温度が約75°Cにとどまっている金星の雲の中で、微生物の形で現存しているかもしれません。



太陽系の惑星とその宇宙生物学的関心： 火星



この惑星は、太陽系で生命のための条件が整った、あるいは現在も存在するのに最適な場所として考えられてきました。

微生物の存在は、バイキング・ミッションの準備中の70年代にすでに考慮されてきました。着陸船には、火星の生命に焦点を当て、光合成活動を検出したり、火星のバクテリアに栄養素を提供したりすることを目的とした実験を実行できる機器が装備されていましたが、結果は否定的でした。



太陽系の惑星とその宇宙生物学的関心： 火星



火星表面の過去の水の存在の証拠
(NASA/JPLのご厚意による)

バイキングは、火星の過去に液体の水が存在したことを確認し、水路、乾燥した川、樹枝状の谷を観測しました。

水は少なくとも10億年間その表面にとどまっていた可能性があり、現在表面を覆っている鉱物の中に、まだ存在しています。

両極では極冠に水の氷があり、火星の地殻には水が大量に存在すると考えられています。



太陽系の惑星とその宇宙生物学的関心： 火星

火星では地球と同時期に生命が発達し、地下に潜っていた可能性があります。

火星で生命が発見されれば、地球上の生命の出現について多くの答えが得られるでしょう。

もし火星に、微生物の形であったとしても生命が存在したとするならば、現在は地質学的に活動していないので、地表において痕跡化石の形で発見されるかもしれませんし、地下に存在して生き残っていたりすることも期待できるかもしれません。



太陽系の天体とその宇宙生物学的関心： 衛星

ここ数十年の間に、小惑星帯という壁の向こう側に、宇宙生物学的に関心のある他の居住可能な天体、つまり巨大なガス惑星の衛星が注目されています。

巨大惑星は表面がなく、岩石もないため、宇宙生物学の関心は限られています。

衛星は、太陽系の起源や進化を理解する上でも重要です。



太陽系の衛星とその宇宙生物学的関心

木星の衛星：ガニメデ、カリスト、エウロパ

土星の衛星：エンケラドゥスとタイタン

15年間にわたって土星とその衛星を訪れたカッシーニ・ホイヘンス探査機（1997-2017）によって明らかになった驚くべきことは、土星の氷衛星は多様であり、液体の水が豊富にあるだろうということです。

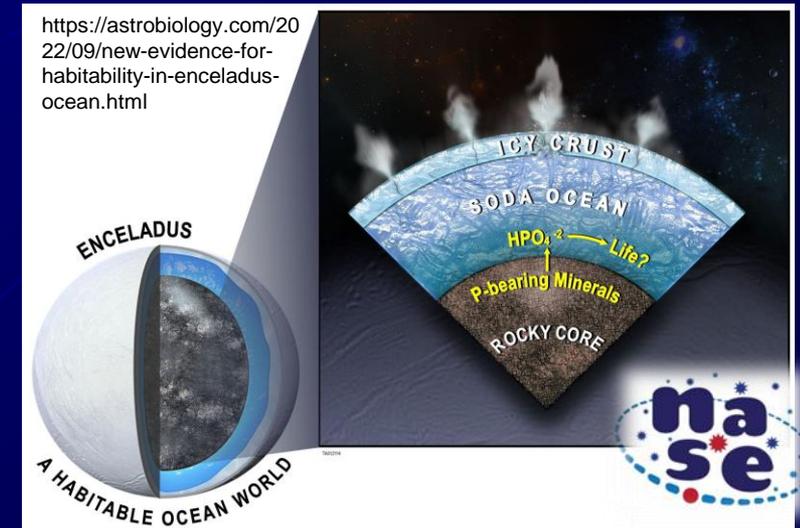
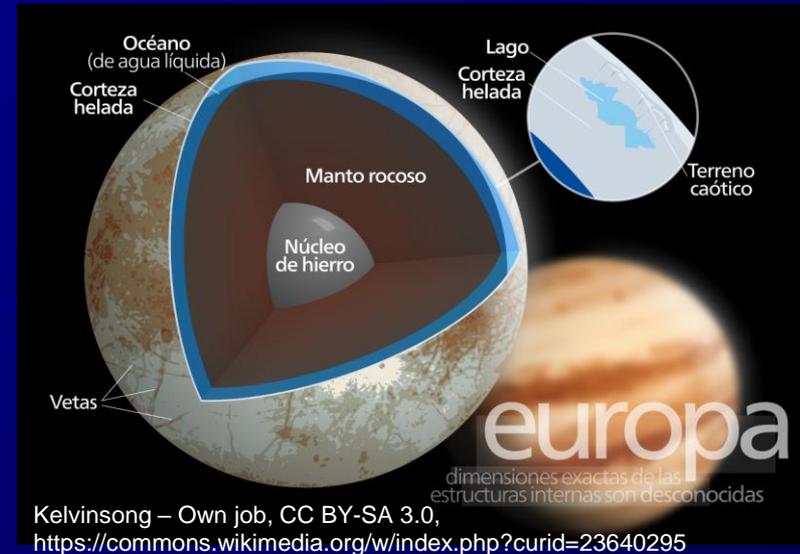


太陽系の衛星とその宇宙生物学的関心

エウロパ 地球の3倍小さいものの、地球の10倍の量を持つ海があります。

エンケラドス 2014年には、地表から 100 km の高さまで吹き上げる間欠泉が発見されました。

この観測により、氷床の下に海が存在することが明らかになりました。



太陽系の衛星とその宇宙生物学的関心： タイタン

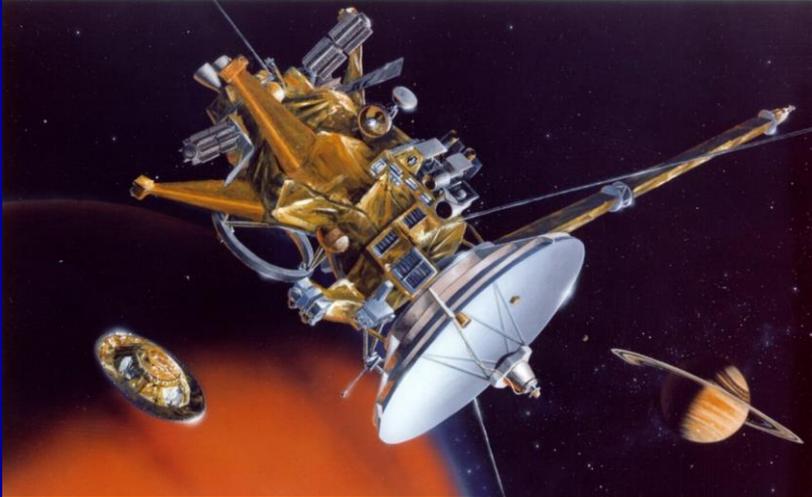
土星最大の衛星であるタイタンは、大気中に大量の有機物を形成しています。

1980年と1981年に、ボイジャー1号と2号の探査機は、主に窒素とメタンからなる非常に密度の高い大気存在を明らかにしました。

タイタンの大気中の化学的性質は非常に複雑で、その結果として、地表に沈殿する有機エアロゾルが形成されることがわかっています。



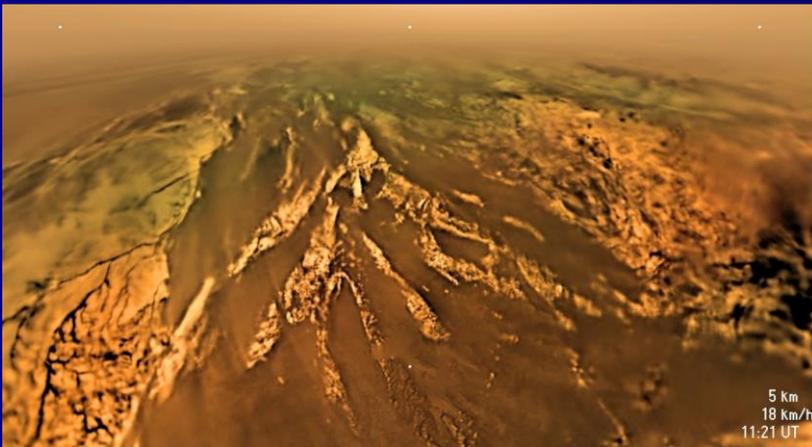
カッシーニ・ホイヘンス計画（1997-2017）で、タイタンの大気中に複雑な有機物が確認されました。



カッシーニ・ホイヘンス計画（NASA）

有機物の粒、砂丘、炭化水素の湖で覆われた表面の印象的な画像が得られました。

天体物理学のモデルでは、タイタンの表面の下には液体の水の海があり、豊富な前生物化学物質と生命出現に必要なすべての成分が用意されている可能性があると考えられています。

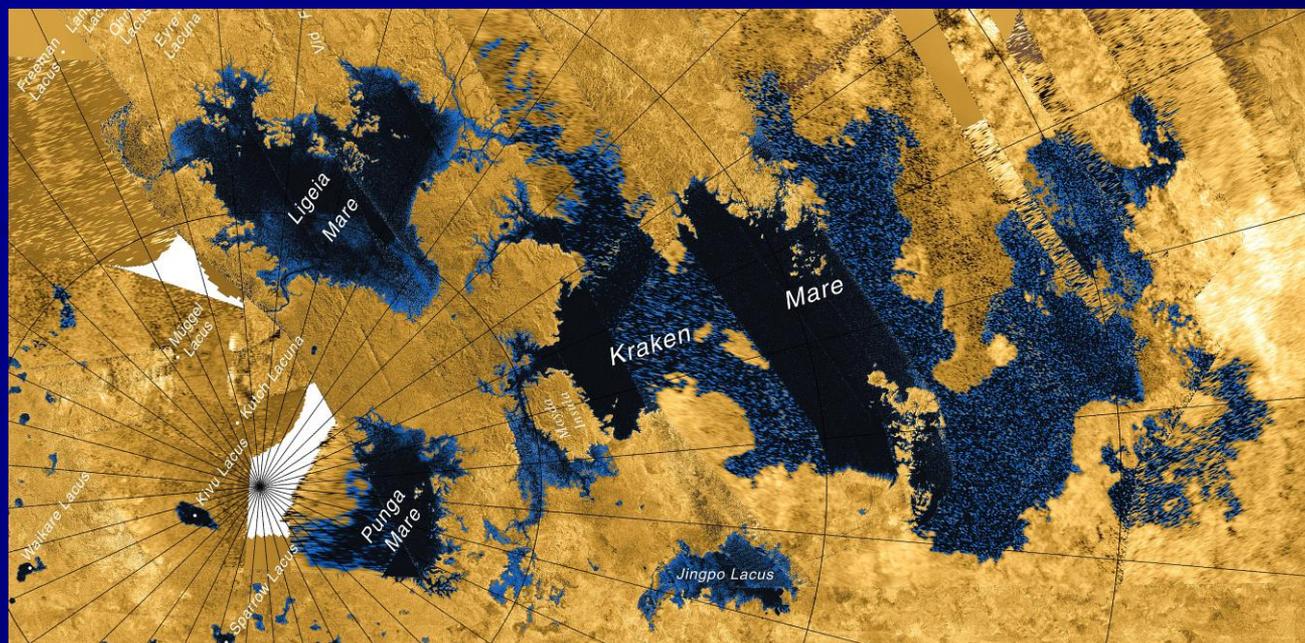


タイタンの表面（カッシーニ・ホイヘンス, NASA）



進化的地球化学モデルによると、タイタンの形成後100万年から、この地下海が大気と接触し、そこで最初の複雑な分子が生成されたことを示唆しています。

地球に例えると、このタイタンの海には熱水噴出孔の存在が期待されており、有機分子のエネルギー源であり、前生物段階の潜在的な環境となっています。



太陽系を超えて

私たちの住む銀河系では、5500個（2024年現在）の太陽系外惑星が発見され、確認されています。それは私たちの太陽系の形成、それはおそらく独特のものでしょう、を理解するのに役立つでしょう。

アストロバイオロジーの分野における知識と進歩の現状では、生命居住可能惑星は何か、私たちの銀河系内外に生命が存在するかということについて仮説を立てることは非常に困難です。

生命の発達の候補地はどんどん増えているようですが、実際の生命の発達はどうか。



結論

アストロバイオロジーは、宇宙の他の領域に生命が存在するかどうか、もし存在するとすればどのような形で存在するのか、という実存的な疑問に答えようとしています。

地球上の生命の出現は、偶然の一致なのか、特定の条件や環境下で再現可能な現象なのかを判断するために、数十年にわたる研究が行われてきました。



結論

このことを理解することは、宇宙の他の場所に生命が存在する可能性について結論を出すために必要です。

積極的な努力にもかかわらず、結論はまだ出ていません。



ありがとうございました

