

第二の地球の色とバイオシグニチャー



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

山岸明彦教授退官記念講演会

アストロバイオロジーセンター・サテライト研究シンポジウム

「深海底から宇宙へ、過去から未来へ、分子から社会へ」

14:40-15:15 2019年1月5日

ハッブル

スライファー

宇宙植物学 (astrobotany)

ハッブル - ルメートルの法則

- **1929年** ハッブルが遠方天体の距離速度関係を発見し出版(**ハッブルの法則 = 宇宙は膨張している**)
- **1927年** ルメートルはすでにベルギーの天文学会誌(フランス語)で同じ関係を発表済み
- **1931年** その論文の英訳版が英国天文学会誌に出版される。ただし、ハッブルの法則に関係する部分がごっそり削除されていた。
- **2018年** 国際天文連合による電子投票の結果、今後はハッブルの法則ではなく、**ハッブル - ルメートルの法則と呼ぶことが推奨**される
 - 詳しい経緯は拙著:『宇宙人の見る地球』(毎日新聞出版、2014)を参照のこと

ヴェスト・スライファー



- 遠方の“spiral nebulae”（今で言う銀河）の大半が我々から遠ざかっていることを発見
- 実は、ハッブルもルメートルも、スライファーの観測した速度データをもとに議論していた
- 宇宙膨張の発見に本質的寄与



“Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars” PASP 36(1924)261

reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

火星に生物はいるか？

- 1895年 P.L.ローウェル 火星人の存在を主張(大富豪だったので、私財でローウェル天文台を設立したほど)
- 1897年 H.G.ウェルズ SF小説『宇宙戦争』
- 1914年 G.A.Tikhov 宇宙から見た地球はレイリー散乱のためにpale-blueに見えることを示唆
- 1924年 スライファー (ローウェル天文台長)
 - 火星の表面にクロロフィルがある証拠は見出せなかった
- 1938年 オーソン・ウェルズ 『宇宙戦争』のラジオドラマ
- 1945年 G.A.Tikhov 火星表面上の植物探査、地上の植物の反射スペクトルの研究、単語astrobotanyを造る
- 1957年 W.シントン 火星の赤外線観測より植物の存在を主張

リモートセンシング

わが地球の観測

カール・セーガン (1934-1996)



- 米国の惑星科学者
 - NASAの惑星探査プロジェクトの多くを主導
 - 「核の冬」、「われわれは星くずからできた星の子供」など多くの言葉を残し、社会に大きな影響を与えた
 - TVシリーズコスモス(1980)
 - 映画コンタクト(1997)
「地球人だけじゃこの広い宇宙がもったいない」

ペイル・ブルー・ドット



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

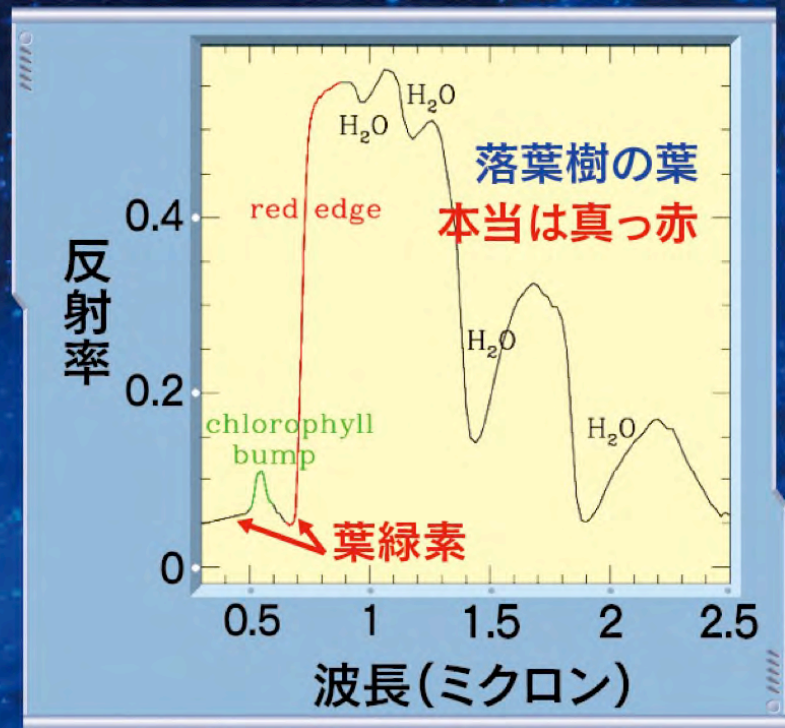
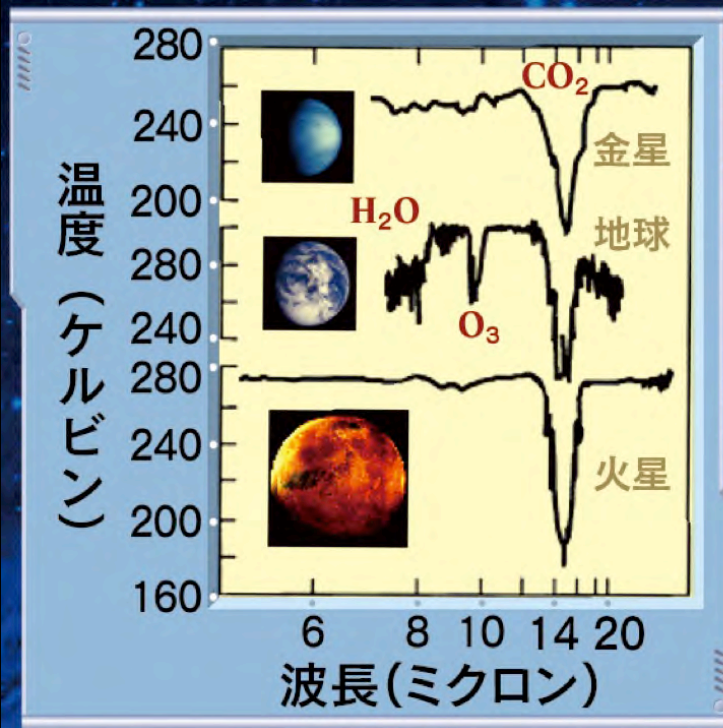


土星から 見た地球

- 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):2万人がこちらに手を振っている

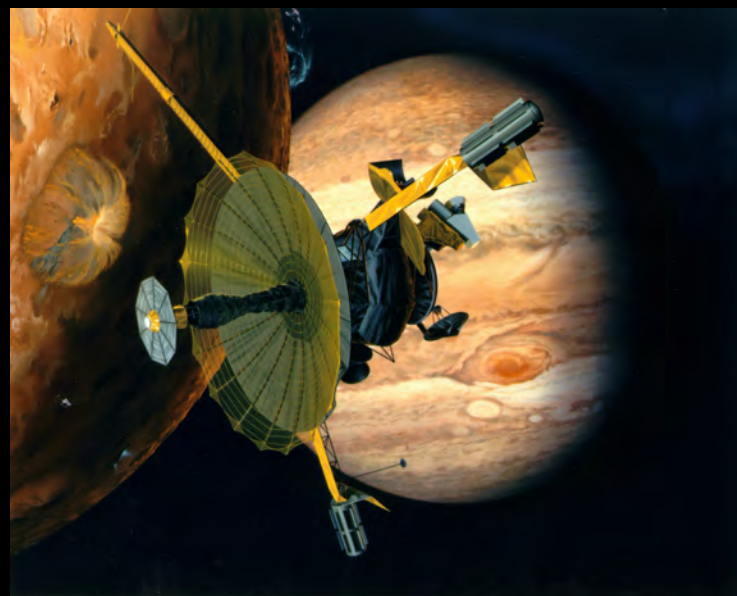
バイオシグニチャー: 生物が存在する兆候

- 何を見れば生命があると考えられるのか？
 - 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 (astrobotany)
 - 知的生命体からの電磁波
- 天文学観測(リモートセンシング)が唯一の手段



ガリレオ探査機による地球上の生命探査

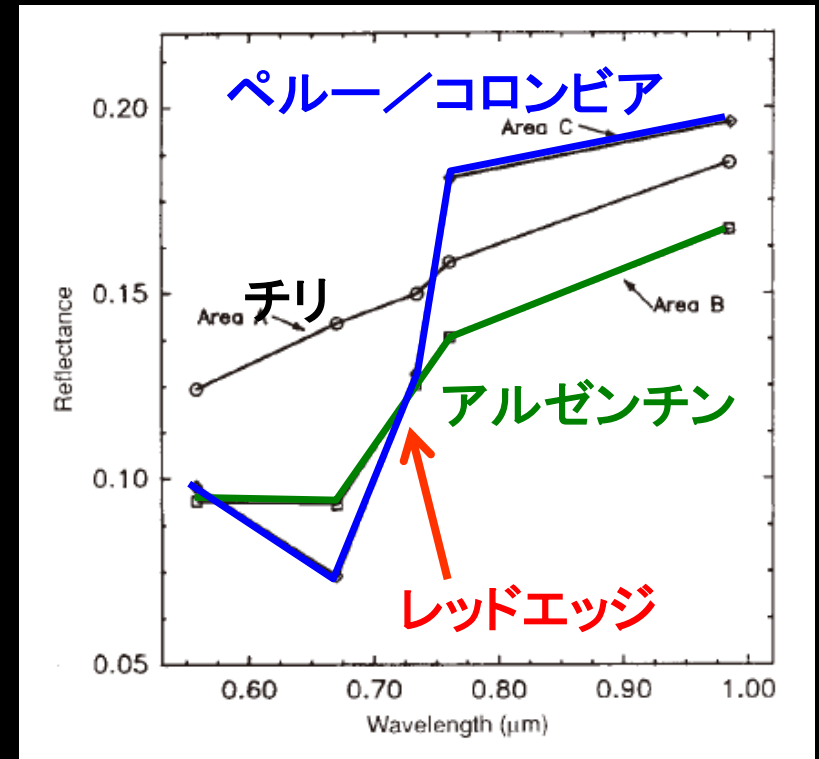
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- **地球には生命がいるらしい!**
 - 大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する“不自然な”パルス状電波



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

Sagan et al. (1993): 撮像

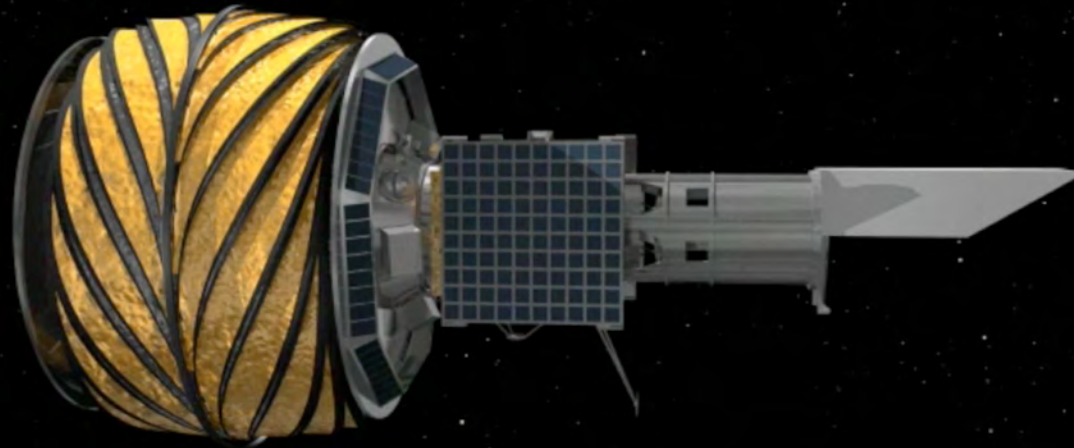
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



リモートセンシング

第二の地球の模擬観測

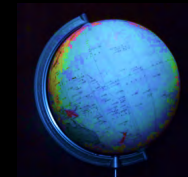
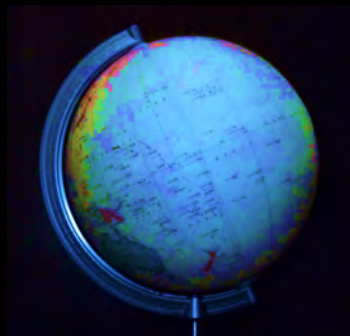
Starshade project: 地球型惑星を直接見る



- 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)

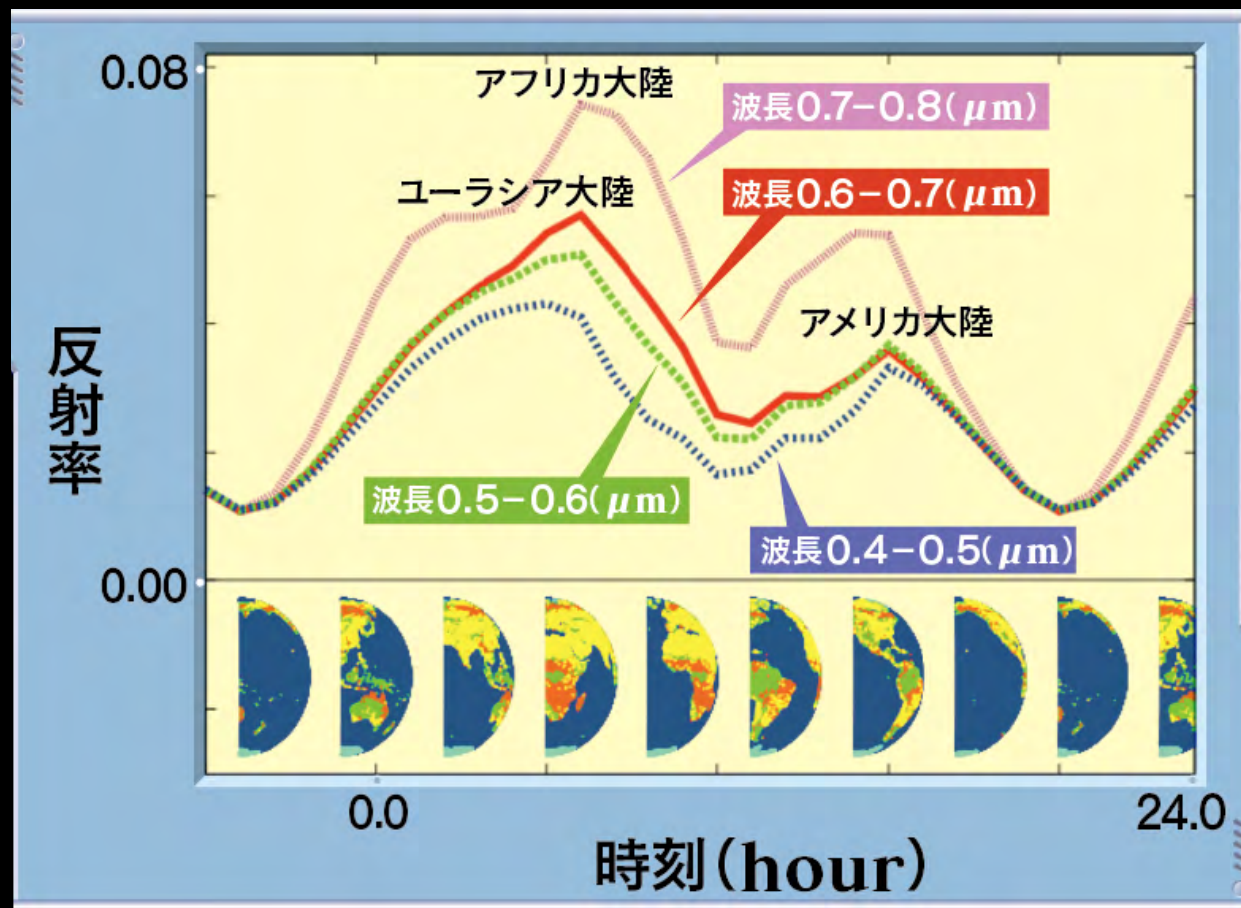
ペイルブルードットを超えて

- 系外惑星は「点＝ドット」としか見えない
- 表面を直接分解する解像度はない
- 自転周期による微妙な色の変化は観測可能



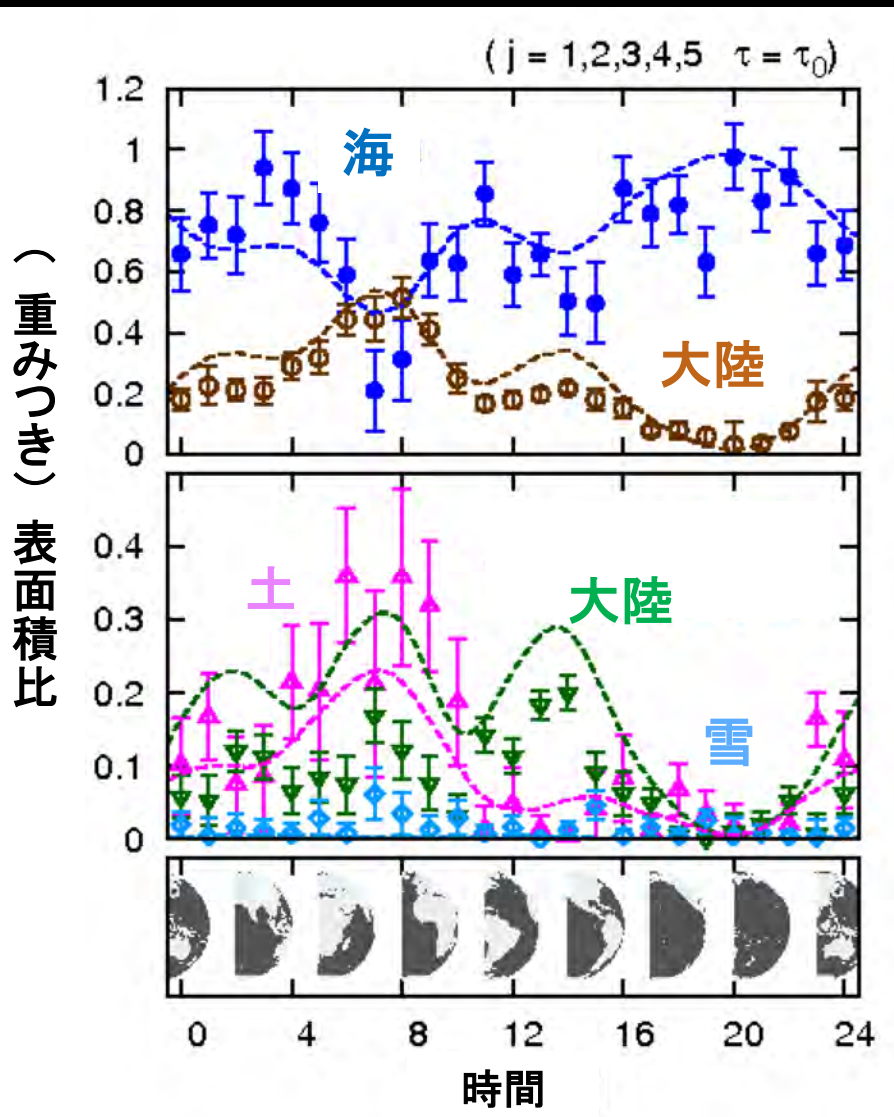
もうひとつの地球の色

- 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



- 雲は無視
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 30光年先の地球を口径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、植物の検出までは難しいという結論

藤井友香ほか(2010)

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

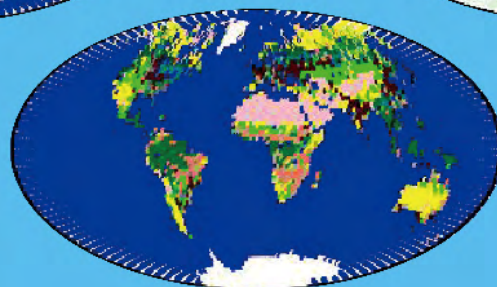
海



植生



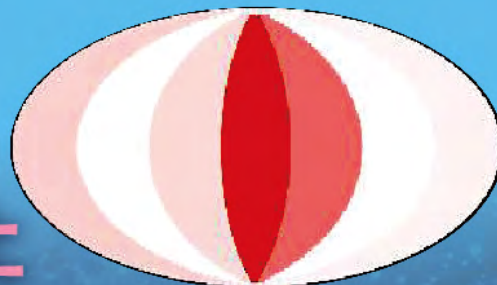
雲



雪



土



藤井友香 他(2011)

系外惑星上の植物の色を予想する

古いM型星



若いM型星



G型星

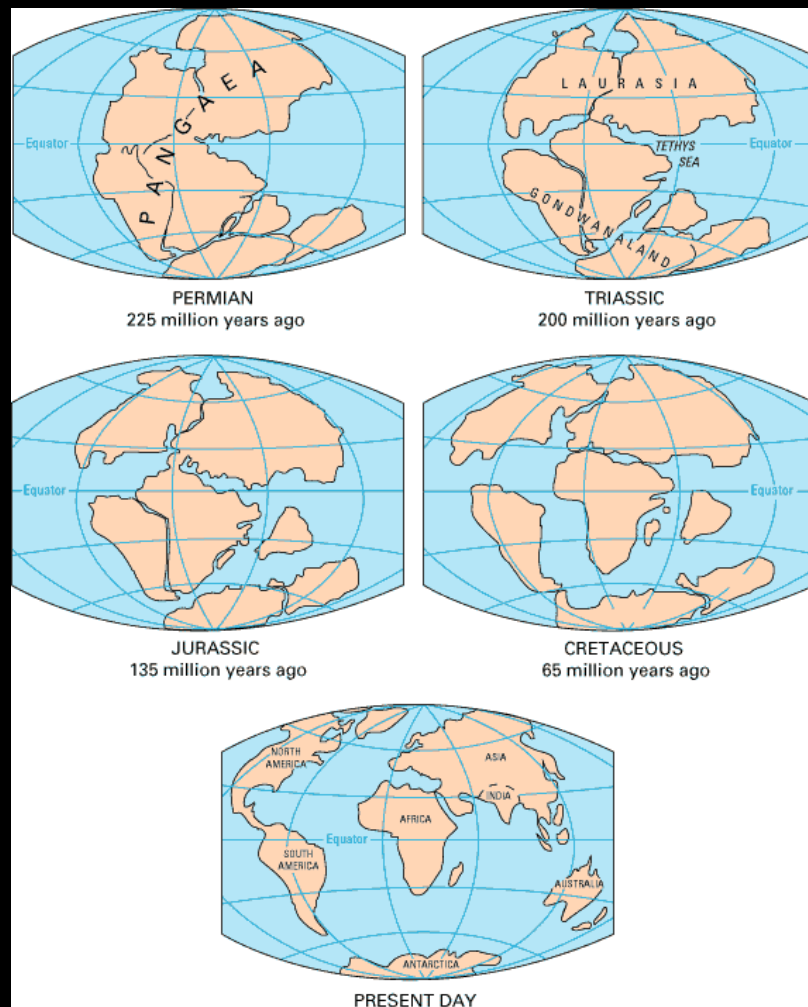


F型星



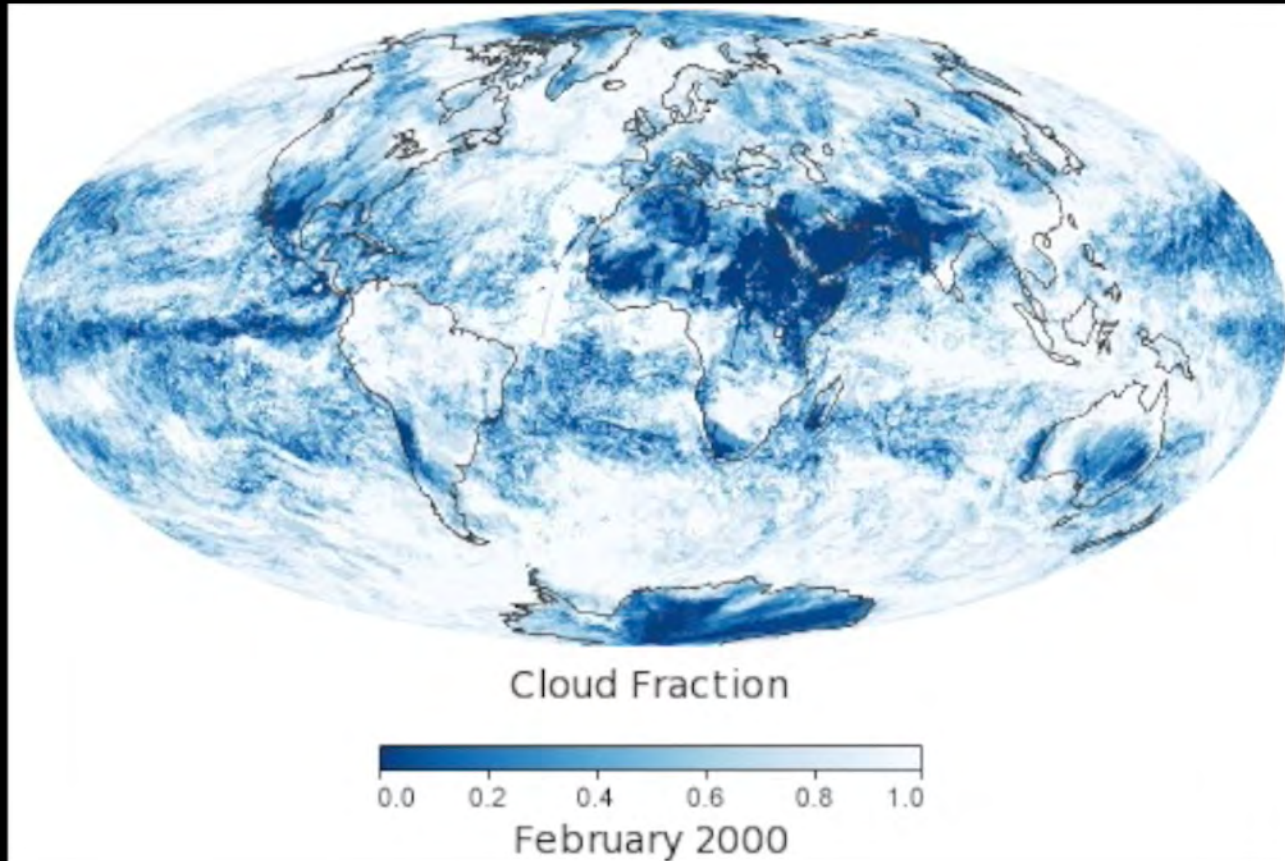
日経サイエンス2008年7月号
Nancy Y. Kiang

紅色細菌は植物の陸上進出以前の地球(38~25億年前)におけるバイオシグニチャーになるか？



Sanroma et al. arXiv:1311.1145

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/>

第二の地球の

気象シミュレーション

GCM

general circulation/global climate model

- 大気、海洋、陸地、雲、雪氷などの変化を考慮して、地球の大気循環と気候を再現し予測するモデル
- 1960年代に、プリンストンの地球物理流体力学研究所にいた真鍋淑郎とカーク・ブライアンが共同で開発
- 地球温暖化に関する議論において本質的な役割を果たす



2018年6月9日@Mediterra, Princeton

第二の地球の気候シミュレーション

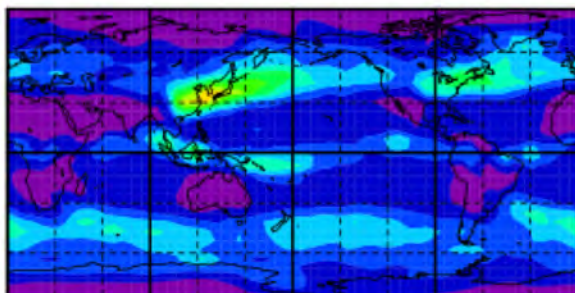
- 中川雄太、石渡正樹、小玉貴則、河原創、須藤靖+
 - 林祥介(神戸大)のグループが開発したGCMコード **DCPAM5 (電脳倶楽部惑星大気モデル)** <http://www.gfd-dennou.org>
 - (経度、緯度、大気圧高度)=(32,64,26) グリッド
 - 実際の地球の表層データ
 - 自転傾斜角 ζ [deg]=0, 30, 60, 90, 150, 180
- 大気輻射輸送公開コード libRadtran を用いて、地表+雲の反射スペクトル光度曲線を3時間ごと1年分計算
 - とりあえず、光度曲線から地球の時点の周波数変調を計算し自転傾斜角の推定可能性を議論 (Kawahara 2016)
 - 次に、雲を考慮したリモートセンシング宇宙植物学を行う

年平均した雲柱密度の自転傾斜角依存性

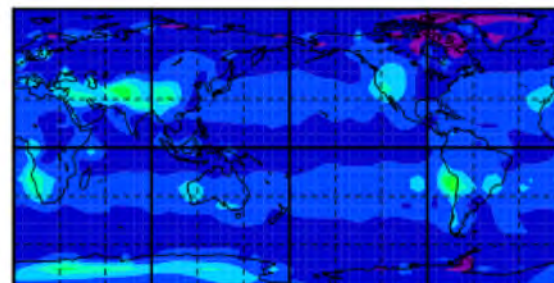
(Nakagawa et al. 2018)

Annual mean cloud [g/m²]

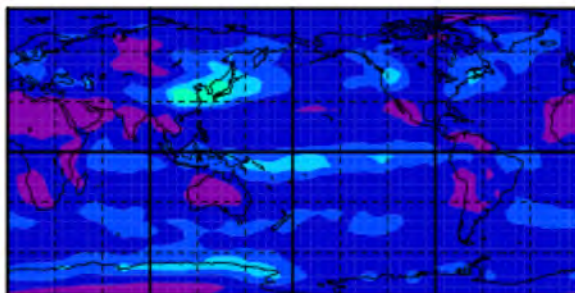
$\zeta = 0^\circ$



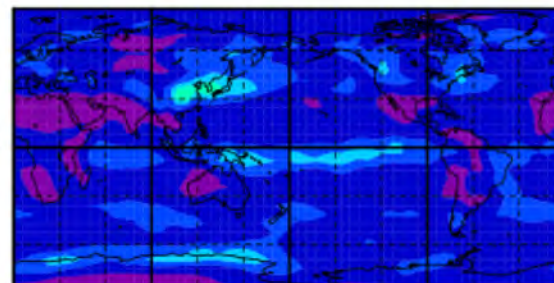
$\zeta = 90^\circ$



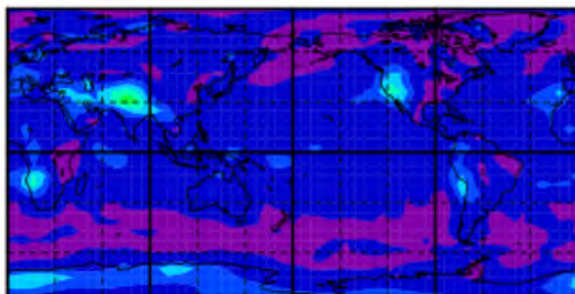
$\zeta = 30^\circ$



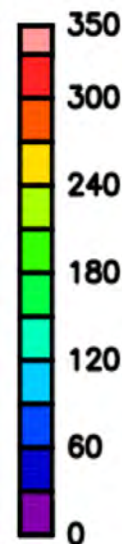
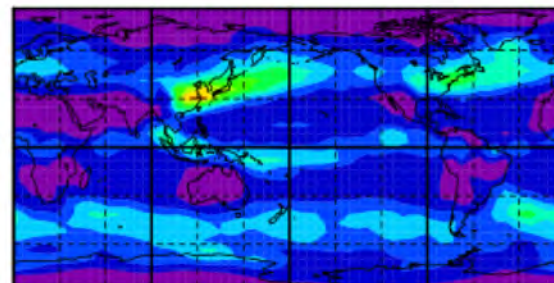
$\zeta = 150^\circ$



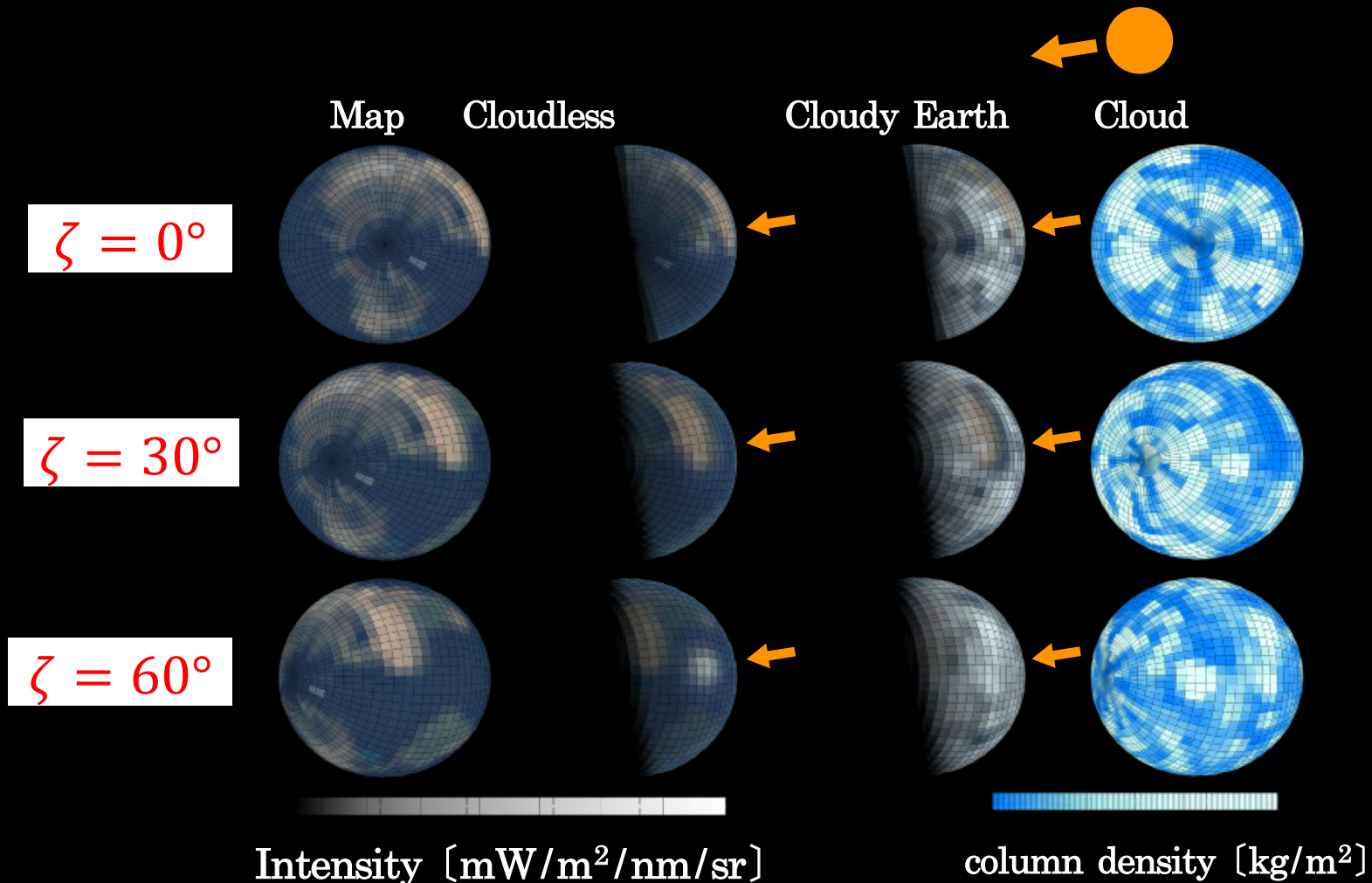
$\zeta = 60^\circ$



$\zeta = 180^\circ$

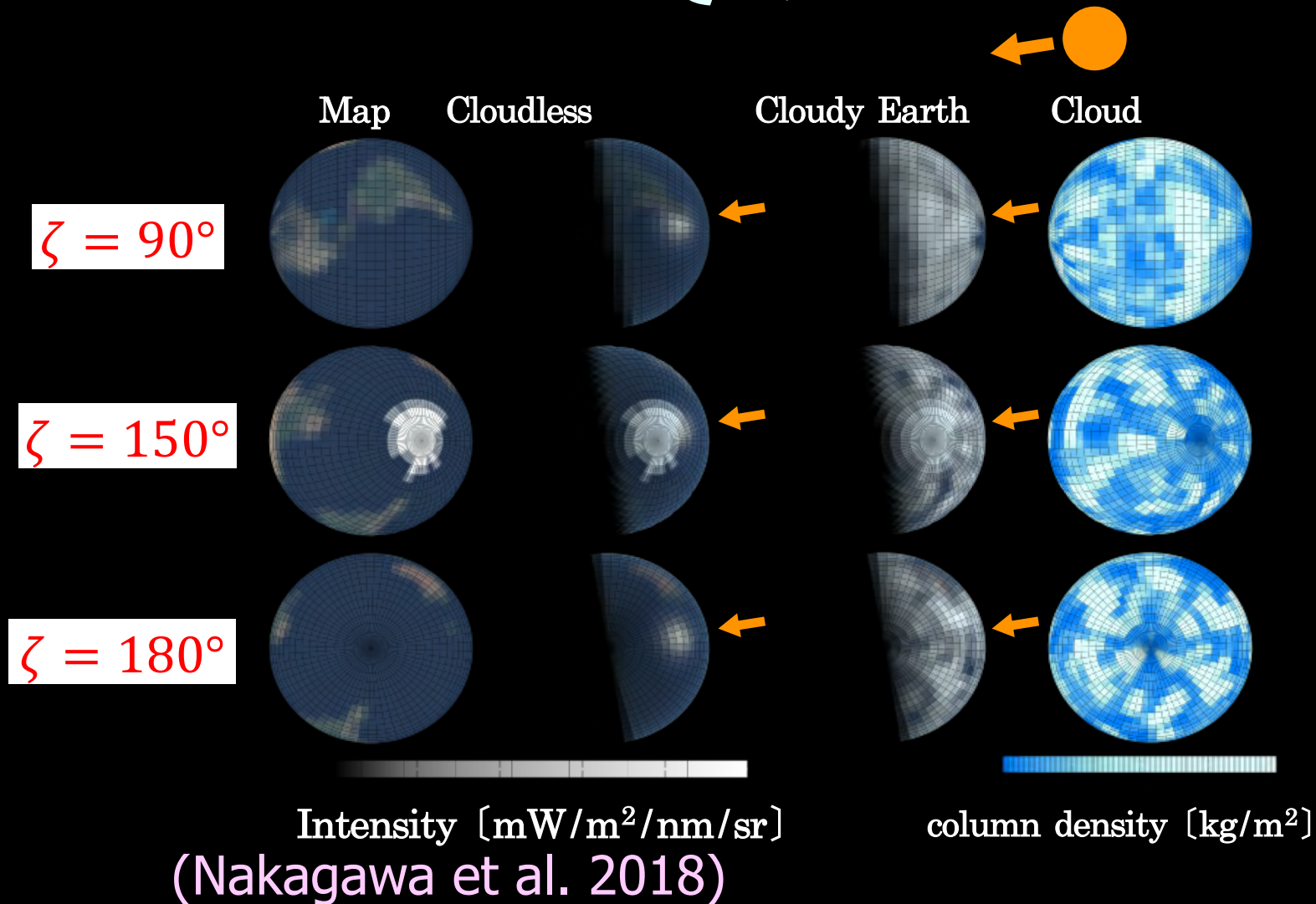


雲を考慮した地球反射光の模擬観測

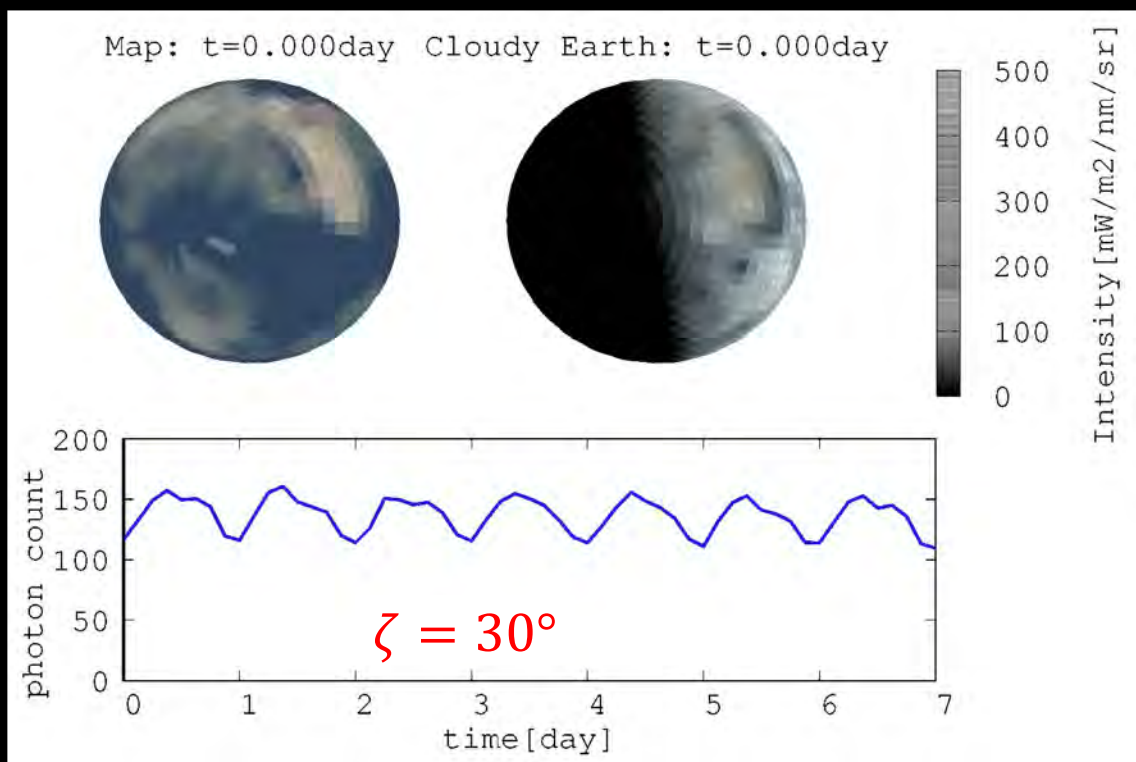


(Nakagawa et al. 2018)

雲を考慮した地球反射光の模擬観測 その2



反射光シミュレーションからの光度曲線



(Nakagawa et al. 2018)

- 第二の地球の模擬観測
- 第二の地球の自転周期と、自転傾斜角の推定 (進行中)
- 雲と気象の時間変化を考慮した第二の地球上の大陸、海洋、植物の同定 (計画中)

プロキシマ ケンタウリ b

プロキシマ ケンタウリb

- 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α 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)
- そこへ直接超ミニ探査機を送るスターショット計画が検討されている

Alpha Centauri AB

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(素粒子理論で学位取得)が地球外知的生命を探查するために、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查機群を送るための概念設計検討

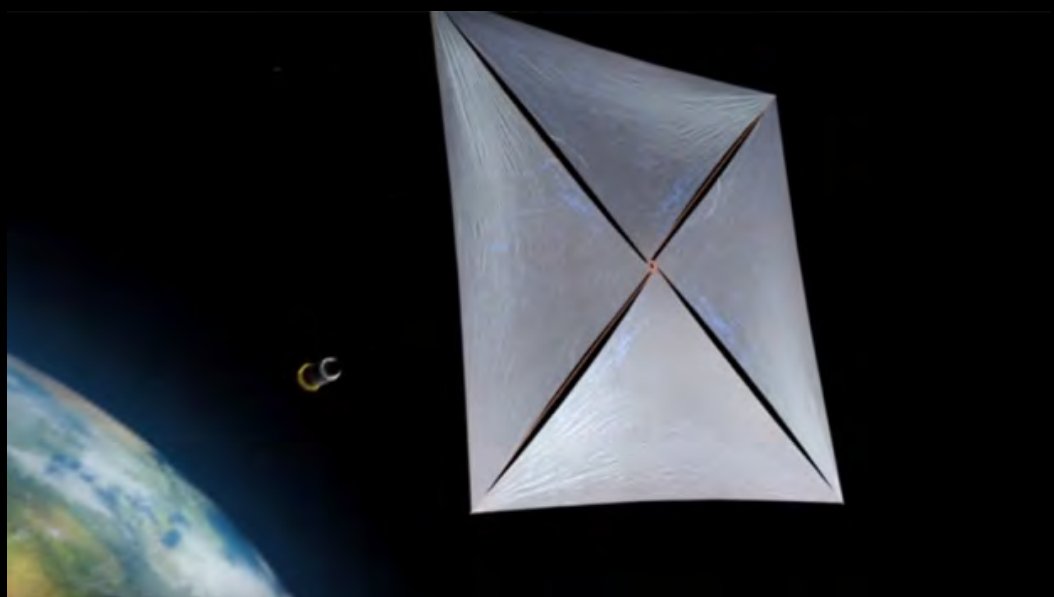
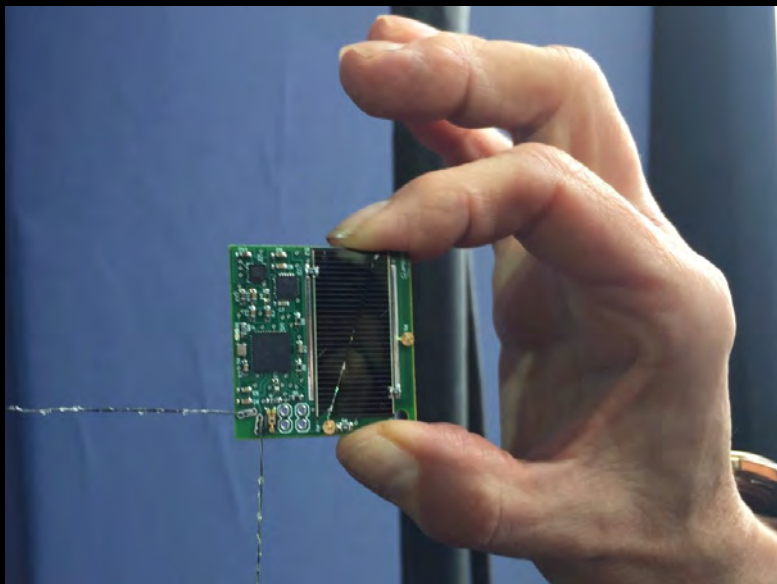
ブレイクスルースターショット

<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

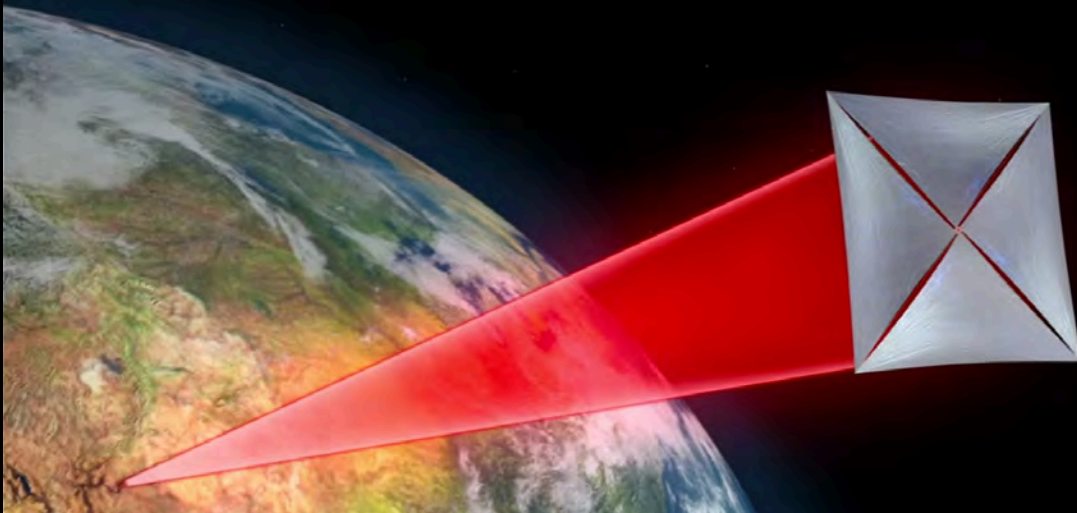
■ スターチップ

- 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 x 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

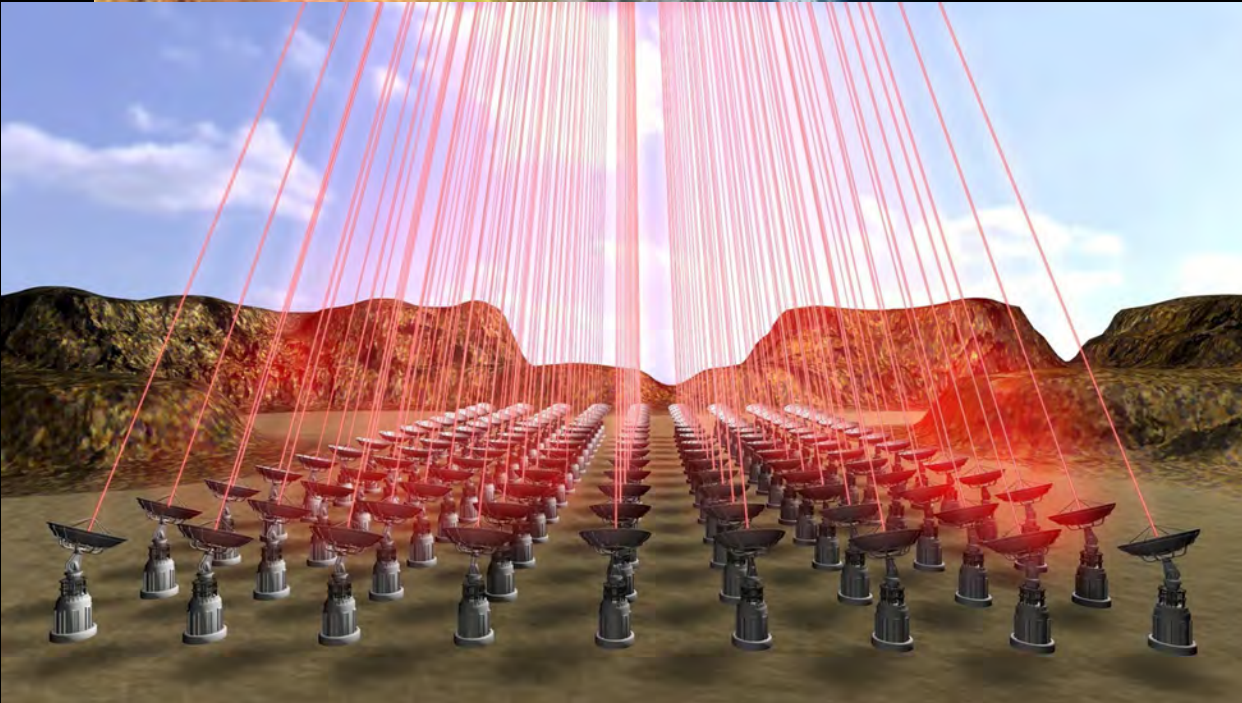
スターチップ



地上のレーザーで光速の20%に加速



- 今から20年後に打ち上げ、さらに20年かけて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？



展望

宇宙における生命探査

- 30年前まではSFでしかなかった
 - 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

天文学から宇宙生物学へ

- **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)
 - 系外惑星探査機TESSがさらなる候補を
 - いずれは、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検出可能性から考える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)
 - もちろん、最も確実なのは高度文明からの(電磁波)信号
- **リモートセンシングのシミュレーションが本質的**

第二の地球のシミュレーション

- 地球の観測データを用いた研究はすでに多くなされてきた (Fujii et al. 2010, 2011; Kawahara & Fujii 2010, 2011; Fujii & Kawahara 2012)
 - 「地球」をより一般化したシミュレーションによる観測可能性を系統的に研究すべき
- 大気大循環モデルシミュレーション(現在進行中)
 - 大気・表層環境(海洋、大陸、植生分布)
 - 中心星(温度、距離)、惑星軌道(自転、傾斜角、離心率)
 - 雲の分布を含めた惑星の観測シミュレーション
 - 気象、地球物理、生物、物理、天文の学際的研究
 - 生物学研究者の方々の協力が不可欠な時期となっている