

A person in silhouette is shown in profile on the right side of the frame, looking towards a sunset. The sun is low on the horizon, creating a bright orange glow that illuminates the sky and a sea of clouds below. The sky transitions from a deep blue at the top to a lighter orange near the horizon. The person is wearing sunglasses and a dark jacket. The overall scene is serene and contemplative.

天文学の心： *from After Dark to Beyond Dark*

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

プラズマ科学のフロンティア2013研究会

2013年8月22日15:00-17:00@核融合科学研究所

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2013j.html

1

My naïve perspective for science

牧歌的科学觀

働き者と怠け者の会話

- 「お前はなぜ毎日ごろごろと怠けてばかりで、真面目に働こうとしないのか？」
- 「むしろ君こそ、なぜあくせく働いているの？」
- 「それはたくさんお金を稼ぎたいからだ」
- 「お金を手に入れてどうする？」
- 「いい家に住み、おいしい物を食べ、好きな物を買い、、、」
- 「それから？」
- 「残りの人生をゆっくり楽しむつもりだ」
- 「だろ？俺は今まさにそうしているのさ」

社会人と天文学者の会話

- 「お前はなぜ毎晩星を眺めているばかりで、真面目に働こうとしないのか？」
- 「むしろ君こそ、なぜあくせく働いているの？」
- 「それはたくさんお金を稼ぎたいからだ」
- 「お金を手に入れてどうする？」
- 「いい家に住み、おいしい物を食べ、好きな物を買い、、、」
- 「それから？」
- 「星でも眺めながら人生をゆっくり楽しむつもりだ」
- 「だろ？俺は今まさにそうしているのさ」

invaluable > valuable

- 「役に立たない」≠「価値がない」
 - 芸術、音楽、文学、恋愛は役に立つのか？
 - でもそれらは生きる意味を与えてくれる
 - **valuable** は、「価値を判断できる」ほど大切、意義深いという意味
 - **Invaluable** は、「もはや価値を判断する事すらできない」ほど重要であるという意味
 - 科学にも**useful**ではなく**useless**だが**invaluable**で**priceless**な分野があって良い
 - ⇒ 天文学はその典型例

私の牧歌的科学観

- 謎を解明する(問題に答える)よりも、**新たな謎を発見(世の中の不思議さに感嘆)**するほうが大事
 - **勉強**(つとめはげむ)から **学問**(学びて問う)へ
- **競争のための競争は無意味**: 勝ち負けという価値観は科学とは本来相容れない(なぜトップだけを目指す?)
- **ただし、このような私の価値観は、科学者の間ですらあまり共感をもたれていないかも、、、**
 - しかし「役に立たない」学問を、その波及効果あるいは「100年後に役に立つ」事を生み出すという理由を前面に出して正当化する論調には全く賛同しかねる

笠井献一著『科学者の卵たちに贈る言葉 江上不二夫が伝えたかったこと』

岩波科学ライブラリー 210

科学者の卵たちに 贈る言葉

江上不二夫が伝えたかったこと

笠井献一



岩波書店

「実験が失敗したら
大喜びしなさい」
「自然は人間の頭で
考えられるよりも
はるかに偉大で
複雑だよ」

- 科学は勝ち負けではない
- 流行している研究などやらなくてよい
- 人真似でかまわない
- 牛でこうだったから馬でもそうなるかどうかはやってみる前から分かるはずがないでしょう
- つまらない研究なんてない
- 実験が失敗したら大喜びしなさい

2

Intellectual curiosity

知的好奇心

天文学という文学

- 「文学部か、いいなあ」
- 「え、どうしてです」
- 「思い残すことがないでしょう」

私は《文学部しかない》と決めていて、それが何のためとは思わなかった。しかし、勉強が、それ自体のためというより、ステップであるということも当然あるわけだ。いや大学という存在の《機能》を考えたら、そちらの方が自然なのかもしれない。

北村薫『六の宮の姫君』(東京創元社)



村上春樹『アフターダーク』より

- 果物がたわわに実り、真ん中には高い山がそびえるハワイのある美しい島に流れ着いた3人の兄弟。夢にでた神様が「とてつもなく重く大きな岩が3つあるはず。それを好きなところまで転がして行け、どこまで行くかはお前達の自由である。高い場所に行けば行くほど遠くを見ることができる」と告げる。
 - 三男：海岸の近く：とても美しいし、魚も捕れる
 - 次男：山の中腹：果物が豊富に実っている
 - 長男：山のとっぺん：霜をなめ苔を食べることで水分と栄養をとるしかない、でも世界は見渡せる

マリは質問する

- 「その話には教訓みたいなものはあるの？」
- 「教訓はたぶんふたつある。ひとつは」と彼は指を一本立てる。
- 「人はそれぞれに違うということ。たとえ兄弟であってもね。もうひとつは」と二本目の指を立てる。「何かを本当に知りたかったら、人はそれに応じた代価を支払わなくてはならないということ。」

Mari offers her opinion:

"To me, the lives chosen by the two younger brothers make the most sense."

- "True," he concedes. "**Nobody** wants to go all the way to Hawaii to stay alive licking frost and eating moss. That's for sure. But the eldest brother was curious to see as much of the world as possible, and he couldn't suppress that curiosity, no matter how big the price was he had to pay"

- *"Intellectual curiosity."*

- "Exactly."

*English translation by Jay Rubin
(distorted by Yasushi Suto)*

Indeed, we are *the Nobody* !



すばる望遠鏡



ハワイ島マウナケア山頂上の
3つの大きな岩

(以下のハワイの写真はすべて
柏木俊哉氏撮影)



三男@ハワイ島ヒロ(海拔0m)

次男@中間宿泊所ハレポハク (海拔2,800m)



長男@すばる望遠鏡(海拔4,200m)



でも世界は見渡せる



でも世界は見渡せる



でも世界は見渡せる



でも世界は見渡せる



3

What controls our world ?

世界を流れる理由を知りたい

Langton's ant

- 極めて単純な決定論的規則でありながら、予想不可能な複雑なパターンを示す：世界の多様性の起源？
 - 検索あるいはウィキペディアを参照のこと

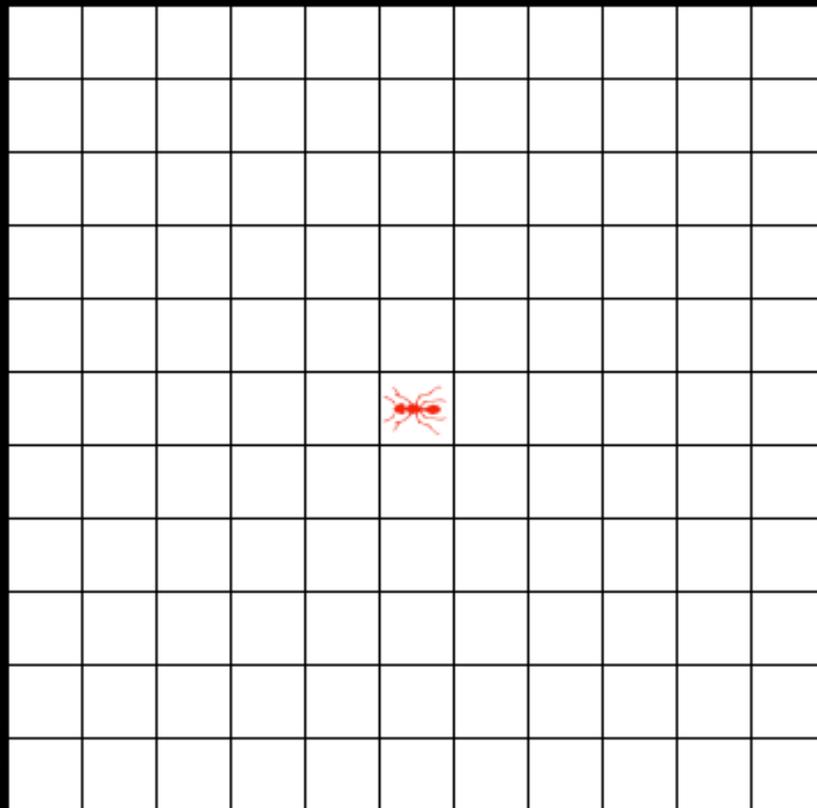


Step: 199

ウィキペディアより

複雑な世界に隠された単純な摂理

- 黒と白の2色からなる2次元タイルをアリが以下の単純な規則にしたがって動く
 - 黒いマスにアリがいた場合、 90° 右に方向転換し、そのマスに色をつけ、1マス前進する
 - 白いマスにアリがいた場合、 90° 左に方向転換し、そのマスの色を黒にして、1マス前進する
- 最初の黒と白のタイルの配置によって複雑なパターンが生まれる



単純な法則から生まれる複雑な世界



Step: 199

- 物理学における二つの大きな目標
 - 一見複雑そうな現象からその背後にある単純な法則を見抜く
 - 単純な法則からなぜこのような多様性が生まれるかを理解する
 - 対象が何であるかは問わない(物質のみならず、生命、社会現象、心理現象、脳などまさに森羅万象) ウィキペディアより

**All truths are easy to understand
once they are discovered;
the point is to discover them.**

Hale Telescope at the Palomar Observatory

Photograph of 200-inch Hale telescope and dome.

Image Credits: Peter Sorel and Charles H. Cahill

- Galileo Galilei

2010年10月7日@カリフォルニア工科大学天文学教室講堂

天文学・宇宙物理学研究対象と方法論： とにかく「いろいろ」

■ 対象別：「XX」の起源と進化

- 「XX」 = 惑星、太陽、恒星、星間物質、超新星、コンパクト天体、銀河系(天の川)、銀河、活動銀河核、銀河団、宇宙、時空、生命・文明

■ 波長別：「YY」天文学

- 「YY」 = 電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線、宇宙線、ニュートリノ、重力波

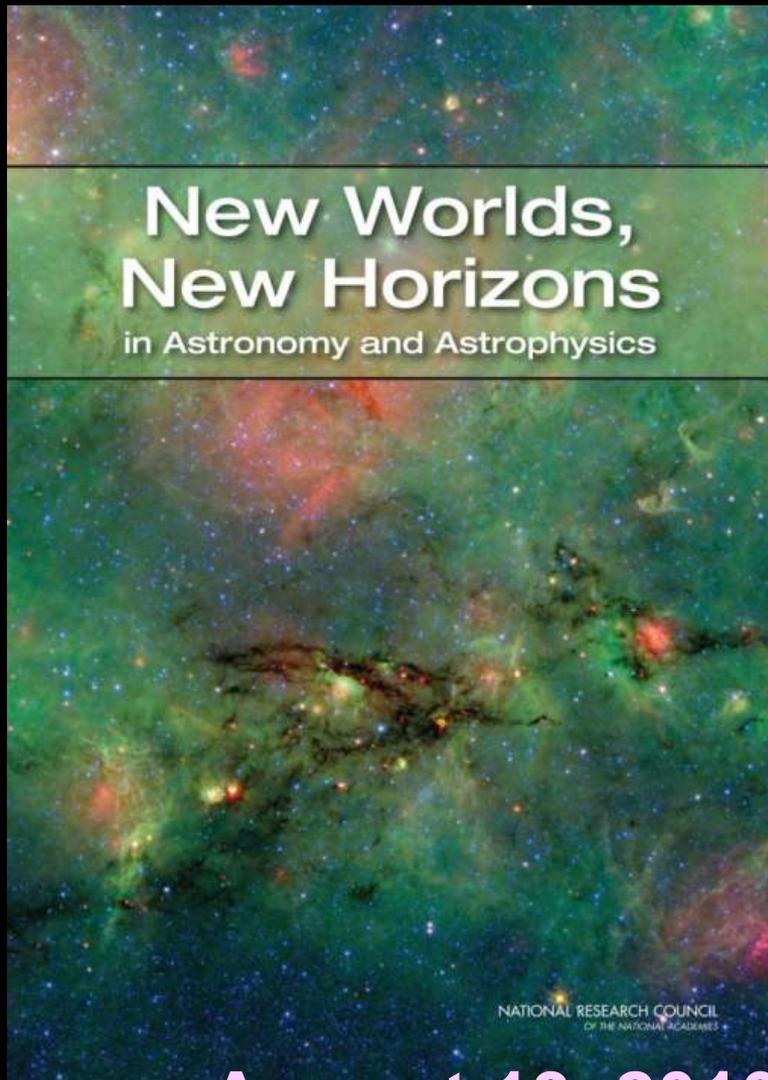
■ 手法別：

- 理論、観測(地上、気球、ロケット、衛星、地下)、実験、数値シミュレーション

宇宙もいろいろ・残された謎

- **宇宙の起源**
 - 素粒子物理学・量子重力理論の進展に依存
- **ダークマターの直接検出**
 - 天文学から高エネルギー物理学実験へ
- **ダークエネルギーの性質の解明**
 - 宇宙の加速膨張の起源
- **重力波の直接検出**
 - 一般相対論の検証から新しい天文学の窓へ
- **高エネルギー宇宙線の起源**
 - 粒子加速機構の解明、粒子線天文学の開拓
- **超新星爆発・ガンマ線バーストのメカニズム**
 - 大質量星進化の最終段階の理解
- **第一世代天体の発見・起源・進化**
 - 宇宙の果てを見通す、天体の起源、元素の起源
- **恒星・惑星の起源**
 - 星・惑星・コンパクト天体の形成と進化
- **地球型系外惑星の発見から宇宙生物学へ**
 - 第二の地球、生命・文明の起源、生物の普遍性

Astro2010: decadal survey



■ *Cosmic Dawn*

- 宇宙の夜明け: 第一世代天体・ブラックホールの探索

■ *New Worlds*

- 新世界: 近傍の居住可能惑星の探索

■ *Physics of the Universe*

- 宇宙の物理: 宇宙を支配する科学法則の理解

August 13, 2010

http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

4

We did not know anything

我々は何も知らなかった

アイザック・アシモフ著 「Nightfall (夜来たる)」

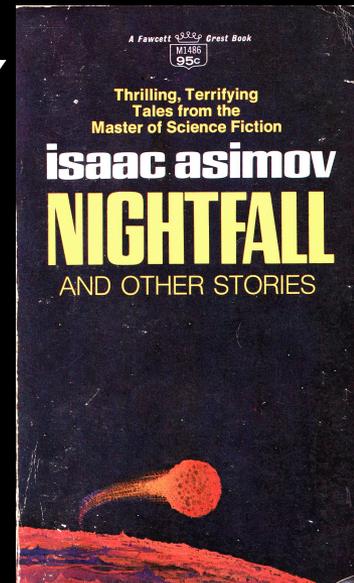


イラスト：羽馬有紗

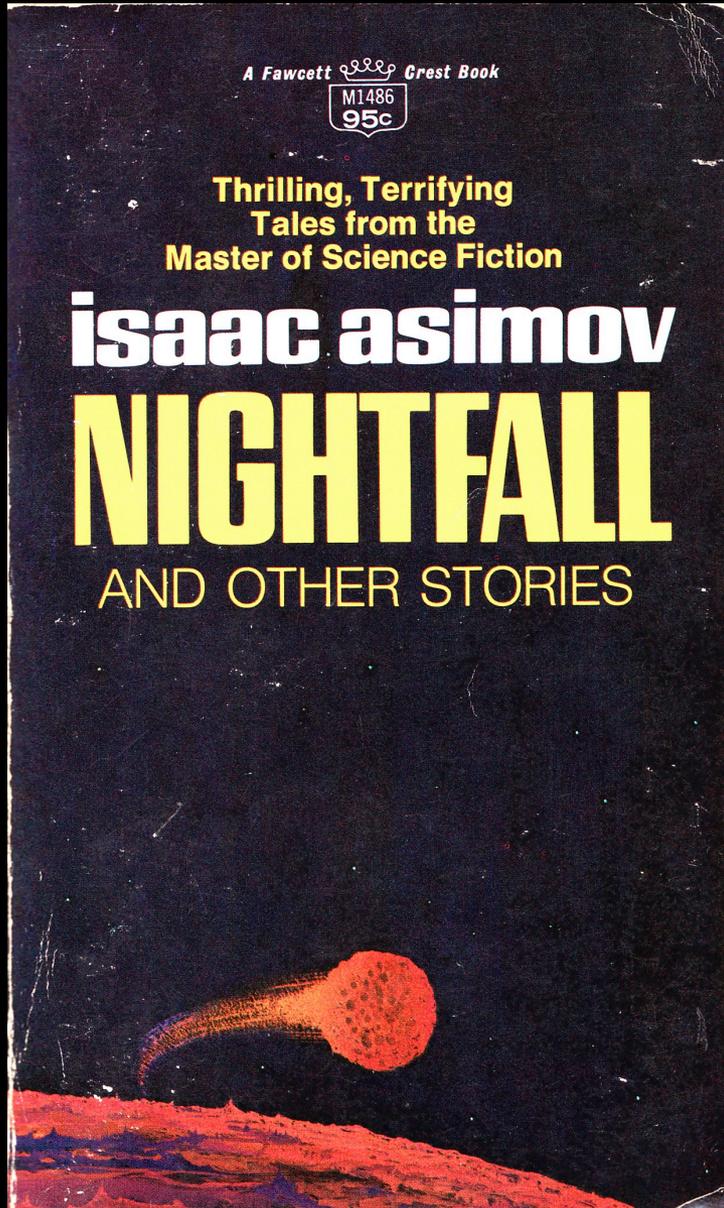
- 2049年に一度しか夜が来ない“地球”の世界観
- 自分たちの“地球”以外に宇宙はあるか？

アイザック アシモフ: Nightfall

- *The Cultists said that every two thousand and fifty years Lagash entered a huge cave, so that all the suns disappeared, and there came total darkness all over the world! And then, they say, things called **Stars** appeared, which robbed men of their souls and left them unreasoning brutes, so that they destroyed the civilization they themselves had built up.*



夜空を観て世界を知る: Nightfall



- “Light !” he screamed. Aton, somewhere, was crying, whimpering horribly like a terribly frightened child.
- *“Stars -- all the Stars -- we didn't know at all. We didn't know anything.”*

この青空は宇宙の果てなのか



「我々は何も知らなかった」
でもこれですべて？

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

5

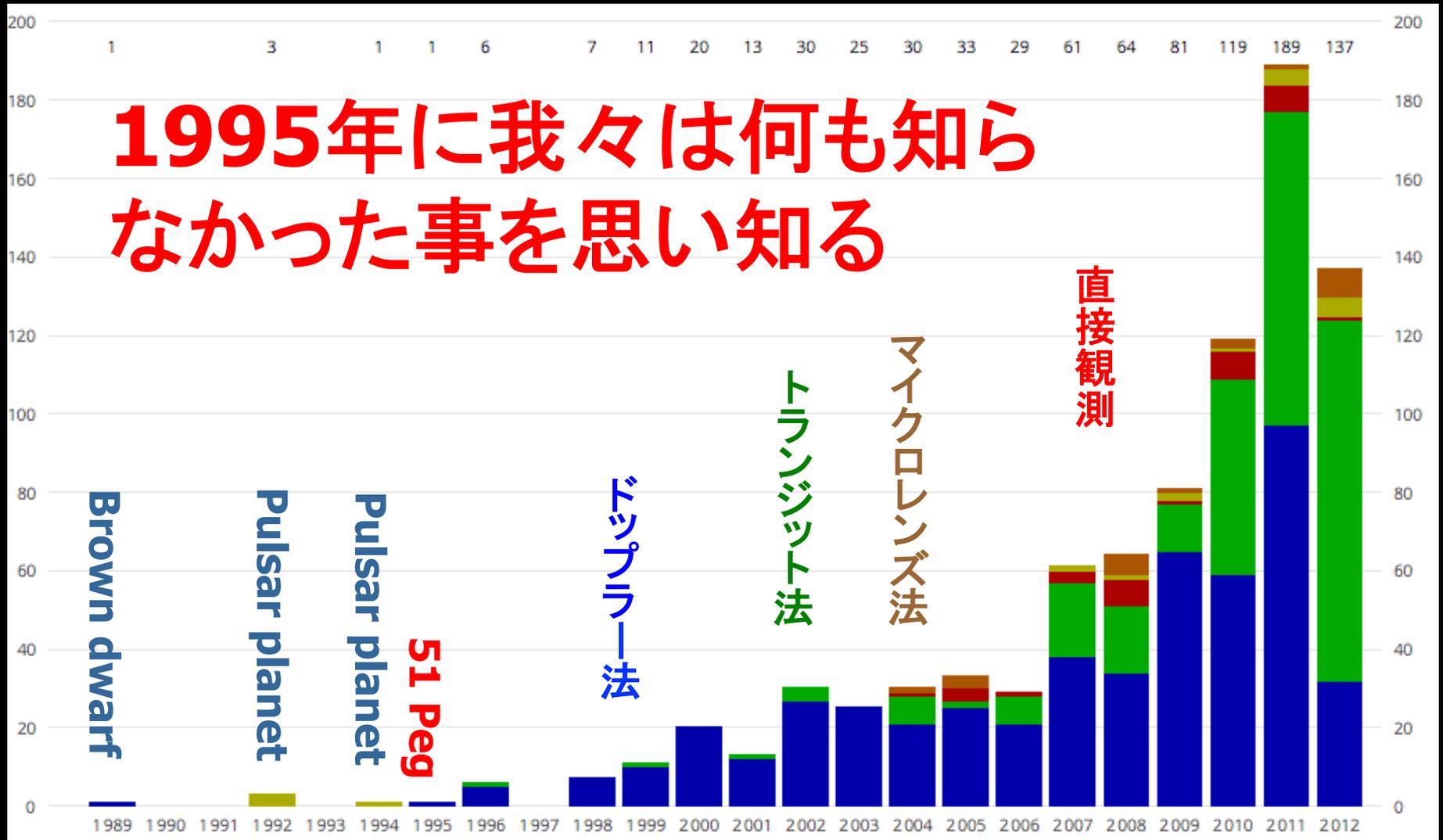
Another world outside the earth?

地球の外に「世界」はあるのか？

太陽系外惑星発見史

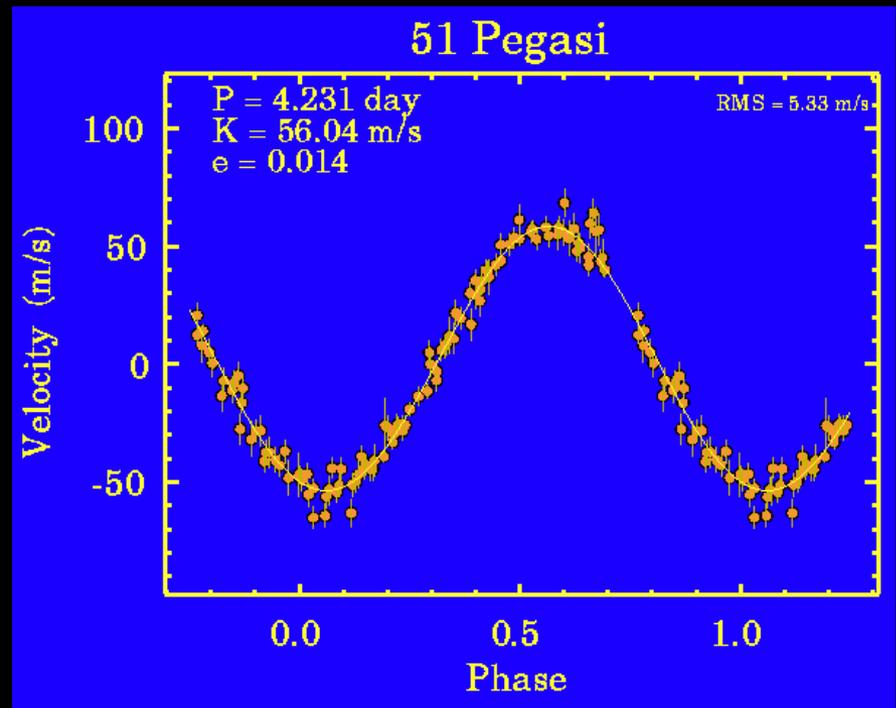
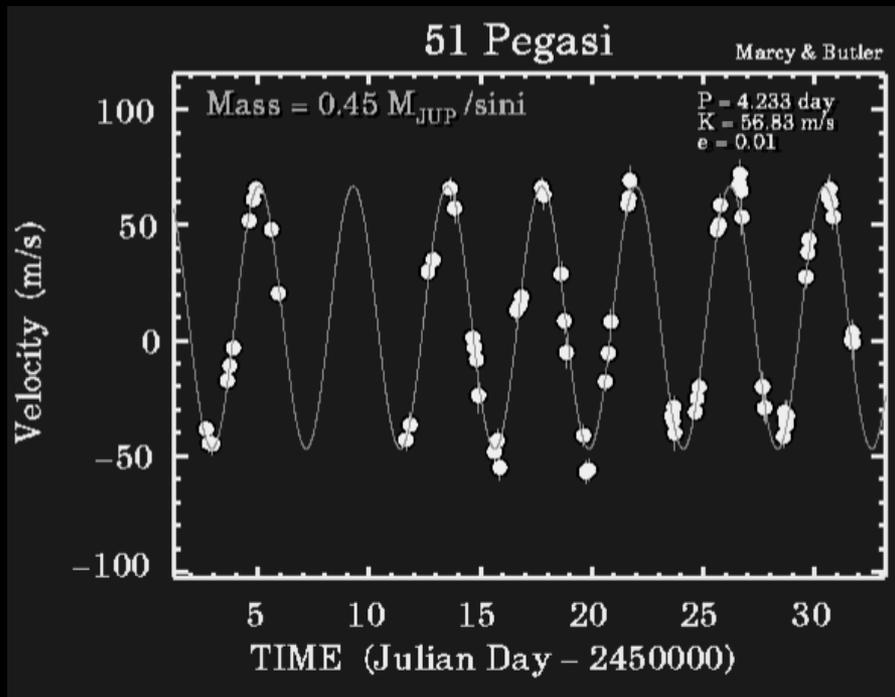
- 1963年 バーナード星に惑星を発見！（ピーター・バンデキャンプ）と報告したが、後に間違いとわかる
- 1995年8月：カナダのゴードン・ウォーカーのグループが12年にもわたる観測の結果、21個の恒星のまわりに巨大惑星は存在しないことを発表
- 1995年10月：スイスのミシェル・メイヨールとその学生デディエ・ケロズが太陽に似た恒星ペガスス座51番星を周期4日で公転している巨大惑星を発見
 - 前年4月に新装置で探査開始したばかり！
 - 直後に、過去7年惑星探査を続けていた、アメリカのジェフ・マーシーとポール・バトラーらがこのデータを確認
- 2013年8月17日時点で726個の惑星系（940個の惑星）

太陽系外惑星発見の歴史年表

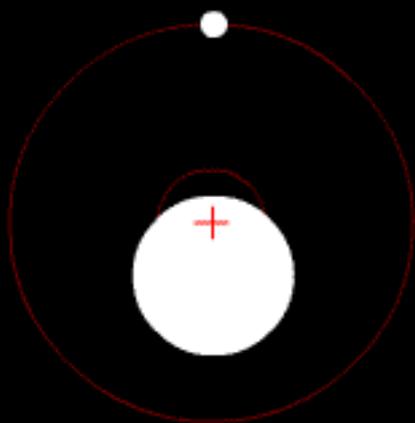


ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



どうやって見つけたのか？



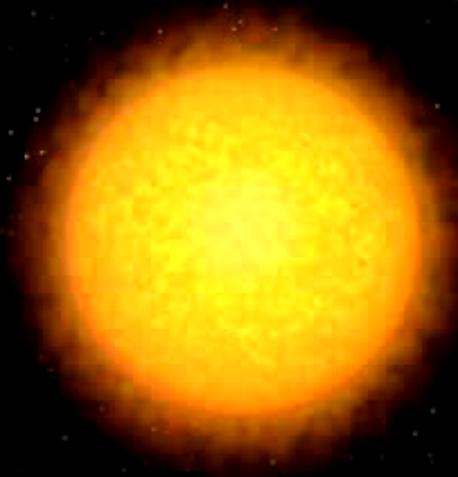
■ ドップラー法

- 中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的変動

■ トランジット法

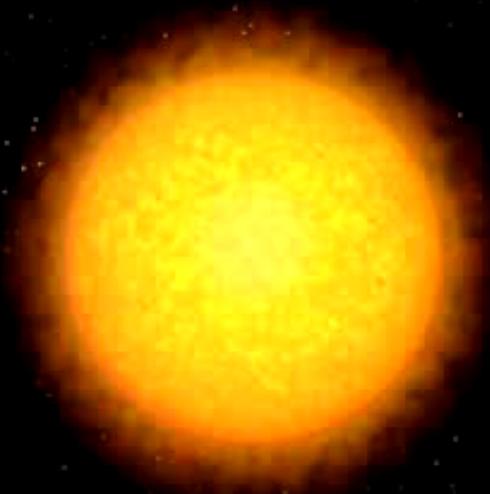
- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることによって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

■ 重力レンズ、直接撮像



初めてのトランジット惑星HD209458b

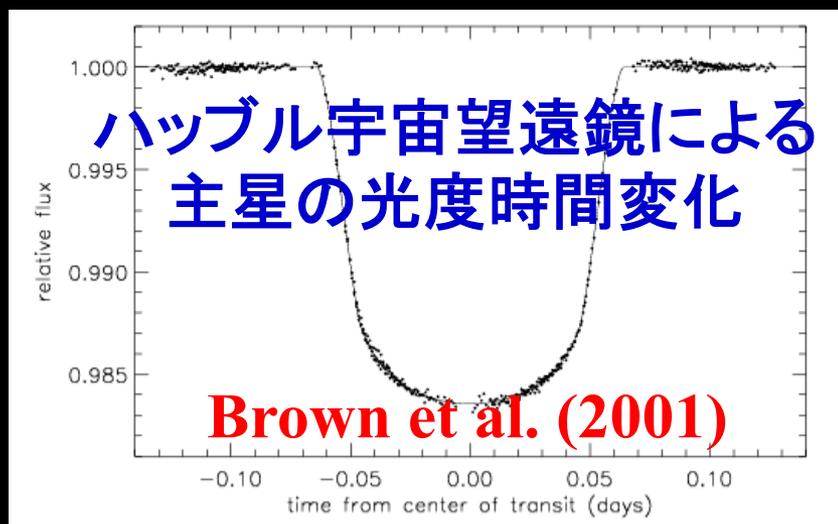
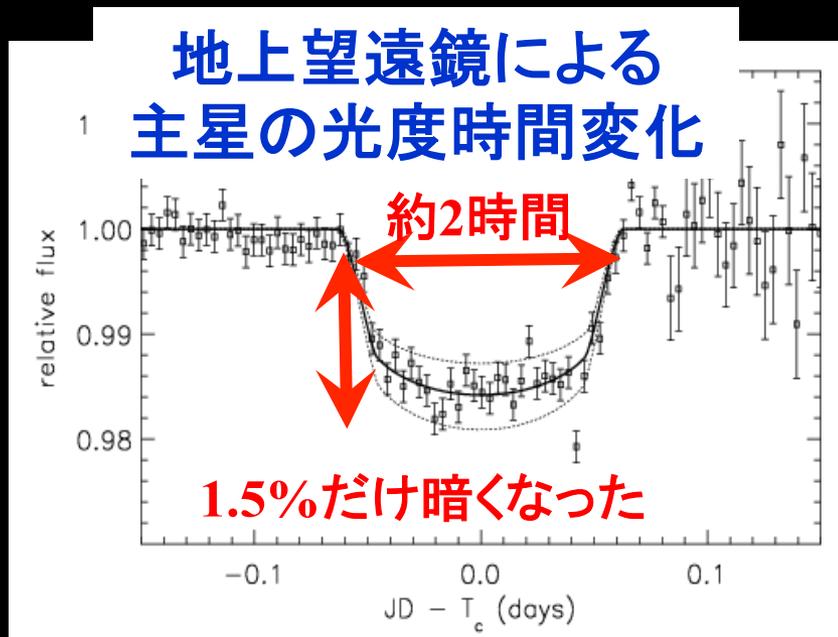
- 速度変動のデータに同期した惑星による中心星の掩蔽の初検出
周期3.5日のホットジュピター



想像図

Henry et al. (1999)

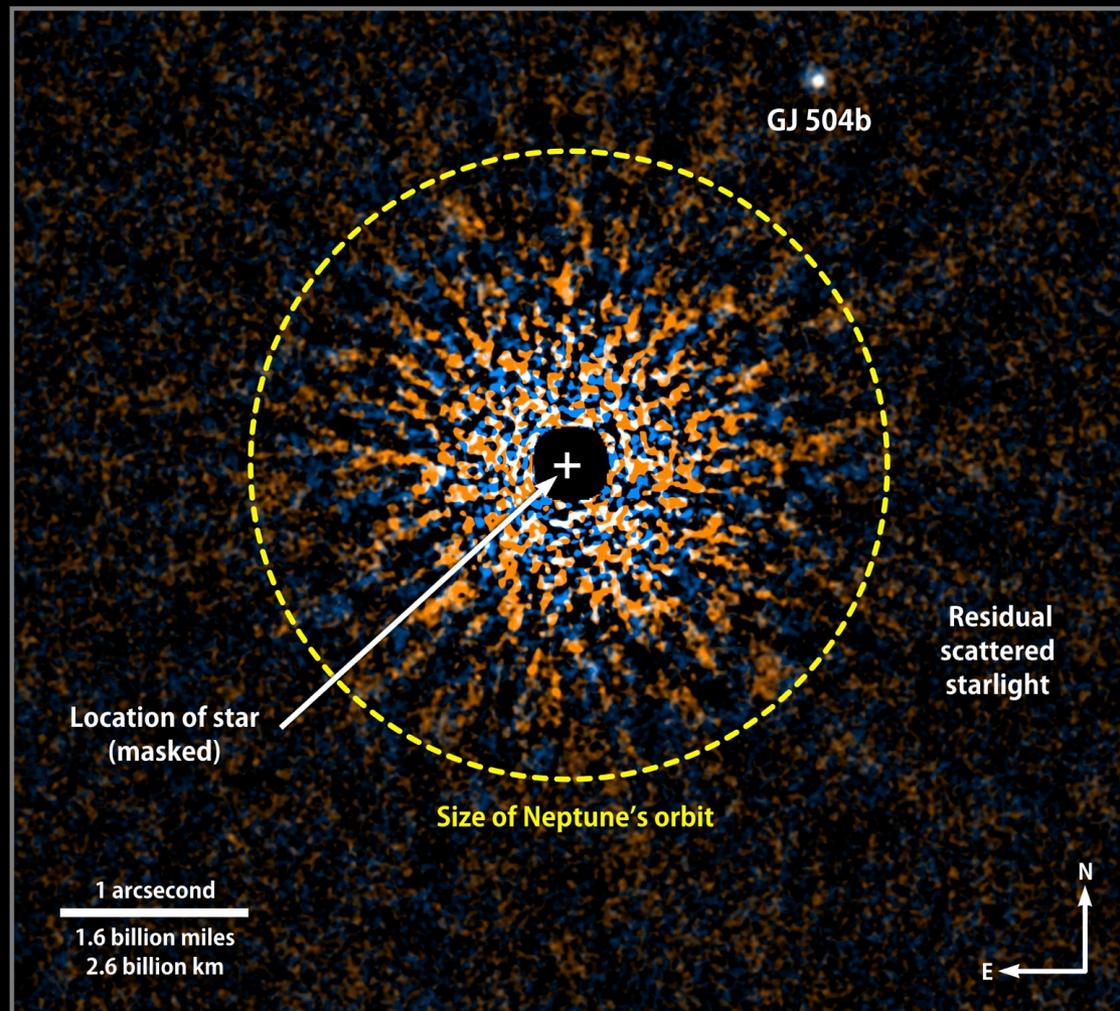
Charbonneau et al (2000)



すでに学んだこと: 惑星いろいろ

- 惑星(系)は稀なものではなく普遍的
 - 太陽と似た恒星の34%(以上)が惑星を持ち、17%(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木星型惑星が大量に存在(太陽系の木星の周期は約10年)
 - 太陽系とは違い円軌道というよりもかなりゆがんだ楕円軌道の惑星も多い
 - 地球の2倍程度の質量の惑星候補も複数報告
 - 水が液体として存在する摂氏0度から100度の温度の惑星(ハビタブル惑星)候補も報告
- 我々の地球以外に生命が存在するか?

すばる望遠鏡によるガス惑星 GJ504bの直接撮像



- 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(10213)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

地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*

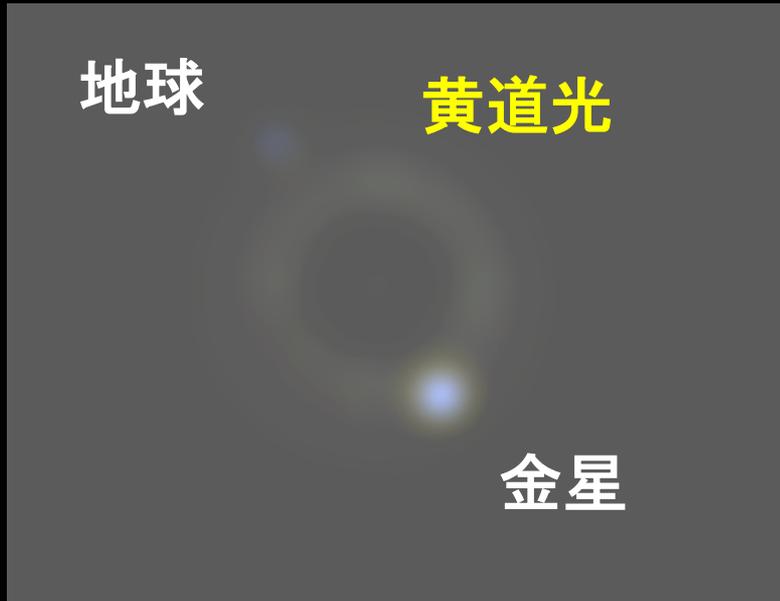


<http://newworlds.colorado.edu/>

- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画はプリンストン大学でも検討中(O₃)

New Worlds Mission: simulated image

軌道面傾斜角=0°



軌道面傾斜角=60°



- 我々の太陽系の内惑星を(4m宇宙望遠鏡+オカルター)を用いて30光年先から観測した場合に予想される画像
- このようなミッションが実現した場合、一体何がどこまで分かるのだろうか?

<http://newworlds.colorado.edu/>

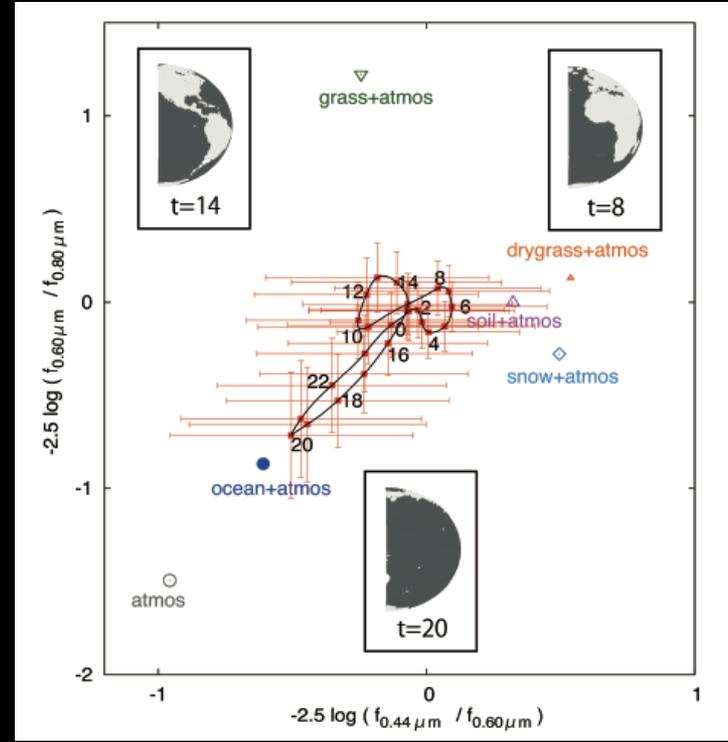
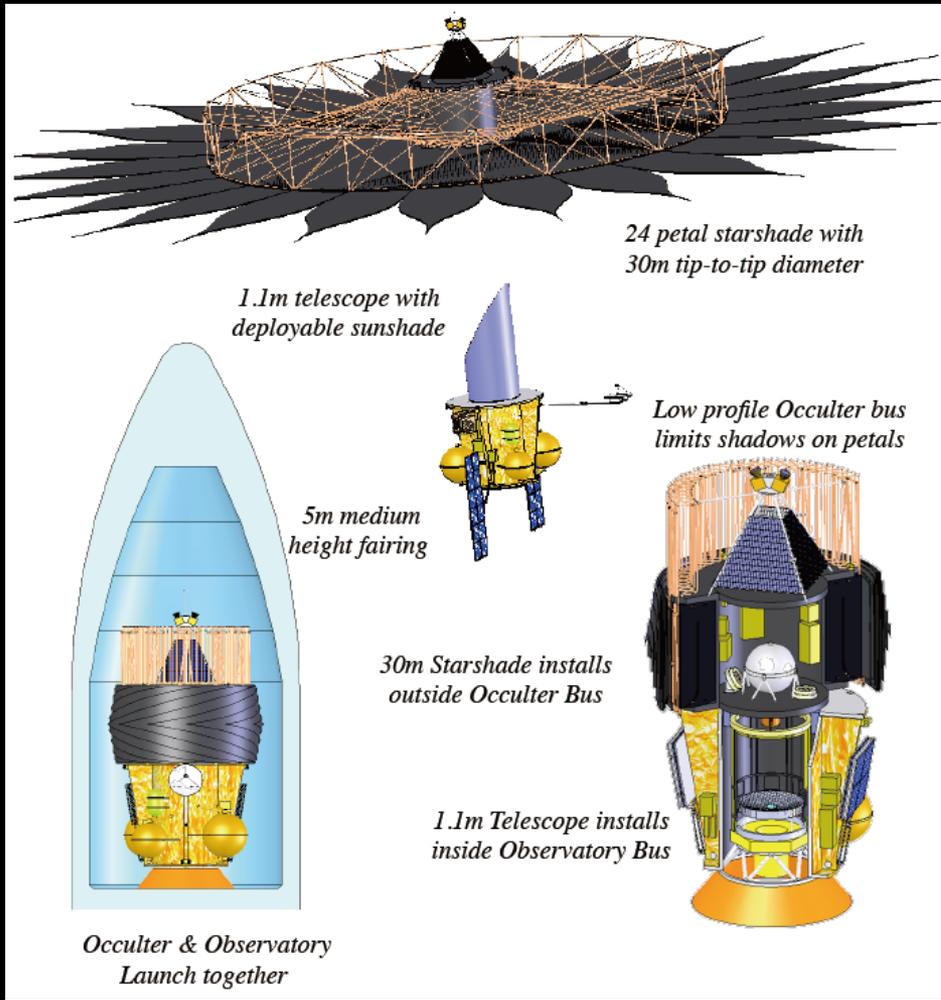
O₃: The Occulting Ozone Observatory



O₃: The Occulting Ozone Observatory

N. Jeremy Kasdin¹, David N. Spergel¹, P. Doug Lisman², Stuart B. Shaklan², Dmitry Savransky¹, Eric Cady¹, Edwin L. Turner¹, Robert Vanderbei¹, Mark W. Thomson², Stefan R. Martin², K. Balasubramanian², Steven H. Pravdo², Yuka Fujii³, Yasushi Suto³

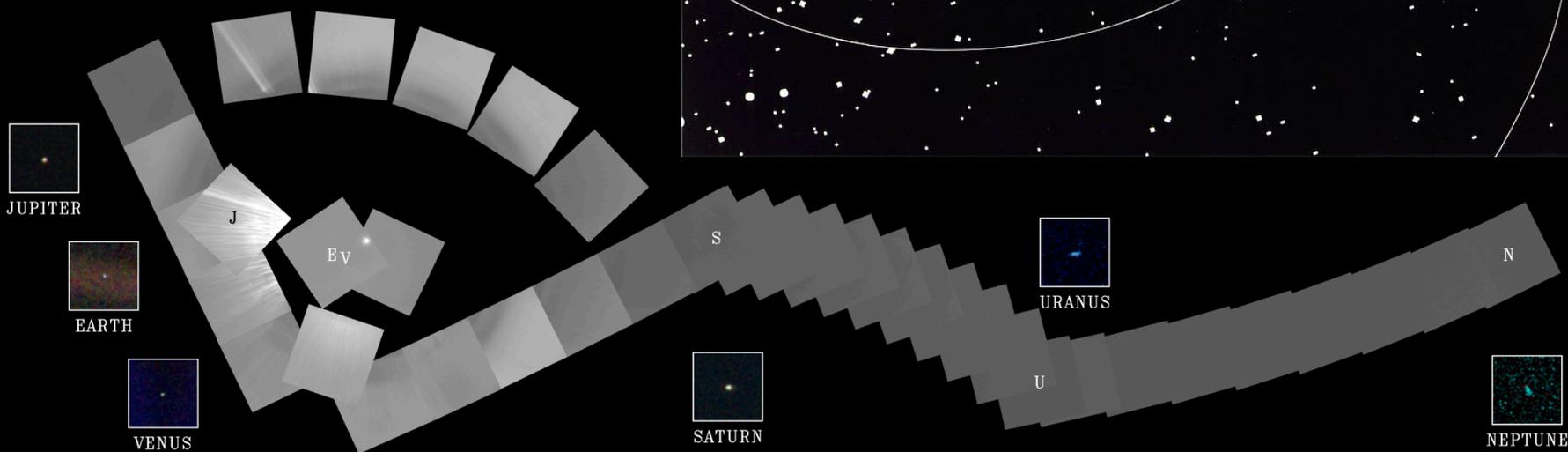
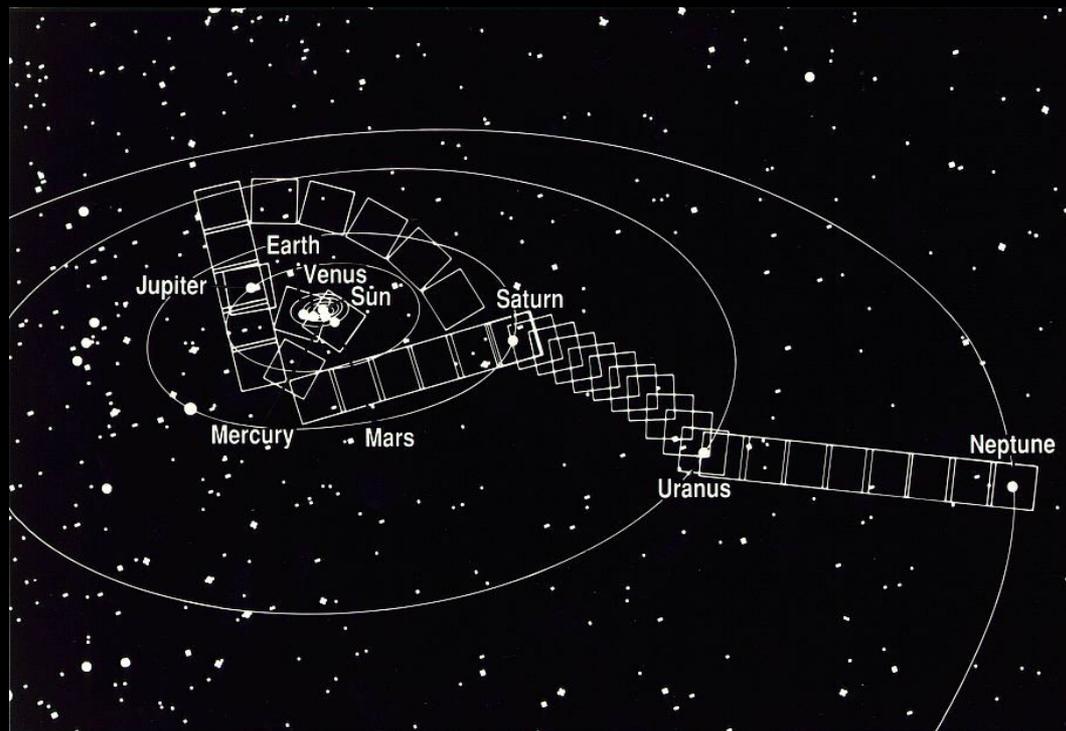
¹Princeton University, ²Jet Propulsion Laboratory, ³University of Tokyo



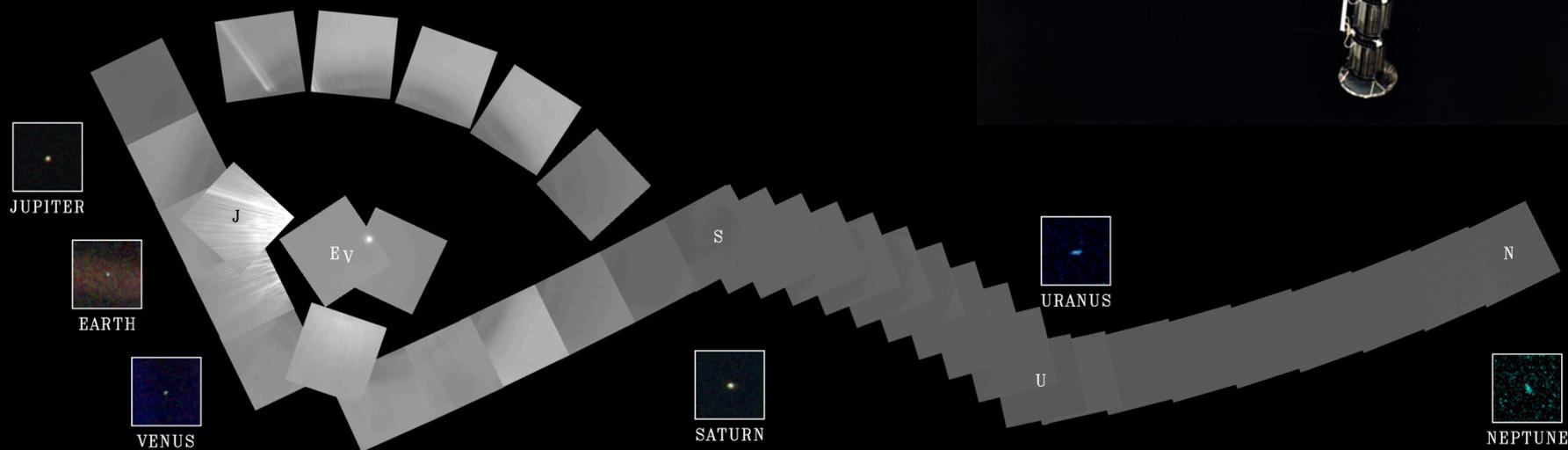
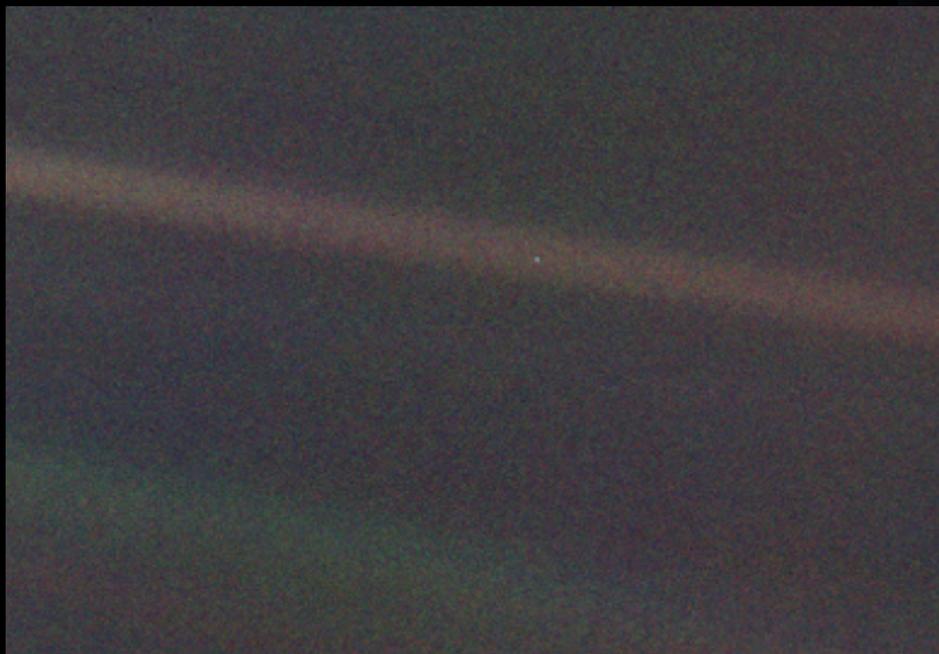
■ 今回の結果はプリンストン大学で検討中の衛星計画において注目されている

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



ペイル・ブルー・ドット



土星越しに 見る地球



- 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

View from Saturn (Cassini)
900 million miles away

水星軌道から 見た地球

- 水星探査機メッセンジャーが撮影
 - 2013年7月20日
(日本時間)



6

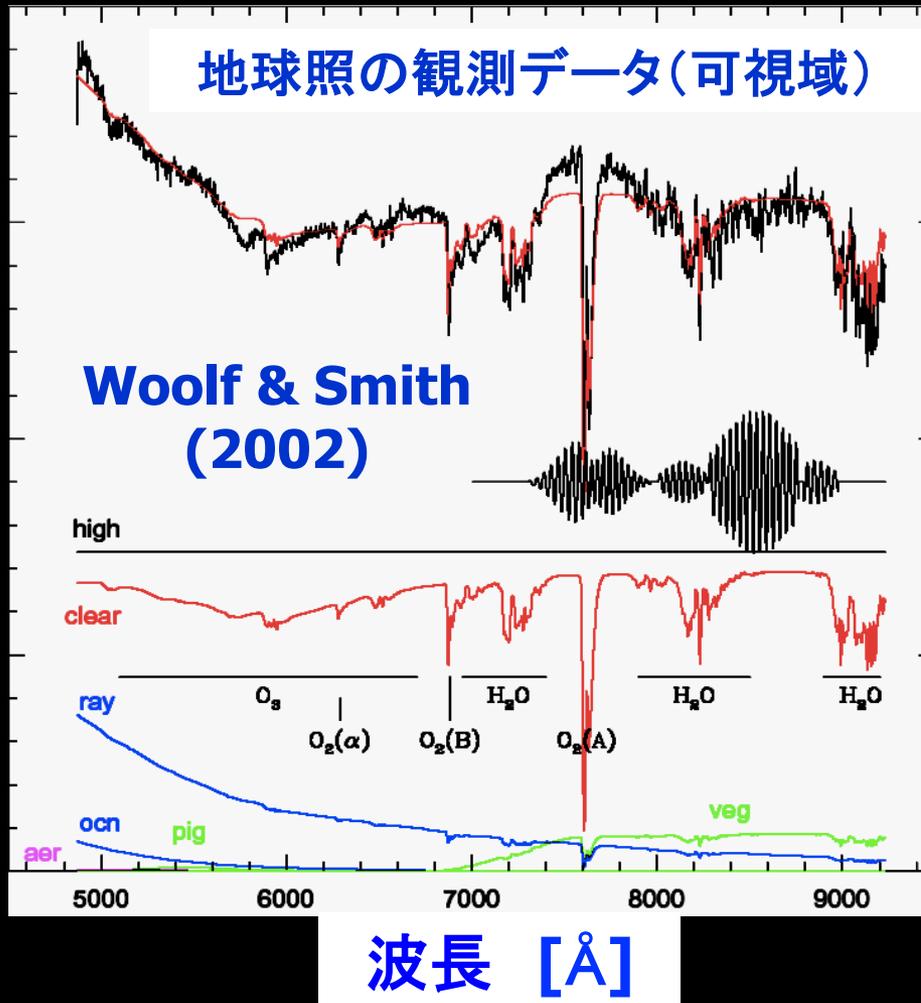
from Planets to Astrobiology

系外惑星から宇宙生物学へ

バイオマーカー

- 何をもってバイオマーカーとするのかは曖昧
 - 生物由来と考えられる大気成分(酸素、オゾン、メタン)の分光観測
 - 植物のレッドエッジの測光観測
 - 知的生命体からの信号の電波観測
 - 地球外での生命を生み出す環境とそれに対応した生物の多様性をどこまで認めるか
- 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

常識的バイオマーカー（生物存在の証拠）



■ 酸素

- Aバンド@ $0.76 \mu\text{m}$
- Bバンド@ $0.69 \mu\text{m}$

■ 水

- $0.72, 0.82, 0.94 \mu\text{m}$

■ オゾン

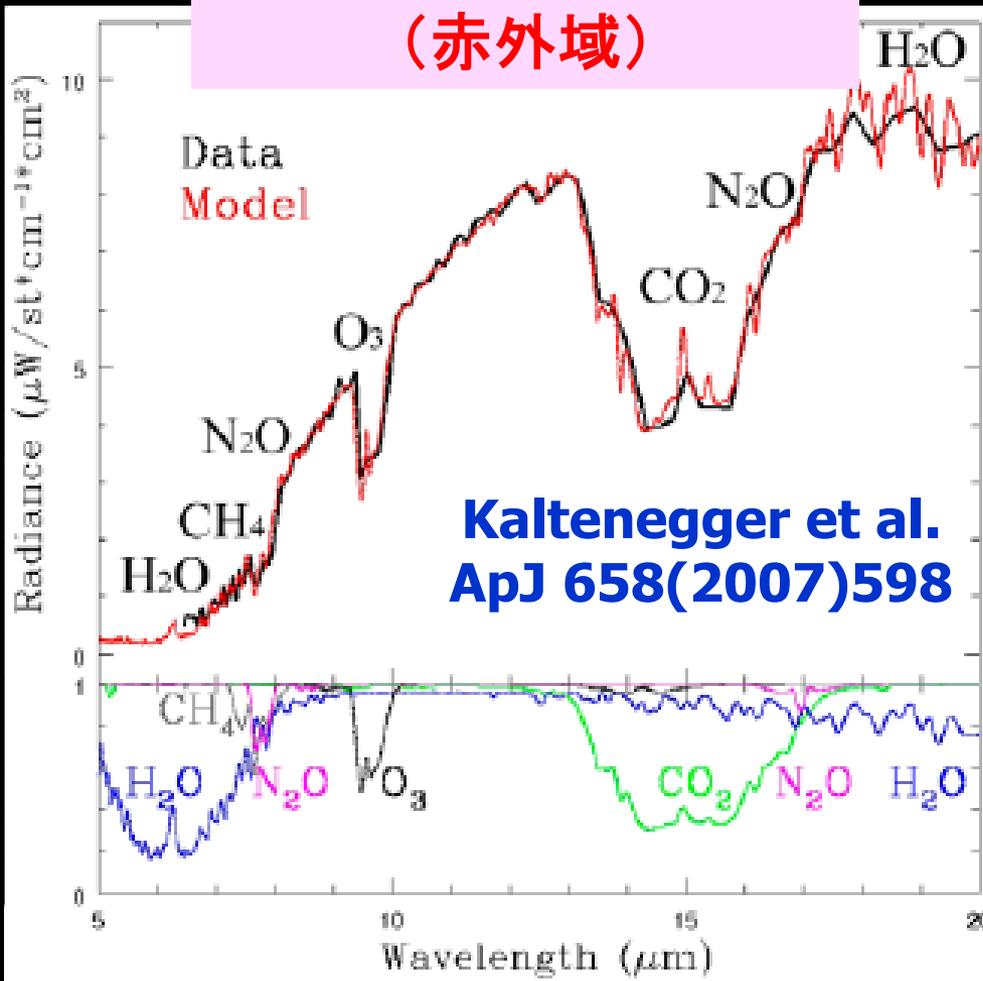
- Chappuis バンド
@ $(0.5-0.7) \mu\text{m}$
- Hartley バンド
@ $(0.2-0.3) \mu\text{m}$

Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

地球の赤外スペクトルとバイオマーカー

地球観測衛星データ
(赤外域)



- オゾン: @9.6 μm
 - 仮に酸素が少量であっても検出可能なので、酸素の良いトレーサー
- 水: <8 μm , >17 μm
- メタン@7.7 μm
 - 24億年以上前の地球にはまだほとんど酸素がなかったはず
 - メタン生成細菌由来?

Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

より過激(保守的?)なバイオマーカー

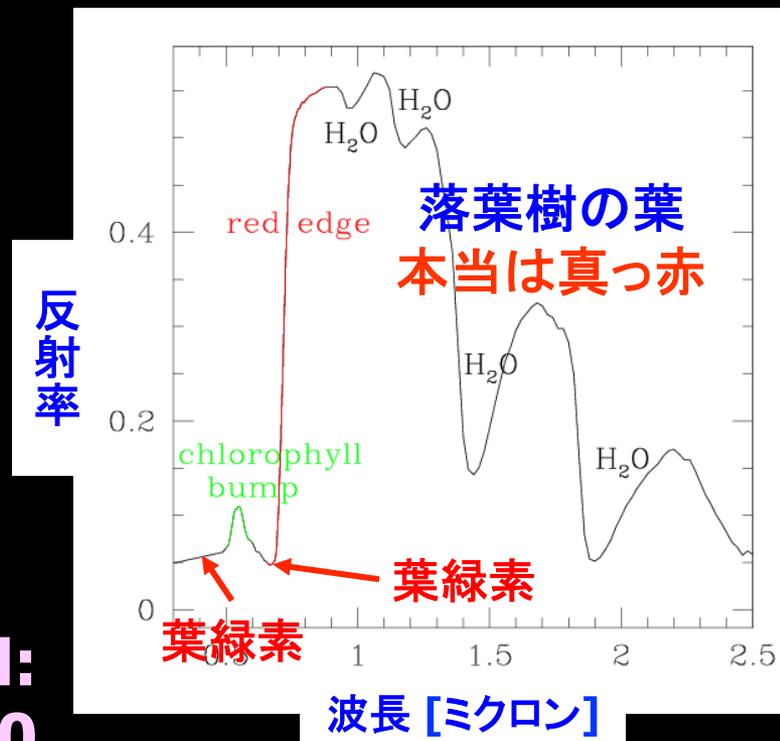
Extrasolar plants on extrasolar planets

- (居住可能)地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

■ Biomarker の探求

- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物の **red edge**
- 地球のリモートセンシング
ではすでに確立

Seager, Turner, Schafer & Ford:
astro-ph/050330



Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “spiral nebulae”（今で言う銀河）の赤方偏移を発見
- ハッブルによる宇宙膨張の発見に本質的寄与
- 天文台長としてPluto(冥王星)という名前を採用決定

“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.

系外惑星の植物の色

■ *The color of plants on other worlds*

- Nancy Y.Kiang

- Scientific American April 2008

- 邦訳：日経サイエンス2008年7月号



- 誤解・理解不足がある可能性が高いのであらかじめご容赦頂きたい

- 生物学との学際的な協力が、天文学にとっていかに大切かを示す具体例なので詳しく紹介

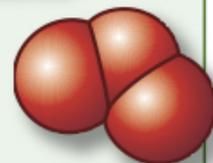
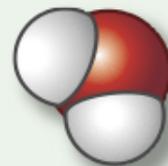
地球上での光合成の歴史

- 34億年前： 最初の光合成細菌
 - 近赤外線を吸収し硫化物や硫酸塩化合物を放出
- 27億年前： シアノバクテリア
 - 可視光を吸収する最初の酸素発生生物
- 12億年前： 紅藻類および褐藻類
- 7.5億年前： 緑藻類
- 4.8億年前： 最初の陸上植物
- 4.2億年前： 維管束植物

大気中のバイオマーカー

酸素 (O_2) と水 (H_2O)

生命の存在しない世界でも、中心星からの光による水蒸気の分解で、惑星の大気中に少量の酸素ができる可能性はある。しかし、酸素ガスは雨に溶けたり、岩石の酸化や火山ガスの酸化に使われて減っていく。したがって、もし液体の水のある惑星に酸素が大量に存在すれば、酸素の発生源はほかにもあるはずだ。酸素発生型光合成が有力な候補となる。

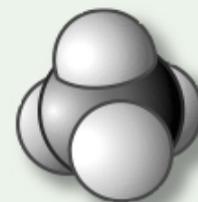


オゾン (O_3)

地球の成層圏では、太陽光のエネルギーで酸素分子が分解され、これが再結合することでオゾンが生じる。液体の水とともにオゾンの存在が確認できれば、生命の強力な証拠となる。酸素は可視光領域で検出可能だし、オゾンも赤外波長域で検出できる。従来の望遠鏡で容易に観測できる。

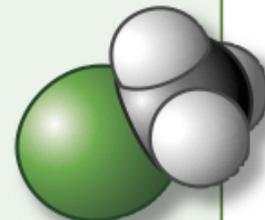
メタン (CH_4) と酸素の組み合わせ、またはメタンの季節変動

メタンと酸素は、光合成以外では生成されにくい特徴的な組み合わせだ。また、メタン濃度が季節変動を示したら、生命体の存在を示す優れた指標となる。生命の存在しない惑星では、メタン濃度はほぼ一定だが、恒星からの光がメタンを分解するために、長い時間をかけて徐々に低下する。



塩化メチル (CH_3Cl)

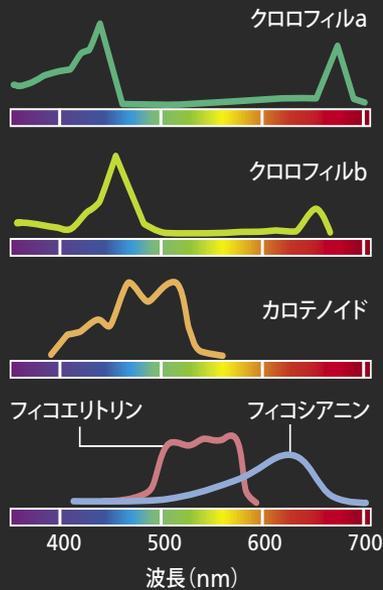
塩化メチルガスが地球上で生じるケースは、植物の燃焼（おもに森林火災）のほか、プランクトンや海水中の塩素に太陽光が作用することなどだ。塩化メチルは酸化されると分解する。しかし、M型星の放射は比較的弱いので、塩化メチルガスが検出可能な量まで蓄積する可能性がある。



惑星表面での光のスペクトル： G型星の場合

光合成色素は、さまざまな波長域の光を吸収する。地球上のすべての陸上植物は、クロロフィルaとクロロフィルb、カロテノイド系色素なしには生存できない。藻類やシアノバクテリアはフィコビリ色素を使用する。

相対吸収度



恒星の光

大気中に入射前の光は明瞭なスペクトルを示す。スペクトルの全体的な形状は、恒星の表面温度によって決まる。曲線上の切れ込みの一部は、恒星そのものの大気が吸収したことによる。

惑星表面

大気中のガスが恒星の放射する光を不均一に吸収し、そのピークの色をずらす。また、特定の波長を吸収するのでスペクトルに吸収帯が生じる。吸収帯は地球(太陽はG型)について最もよく知られている。

水面下

水は青色光は通すが、赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは、水面下5cmおよび60cmにおける値を示す(成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した)。

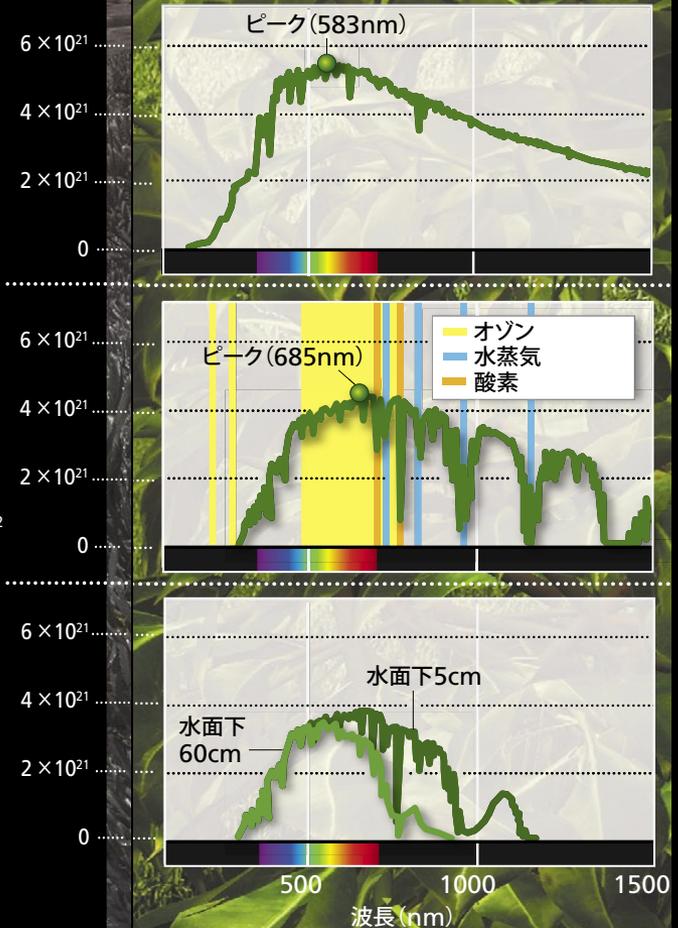
G型星

下の曲線は、地球上に注ぐ太陽光のスペクトルを示す

寿命：100億年

地球の軌道：1天文単位

光子束密度(1秒あたり、1m²あたりの光子の数)



惑星表面での光のスペクトル： 古いM型星の場合

成熟したM型星

質量*：0.2

光度*：0.0044

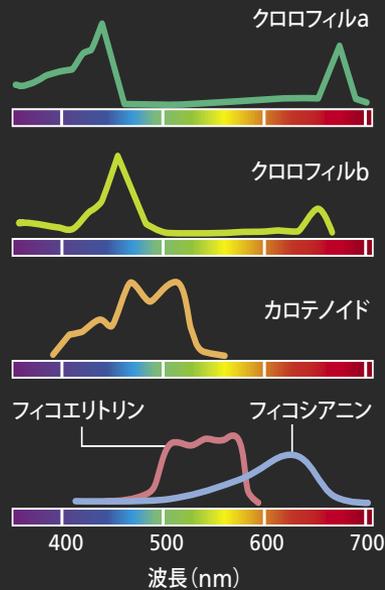
寿命：5000億年

モデル惑星の軌道：0.07天文単位

* 太陽に対する相対値，天文単位は
太陽と地球の平均距離

光合成色素は、さまざまな波長域の光を吸収する。地球上のすべての陸上植物は、クロロフィルaとクロロフィルb、カロテノイド系色素なしには生存できない。藻類やシアノバクテリアはフィコビリ色素を使用する。

相対吸収度



恒星の光

大気中に入射前の光は明瞭なスペクトルを示す。スペクトルの全体的な形状は、恒星の表面温度によって決まる。曲線上の切れ込みの一部は、恒星そのものの大気が吸収したことによる。

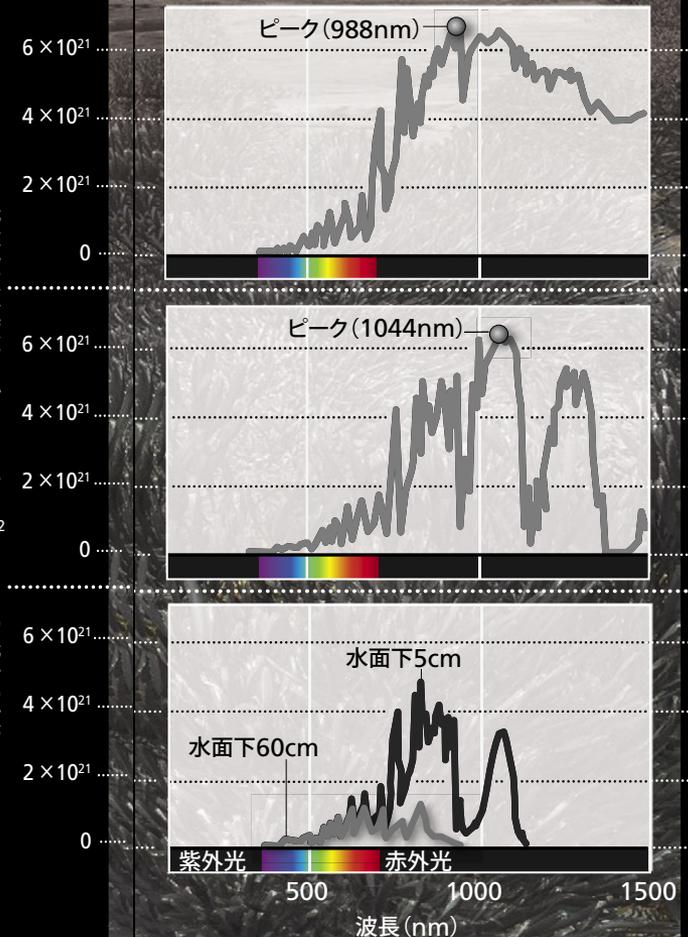
惑星表面

大気中のガスが恒星の放射する光を不均一に吸収し、そのピークの色をずらす。また、特定の波長を吸収するのでスペクトルに吸収帯が生じる。吸収帯は地球(太陽はG型)について最もよく知られている。

水面下

水は青色光は通すが、赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは、水面下5cmおよび60cmにおける値を示す(成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した)。

光子束密度(1秒あたり、1m²あたりの光子の数)



惑星表面での光のスペクトル： 若いM型星の場合

若いM型星

質量*：0.5

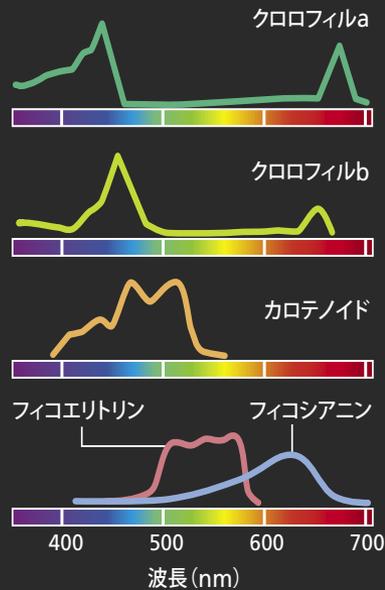
光度*：0.023

寿命：2000億年（フレアの発生は
星の誕生から10億年後まで続く）

モデル惑星の軌道：0.16天文単位

光合成色素は、さまざまな波長域の光を吸収する。地球上のすべての陸上植物は、クロロフィルaとクロロフィルb、カロテノイド系色素なしには生存できない。藻類やシアノバクテリアはフィコビリ色素を使用する。

相対吸収度



恒星の光

大気中に入射前の光は明瞭なスペクトルを示す。スペクトルの全体的な形状は、恒星の表面温度によって決まる。曲線上の切れ込みの一部は、恒星そのものの大気が吸収したことによる。

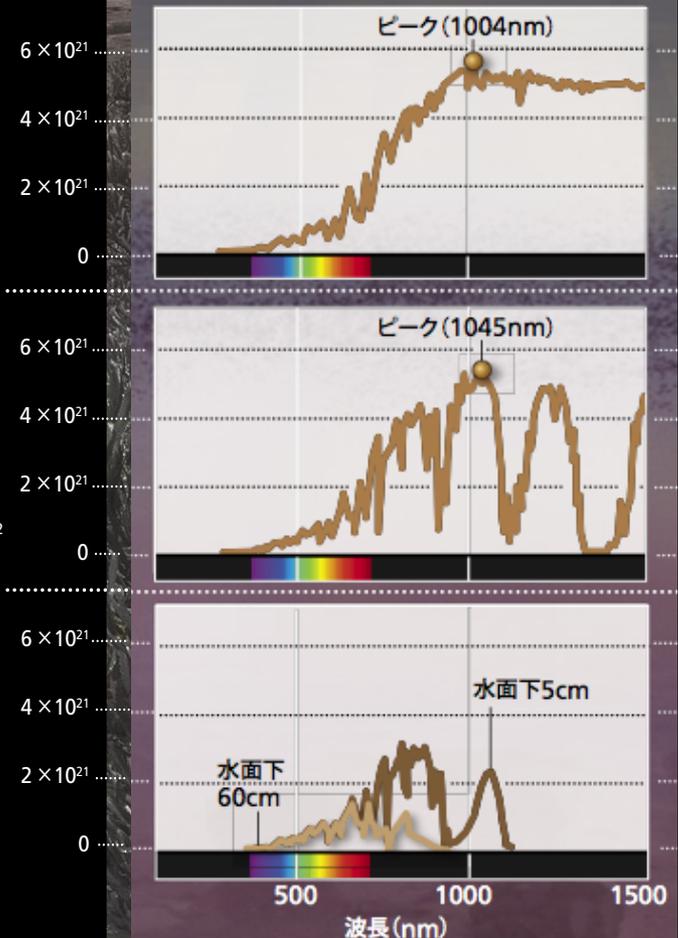
惑星表面

大気中のガスが恒星の放射する光を不均一に吸収し、そのピークの色をずらす。また、特定の波長を吸収するのでスペクトルに吸収帯が生じる。吸収帯は地球（太陽はG型）について最もよく知られている。

水面下

水は青色光は通すが、赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは、水面下5cmおよび60cmにおける値を示す（成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した）。

光子束密度（1秒あたり、1m²あたりの光子の数）



惑星表面での光のスペクトル： F型星の場合

F型星

質量*：1.4

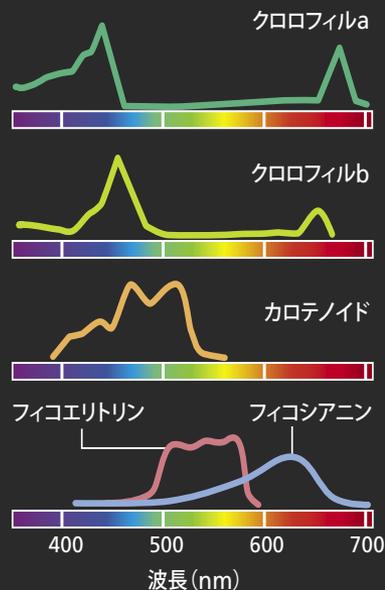
光度*：3.6

寿命：30億年

モデル惑星の軌道：1.69天文単位

光合成色素は、さまざまな波長域の光を吸収する。地球上のすべての陸上植物は、クロロフィルaとクロロフィルb、カロテノイド系色素なしには生存できない。藻類やシアノバクテリアはフィコビリ色素を使用する。

相対吸収度



恒星の光

大気中に入射前の光は明瞭なスペクトルを示す。スペクトルの全体的な形状は、恒星の表面温度によって決まる。曲線上の切れ込みの一部は、恒星そのものの大気が吸収したことによる。

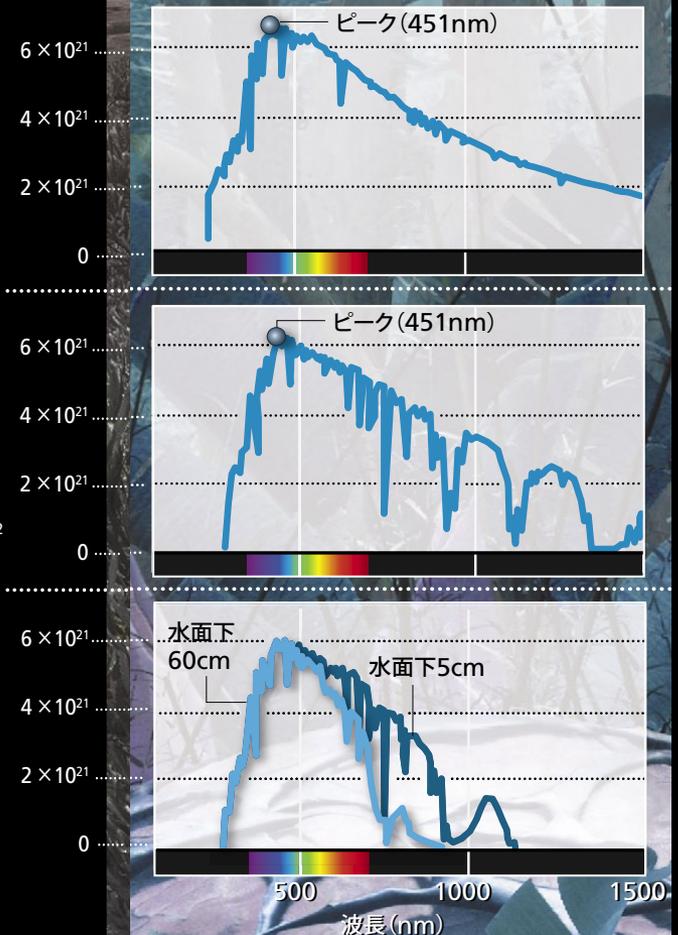
惑星表面

大気中のガスが恒星の放射する光を不均一に吸収し、そのピークの色をずらす。また、特定の波長を吸収するのでスペクトルに吸収帯が生じる。吸収帯は地球(太陽はG型)について最もよく知られている。

水面下

水は青色光は通すが、赤色光や赤外光を吸収する傾向がある。グラフは、水面下5cmおよび60cmにおける値を示す(成熟したM型星については酸素のほとんどない大気を想定した)。

光量子束密度(1秒あたり、1m²あたりの光子の数)



系外惑星上の植物の色？

古いM型星



若いM型星



G型星



F型星



7

Colors of a second Earth

もうひとつの地球の色

第二の地球の色から、海、雲、植生の占める面積の割合を推定する

- 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 - 藤井友香、河原創、樽家篤史、須藤 靖
- 東京大学気候システム研究センター
 - 福田悟、中島映至
- プリンストン大学
 - Edwin Turner

Fujii et al. *Astrophys. J.* 715(2010)866, arXiv:0911.5621
Astrophys. J. 738(2011)184, arXiv:1102.3625

<http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alien-life-100513.html>

地球は青かった？

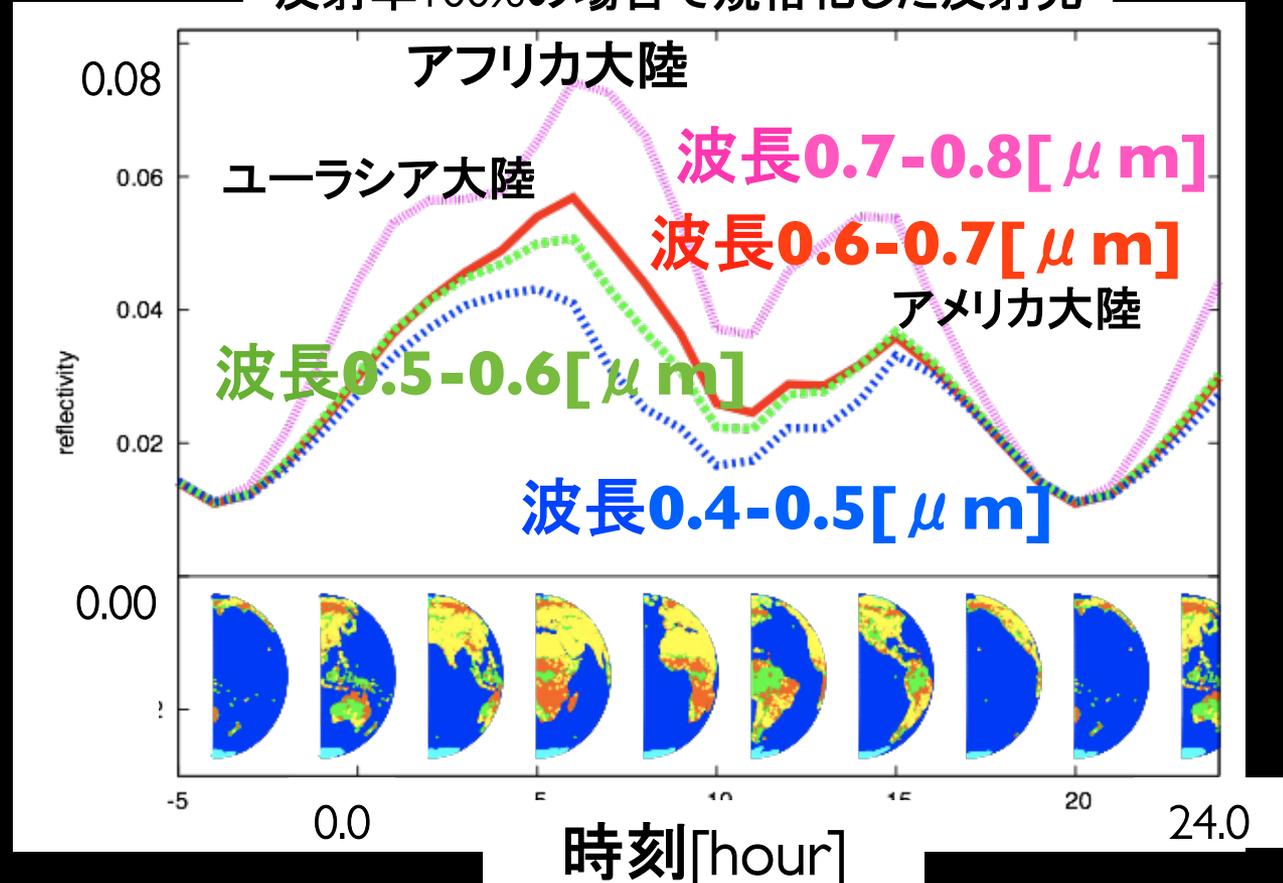
A pale blue dot



自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

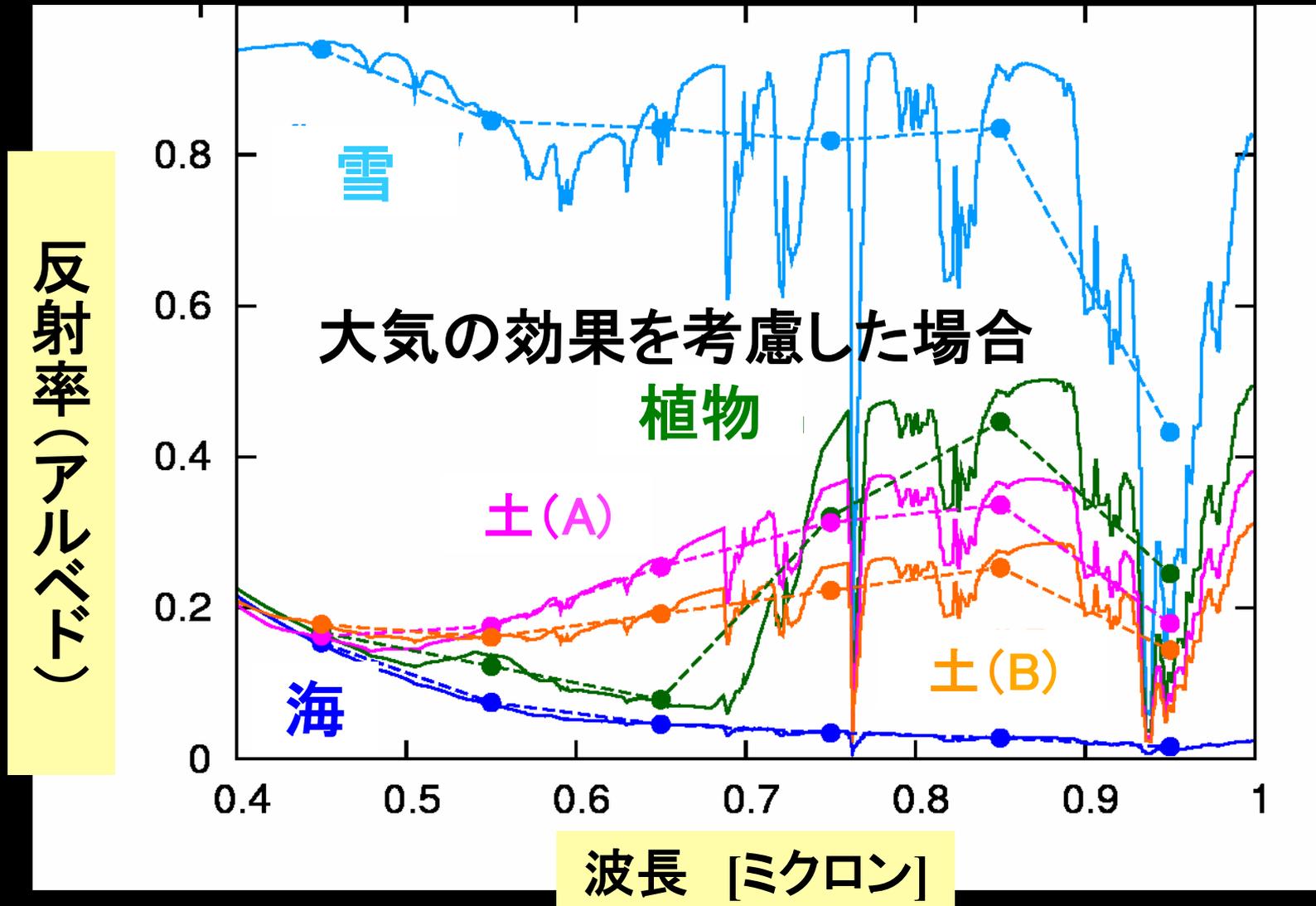
- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

反射率100%の場合で規格化した反射光



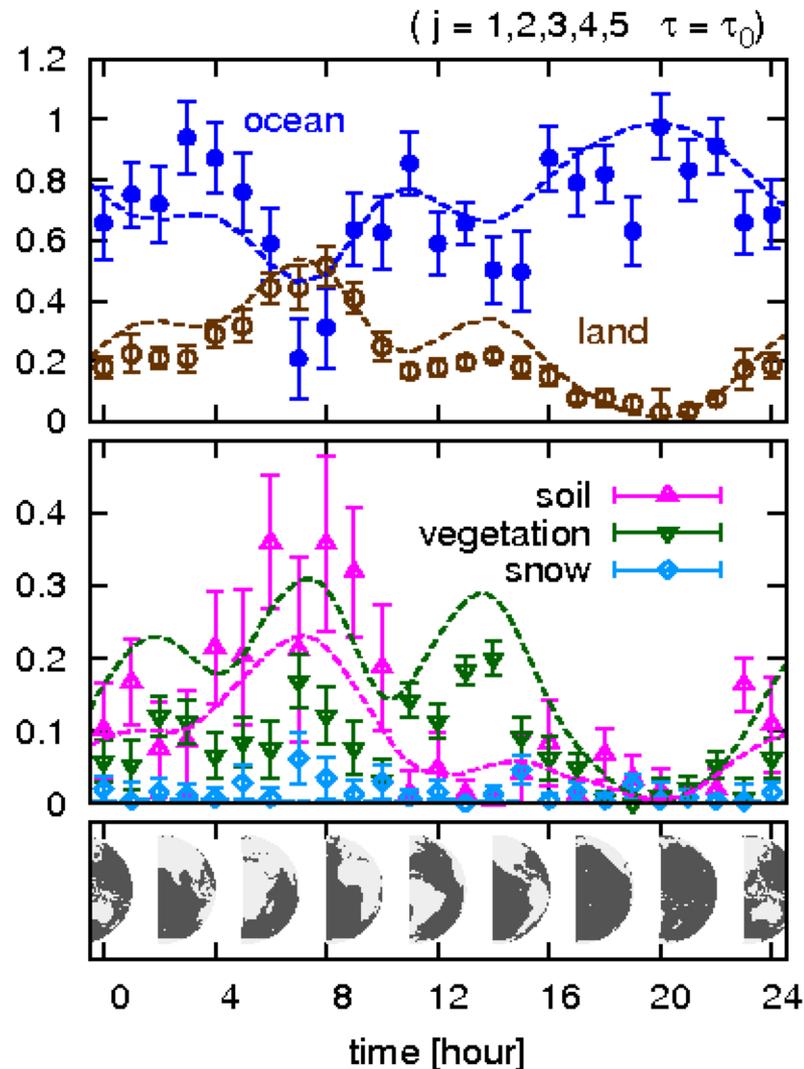
Fujii et al. (2010)

等方散乱近似での反射スペクトル



もうひとつの地球の色から表面積を推定

(重みつき)表面積比



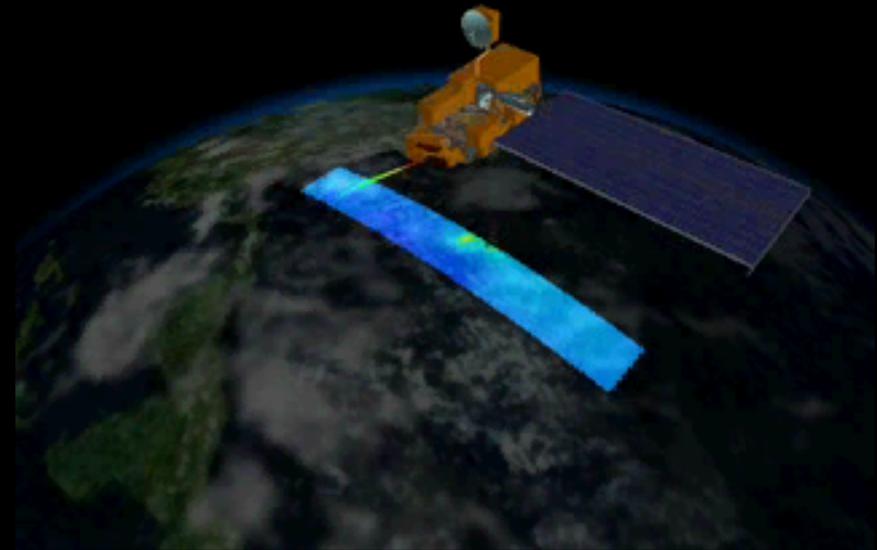
- 10pc先の地球を口径4 mの宇宙望遠鏡で1週間観測したと仮定
 - 雲が存在せず、かつ中心星の光が完全にブロックできたとする
- 微妙な色の変化から、表面の海・土・植物・雪の4成分の面積の割合が推定できる
 - 地球は単なるペイルブルードットではない

Fujii et al. (2010)

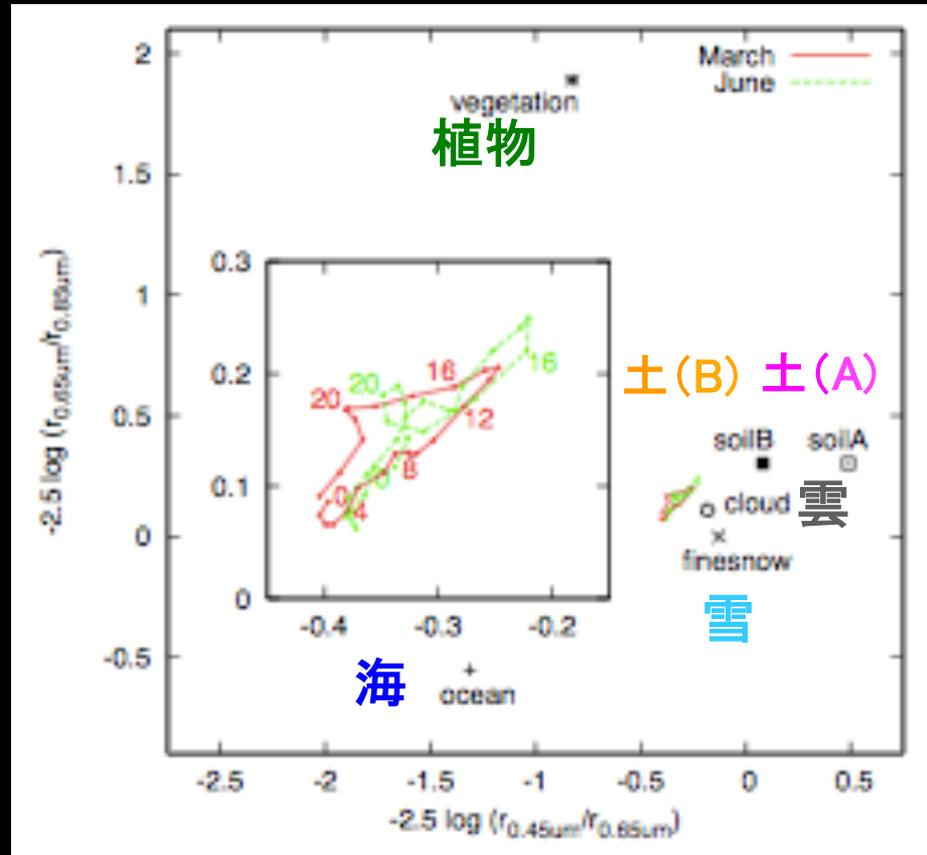
順問題：地球の反射光計算

- 地球観測衛星TerraのMODIS検出器から作成された経験的反射モデルを用いて、ある日時地球の7バンドの模擬光度曲線を作成。それを実際のEPOXI衛星の観測データと比較
 - 陸地： $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ のピクセル毎に決められた反射特性のパラメータ(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)を用いて足し合わせる
 - 海：MODISデータにない海に対してはNakajima & Tanaka (1983)のBRDFモデルを用いて計算
 - 雪：その月の平均的雪分布データを用いる
 - 雲：その日の雲分布データを(時刻には関係なく)用いる
 - 大気と雲の輻射輸送数値コードrstar6bで計算

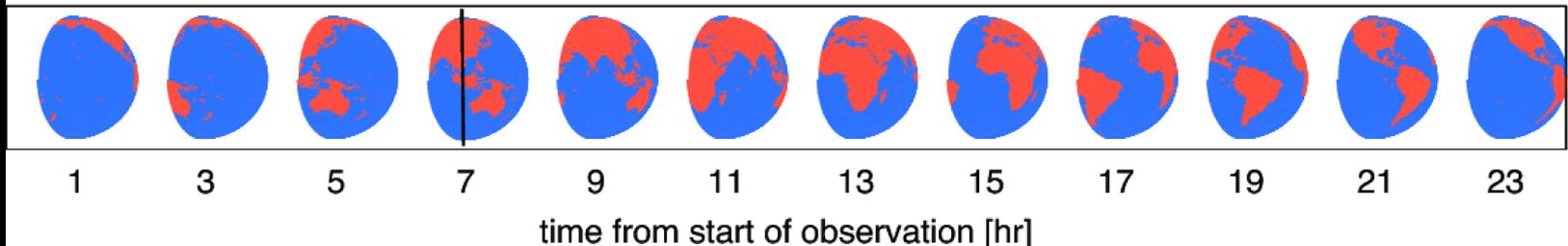
Earth observing satellite **Trace** (Transition
Region and Coronal Explorer)
+ detector **Modis** (Moderate Resolution
Imaging Spectroradiometer)



地球の色

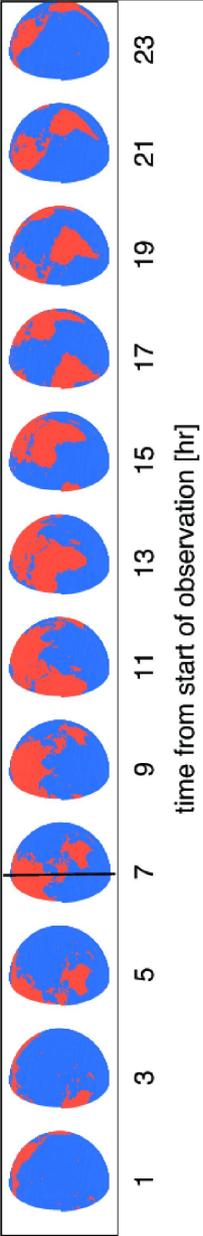


March 18th-19th

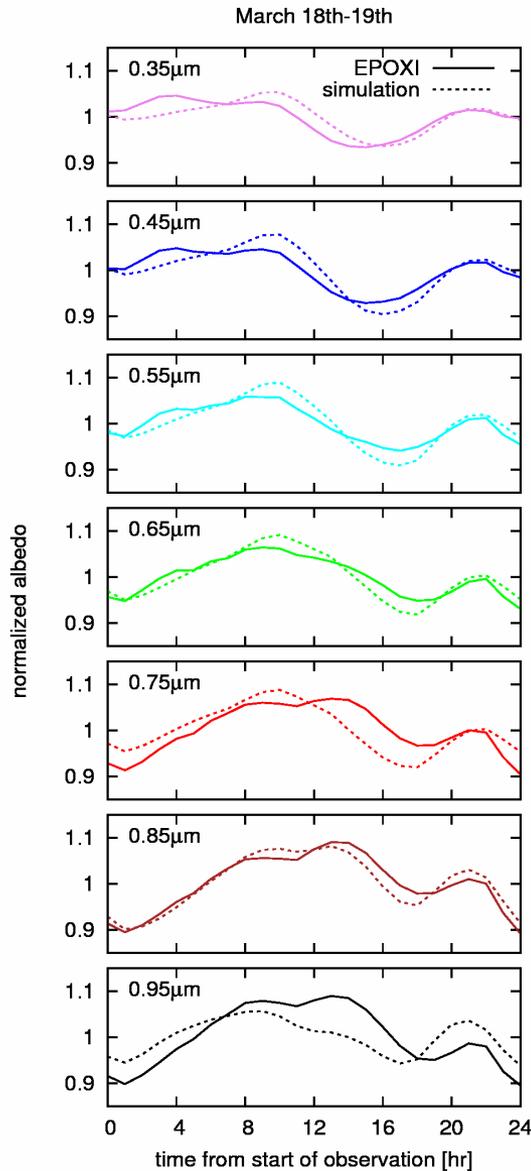


模擬光度曲線と地球観測データの比較(雲あり)

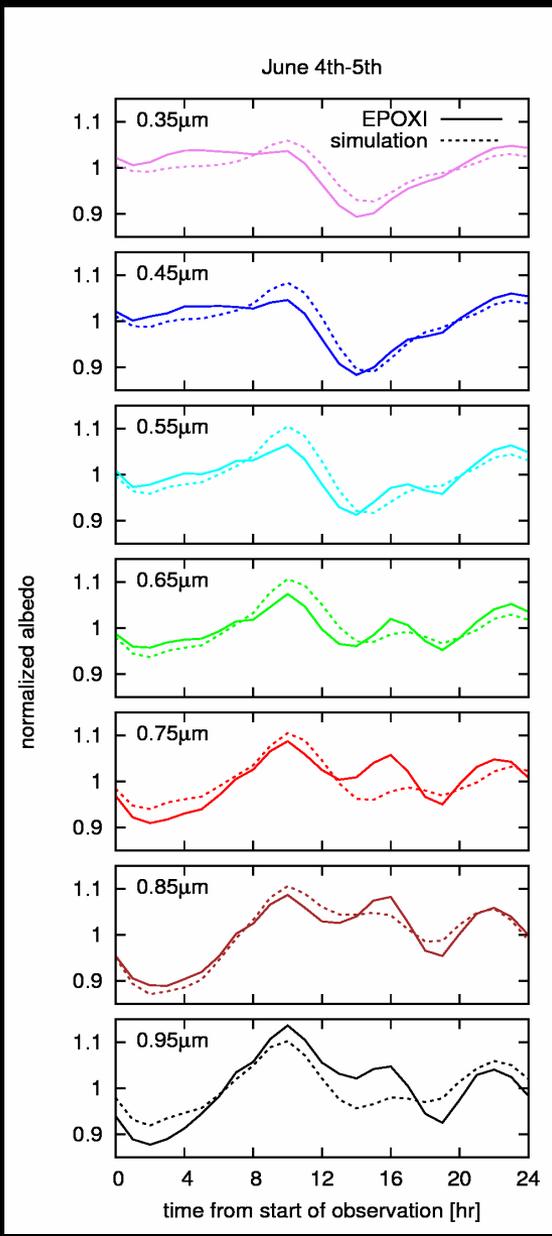
March 18th-19th



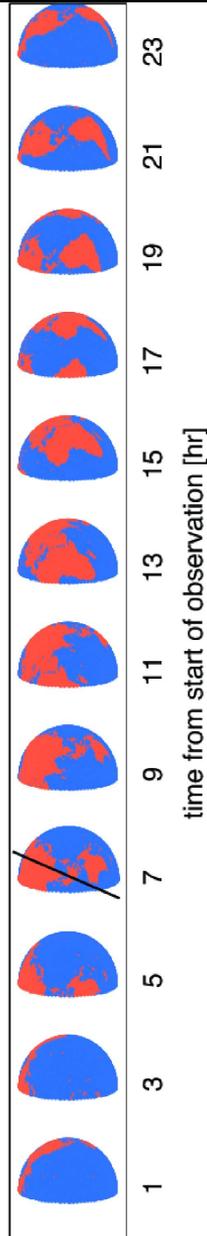
time from start of observation [hr]



June 4th-5th



June 4th-5th

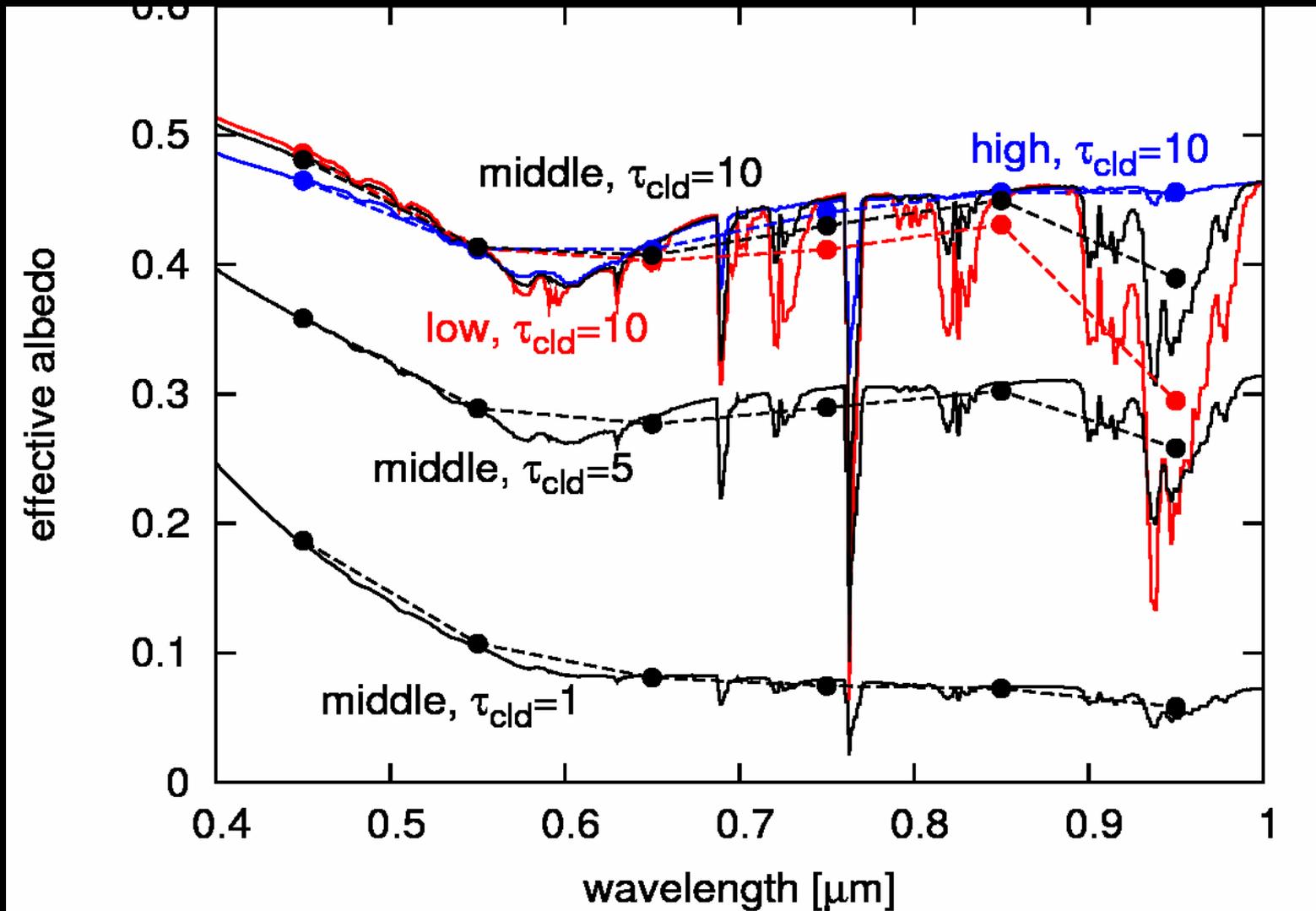


time from start of observation [hr]

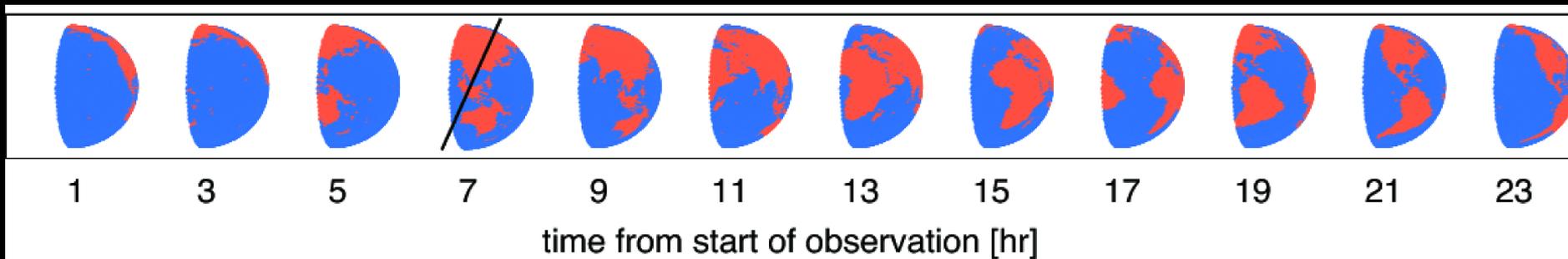
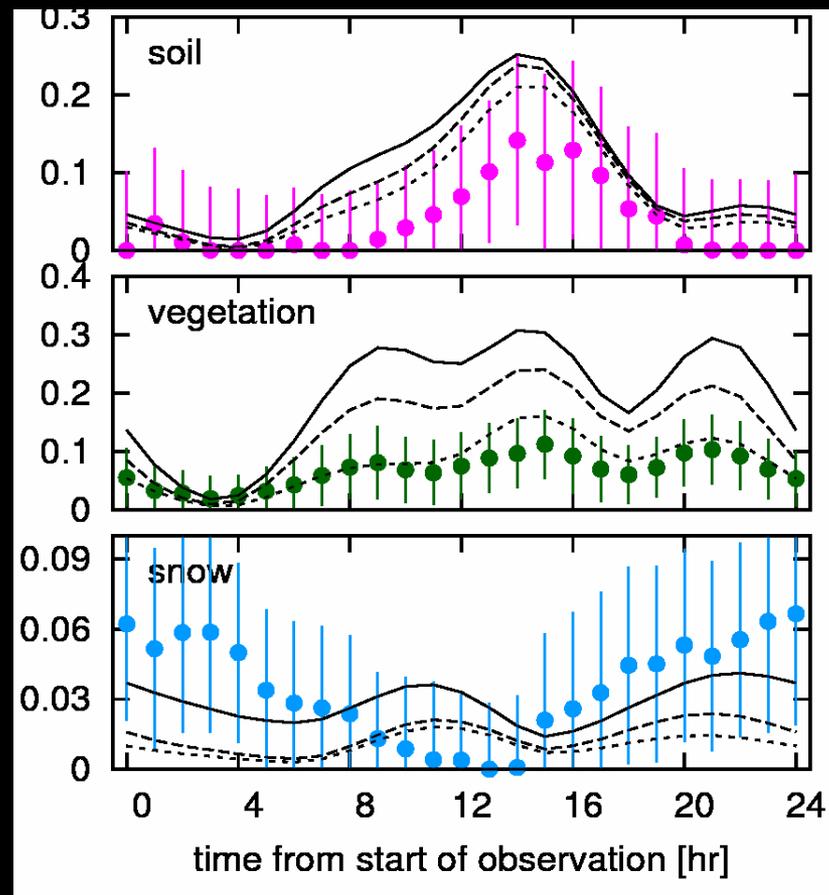
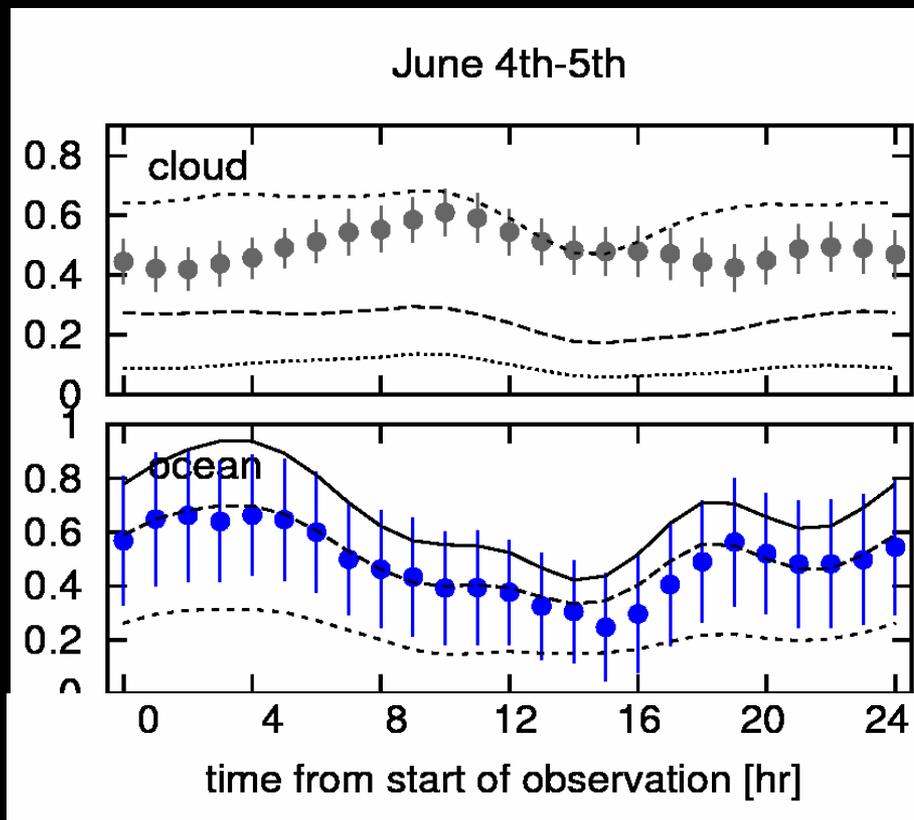
逆問題：地球の成分ごとの面積の推定

- EPOXIデータを、単純化されたモデル(等方散乱で近似した海、土、植物、雪、雲の5成分)でフィットして、成分ごとの面積を推定する
 - 系外惑星の場合には、中心星の光がブロックされた極度に理想的な観測に対応(可能性の限界)
 - 各観測中の自転や公転の効果は無視
 - 雲については、ある光学的厚さ τ (今回は10とする)の単一モデルを想定
 - 大気も「米国標準大気」と呼ばれる組成、圧力・温度プロファイルを仮定

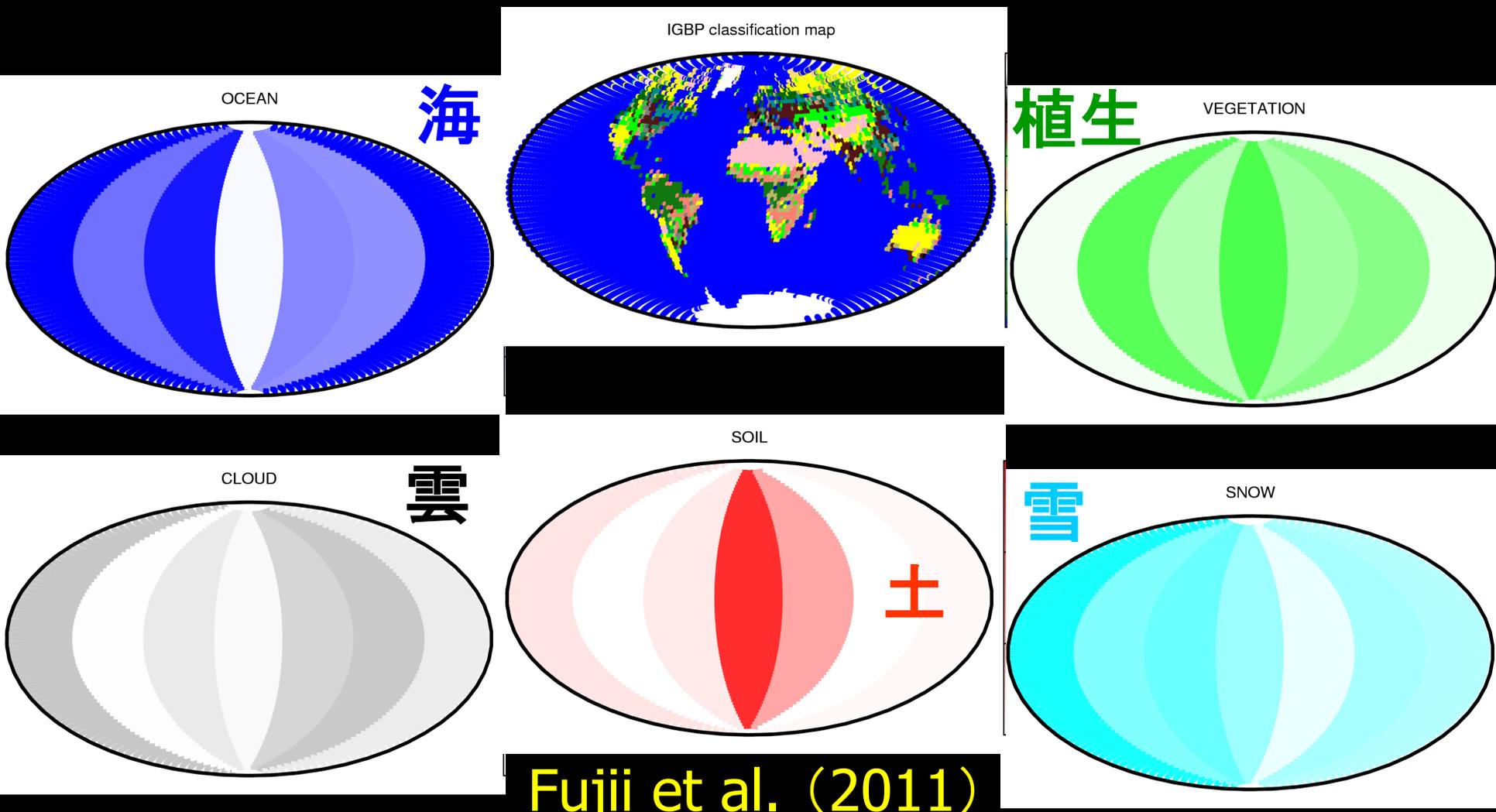
雲の反射スペクトル: モデル依存性



EPOXIデータから推定された面積



実際の地球観測データ(EPOXI)から推定された地表面成分の経度分布地図



8

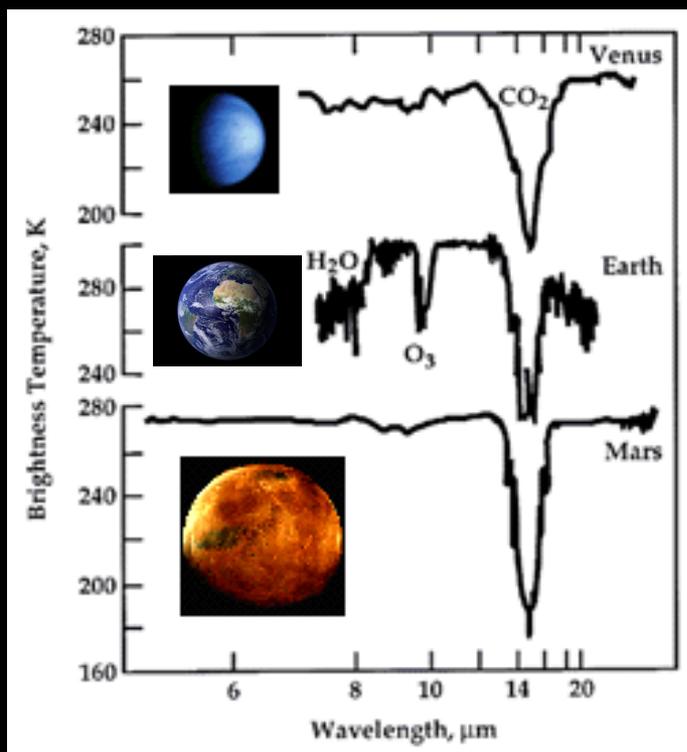
Summary and Prospects

まとめと展望

太陽系外惑星の世界

- 1995年に天文学が「世界観」を大きく広げた
 - 今や惑星系は固有名詞ではなく、普通名詞
- 惑星系の存在は普遍的だが、性質は多種多様
 - 太陽に似た恒星の30パーセント以上は惑星を持つ
 - 太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
- 宇宙における生命の起源とその普遍性という究極の問いに、科学的立場から答えられる日が来る可能性もある
 - 「もうひとつの地球」の発見をめざして、数多くの観測が実行中・計画中

太陽系外惑星： そのさきにあるもの “天文学から宇宙生物学へ”



- 地球型惑星の発見
 - 居住可能(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
 - バイオマーカーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、植物、核爆発、、
 - 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 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
 - 植物の有無を通じて宇宙生物学に至る一つの道

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、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と等しい

太陽系外惑星研究の歴史と展望

**ブレイク
スルー**

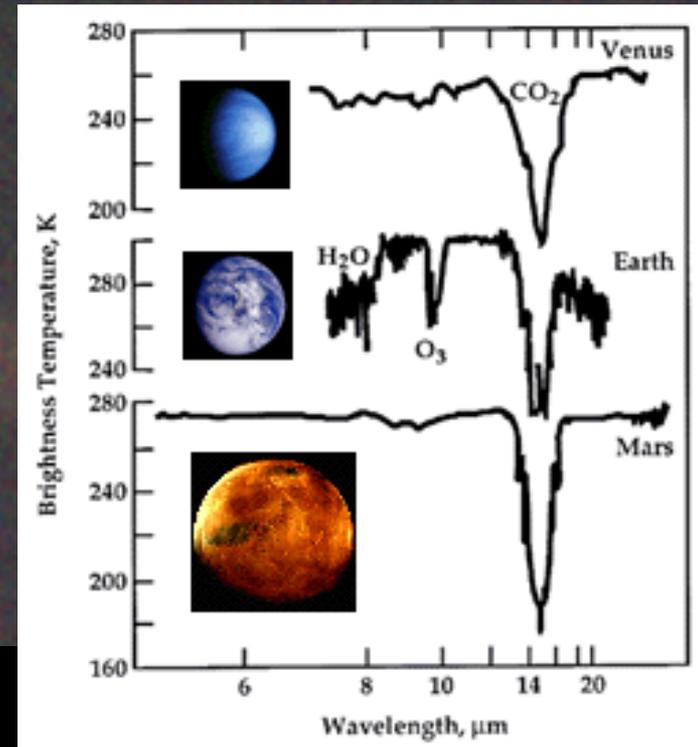
1995年
系外惑星発見

2009年
系外惑星専用
衛星Kepler
打ち上げ

20XX年
ハビタブル惑星
発見???

	地上からの系外惑星探査	スペースからの系外惑星探査	系外惑星上の生命探査
紀元前 ~1995年	山師、先駆者 ハイリスク ・ノーリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン	論外： 危ない人々、十分 成功して失うもの がない人
1995年 ~2009年	ゴールドラッシュ ハイリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン	荒唐無稽 ハイリスク ・ノーリターン
2009年 ~ 20xx年	定着 ローリスク ・ハイリターン	実現 ローリスク ・ハイリターン	立案 ハイリスク ・ハイリターン
20xx年~	統計を稼ぐ ローリスク ・ローリターン	定着 ローリスク ・ローリターン	実現？ ローリスク ・ハイリターン？

From
the *Pale Blue Dot*
to
Beyond a Pale Blue Dot



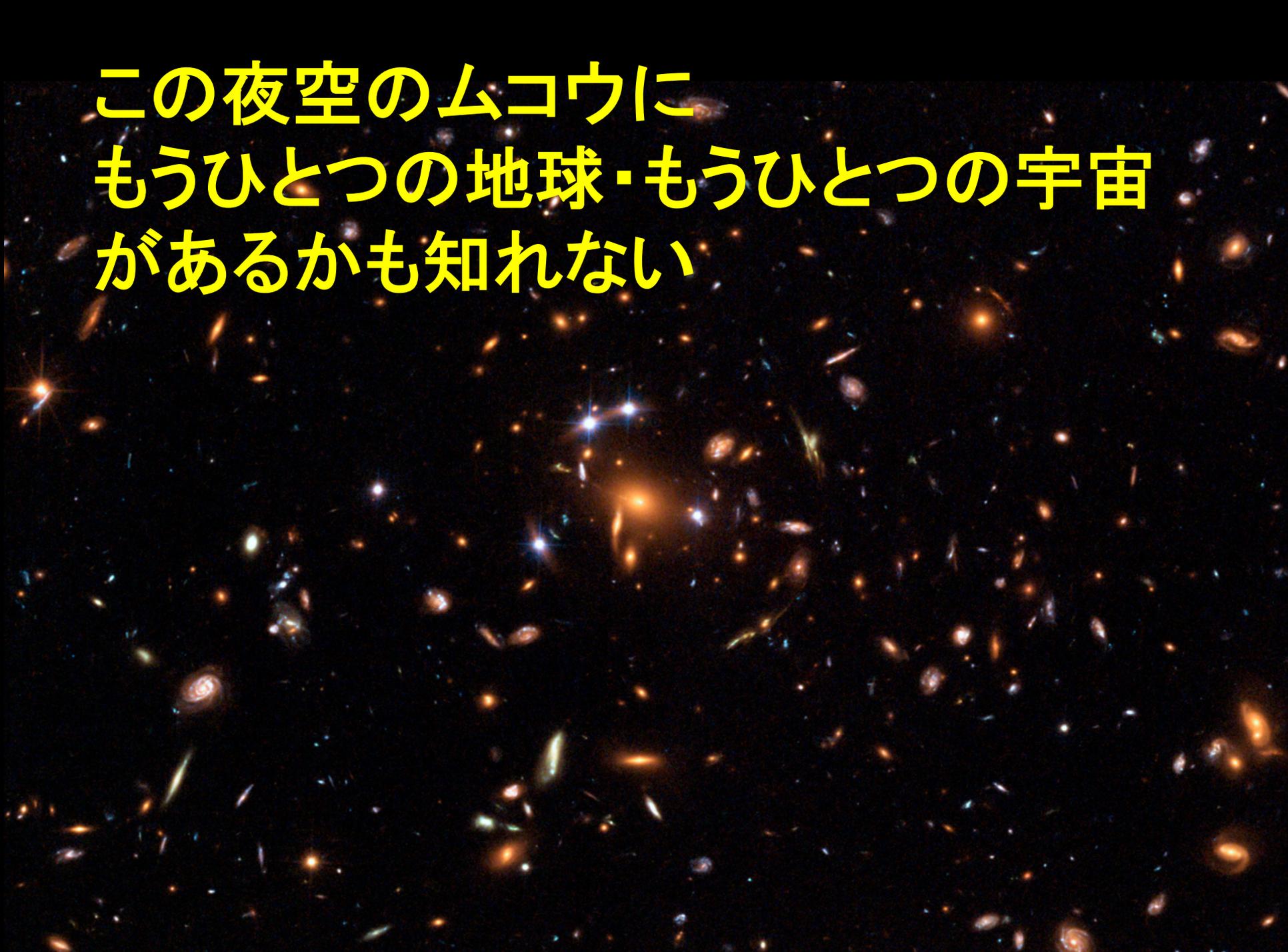
この青空の向こうに何かがあるはず



この星空の向こうにも何かがあるはず



この夜空のムコウに
もうひとつの地球・もうひとつの宇宙
があるかも知れない



From After Dark



To Beyond Dark

