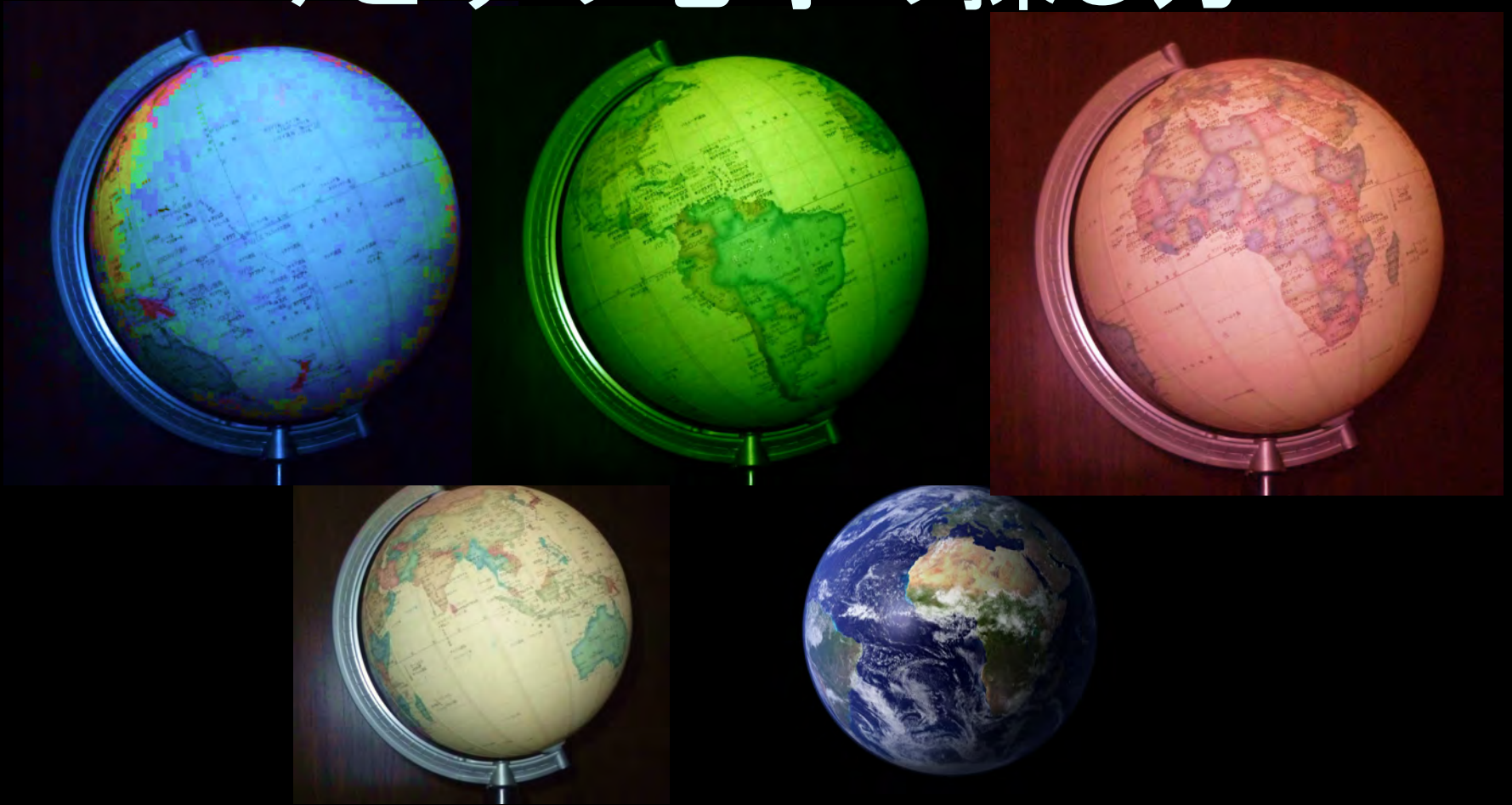


# みどりの地球の探し方



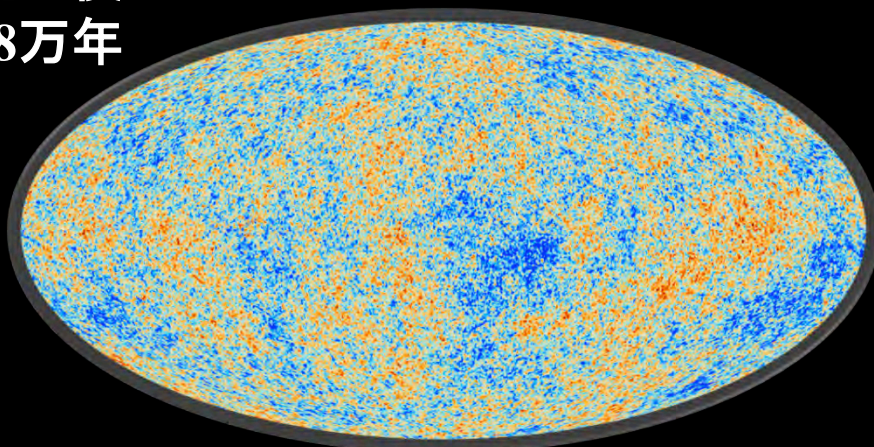
[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2014j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2014j.html)

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

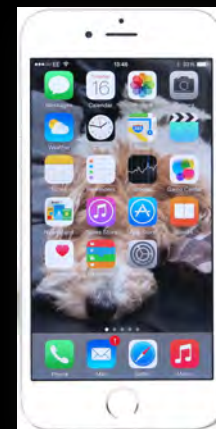
高校生のための冬休み講座 2014年12月24日 @理学部1220号室

# 宇宙はどこまで予測可能か

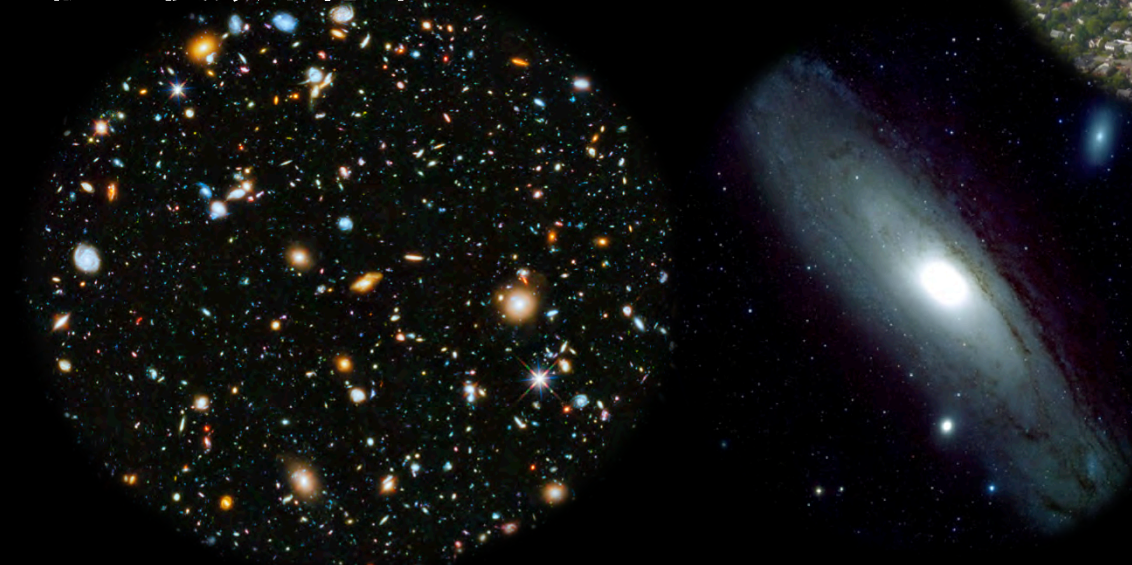
誕生後  
38万年



現在の宇宙・地球・社会の驚異的な多様性のすべては、誕生直後の宇宙の初期条件に刻まれていた(はず)



誕生後数十億年





自然法則に矛盾しないものはすべて  
この広大な宇宙のどこかに必ず存在する

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 R. 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

青空と夜空ノムコウの世界



2010年6月25日@ロサンゼルス

# 空が青いわけ

- 自然な疑問
  - 青空は世界の果てなのか
  - この先に別の世界が広がっているのか
- 物理学の答え
  - 大気は粒子(気体分子)から成る
  - 分子のレイリー散乱  $\propto (\text{波長})^{-4}$





2011年12月10日22時13分@埼玉県上尾市

# 夜空が暗いわけ



- 夜空はなぜ暗い？ (オルバーズのパラドックス)
  - 宇宙は有限の過去から始まった
  - 光の速度は無限ではない
- さらなる疑問
  - 夜空ノムコウのどこまで宇宙は広がっているのか



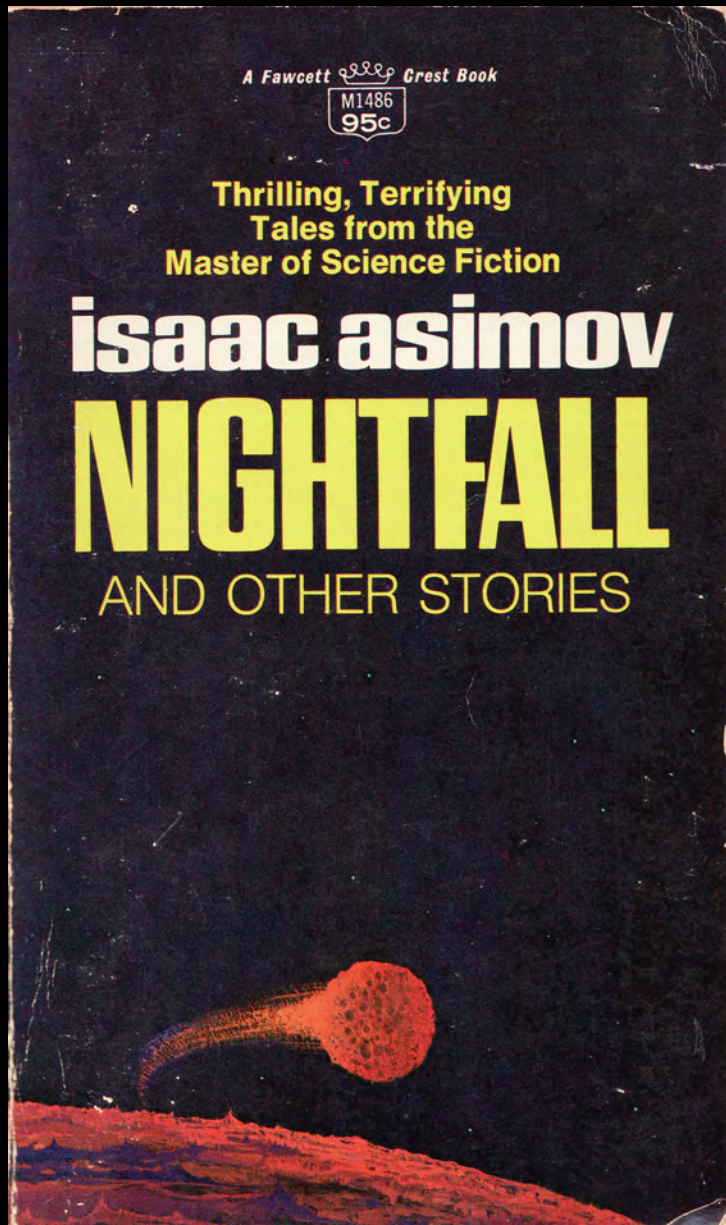
# アイザック・アシモフ著 「Nightfall(夜来たる)」



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？

# Issac Asimov: 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."*



青空ノムコウに世界はあるのか



「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、田中壱氏撮影)



地球以外の「世界」はあるのか？  
太陽系外惑星

# 太陽系外惑星の発見史

## ■ 哲学的宇宙観 (universe vs. multiverse)

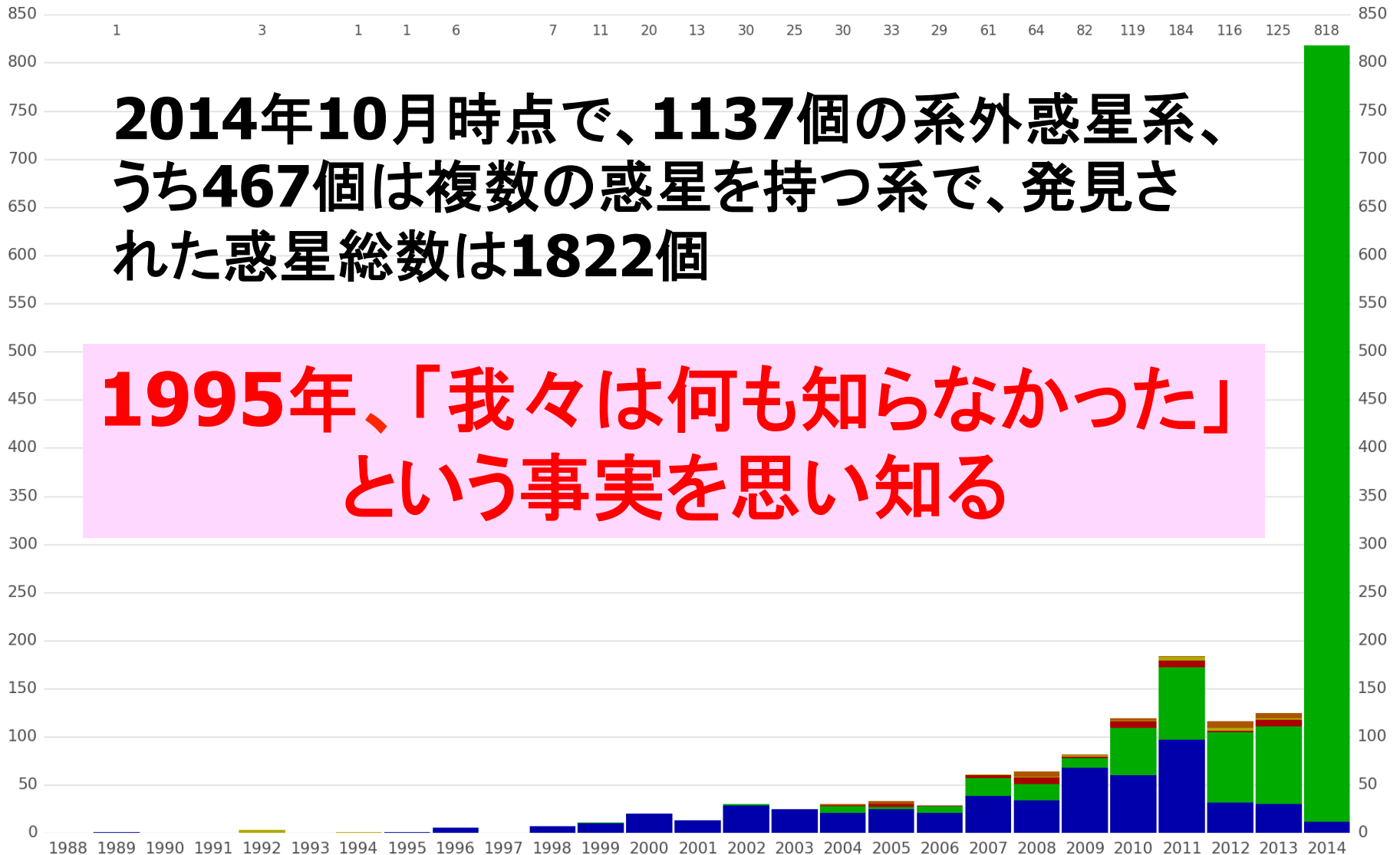
- この宇宙とよく似た宇宙も異なる宇宙も無限に存在する
  - エピキュロス (紀元前341年～270年)
- 我々以外の宇宙は存在し得ない
  - アリストテレス (紀元前384年～322年)

## ■ 科学的発見史 (太陽系から太陽系外惑星系へ)

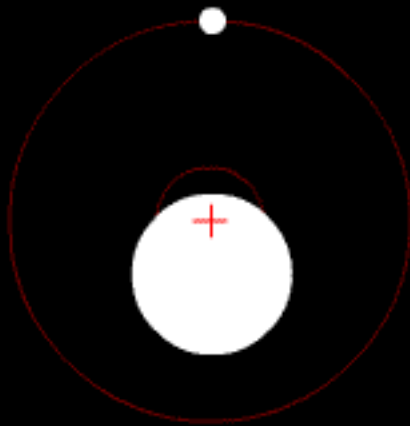
- 1963年 ピーター・バンデキャンプがバーナード星に惑星を発見と報告したが、現在は間違いとされている
- 1995年8月 ゴードン・ウォーカーたちが、12年間21個の恒星を観測したが、巨大惑星は見つからなかったと報告
- 1995年10月 ミシェル・メイヨールとデディエ・ケロズがペガサス座51番星を周期4日で公転している巨大惑星を発見



# 太陽系外惑星発見の歴史年表



# 系外惑星検出方法



## ■ ドップラー法

- 惑星の公転に同期して中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

## ■ トランジット法

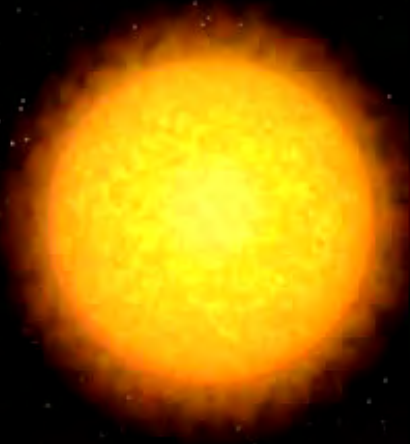
- 中心星の正面を惑星が横切ることによって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

## ■ 重力マイクロレンズ法

- 重力レンズ効果により、背景星が1日程度急激に明るくなる

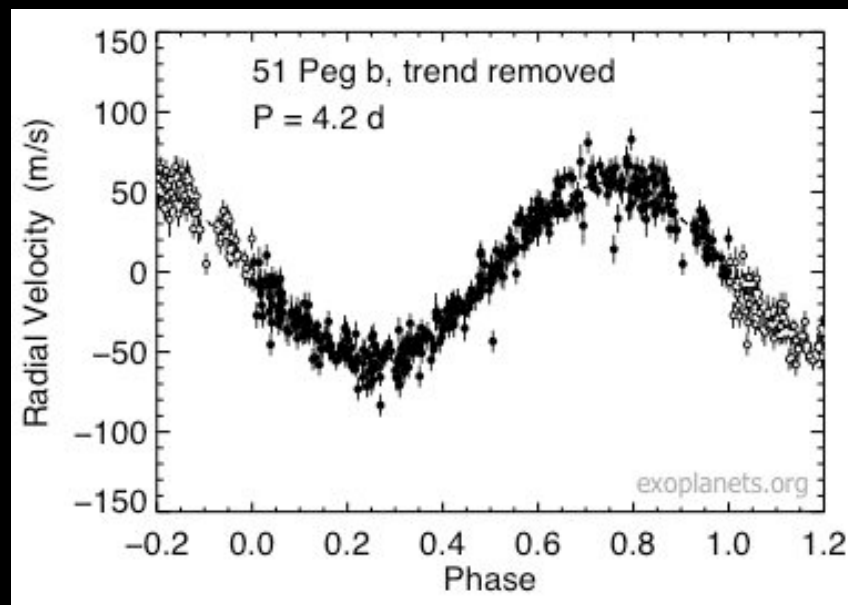
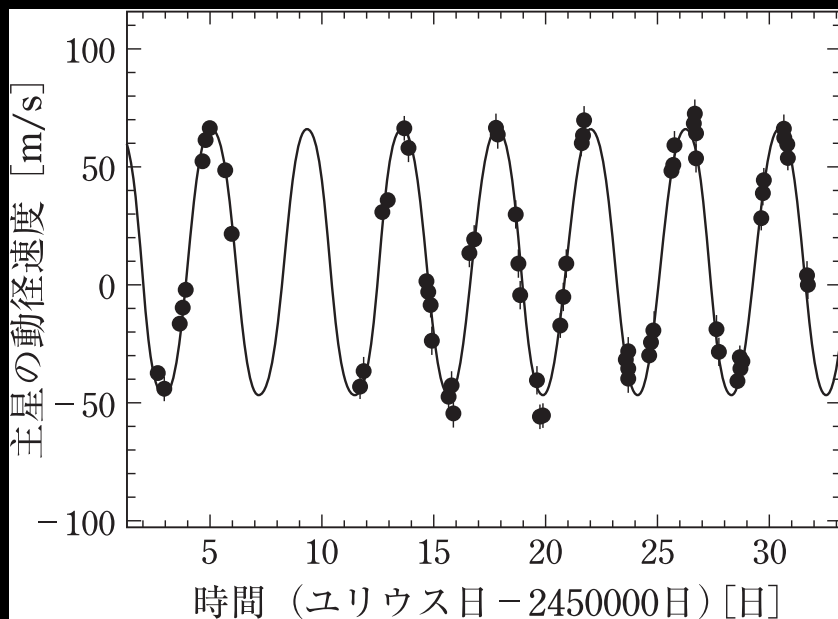
## ■ 直接撮像

- 中心星の光を隠して惑星の光を分離



# ドップラー法（視線速度法）

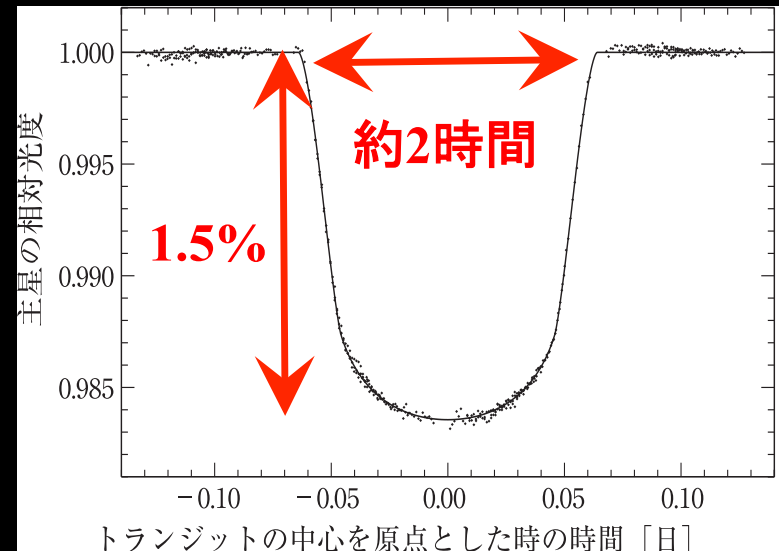
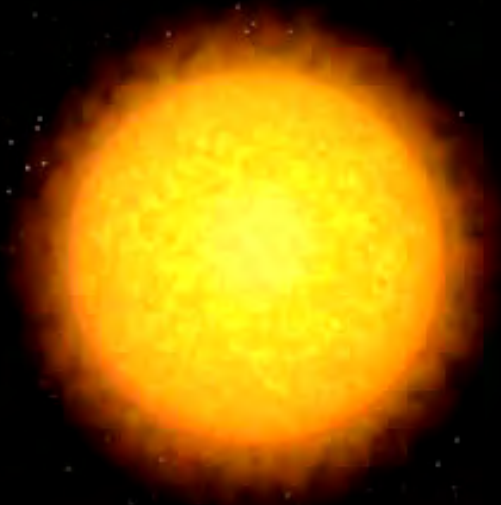
- **最初の太陽系外惑星 51Peg b (1995年)**
  - ペガサス座51番星の周りを4.2日で公転する、0.5木星質量のガス惑星（ホットジュピター）
  - 太陽系とは全く異なる惑星系の世界の存在！





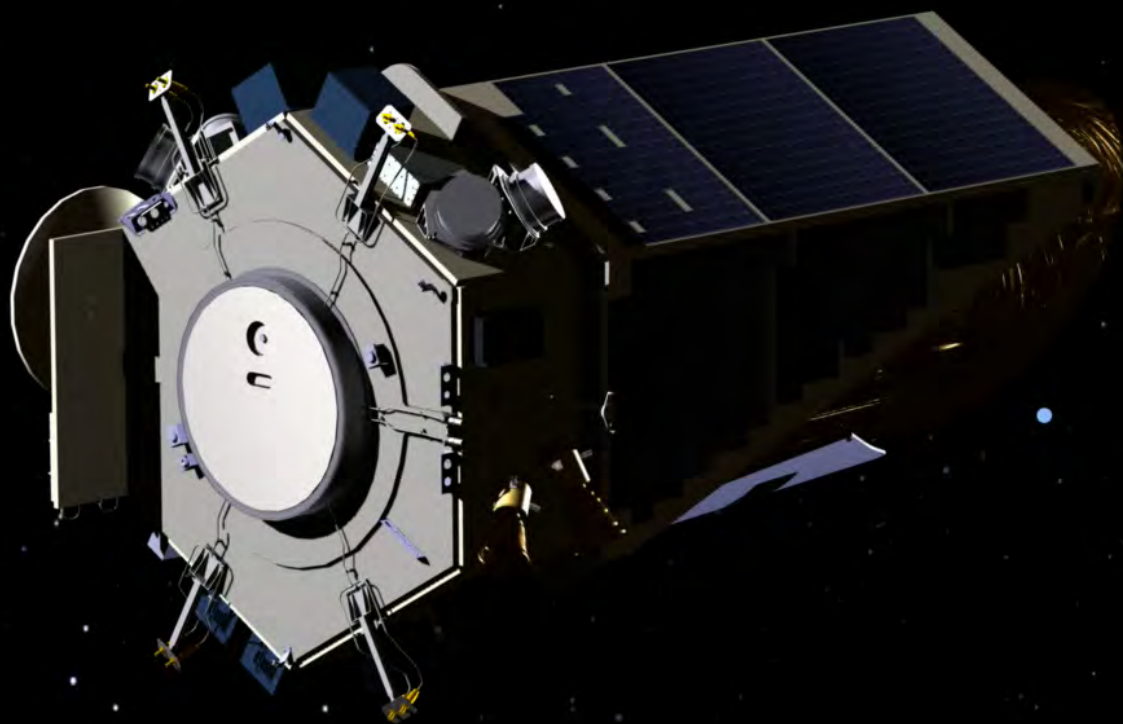
# トランジット法

- **最初のトランジット惑星HD209458b (1999年)**
  - ドップラー法で検出された3.5日の公転周期に同期して中心星がわずかに暗くなる
  - トランジット法: 惑星半径  
+ドップラー法: 惑星質量 = 惑星密度



ケプラー探査機 (2009年3月6日打ち上げ)

トランジット惑星専用測光モニター観測  
地球型ハビタブル惑星を探す



<http://kepler.nasa.gov/>

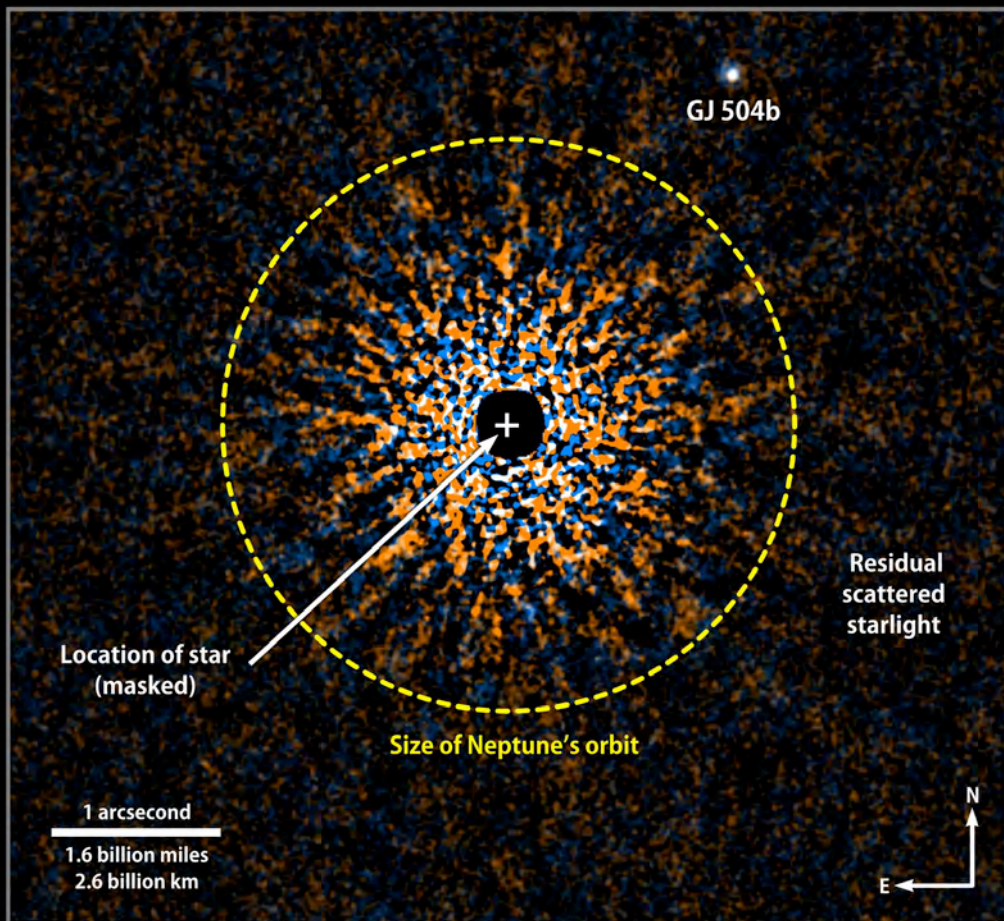
# 系外惑星直接撮像の進歩と限界

## ■ 57光年先の4木星質量のガス惑星の初めての直接撮像

- すばる望遠鏡の成果 (2013年)

## ■ 地球型惑星直接撮像への第一歩

- ただし太陽系の海王星以遠の惑星しか分解できない
- 中心星が明るすぎる！





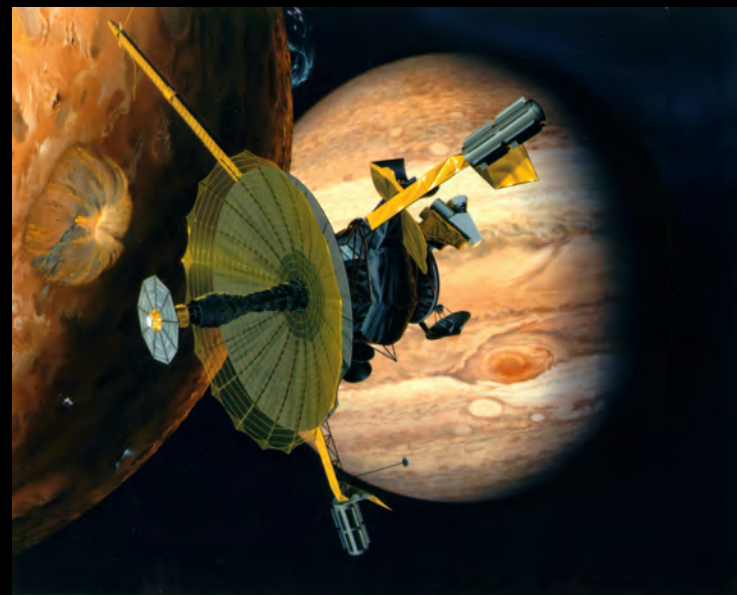
# 系外惑星についてわかってきたこと

- **惑星(系)は稀なものではなく普遍的**
  - 太陽と似た恒星の3割以上が惑星を持ち、2割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巨大ガス惑星(ホットジュピター)が大量に存在(太陽系の木星の周期は約10年)
  - ゆがんだ楕円軌道の惑星系
  - 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
  - (2-3)地球質量の岩石惑星(スーパーアース)の存在
- **我々の地球以外に生命が存在するか？**

我が地球から思いを馳せる

# 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

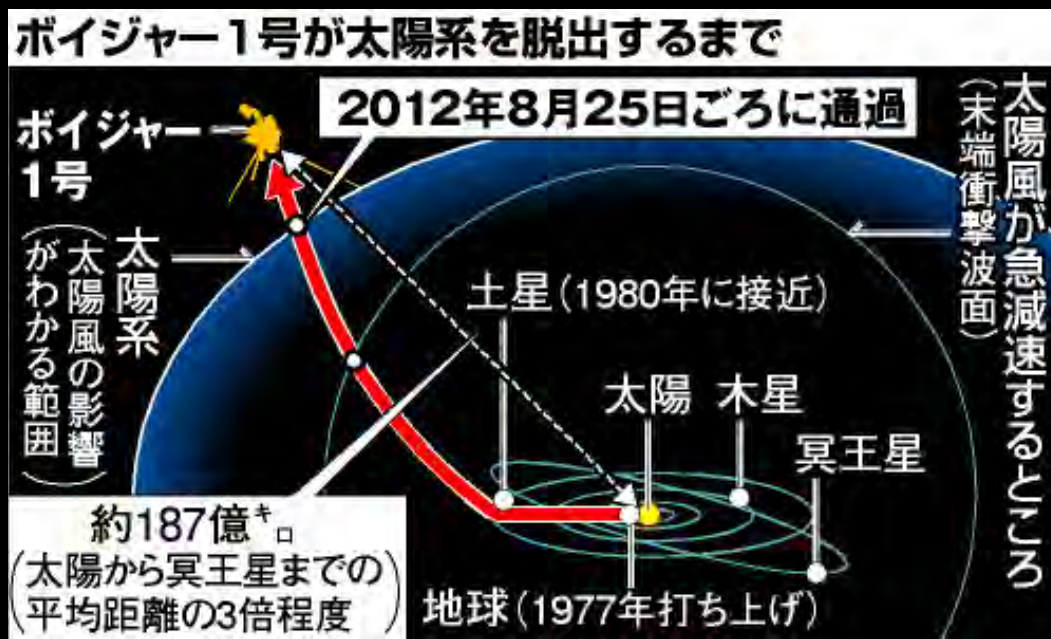


Sagan, Thompson,  
Carlson, Gurnett & Hord:  
Nature 365(1993)715

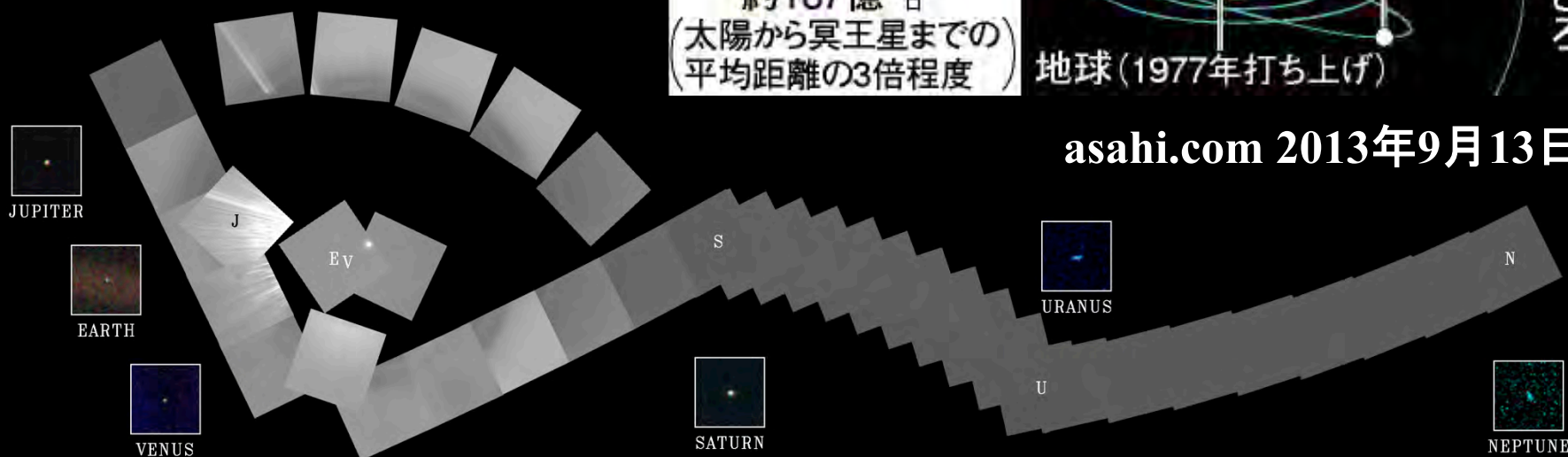


# ボイジャー1号が眺めた我が地球

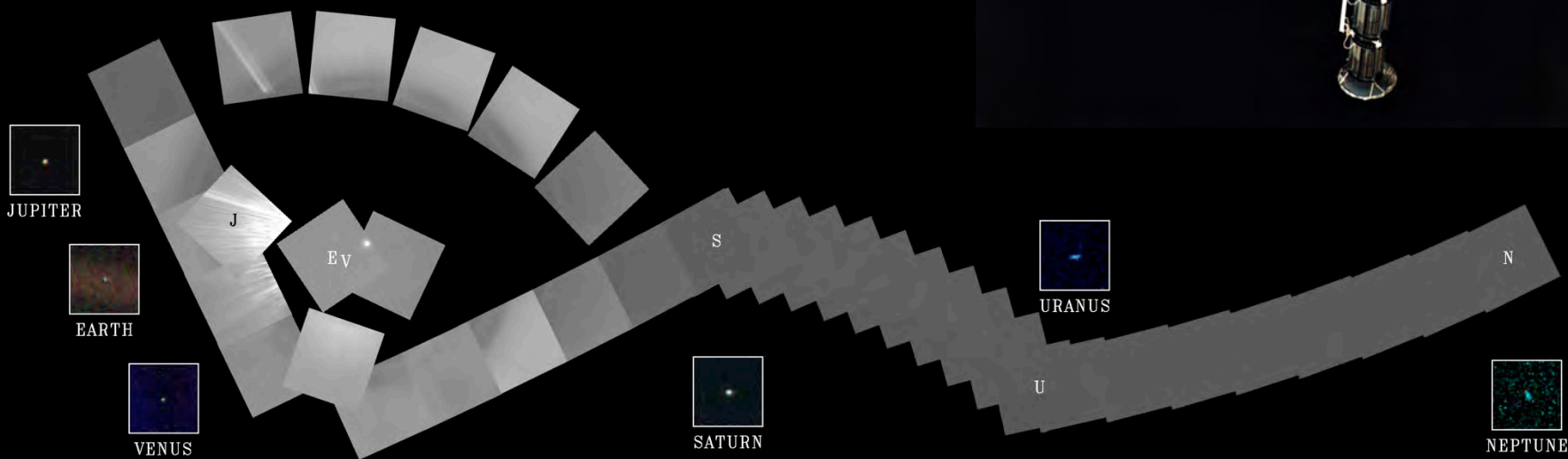
- 1990年2月14日 @40AU
  - カールセーガンが地球の画像を **Pale Blue Dot** と命名



asahi.com 2013年9月13日



# ペイル・ブルー・ドット



# 土星越しに 見る地球



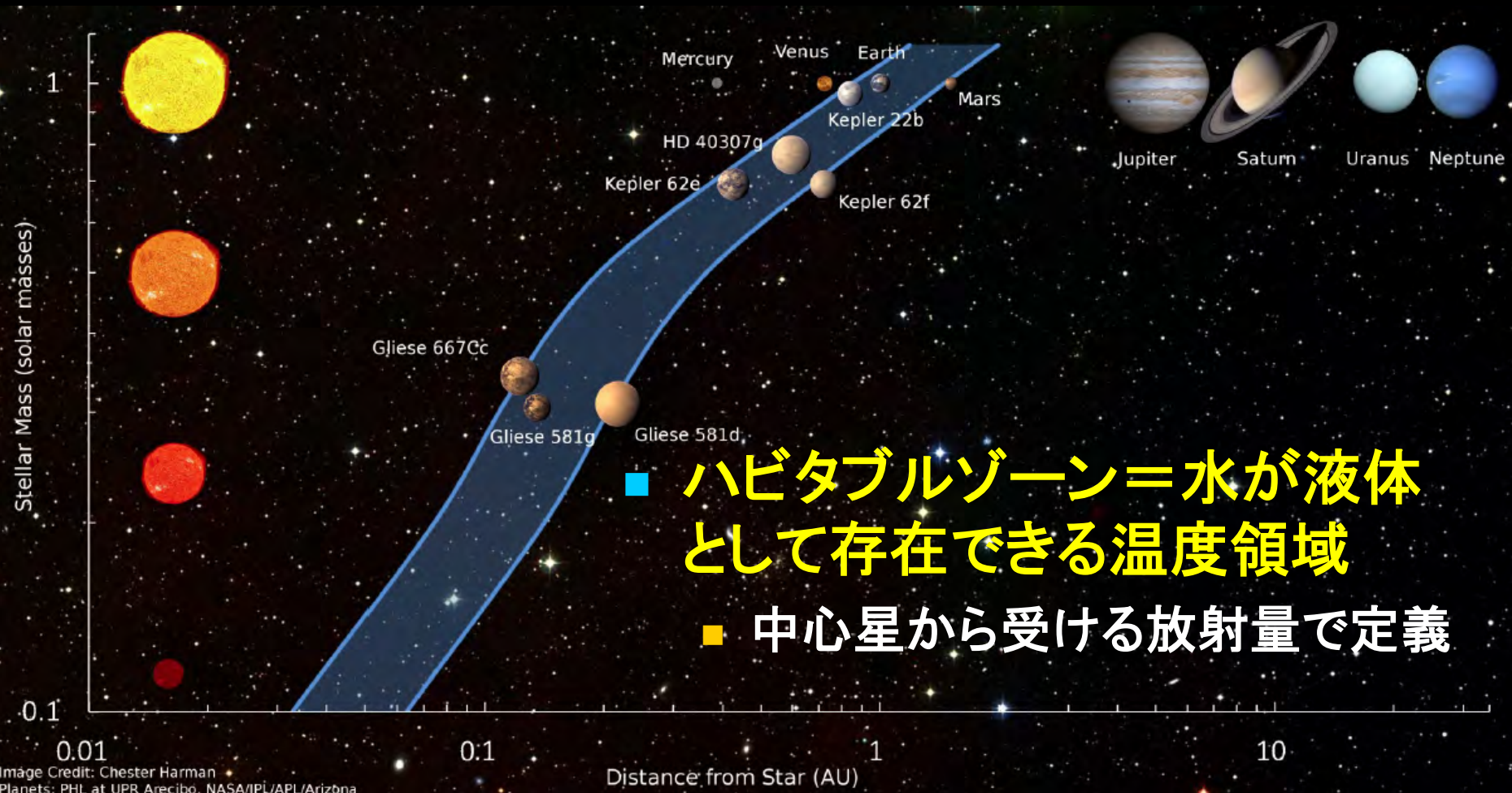
- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
  - 2013年7月20日(日本時間):2万人がこちらに手を振っている

View from Saturn (Cassini)  
900 million miles away



ハビタブル惑星

# ハビタブル惑星候補



Kasting, Kopparapu, Ramirez & Harman (2013)

# ハビタブル惑星候補の例

Kepler-22 System

もう一つの地球？ 生命は存在するのか？

Solar System

Habitable Zone

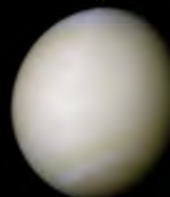
我々は何も知らなかった



Kepler-22b



Mercury



Venus



Earth



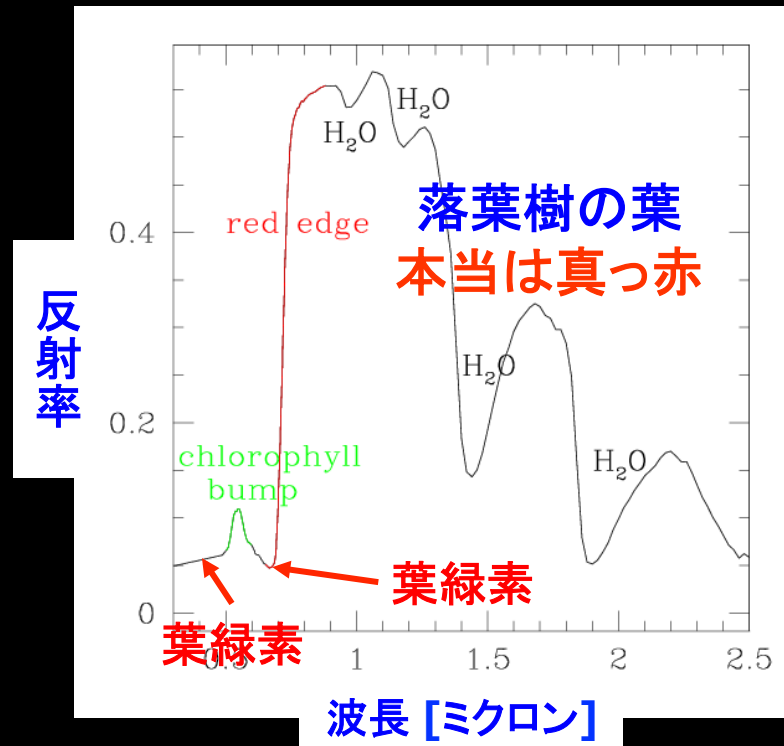
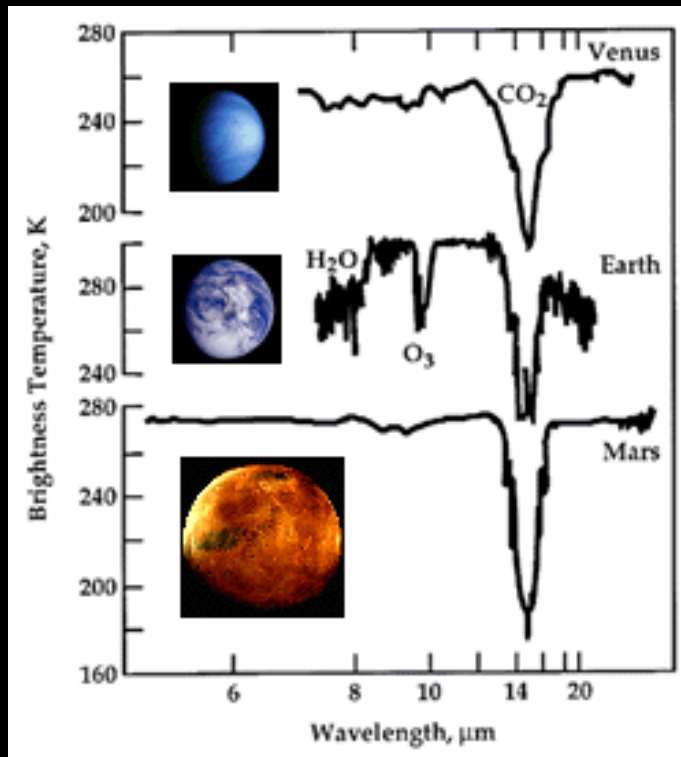
Mars

Planets and orbits to scale



# 天文学から宇宙生物学へ ハビタブル惑星に生命の兆候を探す

- 水とオゾンの吸収が観測されるのは地球のみ
- 地上の植物のほとんどは700nmより長波長で反射率が急激に増加する(レッドエッジ)

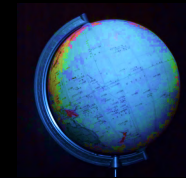
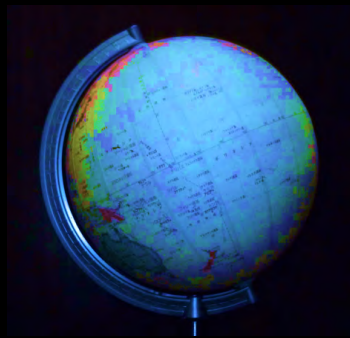


# Starshade project: 地球型惑星を直接見る

- 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)

# もう一つの地球の色

- **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



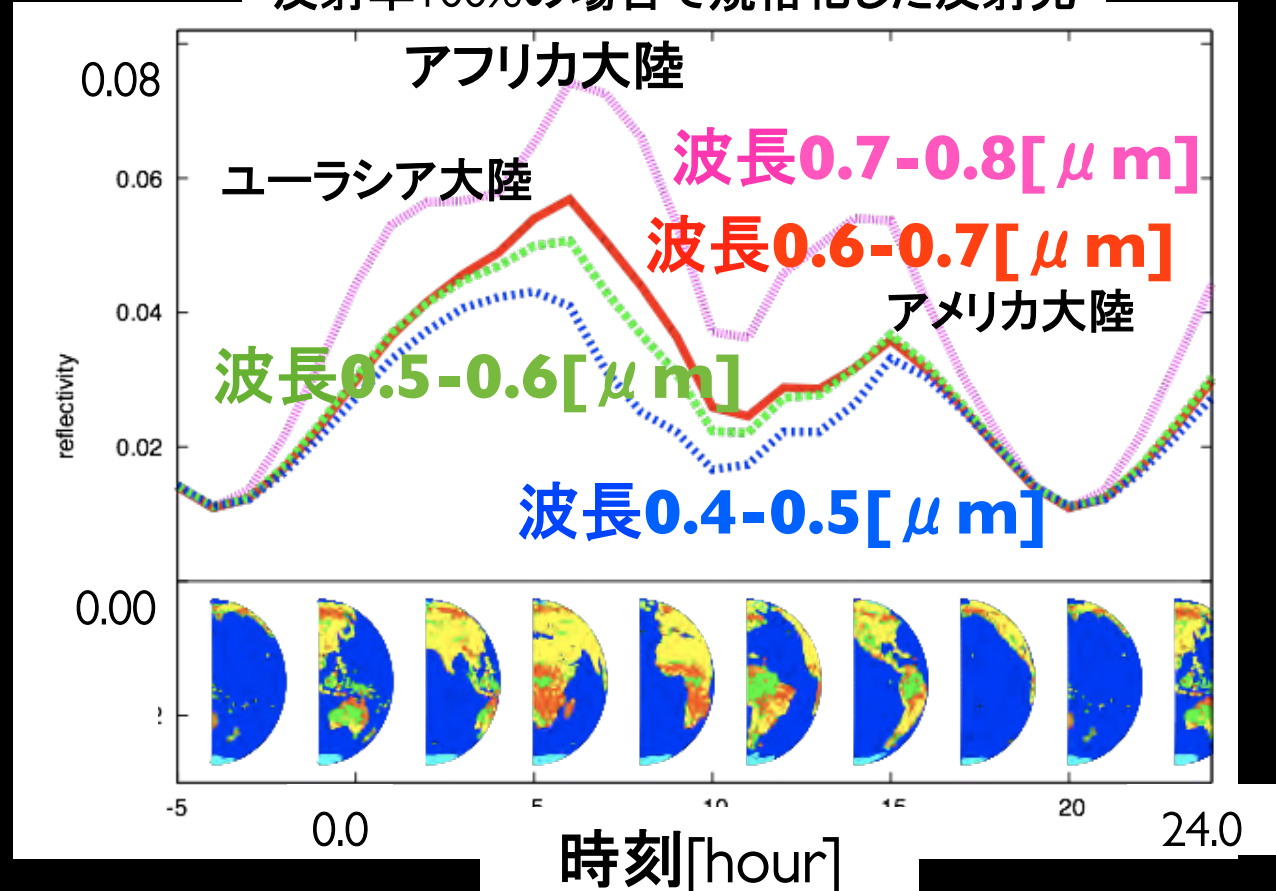


# 地球は青かった？



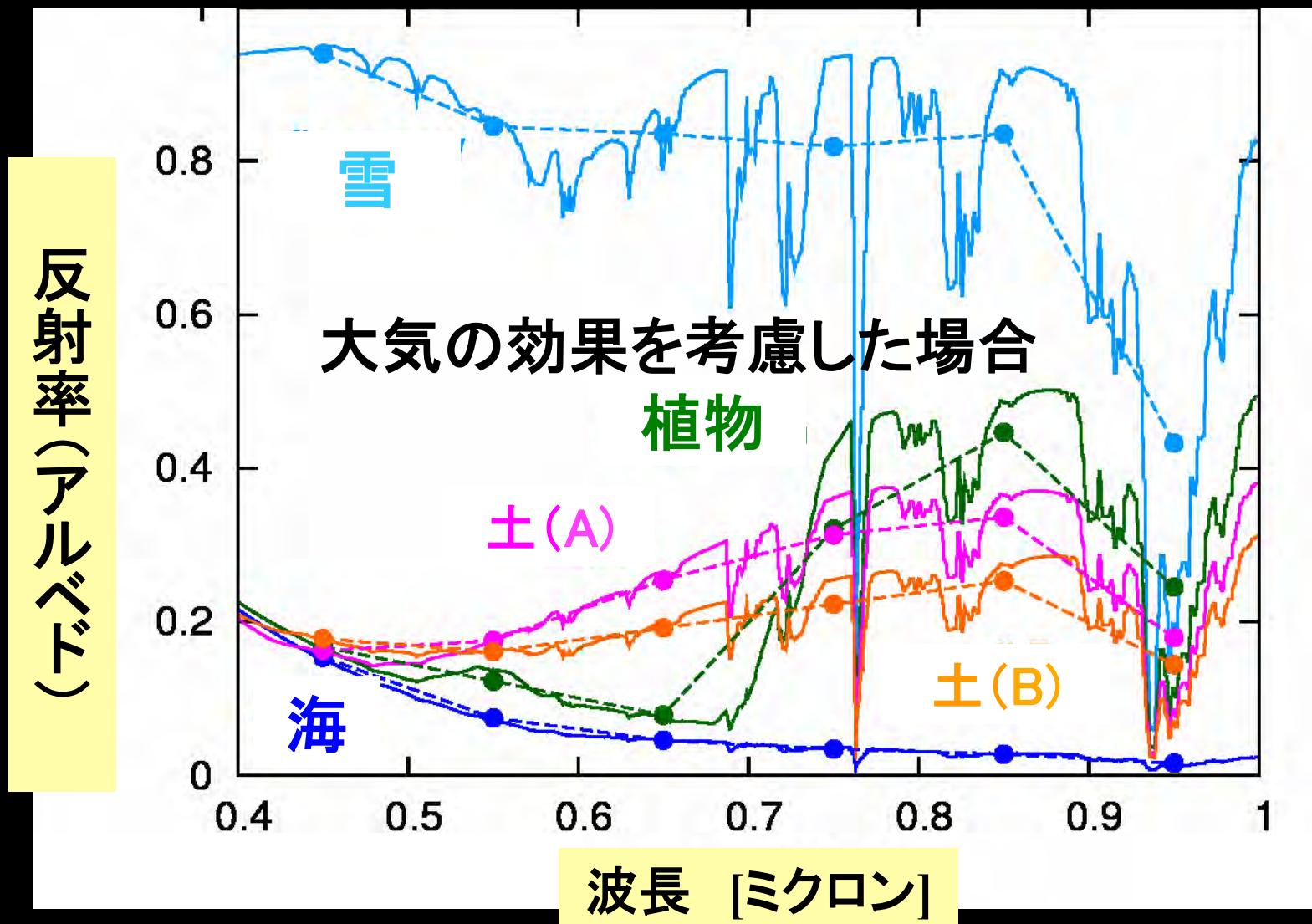
地球が反射する光の自転にともなう色変化のシミュレーション結果

反射率100%の場合で規格化した反射光



- 自転軸に垂直な方向から観測 藤井友香ほか(2010)
- 地球観測衛星のデータを用いた理論予言の計算例

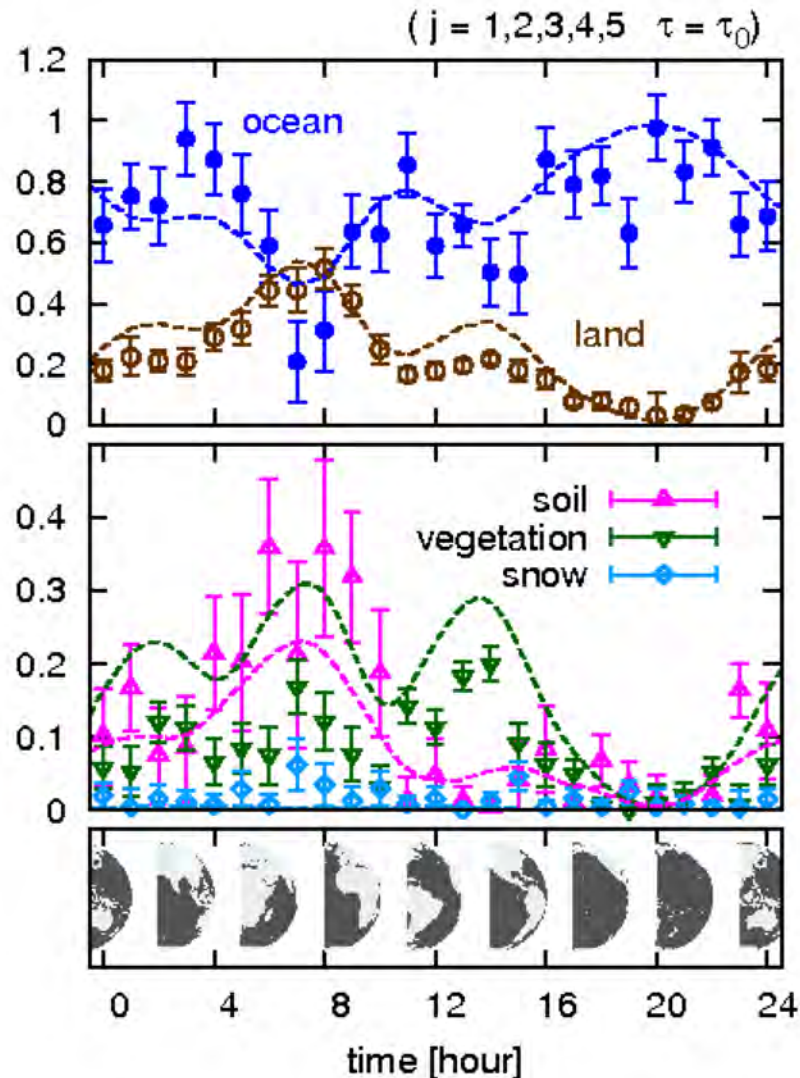
# 等方散乱近似での反射スペクトル



藤井友香ほか(2010)

# もう一つの地球の色を解読する

(重みつき)表面積比

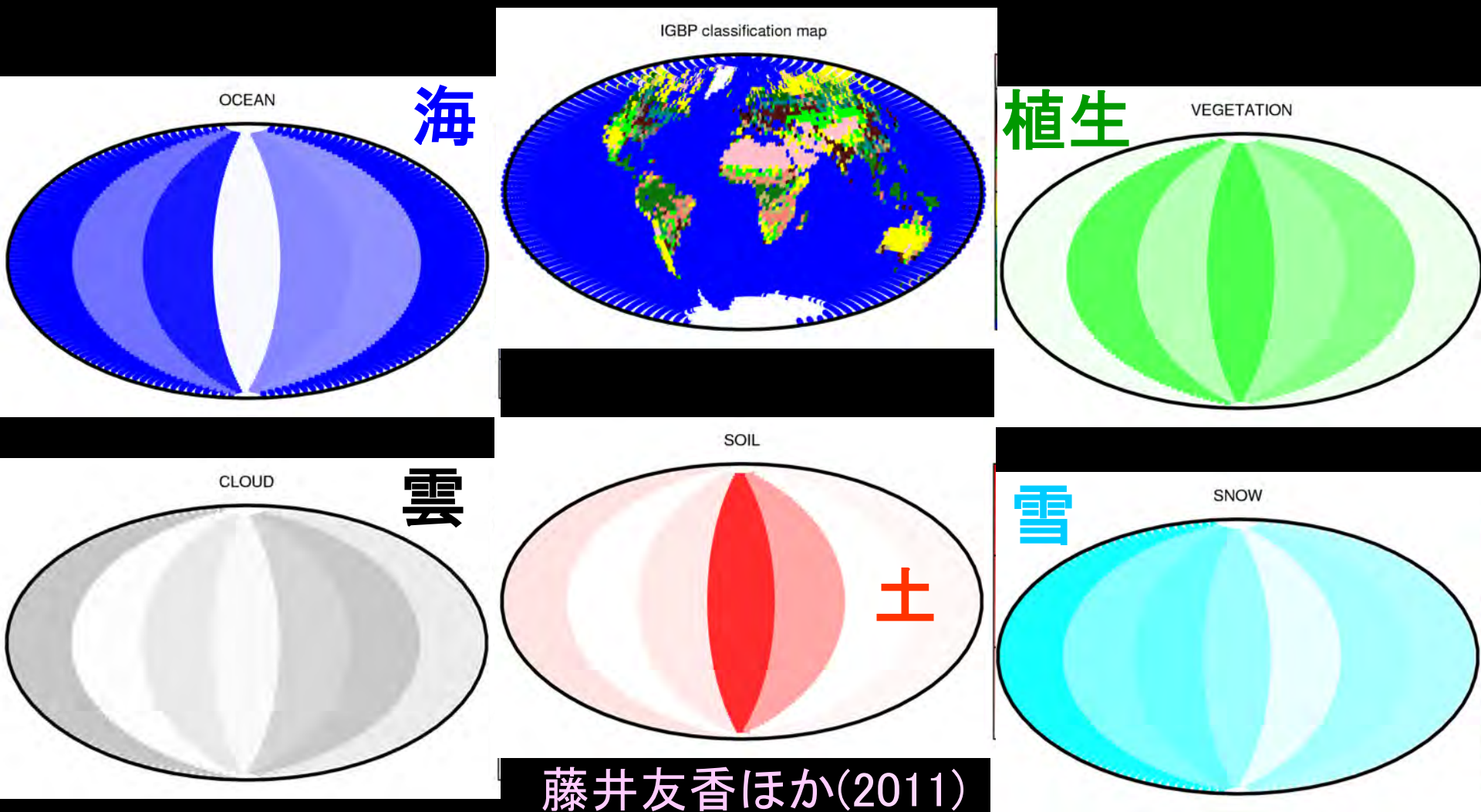


- 雲は無視
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 雲がなければ、海や植物の存在が検出可能！
  - 雲を考慮した計算では、海や雲は検出できるが、植物は難しいという結論

藤井友香ほか(2010)



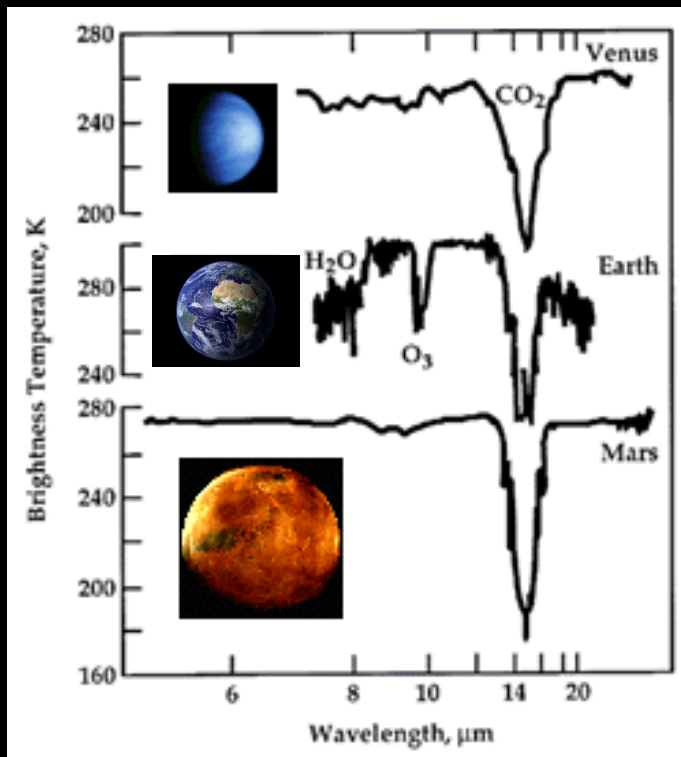
# 地球測光観測データから推定された地表面成分の経度分布地図



藤井友香ほか(2011)

# もうひとつの地球の色

## 天文学から宇宙生物学へ至る道



- **地球型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、、
- **リモートセンシングの成否が鍵！**
  - 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**
  - レッドエッジは宇宙生物学に至る一つの道か？

# 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

科学をする心



# 私の考える科学の心

- 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するな**: 勝ち負けという価値観は科学とは本来相容れない
- **ただし、このような私の価値観は、科学者の間でもあまり受け入れられてはいない**
  - 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」学問を生み出すという理由で正当化する論調には賛同しかねる

invaluable > valuable

⇒ useless > useful ???

■ 「役に立たない」と「価値がない」は違う

- 芸術、音楽、文学、恋愛は役に立つのか？
- でもそれらは生きる理由を与えてくれる
- **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な分野があって良いはず⇒天文学はその典型

# 試験が得意な人≠新しいことを開拓する人

- 大学入学までに行われる「試験」での評価基準
  - 正解が存在することがわかっている問題を
  - 決められた時間内に
  - 一人だけで何も見ず
  - すべての科目を万遍なく
- これらは社会の現場とはすべて「矛盾する」
  - 試験での秀才が必ずしも優れた研究者・社会人になってない
- 人間の才能は1次元に数値化できるものではなく、多次元空間で表現すべきもの
  - 必ずしも(とびぬけて)優秀である必要はない
  - 何でも良いから余人をもって代えがたい度合いが重要
- 何よりも自分が好き・楽しめることを見つけることが大切

# 科学を学ぶ意味

- テストで良い点を取るためではない
- 楽しみながら、すこしでもより自然を理解する
- 世の中の不思議さを認識する
- 当たり前とされていることでも一度は疑ってみる
  - みんなが言っているからではなく自分で納得する
- 本物と偽物を見極める
  - 変な人 (TVに出過ぎる有名人・肩書きだけで中身のない人・詐欺師・政治家・官僚・大学教員) に騙されない
  - 真実を合理的に理解し納得する
  - 健全な懐疑心をもち、善悪を区別する
- 科学的考え方は狭い意味の科学にとどまらない



# 湯川学の人生観

東野圭吾『真夏の方程式』 文藝春秋社 p.412

- **どんな問題にも答えは必ずある。**
  - だけどそれをすぐに導き出せるとはかぎらない。
  - 今すぐには答えを出せない問題なんて、これから先、いくつも現れるだろう。そのたびに悩むことには価値がある。しかし焦る必要はない。
  - 答えを出すためには、自分自身の成長が求められている場合も少なくない。だから人間は学び、努力し、自分を磨かなきゃいけないんだ。



# 私の人生観：謎解きはジュケンの後で 東大ing 2014(東京大学新聞社)

謎解きはジュケンの後で

30年以上も  
覚えていない  
と思った記  
難しい問題を  
仕方なかった  
くどある種  
ぜだろう。  
高校数学は  
いるのに対し  
は結局理解で  
そう考えれば  
この世界の

物理

$$\begin{cases} \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \\ \ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \end{cases}$$
$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0$$



- 決して面白いとは言いがたい  
高校物理は通過儀礼でしか  
ない。大学でなぜそうなるのか  
を学ばずつきりする。さらに、  
この世界が少数の単純な摂理  
に支配されているという驚くべ  
き事実感動すらしてしまう  
かも。
- その先には膨大な謎とさらなる  
摂理の探求の地平が広がって  
いる。長い時間がかかろうと、  
科学を学ぶことで初めて解明  
できる無数の謎が残っている。  
それにチャレンジする人生も悪  
くない。

# 私の人生の最終目標： アンパンマン オープニングテーマ

- 作詞：(高知県人) やなせたかし

なんのために生まれて なにをして生きるのか  
こたえられないなんて そんなのは いやだ！



***Merry Christmas!***

