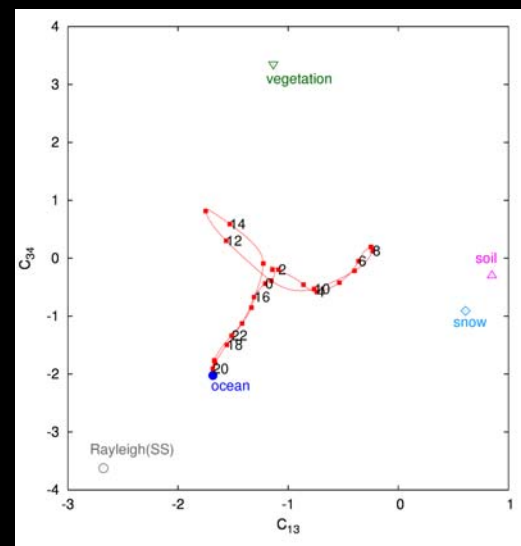
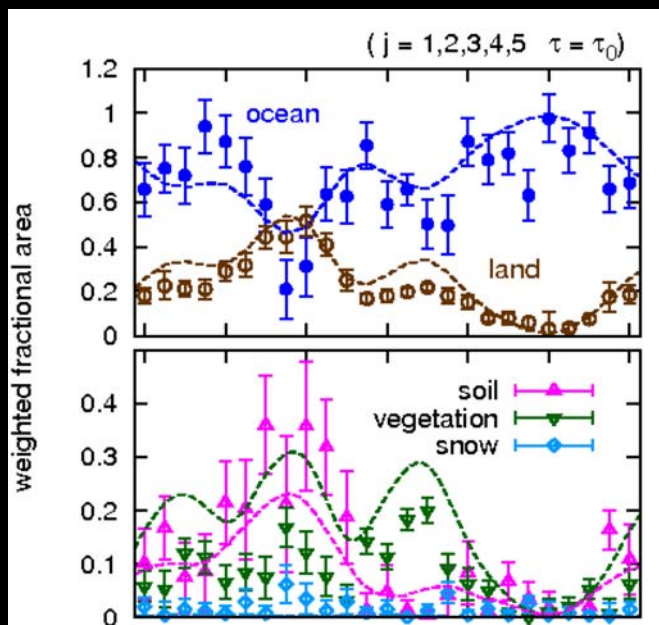


第二の地球の色： 測光観測による海、陸、植生の推定



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

国際高等研究所研究プロジェクト

「宇宙における生命の総合的考察とその研究戦略」

第二回研究会@けいはんなプラザホテル 2009年12月18日～20日

Goal of science ?

- To answer the (known) fundamental questions
 - Maybe, yes...
- It is equally, or even more, important *to discover unknown fundamental questions, or to recognize that we didn't understand anything*
- 学問 (Gaku Mon)
 - No good counterpart in English (academia ? Learning ?)
 - 学 (Gaku) is to learn, and 問 (Mon) is to ask
 - Indeed you can ask questions only after you learn something seriously. Learning without asking later does not bring any progress.

a famous American philosopher and
poet: D.H.Rumsfeld



The Unknown

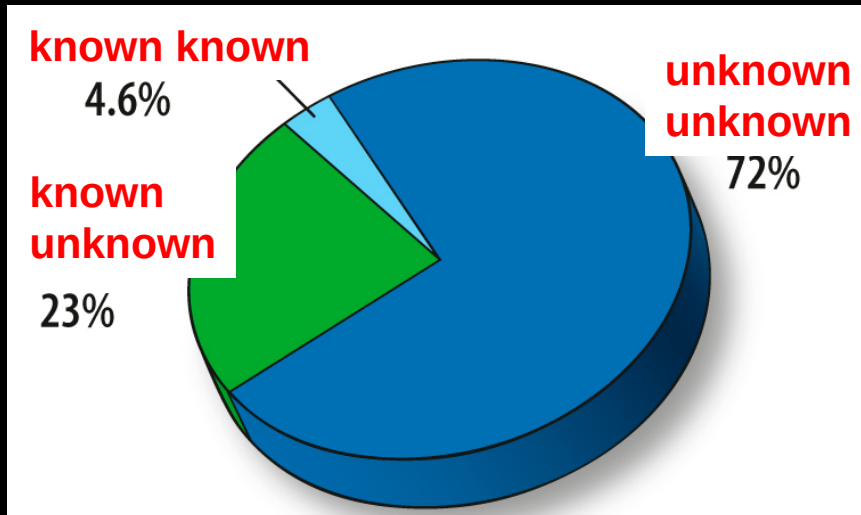
As we know,
There are known knowns.
There are things we know we
know.
We also know
There are known unknowns.
That is to say
We know there are some things
We do not know.
But there are also unknown un-
knowns,
The ones we don't know
We don't know.

*—Feb. 12, 2002, Department of
Defense news briefing*

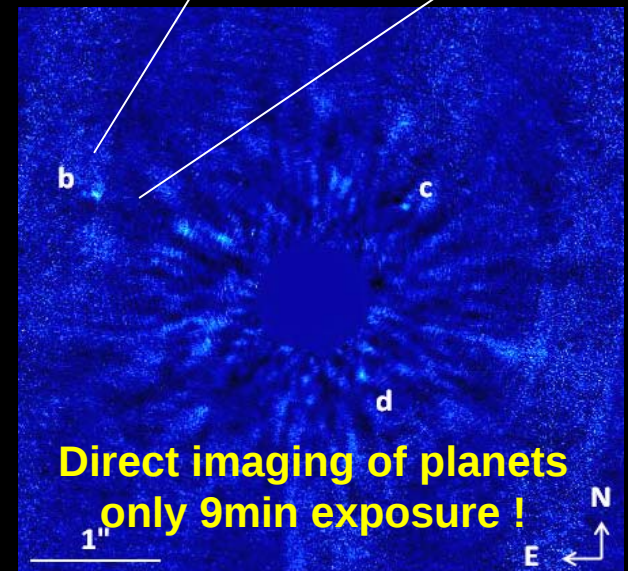
Goal of Princeton-Subaru collaboration

■ Search for the unknowns

- Dark matter in the universe
- Dark energy in the universe
- Most distant objects in the universe
- Planets in the universe
 - A Second Earth ? Ocean ? Life ?

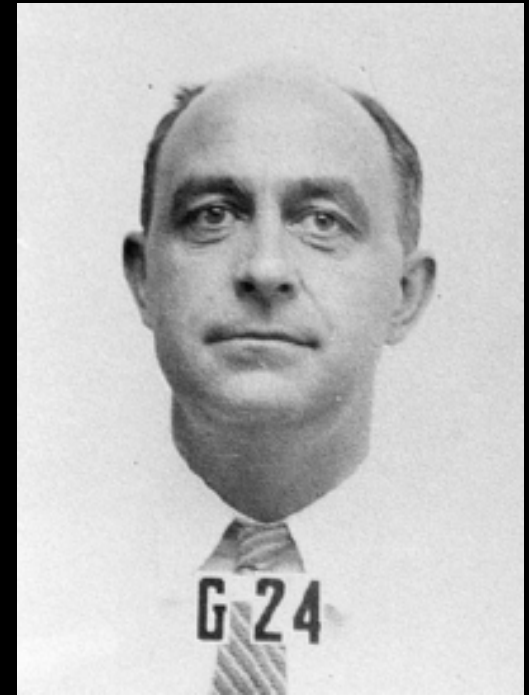


NASA/WMAP Science Team



Subaru HiCIAO team

フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)

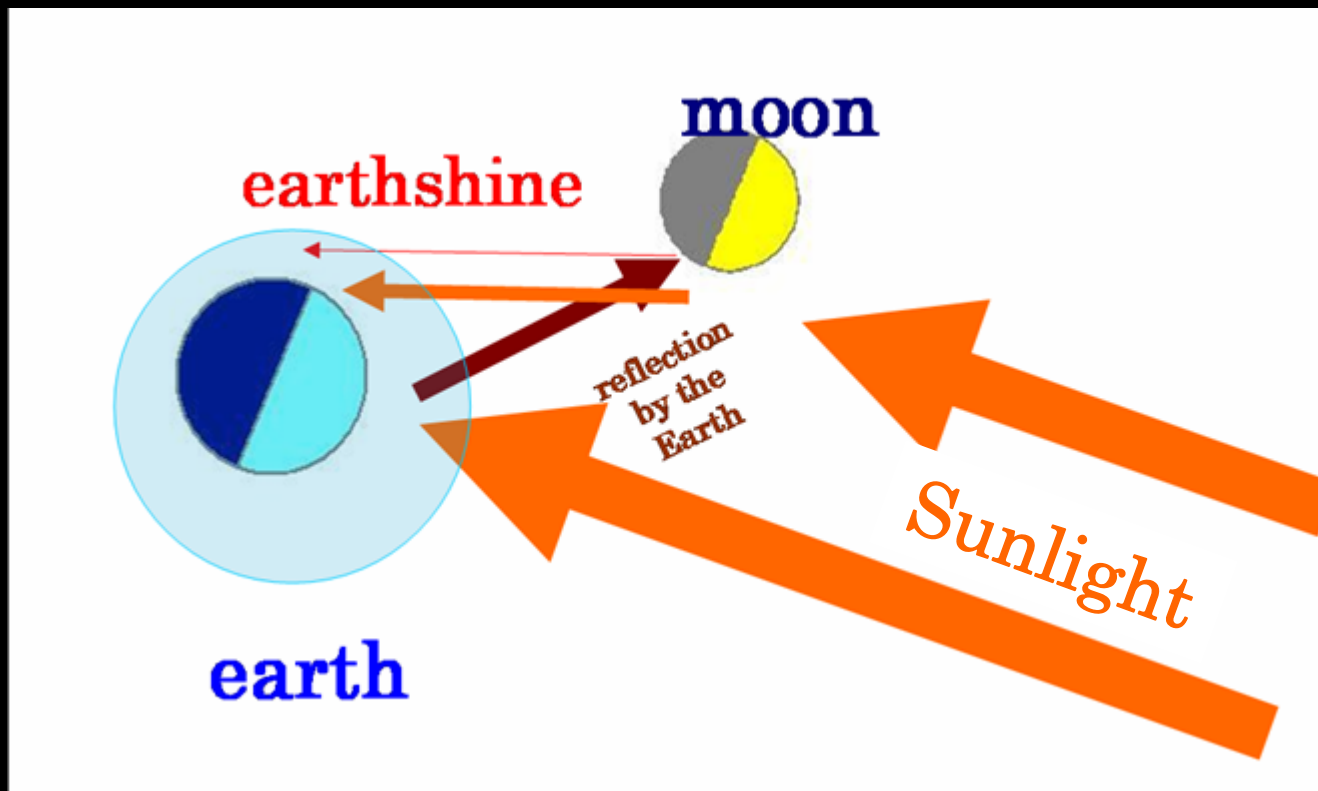


■ Where are *they*?

- 1950年、ロスアラモス研究所の
昼食時にエンリコ・フェルミが問い
かけたとされている

地球照観測

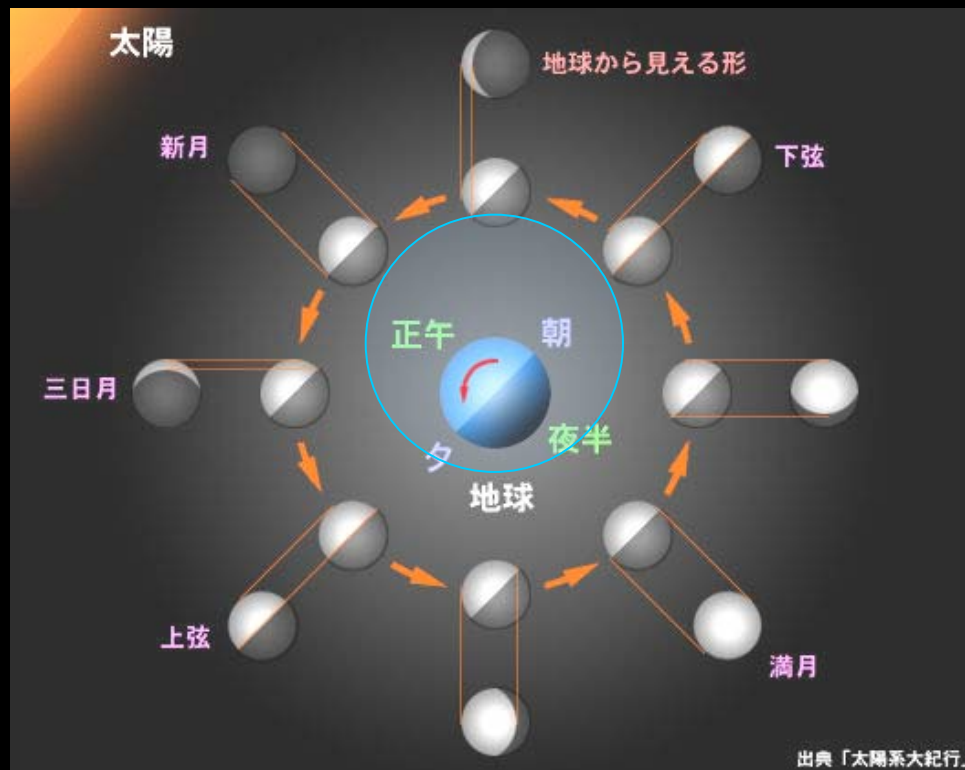
- 月の暗い部分(地球反射光 $\gg$ 太陽光)の分光観測をして、月の明るい部分(地球反射光 $\ll$ 太陽光)との比をとることで、地球からの反射光成分を検出する
- 遠方の第2の地球の分光観測の模擬実験



地球照の観測地点

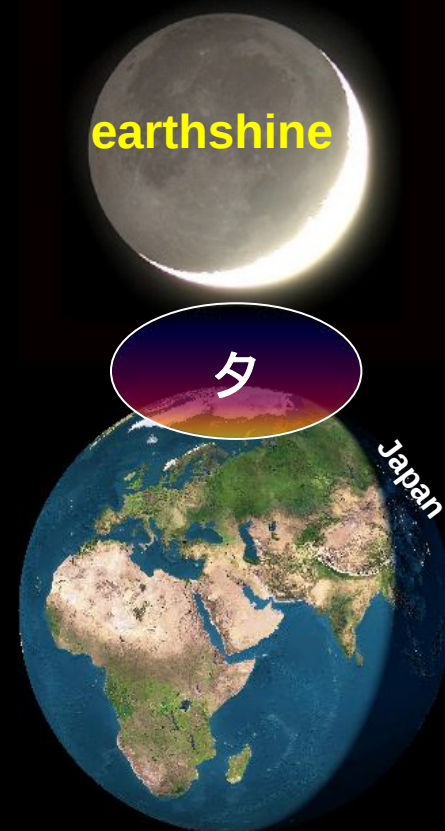


主として海洋



日本は植物のred edgeの有無
を調べる観測に最適

(海老塚 昇氏のppt fileより)



主として大陸

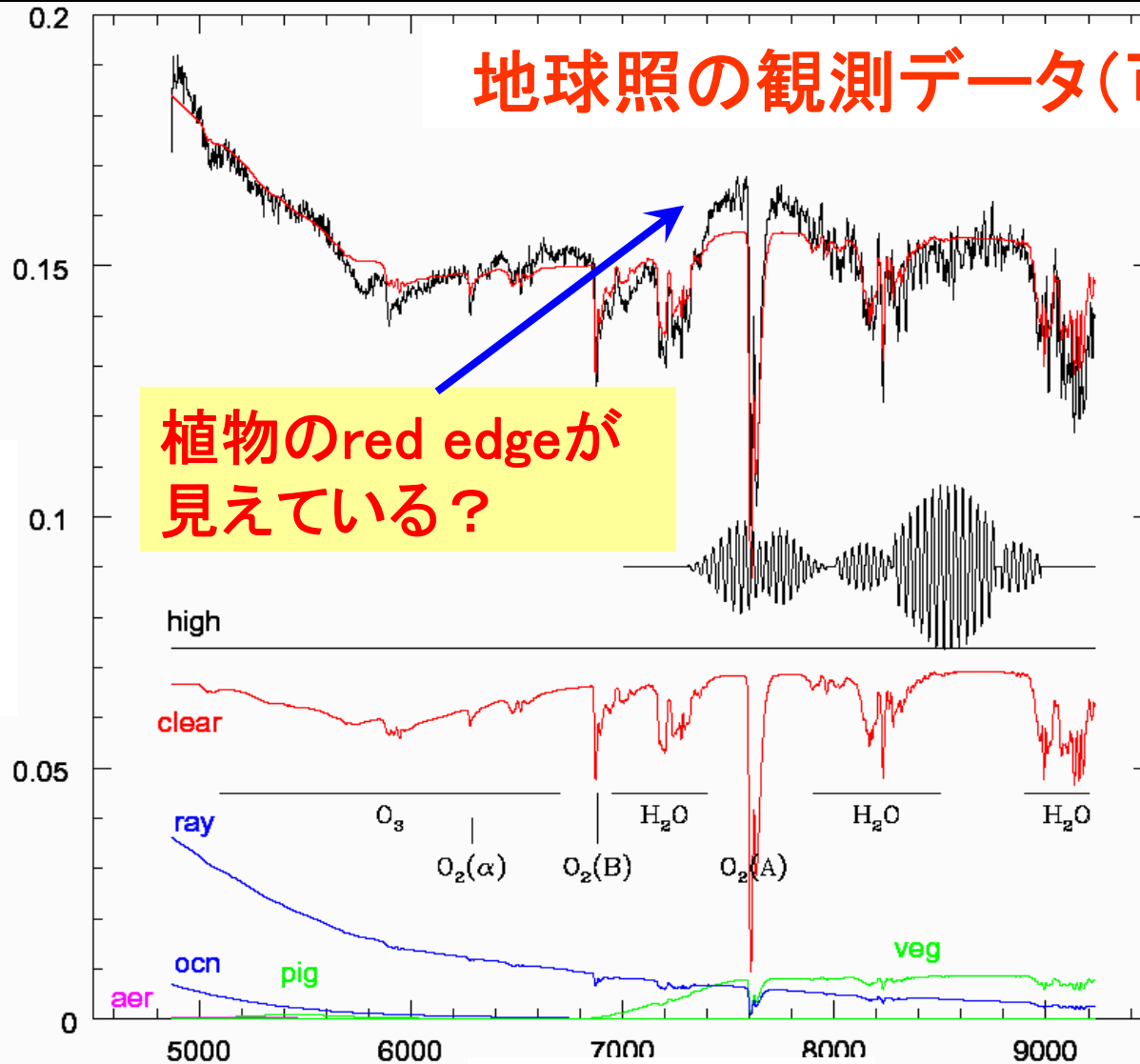


地球照スペクトル観測例

反射率

地球照の観測データ(可視域)

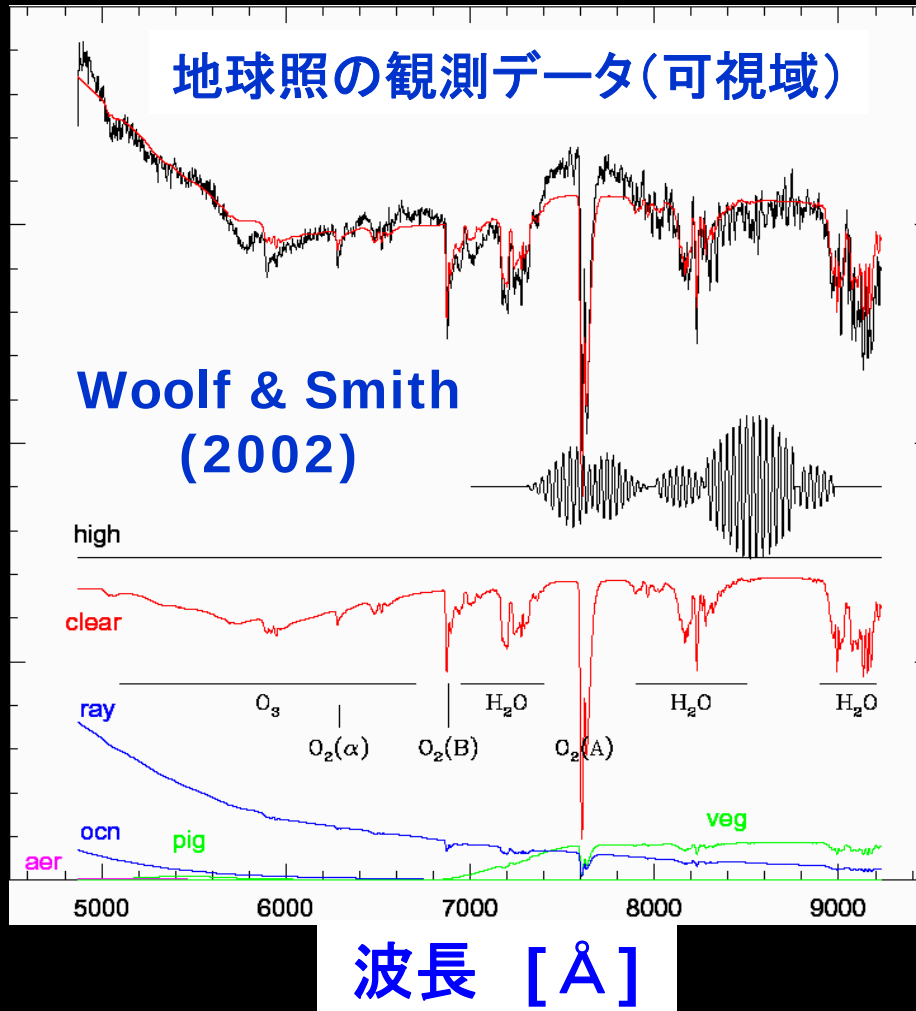
植物のred edgeが見えている？



波長 [Å]

Woolf & Smith:
ApJ 574
(2002) 430
“The spectrum
of earthshine:
A Pale Blue Dot
Observed from
the Ground”

常識的バイオマーカー（生物存在の証拠）



■ 酸素

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

■ 水

- $0.72, 0.82, 0.94 \mu m$

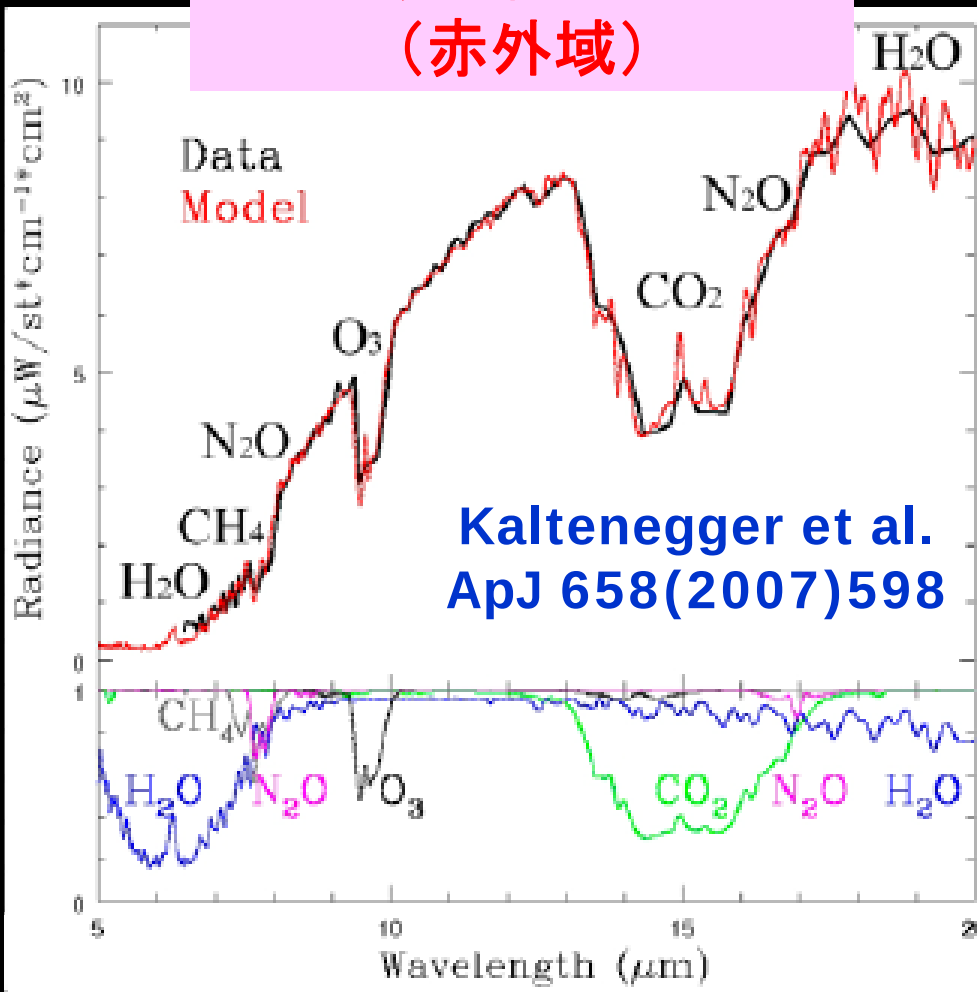
■ オゾン

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

Kasting et al. arXiv:0911.2936（田村さんと芝井さんも共著者）
“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

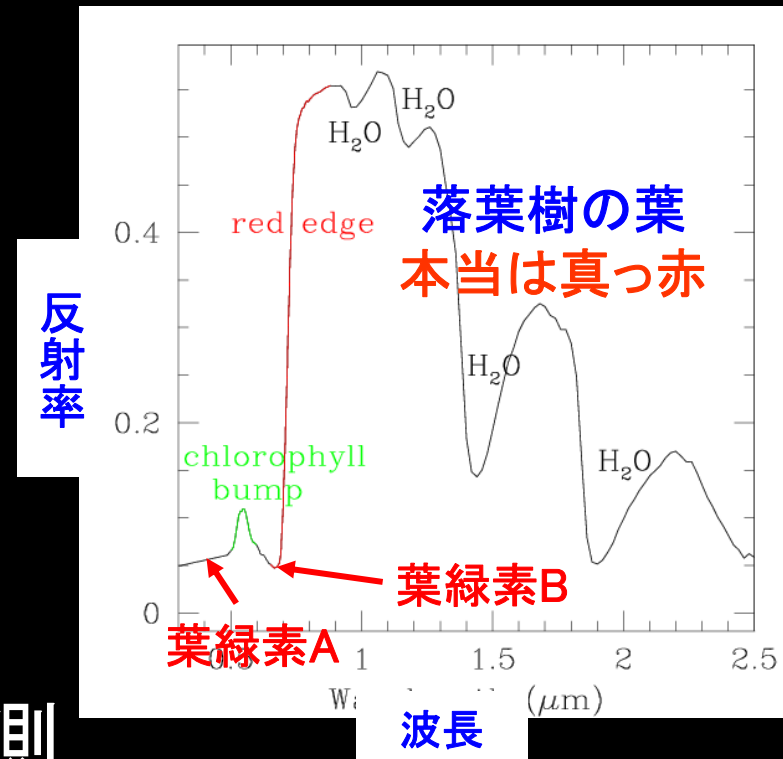
“Exoplanet characterization and the search for life”

より過激なバイオマーカー

- (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

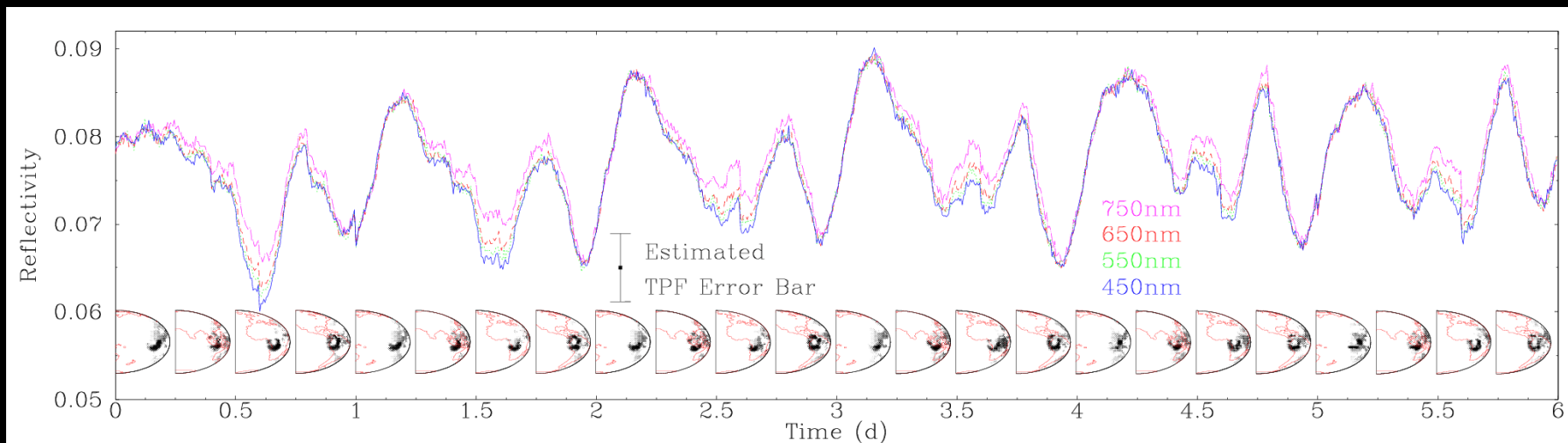
■ Biomarker の探求

- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物の **red edge**
- *Extrasolar planets from extrasolar plants*
- とにかく精密測光・分光観測



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

地球が10pc先にあるとして 何がどこまでわかるか？



Ford, Seager & Turner : Nature 412 (2001) 885

- **10 %レベルの日変化は検出可能**
 - 大陸、海、植生などの反射特性の違いを用いる
- **雲の存在が鍵**
 - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

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

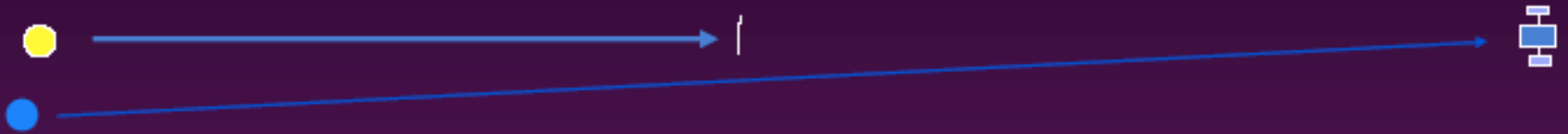
**“Observations of Mars in 1924 made
at the Lowell Observatory: II
spectrum observations of Mars”**

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.

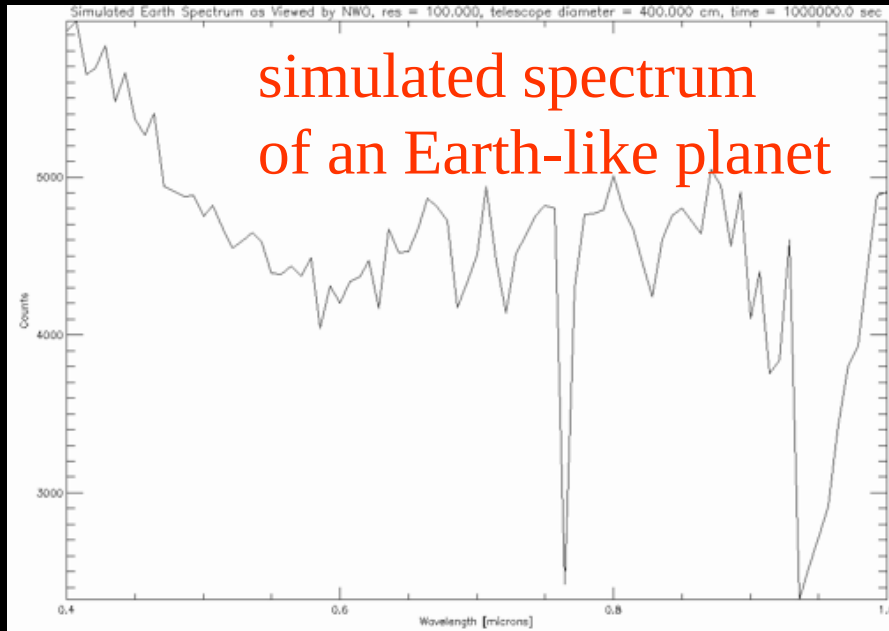
A TPF proposal: *The New Worlds Mission*



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

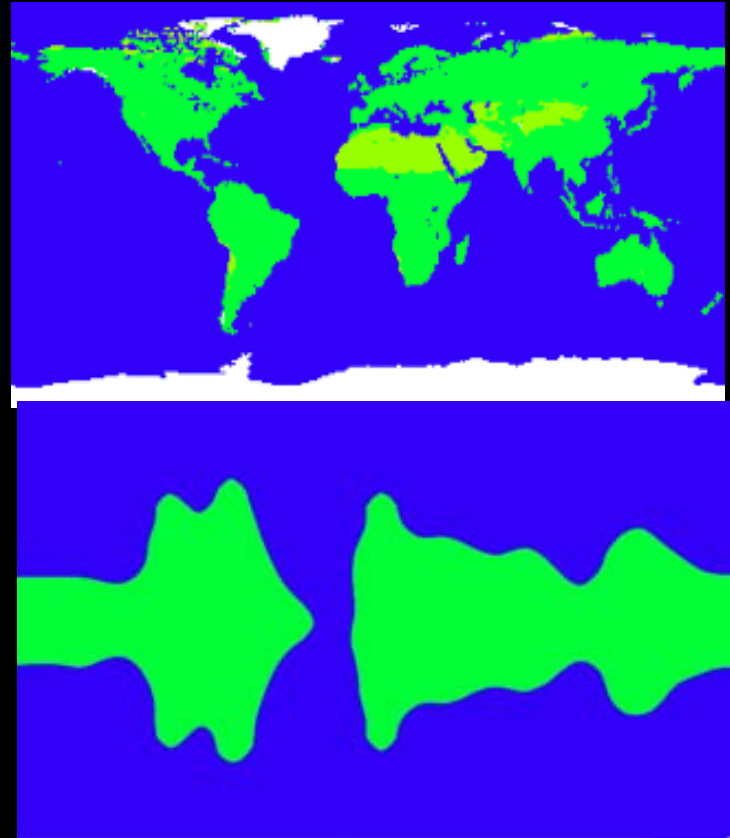
- Two or three spacecraft at L2 point
 - 4-meter aperture telescope in the visible
 - “occulters” craft would each carry a starshade. Operating 70,000 km from the telescope, one starshade blocks starlight but passes planet light.
 - U. of Colorado, Ball aerospace, GSFC, MIT, UCL

New Worlds Mission: simulations



- at 10 pc, with 4-m telescope, an exposure time of 1000000 sec, and a resolution of 100. The O₂ line at 761nm is prominent, as well as the H₂O line at 960nm.

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



- With Earth-like clouds, New Worlds can roughly map continents and oceans at 10 pc. The Atlantic Ocean is clearly visible.

New Worlds Mission: simulated image

Inclination=0°



Inclination=60°

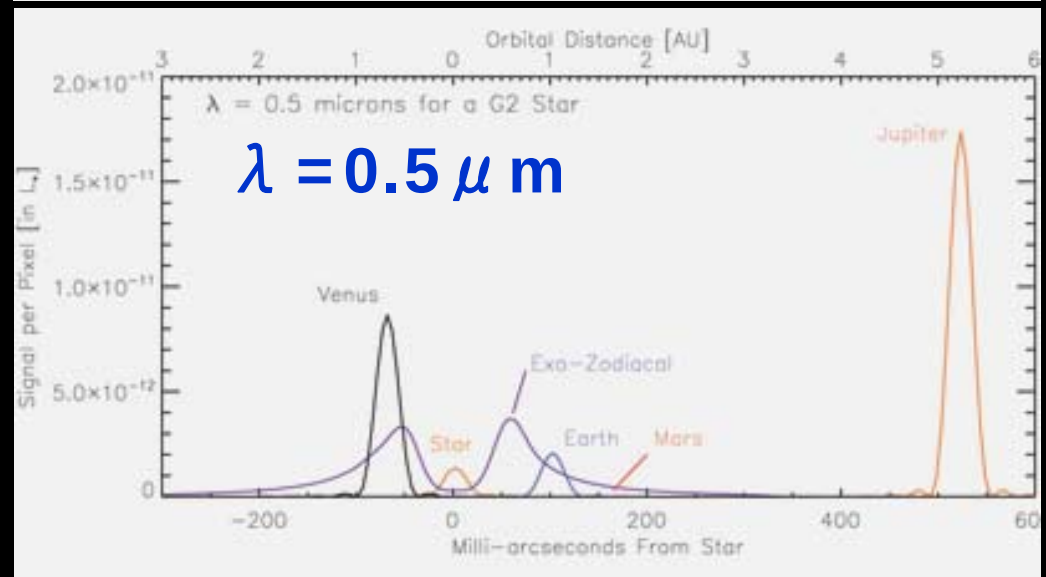
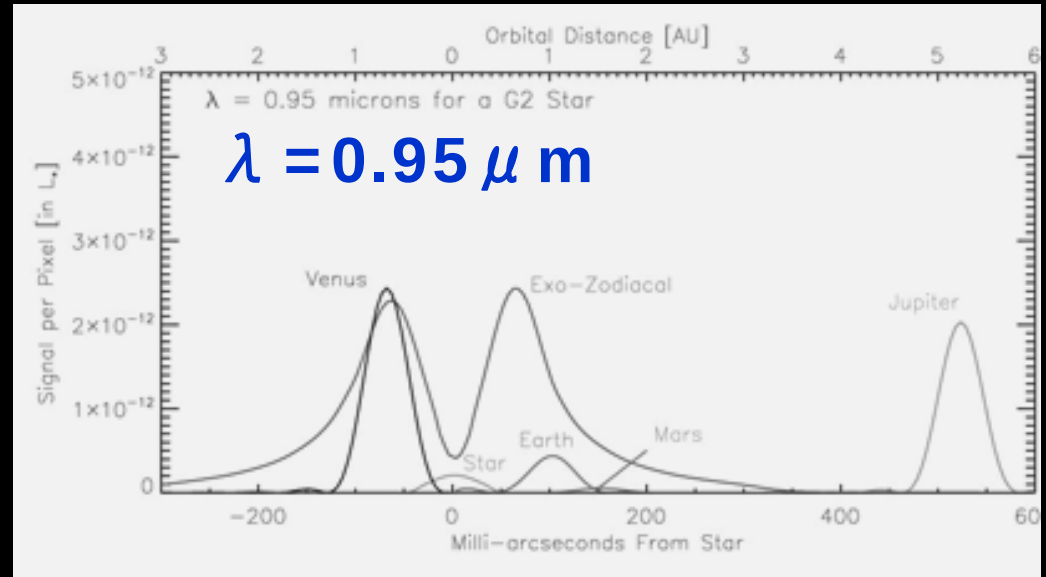


- the inner solar system taken at 10pc with a 4-meter telescope

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

New Worlds Mission: contrast slice

- easier to detect Earth at 0.5 microns (for a G2 star) than at 0.95 microns
 - Earth is harder to see at 0.95 microns because PSF is more spread out at longer wavelengths.



第2の地球の色から、海、陸、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. (2009) submitted to ApJ, arXiv:0911.5621

A pale blue dot

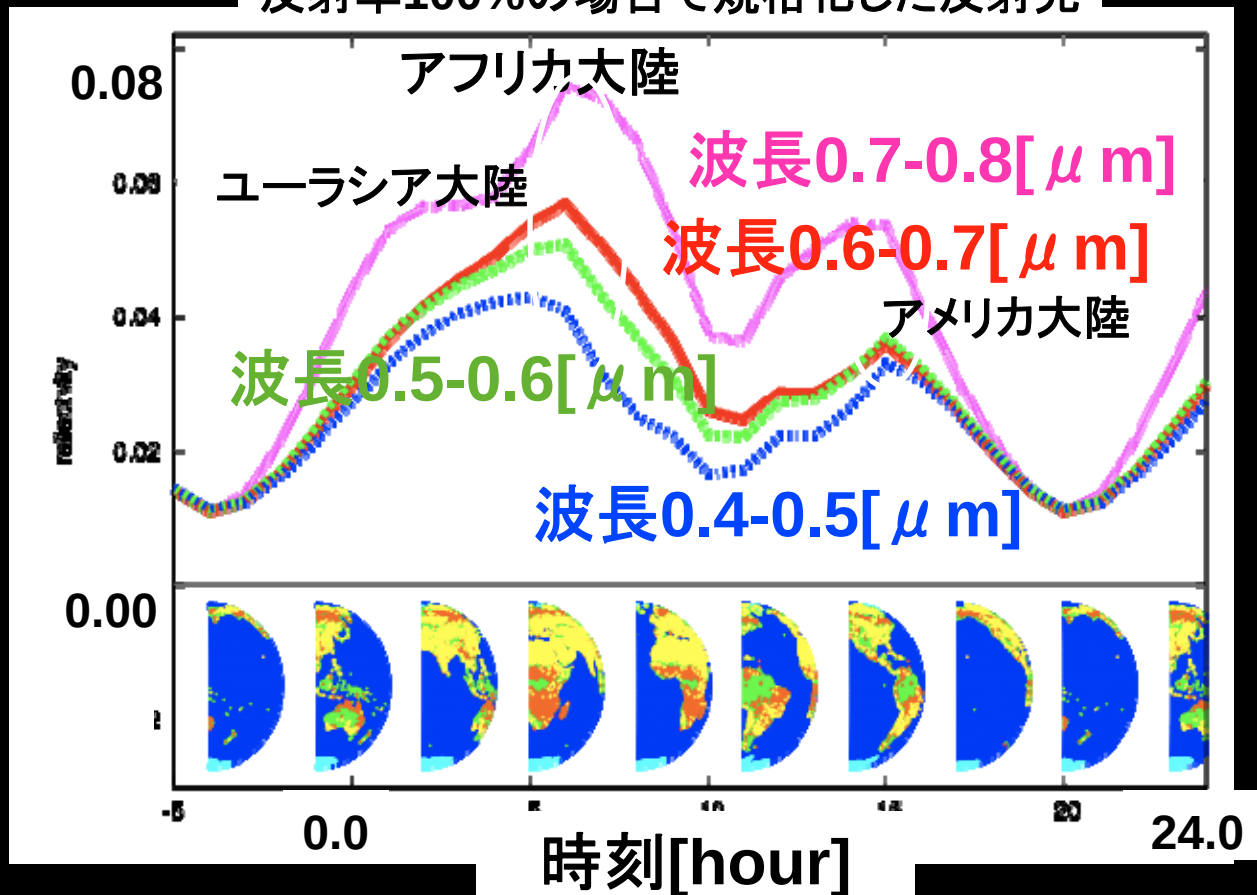


自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 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

地球は青かった？

反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2009)

第二の地球の色：反射光計算の概略

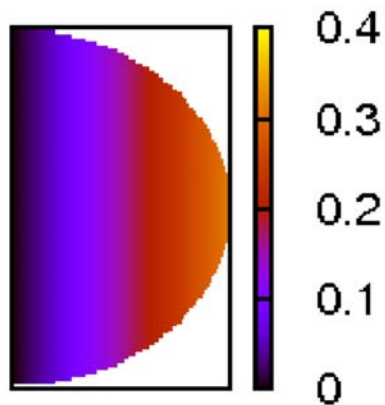
- 地球観測衛星TerraのMODIS検出器の実際のデータを利用して5バンドの模擬光度曲線を作成
 - 陸地： $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ のピクセル毎に決められた反射特性のパラメータ (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) を用いて足し合わせる
 - 海： MODISデータにない海に対してはNakajima & Tanaka (1983)のBRDFモデルを用いて計算
 - 大気の効果としてレイリー散乱の1次までを考慮
 - 24時間周期で自転させる

第二の地球の色：表面積の推定

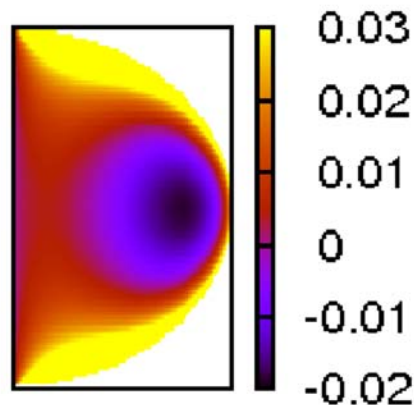
- 得られた5バンドの模擬光度曲線を、等方散乱を仮定した4成分(海、土、植物、氷)だけでフィットして、それらの表面積の割合を推定する
 - 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測(各位相で1時間露出×7回)
 - 中心星の光がブロックされた理想的観測
 - 光子のポワソンノイズだけを考慮
 - 1週間の観測期間での公転の効果は無視
 - 1時間露出中の自転の効果も無視
 - 雲の存在も無視

BRDFの反射特性

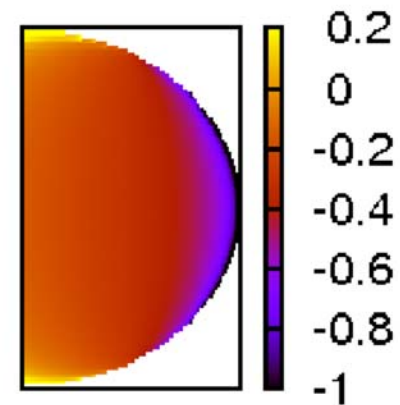
isotropic



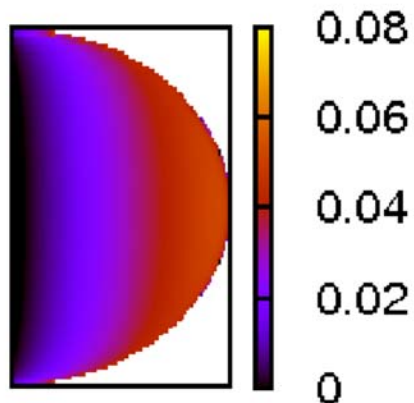
volume



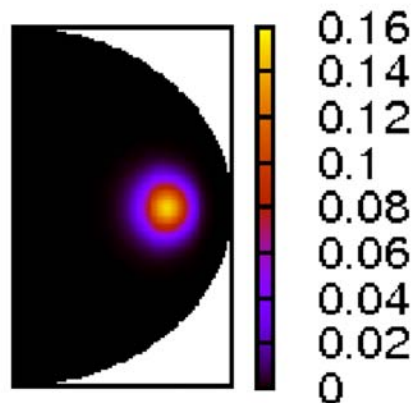
geometric



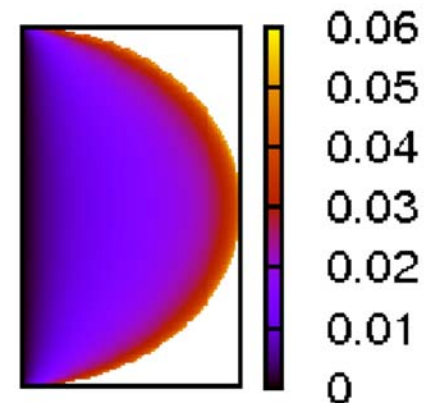
Rossi-Li



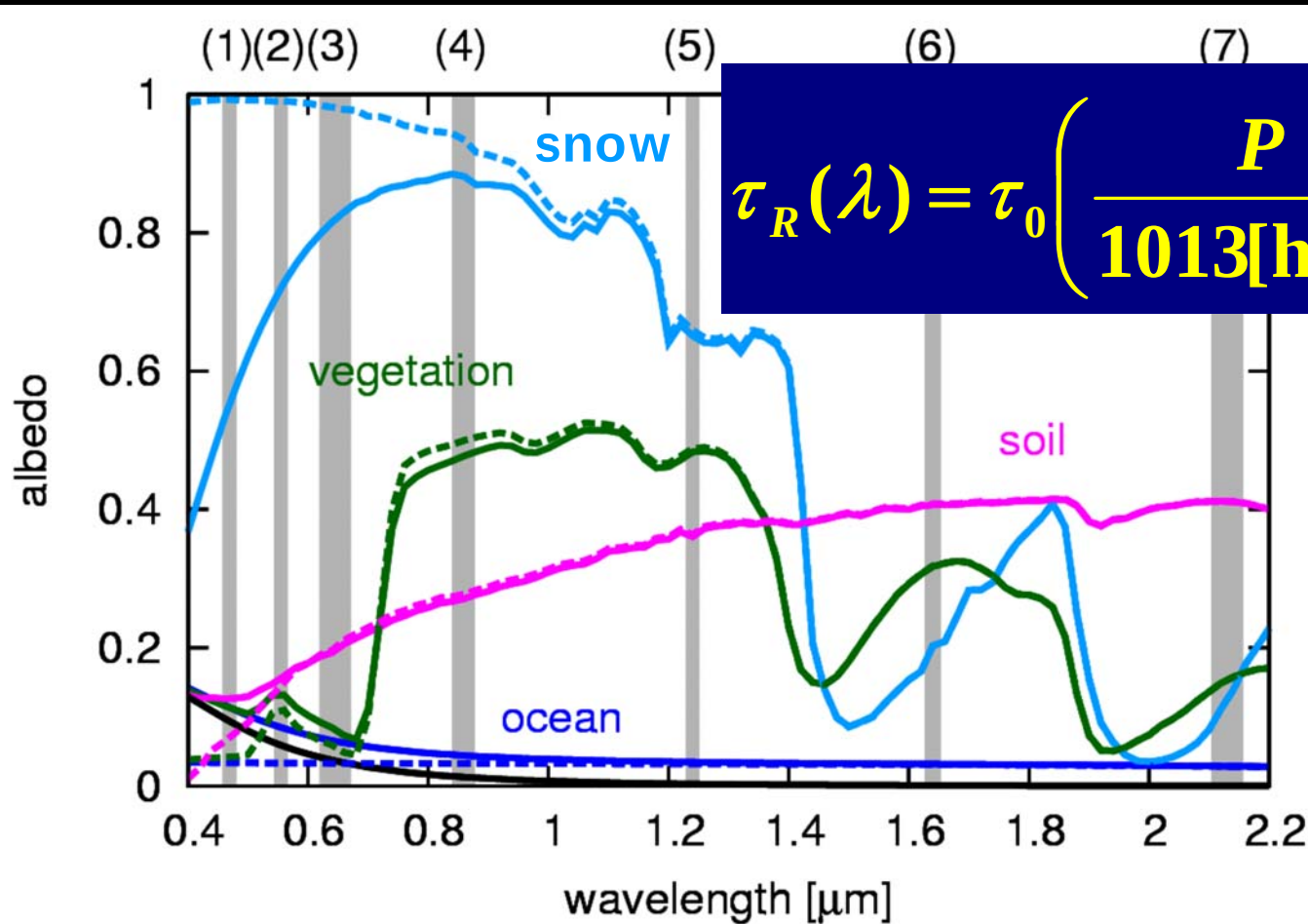
ocean



Rayleigh(SS)

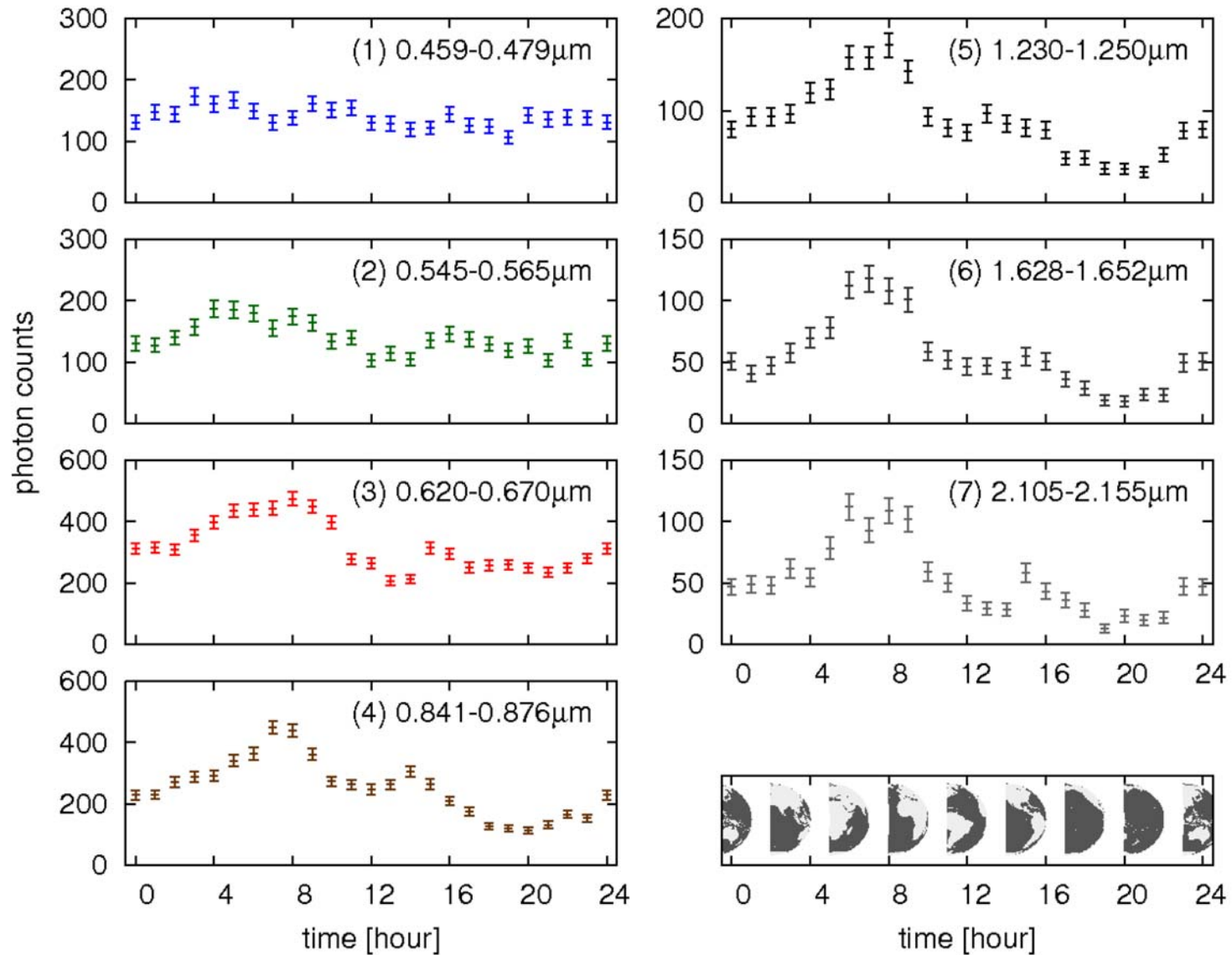


4成分の反射率と大気の効果

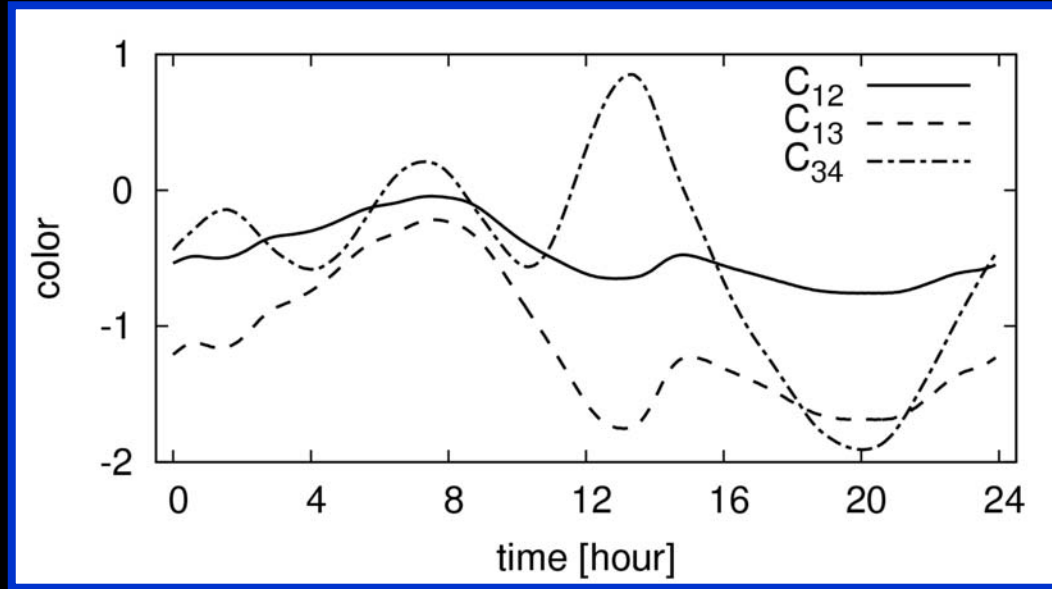


- 空の青、海のをあをにも染まずただよふ
- 大気によるアルベドの波長依存性が重要

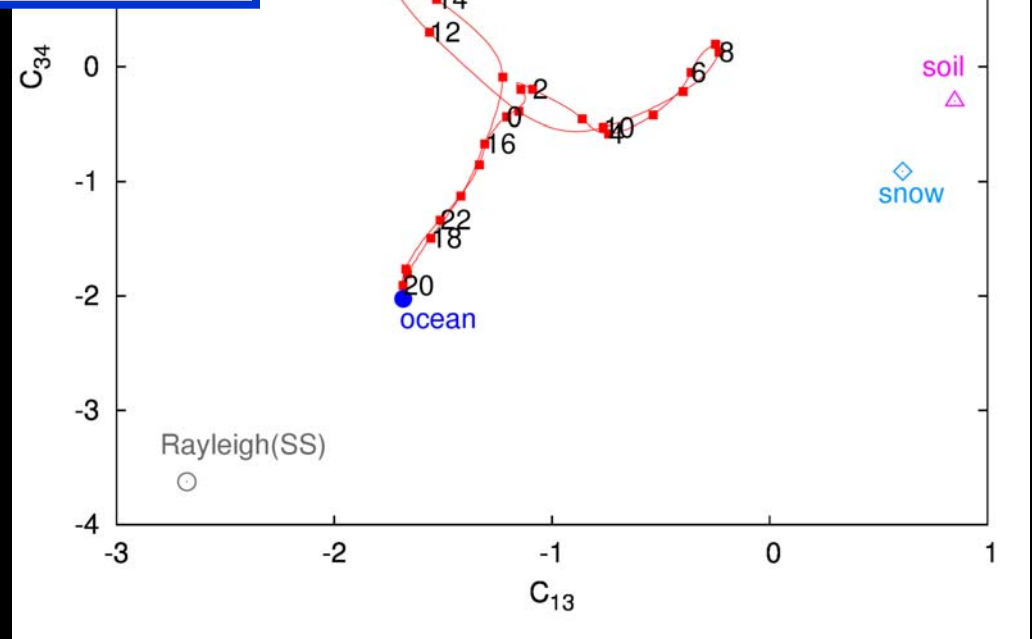
模擬光度曲線



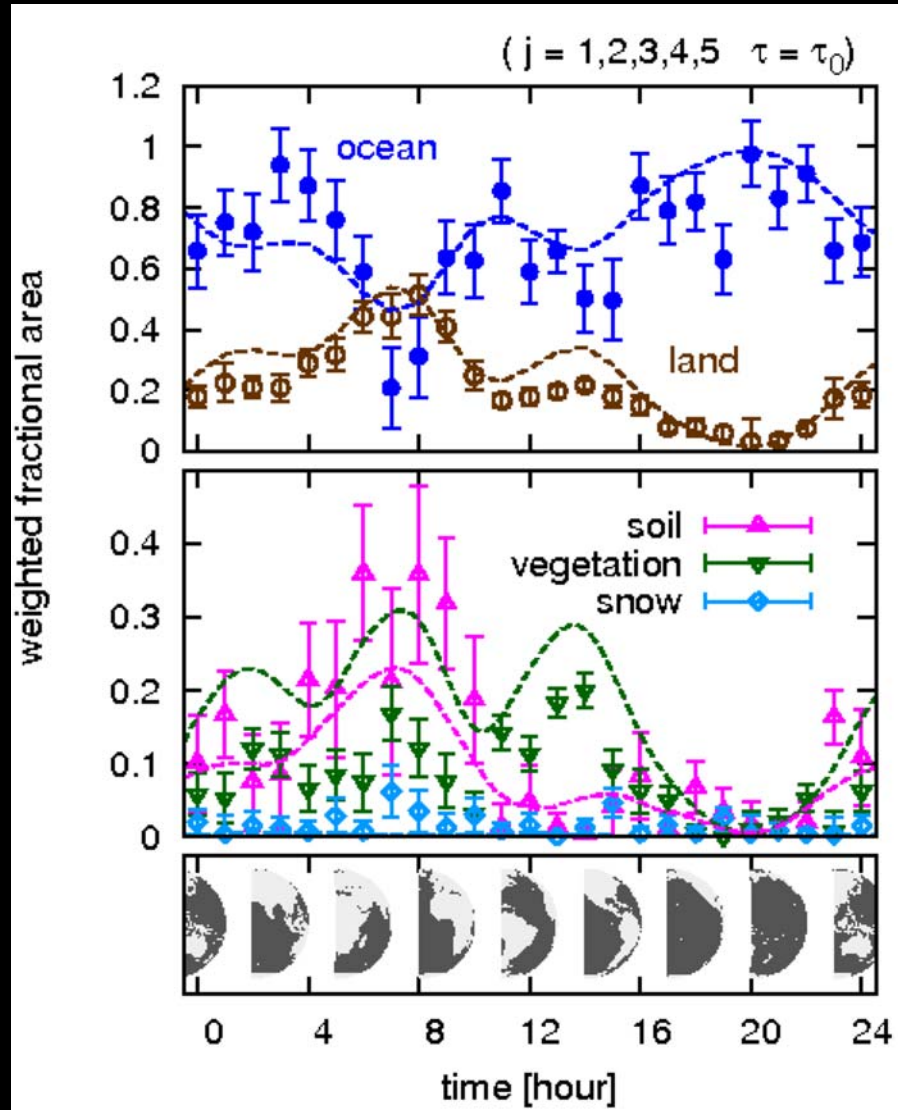
自転に伴う色の変化



$$C_{ij} = -2.5 \log(f_i/f_j)$$



第2の地球の色から表面積を推定

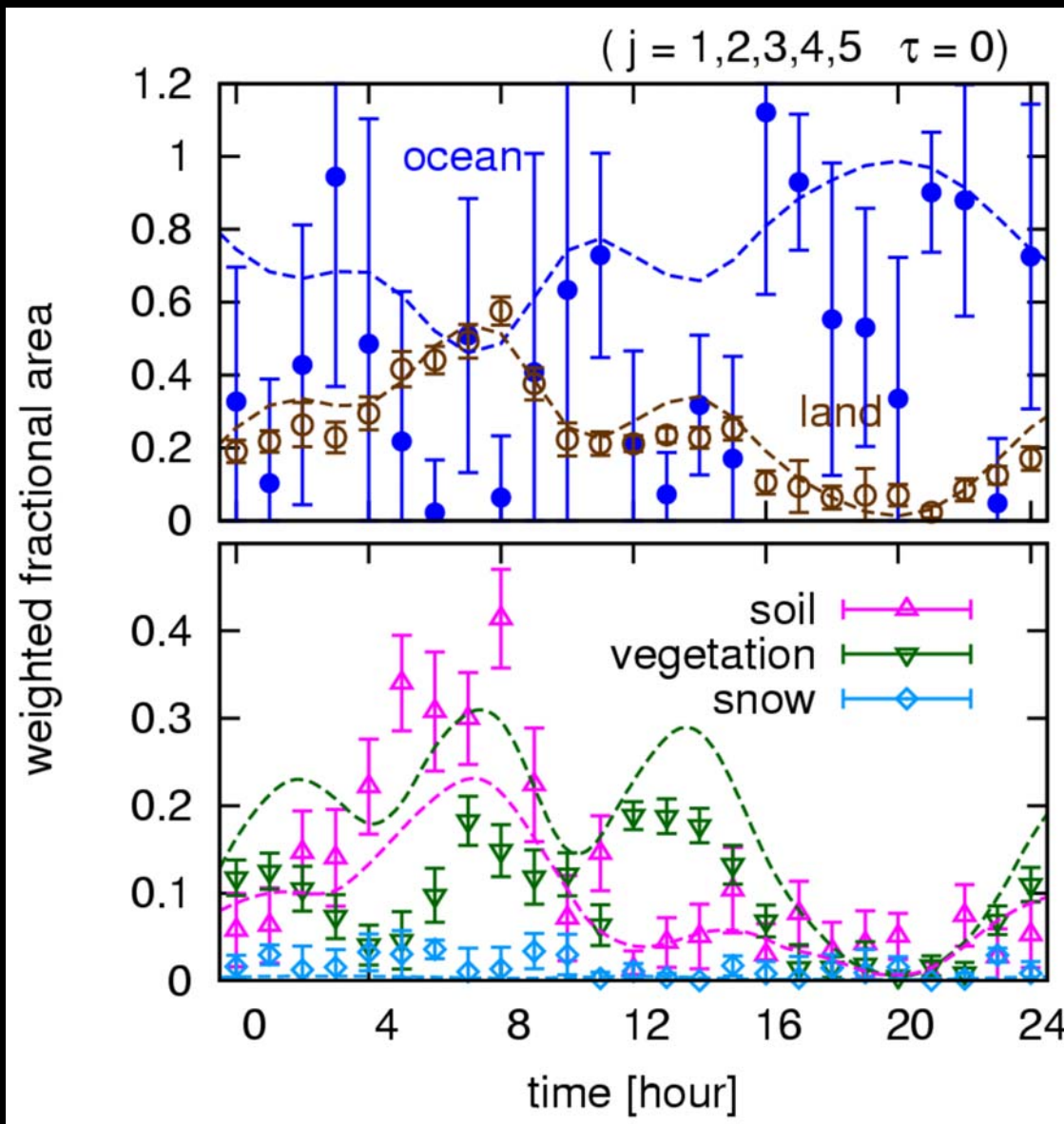


Fujii et al. (2009)

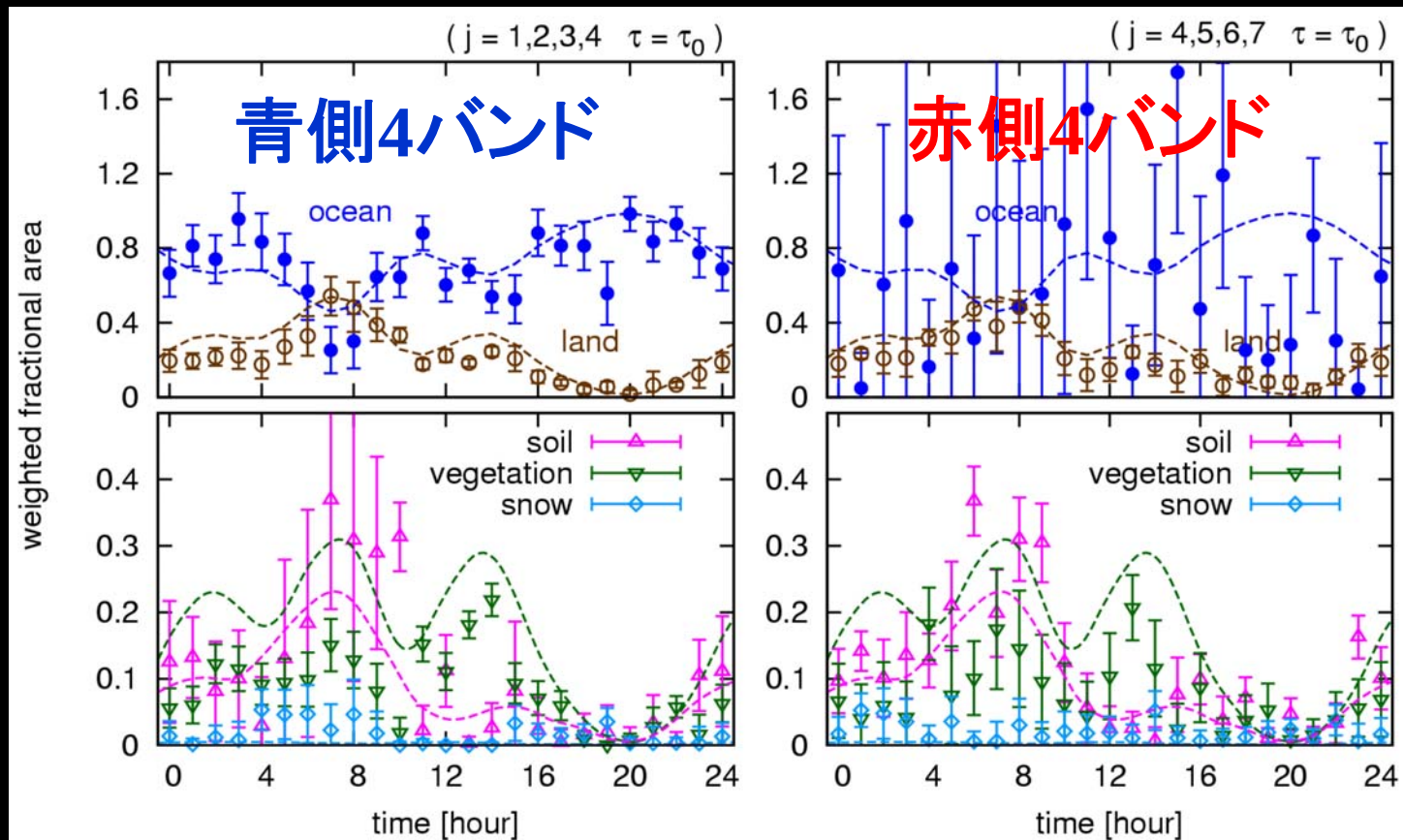
- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 光子のポワソンノイズだけを考慮(雲を無視)
- レイリー散乱の一次近似
 - 我が地球、悲しからずや空の青、海のをあににも染まずただよふ
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 結構イケテル！

海の推定： 大気がないと絶望的

大気なし



バンド選択と大気量の推定

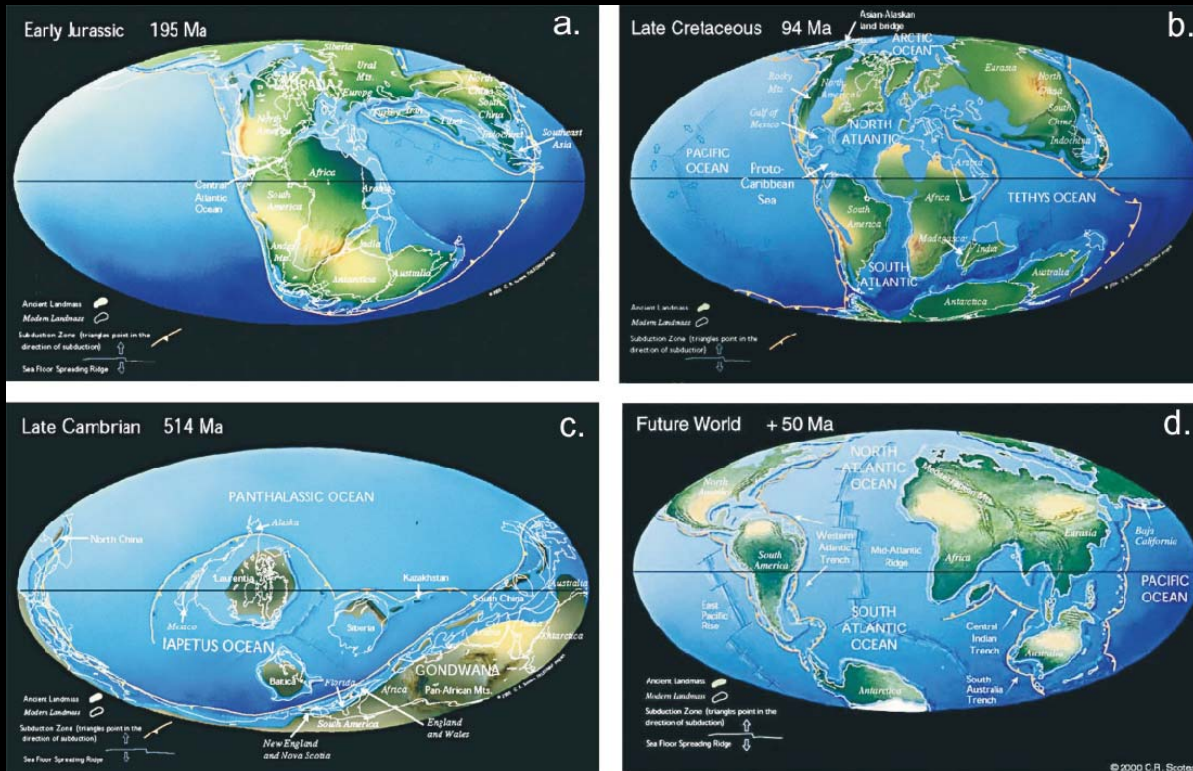


■ A Pale Blue Dot

- 我が地球、悲しからずや空の青、海のをにも染まずただよふ
- 大気のレイリー散乱によるアルベドの波長依存性が重要

異なる地球環境下での 測光観測シミュレーション

- 系外地球型惑星が、「現在」の地球と全く同じ環境にあるわけではない
- 地球のパラメータを変化させた模擬観測をしたい



例えば、左の
Paleomap project
(Scotese 2002)の
ようなデータを用い
て、過去の地球の
模擬観測を行う

改善・応用すべき問題が山積！

- 雲の効果を取り入れる
- レイリー散乱の高次効果を考慮する
- 大気中の分子の吸収線を取り入れる
- 波長域を赤外まで拡張する
- 実際の地球や太陽系惑星の観測データに適用する
- 季節変動や自転周期の精密解析から自転軸傾斜角を推定する
- 過去の地球のシミュレーションデータを用いる
- 植物のレッドエッジを中心星のスペクトル型およびそこまでの距離に応じて変化させる

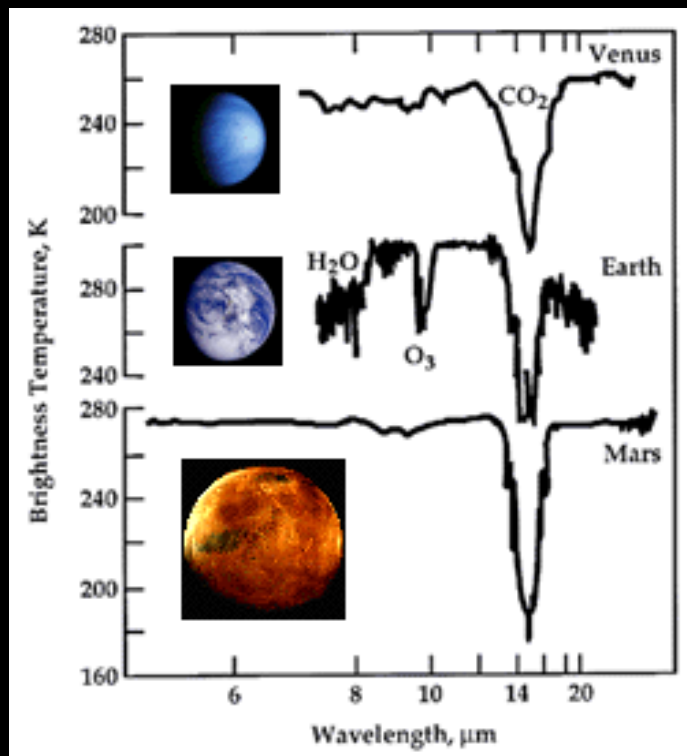
アイザック・アシモフ著 「夜来る」



イラスト：羽馬有紗

- 2000年に一度しか夜が来ない“地球”の人たち
- 自分たちの“地球”と宇宙との関係は？

太陽系外惑星から宇宙生物学へ



- 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、核爆発、植物、、、
- 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

今まで知らなかった世界をやがて発見できるのだろうか？
「やはり我々は何も知らなかった」とつぶやく日を夢見る

