



How to make a world map of a second Earth

河原 創 (首都大学東京)

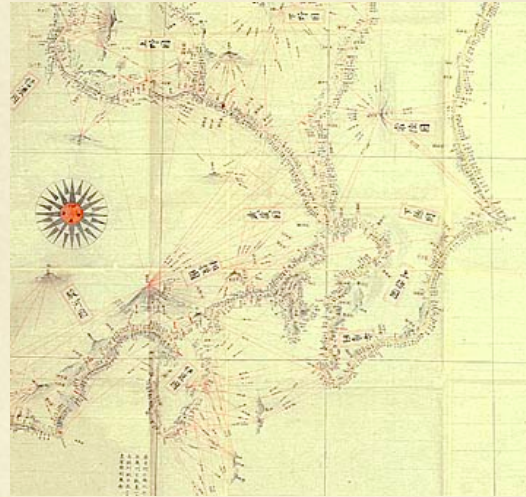
Kawahara and Fujii (2010) ApJ 720, 1333

Stellar world mapsの作成法

地球の場合



航海：Fra Mauro Map (1459)



徒歩：伊能忠敬 (1800's)

伊能図の測定精度と高知

伊能図略歴:

1800 - (56歳) 測量開始

1808 - 第6次測量 東海道-大阪-鳴門-高知-松山-高松-淡路島-大阪-吉野-伊勢-東海道

1818 - 没

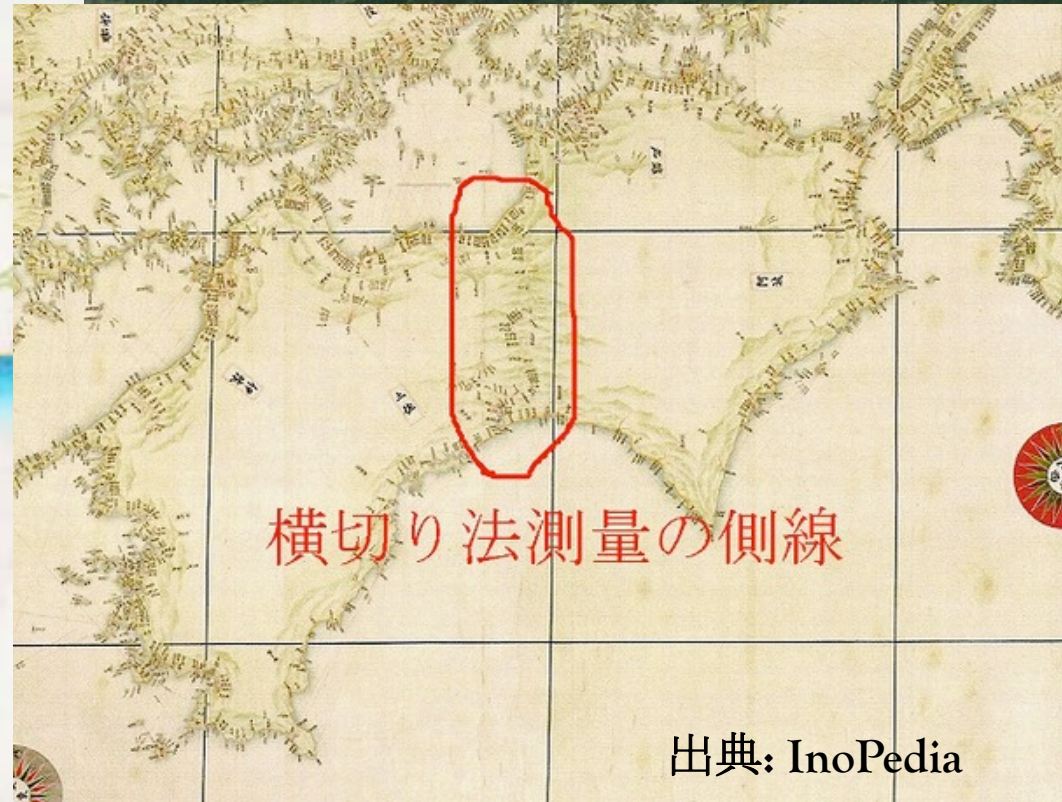
1821 - **大日本沿海輿地全図**完成 (伊能図)

1873 - 皇居火災のため消失

2001 - アメリカ議会図書館で207枚の写本発見



伊能図の測定精度と高知



© 2010 Cnes/Spot Image
Image © 2010 Digital Earth Technology
Image © 2010 DigitalGlobe
Data © 2010 MIRC/JHA

33°29'42.10" N 133°30'48.29" E 標高 0メートル 高度 54.27

高知城下に六泊し、藩主より、
かつお節百本、ちり紙三十束をもらう

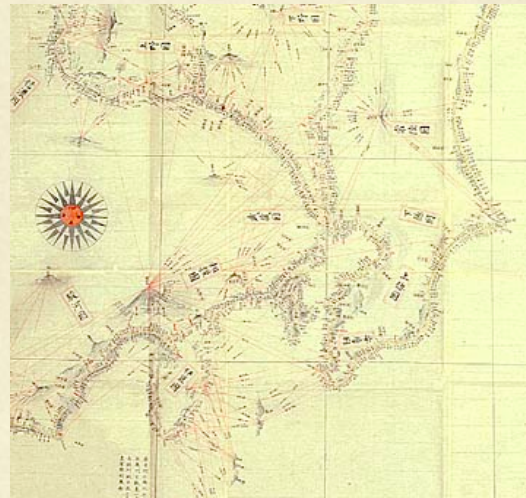


Stellar world mapの作成法

地球の場合

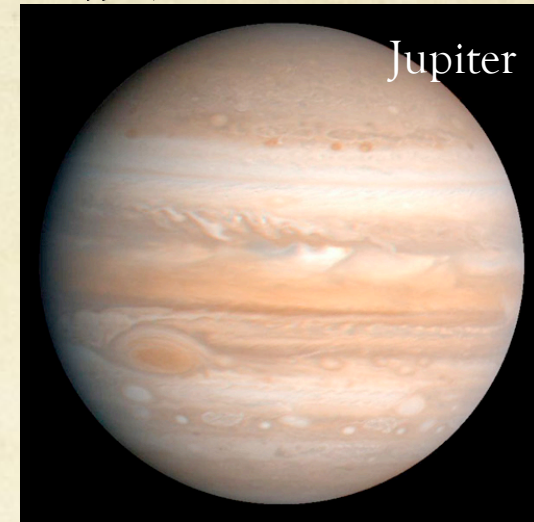


航海：Fra Mauro Map (1459)



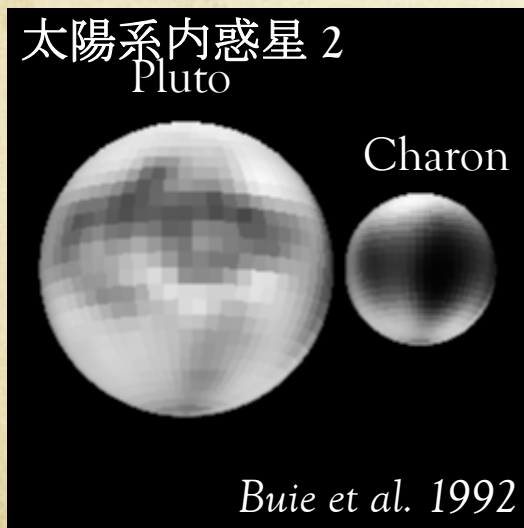
徒歩：伊能忠敬 (1800's)

太陽系内惑星



接近撮影：ボイジャー

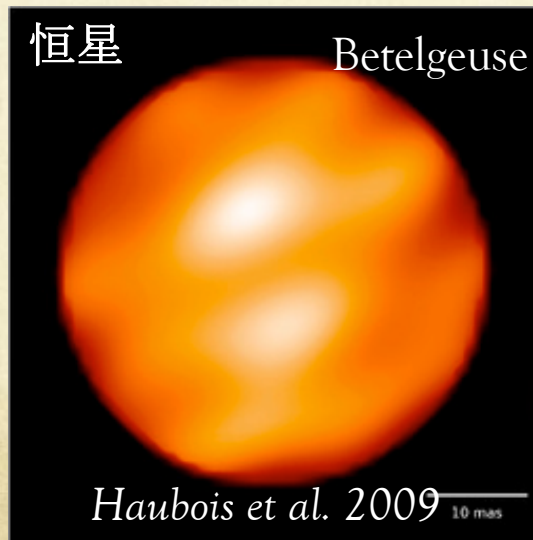
太陽系内惑星 2
Pluto



Buie et al. 1992

衛星の食を利用

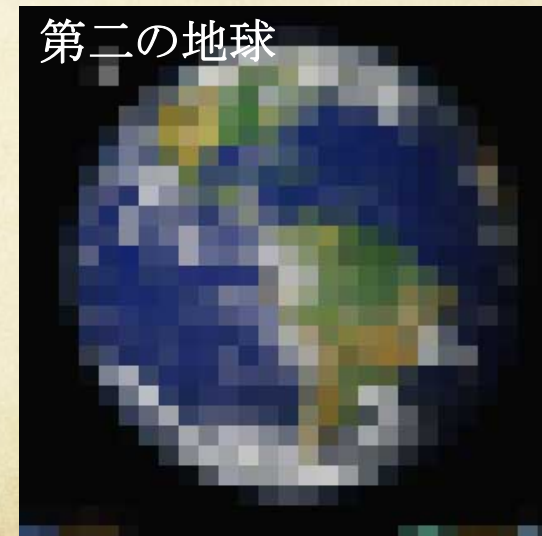
恒星
Betelgeuse



Haubois et al. 2009 10 mas

干渉計：IOTA

第二の地球



How ?

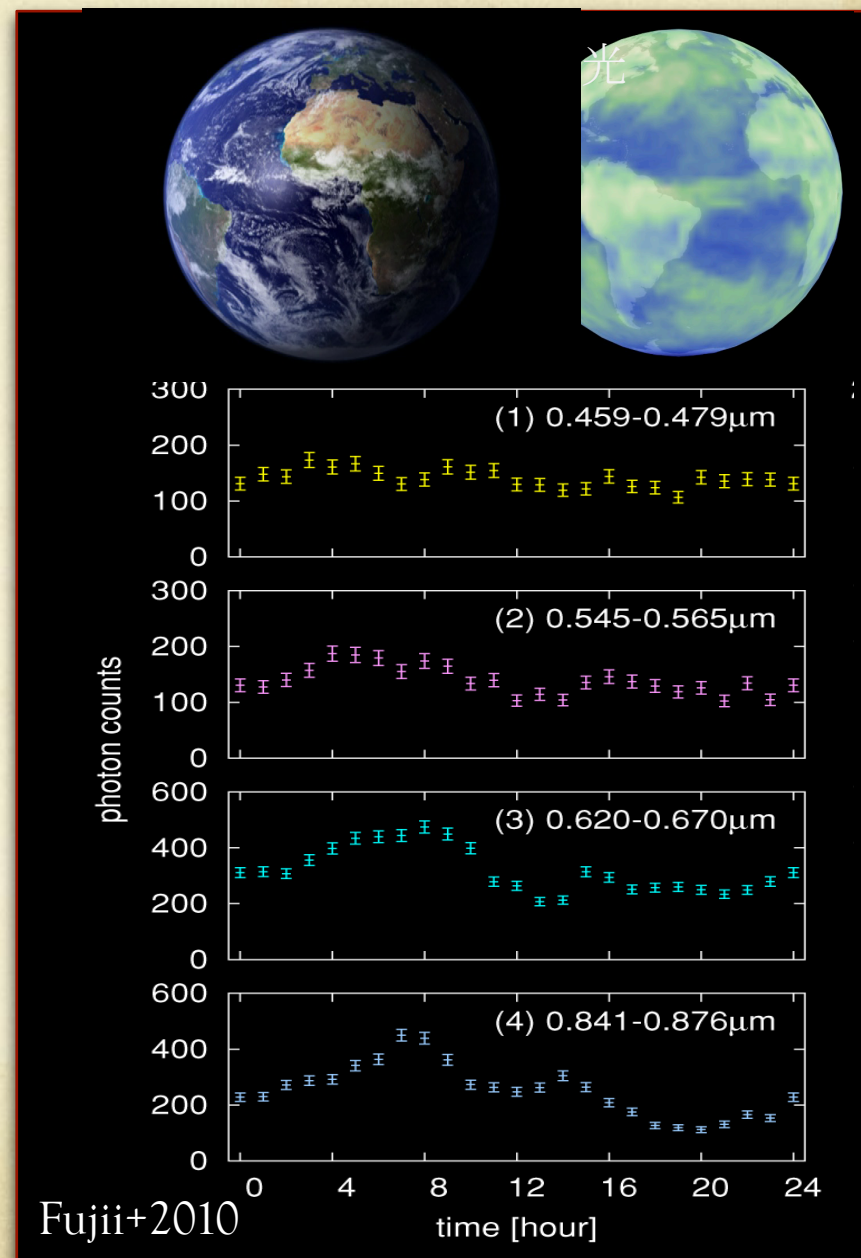
反射光を使って表面を知る

◆ 直接撮像できてやっと点源
($D=5$ pcにおける地球半径 $\sim 10 \mu$ 秒)
→ 表面非一様性は**反射スペクトル**の**時間変化**に現れる (Ford +2001)

◆ 時間ごとに見えている部分の陸とか海の *reflection-weighted* な面積和を求めることは可能

- PCAを利用 (cowan+2010)
- Albedoモデル (Fujii+2010)

反射光を用いて
第二の地球の世界地図
を描くことは可能だろうか?



Here comes the Sun

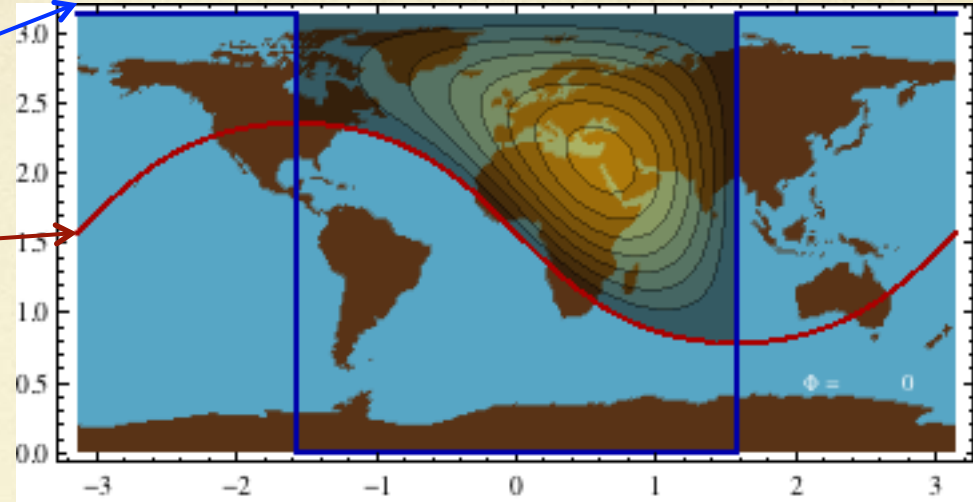
Assumptions :: Face on and spherical orbit, Lambert reflectance

日周変化

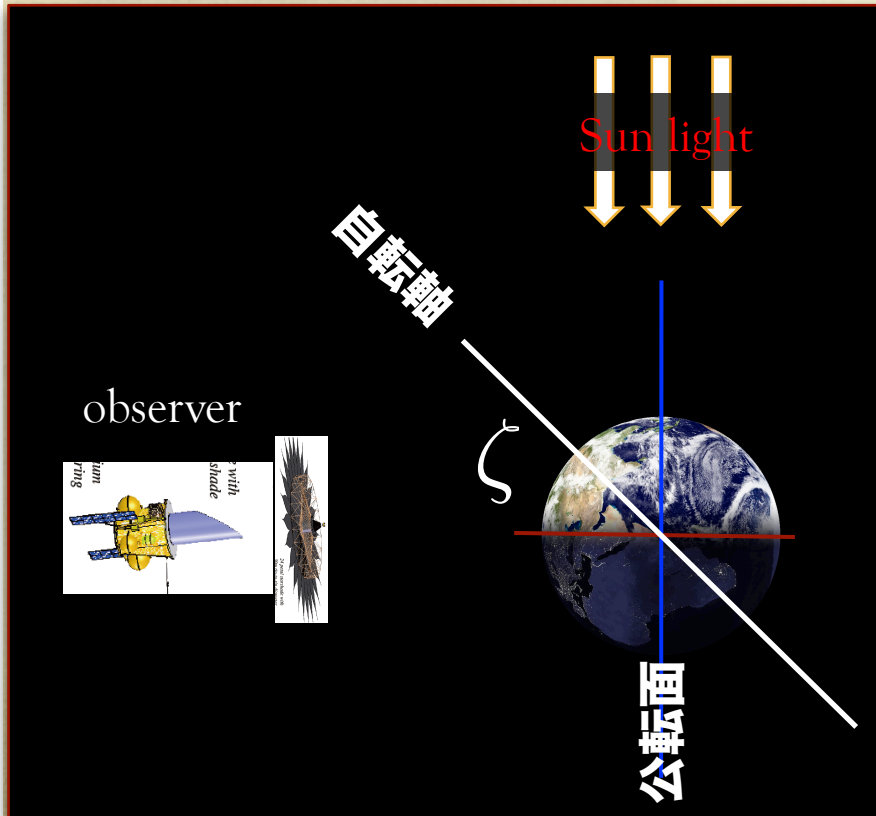
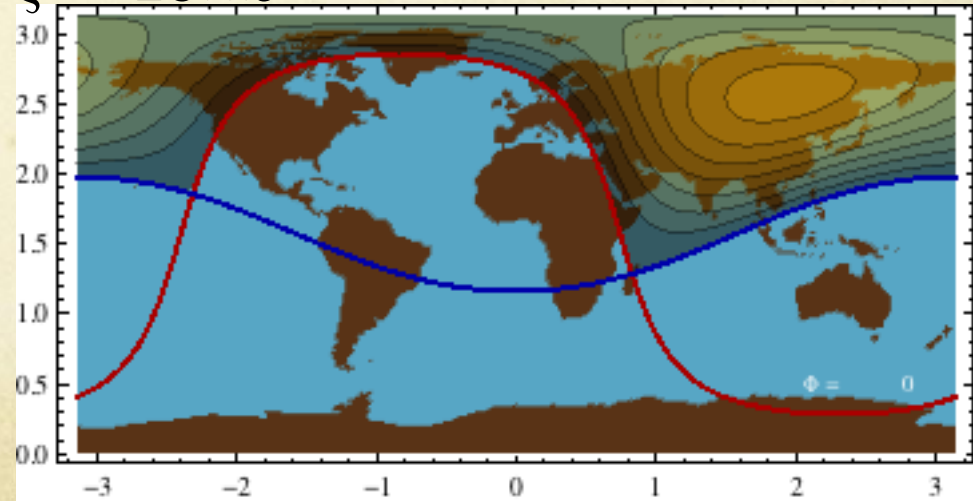
Visible line

Illuminated line

$$\zeta = 90^\circ$$



$$\zeta = 23.45^\circ$$



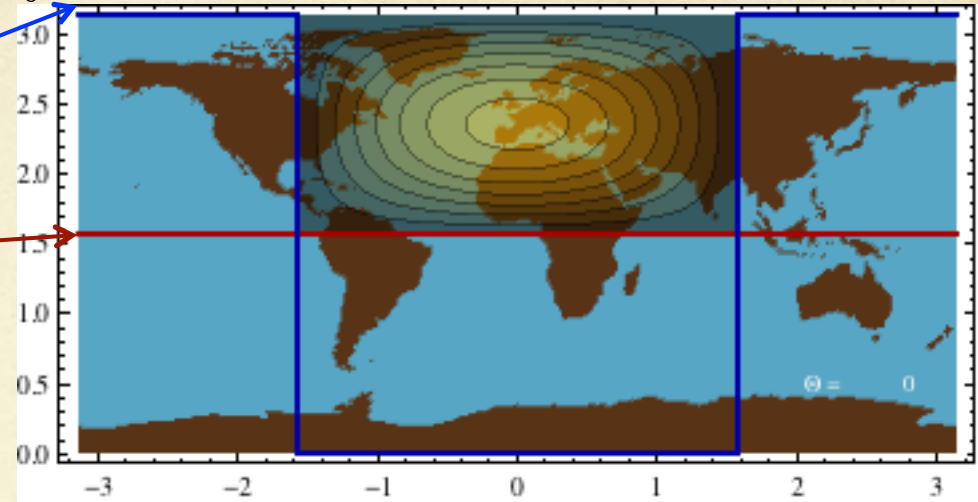
Here comes the Sun

年間変化

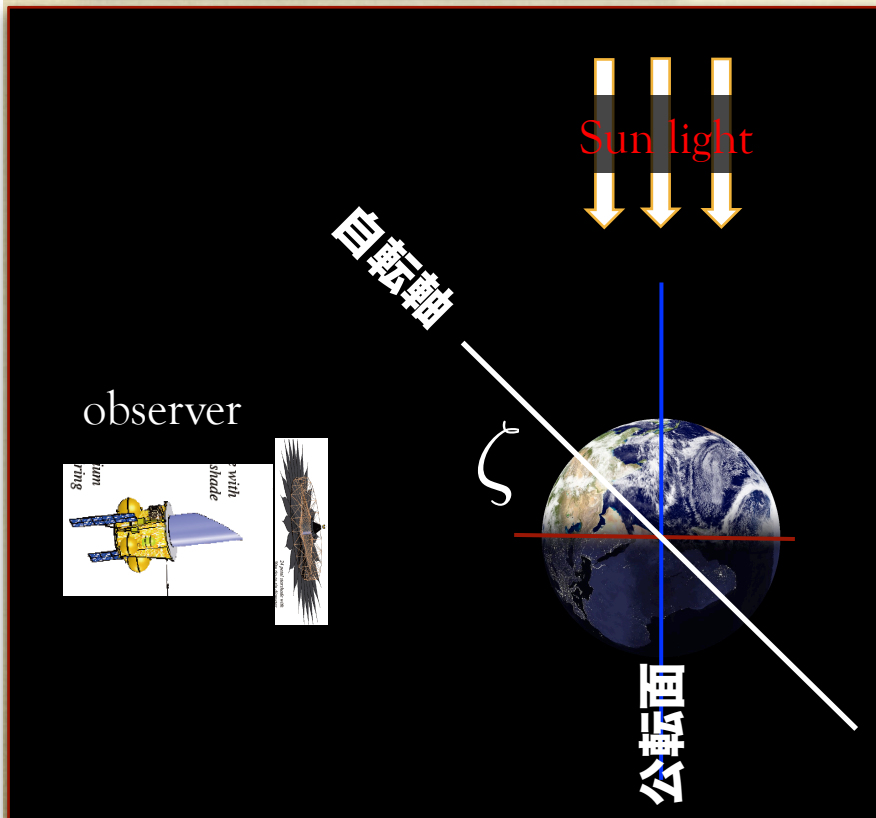
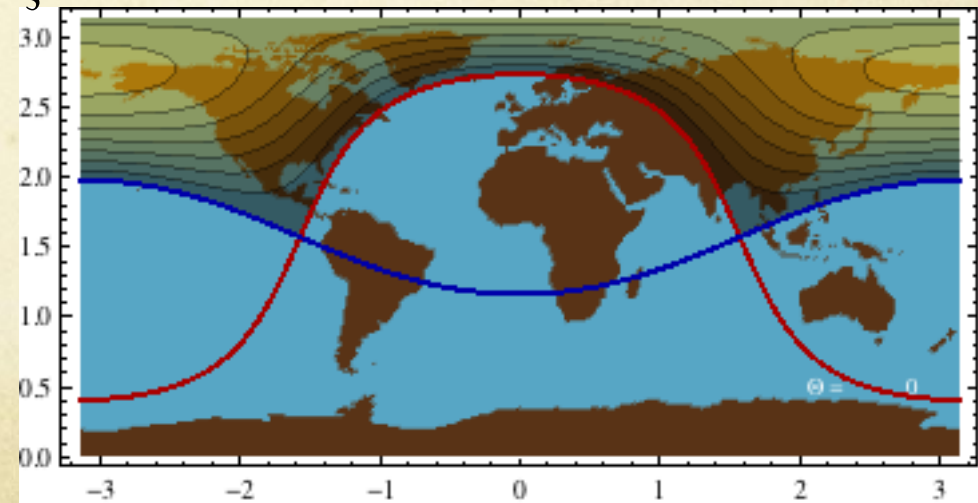
Visible line

Illuminated line

$$\zeta = 90^\circ$$



$$\zeta = 23.45^\circ$$



“反射光トモグラフィー”

陸地のWeighted Area (観測値)

陸地率

$$\begin{aligned} A(\Phi(t_i), \Theta(t_i); \zeta) &= \sum_{j: (s_j \cap S_V) \neq \emptyset} \int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) m(\phi, \theta) d\Omega \\ &= \sum_{j: (s_j \cap S_V) \neq \emptyset} \langle m \rangle_{ij} \int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) d\Omega, \\ &\approx \sum_j \bar{m}_j \int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) d\Omega \quad \longrightarrow \quad A_i = \sum_j D_{ij} \bar{m}_j \end{aligned}$$

◆ Pixel Average

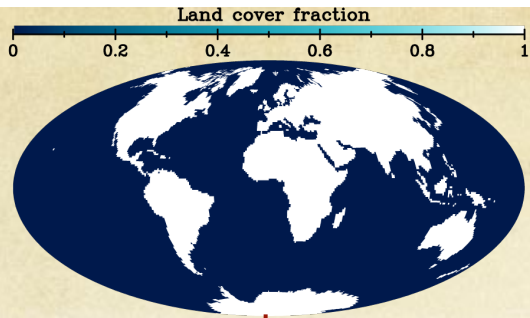
$$\bar{m}_j \equiv \frac{\int_{s_j} m(\phi, \theta) d\Omega}{\int_{s_j} d\Omega}$$

◆ Reflection Weighted Average

$$\langle m \rangle_{ij} \equiv \frac{\int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) m(\phi, \theta) d\Omega}{\int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) d\Omega}.$$



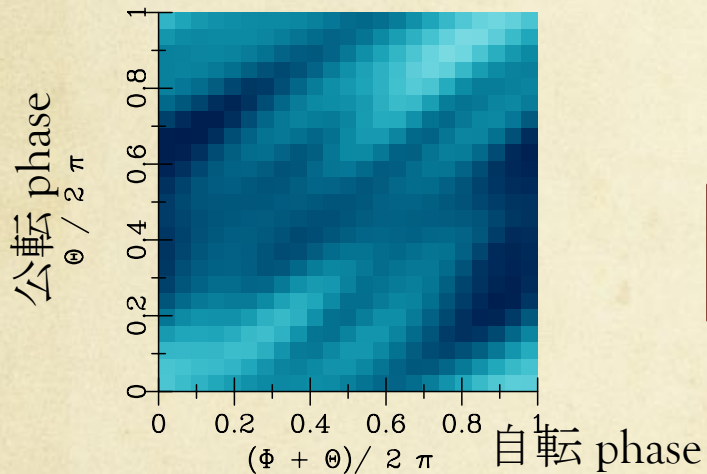
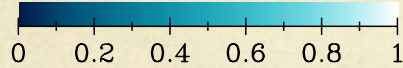
これをmjについて解く →
トモグラフィーの問題 (線形逆問題)



INPUT

Weighted Areaの
日・年周変化を計算

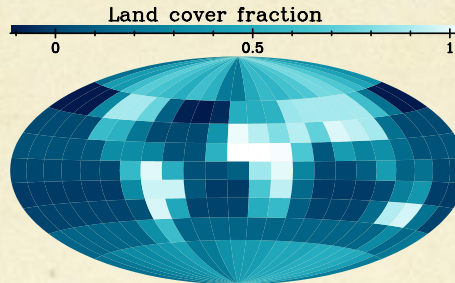
Weighted Area ($\zeta=90.00^\circ$)



ノイズを加える

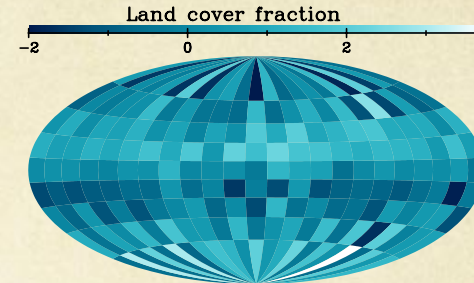
トモグラフィーにより
陸地分布をInversion

○NGIM with average \rightarrow 極めてエラーに弱い \rightarrow 使い物にならない



Solution using NGIM : $\sigma=0.0\%$

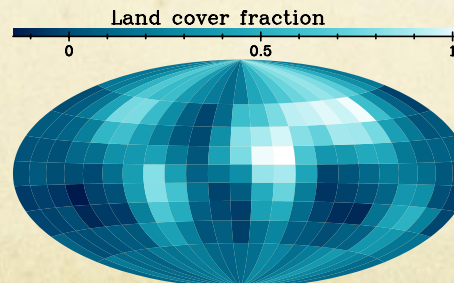
I=Pixel average: 0 %



Solution using NGIM : $\sigma=1.0\%$

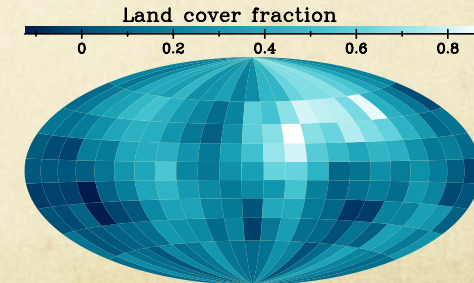
I=Pixel average : 1 %

○Dumping GIM with average - よくなるけど、いまいち... しかも恣意的



Dumping GIM : $\sigma=1.0\%$ $\epsilon=0.2$

I=Input : 1 %



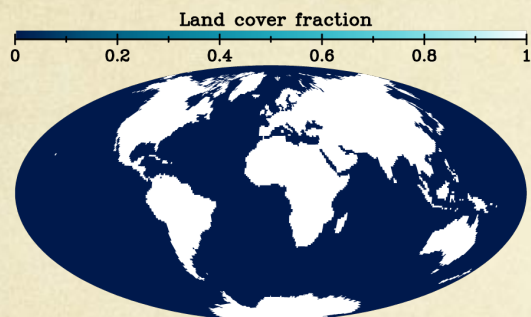
Dumping GIM : $\sigma=10.0\%$ $\epsilon=0.5$

I=Input : 10 %

Bounded Variable Least Square

$$0 \leq m_j \leq 1$$

Lawson & Hanson 1974 & 1995



INPUT

Weighted Areaの
日・年周変化を計算

0,1,10,30%ノイズ
を加える

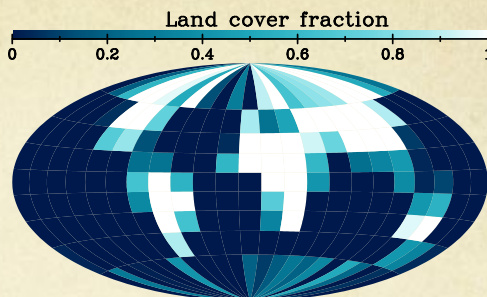
BVLSにより陸地
分布をInversion

ノイズ

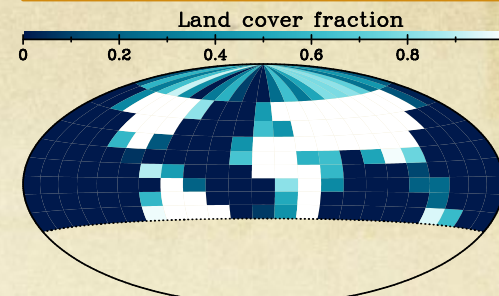
Obliquity 90度

Obliquity 23.45度

0%

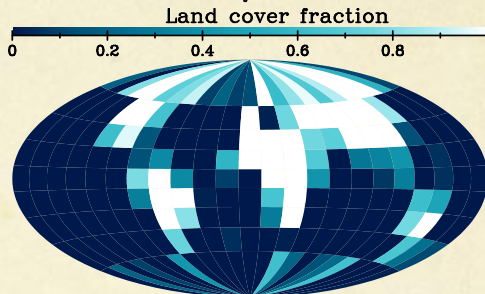


RECOVERED MAP : $\zeta=90.00^\circ$, $\sigma=0.0\%$

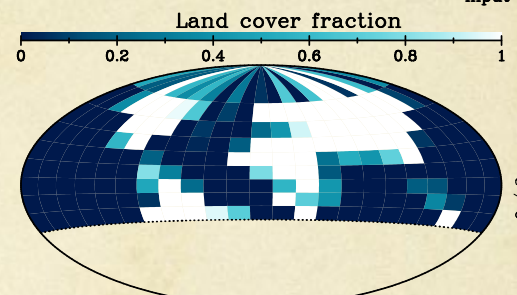


RECOVERED MAP : $\zeta=23.45^\circ$, $\sigma=0.00\langle A_{input} \rangle$

1%

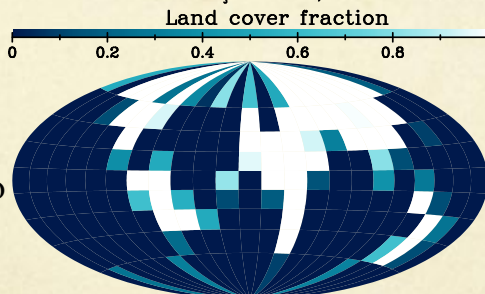


RECOVERED MAP : $\zeta=90.00^\circ$, $\sigma=1.0\%$

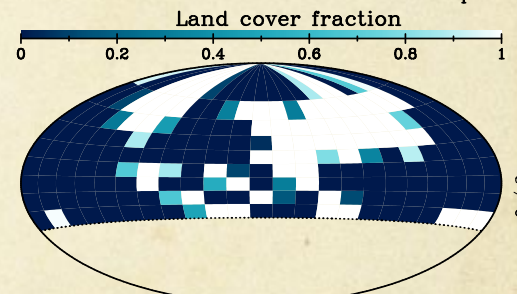


RECOVERED MAP : $\zeta=23.45^\circ$, $\sigma=0.01\langle A_{input} \rangle$

10%

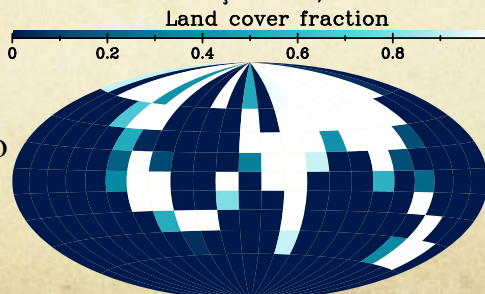


RECOVERED MAP : $\zeta=90.00^\circ$, $\sigma=10.0\%$

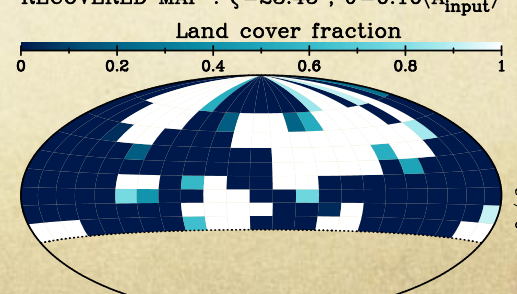


RECOVERED MAP : $\zeta=23.45^\circ$, $\sigma=0.10\langle A_{input} \rangle$

30%



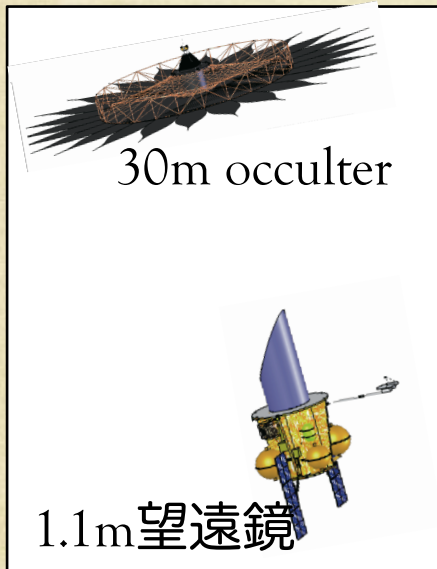
RECOVERED MAP : $\zeta=90.00^\circ$, $\sigma=30.0\%$



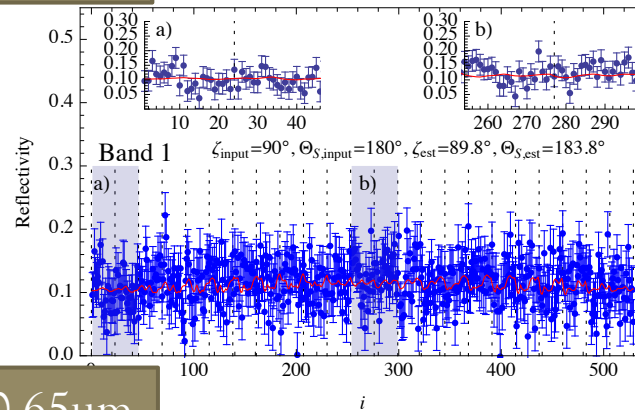
RECOVERED MAP : $\zeta=23.45^\circ$, $\sigma=0.30\langle A_{input} \rangle$

模擬観測

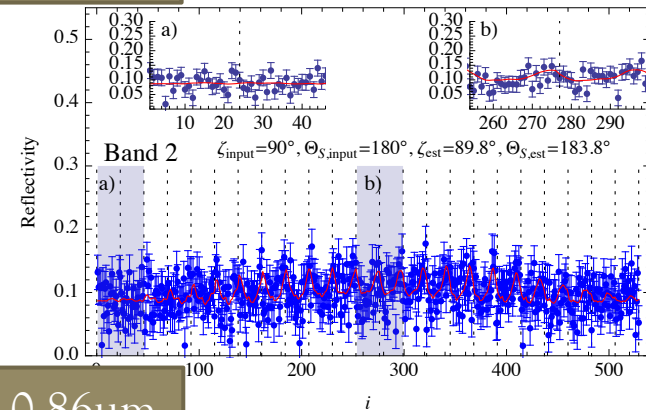
Ozone Occulting Observatory の性能で5 pc先から地球を約一年間観測
 ノイズ: read noise, dark noise, zodi & exozodi noise 雲なし、月なし、



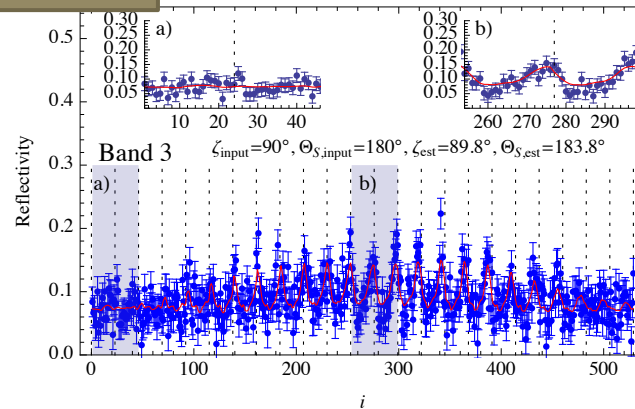
0.47 μ m



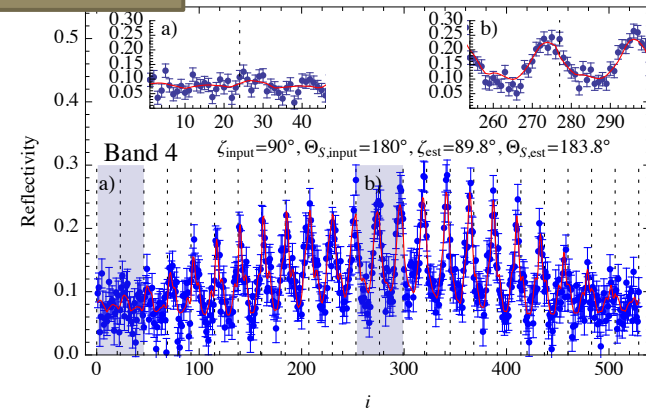
0.56 μ m



0.65 μ m



0.86 μ m



μ m

赤線はBVLSによるPredicted curves

北米

ユーラシア

日本は分解できず

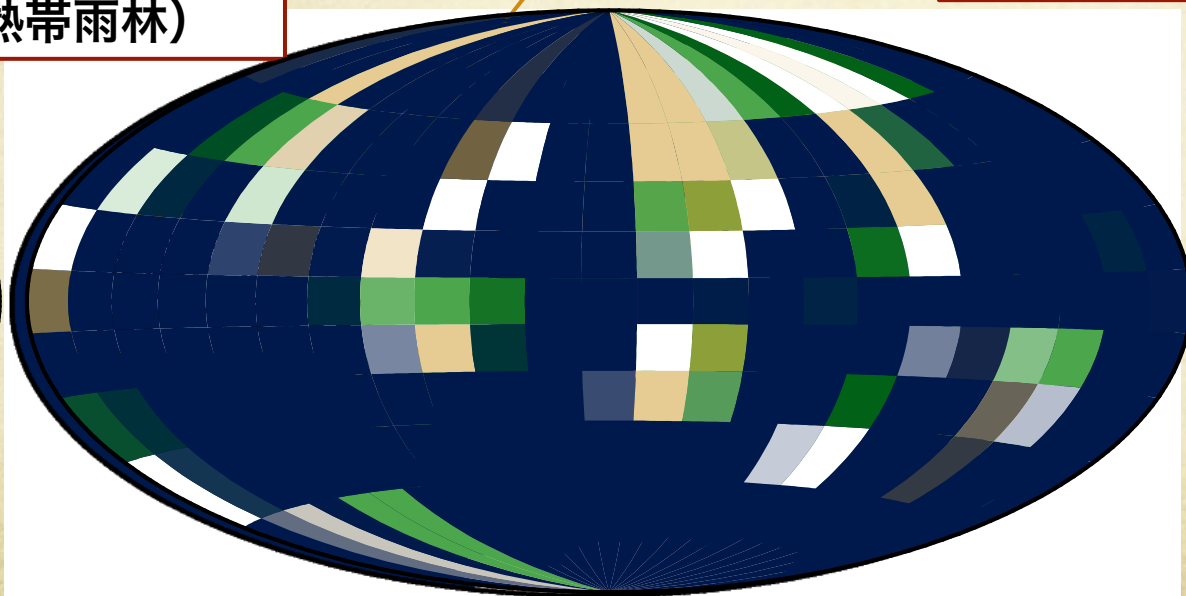
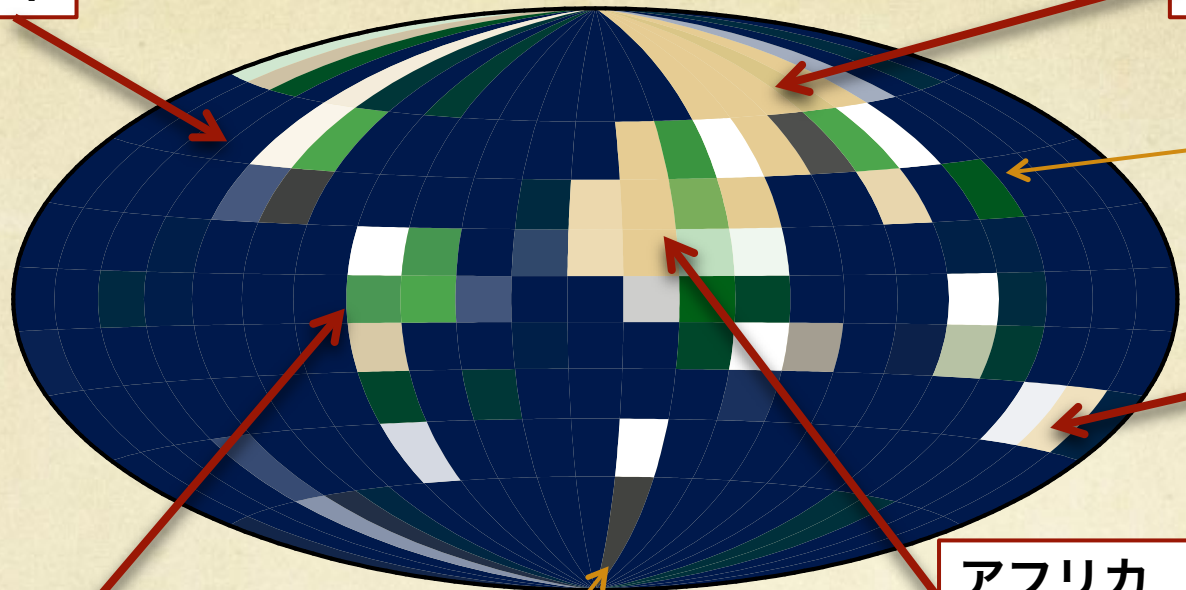
オーストラリア??

ラテンアメリカ
(熱帯雨林)

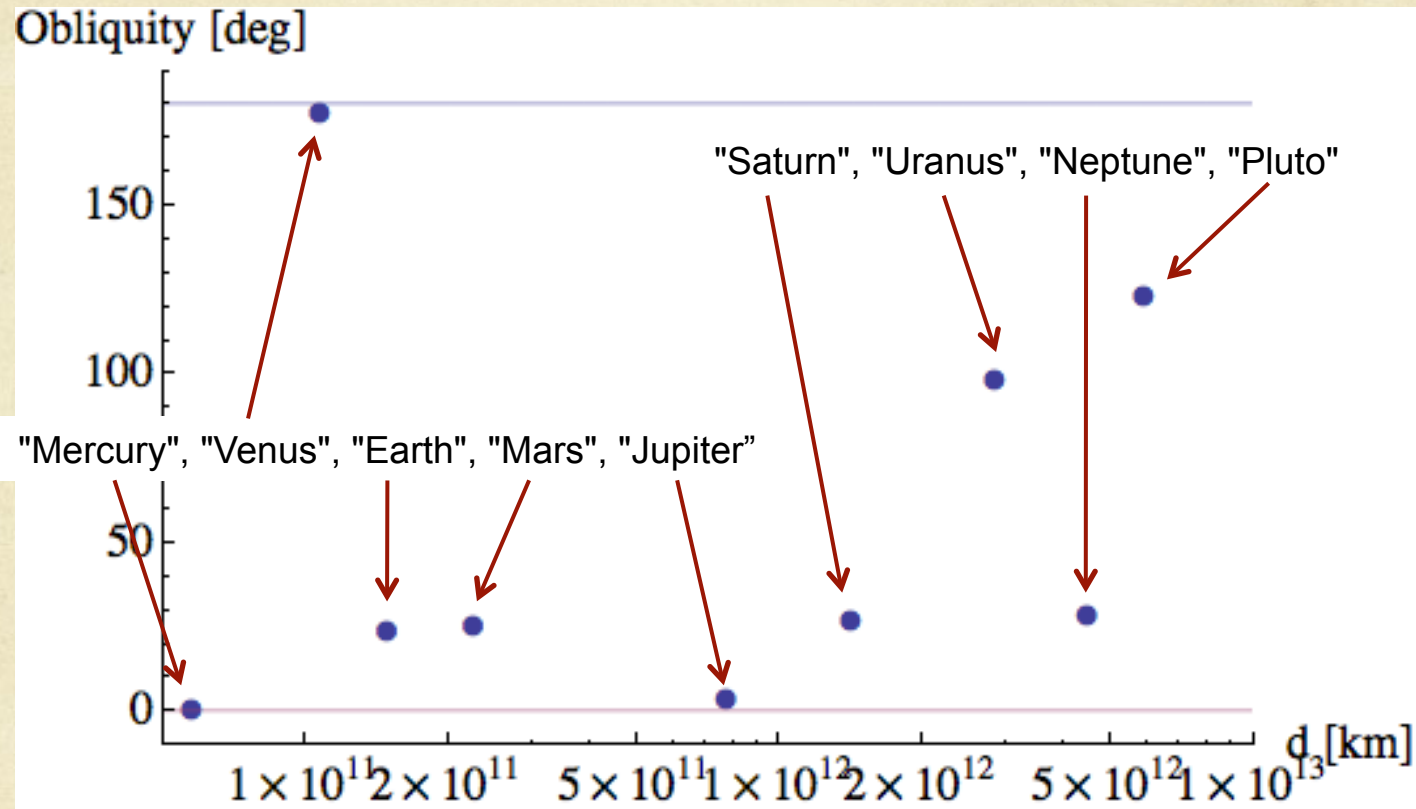
pc), $\zeta=90.00^\circ$, Band 1-

アフリカ
(おもにサハラ砂漠)

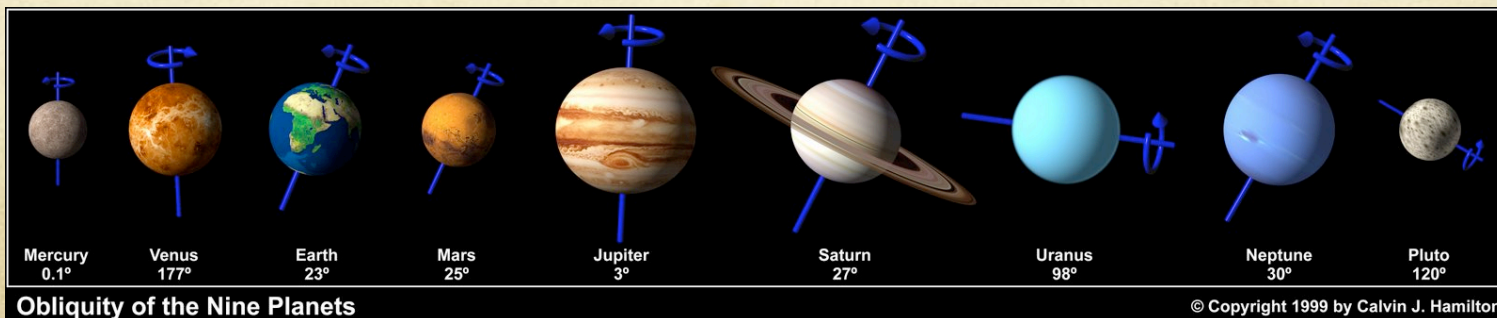
CLASSIFICATION BASED ON GBB and 1-4



Obliquity of our solar system

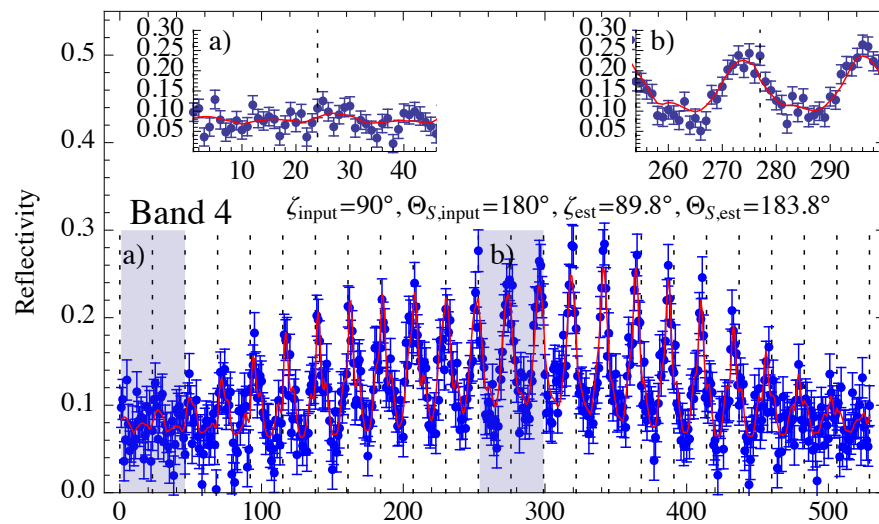


SUN →

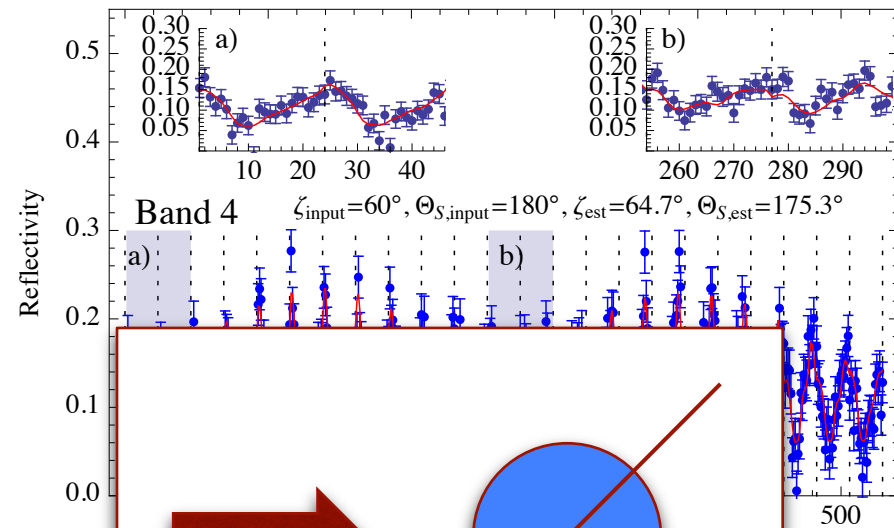


$$\zeta = 90^\circ$$

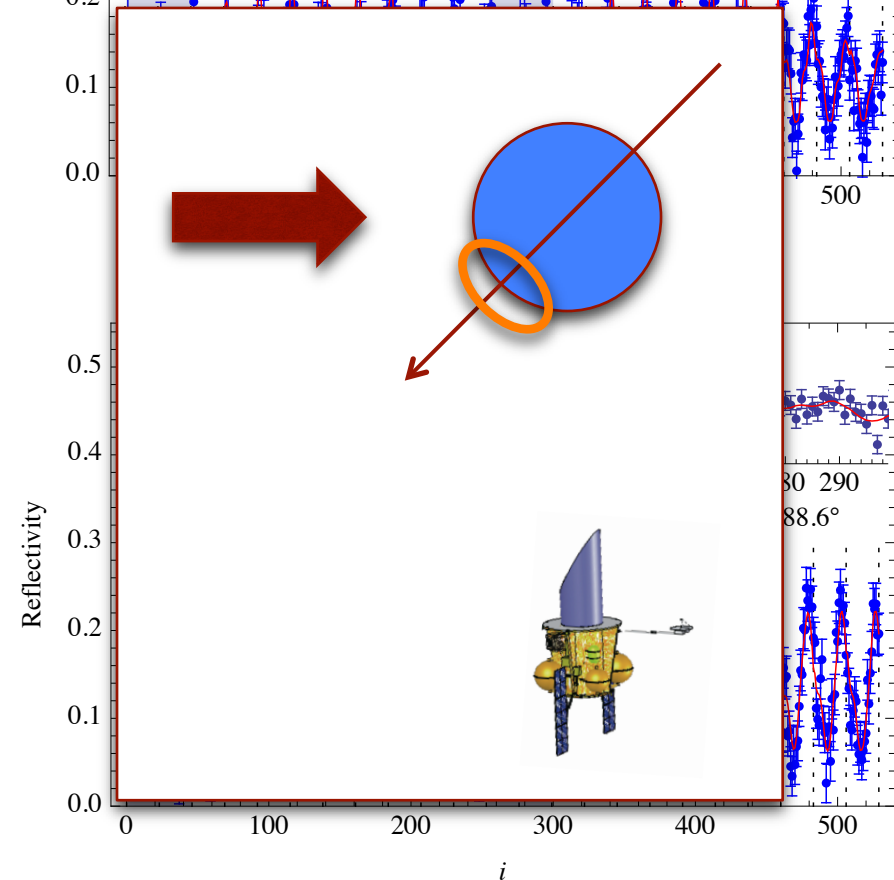
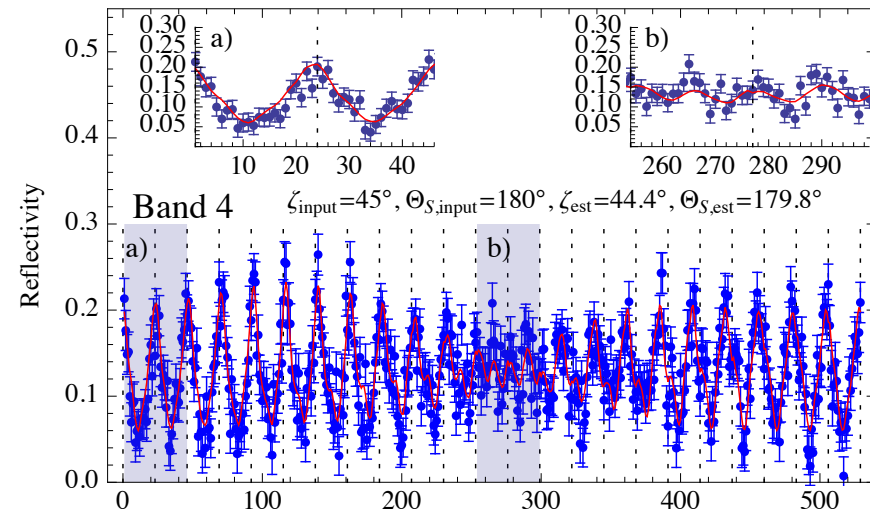
0.86um



$$\zeta = 60^\circ$$



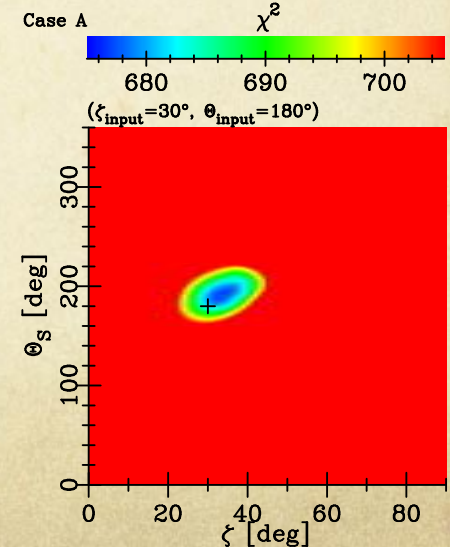
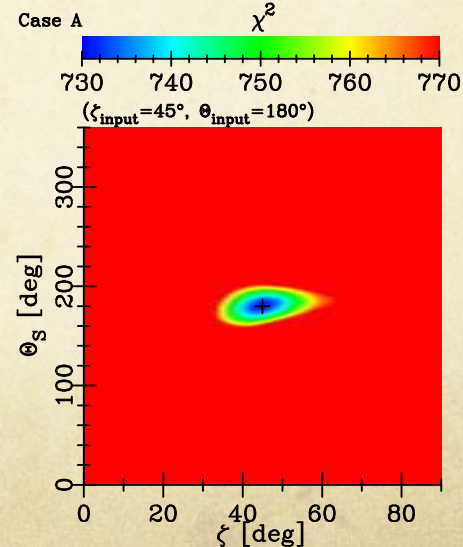
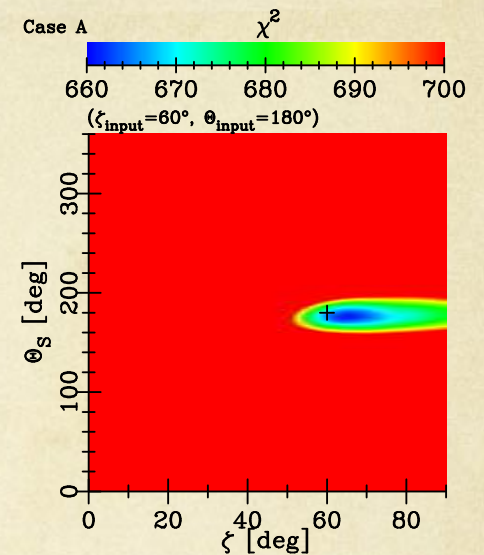
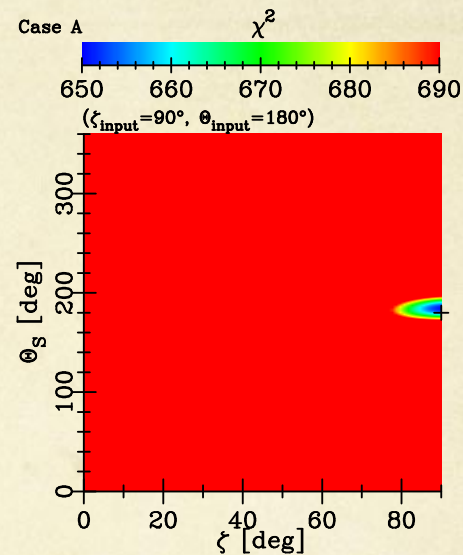
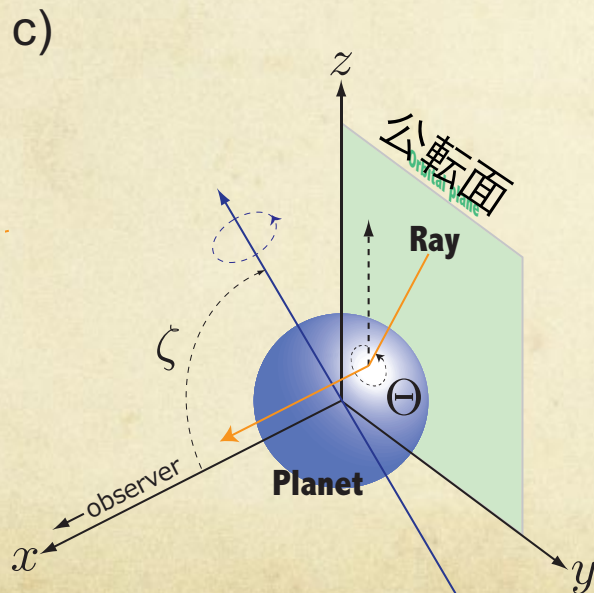
$$\zeta = 45^\circ$$



Obliquityの推定

Obliquityは生物の存在にとって非常に重要だが、観測的に推定できる方法は非常に限られている

◆ Obliquity, Orbital phaseを動かし
chi-square最小をさがすことで、
この方法論をだけからObliquityと
Seasonを推定することができる



まとめ：

- ✓地球型惑星の表面について知りたいならば反射光直接撮像
- ✓公転・自転によって表面2次元分布=**地図を描くことが可能**
- ✓同時に**Obliquityを推定**することができる
- ✓既存の観測計画(O3)でも5-10pc程度ならできそう

✧本当は雲を忘れてはならない → 藤井

