

# 反射光による系外惑星の特徴付け

---

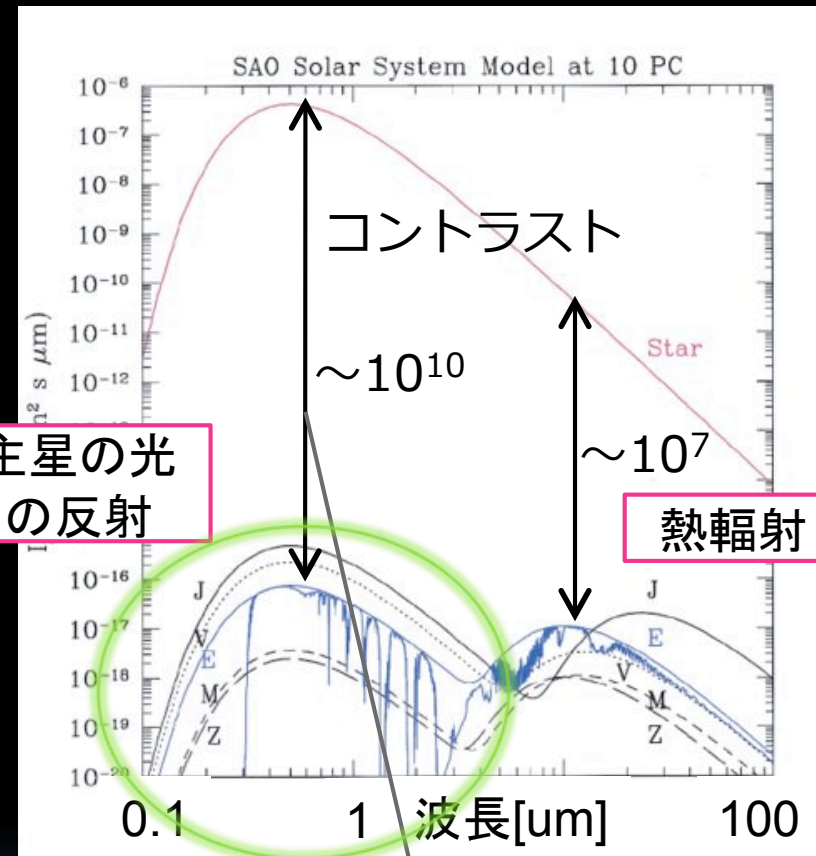
藤井友香 (東京大学宇宙理論研究室D1)

- 河原創 (首都大)
- 須藤靖 (東大理)
- 樽家篤史 (東大理)
- Edwin L. Turner (Princeton大)
- 福田悟 (東大気候センター)
- 中島映至 (東大気候センター)

# 惑星の光

Des Marais et al. 2002

- 吸収線
- 熱輻射
  - 温度
  - 半径 etc
- 反射
  - 表面の組成
  - 大気の厚み、雲 etc

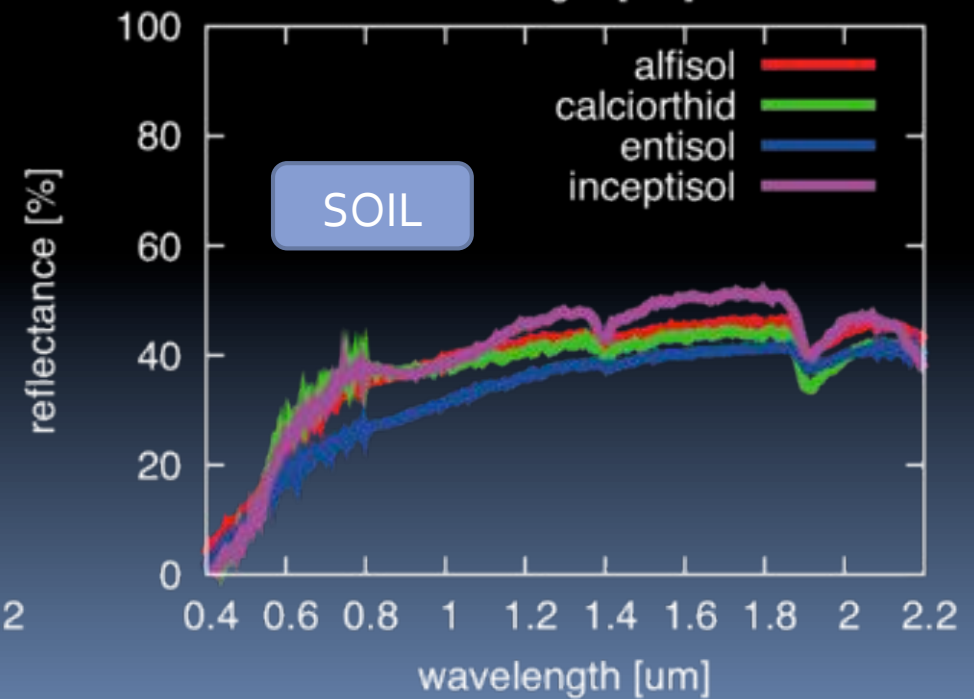
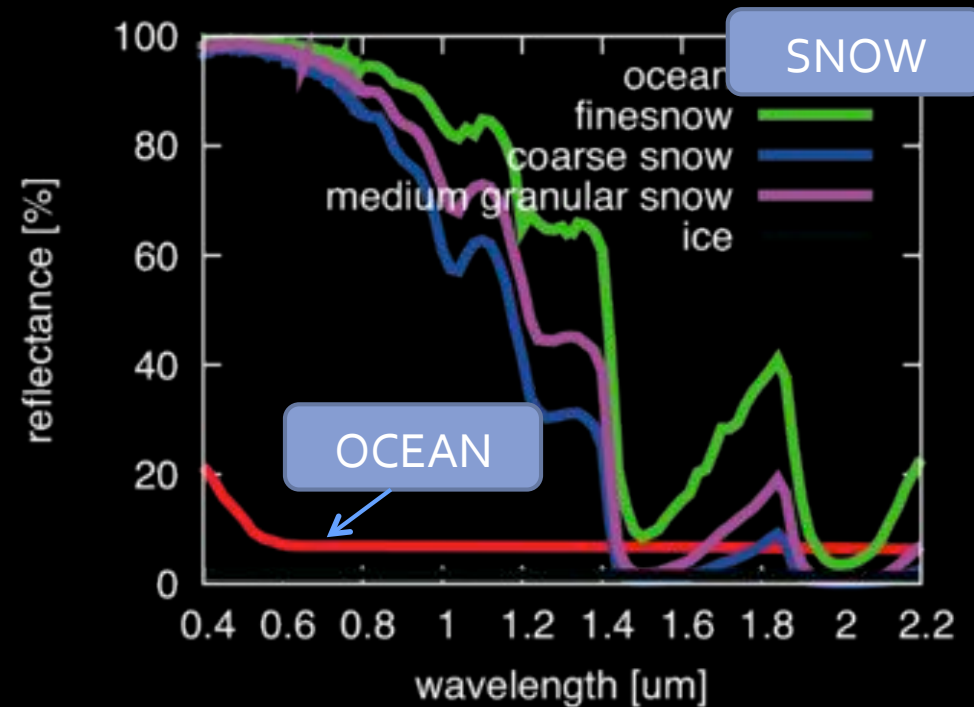
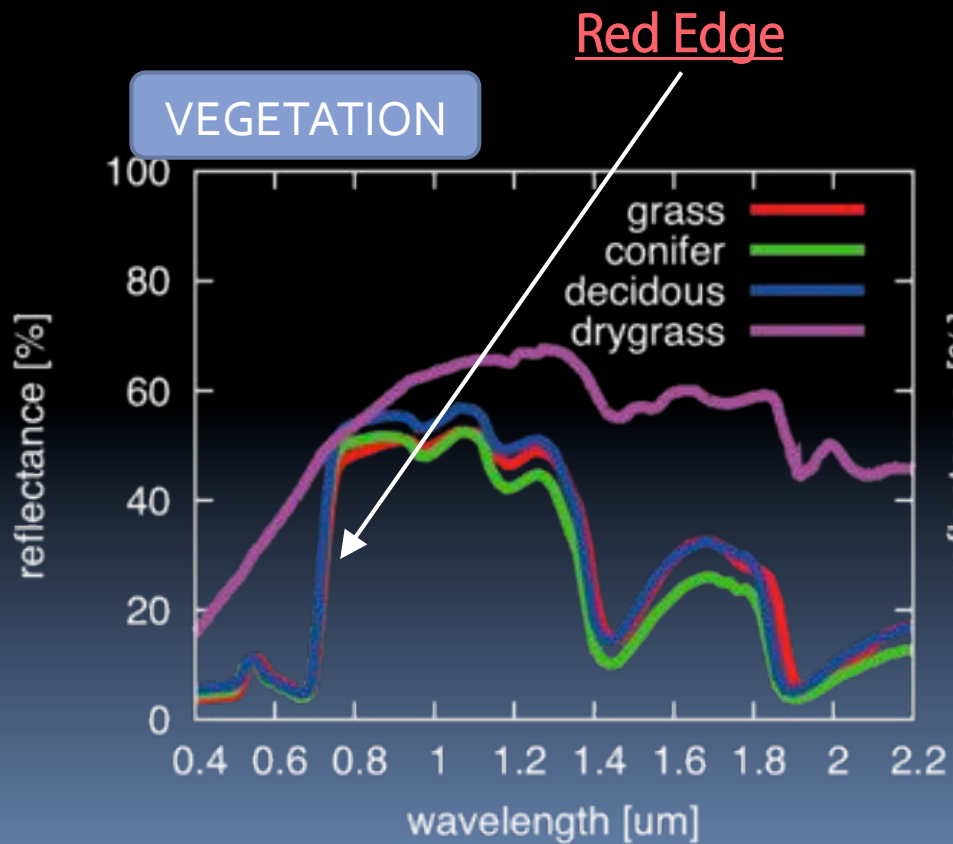


$$\sim \frac{2}{3\pi} \frac{R_p^2}{l^2} (\text{albedo}) \sim 10^{-10}$$

惑星の光は惑星環境の詳細を知る鍵  
惑星の光の分離・検出が鍵

# いろいろな 反射スペクトル

ref.) ASTER spectral library  
( <http://speclib.jpl.nasa.gov/> )



# 反射光による表面の再構築

将来の観測で得られるだろう反射光の情報を最大限利用して惑星の表面情報を得るには？

逆問題を解くには。

- 惑星表面を空間的に分解することはできないが、惑星の自転・公転によって反射光に寄与する表面上の位置が変わる
- 変動パターンは、軌道・表面の非一様性・赤道傾斜角に依存
- →惑星表面の二次元情報  
軌道傾斜角の推定

# 地球の反射光の時間変化 ( $\zeta=45^\circ$ )

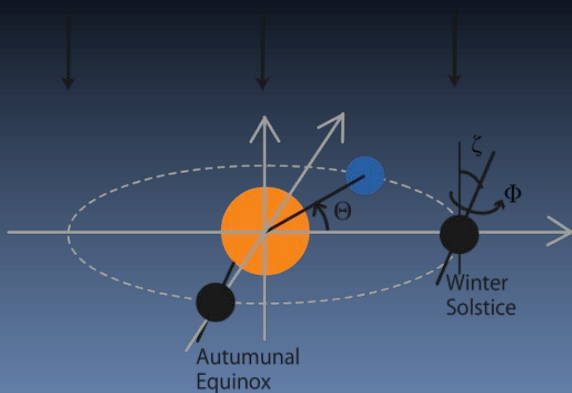
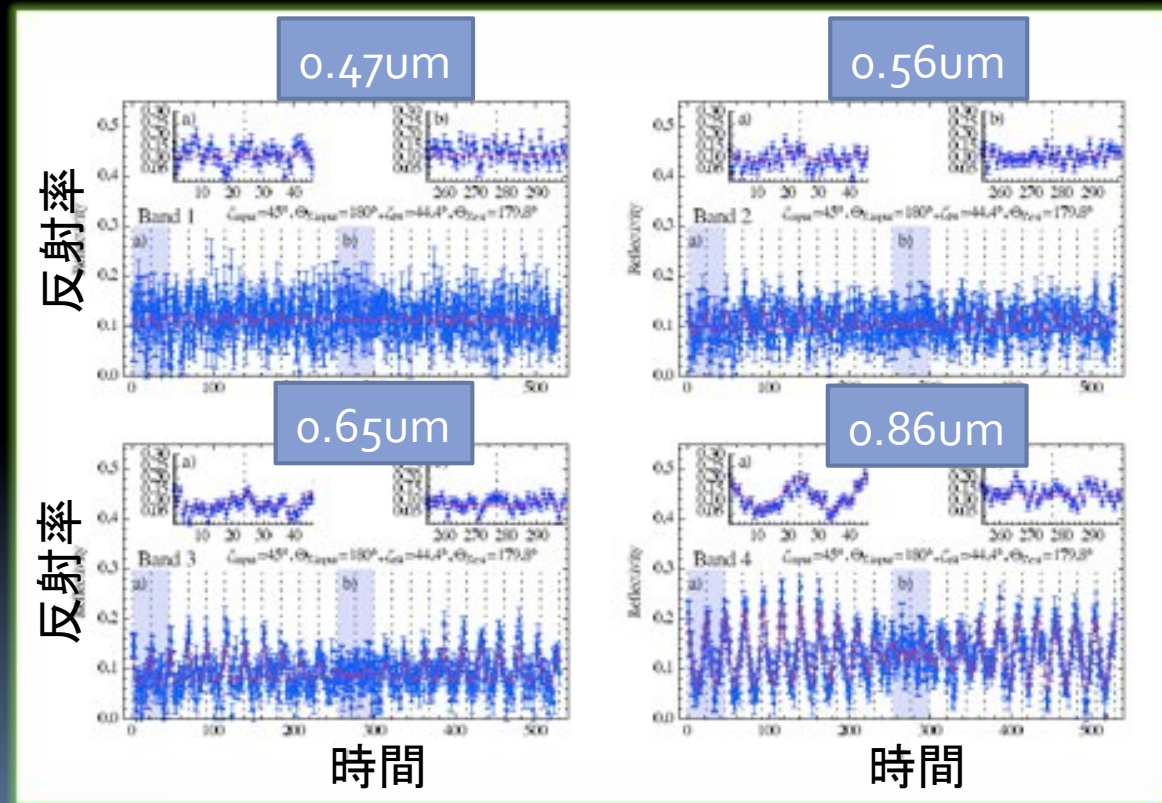
## ノイズ

- 03のような多バンド測光観測を念頭においたノイズ
  - 5pc彼方
  - D~1.1m
  - 主星の光は100%遮蔽されている
  - read noise
  - dark noise
  - exozodi

## 状況

- face-on, circular orbit

赤道傾斜角 $\zeta=45^\circ$



# モデル化 Kawahara & Fujii 2010

$\Theta$ : 公転  $\Phi$ : 自転  
 $\zeta$ : 赤道傾斜角

face-on, circular orbit

$$I_j(t_i) = CR_p^2 F_{*j} \sum_k \frac{D_{jk}}{r^2} A_k(t_i)$$

反射光の強度  $\sum_k$  反射特性 (仮定)

- 4種類の表面を仮定
- 等方散乱を仮定

$$A_k \equiv R_p^2 \int_{S_{VI}} \frac{W(\theta, \phi) m^{(k)}(\theta, \phi) d\Omega}{4\pi}$$

種類kの割合  $\int_{S_{VI}}$  重み関数

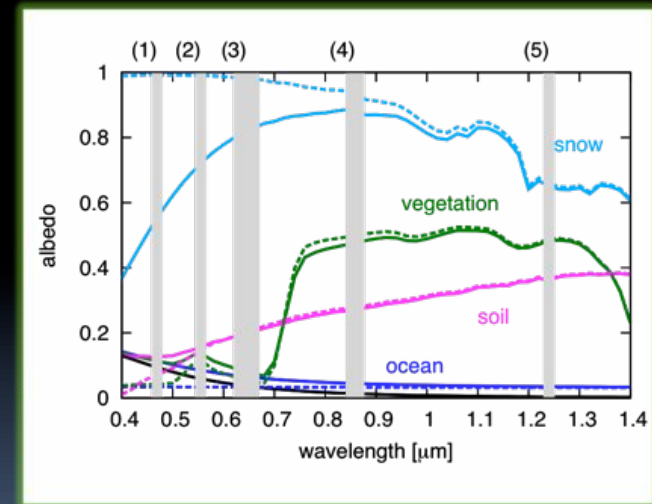
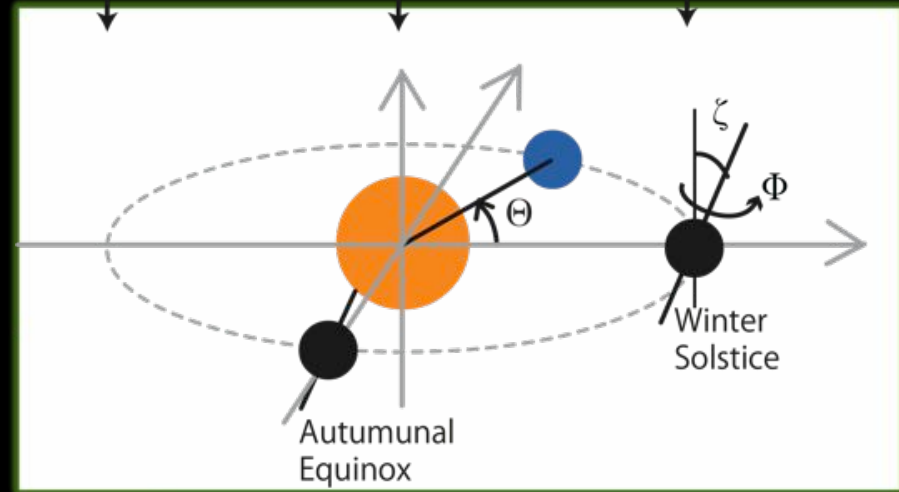
仮定した  
反射  
スペクトル

( $\Theta, \Phi$ )にどれだけk種類の表面があるか

$$\mathbf{a} = G\mathbf{m}$$

$$\begin{cases}
 \mathbf{a} \equiv \{a_i = A(\Phi(t_i), \Theta(t_i); \zeta) / \sigma_i \mid i = 1, 2, \dots, N_{\text{data}}\} \\
 \mathbf{m} \equiv \{\bar{m}_j \mid j = 1, 2, \dots, M\} \\
 G \equiv \{G_{ij} = \int_{s_j} W(\phi, \theta; \Theta(t_i); \Phi(t_i); \zeta) d\Omega / \sigma_i \mid i = 1, 2, \dots, N_{\text{data}}, j = 1, 2, \dots, M\}
 \end{cases}$$

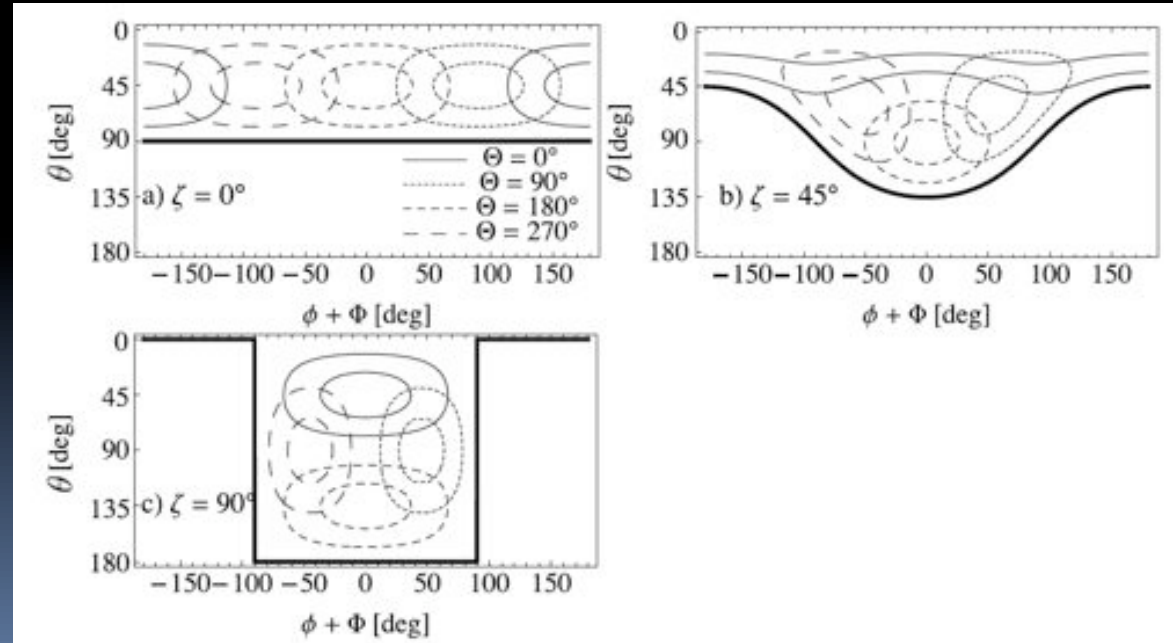
$$\chi^2 \equiv |\mathbf{a}_{\text{data}} - G\mathbf{m}|^2 \text{ を最小化する } \mathbf{m} \text{ を求める } (0 < m_j < 1)$$



# 重み関数の性質

重み関数 :

$$\begin{aligned}
 W(\theta, \phi; \Theta; \Phi; \zeta) &\equiv \frac{\cos \vartheta_0(\theta, \phi) \cos \vartheta_1(\theta, \phi)}{\int_{S_{VI}} \cos \vartheta_0(\theta, \phi) \cos \vartheta_1(\theta, \phi) d\Omega} \\
 &= \frac{3}{2} \cos \vartheta_0 \cos \vartheta_1 \\
 &= \frac{3}{2} [\cos \theta \cos \Theta \cos \zeta - \sin \theta \sin(\phi + \Phi) \sin \Theta - \sin \theta \cos(\phi + \Phi) \cos \Theta \cos \zeta] \\
 &\quad \times [\sin \theta \cos(\phi + \Phi) \sin \zeta + \cos \theta \cos \zeta]
 \end{aligned}$$



# Global Mapping Kawahara & Fujii 2010

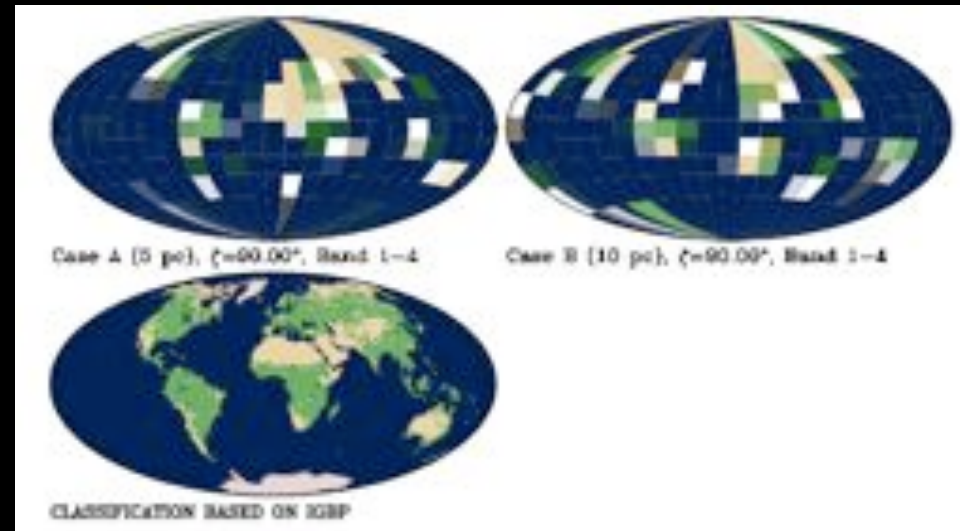
## 地球を黄道北極から観測

雲無し地球の多バンド  
測光模擬観測  
↓  
表面組成に成分分解  
↓  
mapping

$\zeta=90^\circ$ の場合

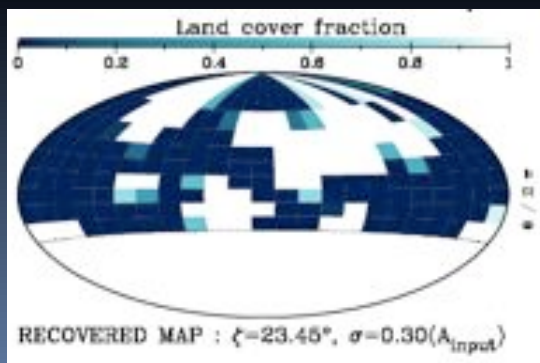
50cの場合

100cの場合



黄：土壌 緑：植生 青：海

$\zeta=23.4^\circ$ の場合



大きなノイズがあっても、1年分まるまる観測すれば表面の2次元情報がある程度再構築できる

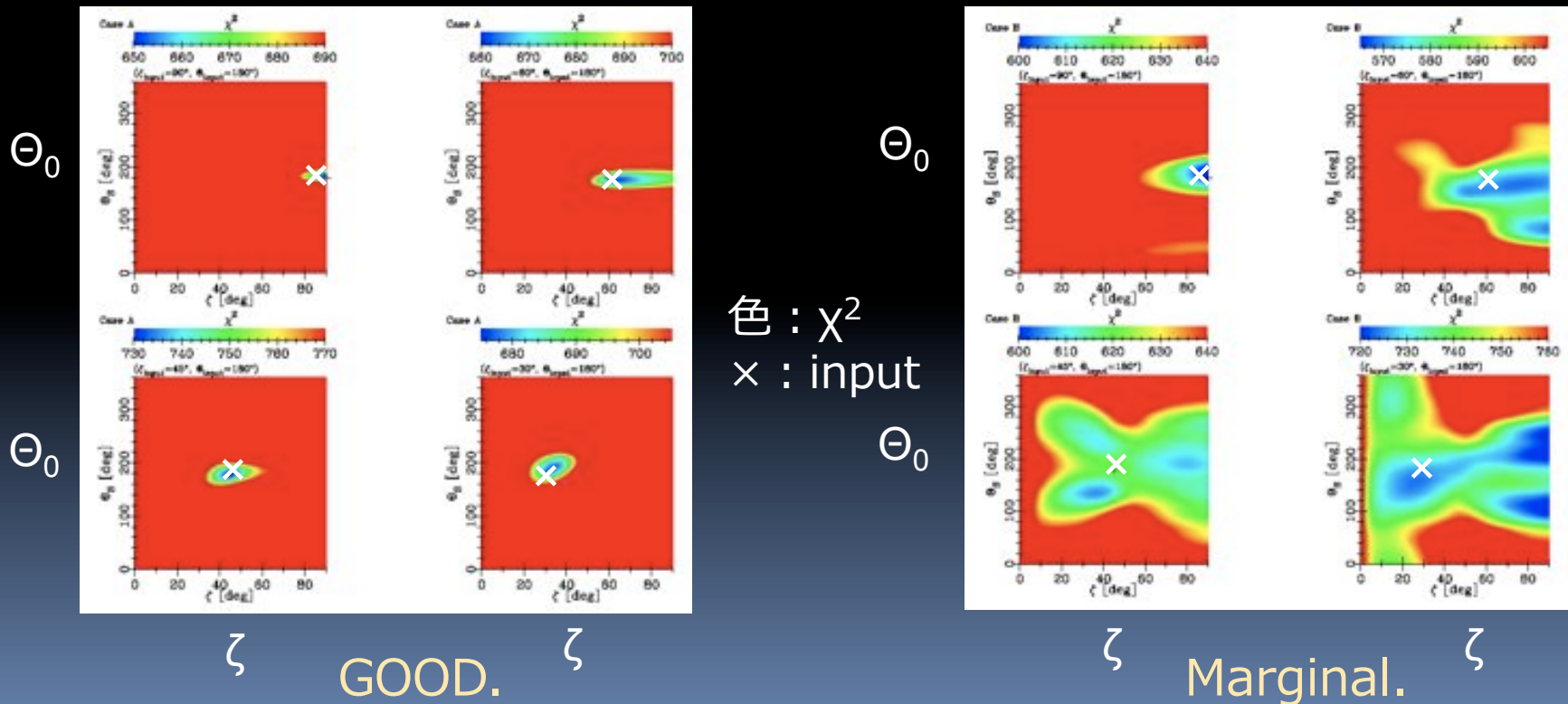


# 赤道傾斜角の推定 Kawahara & Fujii 2010

- 軌道傾斜角は、居住可能性にも影響大
- 様々な赤道傾斜角 $\zeta$ でフィットし、もっともフィットが良い( $\zeta, \Theta_0$ )を求める

5pc彼方の惑星の場合

10pc彼方の惑星の場合



# Summary

- 第2の地球の発見が徐々に現実的なものとなりつつある
- 系外惑星の反射光のスペクトルや時間変化は、惑星表面を再構築するのに重要な鍵
- 5~10pc程度の彼方に地球と同様の表面を持つ惑星があった場合、多いバンド測光観測から表面組成とその分布が再現できる可能性
- 惑星の自転と公転をうまく組み合わせれば、惑星表面の二次元情報が得られる 同時に赤道傾斜角も推定できそう