

# 太陽系外惑星の世界



ESO/M. Kornmesser <http://www.eso.org/public/images/eso1204a/>

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

立教大学 集中講義資料 2016年9月26日～29日

世界が宇宙を予測する

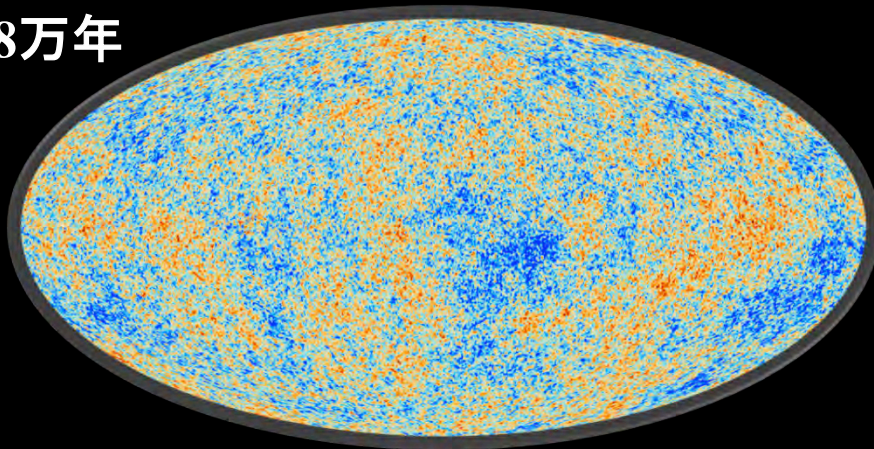
# 宇宙と世界

- **宇宙 > 世界？ それとも 世界 > 宇宙？**
  - **Universe = 宇宙 = Space + Time**
    - 「宇」は「天地四方上下」、「宙」は「往古来今」
  - **World = 世界 = Time + Space**
    - 「世」は過去・現在・未来、「界」は東西南北上下との説あり
- 私にとっては、「宇宙」は観測できる具体的対象というイメージ。一方「世界」は、より抽象的な概念に思える（おそらく普通とは逆？）
- 今回は、**世界 > 宇宙**とする

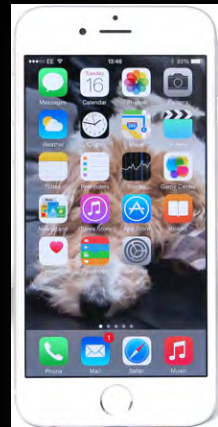


# 宇宙はどこまで予測可能か

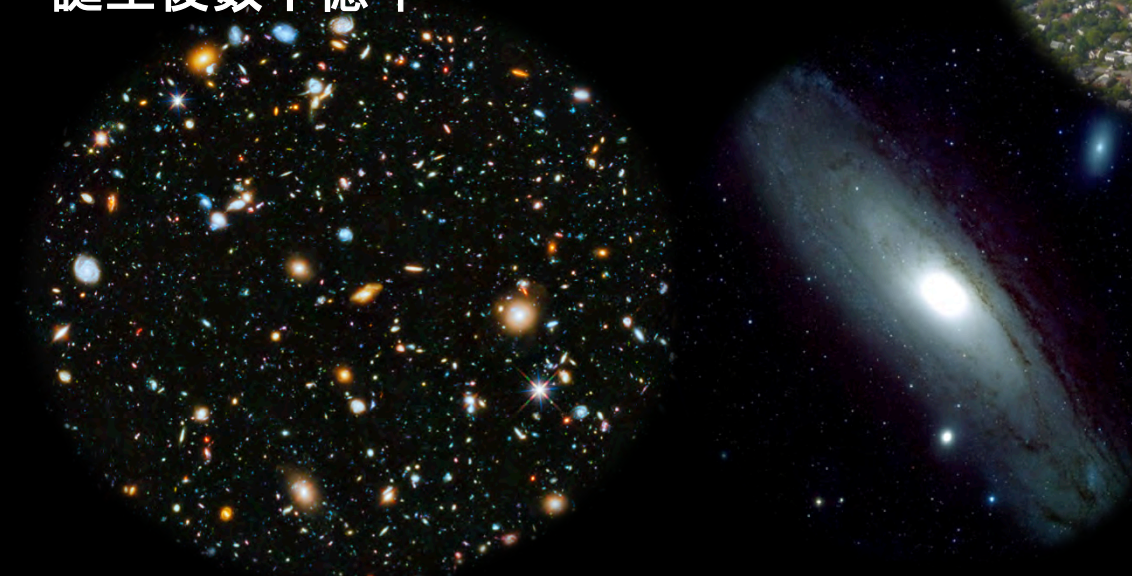
誕生後  
38万年



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)

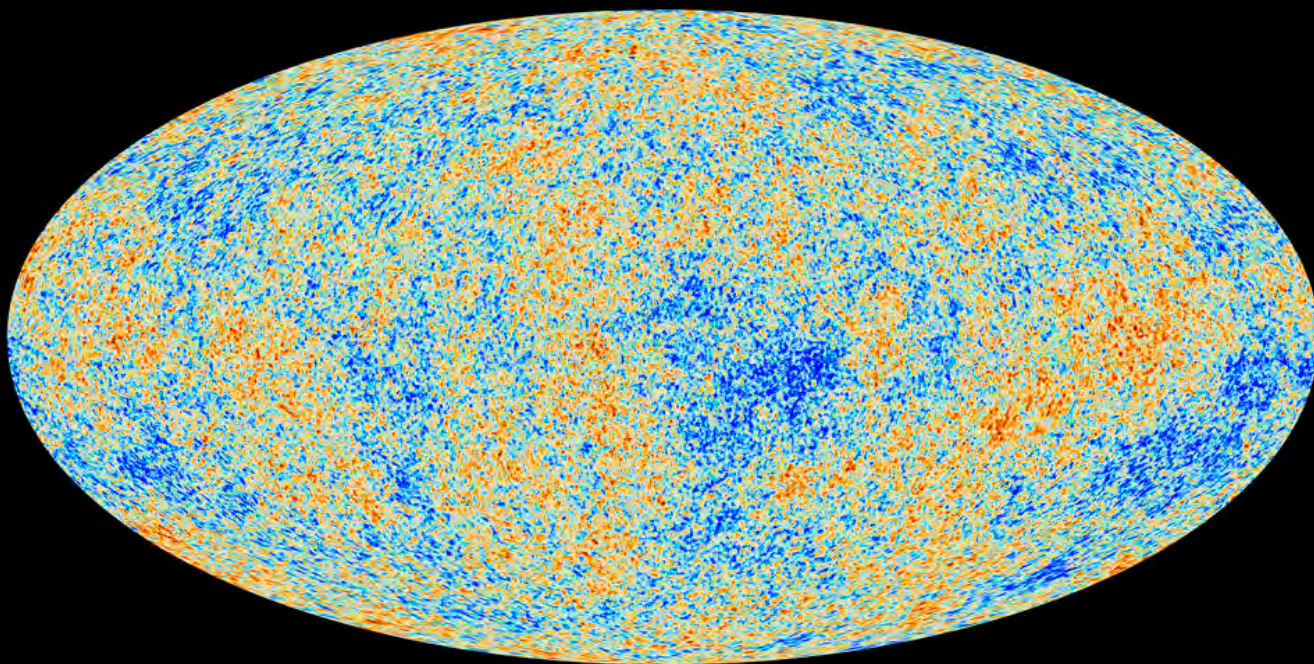


誕生後数十億年



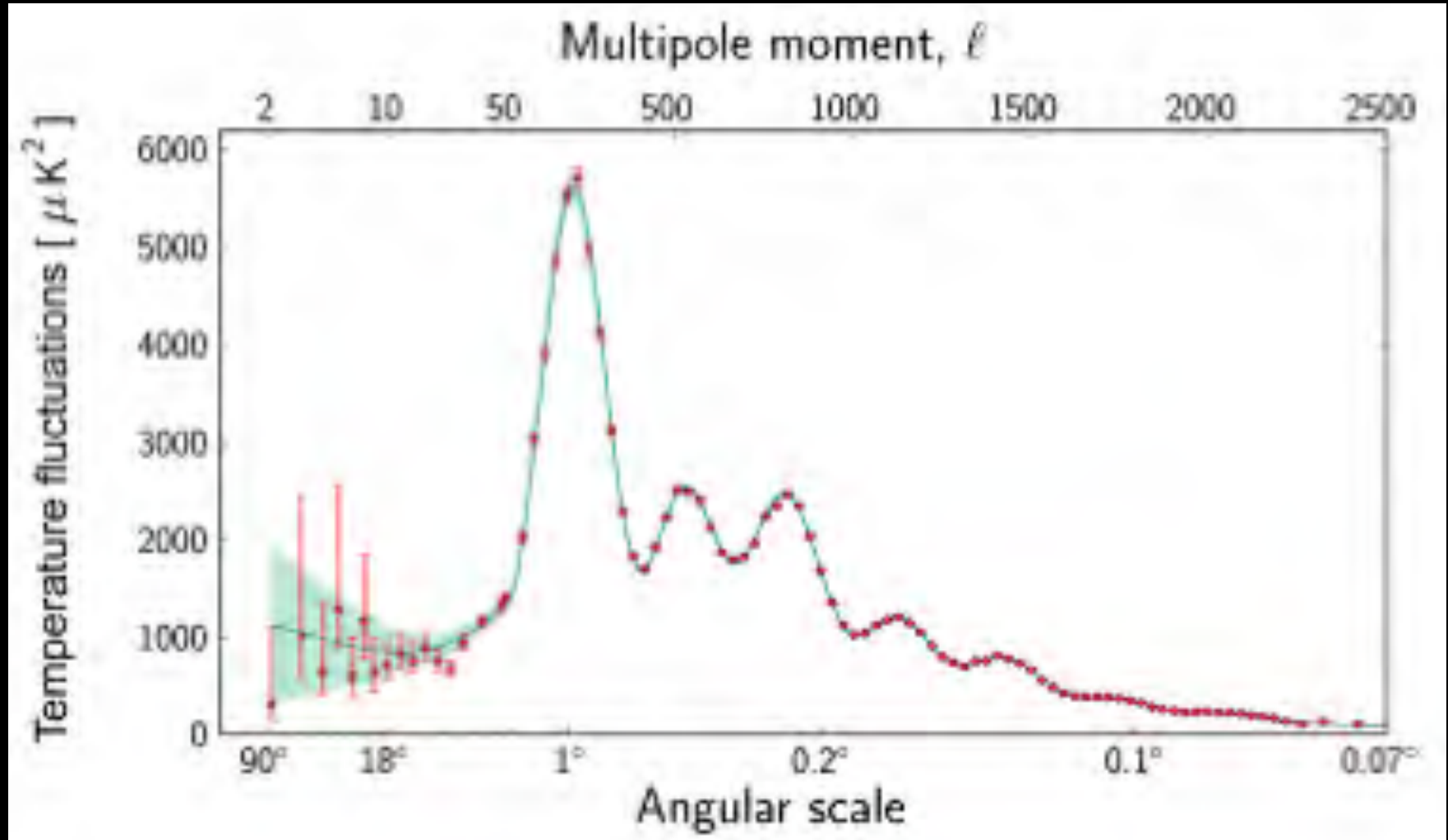


驚くべきことに、現在の宇宙に関するすべての情報は原理的にはここに刻まれている



- 誕生後38万年の宇宙全天電波地図
  - 宇宙マイクロ波背景輻射

# 標準宇宙モデル: わずか6つのパラメータでぴったり説明できる



# 予言できるのは天体だけではない





# 土星越しに見 る地球

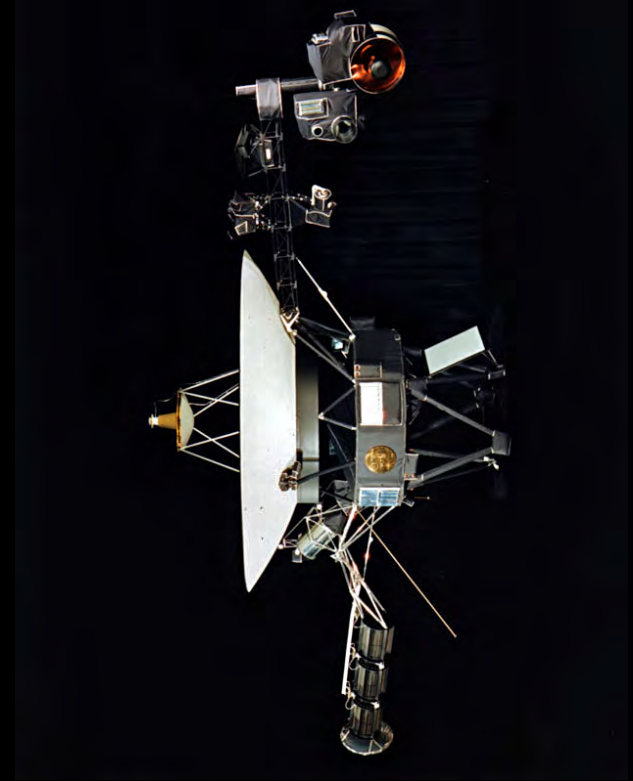


- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
  - 2013年7月20日(日本時間): 2万人がこちらに手を振っている

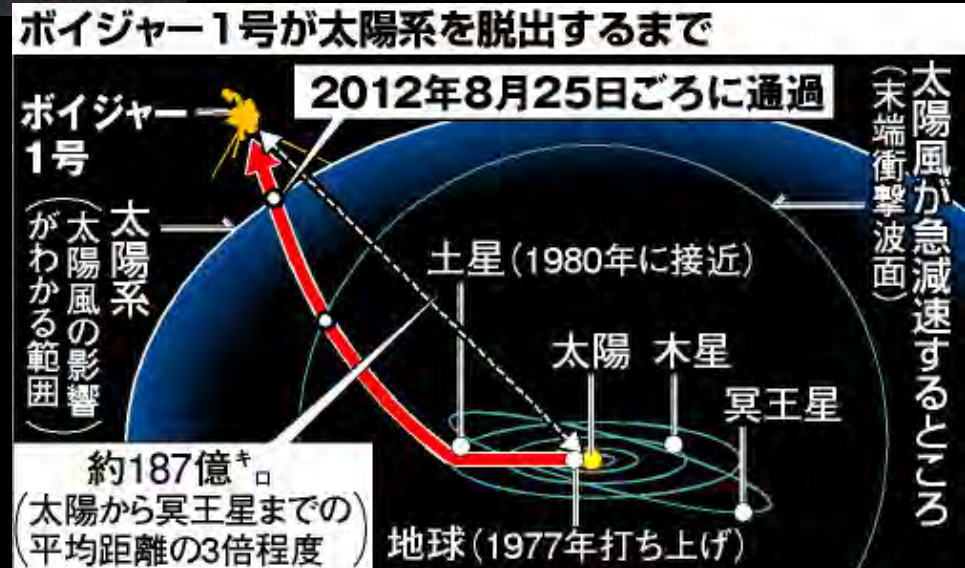
View from Saturn (Cassini)  
900 million miles away



# ペイル・ブルー・ドット



- 1990年2月14日、ボイジャー1号が撮影
- カール・セーガンがPale Blue Dotと名付けた



# 必然と偶然

## ■ 科学が解明すべき究極の謎

- なぜ生命は誕生したのか
- なぜ意識が芽生えたのか
- なぜ宇宙は存在するのか

## ■ 必然と偶然の接点

- この宇宙のどこかで生命が誕生することは必然
- 進化した生物がやがては意識をもつのもまた必然
- しかし、宇宙の存在・誕生は偶然？
  - そもそも、宇宙誕生の前に物理法則はあったのか

# 宇宙の進化という必然

- 誕生後38万年での初期条件(CMB温度地図)
  - + 物理法則 = 現在の宇宙に関する観測事実
    - ビッグバン元素合成、宇宙の中性化、天体の誕生、元素循環と天体の形成・進化、宇宙の加速膨張
- 生命の誕生、知的生命への進化ですら、(未だ具体的な説明には成功していないものの)物理法則にしたがった必然的帰結



# 物事には必ず理由があるのか

## ■ 例題

- 地球上に液体の水が存在するには、太陽との距離が現在の値と $\pm 10\%$ 程度の狭い範囲内におさまっていないとまらない(ハビタブルゾーンと呼ばれている)。これから何かわかることはあるか？

# 「偶然」に意味を見い出す

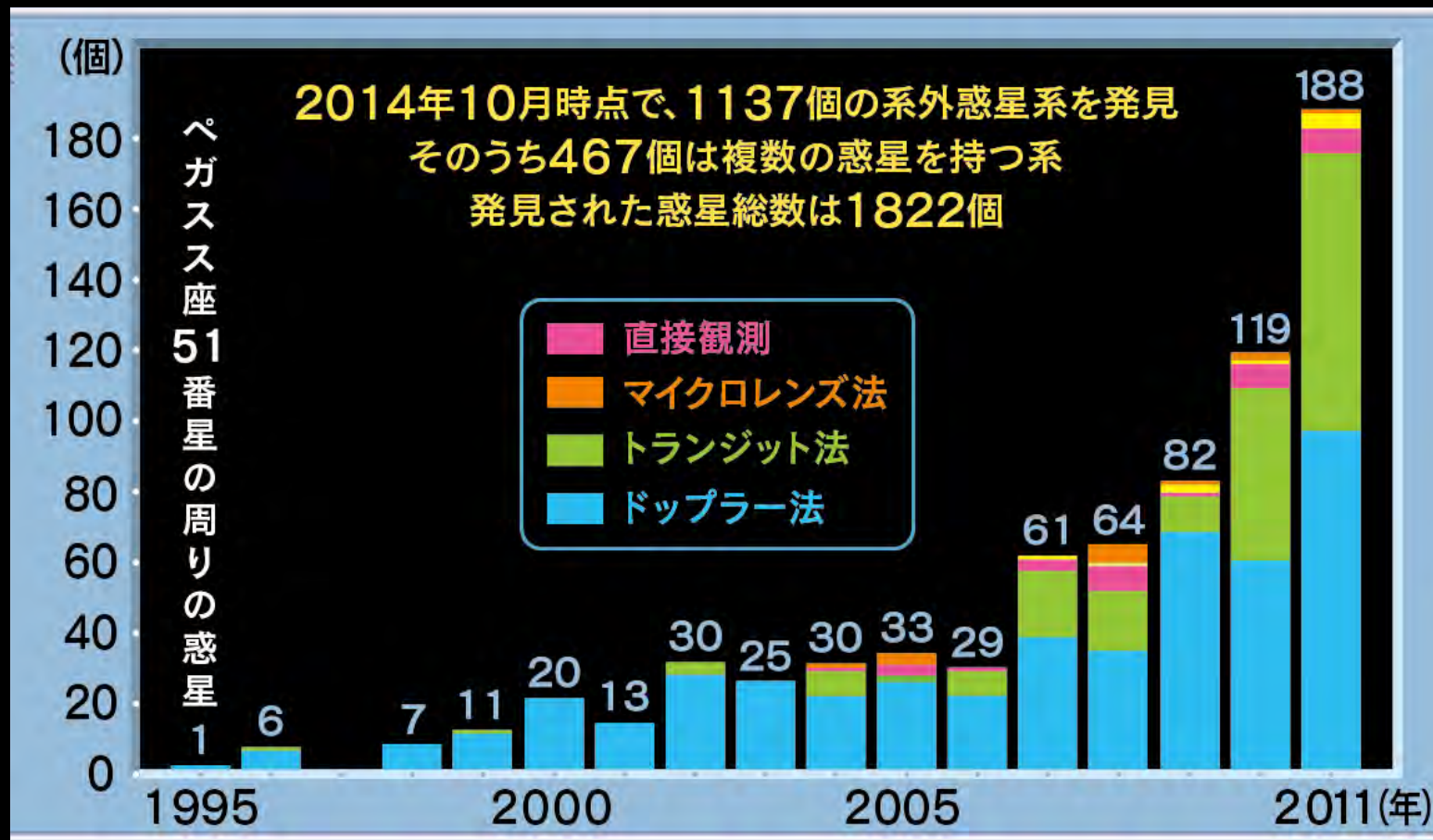
## ■ 回答例 1: 無意味な質問である

- 地球と太陽の距離は単に偶然決まっただけ。偶然には意味はない。

## ■ 回答例 2: 実は深い意味を持つ

- 偶然そのような微調整された系が実在するためには、地球が唯一ではなく、中心星と異なる距離にある無数の惑星が存在すると考える方が自然。つまり、この地球が微調整された(不自然な)性質を持っているのならば、それ以外の無数の惑星が存在していることを示唆する

# この問いの正解は不明だが、太陽系以外に無数の惑星系が存在していることは事実



2015年5月時点では

8重惑星系:太陽系のみ、7重惑星系:2、6重惑星系:2、5重惑星系:15、  
4重惑星系:49、3重惑星系:98、2重惑星系 300個以上



# 物事には必ず理由があるのか

## ■ 応用問題

- この宇宙には我々人間という知的生命が存在するが、それはそのためには宇宙の初期条件と物理法則に微調整が必要だとされている。これから何かわかることはあるか？

# ユニバースからマルチバースへ

- **回答例 1: 無意味な質問である**
  - 知的生命の起源を未だ解明できていないだけ、あるいはそれは偶然に支配されているだけ、のいずれかである。それ以上の意味などない
- **回答例 2: 実は深い意味を持つ**
  - 知的生命を誕生させる条件をもつ宇宙の存在確率が極めて小さいならば、それを相殺するだけの数の宇宙が存在しなければ、知的生命をもつ宇宙は実存し得ない。つまり、宇宙は我々の宇宙以外にも多数存在しているはず。

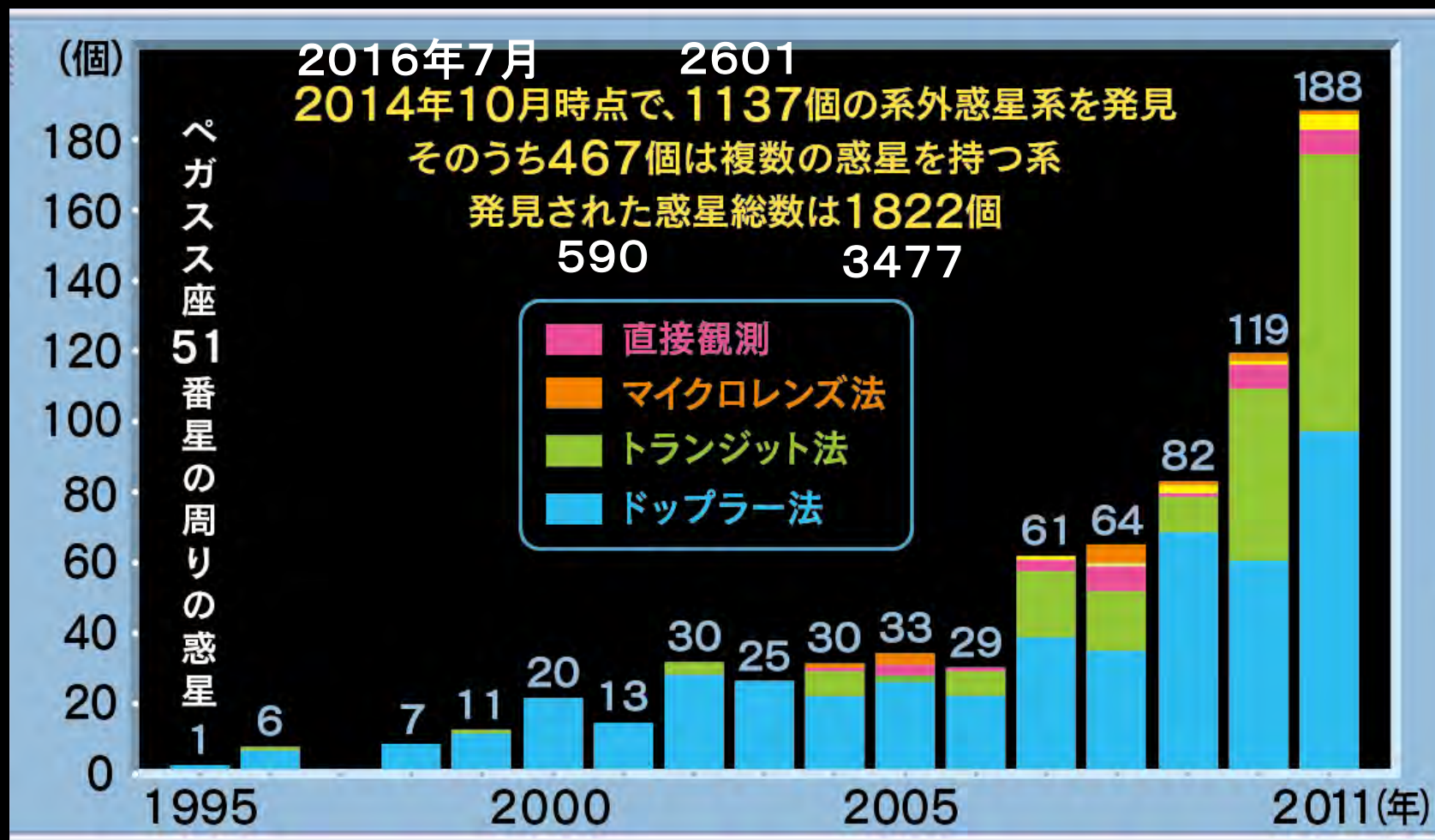
# 物理法則と宇宙の存在もまた必然か

- 初期条件と物理法則によって、その後の振る舞いは説明できるはず(物理学的世界観)だが、、、
- 初期条件は何によって決まったのか
  - 最終的には宇宙のはじまりの問題
- 宇宙はなぜ存在しているのか
- 物理法則は、いつから、どのように、なぜ存在しているのか
  - これらは通常の科学が扱える範囲ではないが、問題の存在は認識しておくべき



# 太陽系外惑星の検出

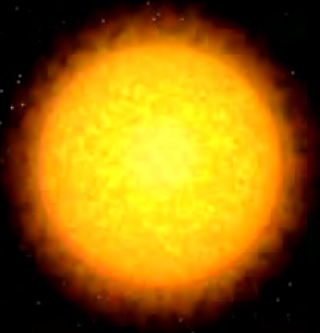
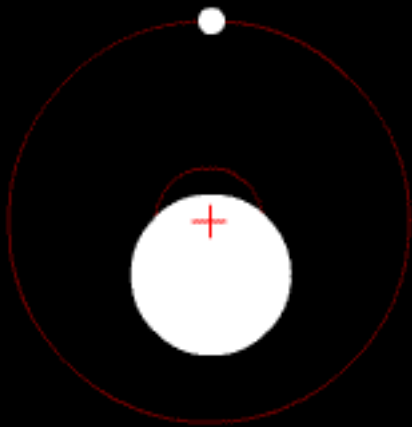
# 太陽系外惑星発見史



2016年6月時点では

8重惑星系:太陽系のみ、7重惑星系:3、6重惑星系:2、5重惑星系:15、  
 4重惑星系:49、3重惑星系:99、2重惑星系 300個以上

# 系外惑星検出方法



## ■ ドップラー法

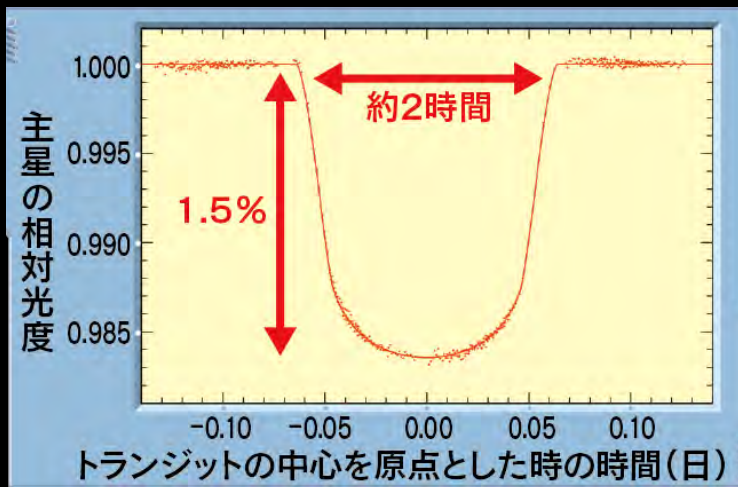
- 惑星の公転に同期して中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

## ■ 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

## ■ 直接撮像

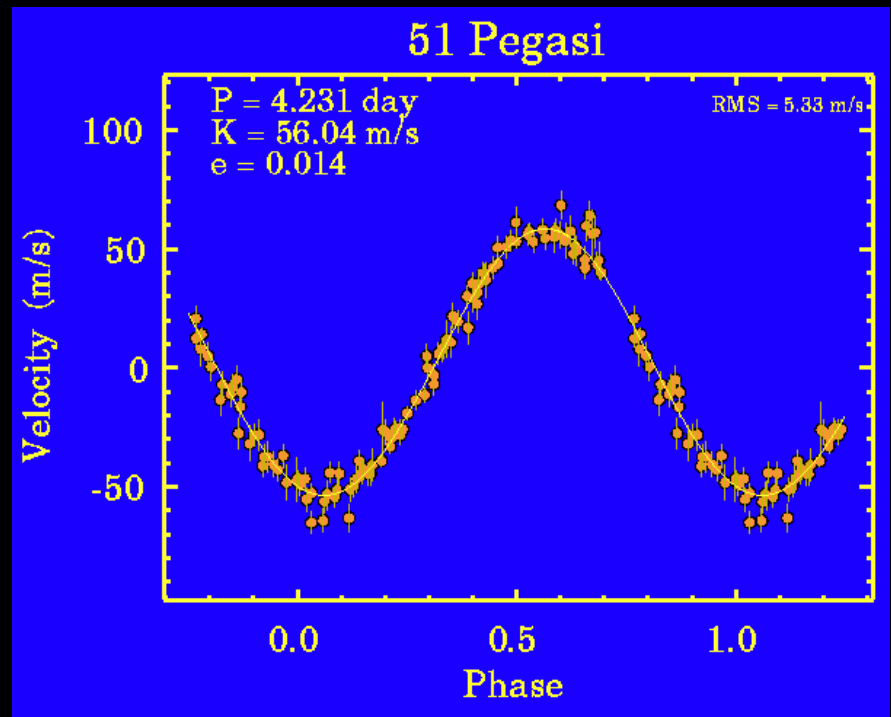
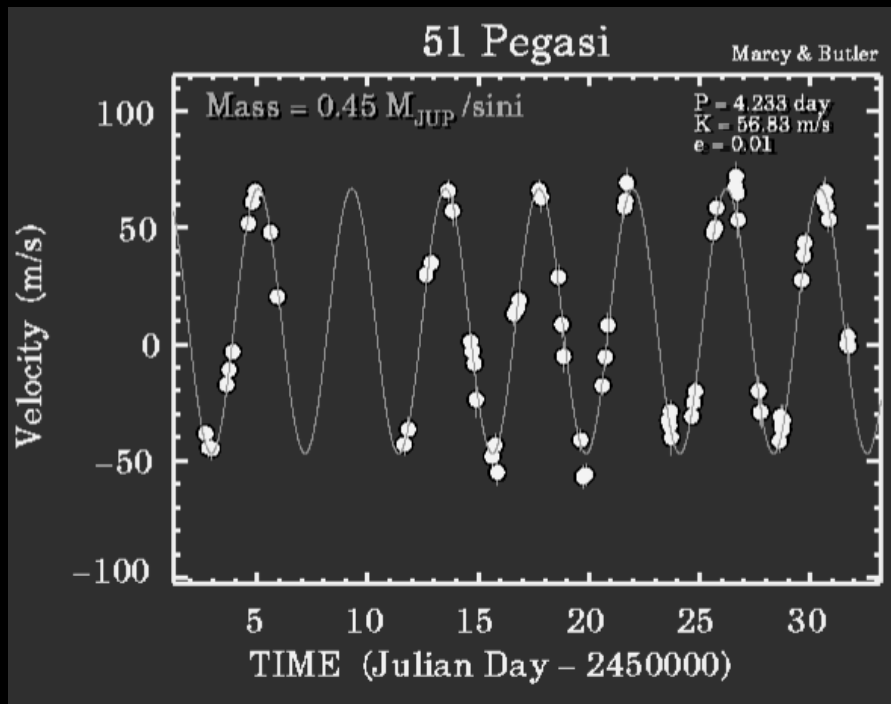
- 中心星の光を隠して惑星の光を分離



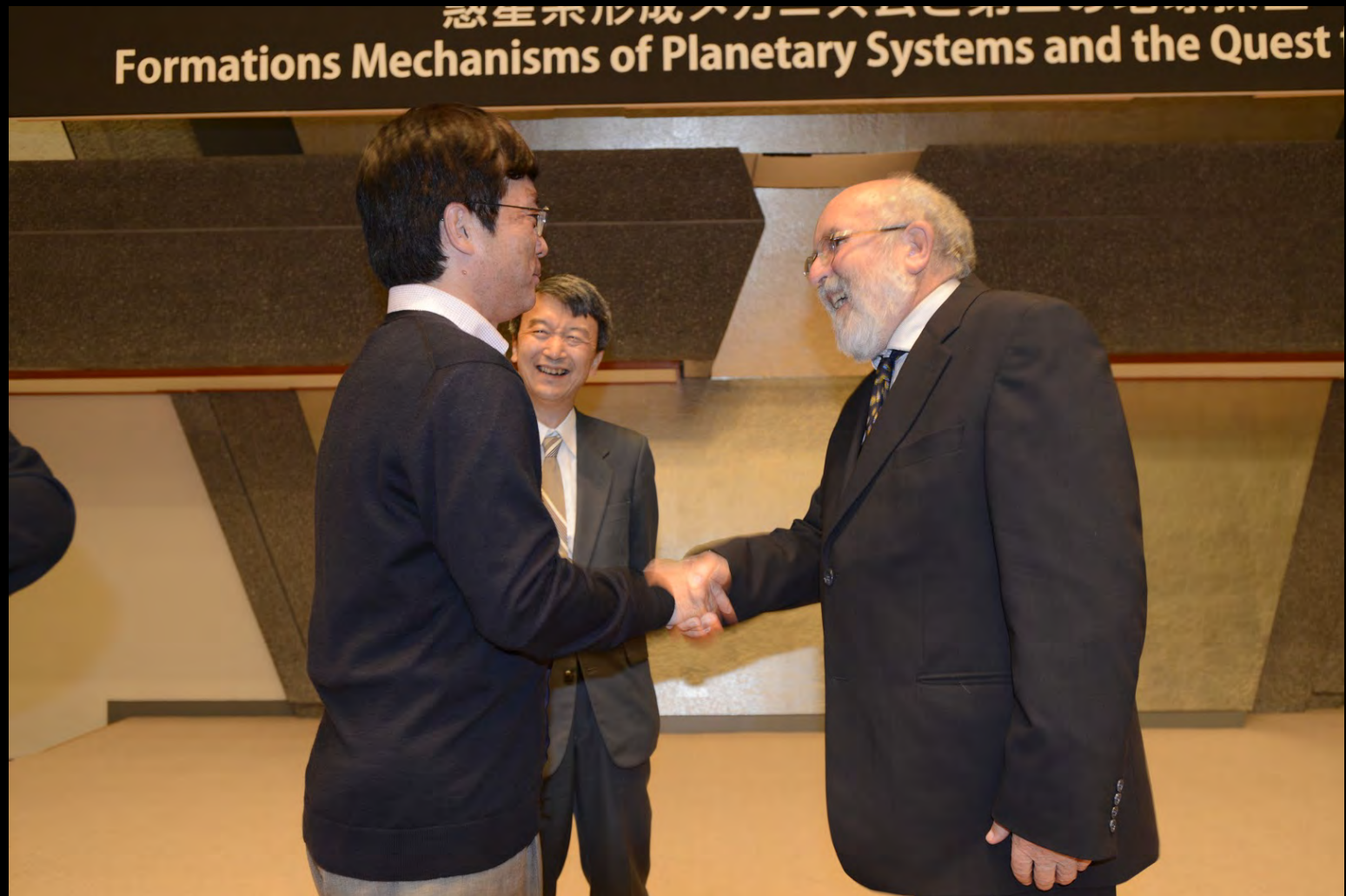


# ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

## わずか4.2日で一周！

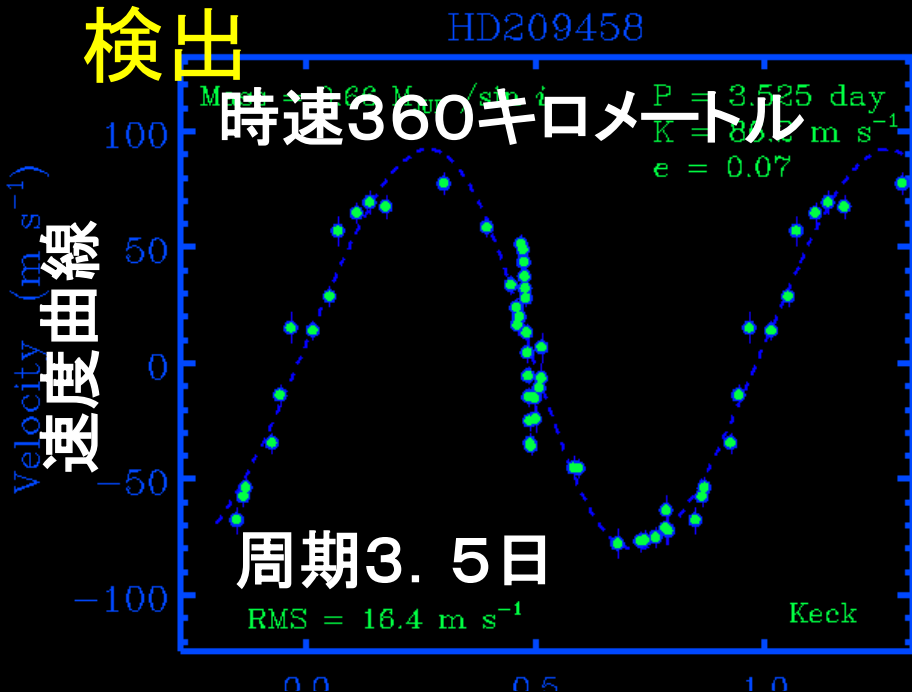


# 2015年京都賞受賞者 マイヨール教授 (初めての太陽系外惑星の発見者)

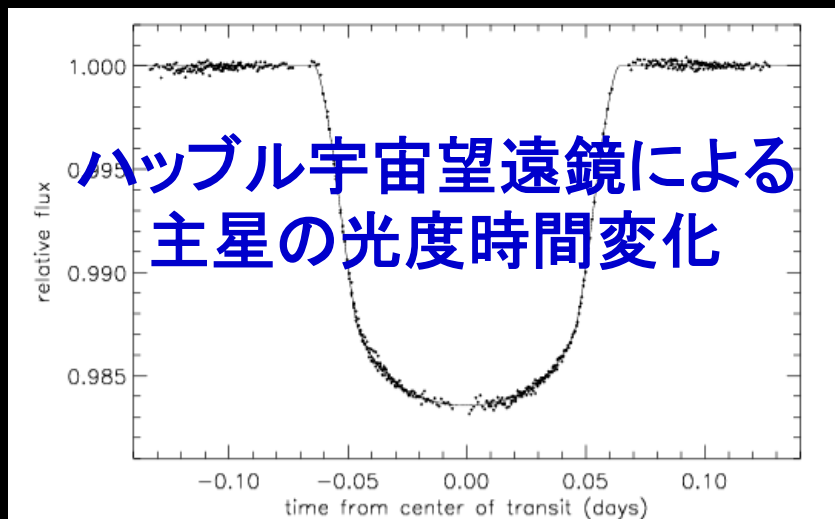
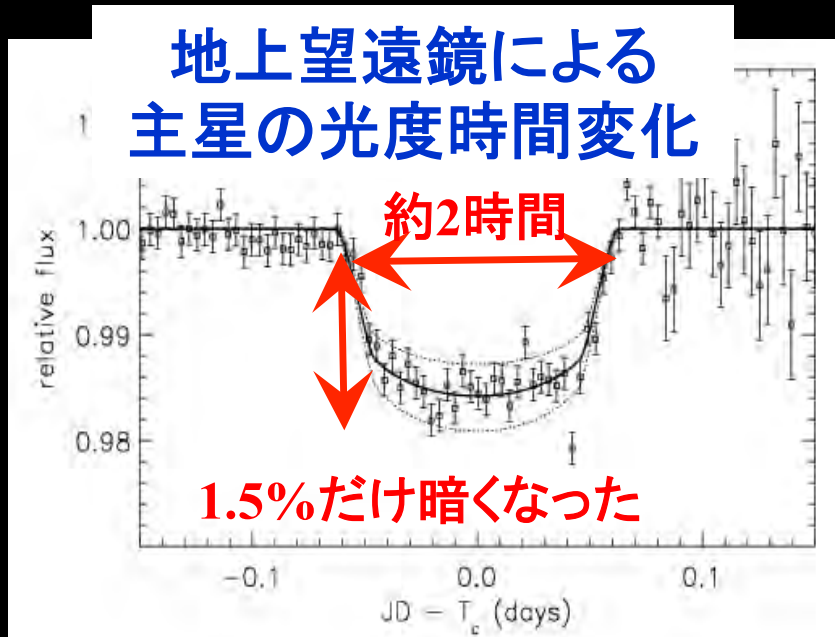


# 初めてのトランジット惑星HD209458b (2000年発表)

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



地上望遠鏡による  
主星の速度時間変化

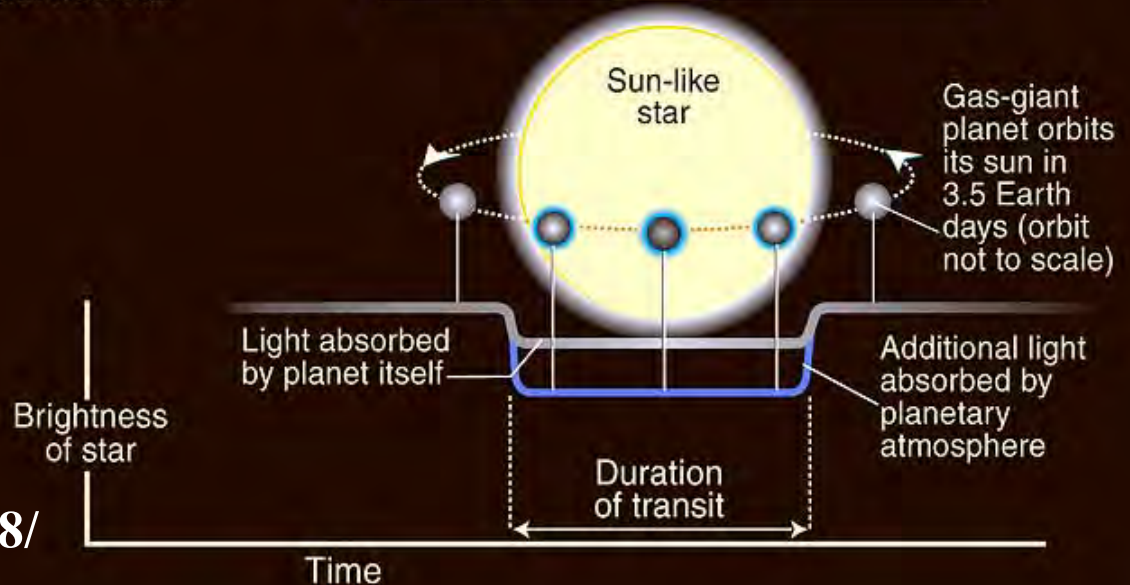
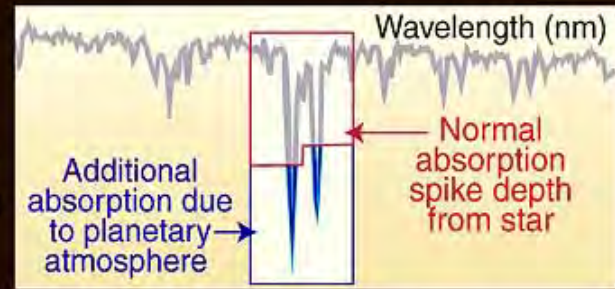




# HD209458bの 惑星大気初検出 (2001年)

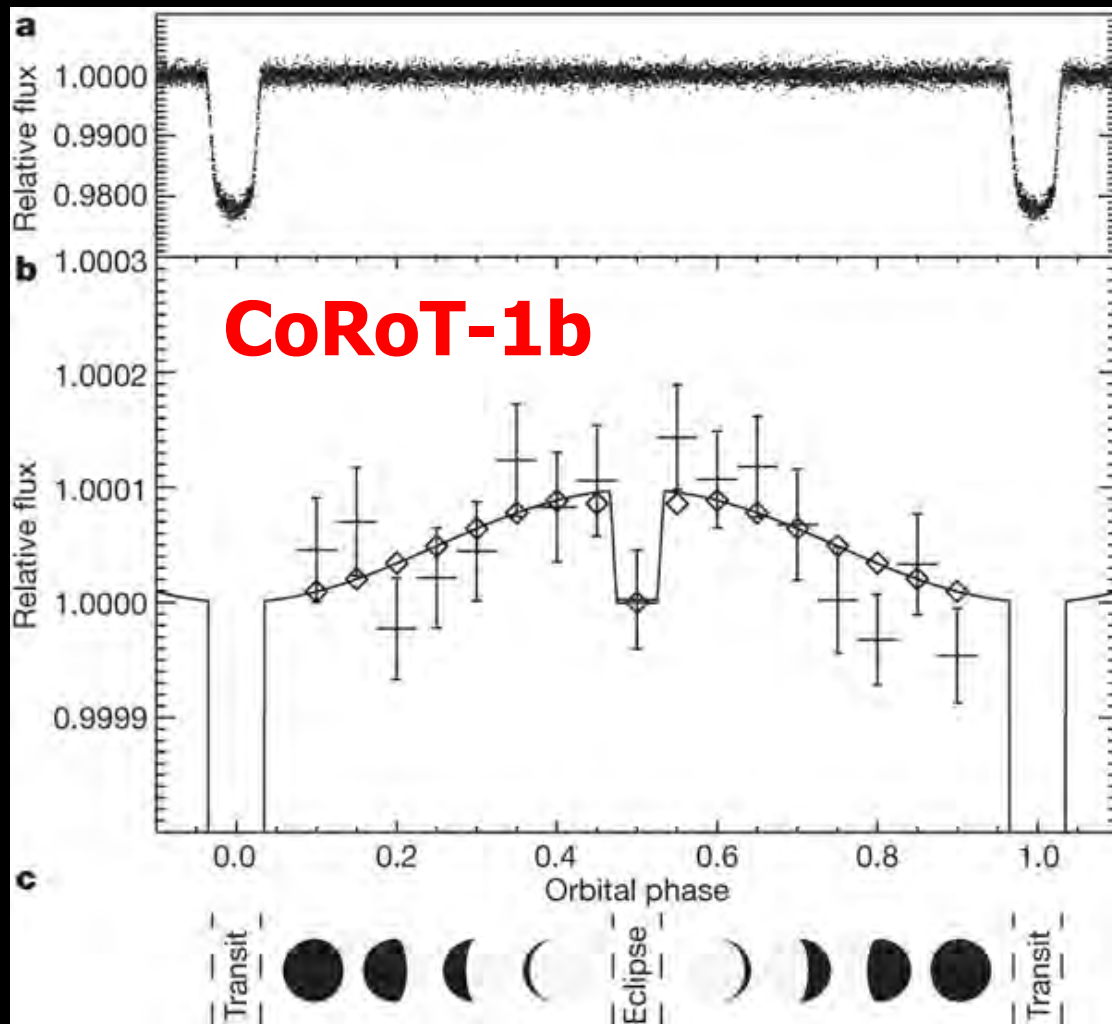
[http://hubblesite.org/  
newscenter/archive/2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



- 2000年 系外惑星の食を検出
  - 惑星の大きさがわかる
  - 質量の観測データとあわせて密度を $0.4\text{g/cc}$ と推定
  - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al.)

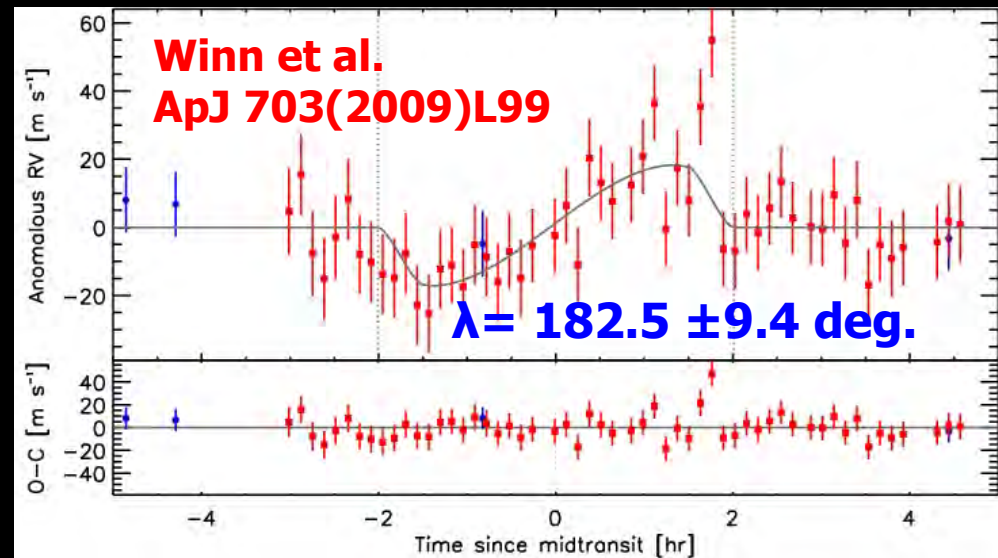
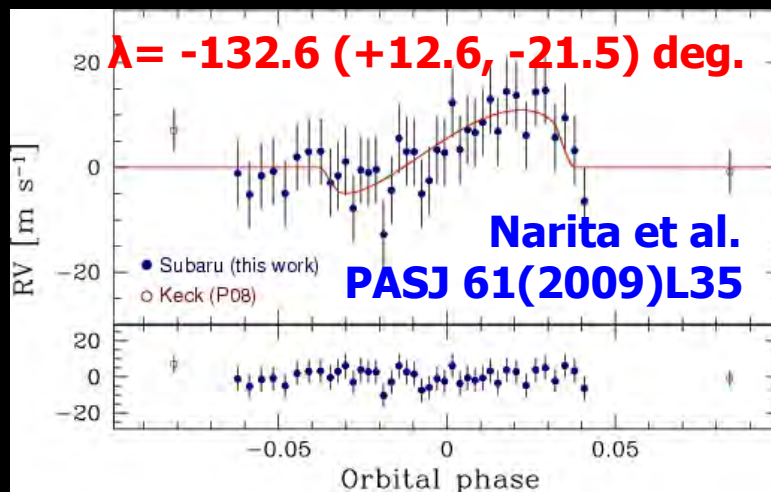
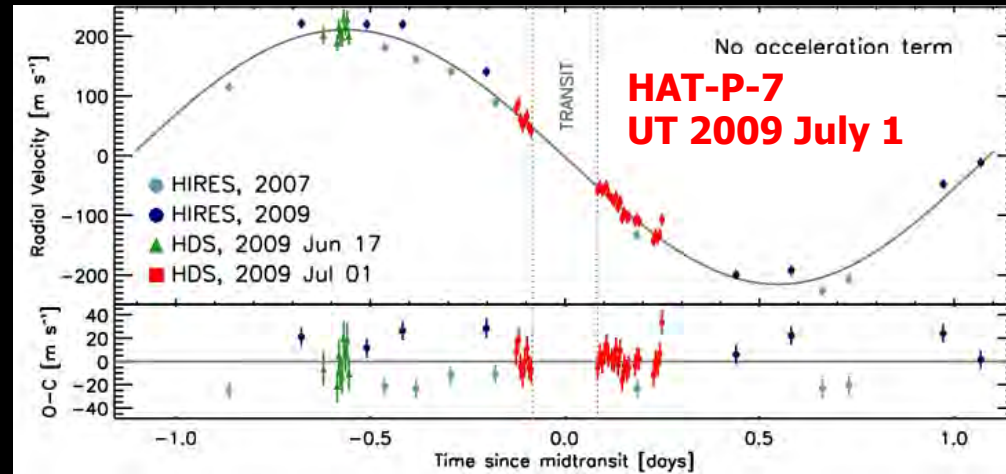
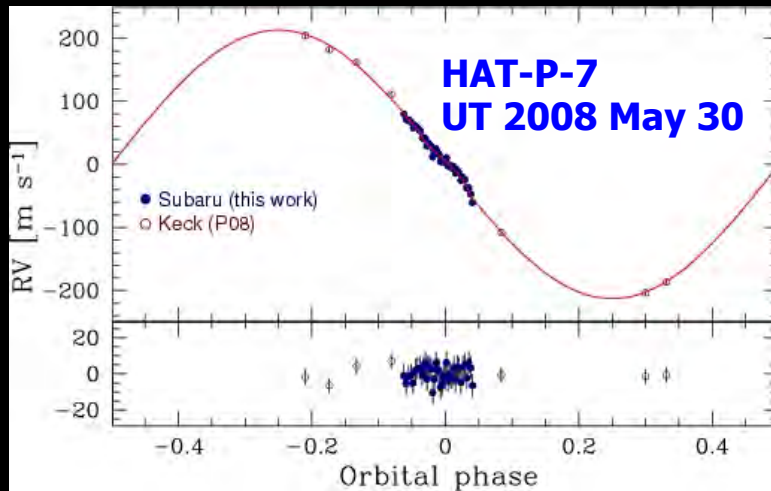
# トランジット惑星CoRoT-1bからの 反射光の検出



- CoRoT-1b: トランジット惑星(周期=1.5日)
- Convection, Rotation and planetary Transit (2006年12月27日打ち上げ)
- 55日間測光モニター
  - 反射光(7100Å)検出
  - 表面温度 2430K
  - $0.02 < \text{albedo} < 0.2$

Snellen, de Mooji & Albrecht: *Nature* 459(2009)543

# 逆行(?)系外惑星(HAT-P-7)の発見



- すばる望遠鏡の成果
- 惑星形成・進化モデルに大きなインパクト

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



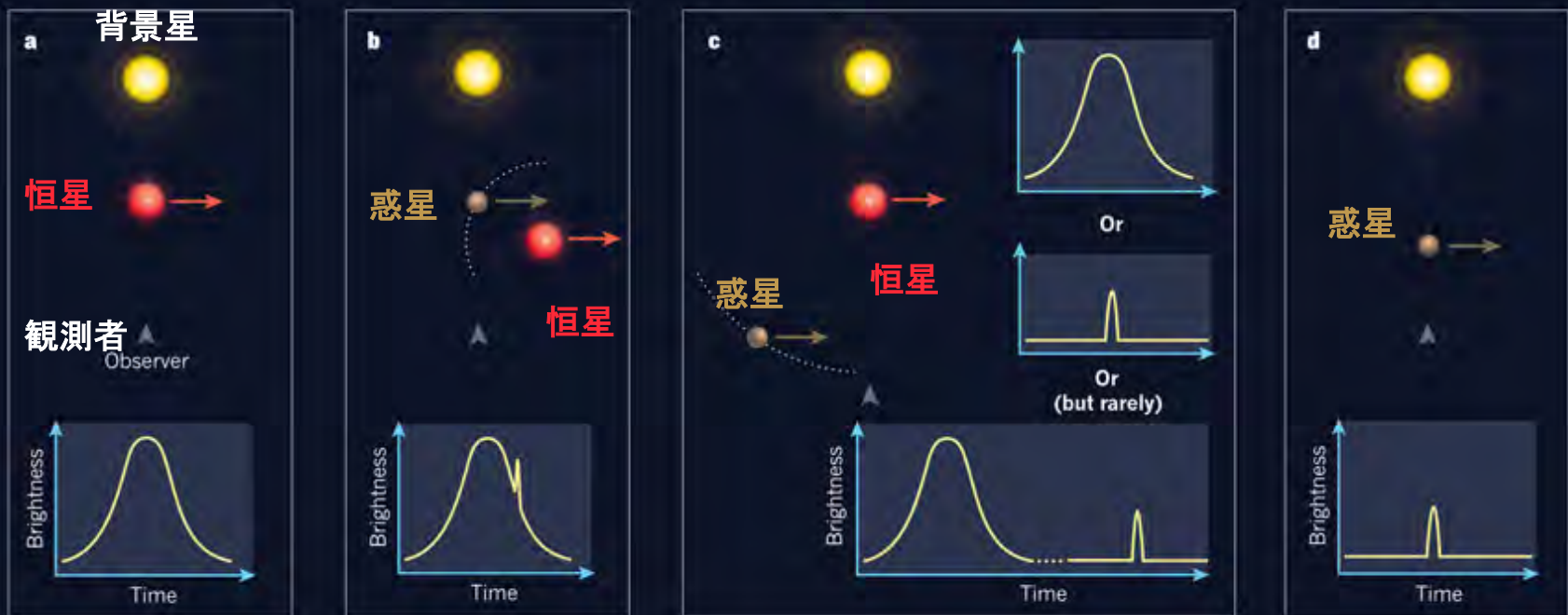
<http://kepler.nasa.gov/>



# 重力マイクロレンズを用いた系外惑星探査

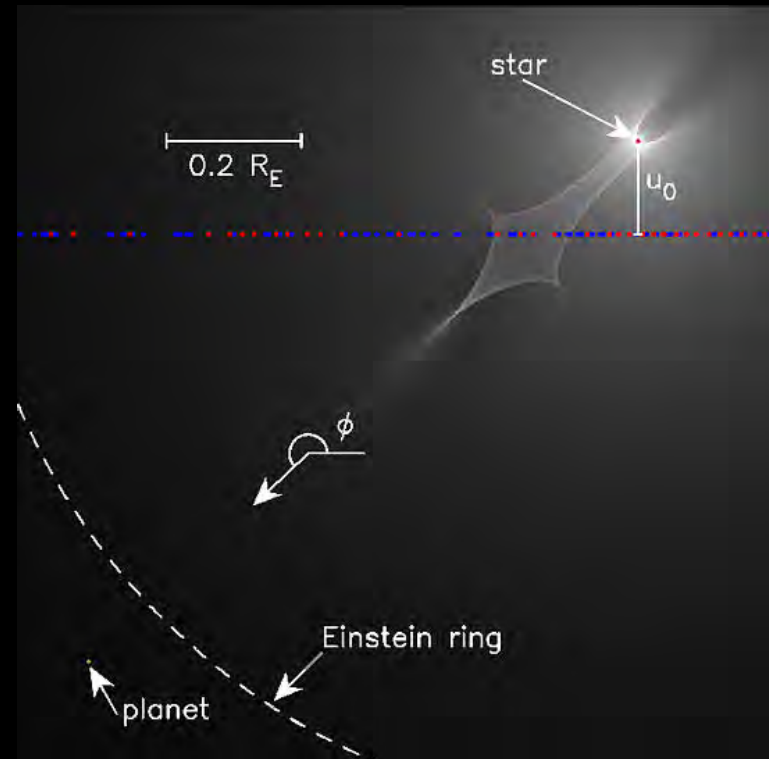
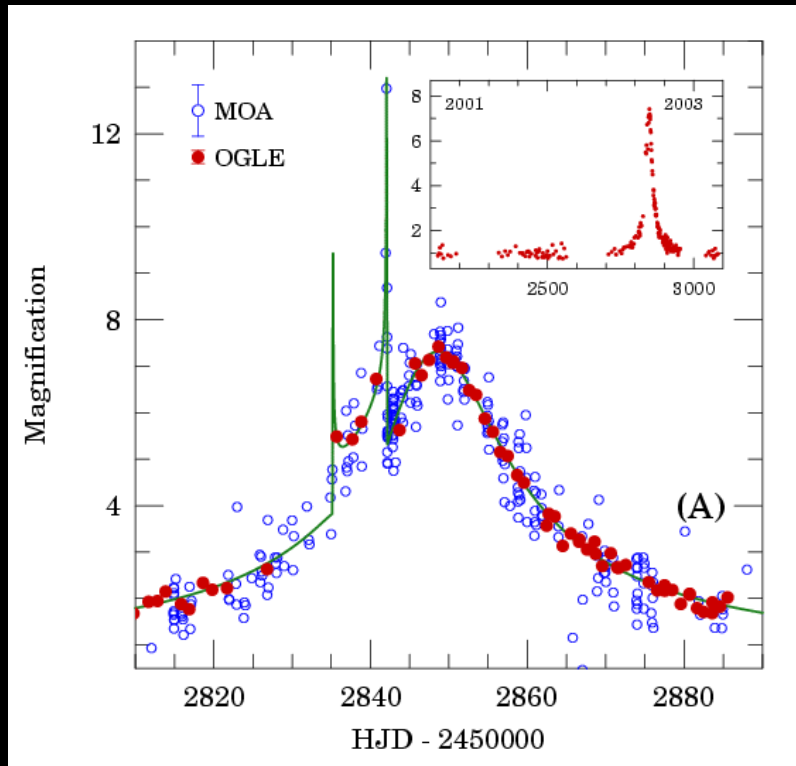
Mao & Paczynski: *Astrophysical Journal* 374(1991)L37

- レンズ天体が惑星を伴った星だったら何が起こるか？
  - うまい配置をしていけば、増光曲線に鋭いピークが出現する
- この兆候を探査すれば系外惑星の検出が可能になるはず！
  - 最初の重力マイクロレンズ現象の検出(1993)
  - 最初の系外惑星の発見(1995)



# マイクロレンズで発見された最初の系外惑星

## OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53



惑星質量:  $\sim M_{\text{木星}}$  公転半径:  $\sim 3\text{AU}$

OGLEが2003年6月22日に、MOAが2003年7月21日に発見  
現在までに20個程度見つかっている (大阪大学 住貴宏氏)





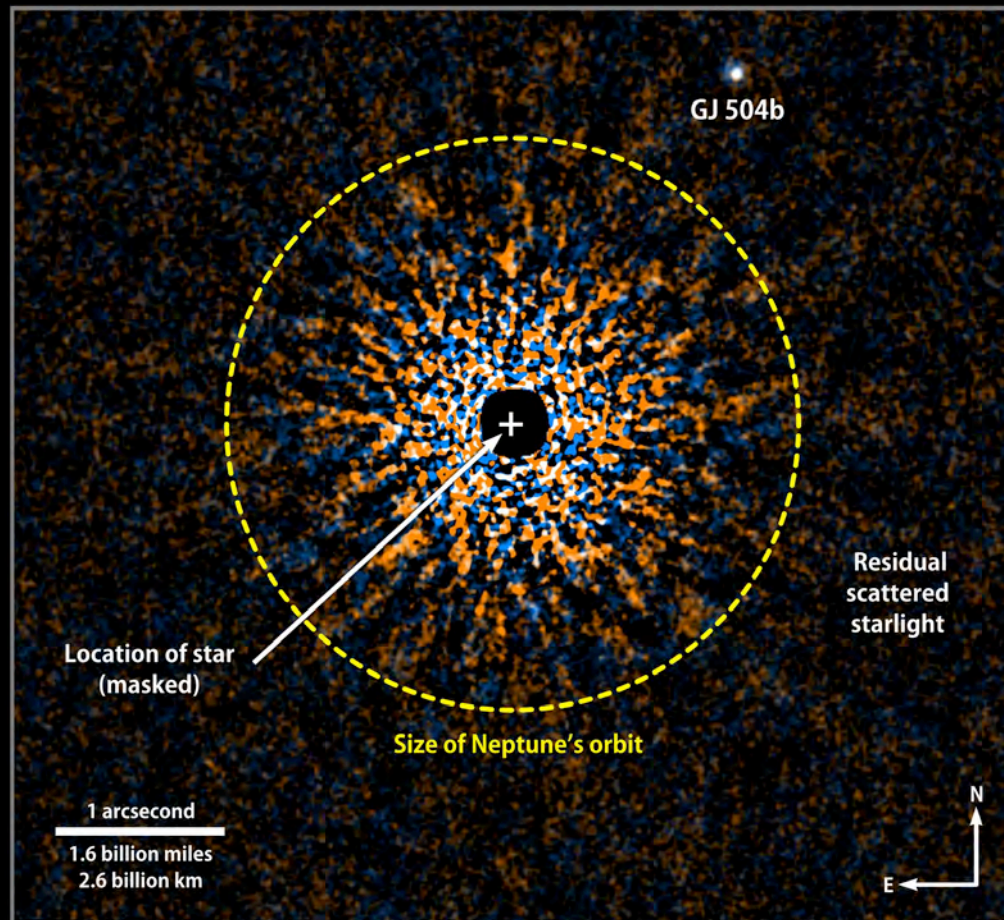
# 系外惑星直接撮像の進歩と限界

- 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 (Kuzuhara et al. 2013)

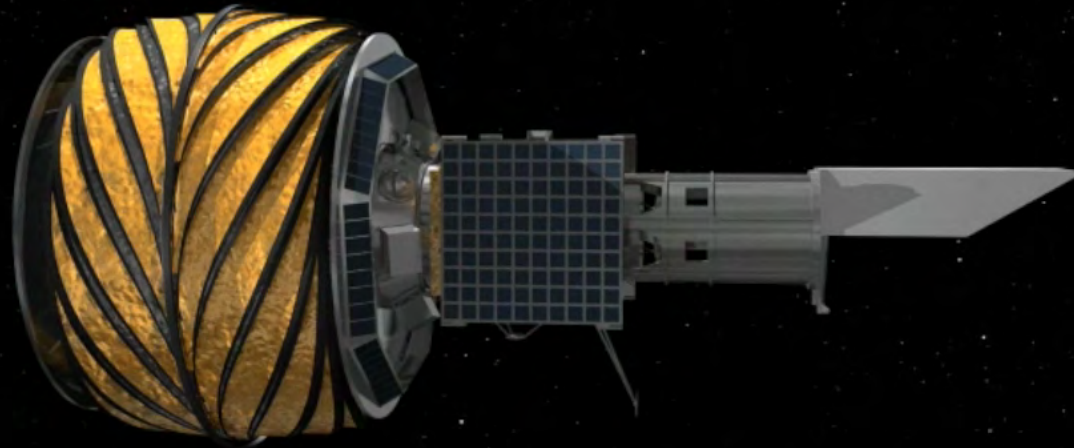
## 地球型惑星直接撮像への第一歩

- 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！



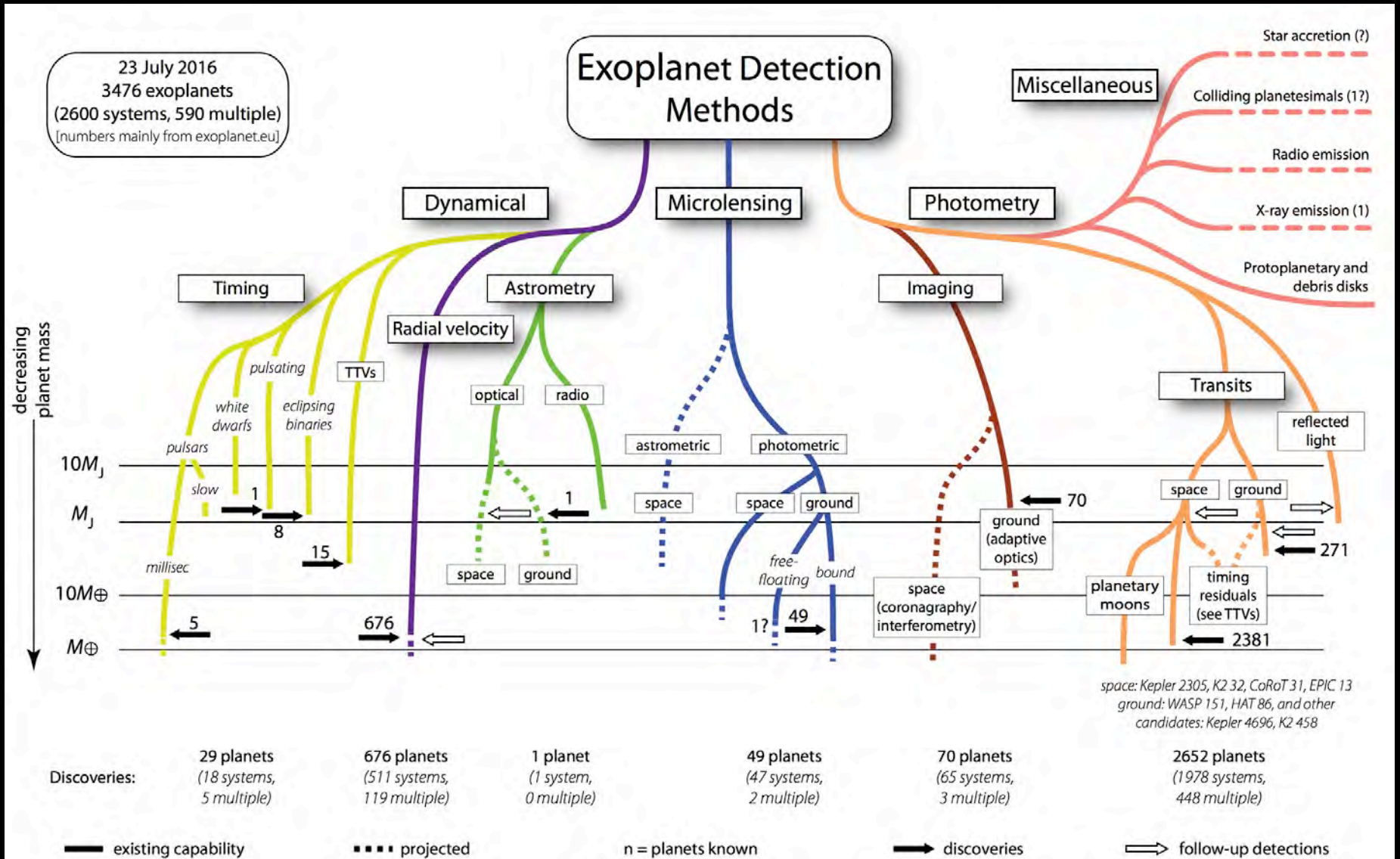


# Starshade project: 地球型惑星を直接見る



- 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)

# 太陽系外惑星検出法一覽



# 系外惑星発見数 (2016年7月)

検出方法	惑星系数	多重惑星系数	惑星総数
時刻変動	18	5	29
視線速度	511	119	676
位置天文	1	0	1
マイクロレンズ	47	2	49
直接撮像	65	3	70
トランジット	1978	448	2652
総計	2600	590	3476

# 系外惑星のリング



Planetary construction zones in occultation: discovery of an extrasolar ring system transiting a young sun-like star and future prospects for detecting eclipses by circumsecondary and circumplanetary disks

E.E.Mamajek et al. AJ 143(2012)72

## ■ Discovery of exo-ring systems in SuperWASP Data Release 1

- Primary = Pre-main-sequence K5 star (1SWASP J1404747.93-394542.6)
- $0.9M_{\text{sun}}$ ,  $0.96R_{\text{sun}}$ , 16Myr at 128pc
- rapid rotation (3.2 days),  $V=12.3$  mag
- asymmetric eclipse for 56 days around April 2007
- Outer ring extending up to 0.4AU

# Mass and period limits on the ringed companion transiting the young star J1407

M.A.Kenworthy et al., MNRAS 446(2015)411

- **Follow-up observations of J1407**
  - Imaging with VLT and Keck
  - Radial velocity
  - Photometric monitoring with Panchromatic Robotic Optical Monitoring and Polarimetry Telescopes (PROMPT)-4
- **Companion not directly identified**
  - Put limits on the mass and period

# J1407bの質量と公転周期に対する制限

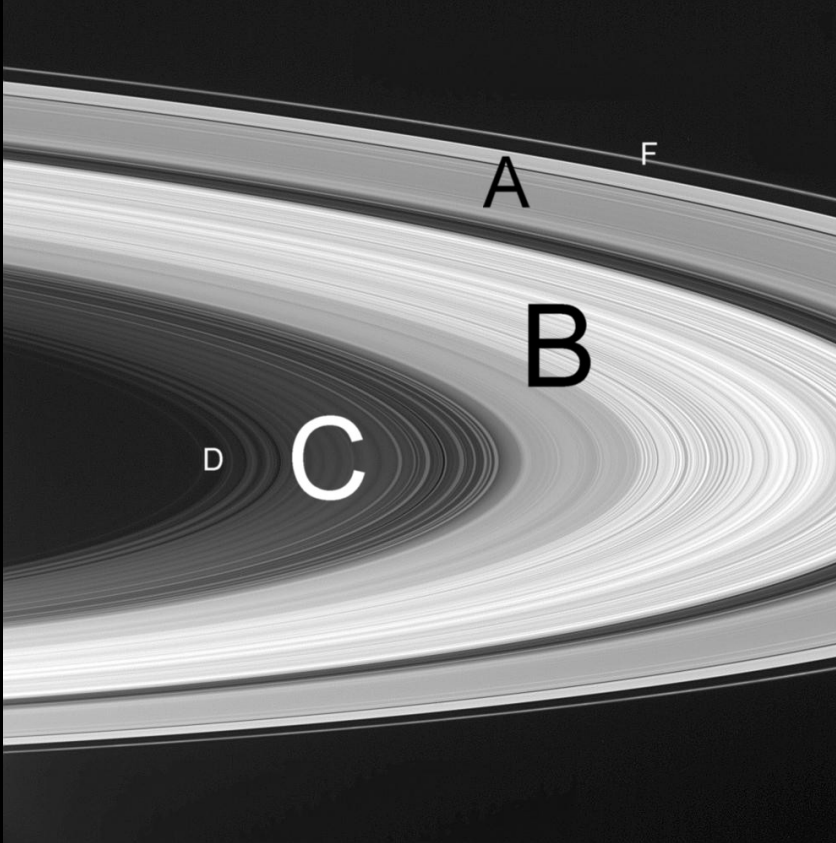
**Table 11.** Probable mass of J1407b with circular orbits.

Mass range	$\xi < 1.0$	$\xi < 0.5$	$\xi < 0.4$	$\xi < 0.3$	$\xi < 0.2$
'star' $P(M > 80 M_{\text{Jup}})$	0.04 per cent	0.05 per cent	0.07 per cent	0.15 per cent	0.02 per cent
'brown dwarf' $P(13\text{--}80 M_{\text{Jup}})$	40 per cent	48 per cent	53 per cent	59 per cent	99 per cent
'planet' $P(< 13 M_{\text{Jup}})$	60 per cent	52 per cent	47 per cent	41 per cent	2 per cent
Probable period $\bar{P}$ (yr)	9.0	9.5	10.2	12.1	12.6
Probable mass $\bar{M}$ ( $M_{\text{Jup}}$ )	13.6	15.6	17.1	16.1	26.1

**Table 12.** Probable mass of J1407b for elliptical orbits.

Mass range	$e < 0.9$	$e < 0.8$
'star' $P(M > 80 M_{\text{Jup}})$	0.5 per cent	1.2 per cent
'brown dwarf' $P(13\text{--}80 M_{\text{Jup}})$	34 per cent	71 per cent
'planet' $P(< 13 M_{\text{Jup}})$	65 per cent	28 per cent
Probable period $\bar{P}$ (yr)	27.5	13.3
Probable mass $\bar{M}$ ( $M_{\text{Jup}}$ )	14.0	23.8

# 土星のリング



name	$R_{in}$ [km]	$R_{out}$ [km]	$\tau$
D	66,900	74,120	
C	74,658	92,000	0.05-0.35
B	92,000	117,580	0.4-2.5
Cassini Division	117,580	122,170	
A	122,170	136,775	0.4-1.0
E	180,000	480,000	$1.5 \times 10^{-5}$

$$a_{Roche} = 2.4 \left( \frac{\rho_{Saturn}}{\rho} \right)^{1/3} R_{Saturn} \approx 3 \times 10^5 \text{ km}$$





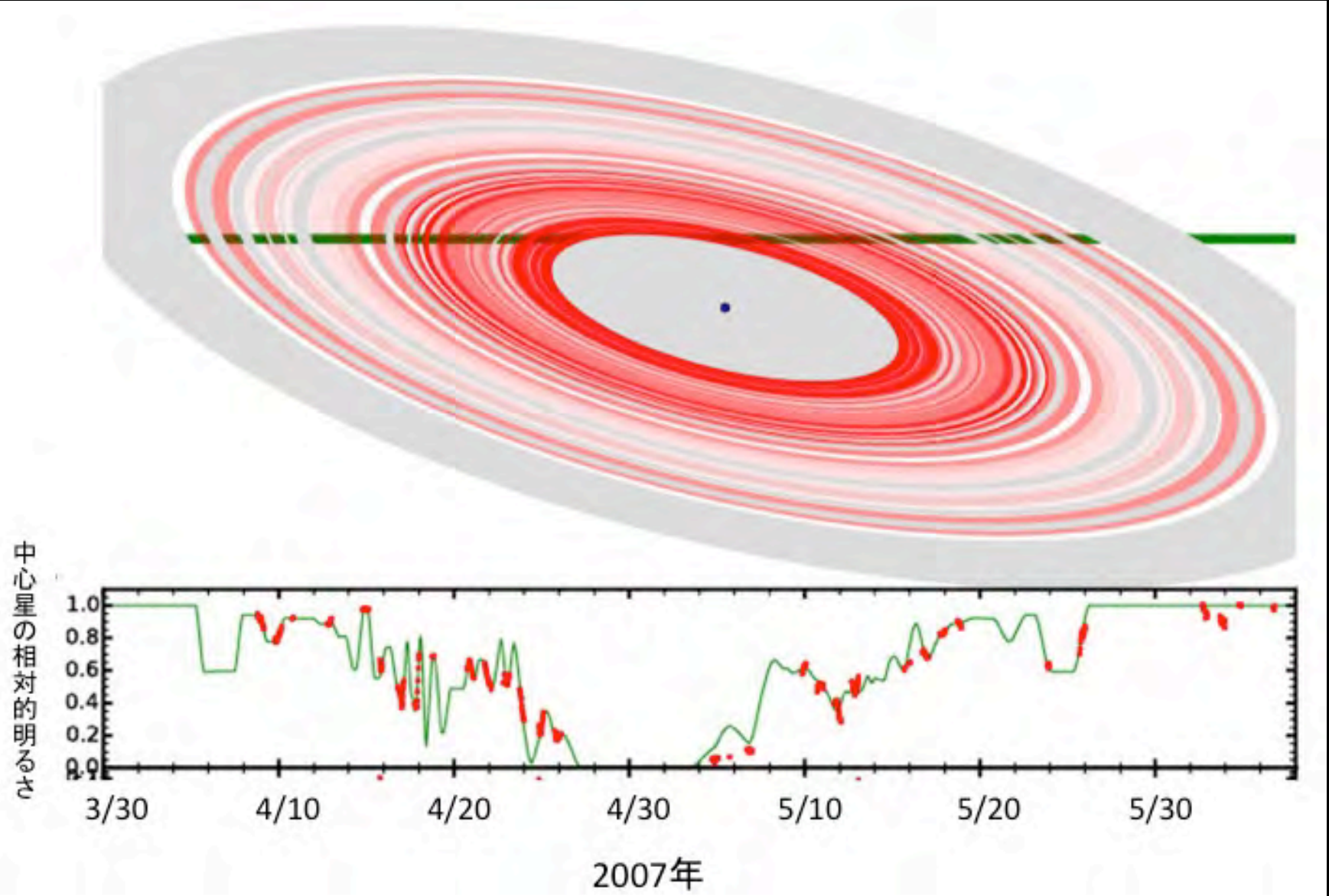
# Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of J1407b: sculpting by exomoons ?

- Detailed modeling of ring systems around J1407 M.A.Kenworthy and E.E.Mamajek ApJ 800(2015)126
  - At least 24 ring edges identified, maybe more
  - A clear gap at HJD 54210 ( $r=59-63 \times 10^6$  km). If this is the Hill radius of J1704b, exomoon of

$$m_{sat} \approx 3M_{J1407b} \left( \frac{r_{Hill}}{2a} \right)^3 \approx 0.8M_{\oplus} \left( \frac{M_{J1407b}}{23.8M_J} \right)$$

$$P_{sat} \approx 1.7 \text{ year} \left( \frac{M_{J1407b}}{23.8M_J} \right)^{-1/2}$$

# 光度曲線データから予想される J1407bのリング



# J1407bの周りの巨大リング

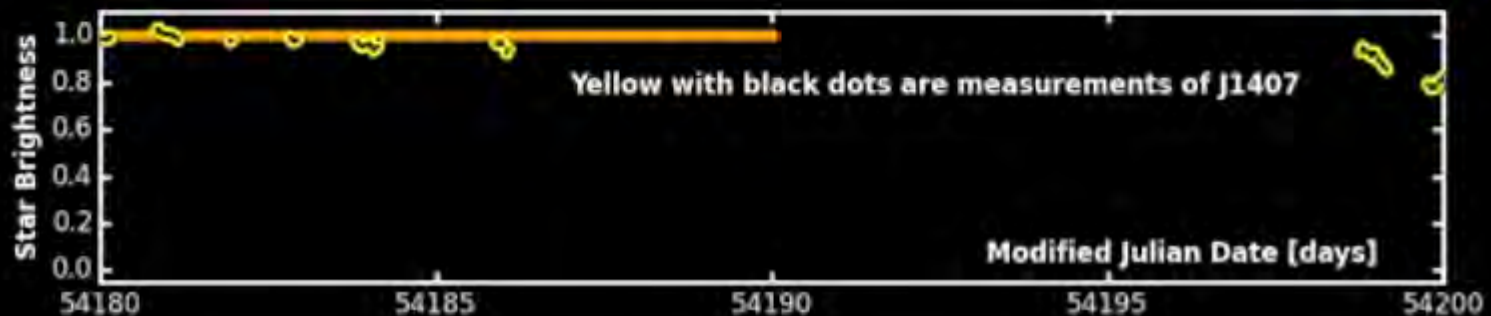
Modelling Giant Extrasolar Ring Systems in Eclipse  
and the Case of J1407b: Sculpting by Exomoons?

M.A. Kenworthy and E.E. Mamajek

2007-03-31

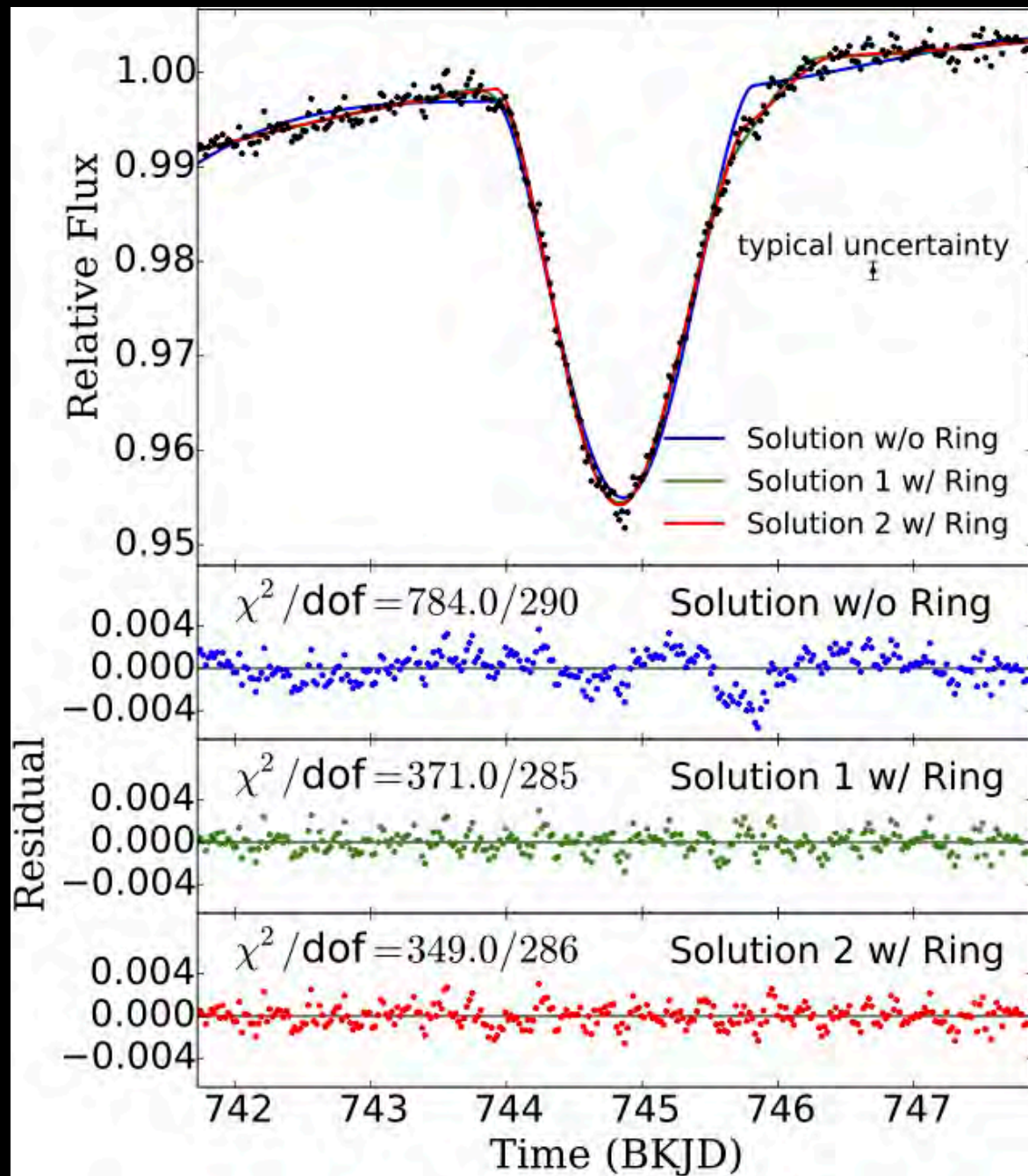
To be published in  
the Astrophysical Journal

  
The star J1407



# KIC 01043228 の光度曲 線とリング 惑星モデ ルの比較

Aizawa et al. (2016)





# KIC 01043228のリングモデル

## Solution 1

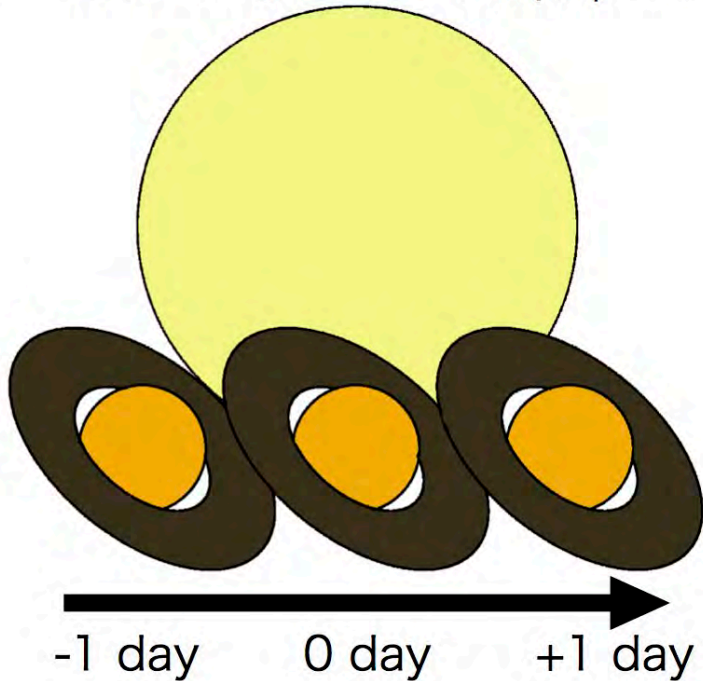
$$\theta = 50.6 \text{ deg}$$

$$\phi = 43.4 \text{ deg}$$

$$R_p/R_\star = 0.29$$

$$R_{in}/R_p = 1.26$$

$$R_{out}/R_p = 2.46$$



## Solution 2

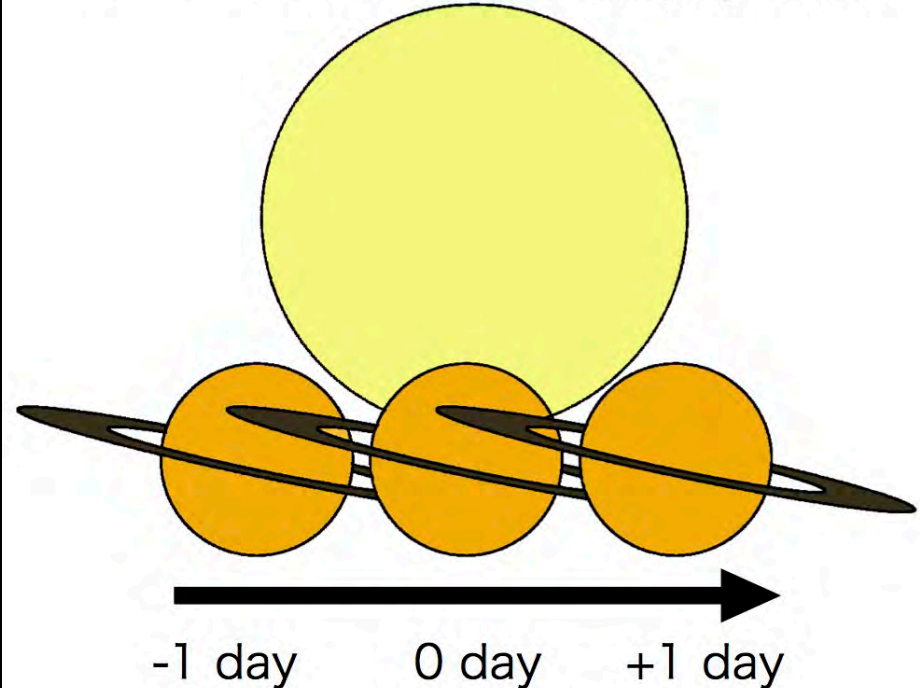
$$\theta = 12.4 \text{ deg}$$

$$\phi = 72.0 \text{ deg}$$

$$R_p/R_\star = 0.45$$

$$R_{in}/R_p = 1.59$$

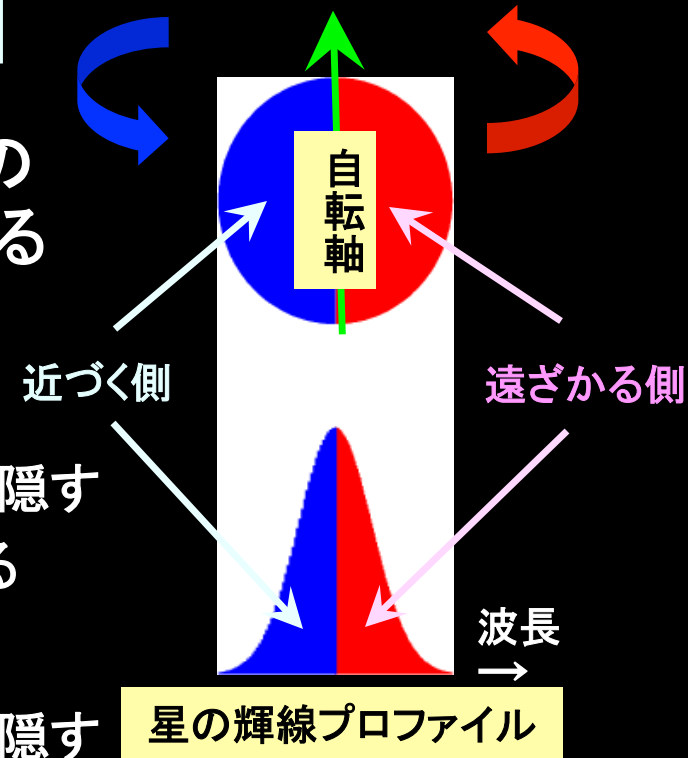
$$R_{out}/R_p = 2.55$$



主星自轉・惑星軌道公轉角

# ロシター効果と惑星公転軸

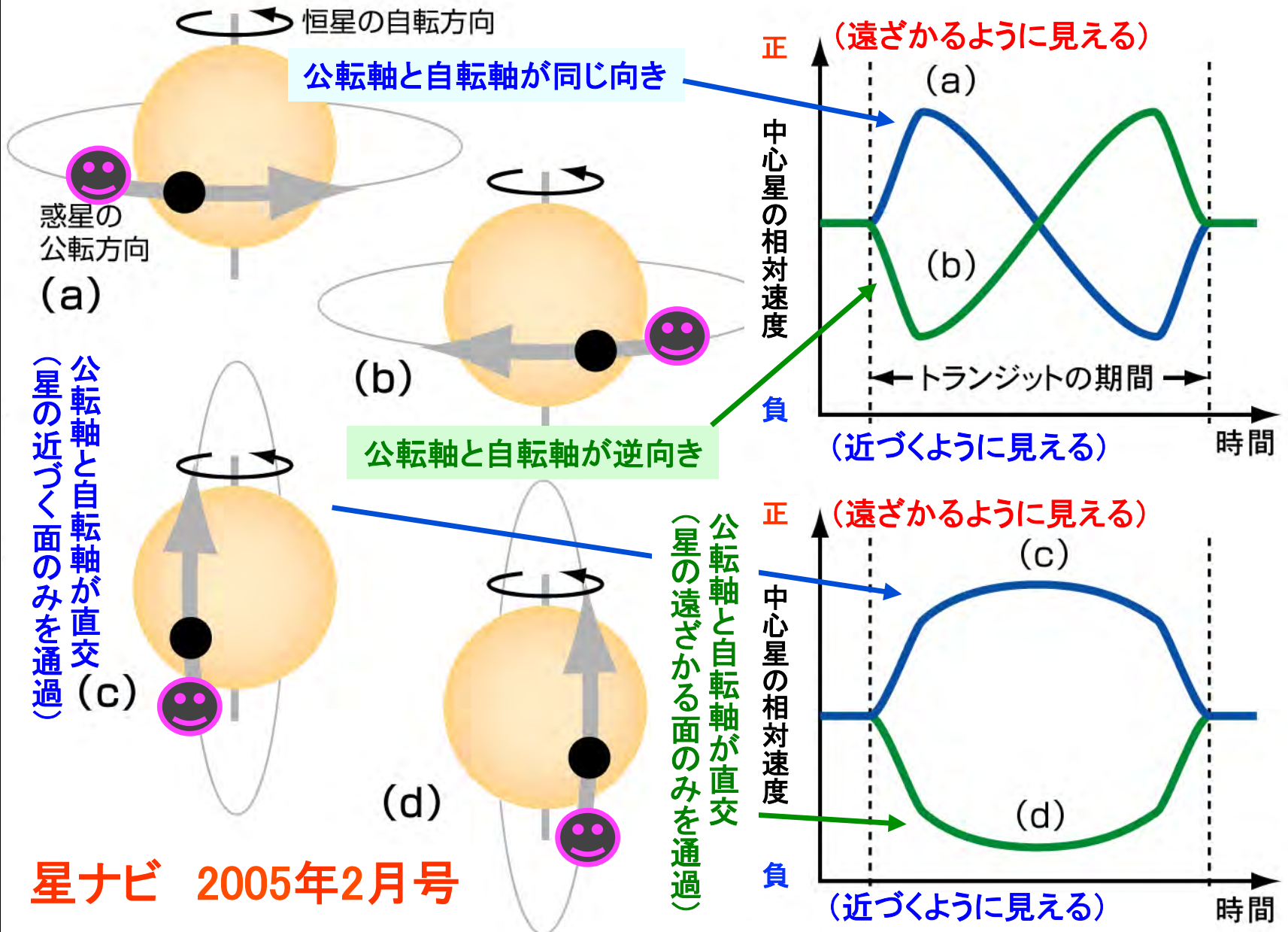
- 中心星の自転のため、星の線スペクトルの形は波長に関して左右対称に広がっている
- しかし、**トランジット惑星が同じ向き(左から右)に通過すると**
  - 中心星の近づく面を隠してから遠ざかる面を隠す
  - 星は、まず遠ざかりその後近づくように見える
- **一方、逆周り(右から左)の場合には**
  - 中心星の遠ざかる面を隠してから近づく面を隠す
  - 星は、まず近づきその後遠ざかるように見える
- **この結果、線スペクトルの形に非対称性が生まれる**
  - この波長のズレを精密に観測すれば、惑星が右回りか左回りかがわかる
  - さらに詳しく解析すると、惑星の公転面の傾きの角度までわかる！



1924年、食連星 こと座ベータ星の速度データの解析に際してロシターが発見した

**R.A. Rossiter:**  
**ApJ 60(1924)15**

# 惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図





## Ohta, Taruya & Suto: ApJ 622(2005)1118

### THE ROSSITER-McLAUGHLIN EFFECT AND ANALYTIC RADIAL VELOCITY CURVES FOR TRANSITING EXTRASOLAR PLANETARY SYSTEMS

YASUHIRO OHTA, ATSUSHI TARUYA,<sup>1</sup> AND YASUSHI SUTO<sup>1</sup>

Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan; ohta@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp, ataruya@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp, suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

Received 2004 October 13; accepted 2004 December 10

Among the recently discovered transiting extrasolar planetary systems, i.e., TrES-1 by the Trans-Atlantic Exoplanet Survey (Alonso et al. 2004) and OGLE-TR 10, 56, 111, 113, 132 by the Optically Gravitational Lens Event survey (e.g., Udalski et al. 2002c, 2002b, 2002a, 2003; Konacki et al. 2003; Bouchy et al. 2004; Pont et al. 2004), TrES-1 has similar orbital period and mass to those of HD 209458b, but its radius is smaller. Thus, it is an interesting target to determine the spin parameters via the RM effect; if its planetary orbit and the stellar rotation share the same direction as discovered for the HD 209458 system, it would be an important confirmation of the current view of planet formation out of the protoplanetary disk surrounding the protostar. If not, the result would be more exciting and even challenge the standard view, depending on the value of the misalignment angle  $\lambda$ .

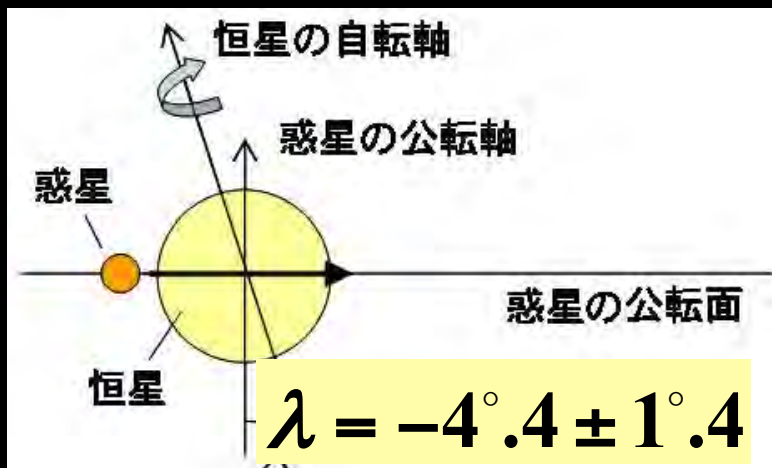
We also note that the future satellites *COROT* and *Kepler* will detect numerous transiting planetary systems, most of which will be important targets for the RM effect in 8–10 m class ground-based telescopes. We hope that our analytic formulae presented here will be a useful template in estimating parameters for those stellar and planetary systems.

In conclusion, we have demonstrated that the radial velocity anomaly due to the RM effect provides a reliable estimation of spin parameters. Combining data with the analytic formulae for radial velocity shift  $\Delta v_r$ , this methodology becomes a powerful tool in extracting information on the formation and the evolution of extrasolar planetary systems, especially the origin of their angular momentum. Although it is unlikely, we may even speculate that a future RM observation may discover an extrasolar planetary system in which the stellar spin and the planetary orbital axes are antiparallel or orthogonal. This would have a great impact on the planetary formation scenario, which would have to invoke an additional effect from possible other planets in the system during the migration or the capture of a free-floating planet. While it is premature to discuss such extreme possibilities at this point, the observational exploration of transiting systems using the RM effect is one of the most important probes for a better understanding of the origin of extrasolar planets.

主星自転軸と惑星公転軸のずれは系外惑星の起源と進化を探る重要な手がかり

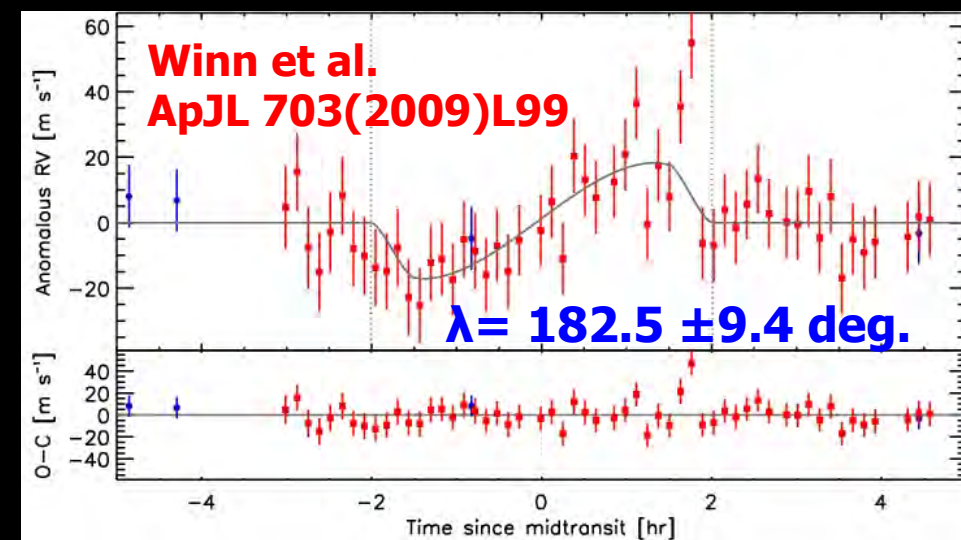
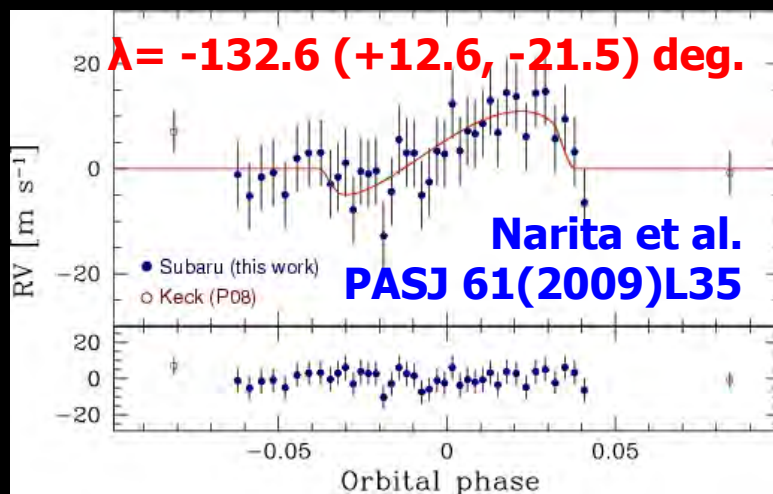
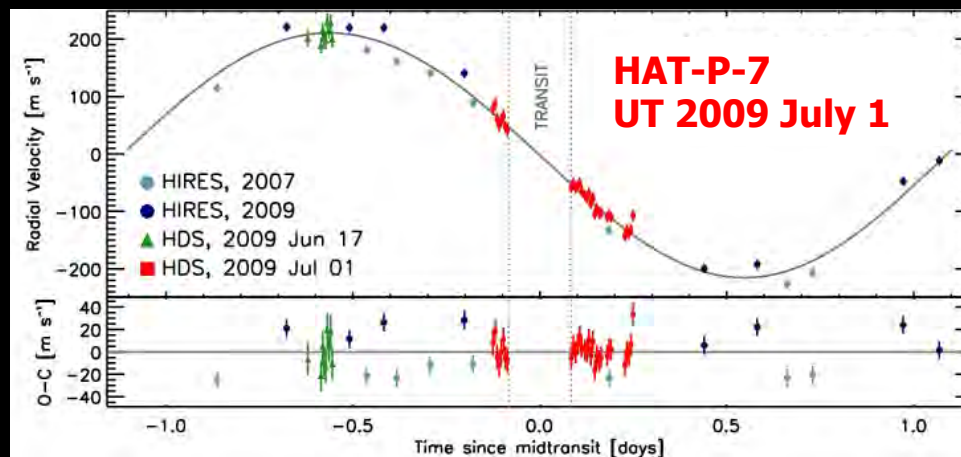
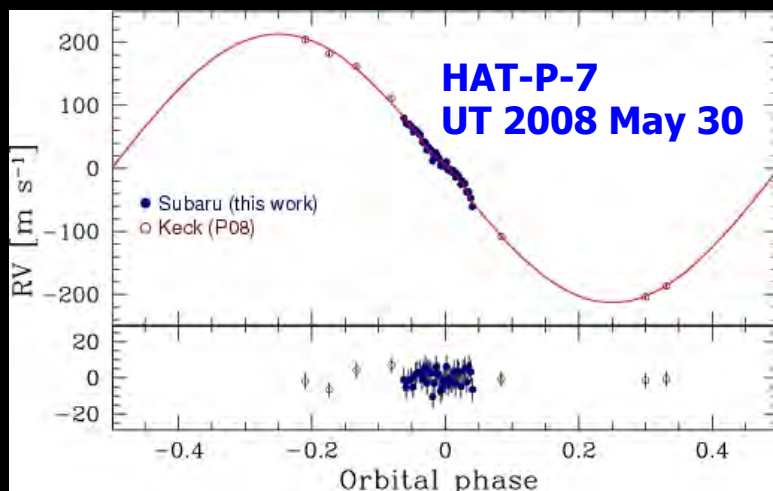
# Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System (太陽系外惑星系における自転軸と公転軸の向き の測定)

- Joshua N. Winn<sup>1</sup>, Robert W. Noyes<sup>1</sup>, Matthew J. Holman<sup>1</sup>, David B. Charbonneau<sup>1</sup>, 太田泰弘<sup>2</sup>, 樽家篤史<sup>2</sup>, 須藤靖<sup>2</sup>, 成田憲保<sup>2</sup>, Edwin L. Turner<sup>2,3</sup>, John A. Johnson<sup>4</sup>, Geoffrey W. Marcy<sup>4</sup>, R. Paul Butler<sup>5</sup>, & Steven S. Vogt<sup>6</sup>
  - <sup>1</sup>ハーバード大学、<sup>2</sup>東京大学、<sup>3</sup>プリンストン大学、<sup>4</sup>カリフォルニア大学バークレー校、<sup>5</sup>ワシントン カーネギー研究所、<sup>6</sup>カリフォルニア大学サンタクルス校
- The Astrophysical Journal 631(2005)1215 (10月1日号)





# 逆行する系外惑星(HAT-P-7)の発見



- とともにすばる望遠鏡@ハワイでの成果
- でも逆行軌道の惑星なんて、どうやったら出来るの???

# 私的先入観の時間的推移 (1)

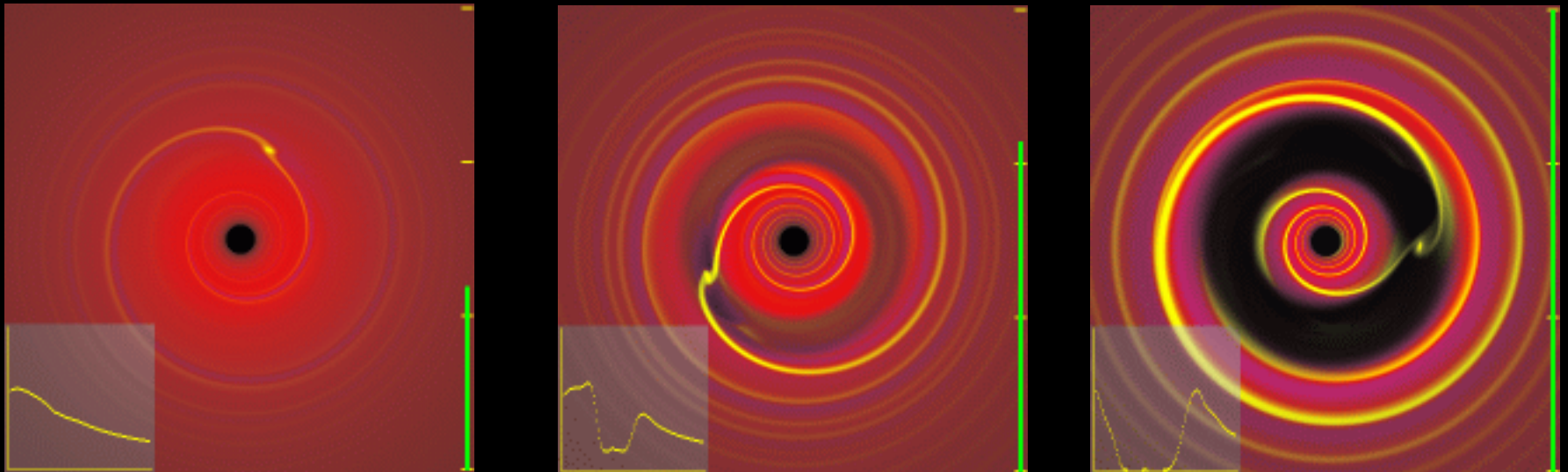
- **2005年**: (Ohta et al., Winn et al.)
  - 惑星公転軸と主星自転軸とは当然平行のはず
- **2009年**: 多くのmisaligned惑星発見(ただし実質的に単独のホットジュピターのみ)
  - 惑星間の重力散乱が悪さをしているのでは?
    - 外側で誕生したガス惑星が、他の惑星との重力散乱の結果内側に落ちる(放出されるものもある)
    - 軌道は一般に高離心率、傾斜角も大きい
    - その後、主星との潮汐相互作用を通じて順行(一部は逆行)軌道へ近づく



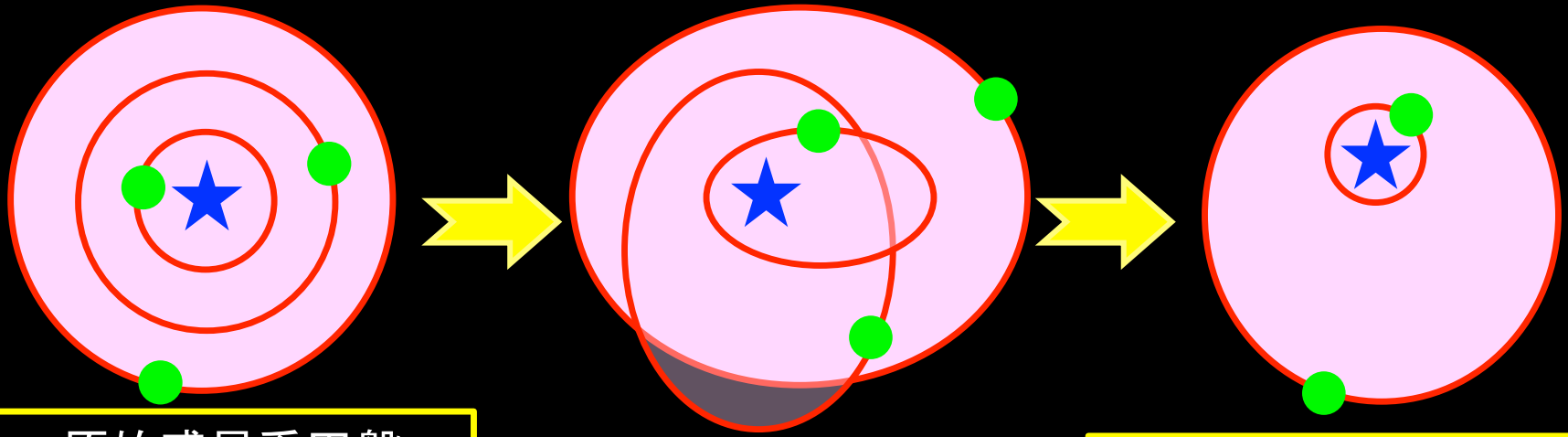
# 代表的な惑星移動シナリオ

- **Type I migration**
  - Low-mass planet - spiral wave in the gas disk
- **Type II migration**
  - High-mass planet - gap in the disk
- **Gravitation scattering**
  - Planet - planet

Simulation by Phil Armitage



# 惑星間重力散乱 + 主星・惑星潮汐作用 = 円軌道のホットジュピター + 遠方の高離心率軌道の惑星



- 原始惑星系円盤
- ダスト沈殿・成長
- 微惑星形成・合体
- 円軌道の原始惑星
- ガス降着によるガス惑星の誕生

- 重力少数多体系
- カオス的力学進化
- 近接散乱
- 軌道交差
- 惑星放出

- 古在機構
- 主星自転軸と惑星公転軸のずれ
- 主星・惑星潮汐作用
- 軌道収縮
- 円軌道化
- ホットジュピターの誕生

太陽系形成標準モデル  
(京都モデル・林モデル)



# この仮説から予想されるホットジュピター

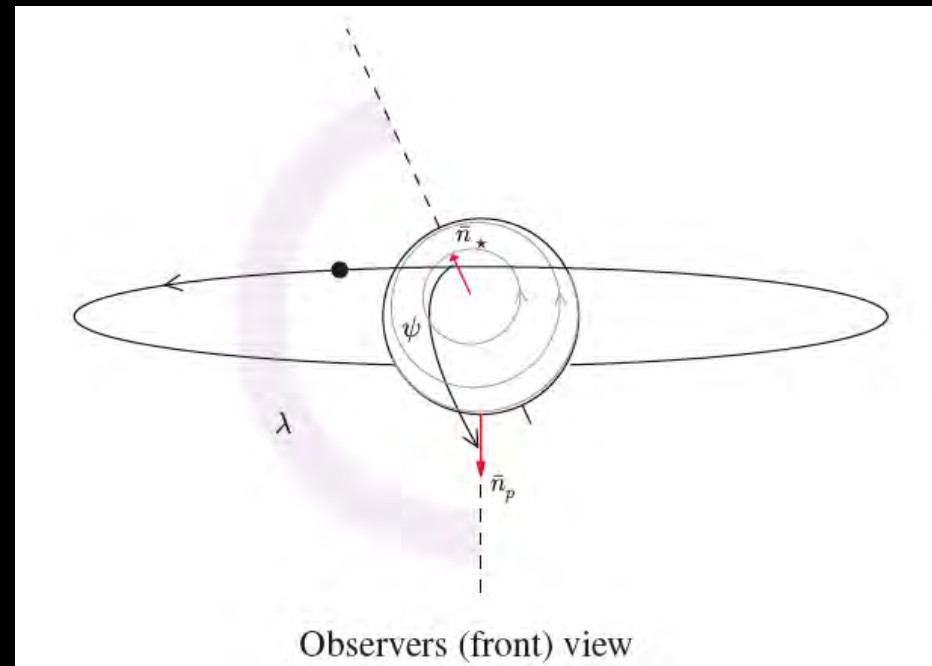
- 外側で誕生したガス惑星が、少数多体系の重力散乱で内側に落ちる
- 軌道は一般に高離心率、傾斜角も大きい
- 主星自転軸とも惑星公転軸は大きくずれているが、その後の潮汐相互作用を通じて順行（あるいは一部は逆行）軌道へ近づいて行く
  - 太陽系は強い重力散乱を経験していないため、ホットジュピターはなく、惑星の公転軸と太陽の自転軸はすべてほぼ平行のまま



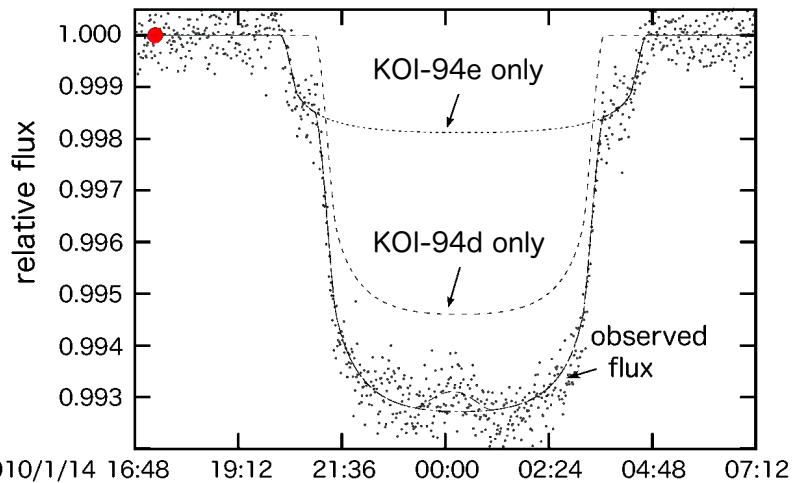
# 私的先入観の 時間的推移 (2)

## ■ 2010年

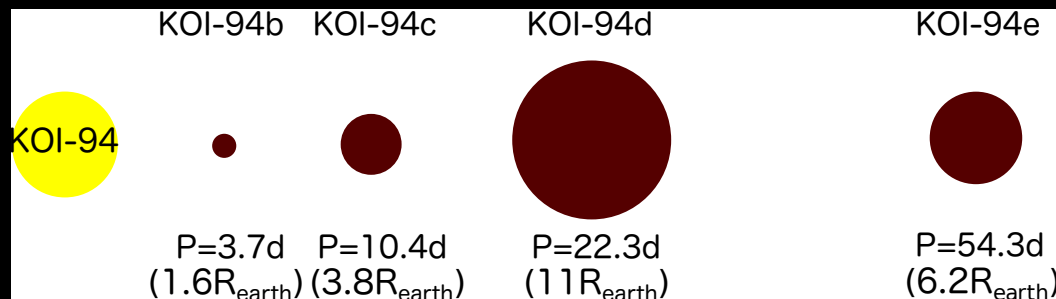
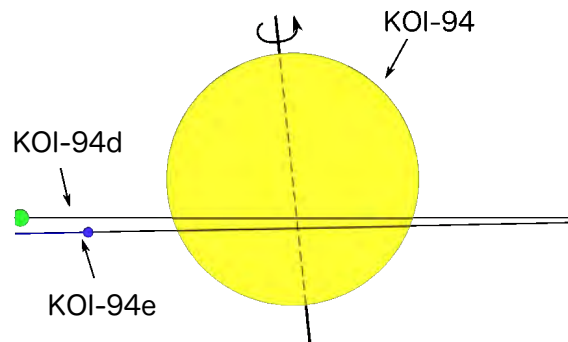
- 太陽系のように公転面をほぼ共有する複数惑星系では、惑星間の重力散乱が効いたとは思えない
- 実際、太陽系では太陽の自転軸と惑星の公転軸は5、6度の範囲でほぼ揃っている
- とすれば**複数トランジット惑星系** (公転面がほぼ同じ) の $\lambda$ はほぼ0のはず  $\Rightarrow$  すばるで観測して確認しようじゃないか! (Hirano et al.)



# 多重トランジット惑星系KOI-94: 惑星食の初検出

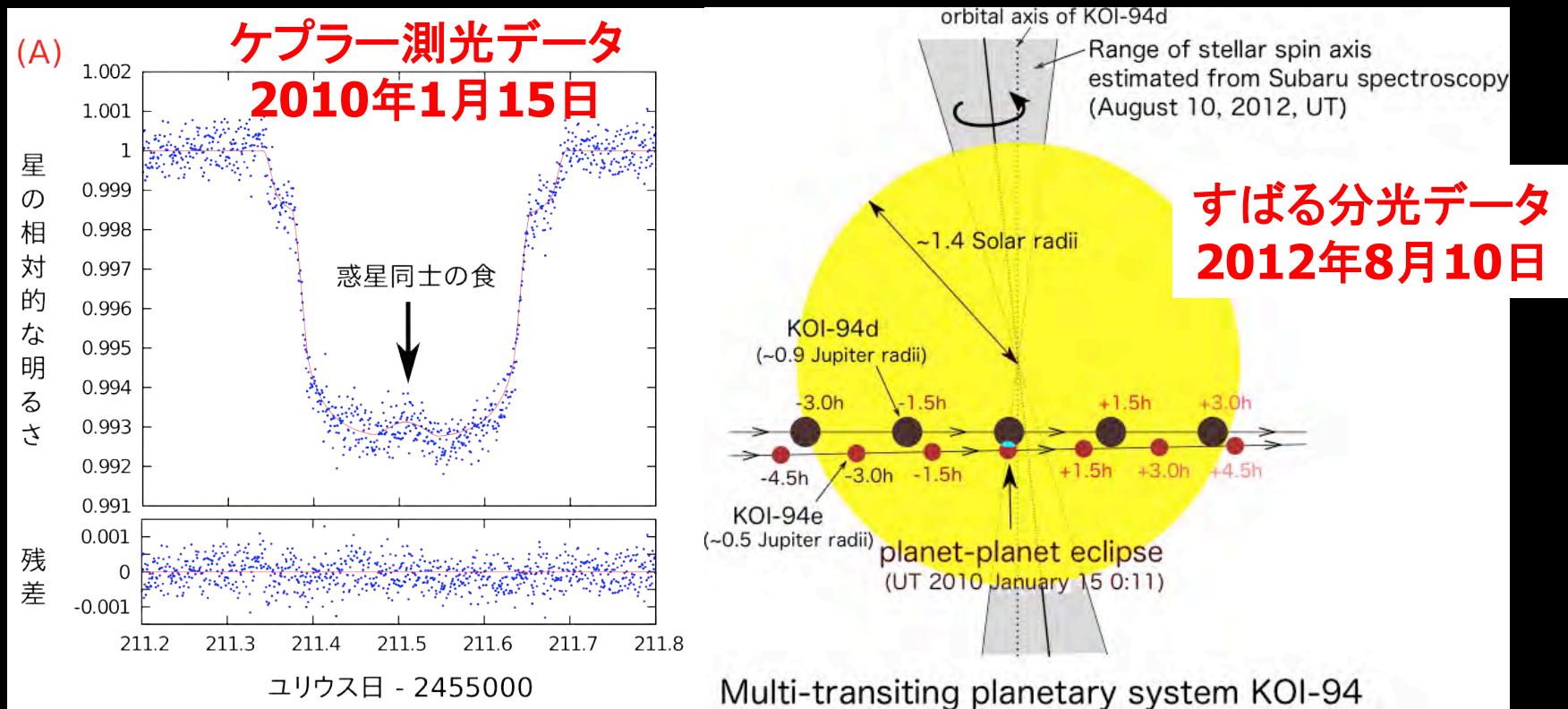


2010/1/14 17:16:48



- すばる観測前にケプラー衛星測光データを確認中、初めての惑星食を偶然発見
- すばる望遠鏡のロシター効果観測で、主星自転軸と惑星公転軸がほぼ揃っている事を発見

# KOI-94: ロシター効果と惑星食



- 惑星食の確率は極めて低いので、これが最初で最後の例かも？
- 地球からみて金星と水星が同時に太陽面を通過(トランジット)するのは、西暦69163年7月26日と西暦224508年3月27日だけらしい。しかもこれは単なる同時トランジットで、惑星食ではない。



# 私的先入観の時間的推移 (3)




- 2012年 (Hirano et al., Masuda et al.)
  - 複数トランジット惑星系で初めてロシター効果が観測されたKOI-94は $\lambda = -6^{\circ+13^{\circ}}_{-11^{\circ}}$ で、予想通り確かにほぼ平行だった
  - ついでに**惑星食を発見**。その後の増田君による詳細な解析が認められて、**惑星系候補 KOI-94は惑星系Kepler-89**として承認された (多分日本人でKepler番号を確定させたのは初めて)
  - めでたしめでたし、、、(?)





# 増田君のTTV解析の結果が 評価されて、惑星系候補 KOI-94が惑星系Kepler-89 として正式認定



Kepler number for KOI-94  

 **Solange Ramirez** solange@ipac.caltech.edu utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp [経由](#) 2013/10/31  

To masuda, keplernumber 

 英語 ▾ > 日本語 ▾ [メッセージを翻訳](#) 次の言語で無効にする: 英語 ×

Dear Kento Masuda,

Congratulations on the publication of your discovery of the planetary system around KOI-94 (KIC 6462863).

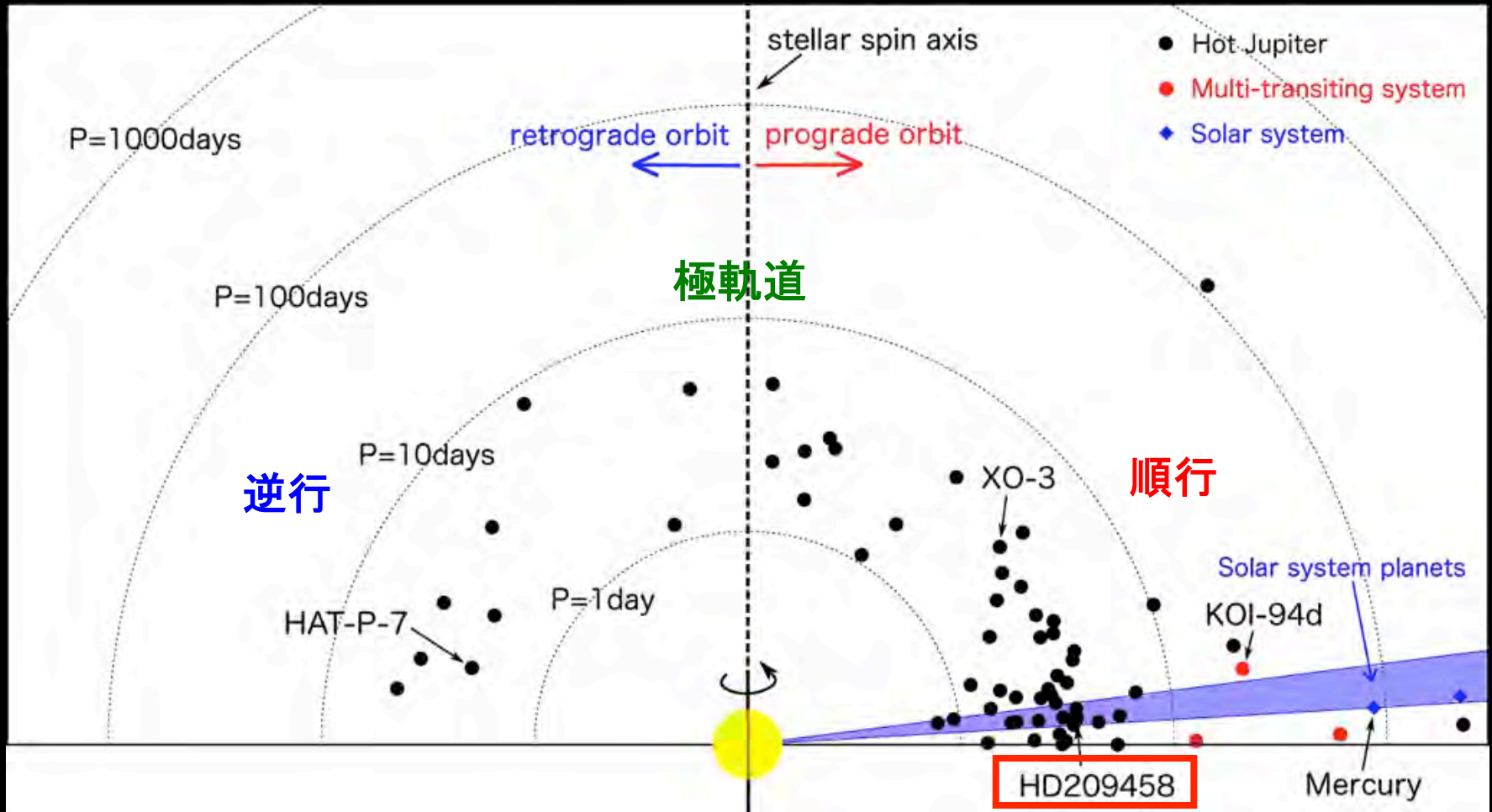
It is our policy to assign Kepler numbers to all confirmed planets that have been observed by the Kepler Mission. The Kepler name that corresponds to KOI-94 is Kepler 89, with the same planet letters as assigned in your paper.

We look forward to seeing more planets confirmed by your group.

Thanks,

Solange V. Ramirez  
(on behalf of the NASA Exoplanet Archive)

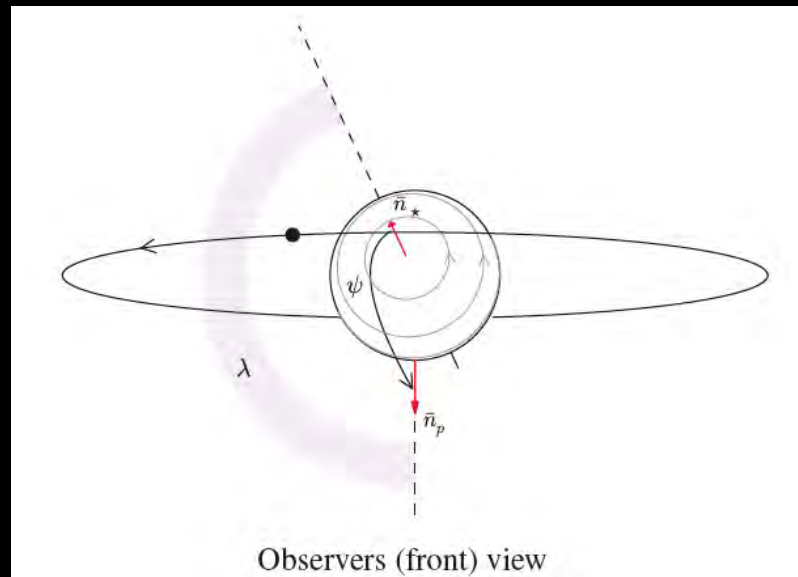
# 主星自転軸と惑星公転軸のまとめ (天球上の射影角なので3次元角度ではない)



2013年6月時点でRM効果が測定されたトランジット惑星70個中29個が $\pi/8$ 以上の有意なずれ。うち、8個が極軌道、7個が逆行軌道。

Xue et al. (2014)

# 私的先入観の 時間的推移 (4)



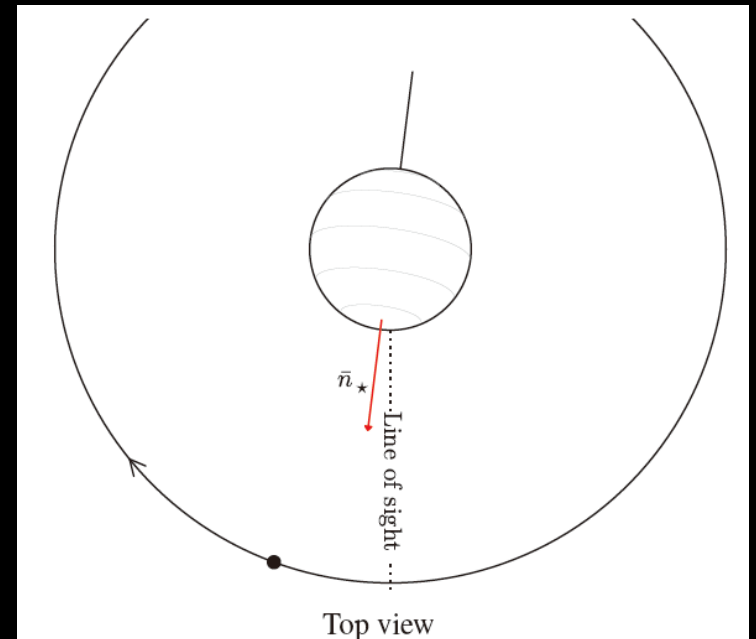
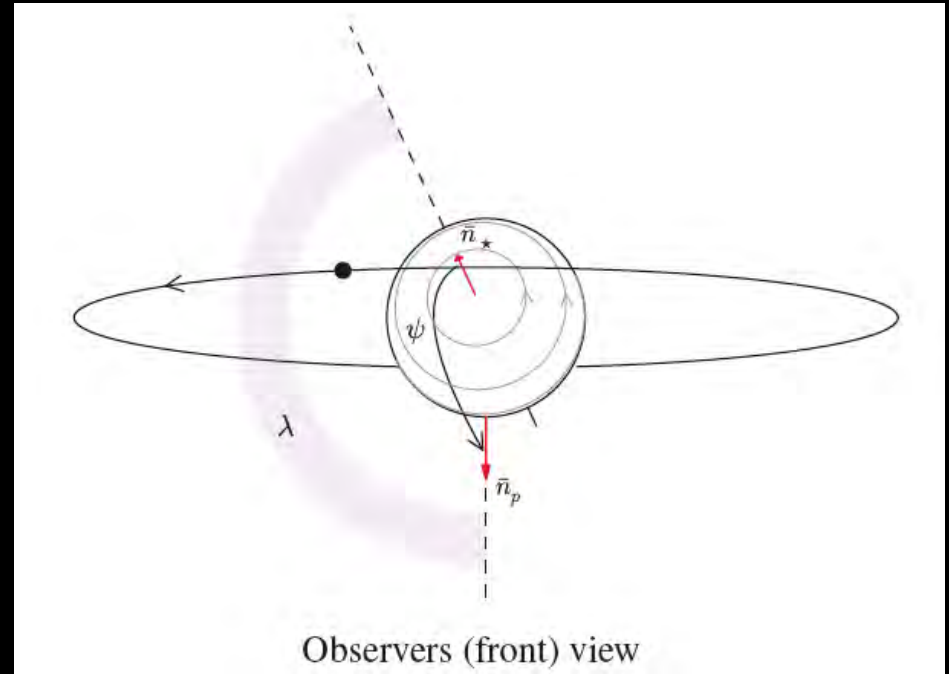
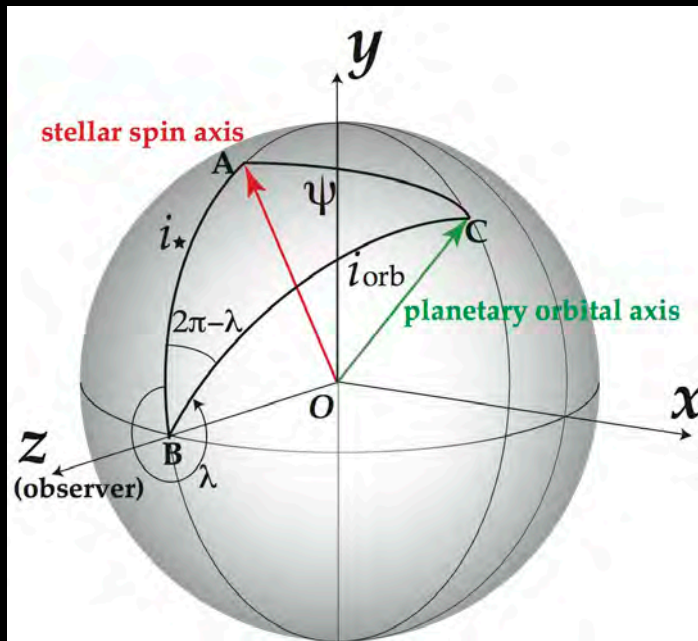
- **2013年** (Huber et al. Science 342, 331)
  - Kepler-56 = red giant ( $1.3M_s$ ,  $4.3R_s$ ) + 10.5day and 20.4day planets
  - **Asteroseismology解析の結果、主星の自転軸が  $47 \pm 6$ 度傾いていることがわかった**
  - 惑星公転軸と主星自転軸も同程度ずれているはず
  - 複数トランジット惑星系でもspin-orbit角は有意に0からずれている! ?

# 私的先入観の時間的推移 (5)

- **2014年** (Benomar, Masuda, Shibahashi+YS)
  - 中心星が主系列星の場合を知りたい
  - Asteroseismologyをやってみたい
  - Kepler-25 = F-type star ( $1.2M_{\odot}$ ,  $1.4R_{\odot}$ ) + 6.2day and 12.7day transiting planets + 123day non-transiting planet
  - Kepler-25c:  $\lambda = 7^{\circ} \pm 8^{\circ}$ 、 $-0.5^{\circ} \pm 5.7^{\circ}$ の2つの以前の観測結果はいずれも0と一致
  - $\lambda$ ではなく、3次元的なspin-orbit角を知りたい (逆行惑星と考えられているHAT-P-7も)



# 主星-惑星-観測者の位置関係



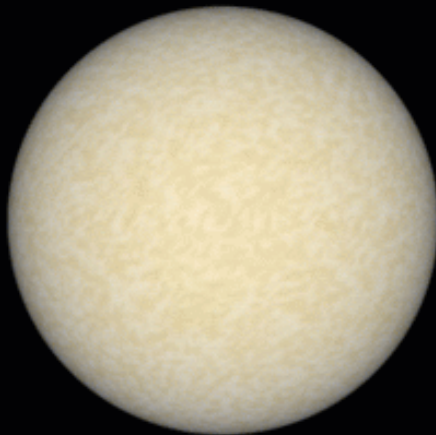
Benomar et al. 2014, PASJ 66, 9421,  
arXiv:1407.7332

Lund et al. 2014, AA 570, A54  
arXiv:1407.7516

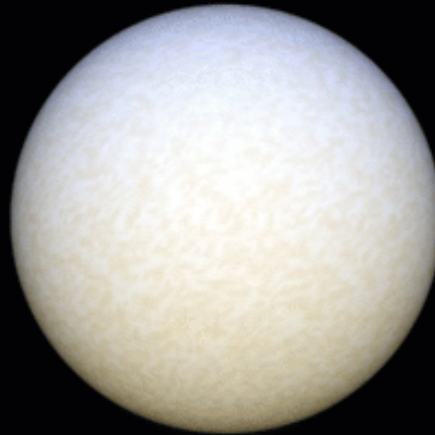
# Non-radial oscillations $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ (spherical degree $l=1$ )

**azimuthal order**

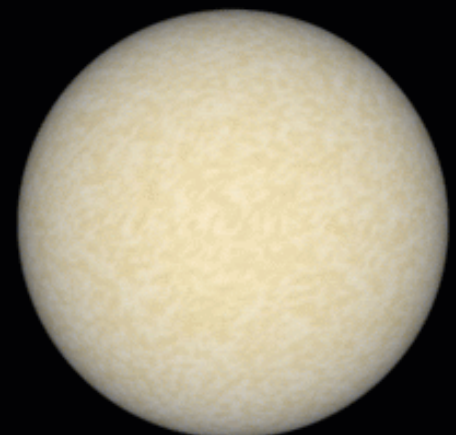
**$m=-1$**



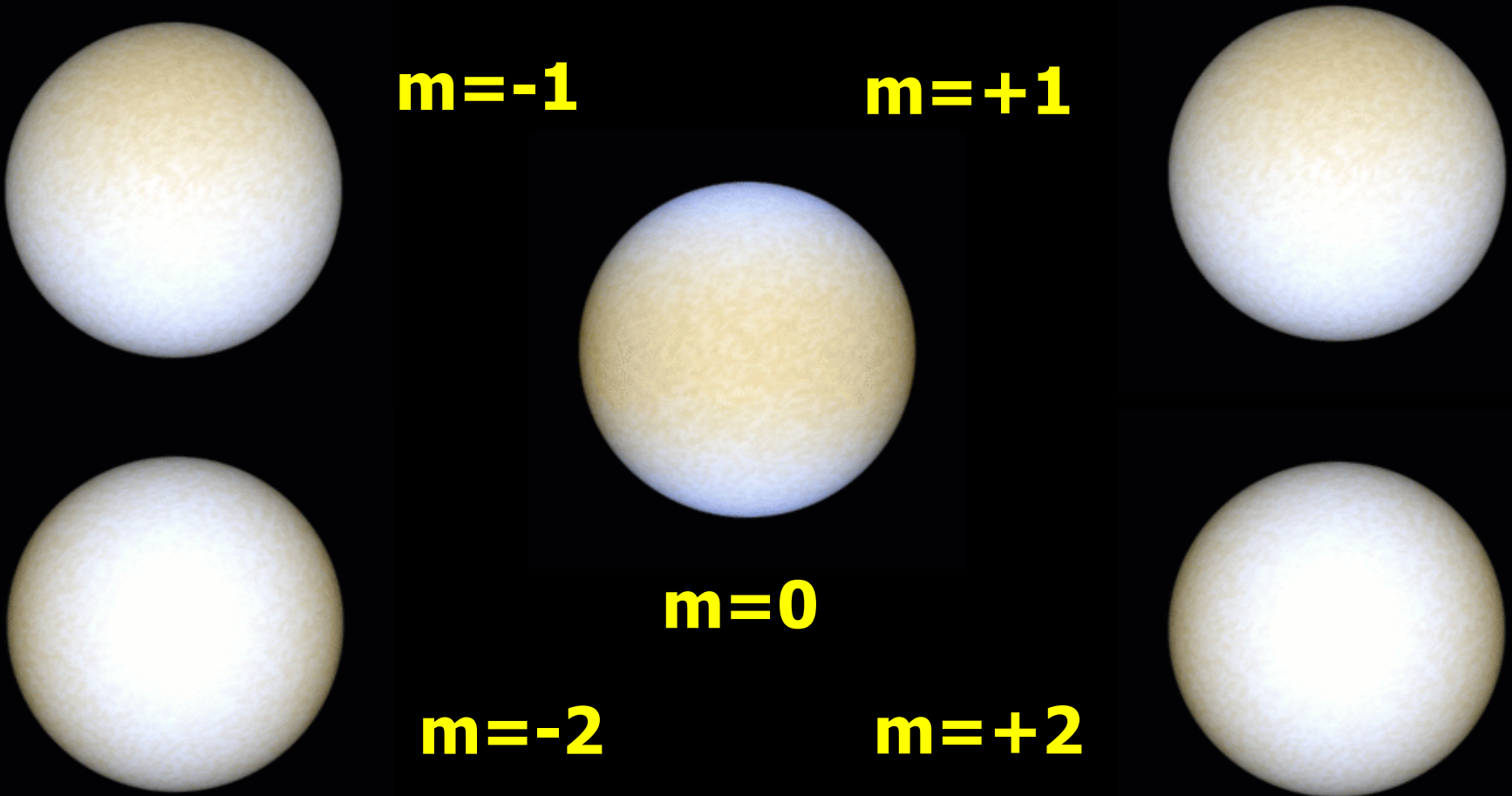
**$m=0$**



**$m=+1$**



# Non-radial oscillations $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ (spherical degree $l=2$ )



# Stellar inclination ( $l=3$ )

$m=\pm 3$

$m=\pm 2$

$m=\pm 1$

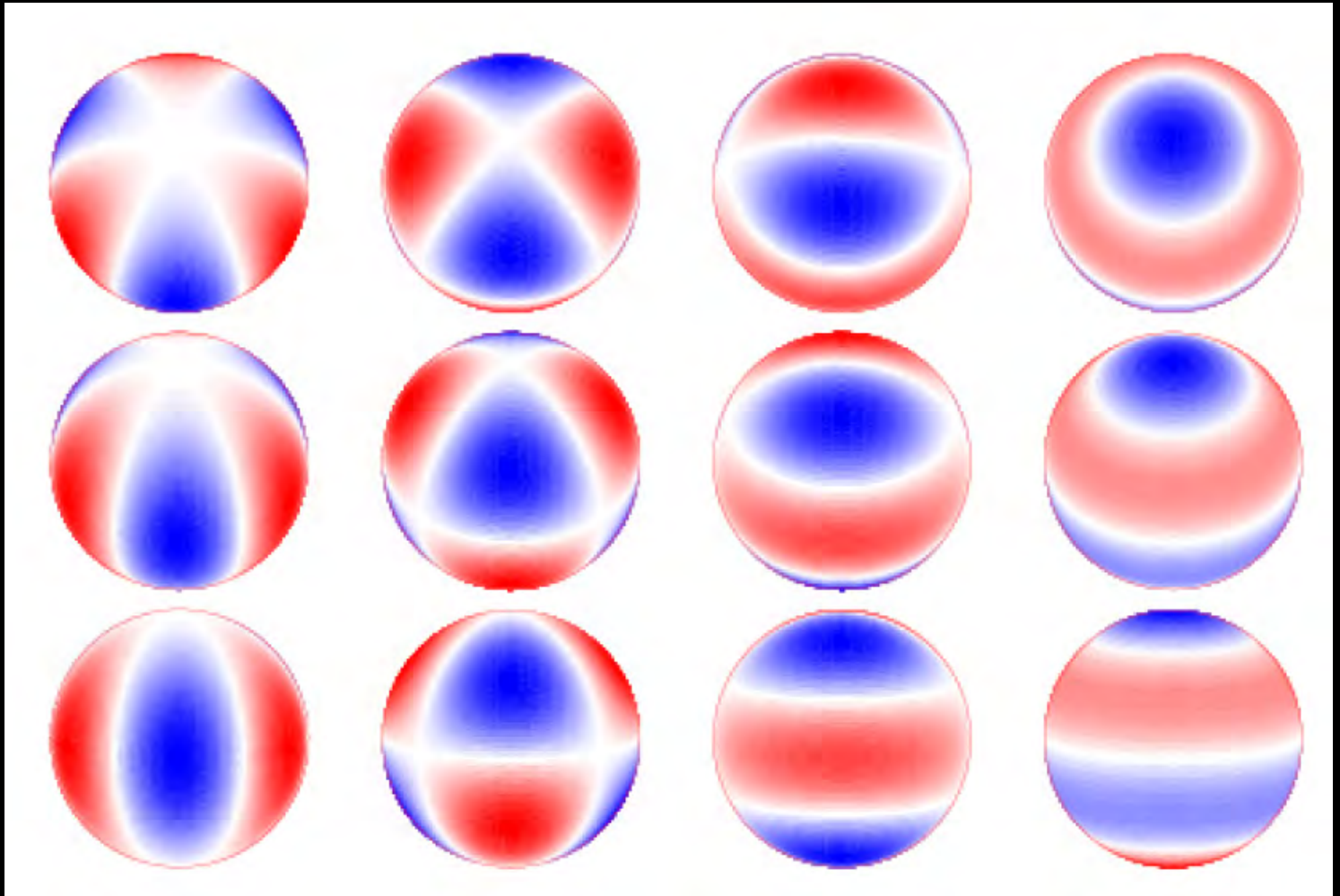
$m=0$

$i_s$

$30^\circ$

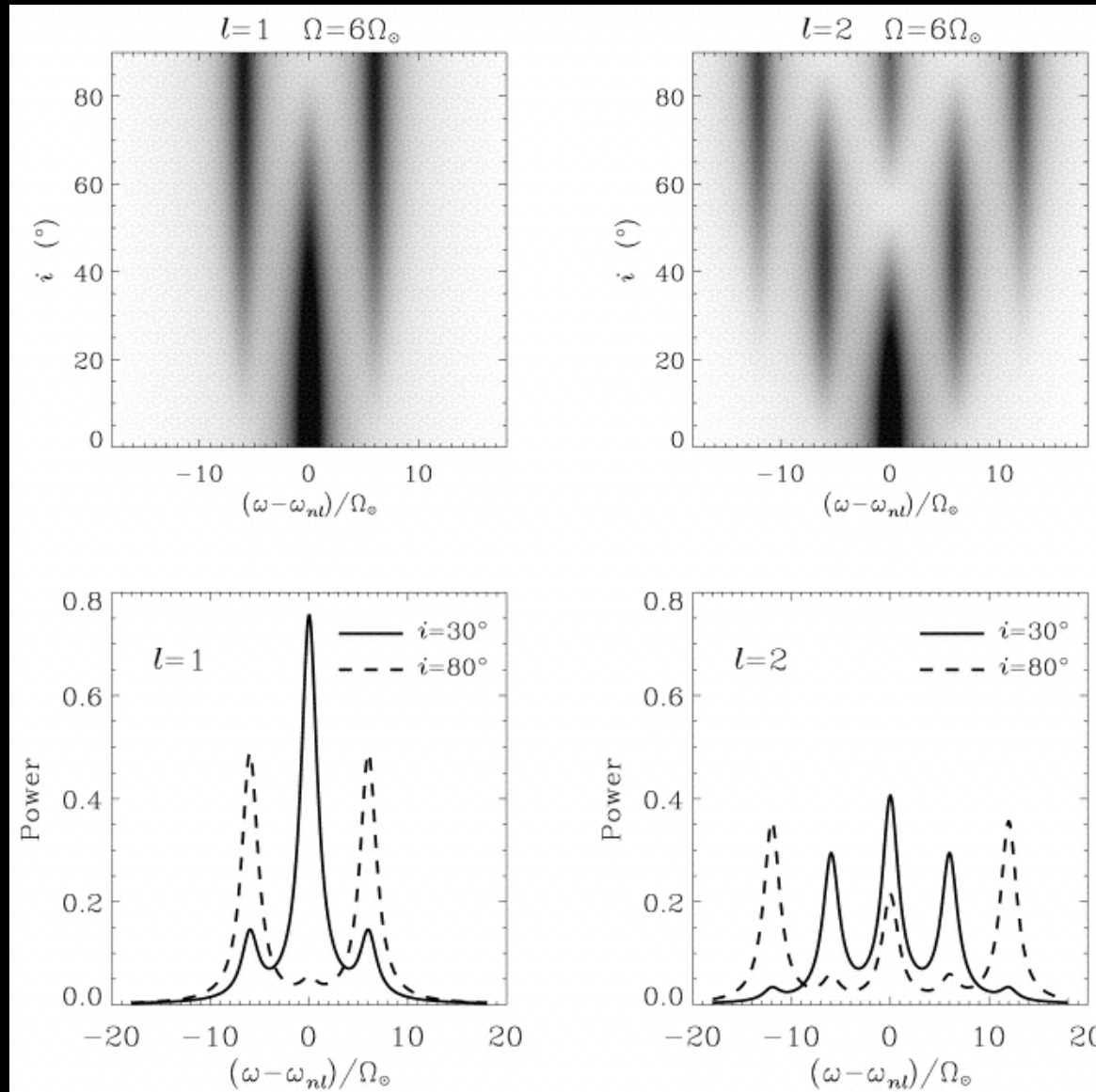
$60^\circ$

$90^\circ$

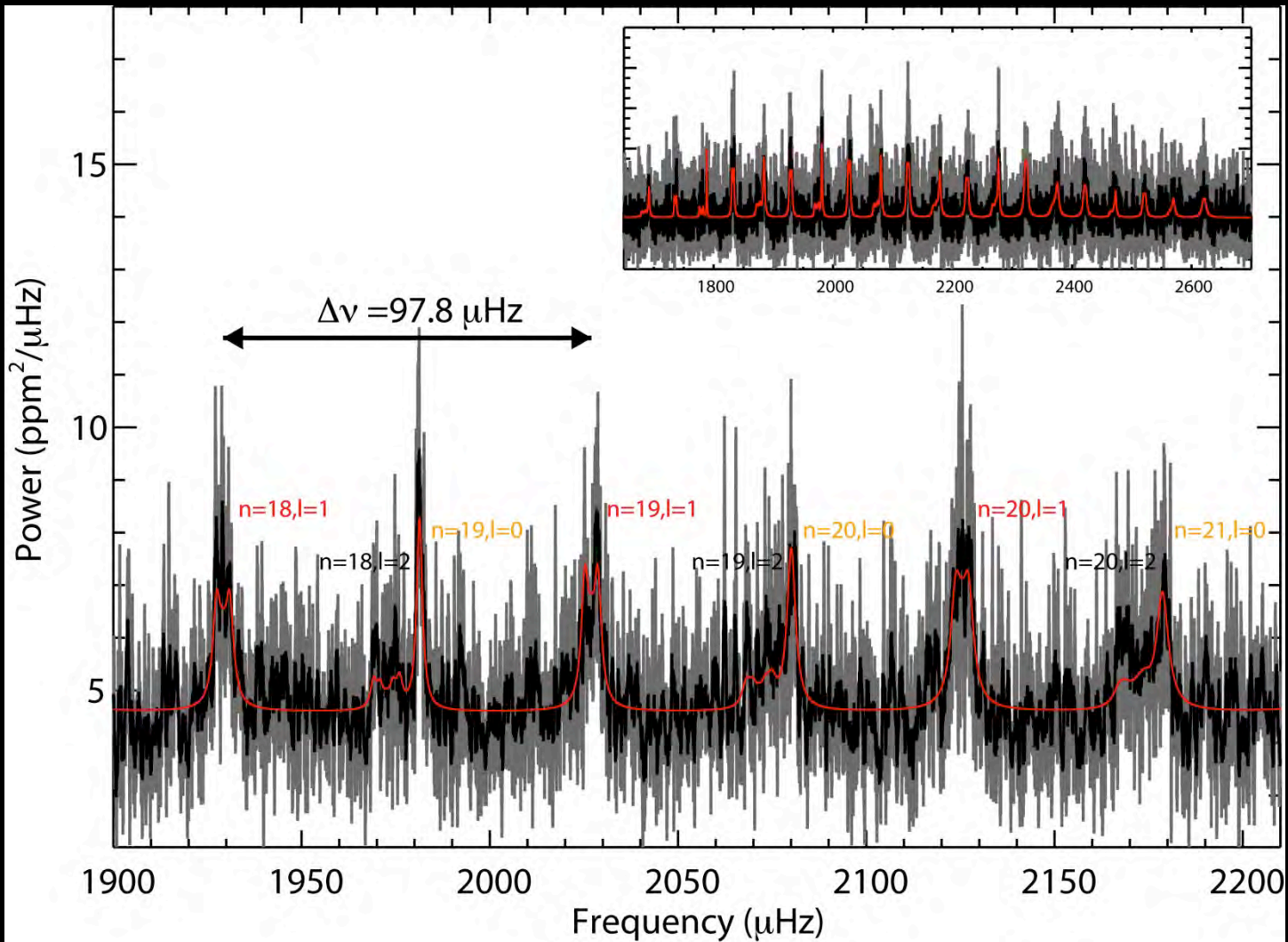




# Power spectra of $l=1$ and $2$ modes



# Power spectra of Kepler-25



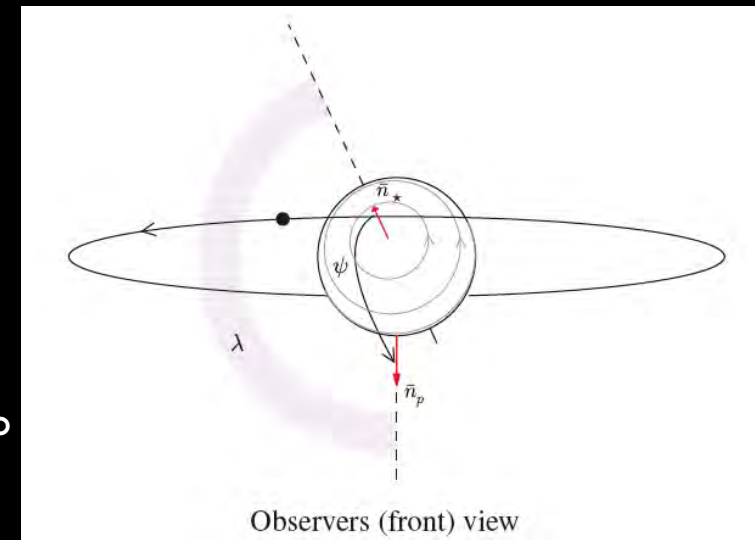
# Kepler-25とHAT-P-7のspin-orbit角

## ■ Kepler-25 (2重トランジット惑星系)

- 主星自転傾斜角  $i_s = 65.4^\circ \text{ }^{+12.1^\circ}_{-7.4^\circ}$
- 射影角  $\lambda = 9.4^\circ \pm 7.1^\circ$
- 3次元角  $\psi = 26.9^\circ \text{ }^{+7.0^\circ}_{-9.2^\circ}$

## ■ HAT-P-7 (逆行惑星候補)

- 主星自転傾斜角  $i_s = 27^\circ \text{ }^{+35^\circ}_{-18^\circ}$
- 射影角  $\lambda = 186^\circ \text{ }^{+10^\circ}_{-11^\circ}$
- 3次元角  $\psi = 122^\circ \text{ }^{+30^\circ}_{-18^\circ}$



# 未解決の興味深い問題

## ■ Nature vs. Nurtureの一例?

- 初期条件: 共通の原始惑星系円盤から誕生した主星と惑星は同じ向きに回っているはずじゃなかったの?
  - Eve Ostriker@Princeton「そんなこと誰が言った!?!」
- 力学的進化
  - 主星の誕生
  - 主星-円盤相互作用
  - 惑星の誕生
  - 惑星間の重力散乱
  - 主星-惑星の潮汐相互作用
- 数値シミュレーション、理論モデル、観測提案、データ解析でやるべきことが山積



# バイオシグニチャー

# ハビタブル惑星候補

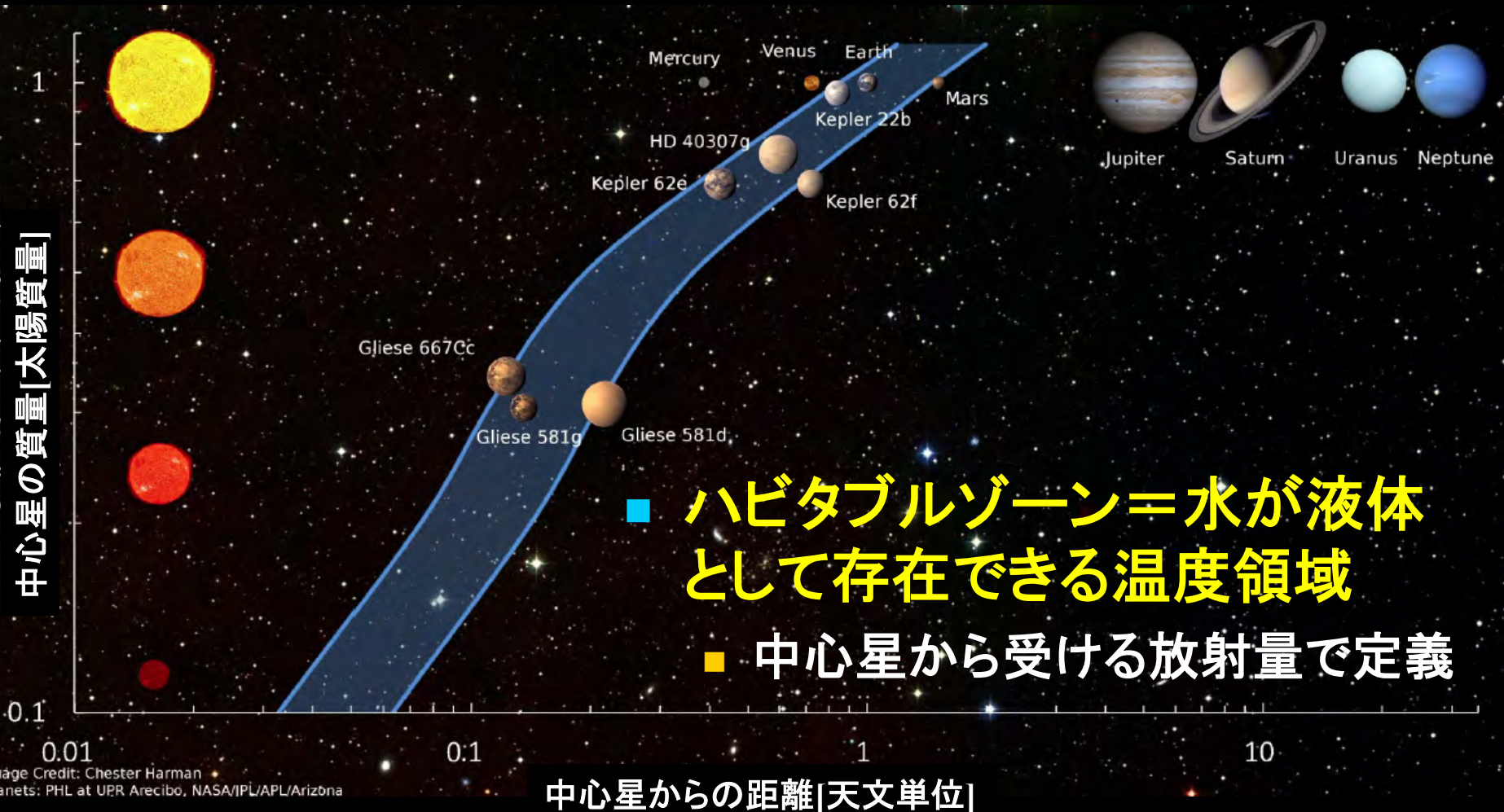


Image Credit: Chester Harman  
Planets: PHL at UPR Arcibo, NASA/IPPL/APL/Arizona

Kasting, Kopparapu, Raminetz & Harman (2013)

# 地球サイズのハビタブル惑星の存在確率

- **GK型星を公転する地球半径の1~2倍の惑星**
  - ケプラーのトランジット惑星検出数から、観測的選択効果を補正して推定
  - **11±4 % (地球上での太陽フラックスの1~4倍のもの)**
  - **5.7<sup>+2.2</sup><sub>-1.7</sub> % (公転周期が200~400日のもの)**

Table 1. Occurrence of small planets in the habitable zone

HZ definition	$a_{\text{inner}}$	$a_{\text{outer}}$	$F_{P,\text{inner}}$	$F_{P,\text{outer}}$	$f_{\text{HZ}}$ (%)
Simple	0.5	2	4	0.25	22
Kasting (1993)	0.95	1.37	1.11	0.53	5.8
Kopparapu et al. (2013)	0.99	1.70	1.02	0.35	8.6
Zsom et al. (2013)	0.38		6.92		26*
Pierrehumbert and Gaidos (2011)		10		0.01	~50 <sup>†</sup>

# バイオシグニチャー

- 何をバイオシグニチャ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



# 大気中のバイオシグニチャー

## 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。

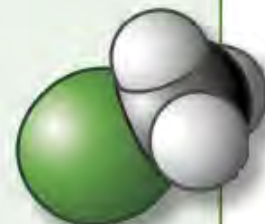
## メタン ( $CH_4$ ) と酸素の組み合わせ、またはメタンの季節変動

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。



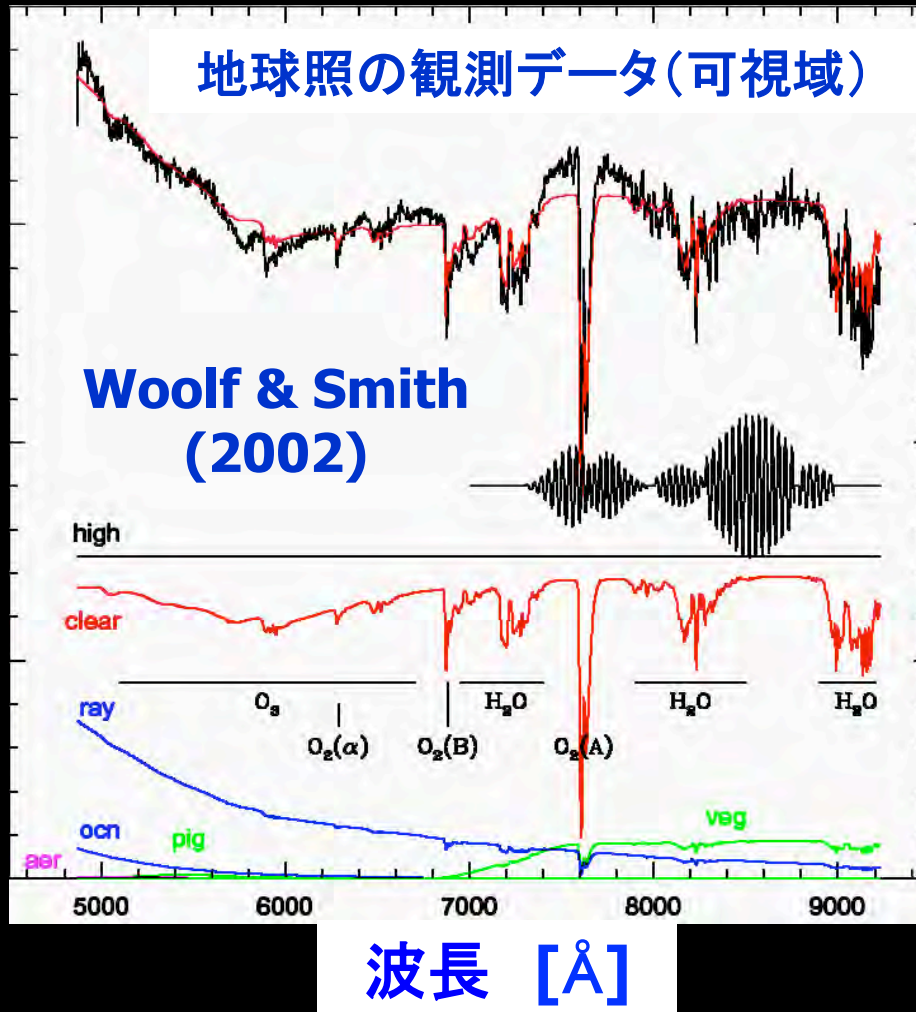
## 塩化メチル ( $CH_3Cl$ )

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。





# 常識的バイオシグニチャー： 大気中の分子



## ■ 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

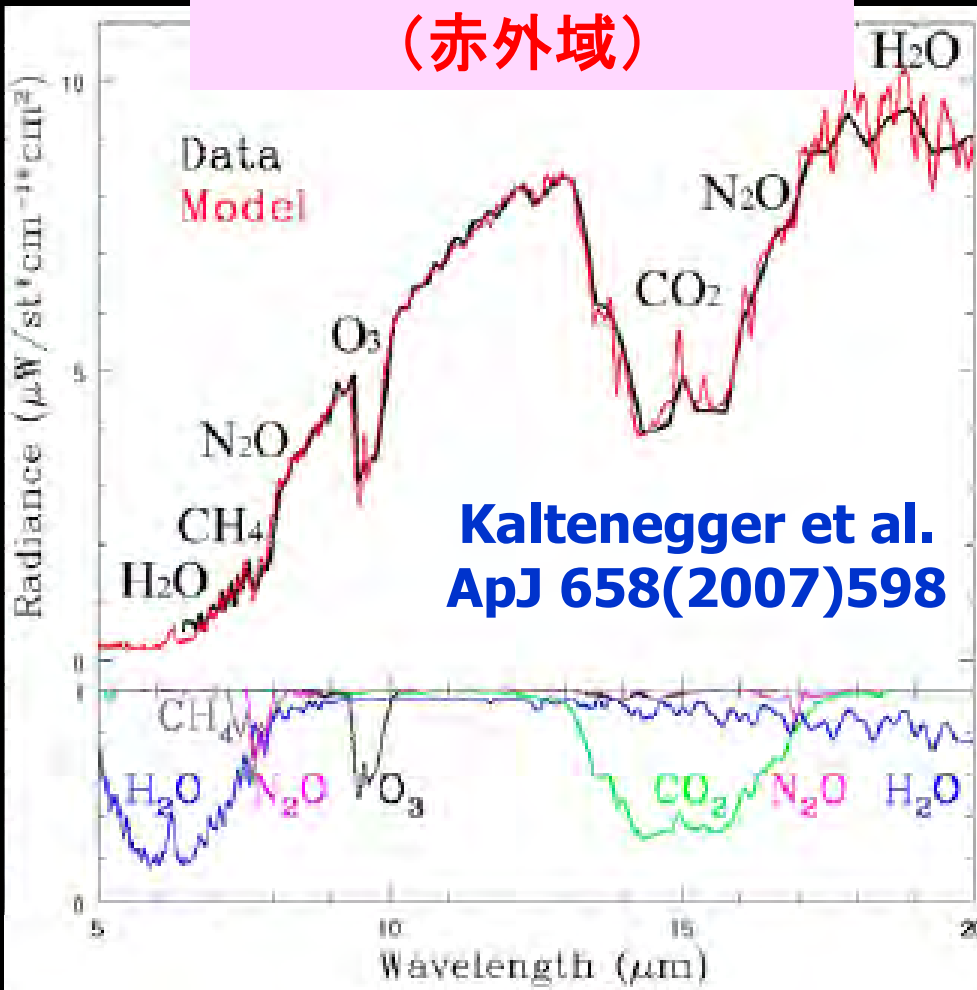
- Chappuis バンド  
@ (0.5-0.7) $\mu\text{m}$
- Hartley バンド  
@ (0.2-0.3) $\mu\text{m}$

Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

# 赤外スペクトルとバイオシグニチャー

地球観測衛星データ  
(赤外域)



- **オゾン: @9.6 $\mu\text{m}$** 
  - 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 $\mu\text{m}$ , >17 $\mu\text{m}$**
- **メタン@7.7 $\mu\text{m}$** 
  - 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シグニチャー

## Extrasolar plants on extrasolar planets

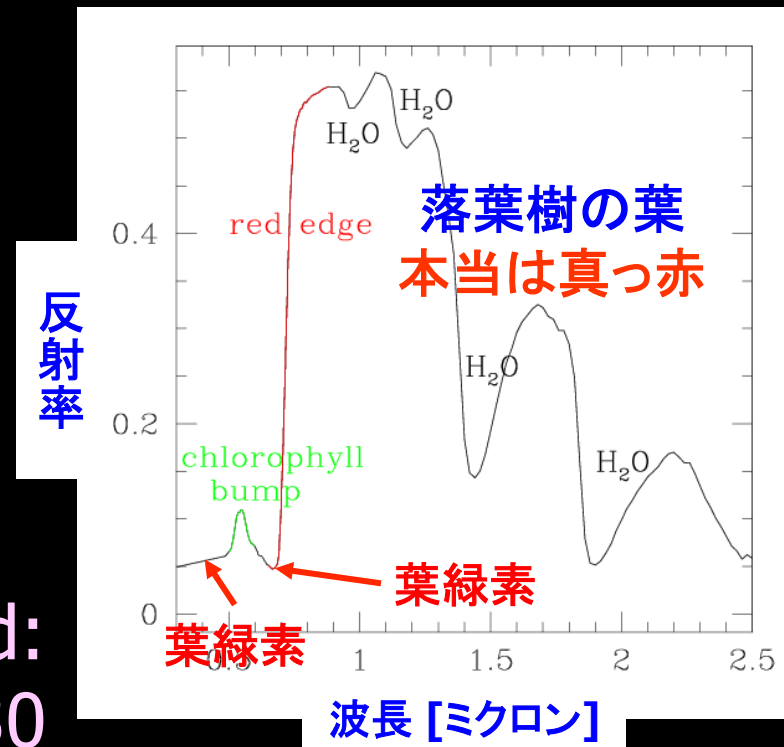
- (居住可能)地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

### ■ Biosignature 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

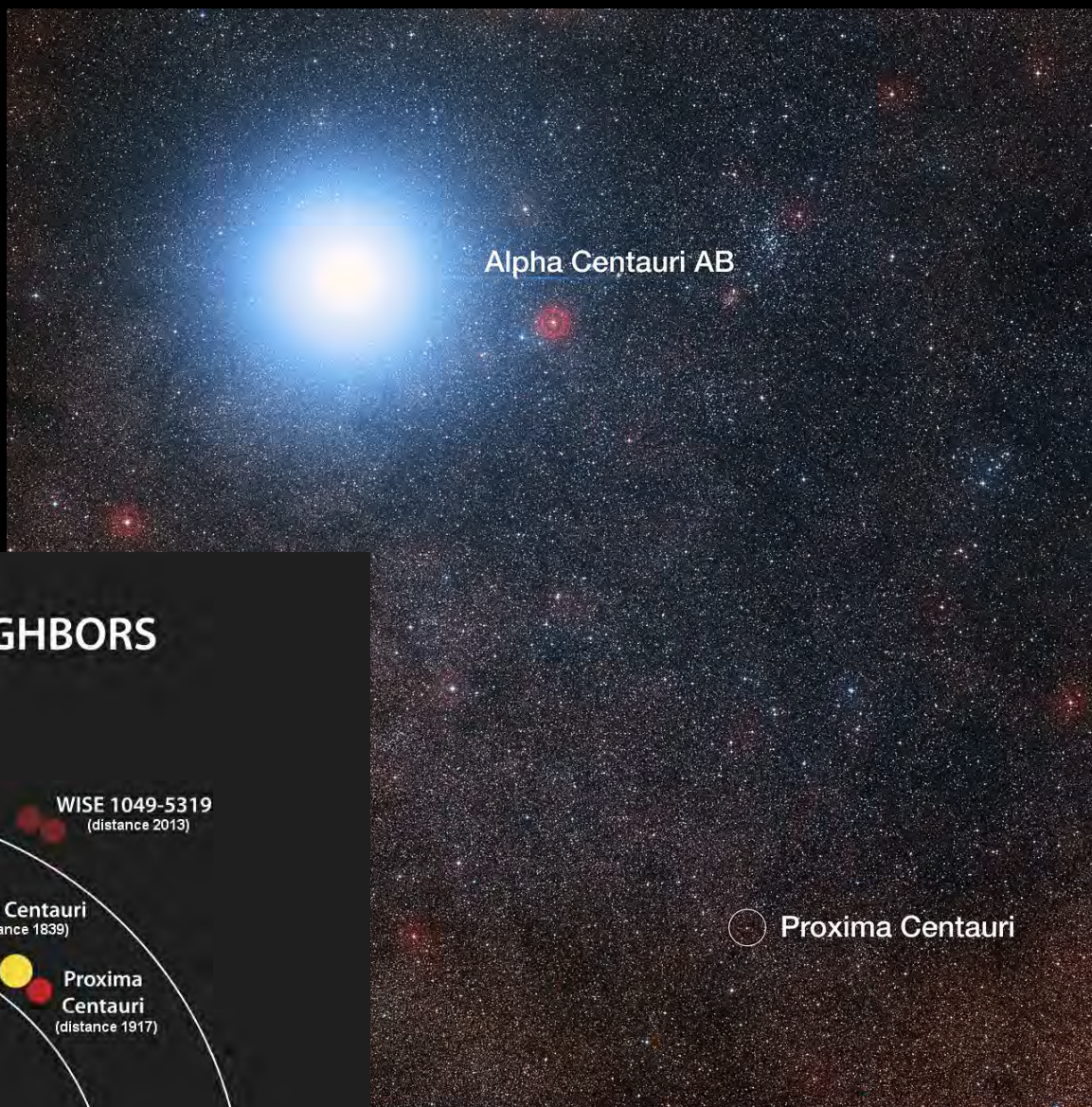
Seager, Turner, Schafer & Ford:  
astro-ph/050330



プロキシマ ケンタウリ b



# プロキシマ ケンタウリ



## THE SUN'S CLOSEST NEIGHBORS



Proxima Centauri

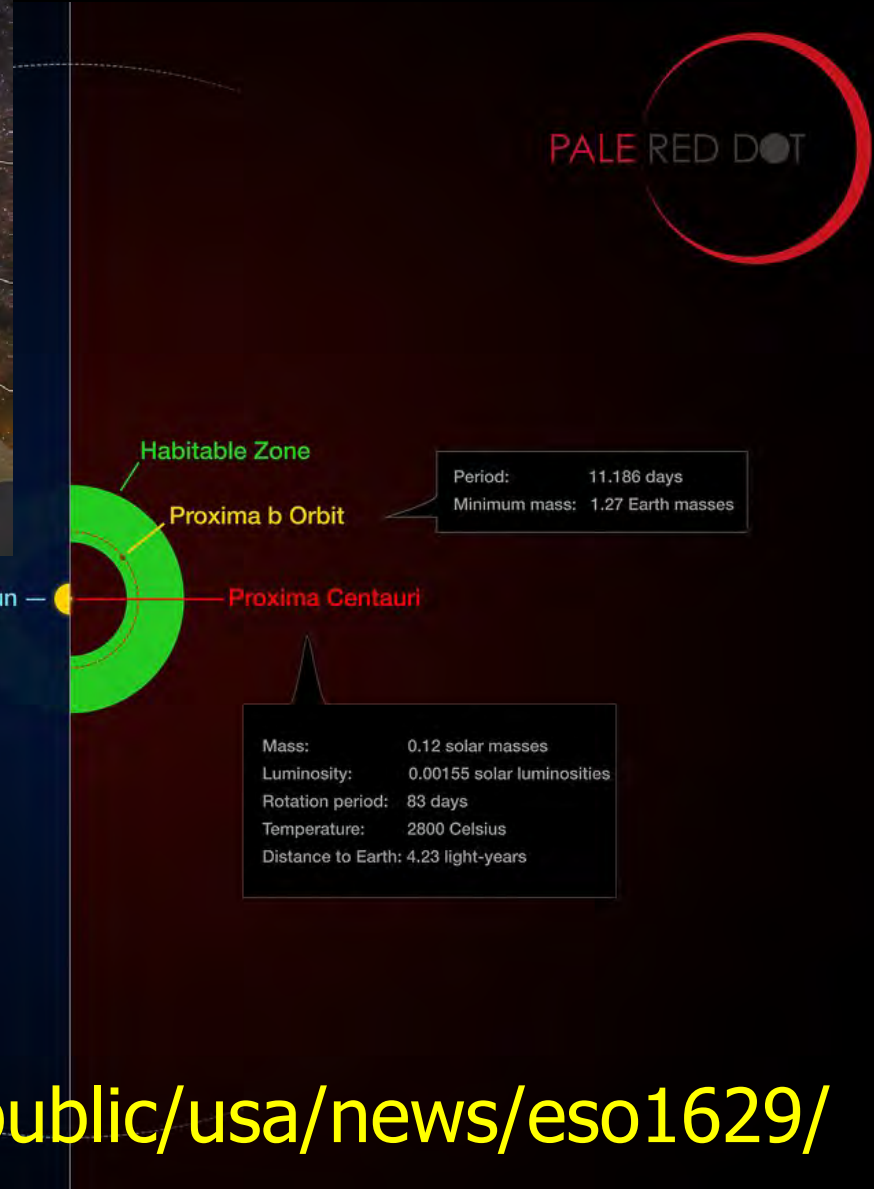
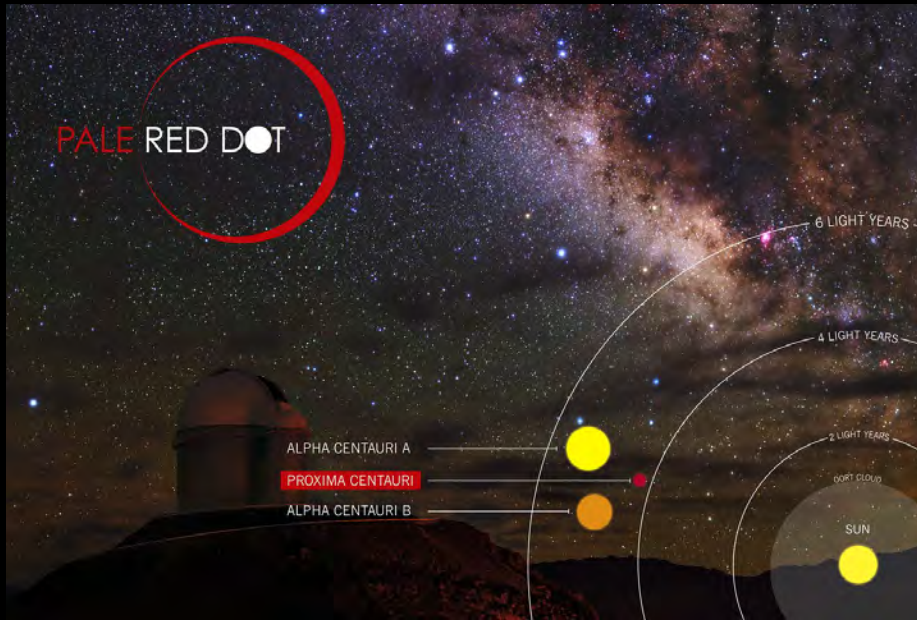
<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

# プロキシマ ケンタウリ

- ケンタウルス座アルファ星
  - 太陽に最も近い恒星 (3重連星系)
  - $\alpha$  Cen A, B, C (=プロキシマ ケンタウリ)
- プロキシマ ケンタウリ
  - 距離: 4.25光年、M型星 (赤色矮星)
  - 表面温度  $(3042 \pm 117) \text{K}$
  - 絶対光度  $0.0017 L_{\odot}$
  - 半径  $(0.141 \pm 0.007) R_{\odot}$
  - 質量  $(0.123 \pm 0.006) M_{\odot}$
  - 自転周期 83.5 days、年齢 48.5 億年



# ペイル レッド ドット: ハビタブル惑星 ?



<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

# *A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri*

- G.Anglada-Escude et al.

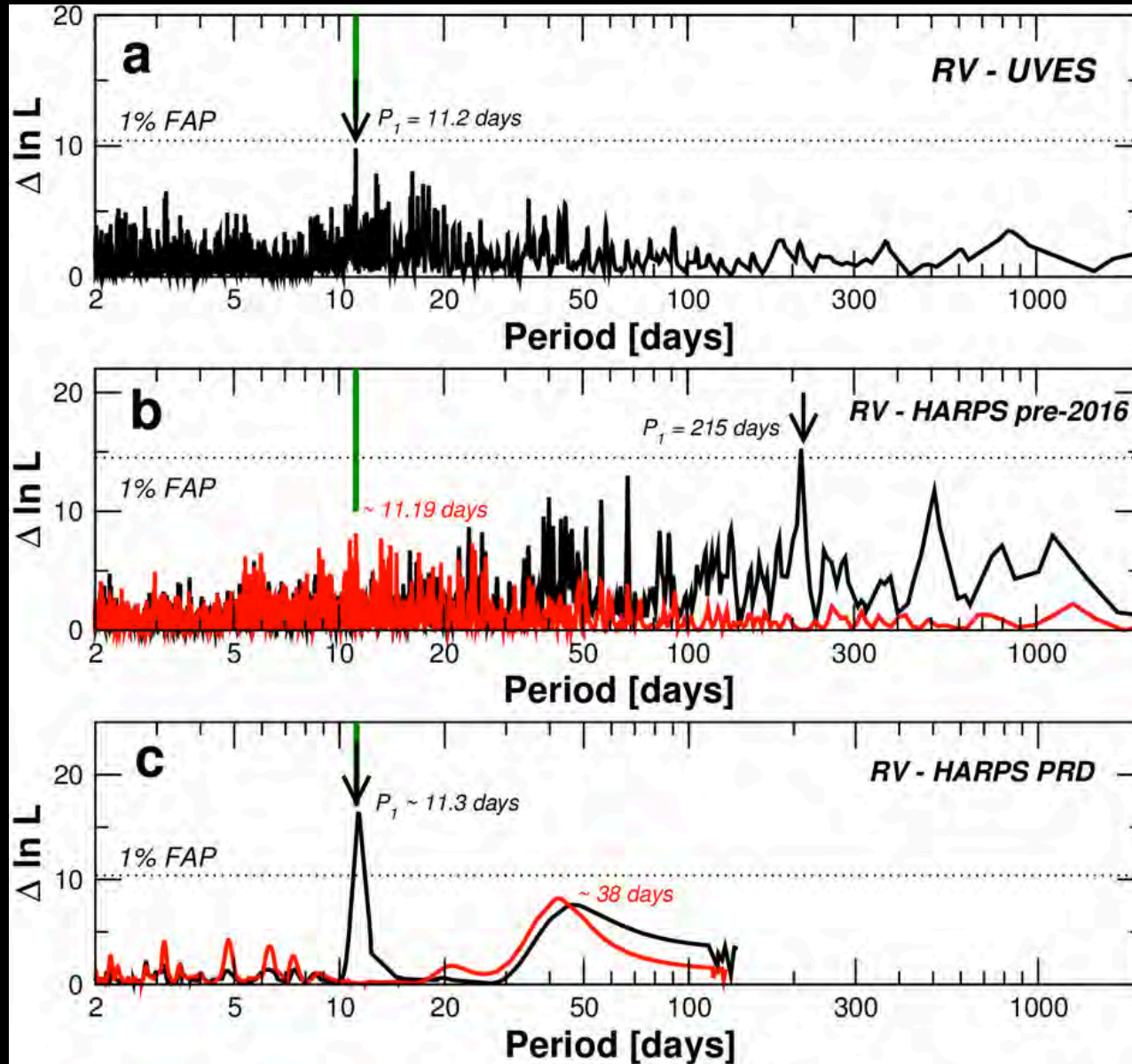
Nature 25 August 2016 issue, 536(2016)437

## ■ プロキシマ ケンタウリ b

- 公転周期 11.186 (11.184-11.187) days
- 質量  $M_p \sin i = 1.27$  (1.10-1.46)  $M_{\text{earth}}$
- 離心率  $< 0.35$
- 軌道長半径 0.0485 (0.0434-0.0526) AU
- 平衡温度 234 (220-240) K

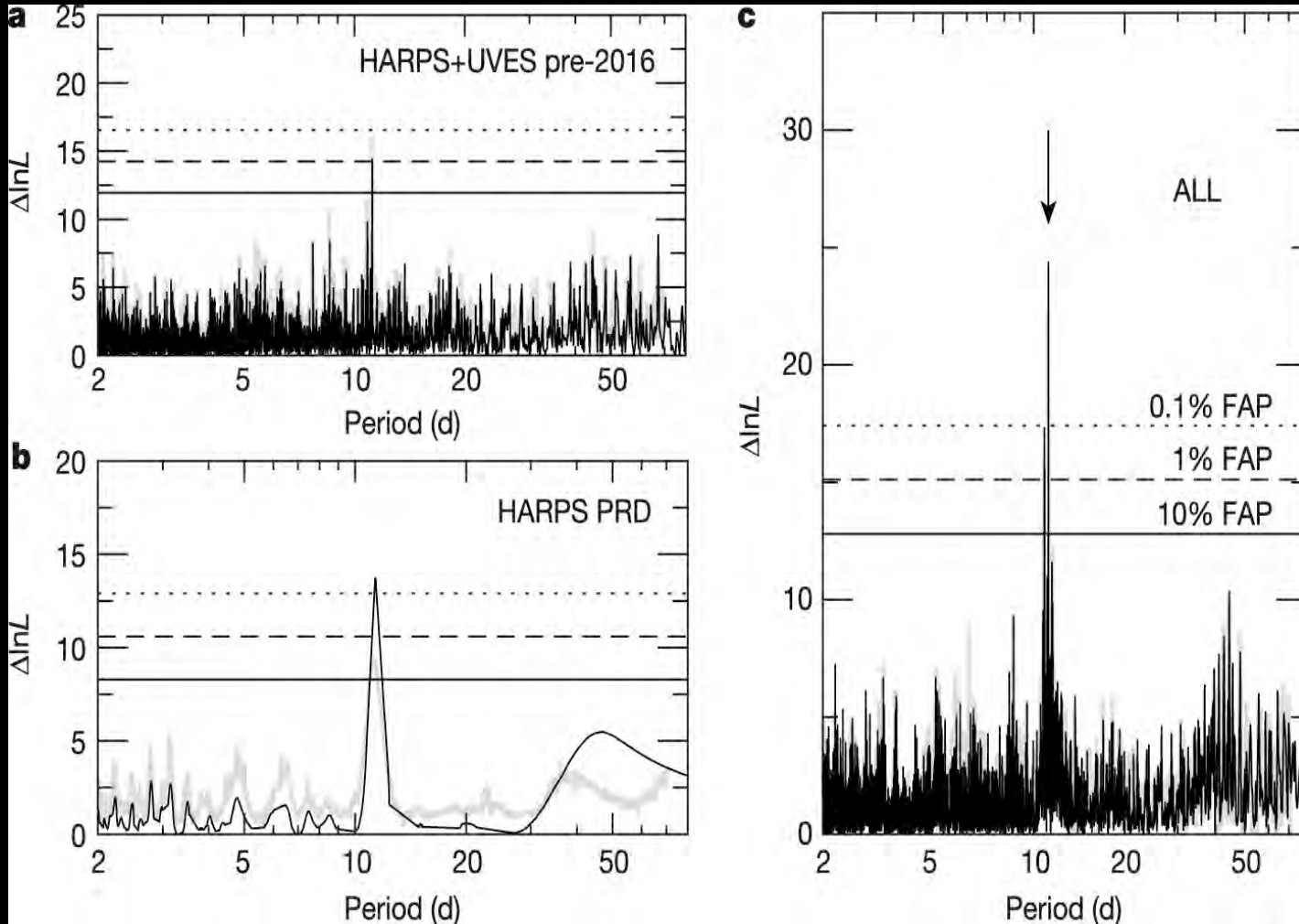
<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

# 独立な視線速度データからの公転周期推定

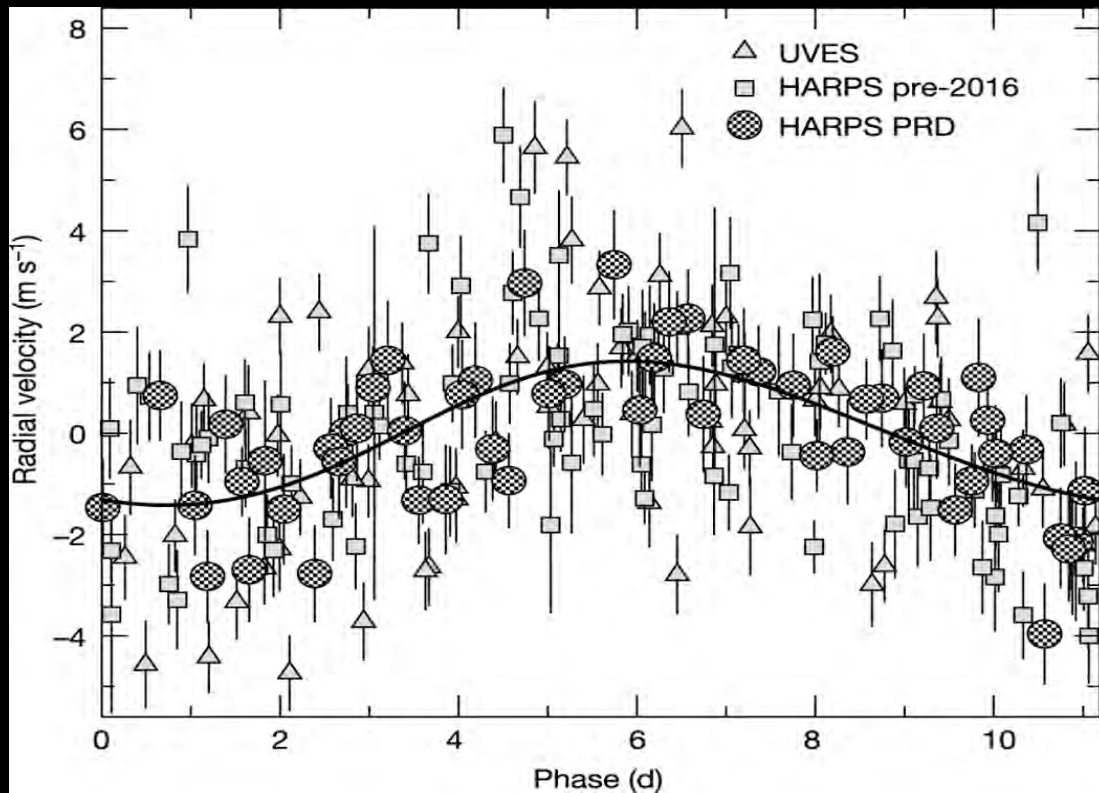




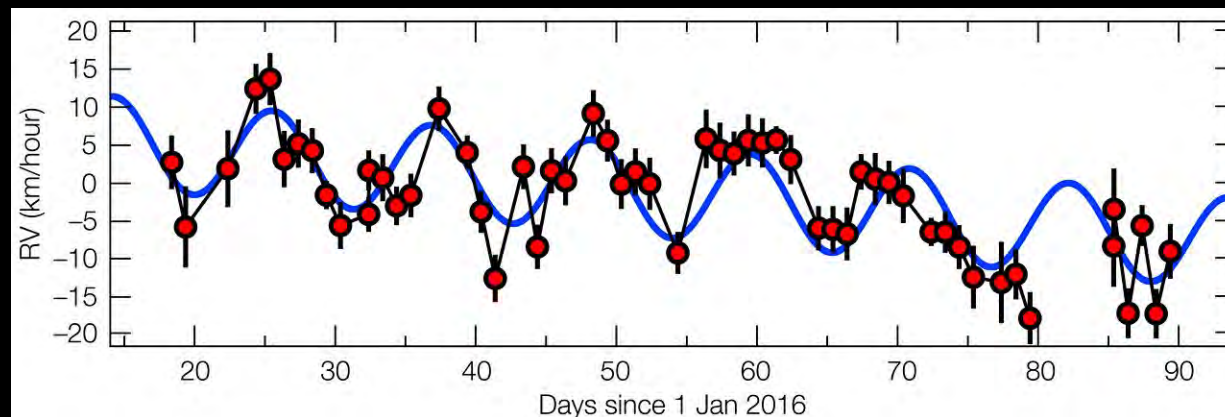
# 視線速度データからの公転周期推定



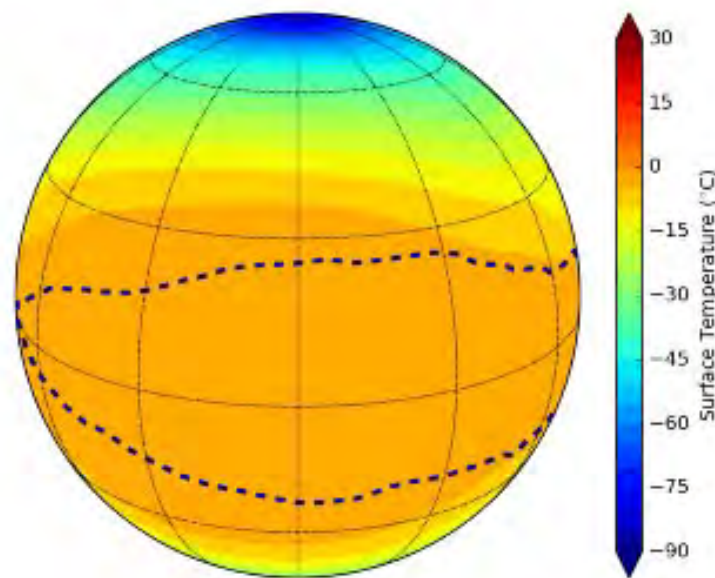
# 視線速度データ



G Anglada-Escudé *et al.*  
*Nature* 536 (2016) 437

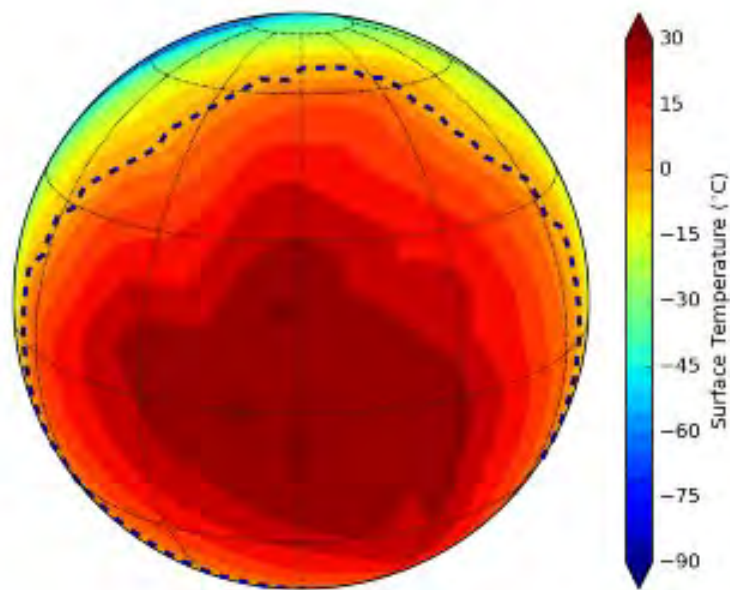


# 表面温度シミュレーション (3:2 共鳴を仮定した場合)



<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

# 表面温度シミュレーション (潮汐ロックを仮定した場合)



<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>



# ブレイクスルー イニシャティブ

<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative>

- ロシア出身のIT投資家ユリ・ミルナー(素粒子理論が学位取得)が地球外知的生命を探查するために、2015年7月20日に立ち上げた
  - **ブレイクスルーリッスン**: 地球外文明の電波あるいはレーザーによる信号を受信
  - **ブレイクスルーメッセージ**: 宇宙空間へ送るメッセージとして最適なものを提案するとともに、その行為の哲学的倫理的妥当性を検討
  - **ブレイクスルースターショット**: ケンタウルス座アルファ星へ探查機群を送るための概念設計検討

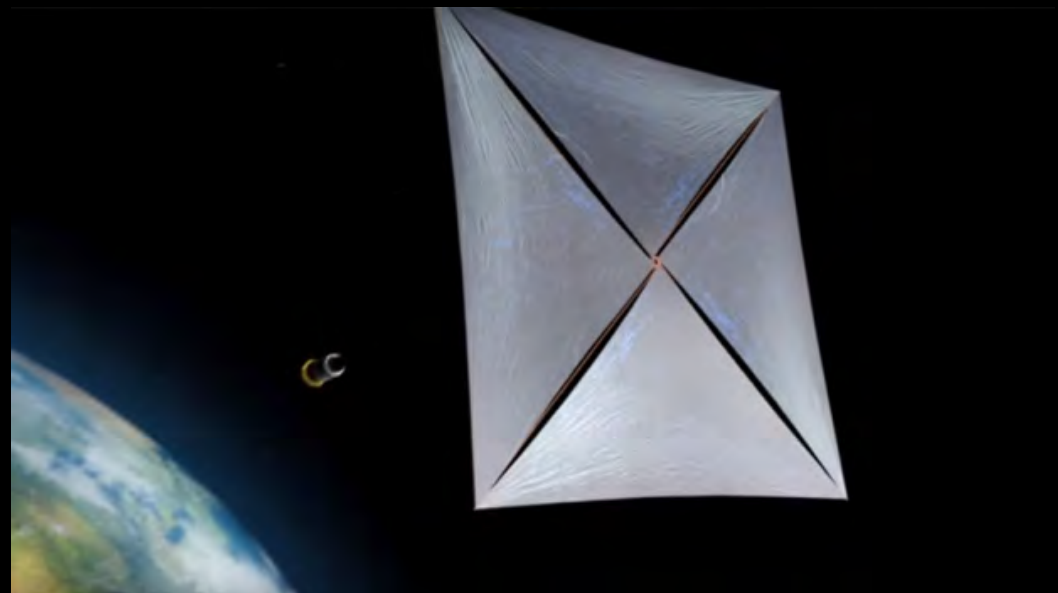
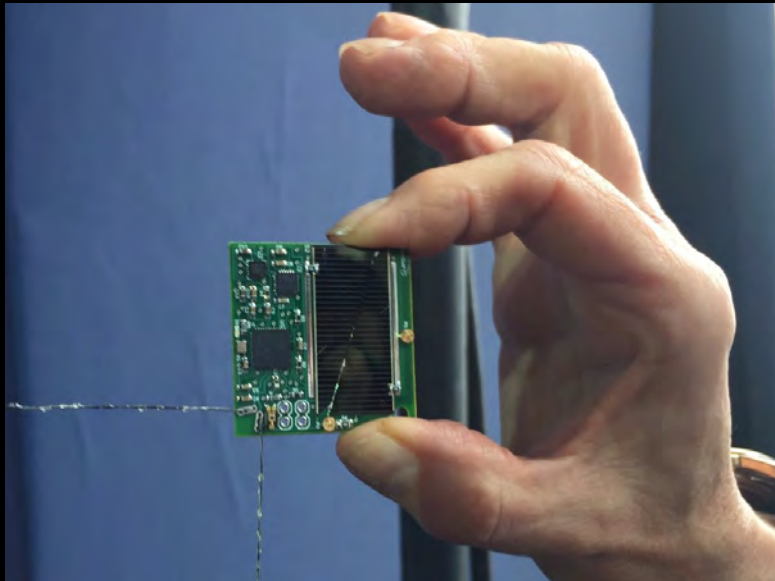
# ブレイクスルースターショット

<http://breakthroughinitiatives.org/Initiative/3>

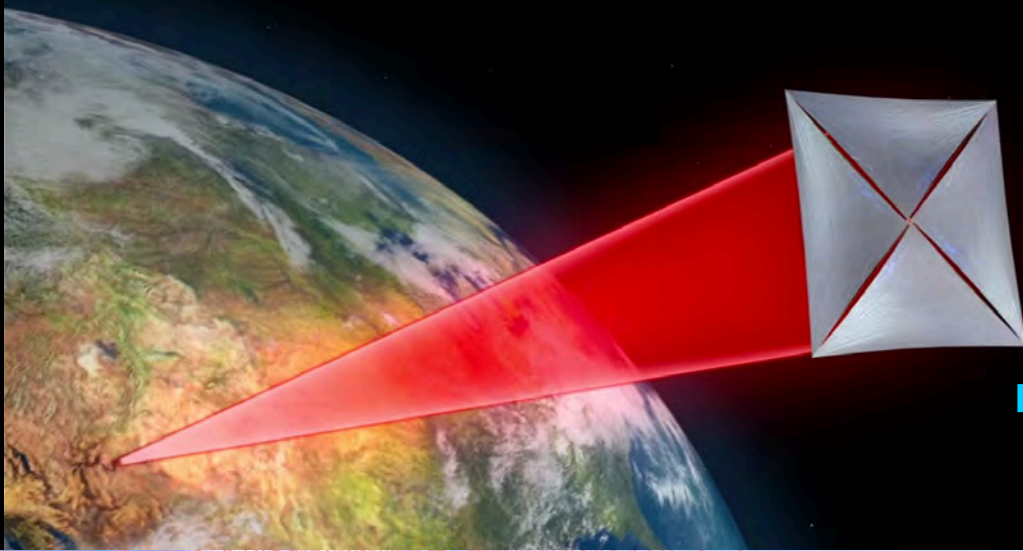
## ■ スターチップ

- 2cm x 2cm、数グラムで、カメラ、コンピュータ、通信用レーザー、燃料装置を搭載したチップ
  - 4m×4m の帆に結びつけられ、それが地上からのレーザー光を受けて、約10分で光の20%の速度にまで加速される
- プロキシマ ケンタウリに1000個のスターチップを次々と飛ばす。約20年で到着する
- ただしこの技術はまだ存在しておらず、完成までに今から20年の研究開発が必要

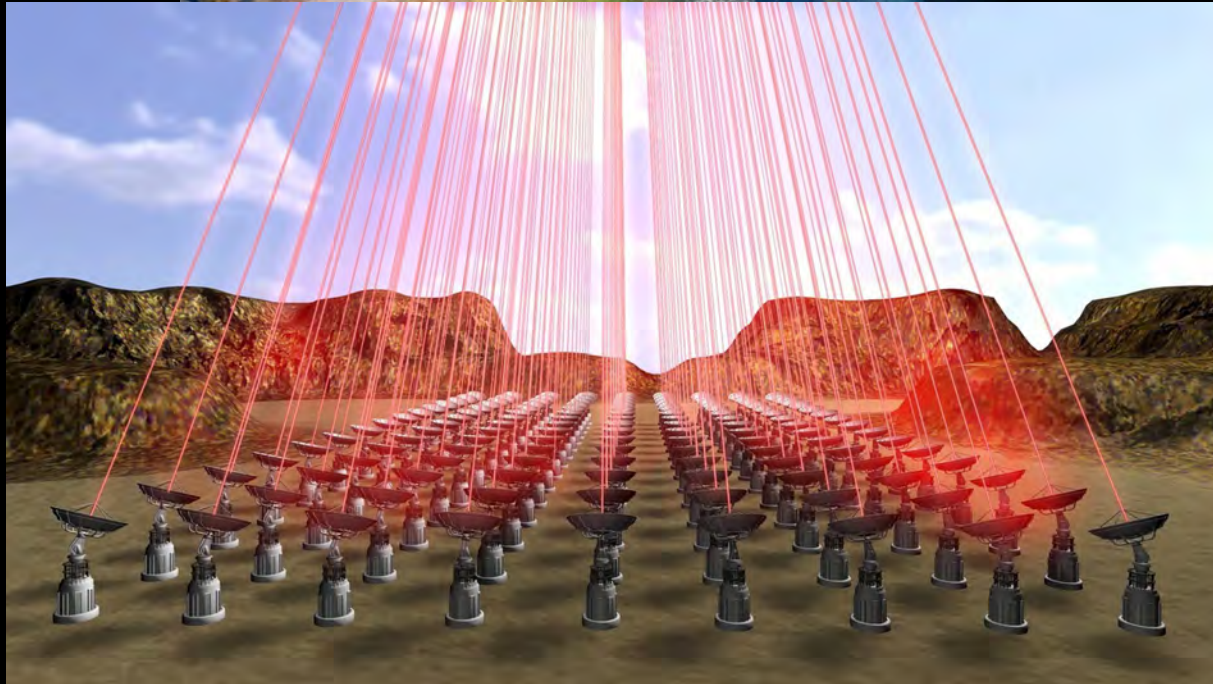
# スターチップ



# 地上のレーザーで光速の20%に加速



- 20年後に打ち上げ、さらに20年かけてでプロキシマケンタウリに到達しデータを取得。その4年後には地球にデータが届く。そこには何が写っているのか？





# 地球からプロキシマケンタウリへ



<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

# プロキシマケンタウリの惑星の風景？

<http://www.eso.org/public/usa/news/eso1629/>

