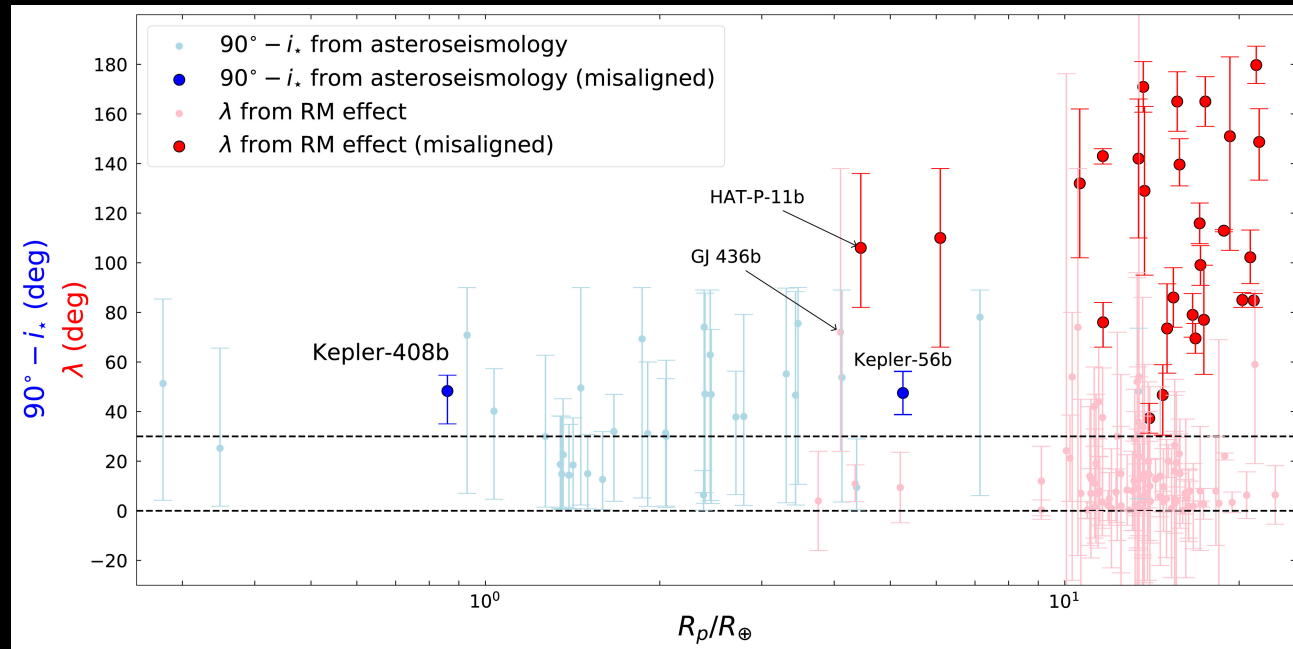
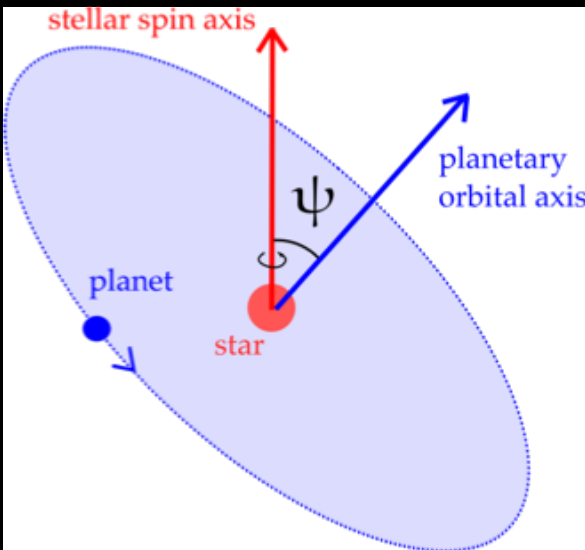


# ロシター効果と星震学で探る 系外惑星系のアーキテクチャー



東京大学大学院理学系研究科

物理学専攻 須藤 靖

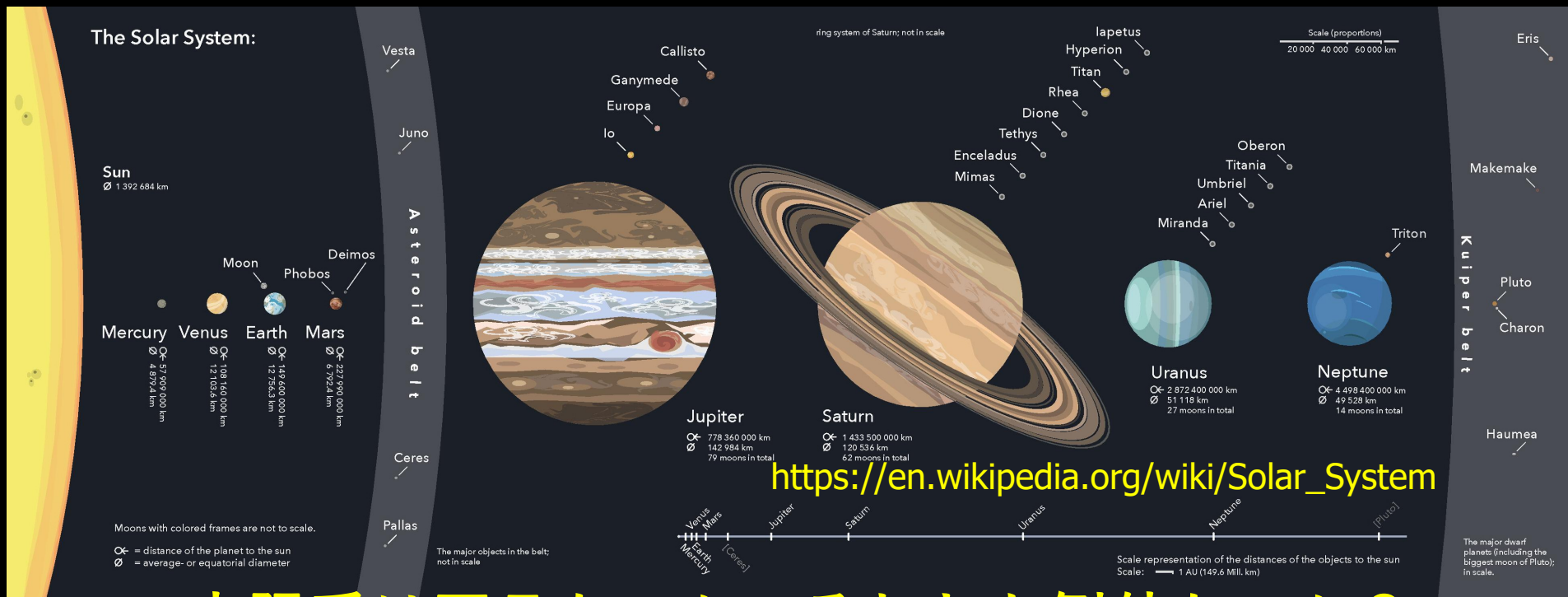
2019年5月22日 15:00

神戸大学理学研究科物理学専攻

宇宙論研究室セミナー

# 1 イントロダクション

# 太陽系のアーキテクチャー



## ■ 太陽系は平凡なのか、それとも例外なのか？

- ほぼ同一平面上の円軌道をなす 8 重惑星系
- 内側に岩石惑星、外側に巨大ガス惑星
- 力学的に極めて安定（約100億年程度は安定）
- ハビタブル惑星（地球）を持つ
- 惑星の多くは複数の衛星と環を持つ

# 宇宙は惑星で満ちていた

## A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

**Nature 378(1995)355**

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

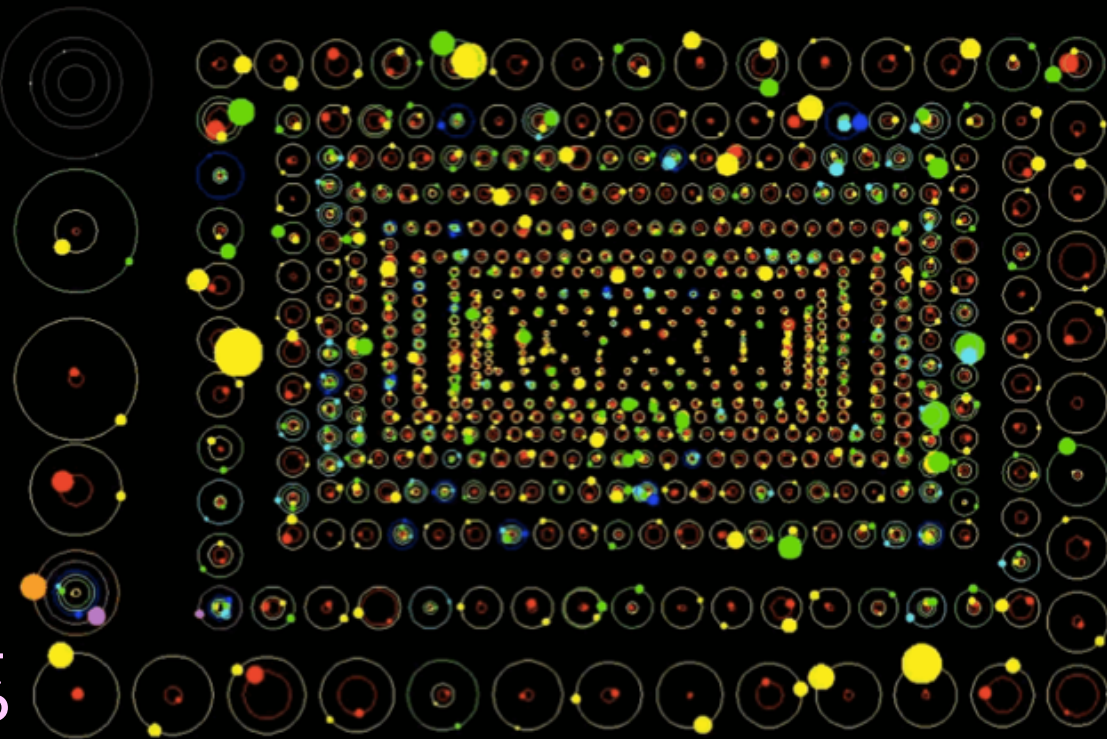
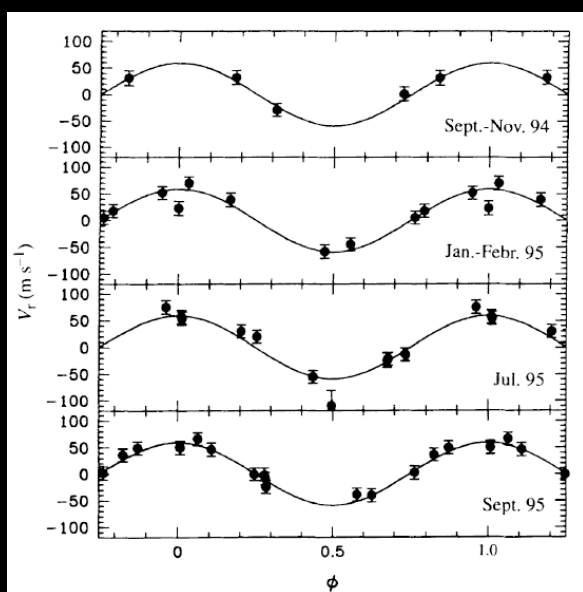
The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

Kepler planets

August 3, 2015

NASA/Daniel Fabrycky

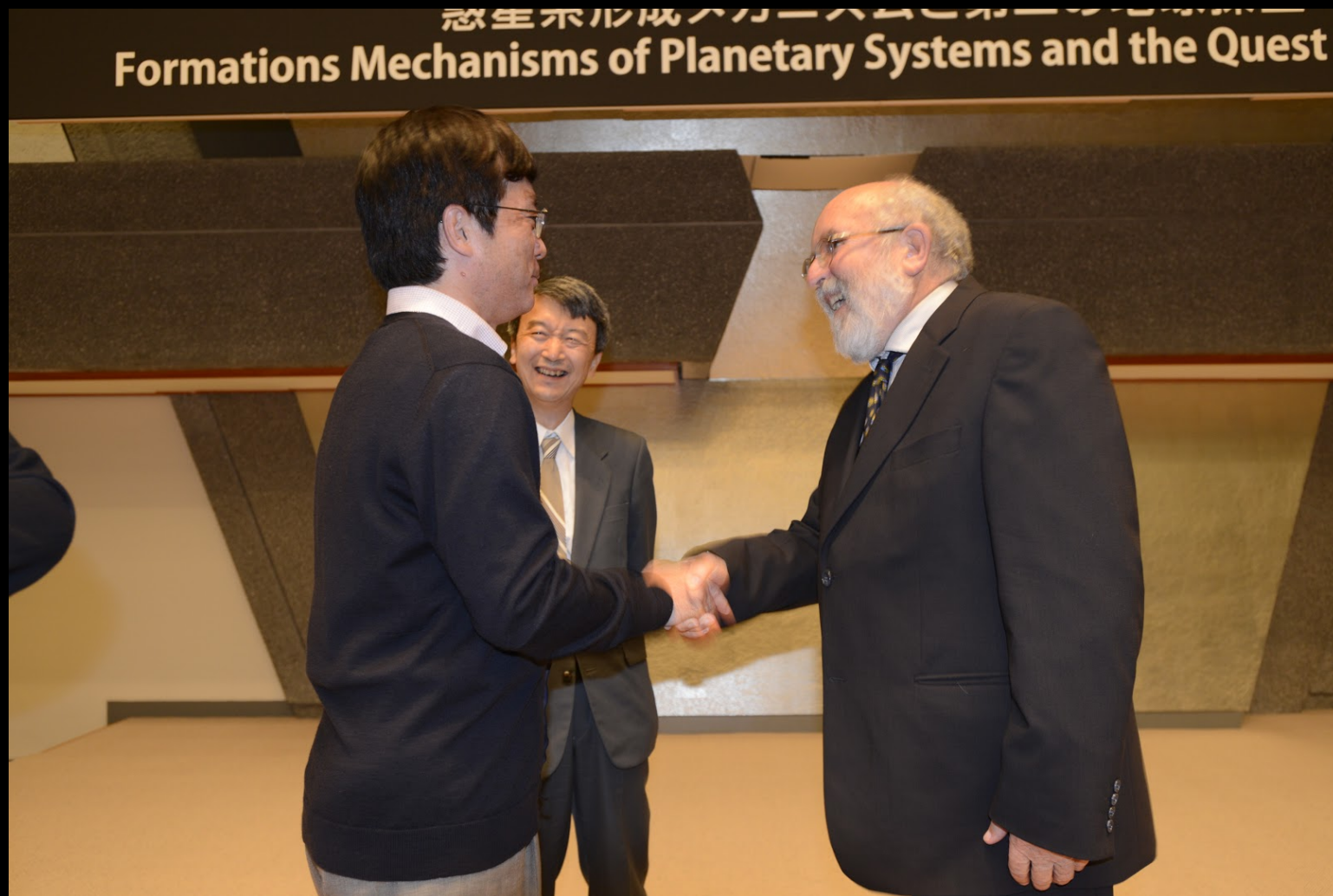
t[BJD] = 2455215



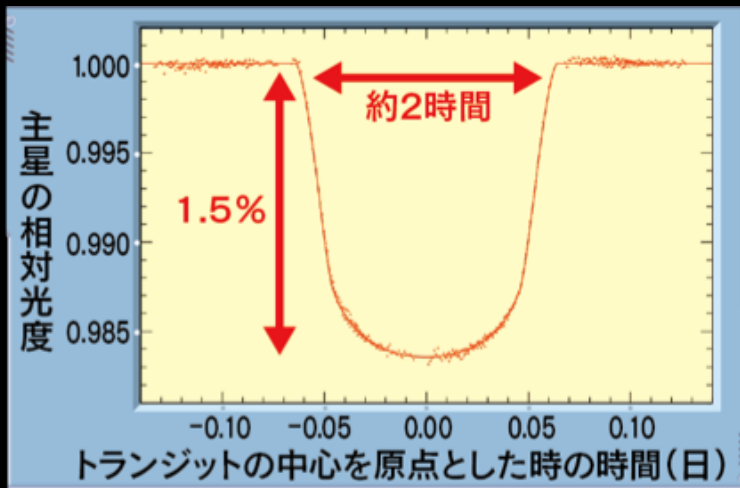
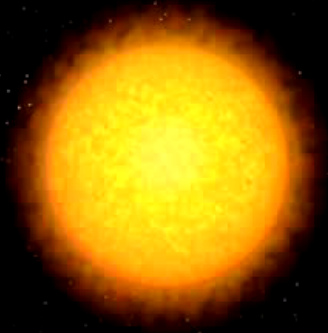
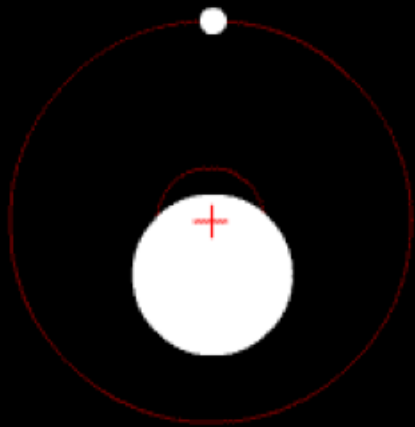
初めて発見された系外惑星  
51Peg b = 4.2日で公転する  
ホットジュピター

<https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>

# 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)



# 系外惑星検出方法



## ■ 視線速度法

- 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

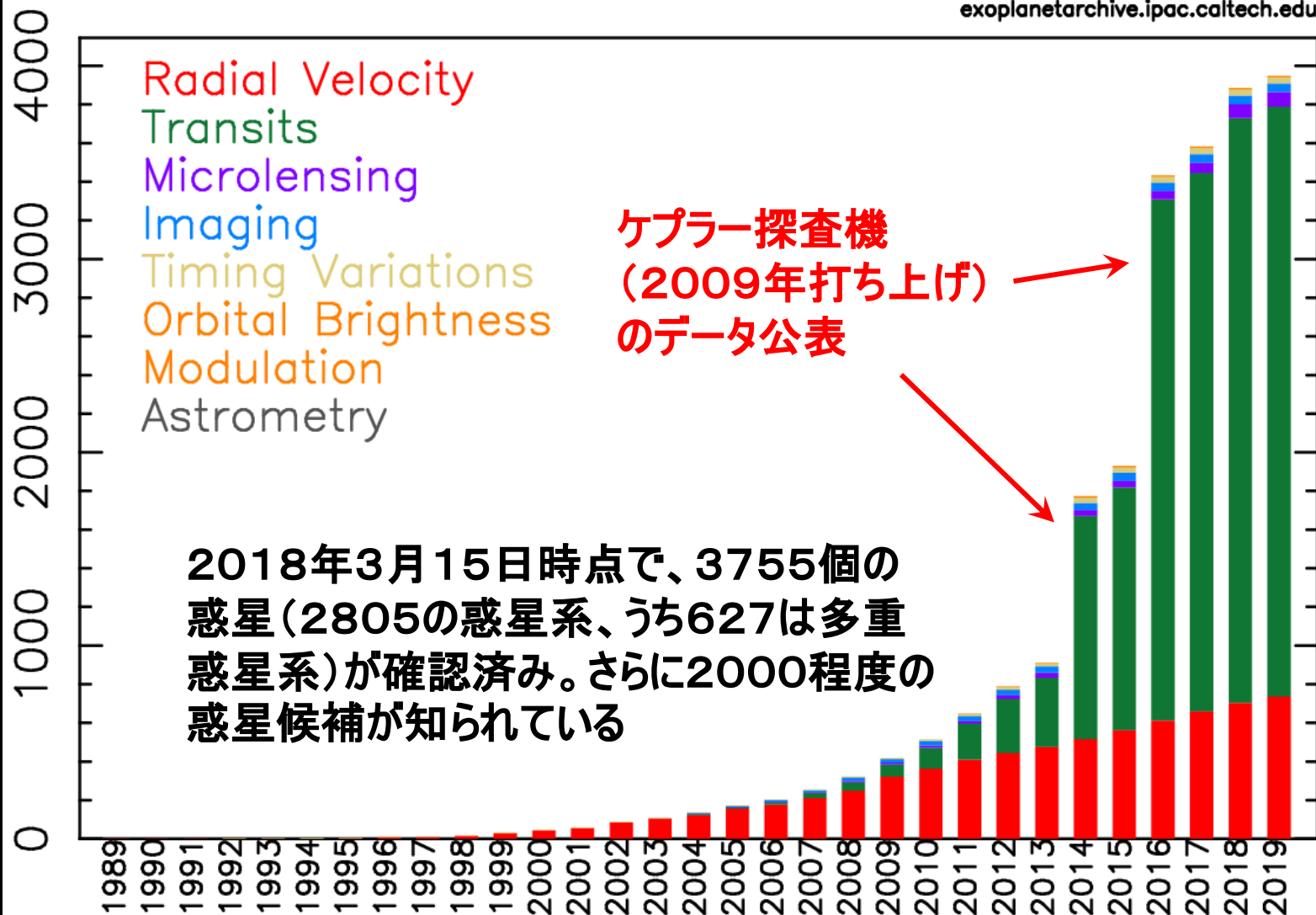
- 中心星の光を隠して惑星の光を分離

## ■ 重力レンズ

# 系外惑星の発見年表

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数

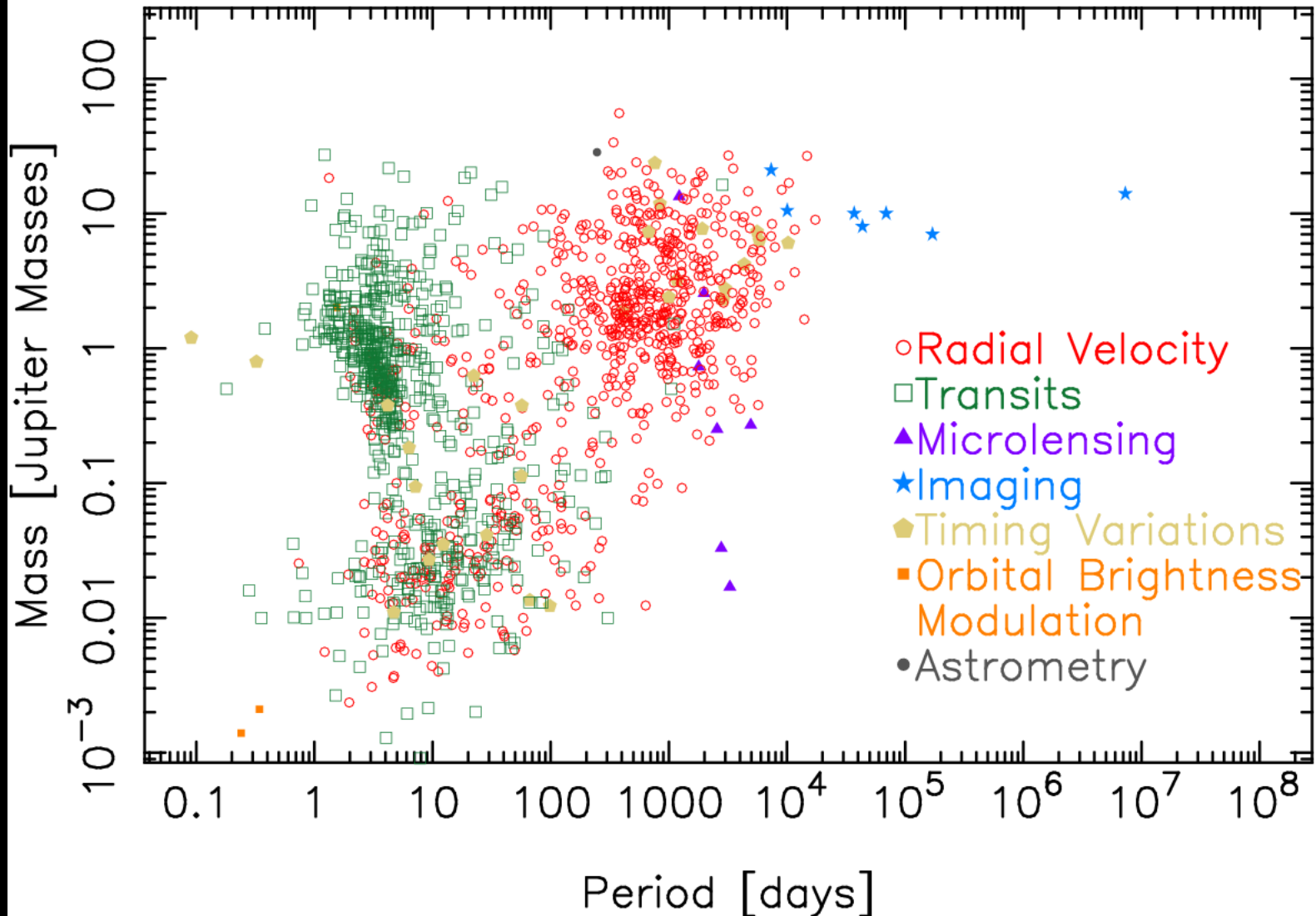


西暦

# 系外惑星の多様性：周期 vs. 質量

02 May 2019

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

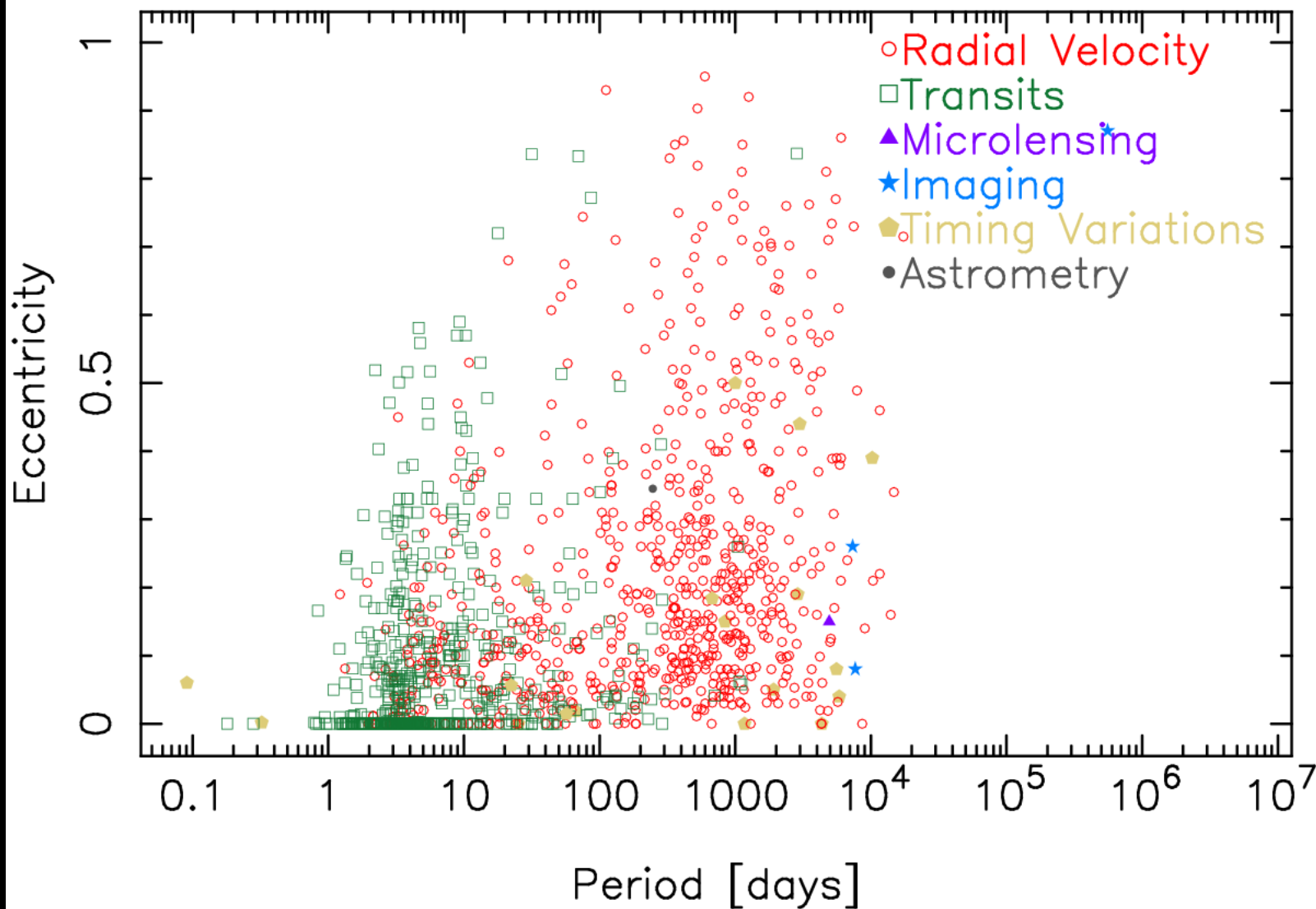




# 系外惑星の多様性：周期 vs. 離心率

02 May 2019

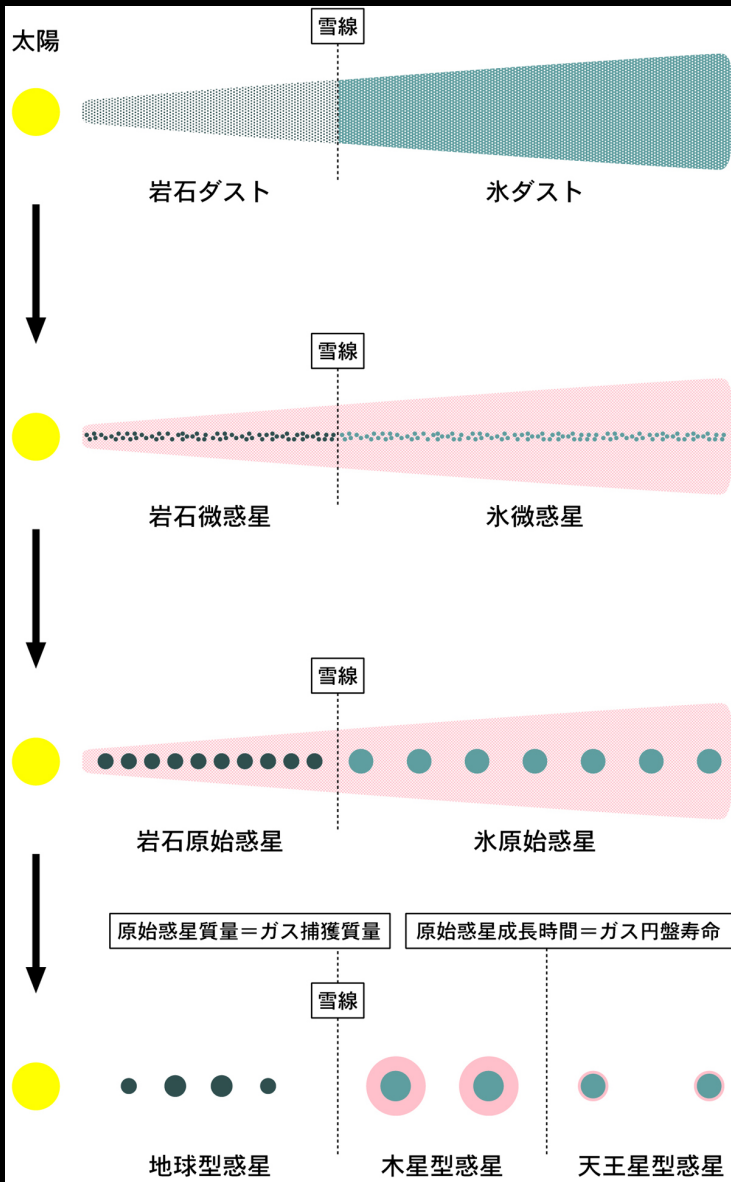
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



# 見えてきた系外惑星系の姿

- **宇宙に惑星系は普遍的に存在する**
  - 太陽と似た恒星の7割以上が惑星を持ち、2割以上は複数の惑星を持つと推定されている
- **太陽系と似た系も全く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）
  - 大きな離心率を持つ楕円軌道の惑星
  - ハビタブル惑星候補（水が液体として存在できる温度）
  - 地球程度の岩石惑星（スーパーアース）が多数
- **普遍性と多様性⇒物理学**
- **我々の地球以外に生命が存在するか？⇒宇宙生物学**

# 太陽系形成標準モデル



## 1. 微惑星の形成 ( $10^6$ 年)

原始惑星系円盤内のダスト沈殿とダスト層形成。ダスト層の重力不安定・分裂・収縮による微惑星 ( $10^{-10} \sim 10^{-7}$  地球質量) の形成。

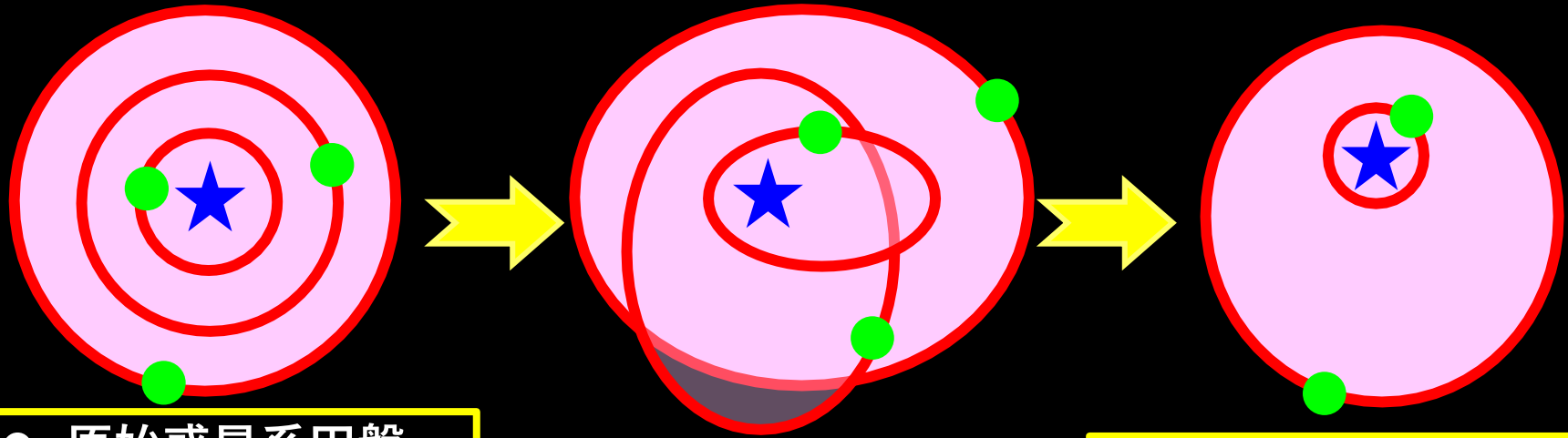
## 2. 原始惑星の形成 ( $10^6 - 10^7$ 年)

微惑星の衝突合体成長、暴走的成長による原始惑星 (0.01~10 地球質量) の形成。

## 3. 惑星の形成 ( $10^7 - 10^9$ 年)

内側では、原始惑星同士の衝突による地球型惑星の形成。外側では、原始惑星を核として原始惑星系円盤のガスを捕獲し、ガス惑星が形成。

# 円盤-惑星、惑星-惑星、主星-惑星相互作用 ⇒ 惑星系の多様性



- 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

太陽系形成標準モデル  
(京都モデル・林モデル)

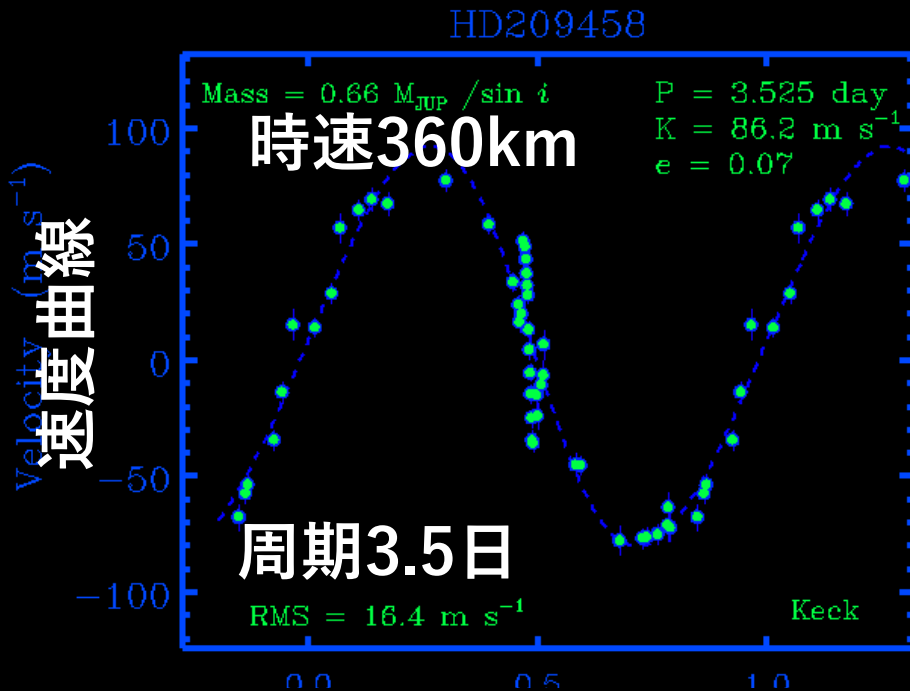
- ガス円盤-原始惑星相互作用
- ガス円盤消失
- 惑星重力少数多体系
- カオス的力学進化
- 近接散乱
- 軌道交差
- 惑星放出

- 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

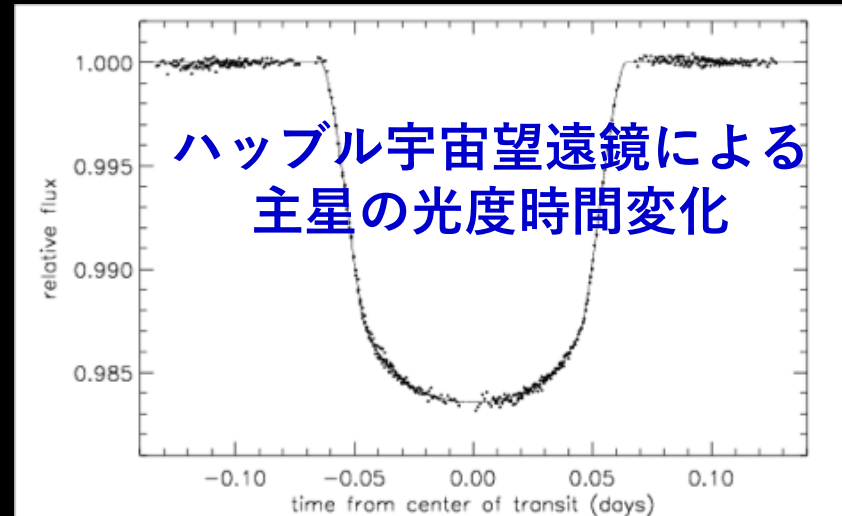
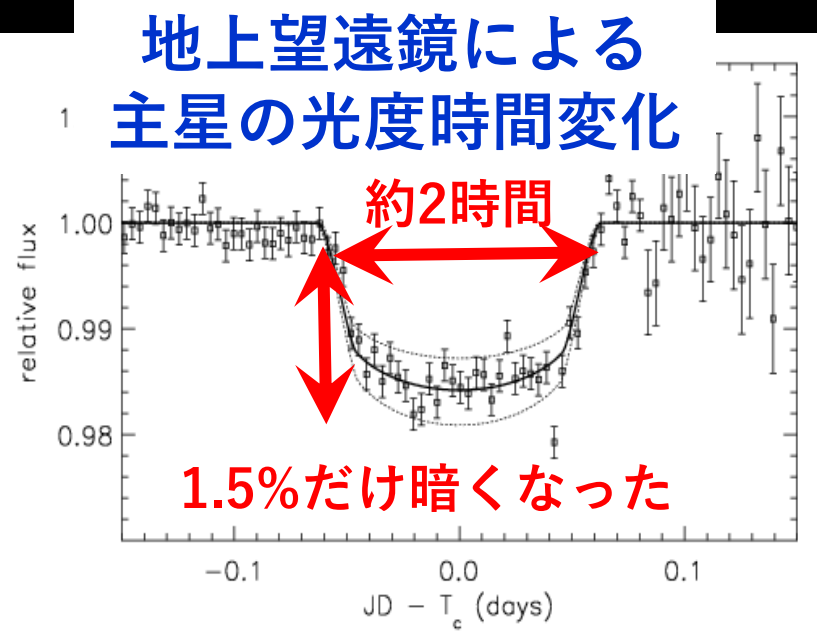
# 2 トランジット惑星 と ロシター・マクローリン効果

# 初めてのトランジット惑星 HD209458b (2000年発表)

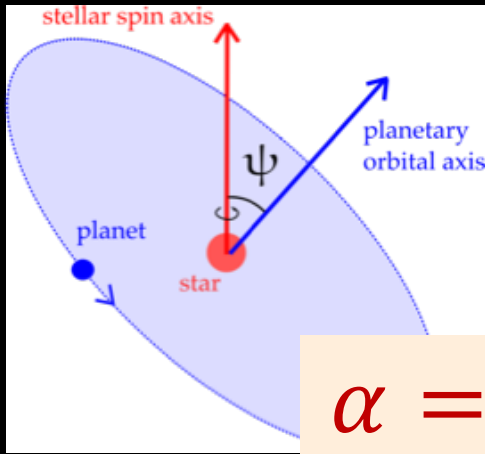
- 速度変動のデータに合わせた惑星の影の初検出



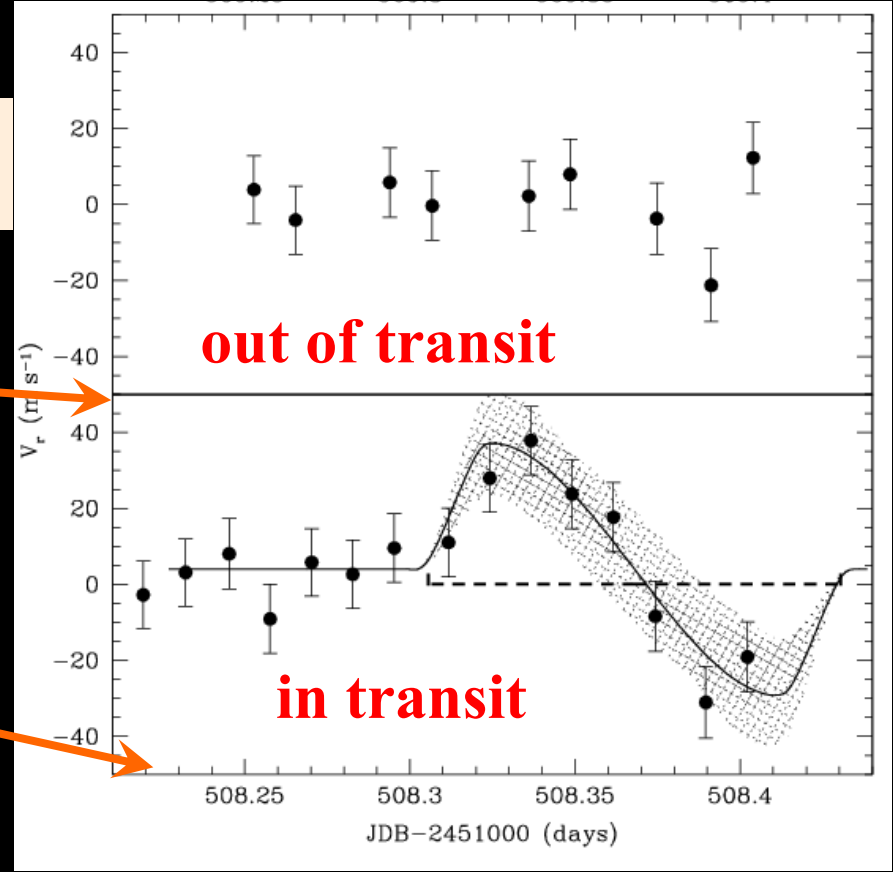
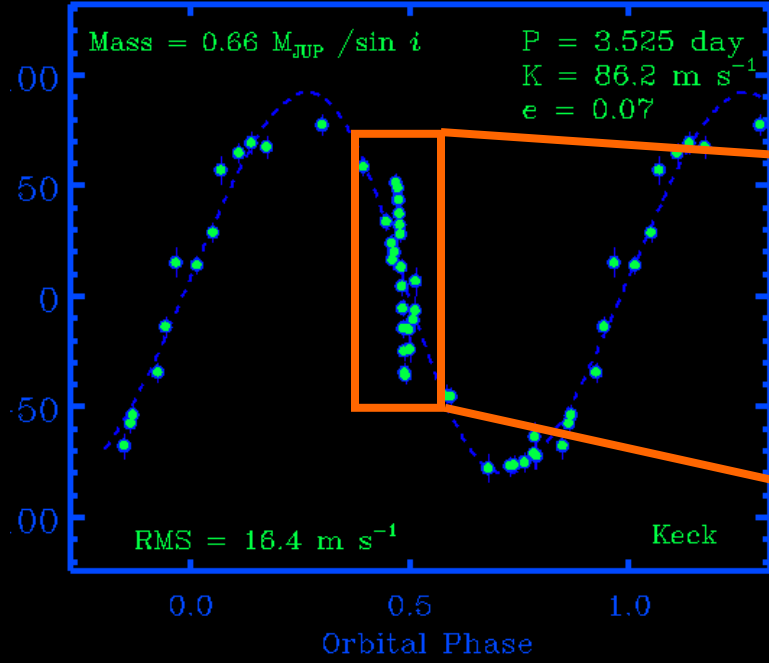
地上望遠鏡による  
主星の速度時間変化



# 2000年 トランジット惑星の ロシター・マクローリン効果初検出



$$\alpha = \pm 3.9^{\circ} \begin{matrix} +18^{\circ} \\ -21^{\circ} \end{matrix}$$

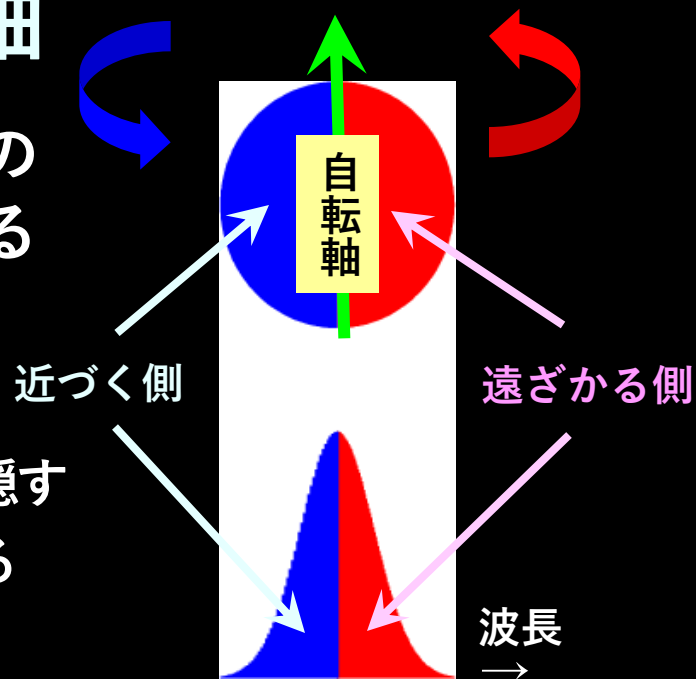


HD209458 radial velocity data  
<http://exoplanets.org/>  
 (This is not their original data)

Stellar rotation and planetary orbit  
 Queloz et al. (2000) A&A 359, L13  
 ELODIE on 193cm telescope

# 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
- **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
- **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！



星の輝線プロフィール

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**



# ロシター効果@wikipedia

## Rossiter-McLaughlin effect

From Wikipedia, the free encyclopedia

The **Rossiter-McLaughlin effect** is a spectroscopic phenomenon observed when either an eclipsing binary's secondary star or an extrasolar planet is seen to transit across the face of the primary or parent star. As the main star rotates on its axis, one quadrant of its photosphere will be seen to be coming towards the viewer, and the other visible quadrant to be moving away. These motions produce blueshifts and redshifts, respectively, in the star's spectrum, usually observed as a broadening of the spectral lines. When the secondary star or planet transits the primary, it blocks part of the latter's disc, preventing some of the shifted light from reaching the observer. This causes the observed mean redshift of the primary star as a whole to vary from its normal value. As the transiting object moves across to the other side of the star's disc, the redshift anomaly will switch from being negative to being positive, or vice versa. This effect has been used to show that as many as 25% of hot Jupiters are orbiting in a retrograde direction with respect to their parent stars,<sup>[1]</sup> strongly suggesting that dynamical interactions rather than planetary migration produce these objects.

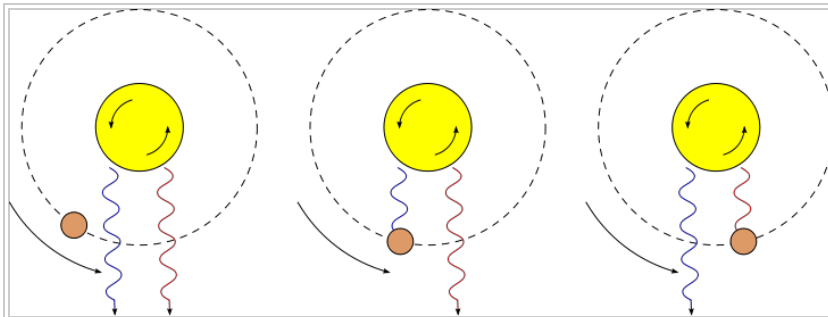


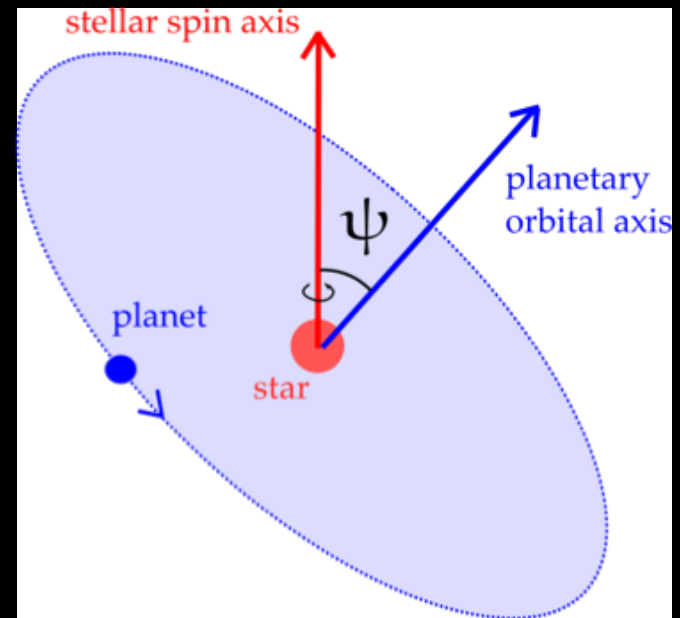
Illustration showing the effect. The viewer is situated at the bottom. Light from the anticlockwise-rotating star is blue-shifted on the approaching side, and red-shifted on the receding side. As the planet passes in front of the star it sequentially blocks blue- and red-shifted light, causing the star's apparent radial velocity to change when it in fact does not.

## History

J. R. Holt in 1893 proposed a method to measure the stellar rotation of stars using radial velocity measurements, he predicted that when one star of an eclipsing binary eclipsed the other it would first cover the advancing blueshifted half and then the receding redshifted half. This motion would create a redshift of the eclipsed star's spectrum followed by a blueshift, thus appearing as a change in the radial velocity in addition to that caused by the orbital motion of the eclipsed star.<sup>[2]</sup>

## Further reading

- Ohta, Y.; Taruya, A. & Suto, Y. (2005). "The Rossiter-McLaughlin Effect and Analytic Radial Velocity Curves for Transiting Extrasolar Planetary Systems". *The Astrophysical Journal* **622** (1): 1118-1135. arXiv:astro-ph/0410499 (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0410499>)



# Ohta, Taruya + YS: 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

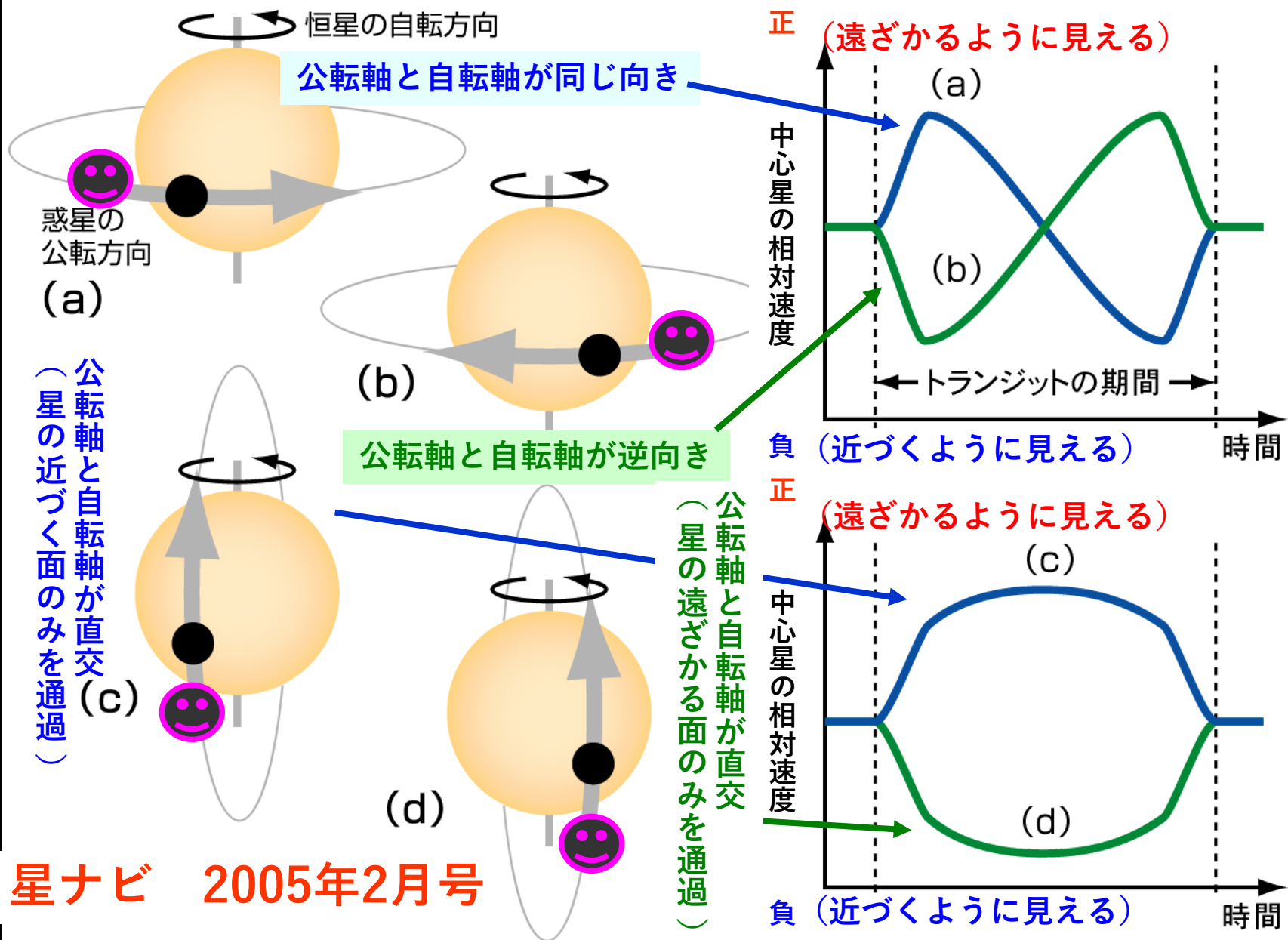
*Received 2004 October 13; accepted 2004 December 10*



effect; if this 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  $\lambda$ .

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

# 惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



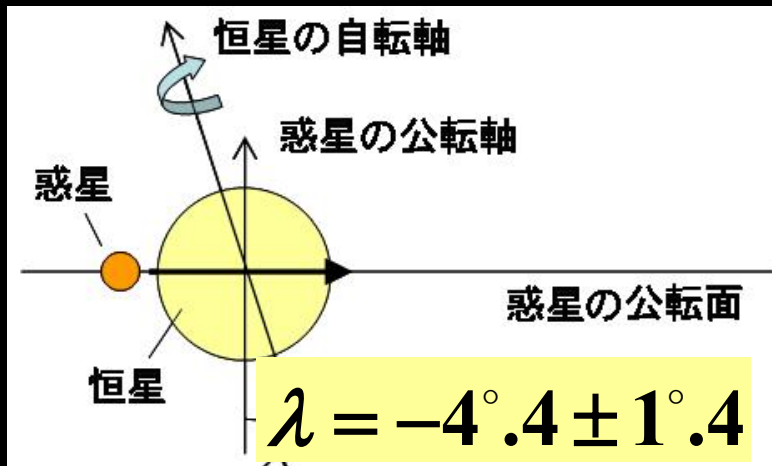
# Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System

(太陽系外惑星系における自転軸と公転軸の向きの測定)

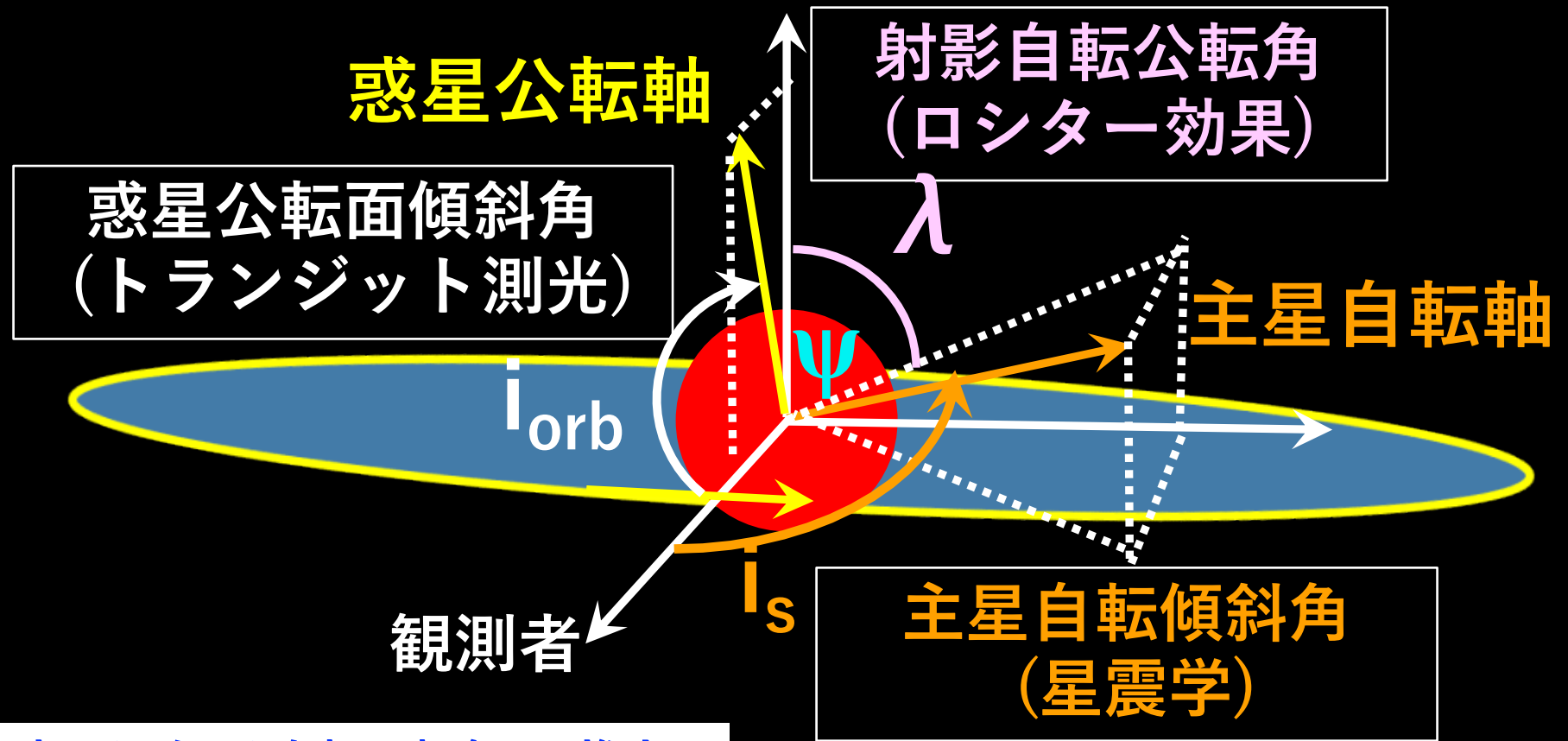
- Joshua N. Winn<sup>1</sup>, Robert W. Noyes<sup>1</sup>, Matthew J. Holman<sup>1</sup>, David B. Charbonneau<sup>1</sup>, 太田泰弘<sup>2</sup>、樽家篤史<sup>2</sup>、須藤靖<sup>2</sup>、成田憲保<sup>2</sup>, Edwin L. Turner<sup>2,3</sup>, John A. Johnson<sup>4</sup>, Geoffrey W. Marcy<sup>4</sup>, R. Paul Butler<sup>5</sup>, & Steven S. Vogt<sup>6</sup>

- 1ハーバード大学、2東京大学、3プリンストン大学、4カリフォルニア大学バークレー校、5ワシントンカーネギー研究所、6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)



# 主星自転軸と惑星公転軸の関係



真の(3次元)自転公転角 $\Psi$ の推定

$$\cos \Psi = \sin i_s \sin i_{orb} \cos \lambda + \cos i_s \cos i_{orb} \\ \approx \sin i_s \cos \lambda$$

# トランジット惑星観測からわかること

## ■ 測光観測

- 公転周期、惑星半径（主星半径との比）
- 我々の視線方向に対する公転面軌道傾斜角 ( $i_{orb}$ )
- 主星の自転速度

$$\cos \Psi = \sin i_s \sin i_{orb} \cos \lambda + \cos i_s \cos i_{orb} \approx \sin i_s \cos \lambda$$

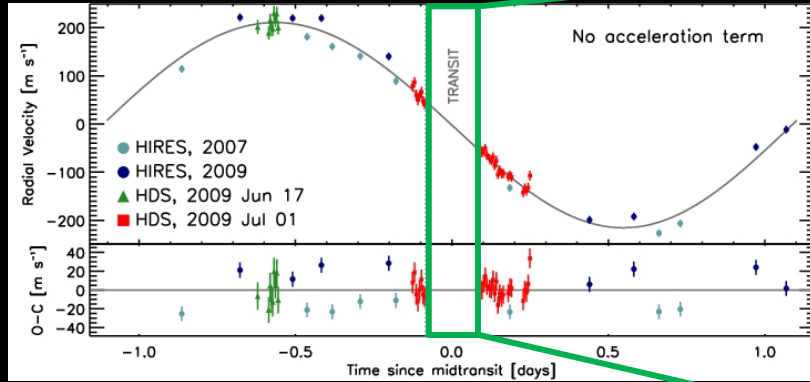
## ■ + 分光観測

- 惑星質量、離心率
- 主星自転軸と惑星公転軸の天球面への射影角 ( $\lambda$ )

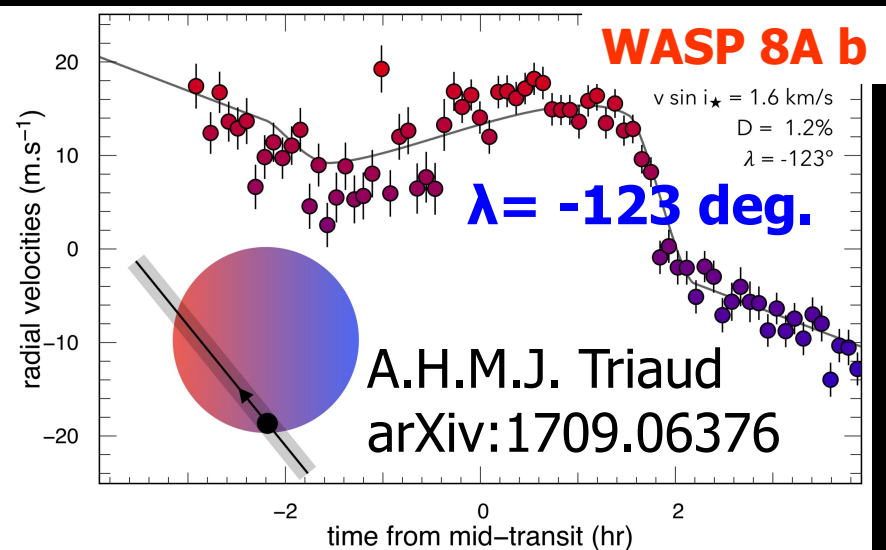
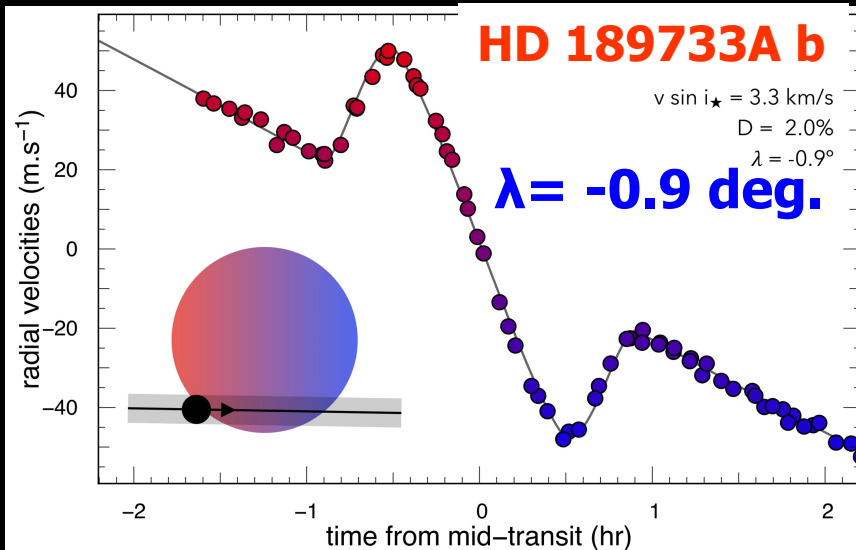
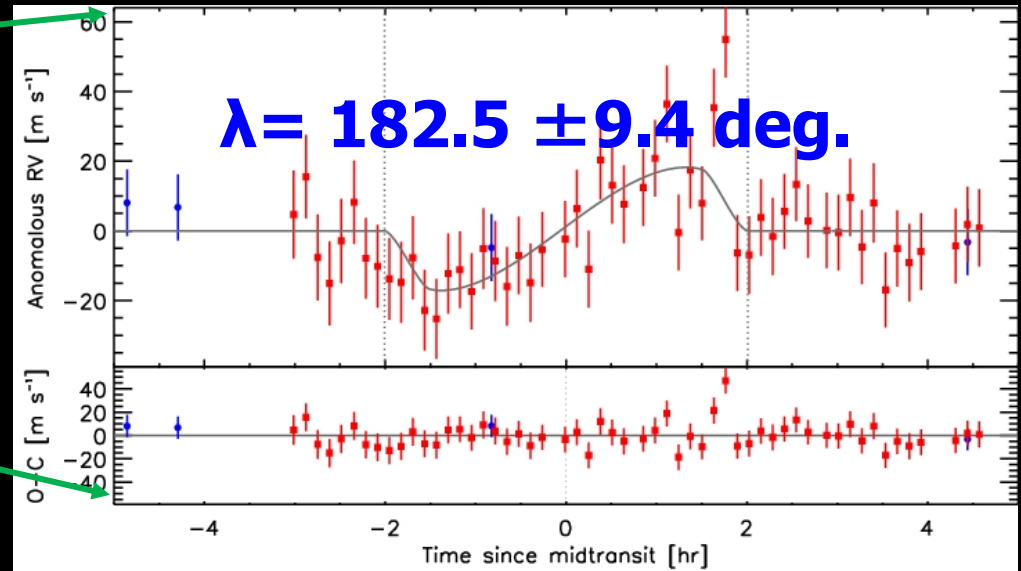
## ■ 星震学(asteroseismology)

- 主星の温度、半径、密度などの精密推定
- 我々の視線方向に対する主星自転軸傾斜角 ( $i_s$ )

# ロシター効果を用いた $\lambda$ の推定



Winn et al. (2010)ApJ 723 L223



### 3 星震学による自転傾斜角測定



# 太陽型恒星の振動

( $0.8M_{\odot} < M < 2.5 M_{\odot}$ )

- **対流**が恒星内部の振動を駆動
- この振動が内部に、異なる振動数をもつ固有モードの重ね合わせの定在波を生む



- この定在波によって誘起された温度変化が、恒星表面の周期的光度変化として測定される

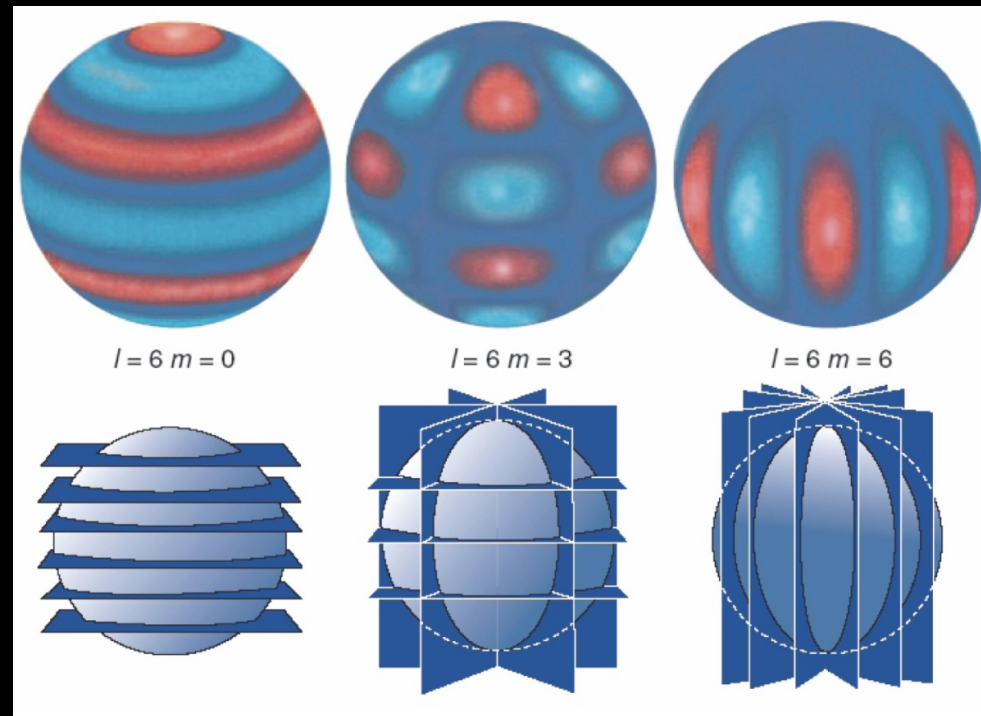
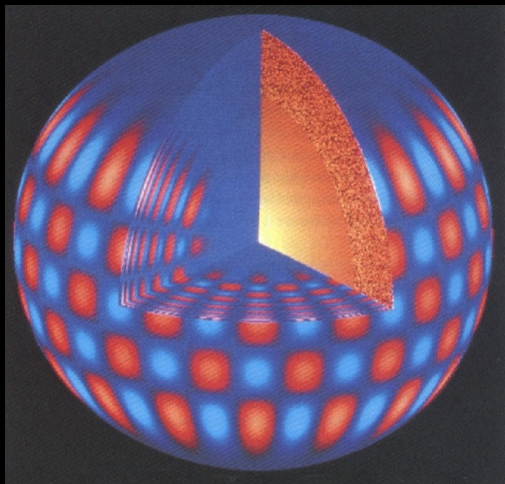
# 振動の固有モードと固有値

- 球面調和関数展開 (⇔ 量子力学！)

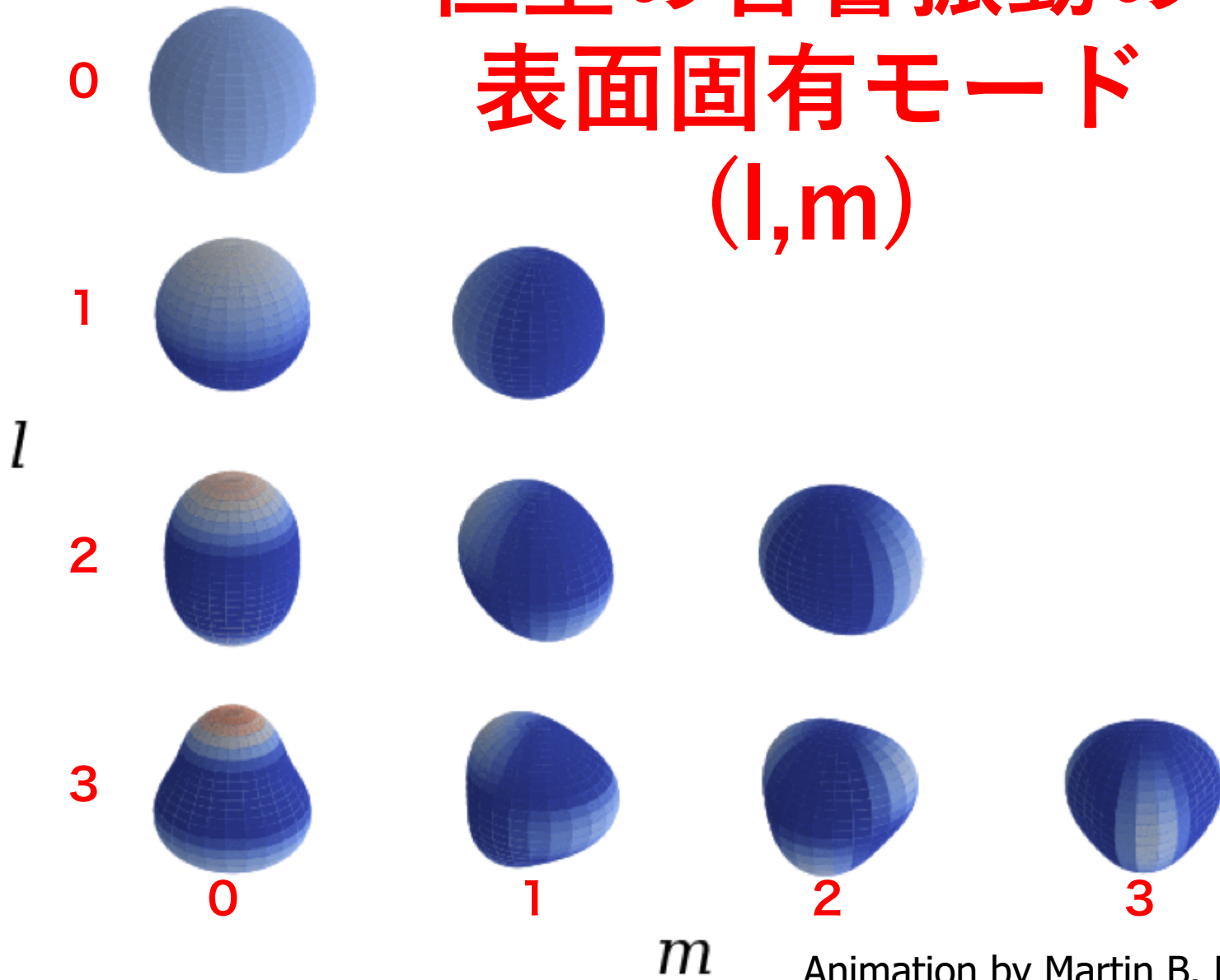
$$Y_{lm}(\theta, \varphi) \propto P_l^{|m|}(\cos \theta) e^{im\varphi}$$

- 固有モードを特徴づける整数(n,l,m)

- **n** radial order
- **l** angular degree
- **m** azimuthal order

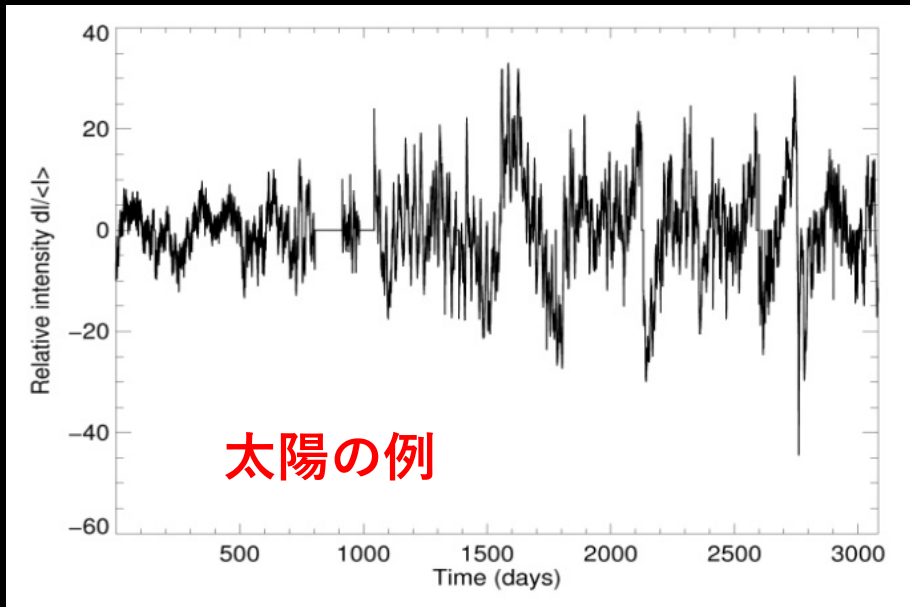


# 恒星の音響振動の 表面固有モード ( $l, m$ )



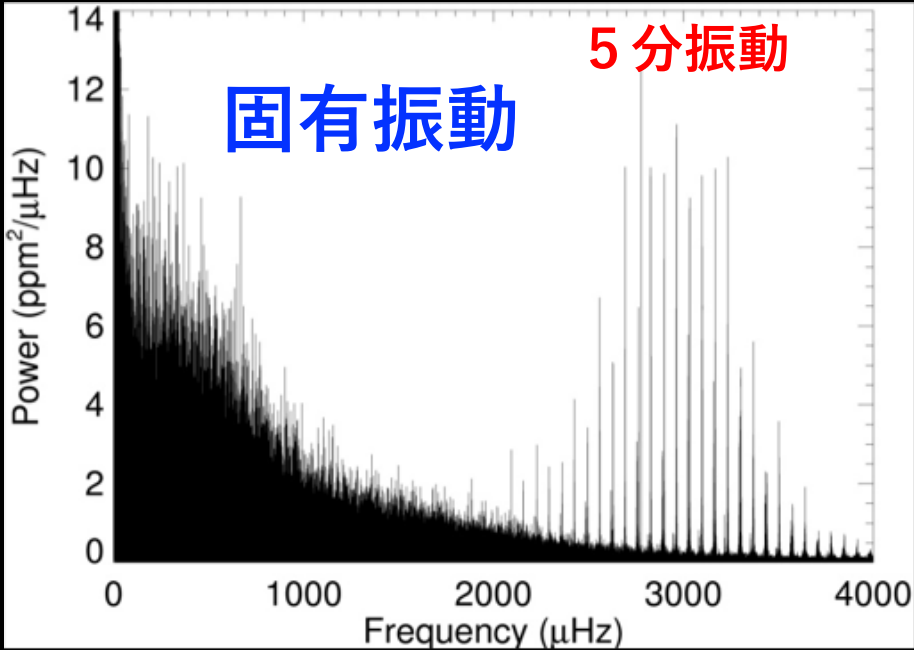
Animation by Martin B. Nielsen

# 恒星光度曲線から振動パワースペクトルへ



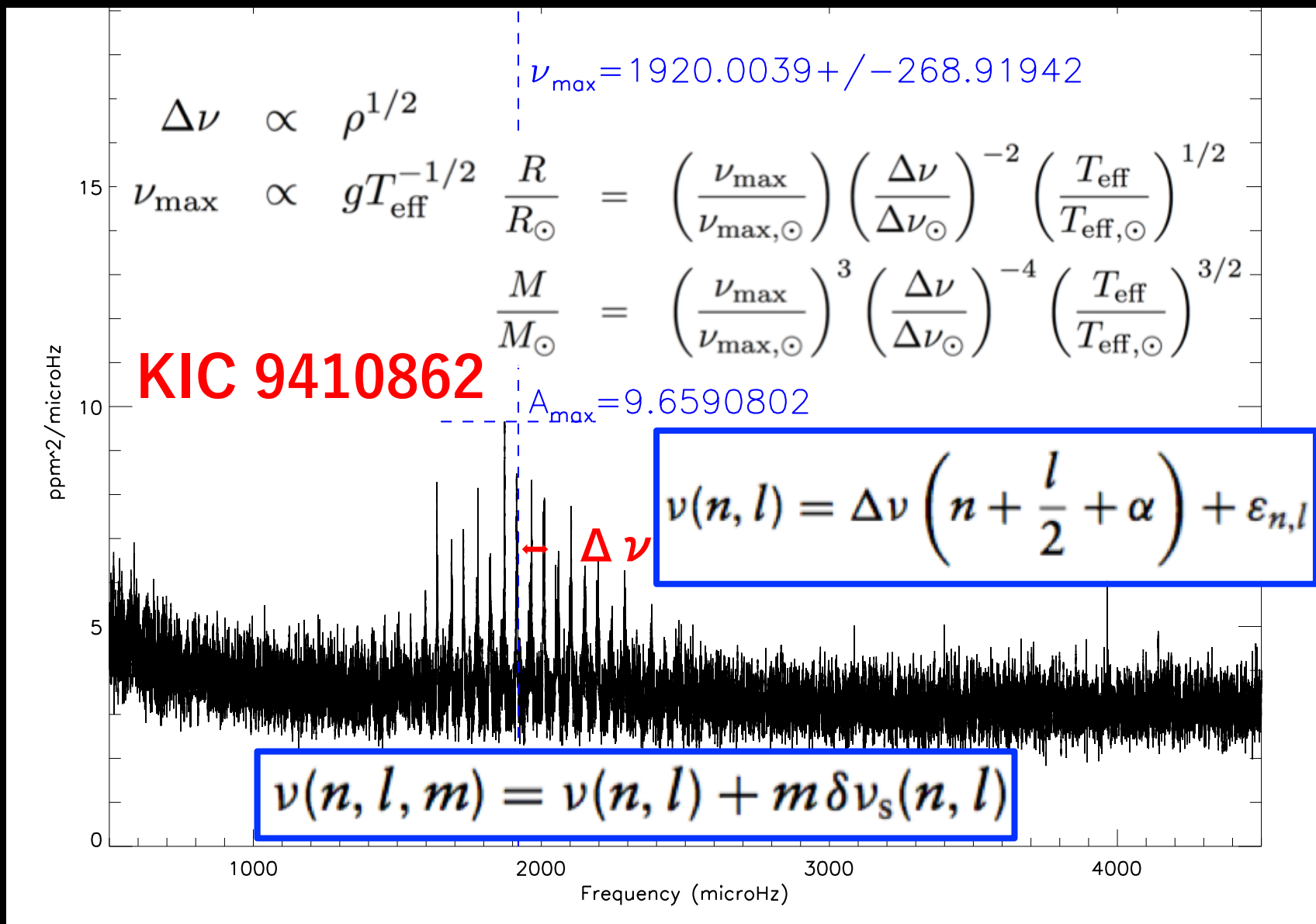
時間領域での光度曲線

周波数領域での  
パワースペクトル



フーリエ変換

# 振動スペクトルから半径と質量を推定



# 恒星の自転傾斜角の効果( $l=3$ )

$m=\pm 3$

$m=\pm 2$

$m=\pm 1$

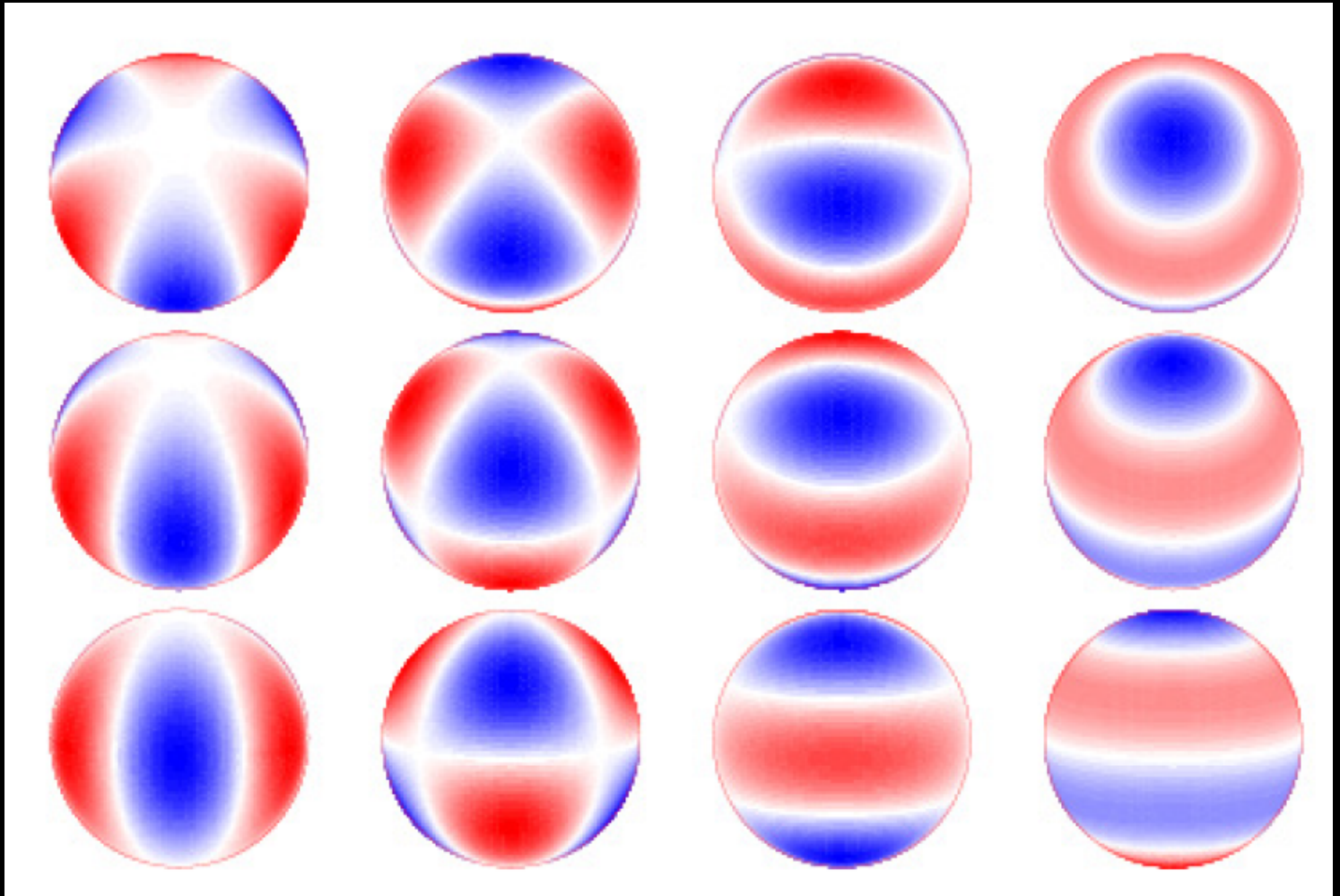
$m=0$

$i_s$

$30^\circ$

$60^\circ$

$90^\circ$



# 恒星の自転傾斜角とパワースペクトル

- 恒星の系での固有振動モードは

$$\Psi_{nlm}(r, \theta, \varphi, t) = R_n(r) Y_{lm}(\theta, \varphi) e^{-i\omega_{nl}t} \propto e^{i(m\varphi - \omega_{nl}t)}$$

- これを観測者の系で見ると

$$\Psi_{nlm'}(r, \theta + i_*, \varphi - \Omega_*t, t) \propto e^{i(m'\varphi - m'\Omega_*t - \omega_{nl}t)}$$

- したがって、観測されるパワースペクトルは

$$P(\omega) = \sum_{n,l} \sum_{m=-l}^l \frac{\mathcal{E}_{lm}(i_s) H_{nl}(\omega)}{1 + 4(\nu - \nu_{nlm})^2 / \Gamma_{nlm}^2}$$

振幅のm依存性

$$\mathcal{E}_{lm}(i_s) = \frac{(l - |m|)!}{(l + |m|)!} \left[ P_l^{|m|}(\cos i_s) \right]^2$$

固有振動数のm依存性

$$\nu_{nlm'} = \nu_{nl} + m' \delta\nu_* (1 - C_{nl})$$

自転周波数

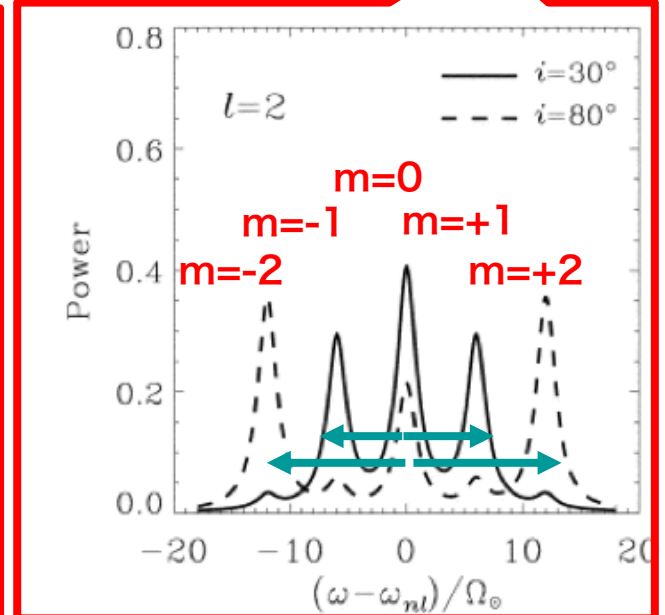
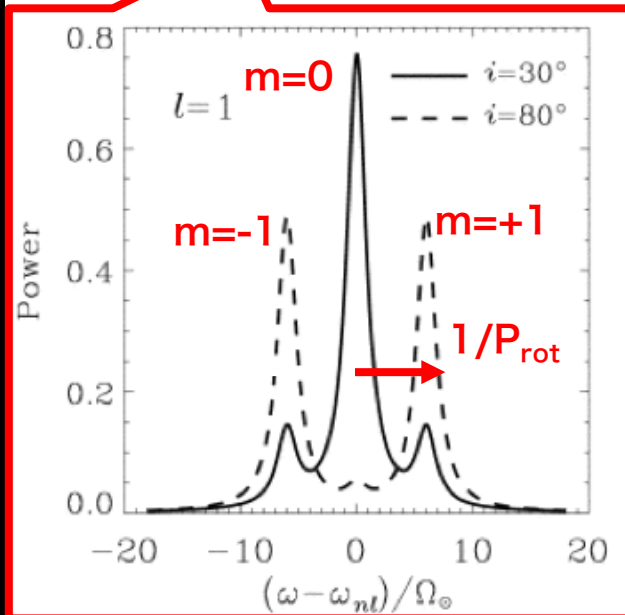
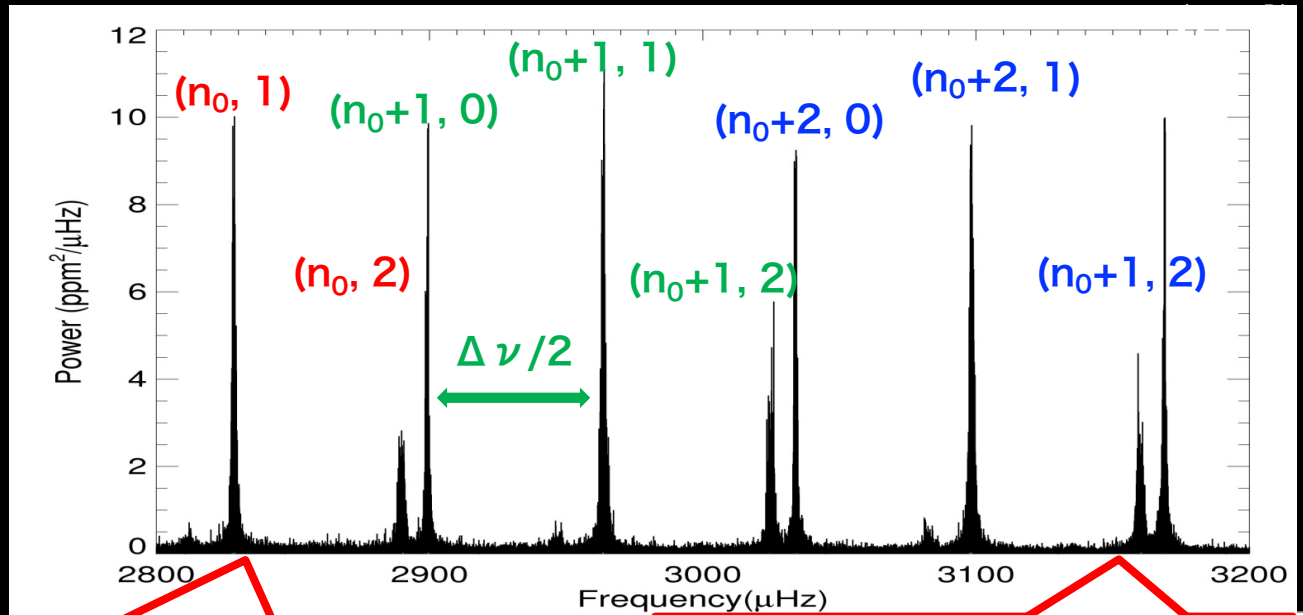
微小補正項

# 恒星の自転がmの縮退を解く

$$\nu(n, l) = \Delta\nu \left( n + \frac{l}{2} + \alpha \right) + \varepsilon_{n,l}$$

$$\nu(n, l, m) = \nu(n, l) + m\delta\nu_s(n, l)$$

異なるmモード  
の振幅比から*i*★  
が測定できる





# ラーマールの定理

- スカラーポテンシャル $\varphi$ のもとで、質量 $m$ と電荷 $q$ を持つ粒子のラグランジアン

$$L = \frac{1}{2}mv^2 - q\varphi(r, z)$$

- $z$ 軸まわりに角振動数 $\Omega$ で回転する座標系

$$L = \frac{1}{2}mv^2 - q\varphi(r, z) + m\Omega(xv_y - yv_x) + \frac{1}{2}m\Omega^2 r^2$$

- $z$ 軸方向に一様磁場 $B$ をかける

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2}mv^2 - q\varphi(r, z) + q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A} \\ &= \frac{1}{2}mv^2 - q\varphi(r, z) + \frac{qB}{2}(xv_y - yv_x) \end{aligned}$$

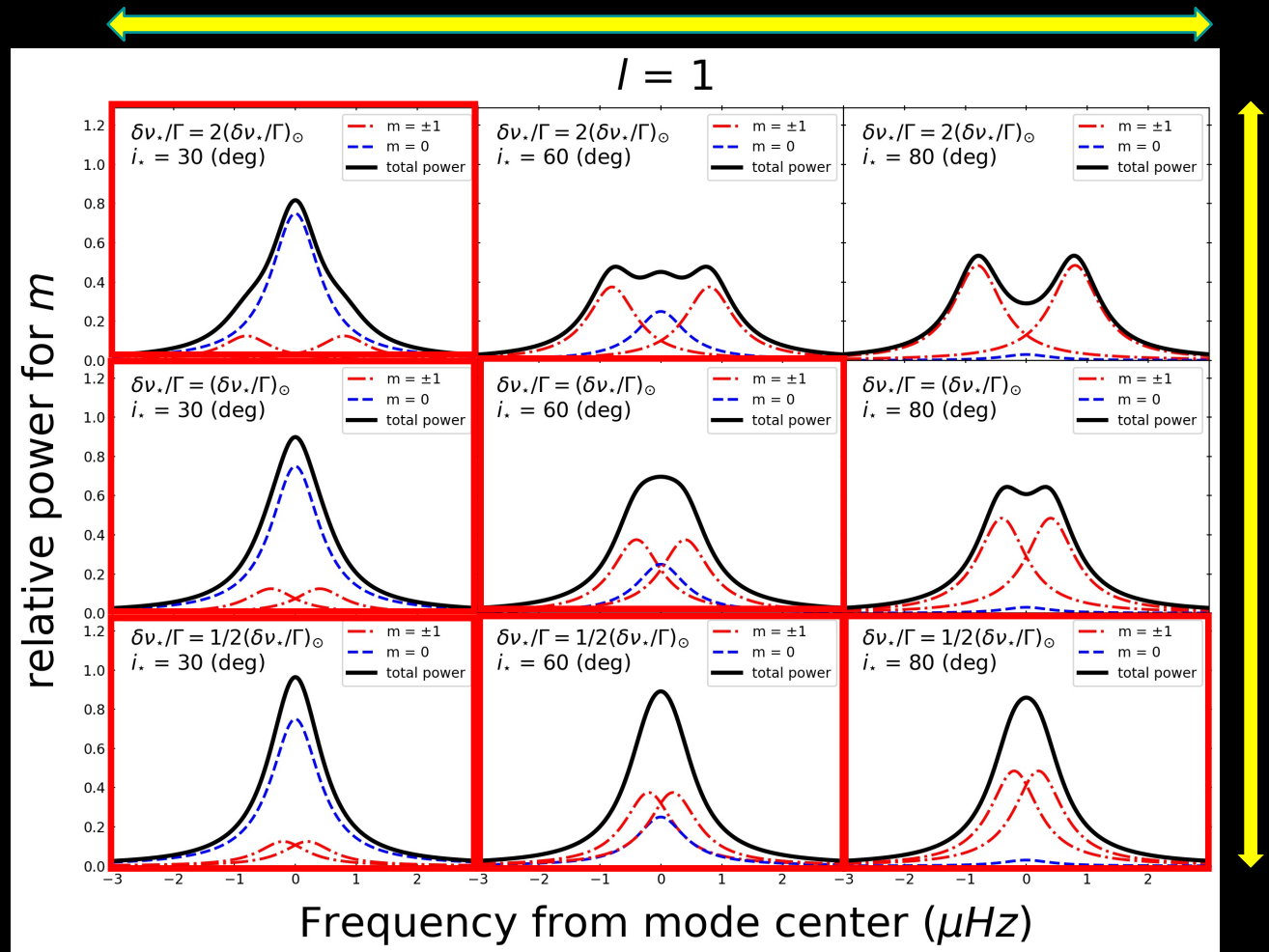
- $\Omega$ の回転は、 $B=2m \Omega/q$ の磁場と等価
  - 古典的な星震学と量子論的ゼーマン効果が対応している

# 星震学による恒星自転傾斜角の推定

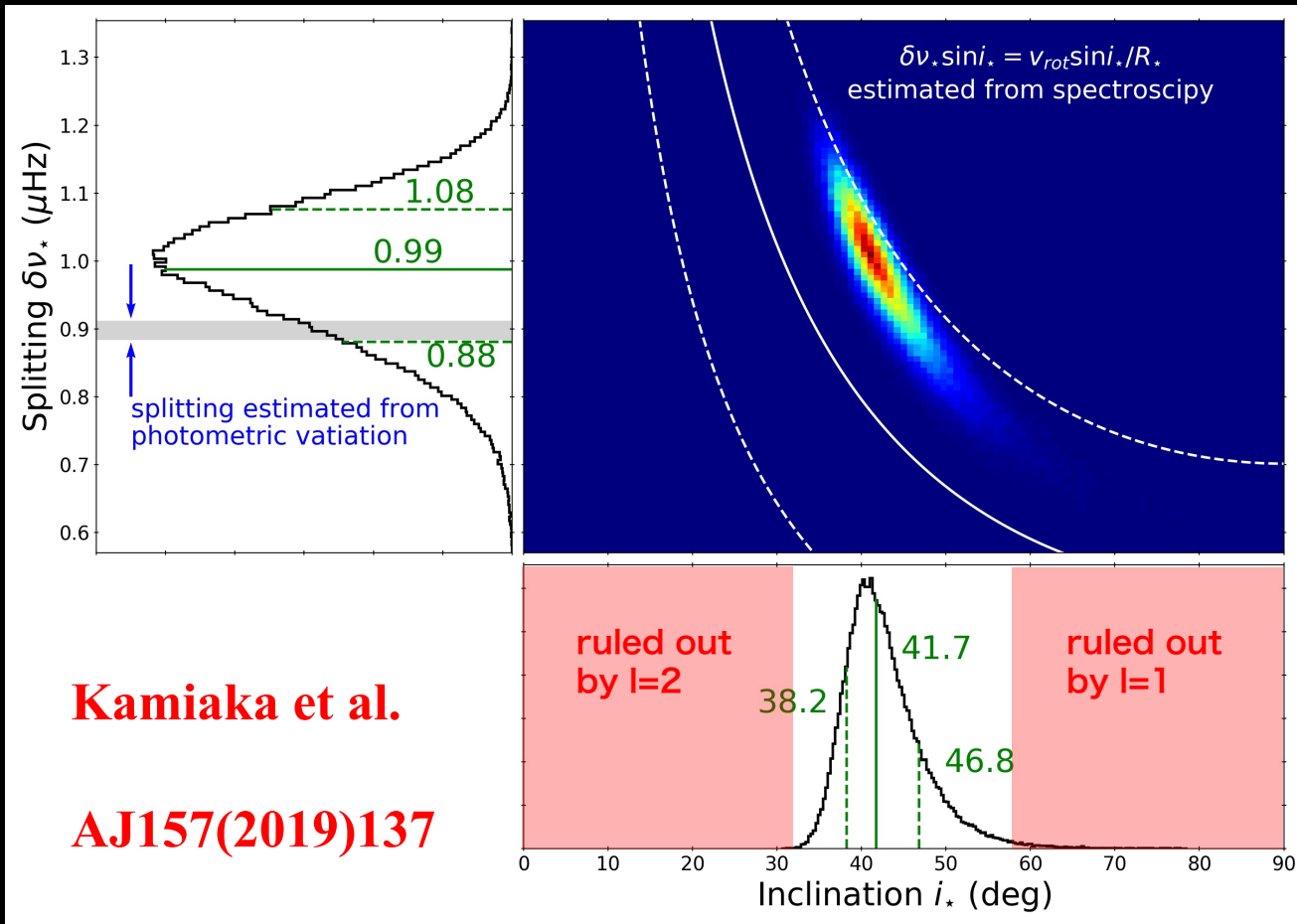
## ■ 振動モードのプロファイル $\delta\nu_{\star}$ : 自転周波数 $\Gamma$ : 振動モードの幅

小さい ← 主星の自転傾斜角 → 大きい

Toutain & Gouttebroze,  
(1993)  
Gizon & Solanki (2003)  
Kamiaka, Benomar & Suto  
(2018)



# Kepler-408に対する制限

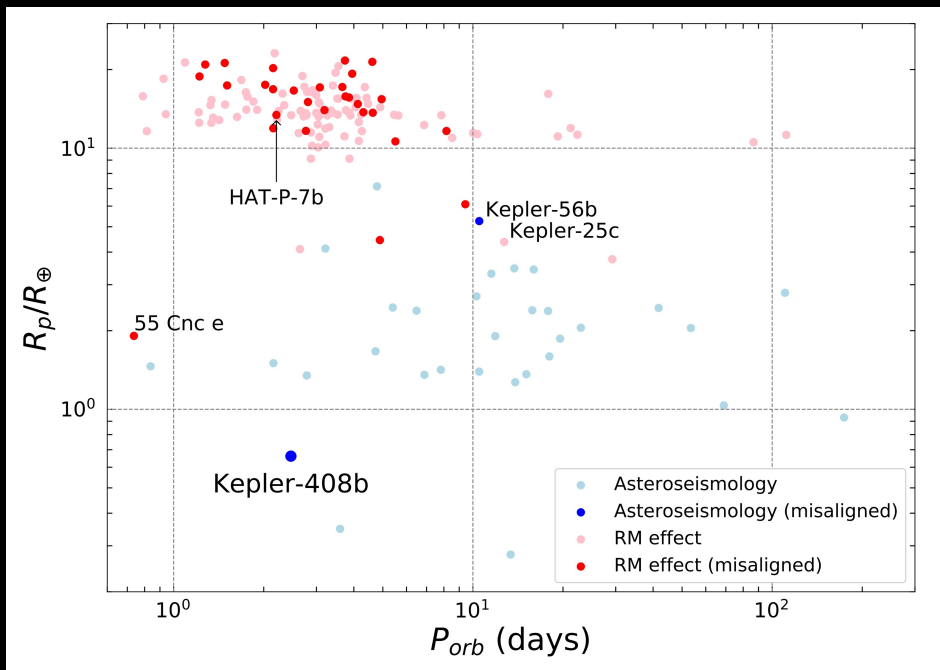


- 他の独立な推定とも良い一致
  - 光度変動から測定した自転周波数： $1/P_{\text{rot}}$
  - 特性線の速度幅： $v_{\text{rot}} \sin i_*$

$$i_* = \sin^{-1} \left( \frac{v_{\text{rot}} \sin i_*}{2\pi R_*/P_{\text{rot}}} \right) = 44^{+20}_{-15} \text{ (deg)}$$

- 傾いた軌道を持つ惑星の中では最小で、唯一の地球サイズの惑星

# Kepler-408の意義



■ 星震学のみで有意な自  
転公転角のずれが得ら  
れた第2例目

■ RM効果も含めて有意  
な自転公転角のずれが  
得られている最小の惑  
星 (0.7地球半径)

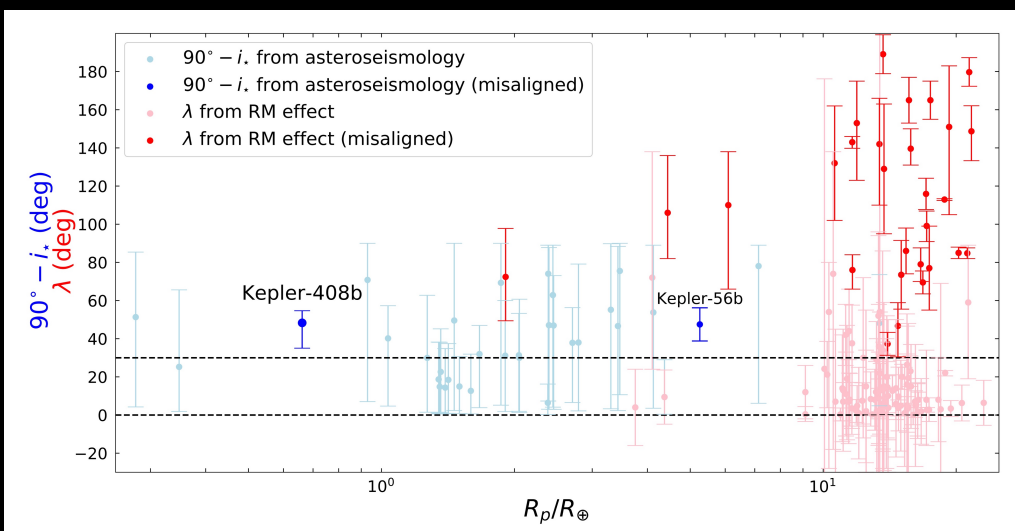
■ ずれを生む物理過程に  
対する制約

**Kamiaka, Benomar & Suto**  
**MNRAS( 2018)**

**Kamiaka, Benomar, Suto**  
**et al.**

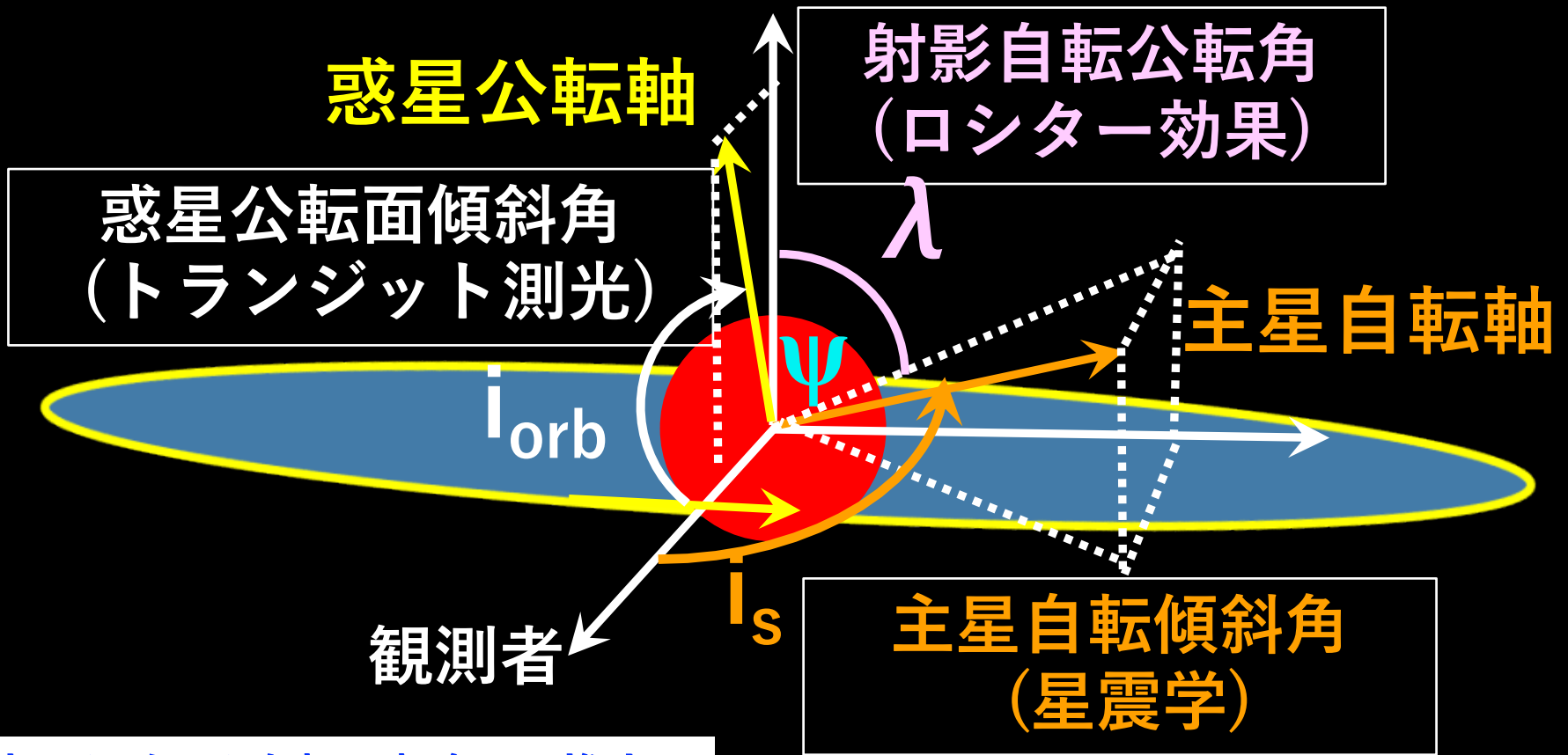
**AJ 157(2019)137**

**Suto, Kamiaka & Benomar**  
**AJ 157(2019)172**



# 4 トランジット惑星系 自転公転角の研究史

# 主星自転軸と惑星公転軸の関係



真の(3次元)自転公転角 $\Psi$ の推定

$$\cos \Psi = \sin i_s \sin i_{orb} \cos \lambda + \cos i_s \cos i_{orb} \\ \approx \sin i_s \cos \lambda$$

# 私的先入観の時間的推移(1)

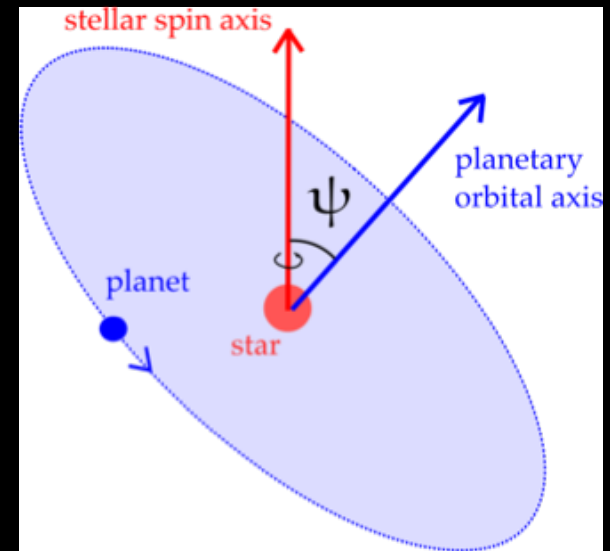
- **2005年**：(Ohta et al., Winn et al.)
  - 惑星公転軸と主星自転軸とは当然平行のはず
- **2009年**：多くのmisaligned惑星発見（ただし実質的に単独のホットジュピターのみ）
  - 惑星間の重力散乱？
    - 外側で誕生したガス惑星が、他の惑星との重力散乱の結果内側に落ちる（放出されるものもある）
    - 軌道は一般に高離心率、傾斜角も大きい
    - その後、主星との潮汐相互作用を通じて順行（一部は逆行）軌道へ近づく

# 2009年時点での自転公転角の理解

- 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ない安定な系だったため、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



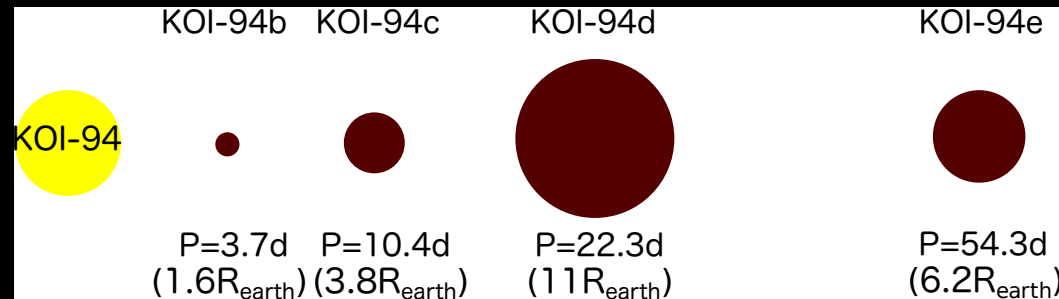
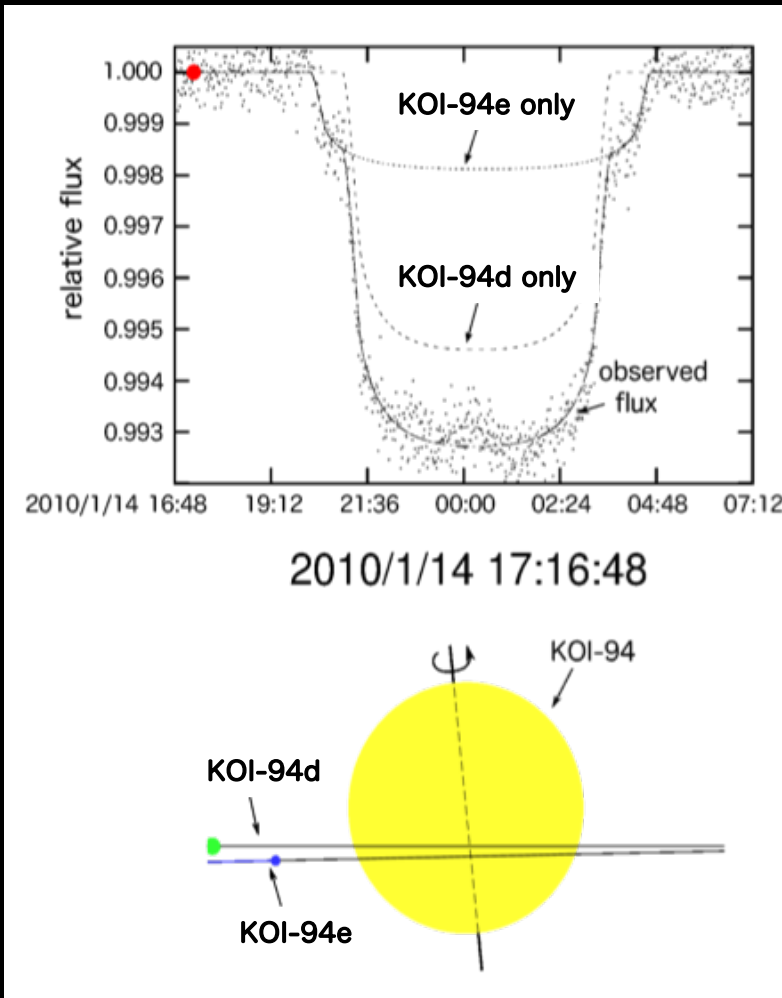
# 私的先入観の 時間的推移 (2)



## ■ 2010年

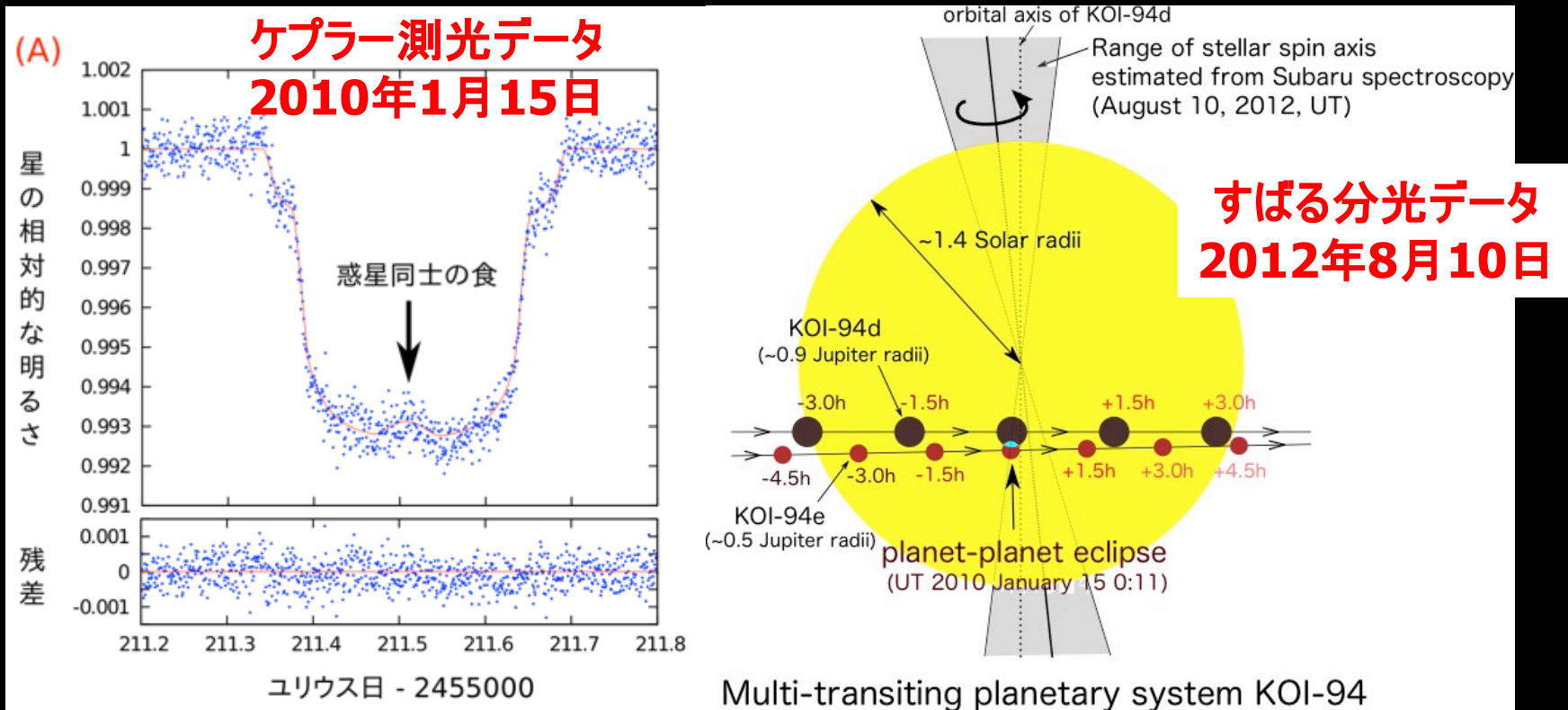
- 太陽系のように公転面をほぼ共有する複数惑星系では、惑星間の重力散乱が効いたとは思えない
- 実際、太陽系では太陽の自転軸と惑星の公転軸は7度以内の範囲でほぼ揃っている
- とすれば**複数トランジット惑星系**（公転面がほぼ同じ）の $\lambda$ はほぼ0のはず  $\Rightarrow$  すばるで観測して確認しようじゃないか！（Hirano et al.）

# 複数トランジット惑星系KOI-94： 惑星食の初検出



- すばる観測前にアーカイブされたケプラー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から、複数惑星系KOI-94においては、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？**
- **地球からみて金星と水星が同時に太陽面をトランジットするのは、西暦69163年7月26日と224508年3月27日だけ。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**

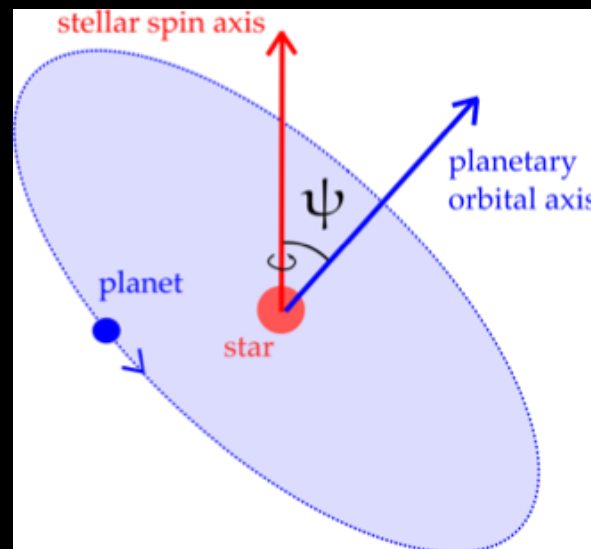
# 私的先入観の時間的推移 (3)

- **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  $\lambda = -6^{+13}_{-11}$ 度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
  - めでたしめでたし(のはずだったが)?

Hirano et al. ApJL 759 (2012)L36

Masuda et al. ApJ 778(2013)185

# 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! ?

# RM効果と星震学による自転公転角の推定

## ■ 2014年 (Benomar, Masuda, Shibahashi+YS)

■ RM効果の $\lambda$ と星震学の $i_s$ を組み合わせて、真の自転公転角 $\Psi$ を初めて推定

■ 実際に可能な次の2つの系のみ

■ Kepler-25 (F型星 + 公転周期6日と13日の2惑星)

$$\lambda = 9.4^\circ \pm 7.1^\circ$$

$$i_s = 65.4^{+12.1}_{-7.4}^\circ$$

$$\Psi = 26.9^{+7.0}_{-9.2}^\circ$$

Campante et al. (2016)  $i_s = 80.6^{+6.5}_{-9.3}^\circ$   $\Psi = 12.6^{+6.7}_{-11.0}^\circ$

■ HAT-P-7 (F型星 + 2.2日の惑星)

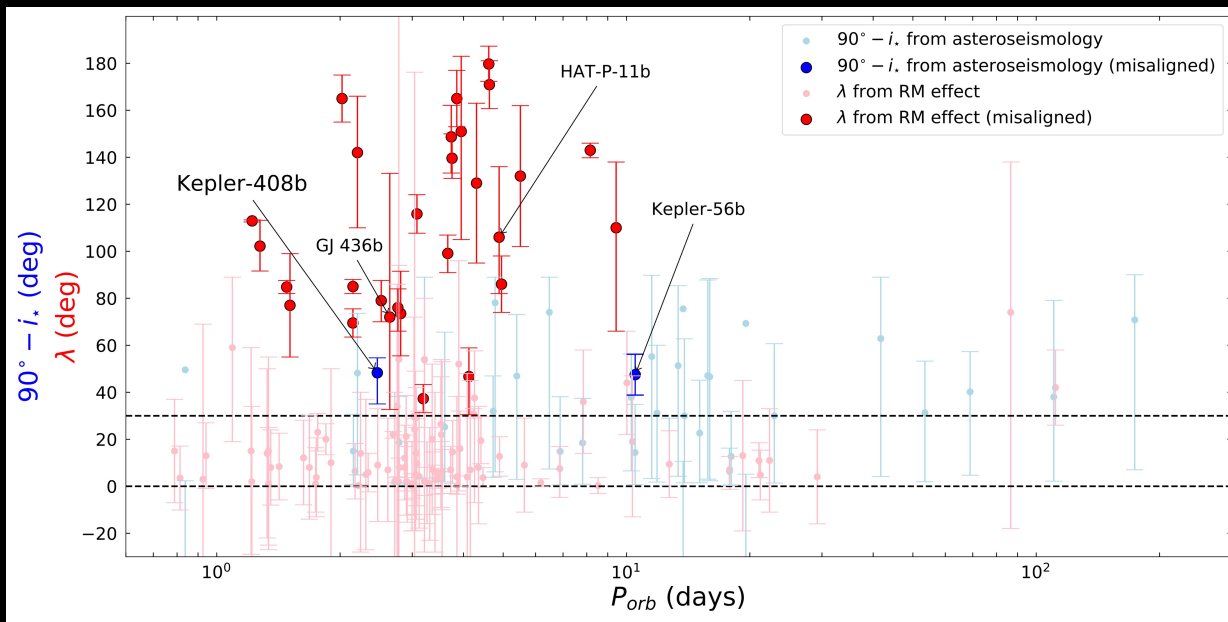
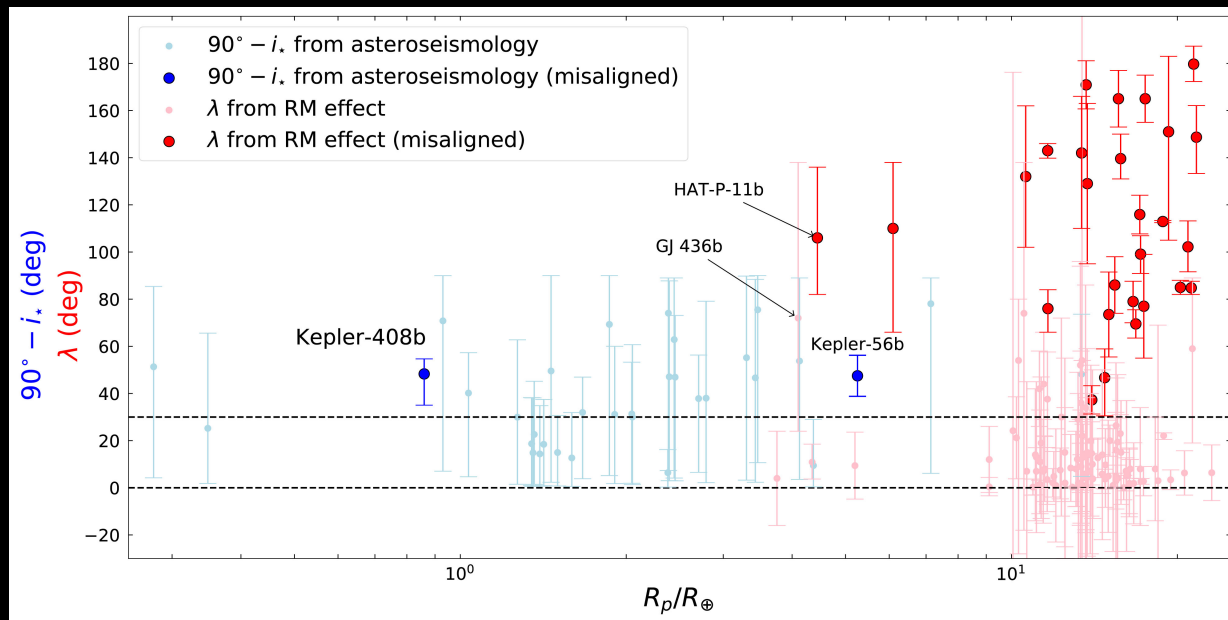
$$\lambda = 186^{+10}_{-11}^\circ$$

$$i_s = 27^{+35}_{-18}^\circ$$

$$\Psi = 122^{+30}_{-18}^\circ$$

Benomar, Masuda, Shibahashi + YS, PASJ 66(2014) 9421

# 2019年時点での自転公転角分布のまとめ



Kamiaka, Benomar & Suto  
MNRAS( 2018)

Kamiaka, Benomar, Suto  
et al.  
AJ 157(2019)137

Suto, Kamiaka & Benomar  
AJ 157(2019)172

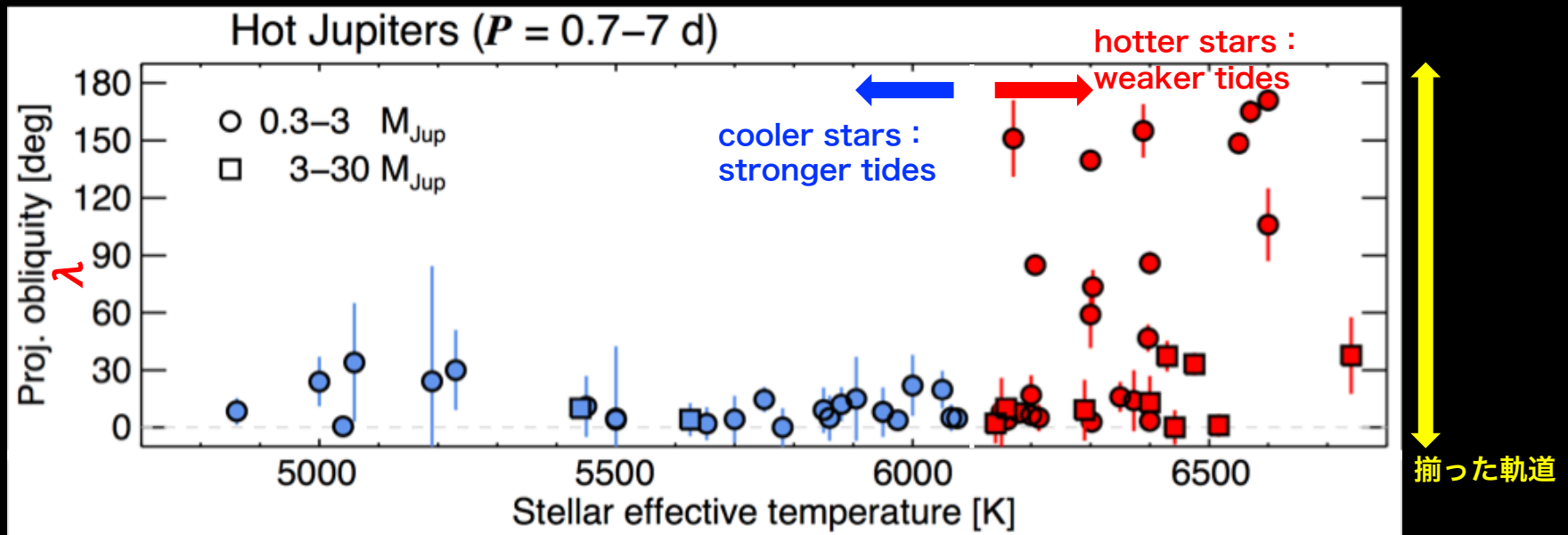
# 5 観測的アーキテクチャーの理解？



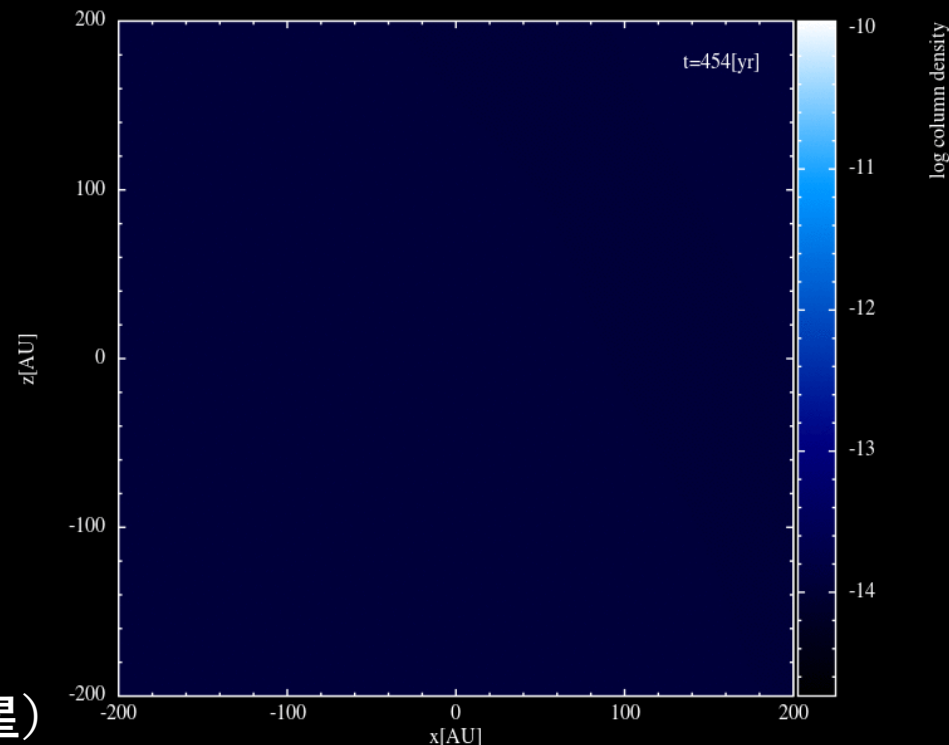
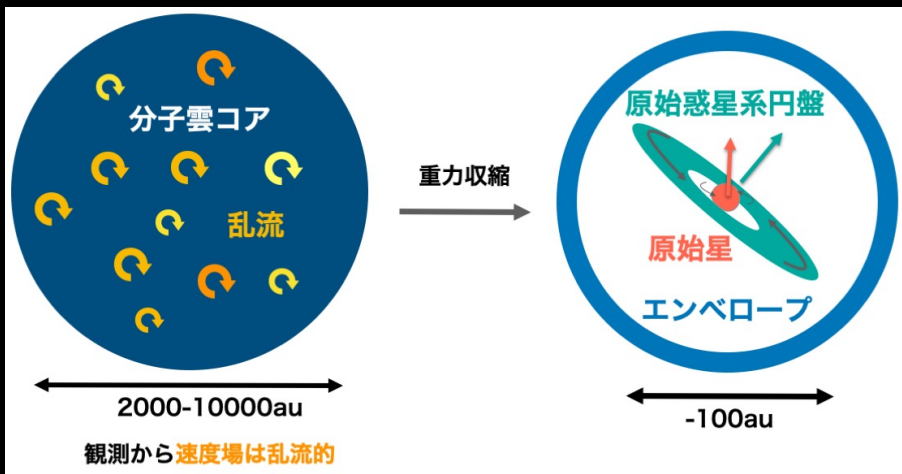
# 惑星系アーキテクチャーの起源？

- **初期条件**：主星の自転軸や原始惑星系円盤の回転軸がもともと傾いていた
- **力学進化**：惑星散乱、外部天体の重力摂動
  - 低温星周りのホットジュピターは軌道が揃っている  
→ 主星-惑星間の潮汐相互作用によって一旦傾いた軌道が再び揃った？

Winn & Fabrycky (2015)



# 乱流分子雲から原始惑星系円盤へ



## ■ SPH simulation

- 100万個粒子+sink粒子 (=原始星)
- 初期条件： $1M_{\text{sun}}$ , 10Kの乱流等温ガス球 (磁場は無視)
- 原始星 ( $0.03M_{\text{sun}} \rightarrow 0.3M_{\text{sun}}$ ) の自転軸はほぼ不変
- 円盤はエンベロープからの継続的物質膠着のために向きを変える
- 約1万年で原始惑星系円盤と原始星は20度以内で整列
- ただし、単独星ではなく複数の原始星が生まれる場合にはこの限りではない

Takaishi, Tsukamoto & Suto (2019)

# おうし座HL星の原始惑星系円盤

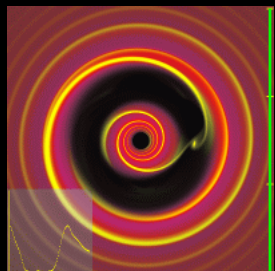
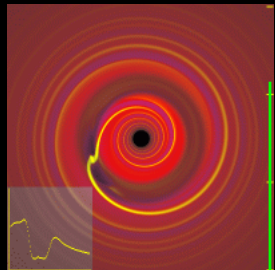
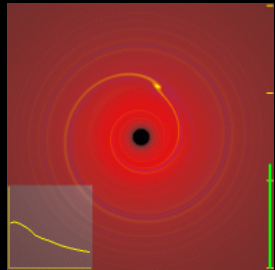


[www.eso.org](http://www.eso.org)

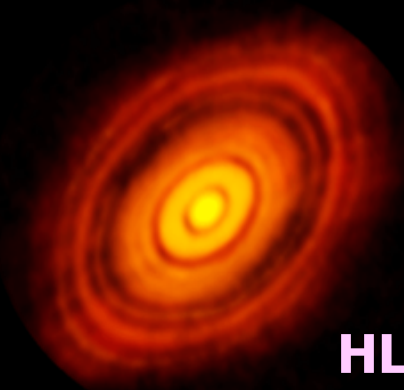
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/NASA/ESA/N. Risinger ([skysurvey.org](http://skysurvey.org))

# おうし座HL星から複数惑星系へ

- HLタウ円盤から生まれる複数惑星系の多様性

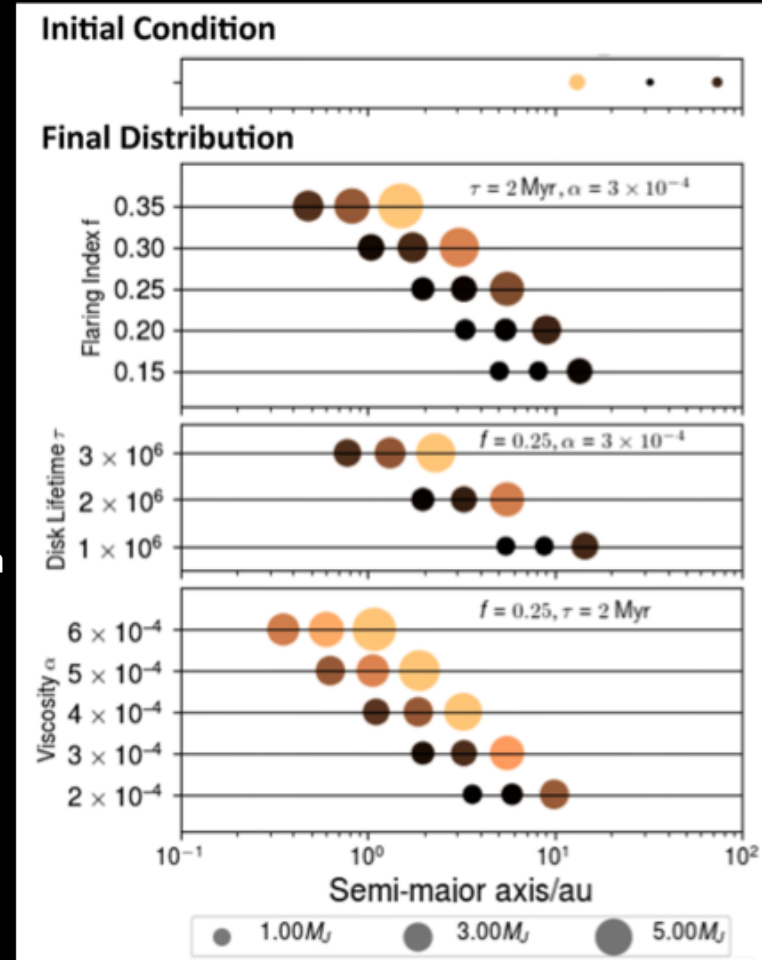


- ALMAによる原始系惑星円盤の高解像度画像（ガスではなくダスト成分）
- 距離140pc、質量(0.6-1.2) $M_{\text{sun}}$
- 年齢10万年以下
- ギャップが惑星形成に伴うものであれば（左図）、惑星形成は予想以上に早いことになる



HL Tauri

Simulation  
by Phil Armitage



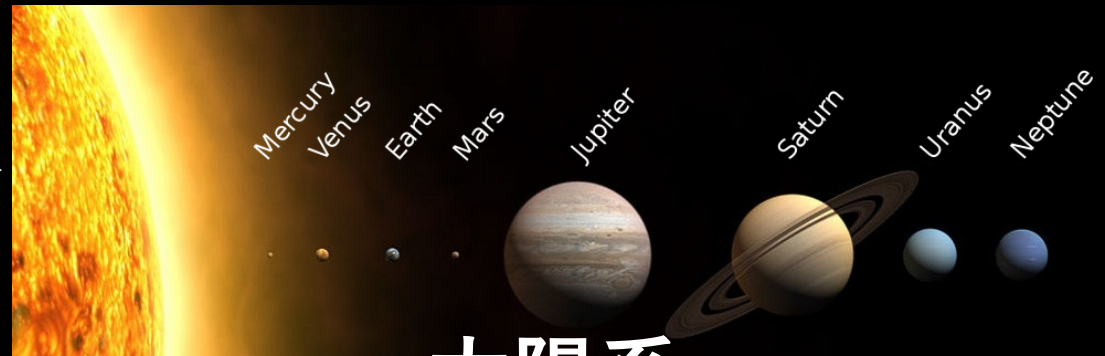
Wang, Kanagawa, Hayashi & Suto (2019)

# 結論：未解決の謎だらけ！

## ■ 惑星系の多様性の起源を探る

- Nature or Nurture (氏か育ちか?)
- 初期条件か力学的進化か
- 原始惑星系円盤から少数多体系のカオスへ
- 惑星－惑星重力散乱 主星－惑星潮汐相互作用
- 3体問題摂動論 数値シミュレーション データ解析

HL Tau



太陽系