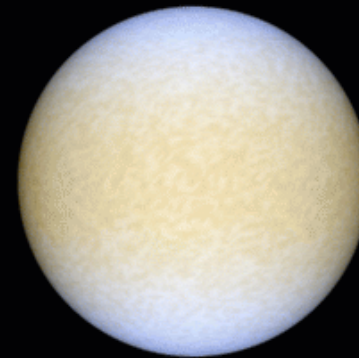
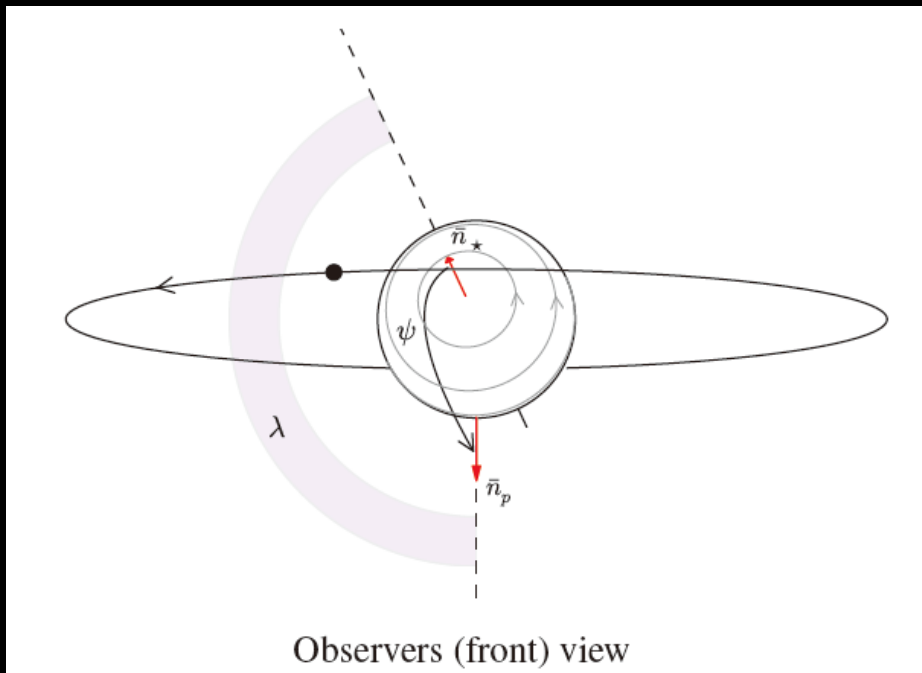


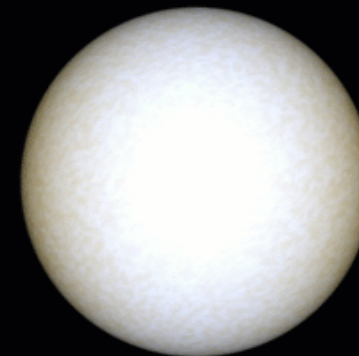
Spin-orbit angles of transiting planets



$l=2$
 $m=0$



$l=2$
 $m=-1$



$l=2$
 $m=+2$

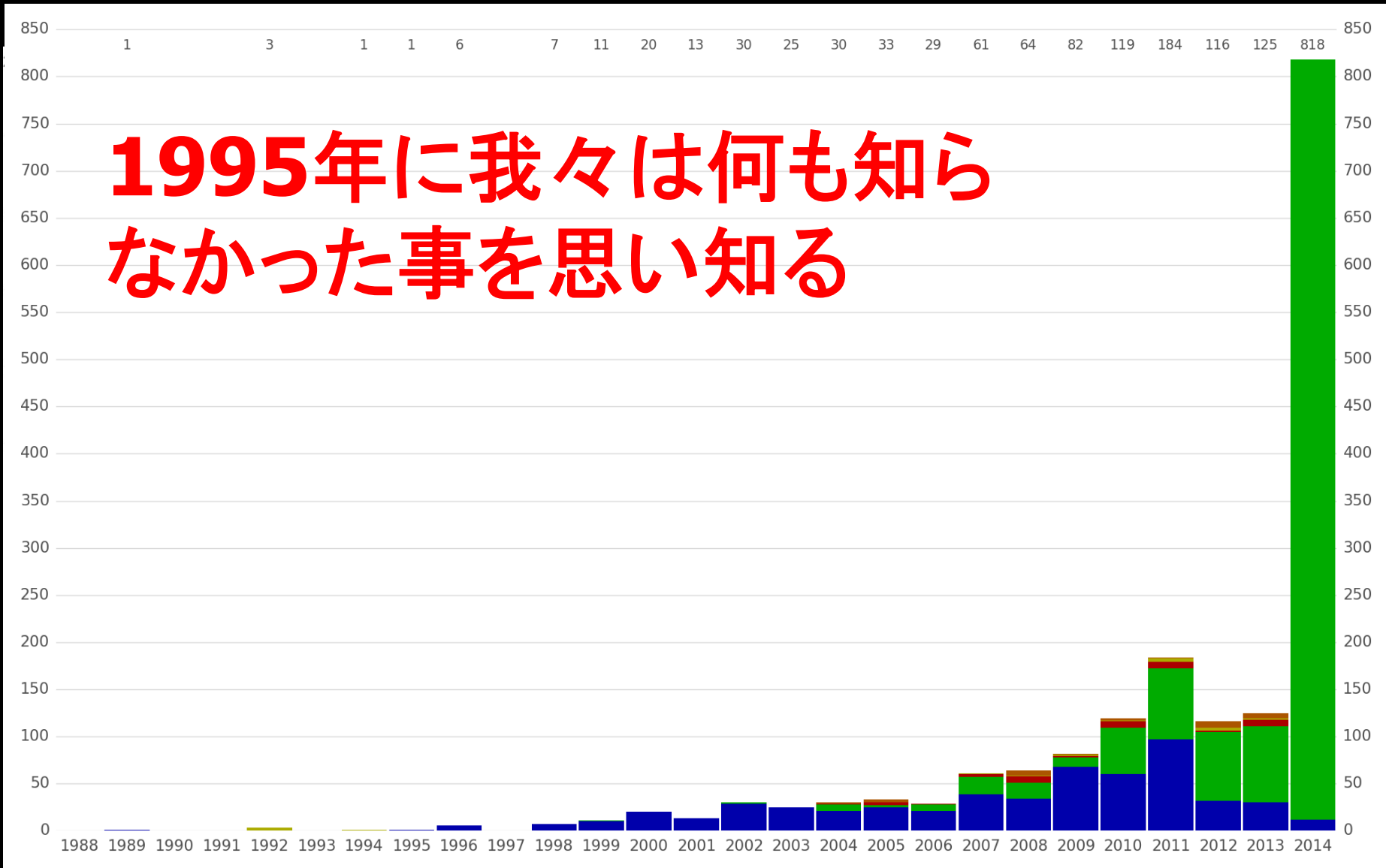
物理学専攻 須藤靖

RESCEU研究成果報告会

@浅間温泉錦の湯 地本屋

2014年7月31日 16:50-17:20

太陽系外惑星発見の歴史年表

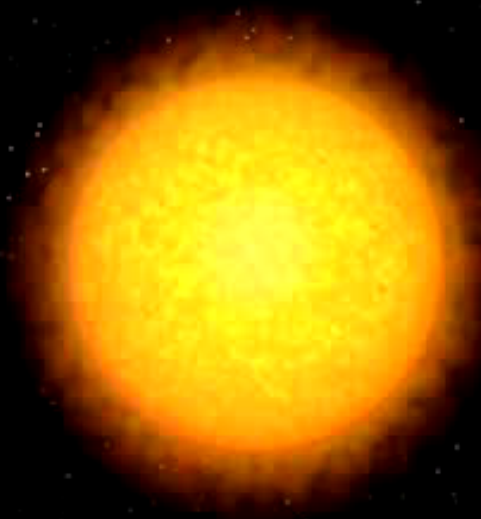


**1995年に我々は何も知ら
なかった事を思い知る**

初めてのトランジット惑星HD209458b

- 速度変動のデータに合わせた惑星による主星の掩蔽(可視光)の初検出

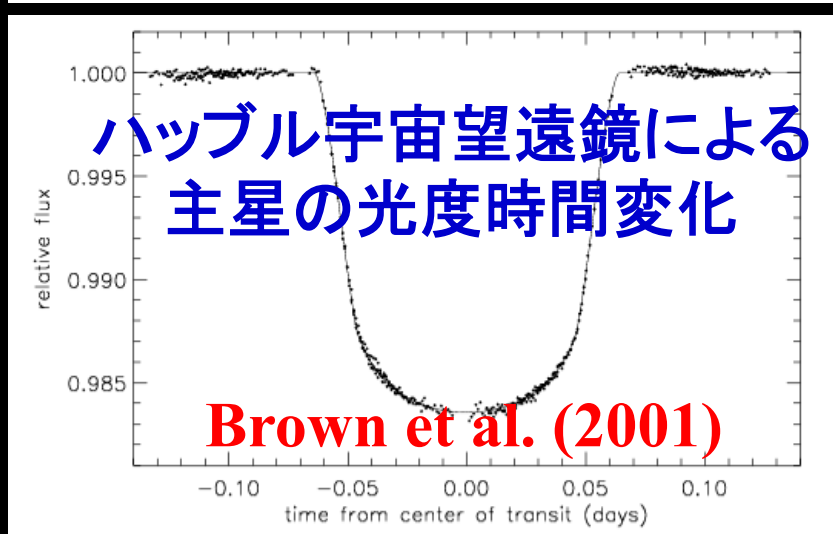
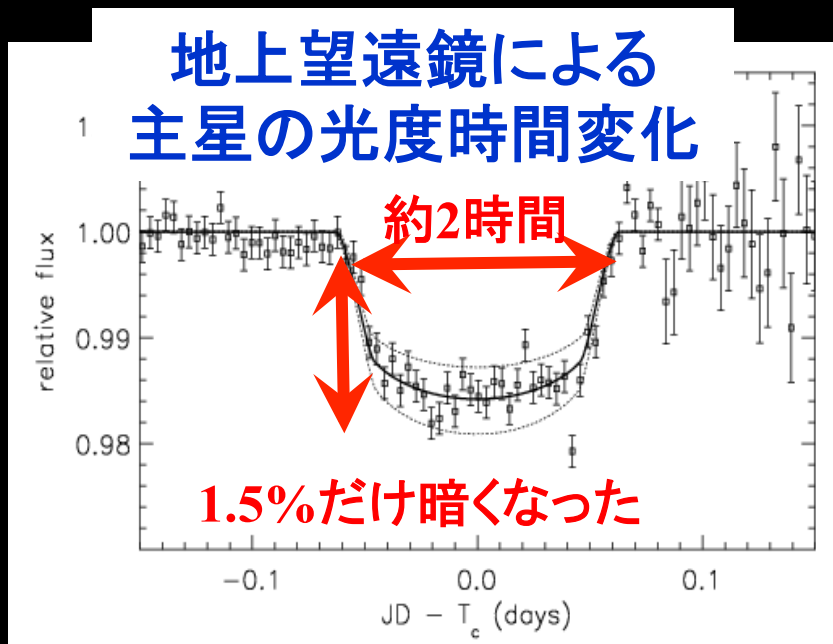
周期3.5日のホットジュピター



想像図

Henry et al. (1999)

Charbonneau et al (2000)



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)、我々の視線に対する公転面軌道傾斜角
- 主星の自転速度

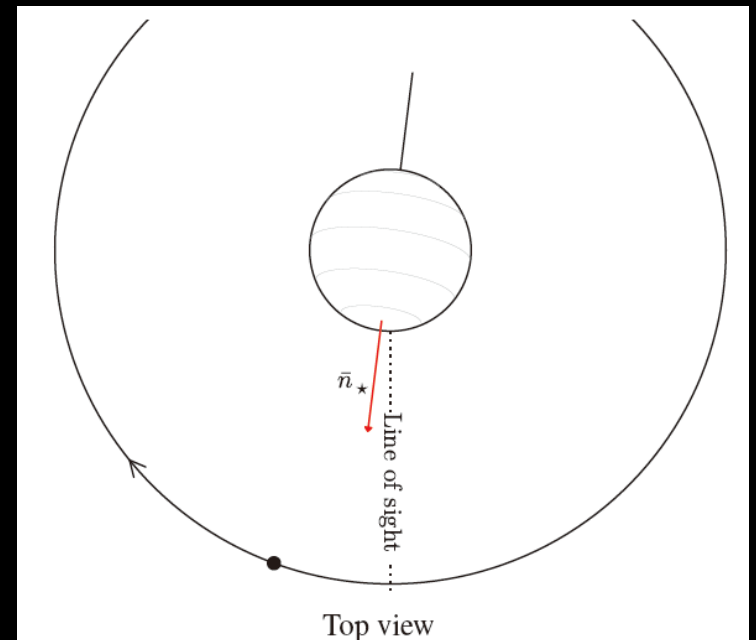
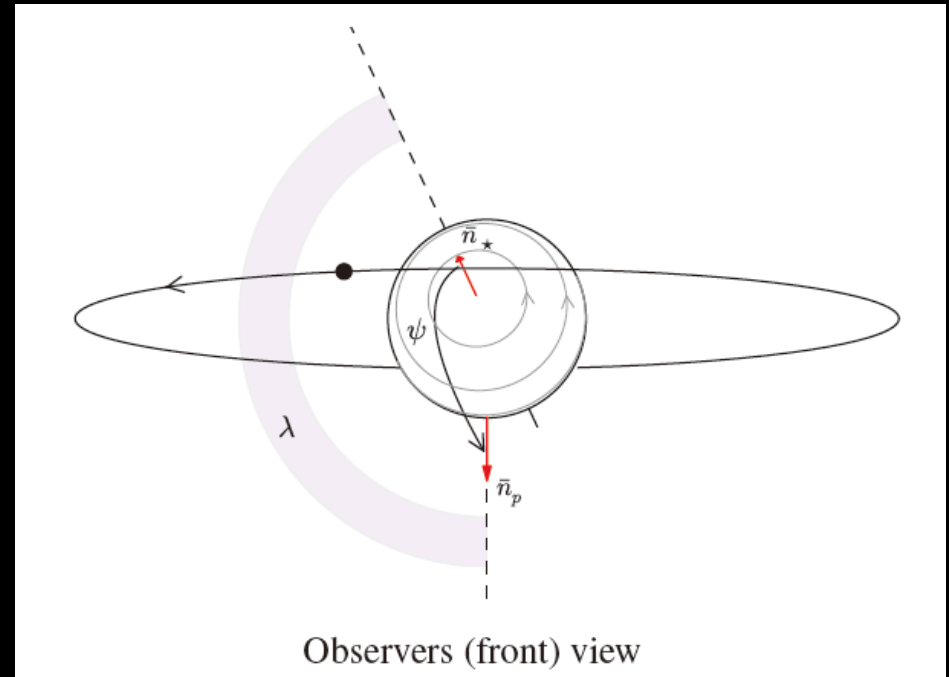
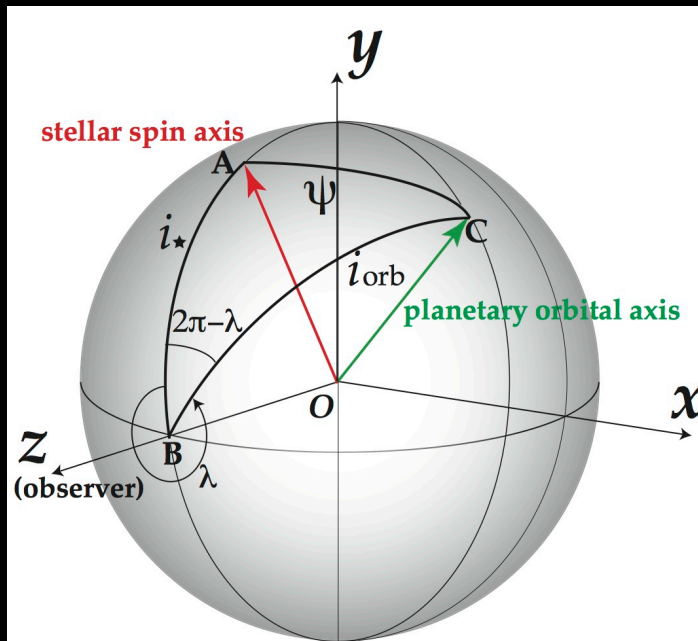
■ + 分光観測

- 惑星質量、離心率
- spin-orbit 射影角 λ (主星自転軸と惑星公転軸のなす角の天球面上への射影)

■ 星振学(asteroseismology)

- 主星の温度、半径、密度などの精密推定
- 我々の視線に対する主星自転軸傾斜角

主星-惑星-観測者の位置関係

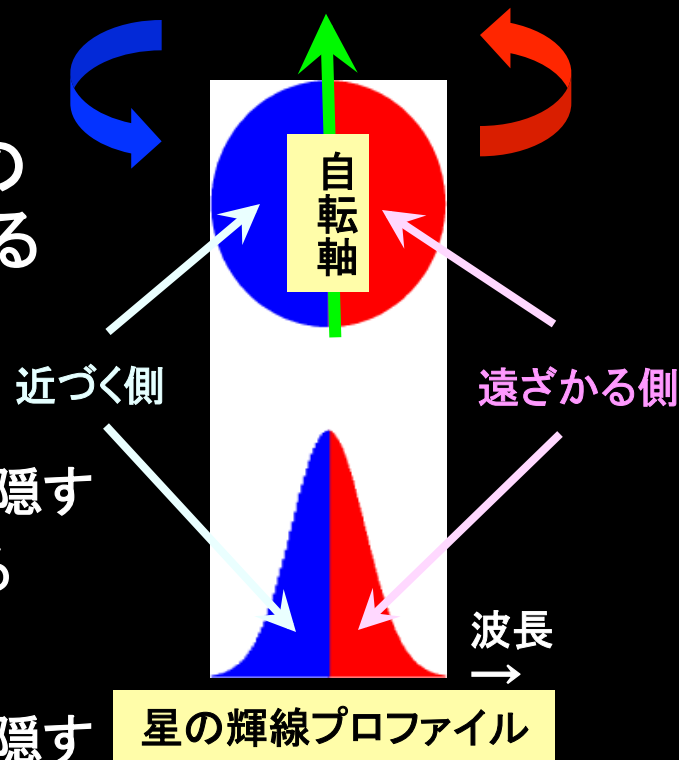


Benomar et al., arXiv:1407.7332

Lund et al., arXiv:1407.7516

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

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,¹ AND YASUSHI SUTO¹

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 λ .

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 Δv_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

ロシター効果@wikipedia

13/06/05

Rossiter-McLaughlin effect - Wikipedia, the free encyclopedia

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,^[1] strongly suggesting that dynamical interactions rather than planetary migration produce these objects.

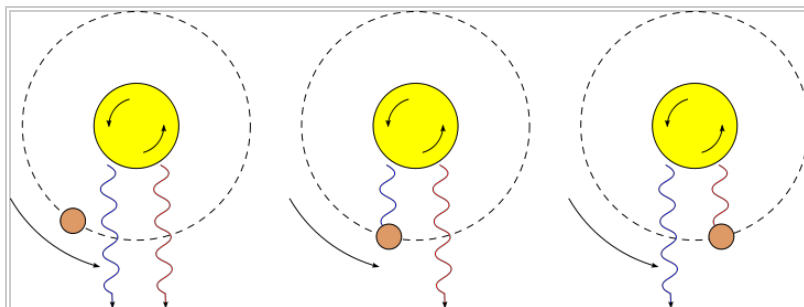


Illustration showing the effect. The viewer is situated at the bottom. Light from the anticlockwise-rotating star is blue-shifted on the approaching side, and red-shifted on the receding side. As the planet passes in front of the star it sequentially blocks blue- and red-shifted light, causing the star's 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.^[2]

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>)

13/06/05

ロシター効果 - Wikipedia

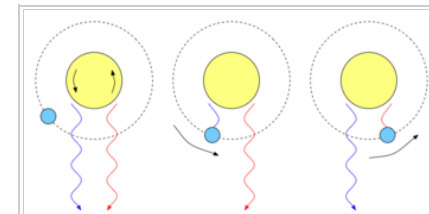
ロシター効果

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

ロシター効果または**ロシター・マクローリン効果**とは、食連星の伴星や太陽系外惑星が恒星面通過（食）を起こす際に、主恒星の光のドップラーシフトに一時的な変化が起きる現象のことである。

原理

恒星が自転をしている場合、観測される恒星面の半分は手前に近づいてくるように見え、残り半分は奥に逃げて行くように見える。この動きによってそれぞれの面が発する光は異なる方向（青方と赤方）にドップラーシフトを起こす。通常は、地球から遠く離れた恒星のそれぞれの半球を個別に観測することはできないため、このドップラーシフトはスペクトル中の吸収線や輝線が本来より幅広くなるという形で観測される。



恒星の自転により、恒星からの光は異なるドップラーシフトを持つ光を合成したものになっている。そのため、伴星によって光が一部分だけが遮られると、ドップラーシフトの平均値には変化が生じる。なお、上図では観測者は下方から恒星を眺めており、伴星の軌道は順行軌道を仮定している。

順行軌道の伴星が恒星面を通過する場合は、まず手前に流れてくる側の半円が一部覆い隠される。これは青方偏移を起こした恒星の光のみが選択的にブロックされることを意味する。その結果、ドップラーシフトの平均としては赤方寄りに偏移することになる。伴星が恒星面の中央に近づくとつれこの効果は次第に弱まるが、偏移が0になった後は、同様のメカニズムによって次第に青方偏移が見られるようになる。そして、通過が完全に終了すると恒星のドップラーシフトは平常に戻る。

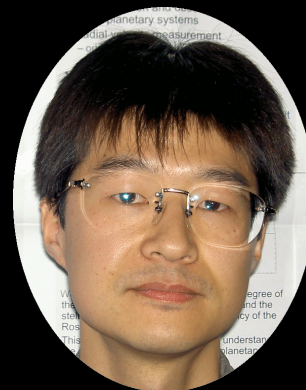
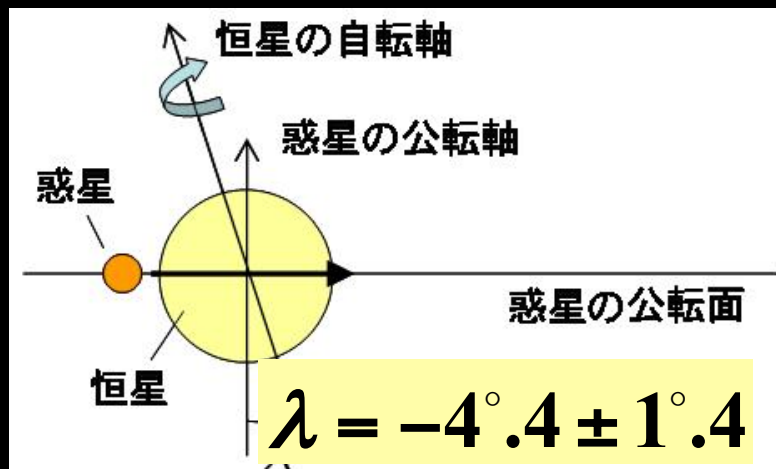
ロシター効果を観測することで主星の赤道面と伴星の公転面のなす角度を推定することができる。また、惑星が逆行軌道を持つ場合は、上の説明とは逆の青方→赤方というパターンの偏移が起きる。これを利用し、太陽系外惑星のWASP-17bやHAT-P-7bの逆行公転が発見されている^{[1][2]}。

参考文献

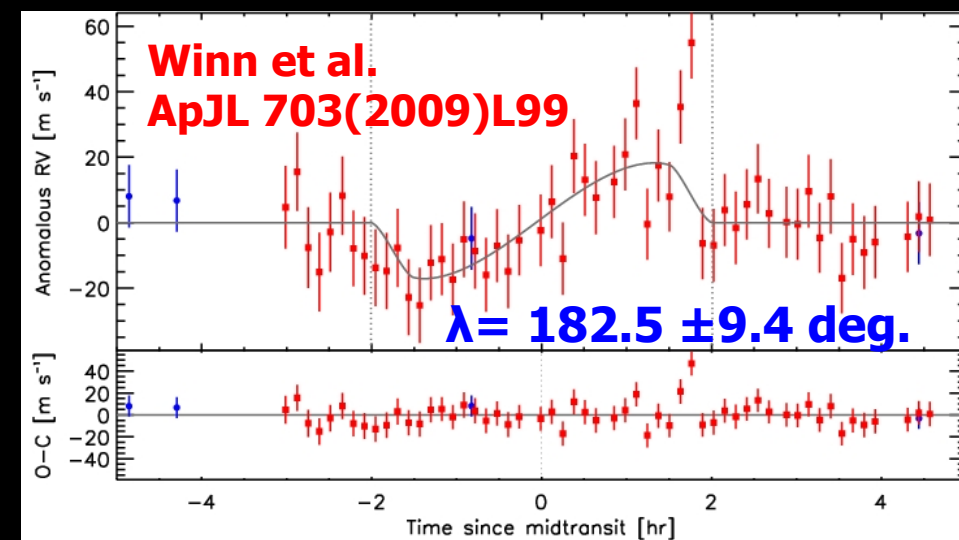
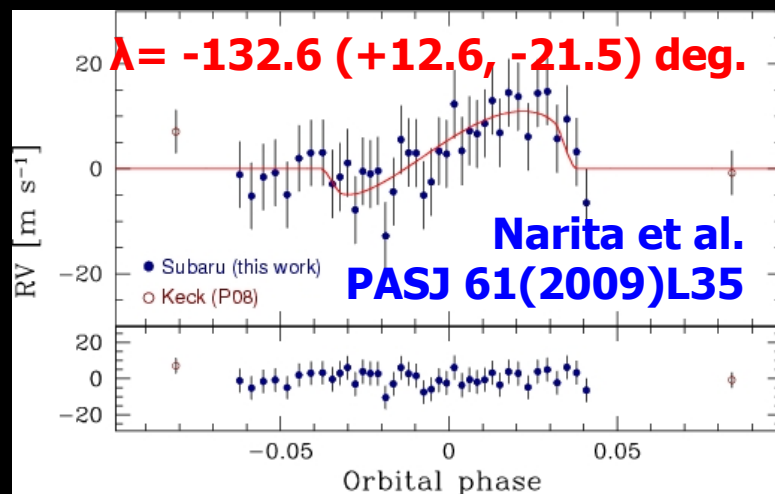
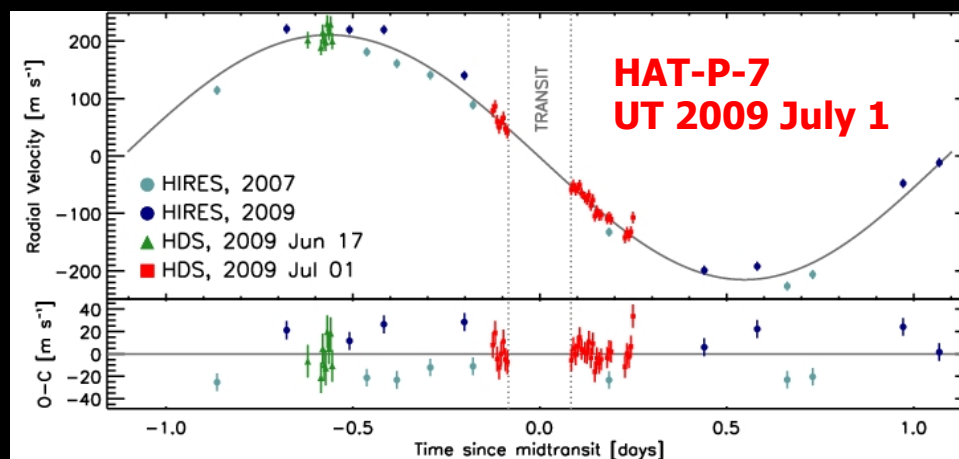
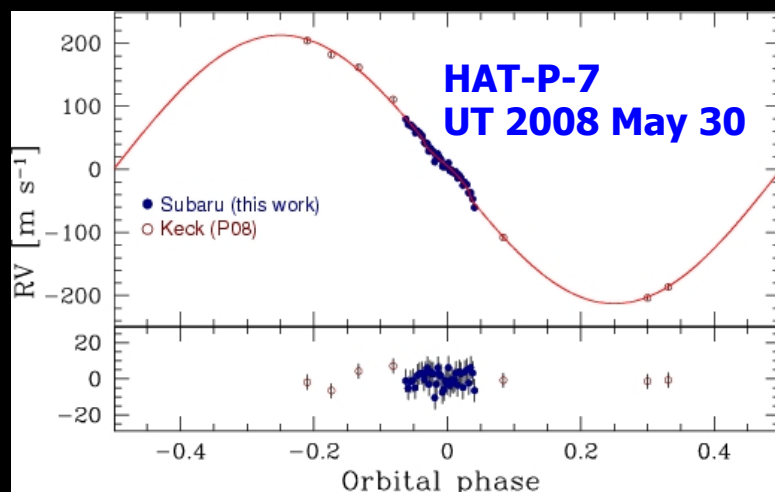
1. ^ Anderson, D. R. *et al.* (2009). "WASP-17b: an ultra-low density planet in a probable retrograde orbit" (<http://ads.nao.ac.jp/abs/2009arXiv0908.1553A>). *The Astrophysical Journal* **Submitted**.
 2. ^ Narita, N. *et al.* (2009). "First Evidence of a Retrograde Orbit of a Transiting Exoplanet HAT-P-7b" (<http://ads.nao.ac.jp/abs/2009PASJ...61L..35N>). *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61** (5): L35-L40.
- Ohta, Y *et al.* (2005). "The Rossiter-McLaughlin Effect and Analytic Radial Velocity Curves for Transiting Extrasolar Planetary Systems" (<http://ads.nao.ac.jp/abs/2005ApJ...622.1118O>). *The Astrophysical Journal* **622** (2): 1118-1135.

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への測定)

- Joshua N. Winn¹, Robert W. Noyes¹, Matthew J. Holman¹, David B. Charbonneau¹, 太田泰弘², 樽家篤史², 須藤靖², 成田憲保², Edwin L. Turner^{2,3}, John A. Johnson⁴, Geoffrey W. Marcy⁴, R. Paul Butler⁵, & Steven S. Vogt⁶
 - 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)



逆行する系外惑星(HAT-P-7)の発見



- 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???

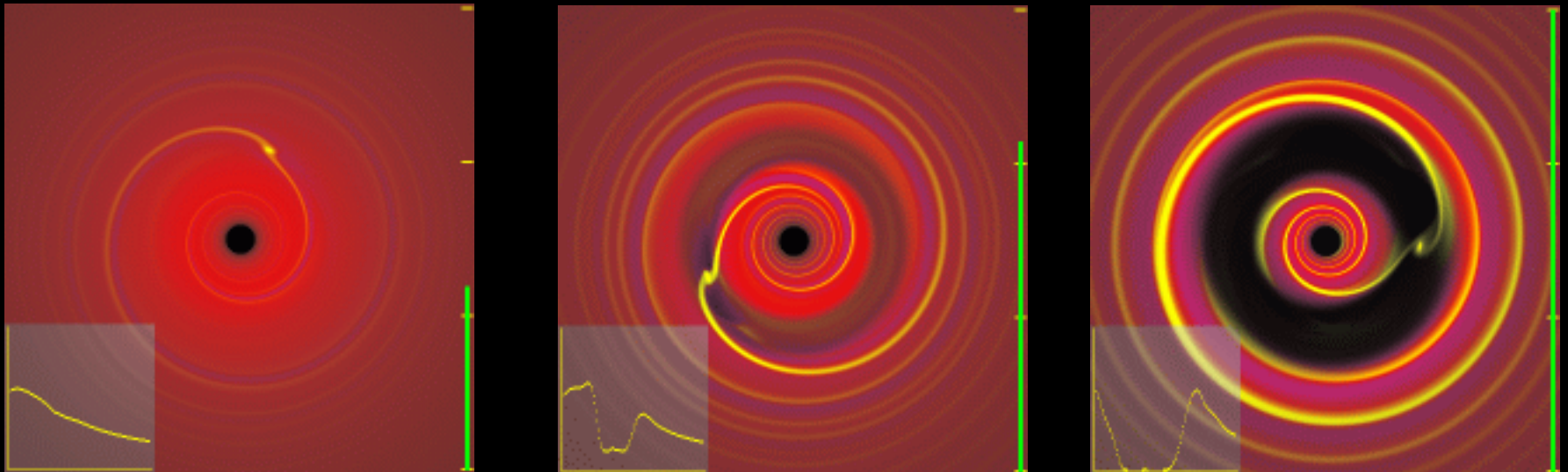
私的先入観の時間的推移 (1)

- **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

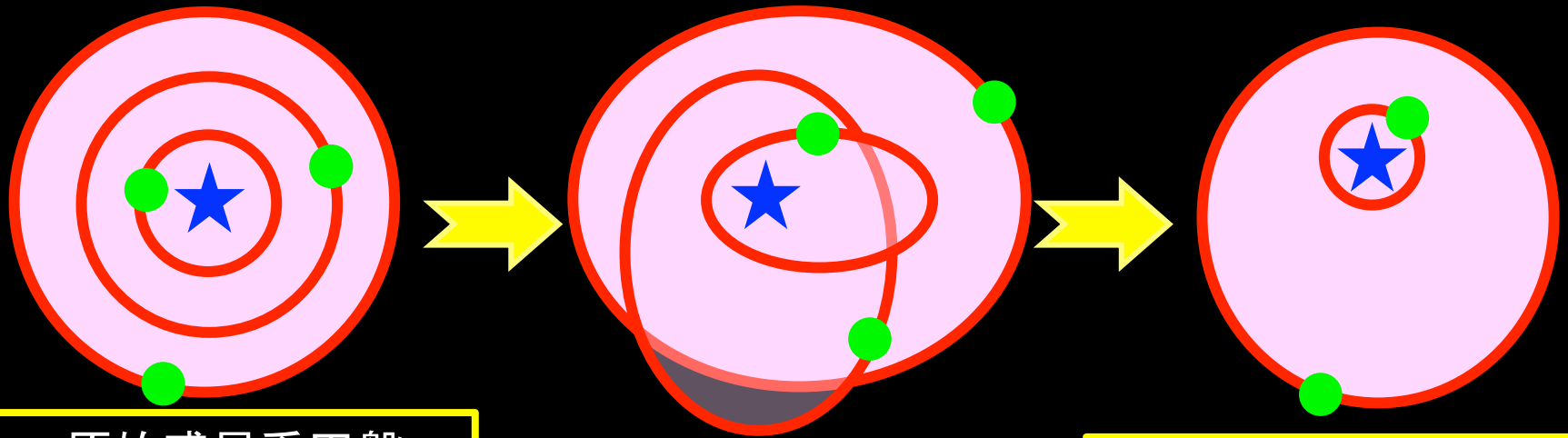
代表的な惑星移動シナリオ

- **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

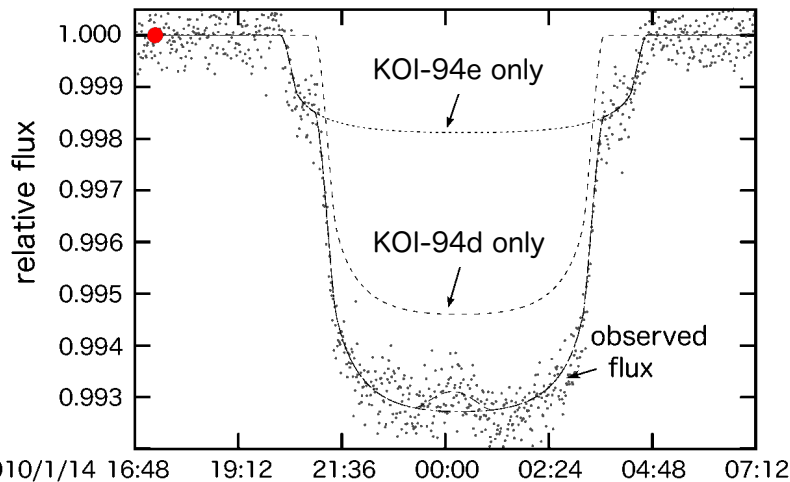
太陽系形成標準モデル
(京都モデル・林モデル)

私的先入観の時間的推移 (2)

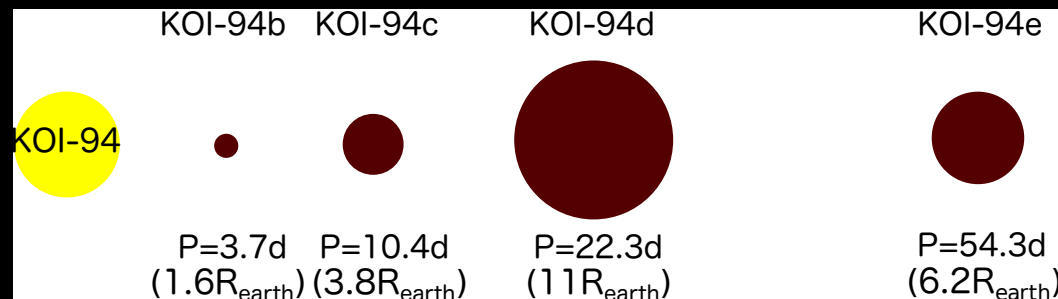
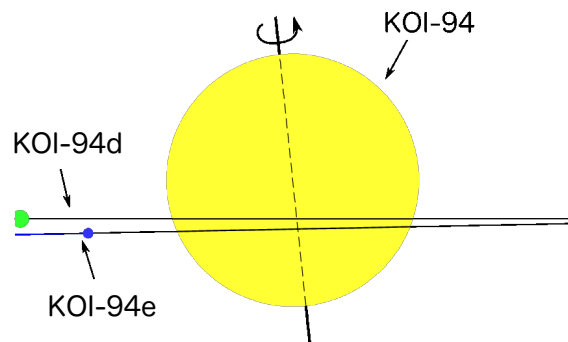
■ 2010年

- 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 λ 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

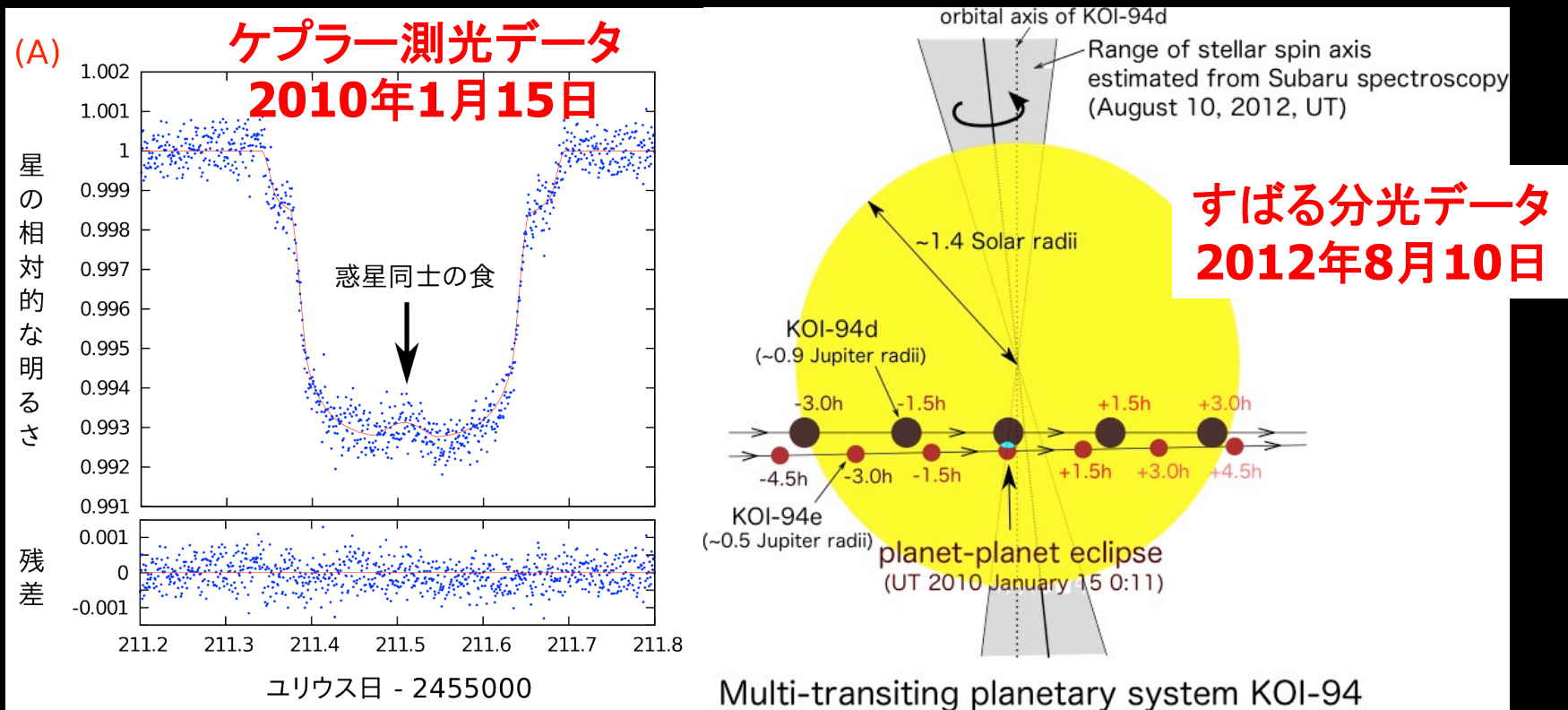


2010/1/14 17:16:48



- 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



受信トレイ x



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 x

Dear Kento Masuda,

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

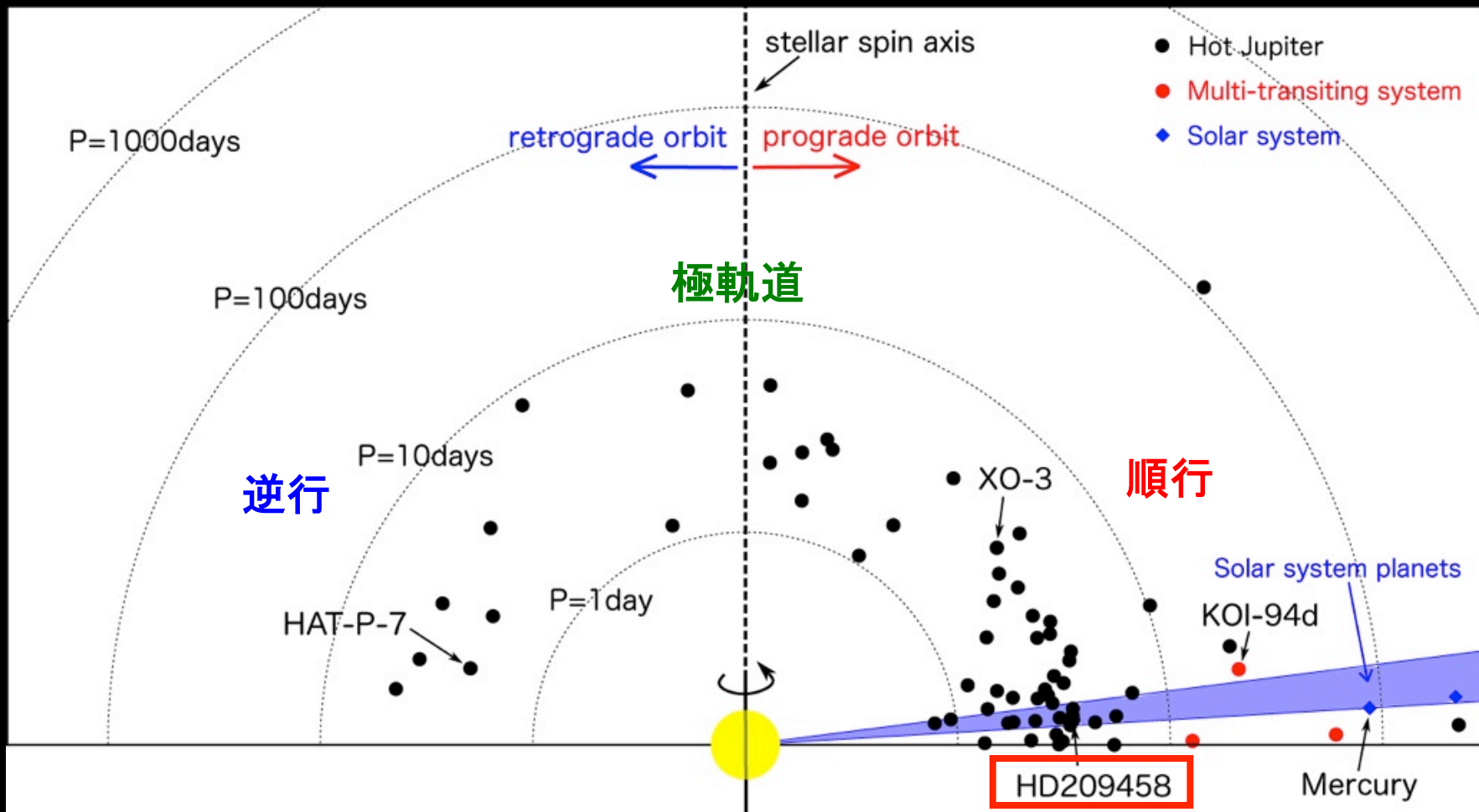
It is our policy to assign Kepler numbers to all confirmed planets that have been observed by the Kepler Mission. The Kepler name that corresponds to KOI-94 is Kepler 89, with the same planet letters as assigned in your paper.

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)

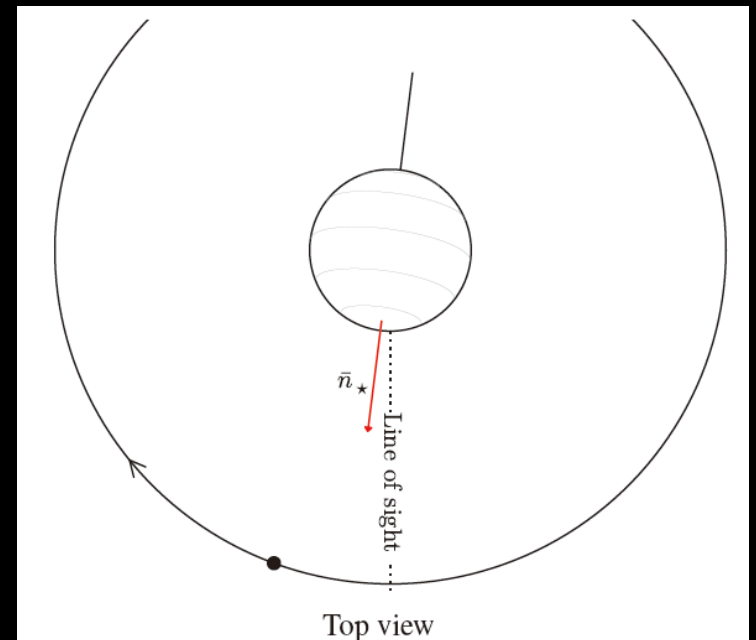
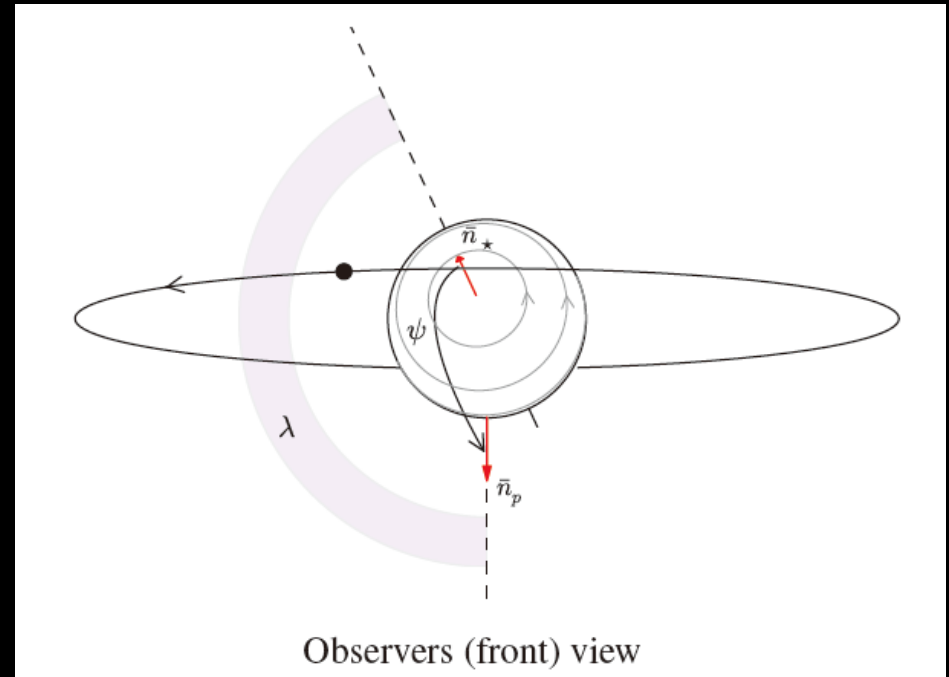
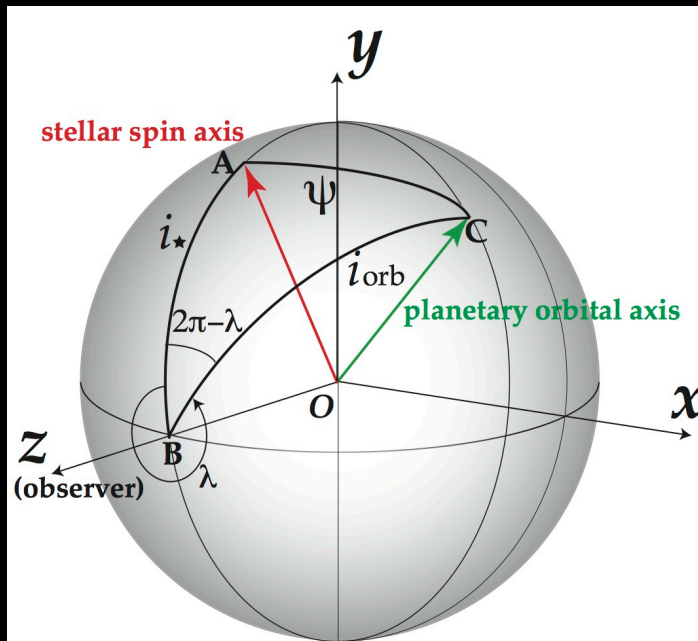
私的先入観の時間的推移 (4)

- 2013年 (Huber et al. Science 342, 331)
 - Kepler-56 = first-ascent red giant ($1.3M_{\odot}$, $4.3R_{\odot}$) + 10.5day and 20.4day planets
 - Asteroseismology解析の結果、主星の自転軸が 47 ± 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
 - λ 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



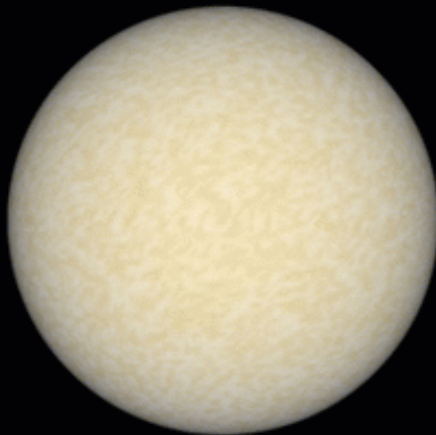
Benomar et al., arXiv:1407.7332

Lund et al., arXiv:1407.7516

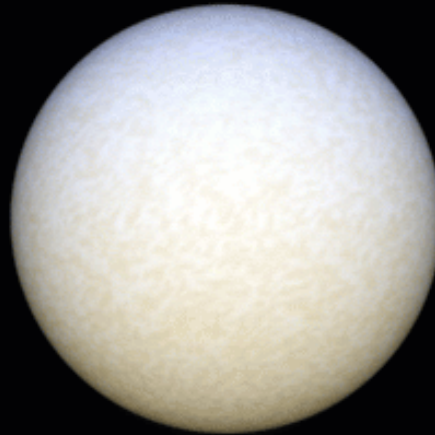
Non-radial oscillations $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ (spherical degree $l=1$)

azimuthal order

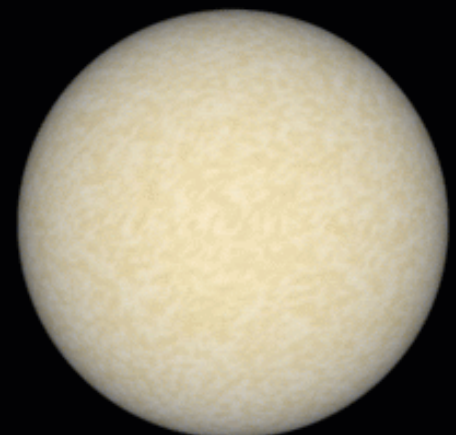
$m=-1$



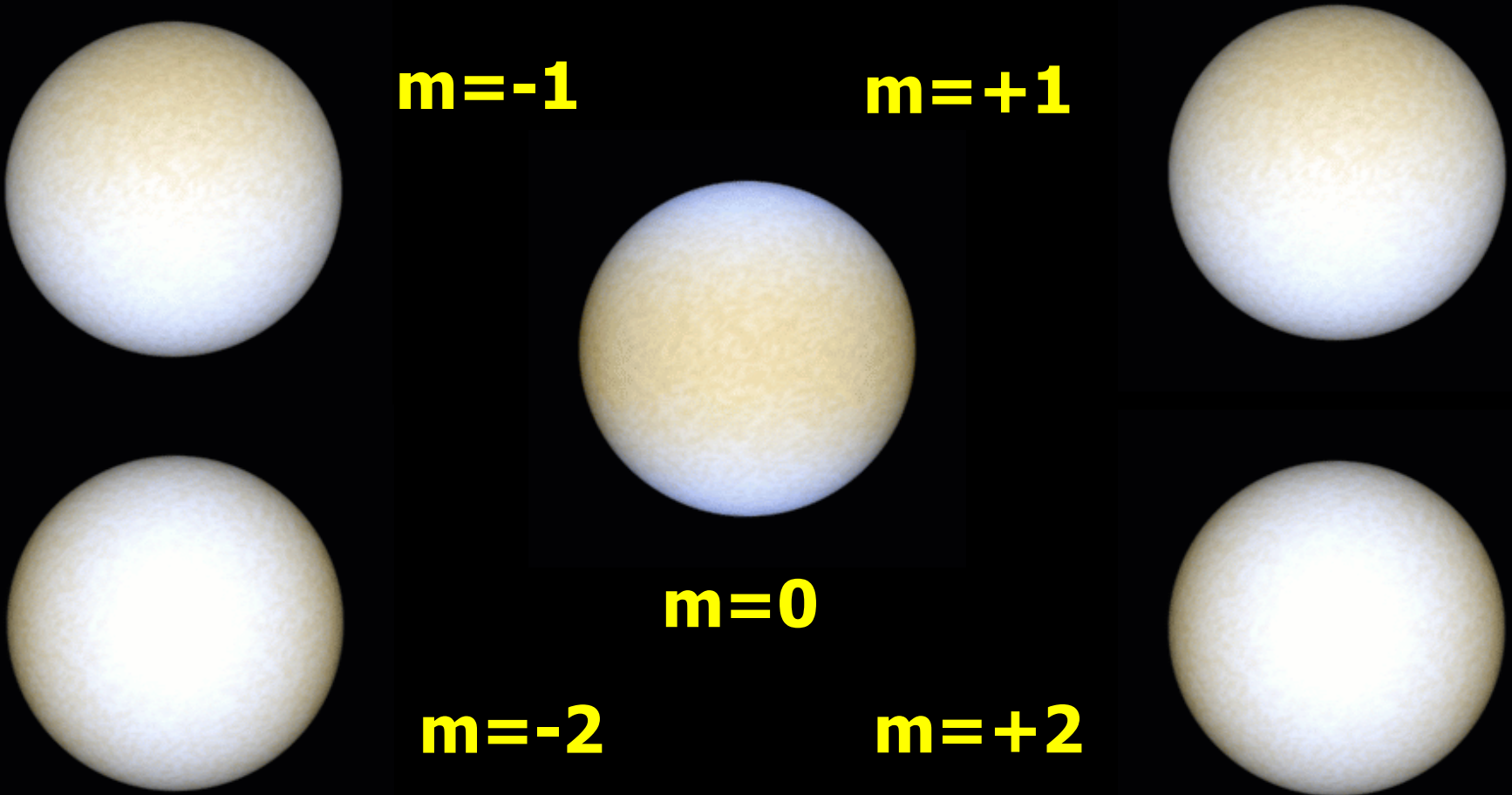
$m=0$



$m=+1$



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



Stellar inclination ($l=3$)

$m=\pm 3$

$m=\pm 2$

$m=\pm 1$

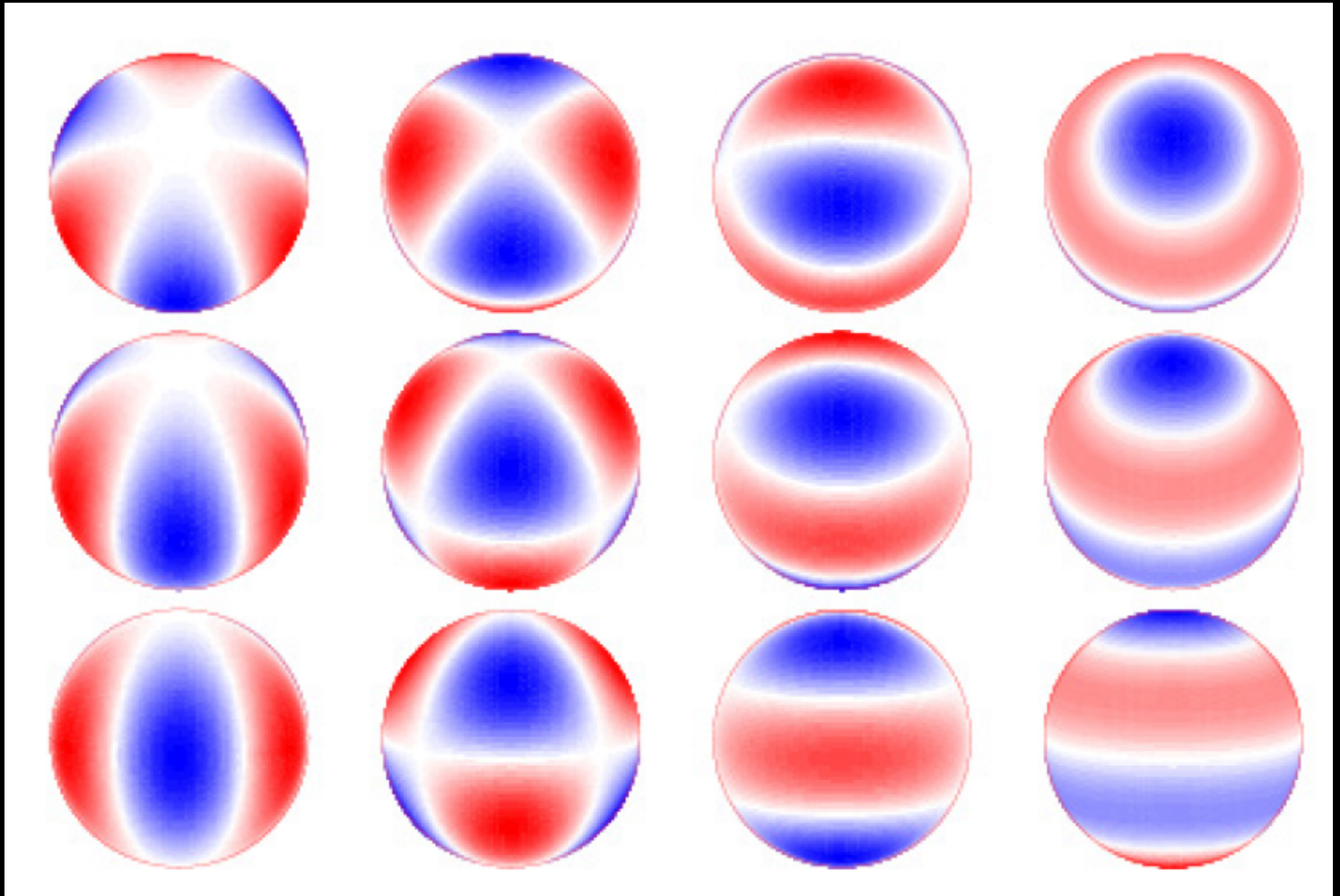
$m=0$

i_s

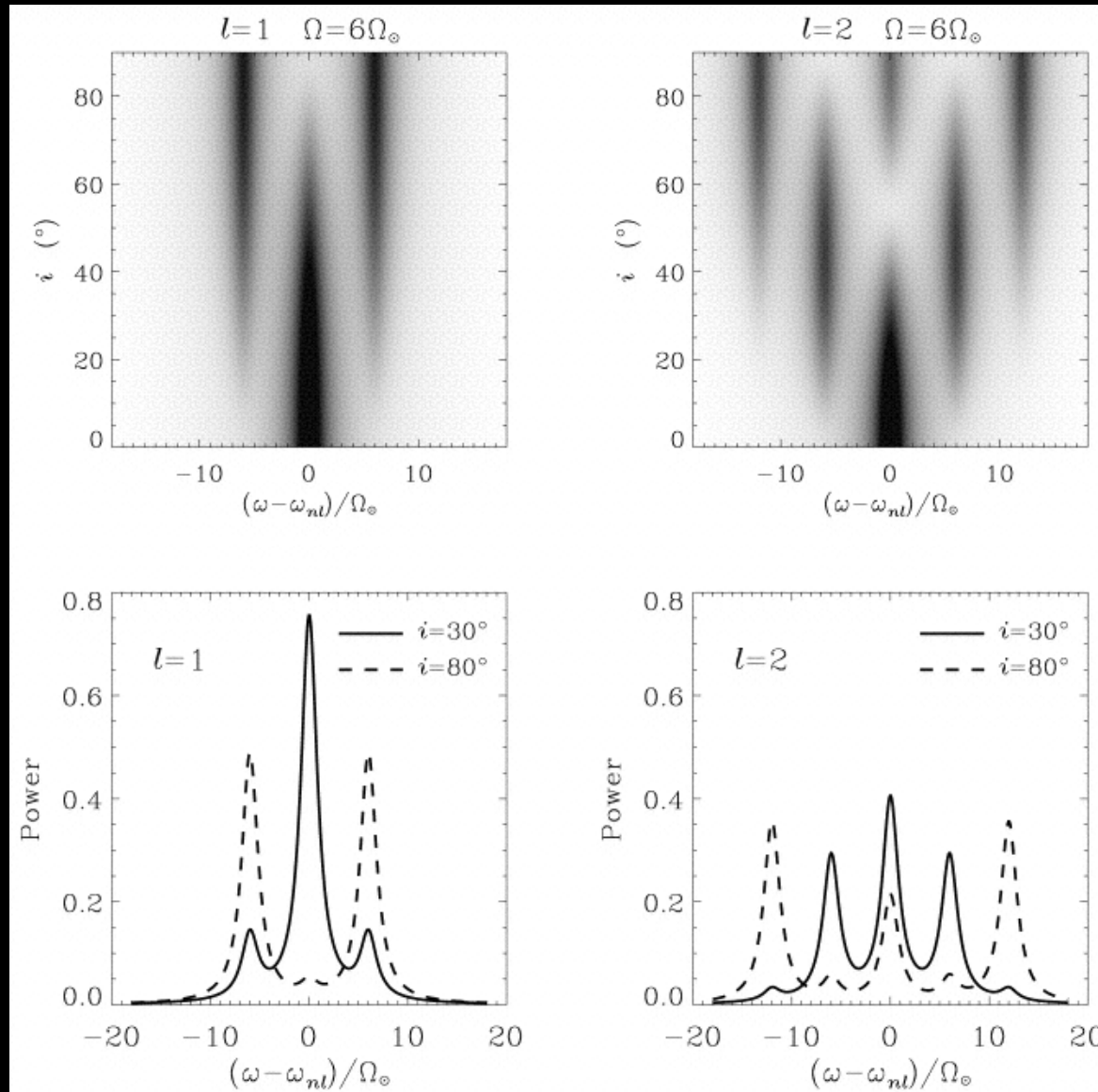
30°

60°

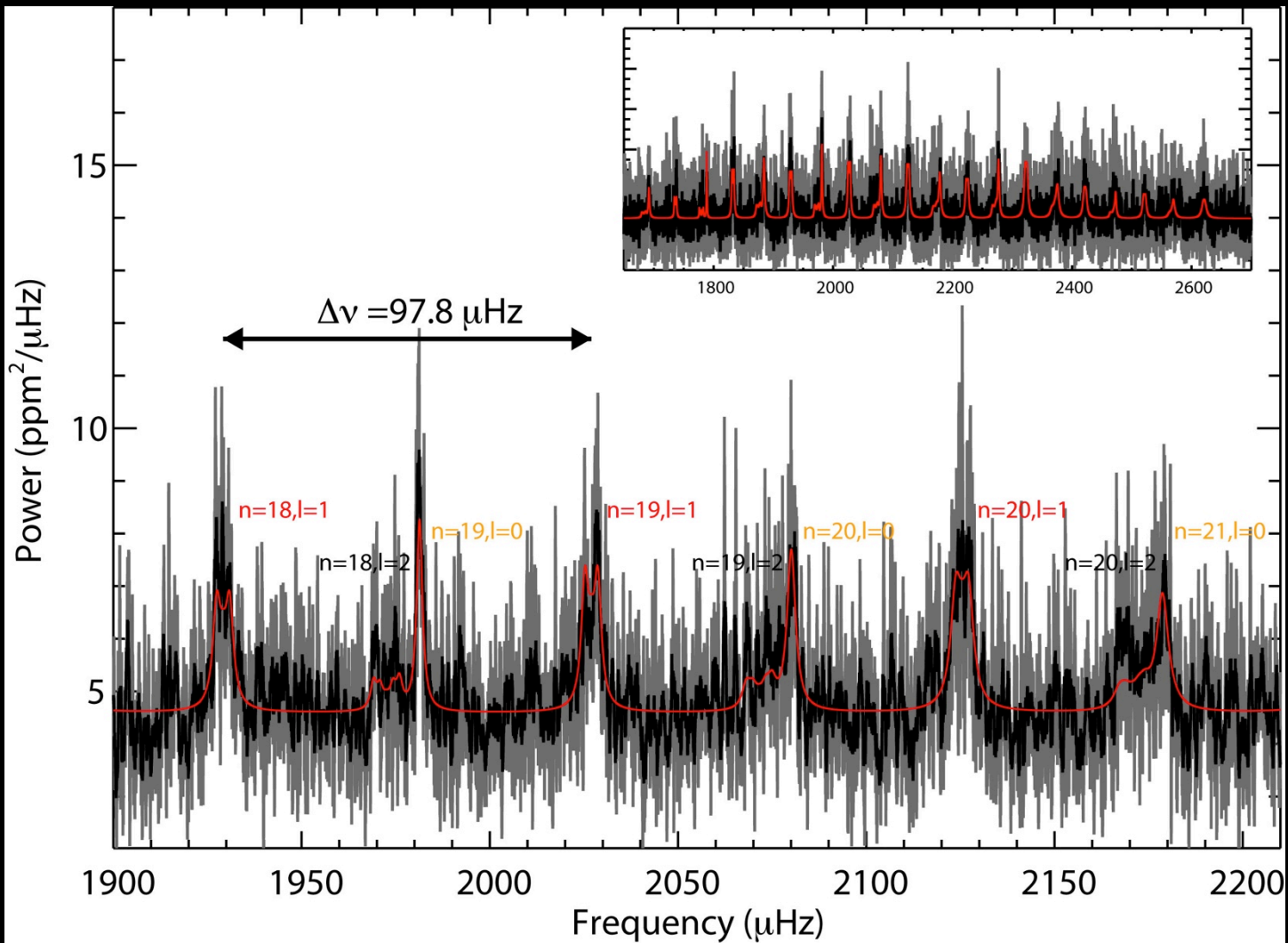
90°



Power spectra of $l=1$ and 2 modes



Power spectra of Kepler-25



Benomar et al. arXiv:1407.7332 (PASJ, in press)

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

結論：結局よくわからない

■ 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
 - 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満載