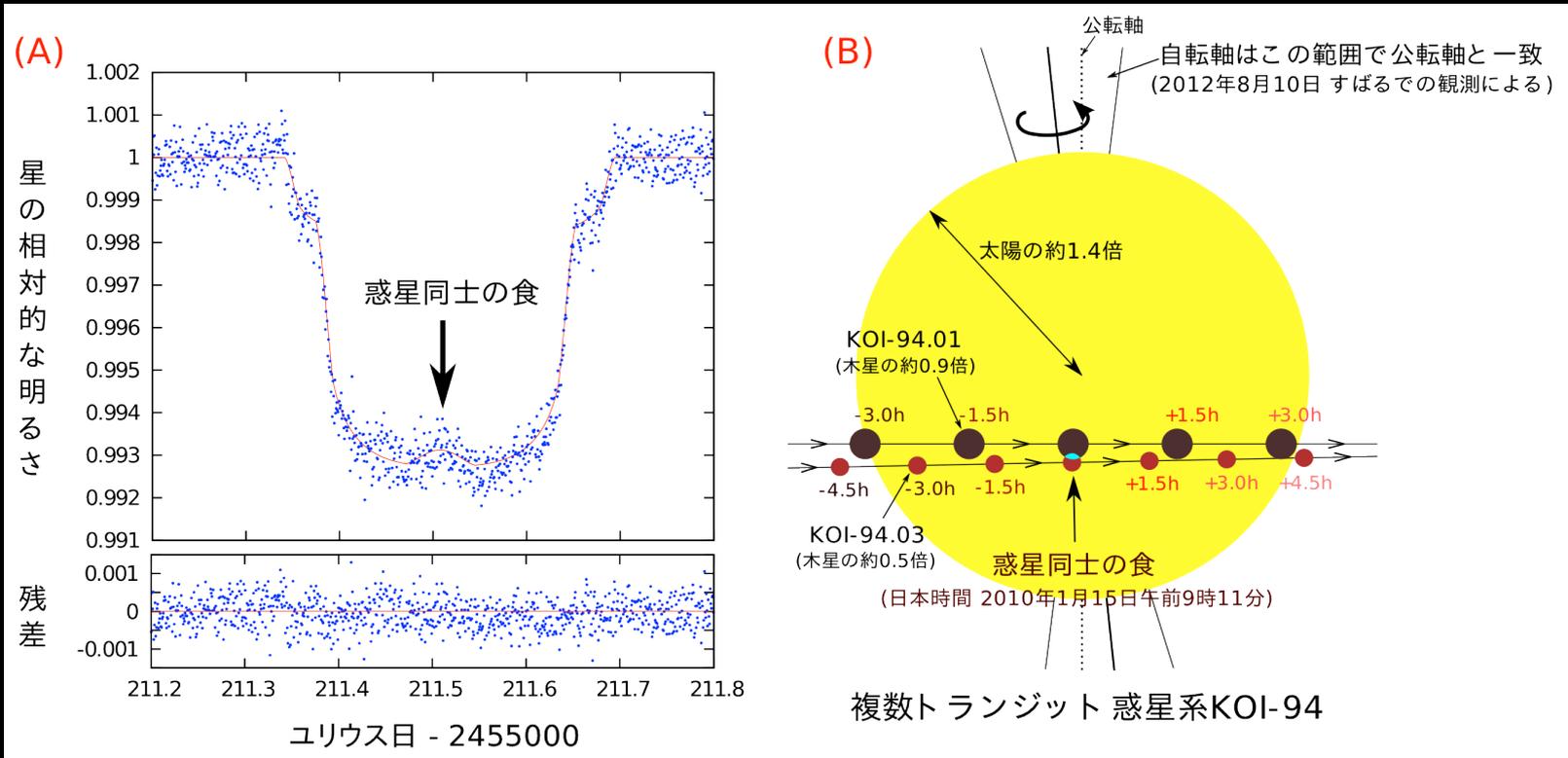


多重トランジット惑星系 KOI-94から学ぶ



物理教室金曜ランチトーク 須藤靖

2013年6月14日 12:30-13:00

とある会話@2007年7月

- H田先生： 須藤さん、後期の物理教室コロキウムで宇宙生物学の話をやってくれませんか？
- 私： 宇宙生物学はまだまだ先のことなので、系外惑星研究の話がメインでもよろしいですか
- H田先生：もちろんそれで結構ですからお願いします

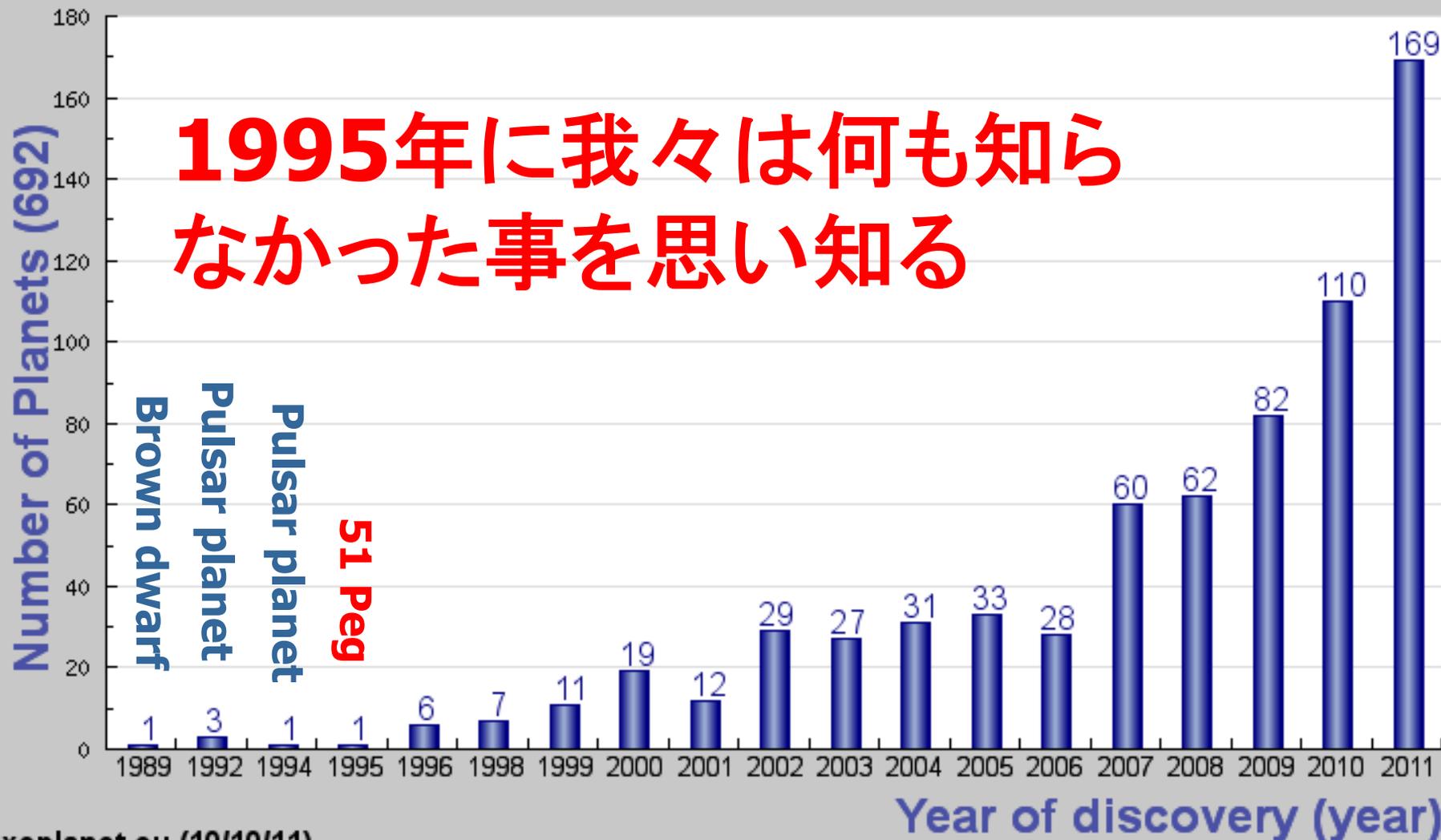
— 数日後 —

- Yぎ田先生： 須藤さん、コロキウム引き受けてくれてありがとう、宇宙人探査の話楽しみにしています。
- 私： …… あの一、私がやっているのは系外惑星研究なのですが、、
- Yぎ田先生： えー！ 系外惑星研究と宇宙人探査の研究って同じじゃないの？？？

これはまずい！

太陽系外惑星発見の歴史年表

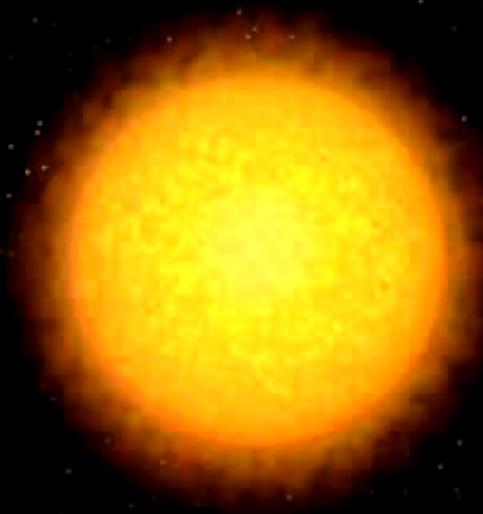
Number of planets by year of discovery



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

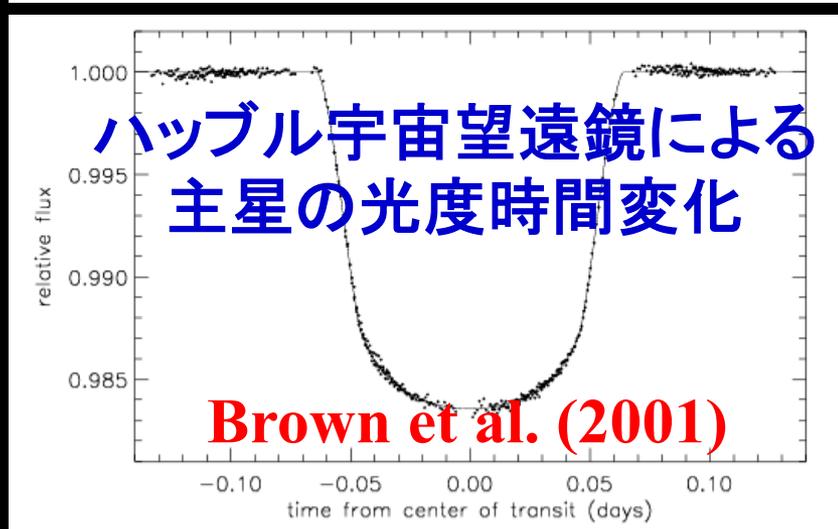
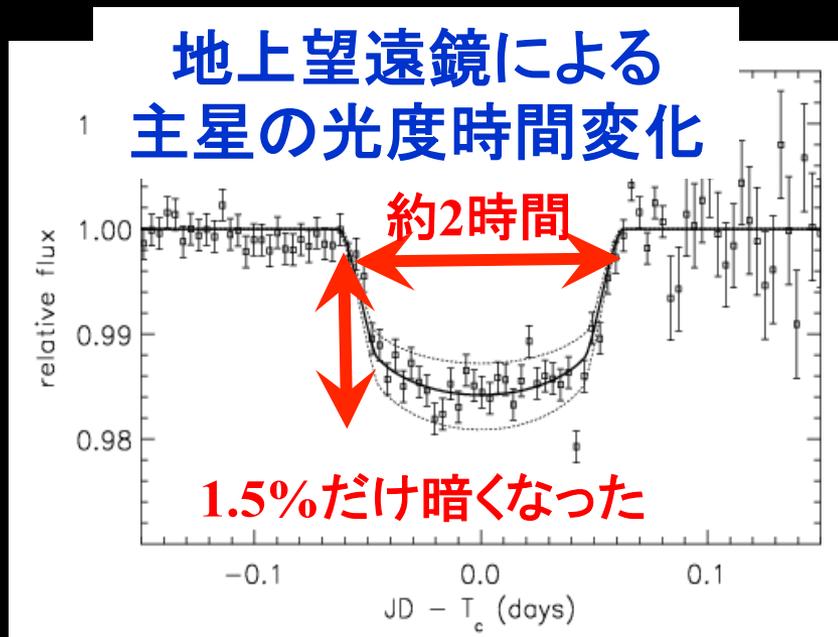
周期3.5日のホットジュピター



想像図

Henry et al. (1999)

Charbonneau et al (2000)



太陽系とは異なる特徴

- 発見されている惑星の約7%(ドップラー速度法)から20%(トランジット法)が、**公転周期一週間以内の巨大ガス惑星(ホットジュピター)**
- ホットジュピターはほとんど円軌道だが、より長周期の惑星には**高離心率軌道**が多い
- 標準太陽系形成モデル(原始惑星系円盤⇒ダスト成長⇒微惑星集積)によると、ガス惑星は氷境界とよばれる公転周期10年程度以遠でしか形成されないはず
- **ではどうやって惑星を移動させるか？**

ロシター効果

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 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.

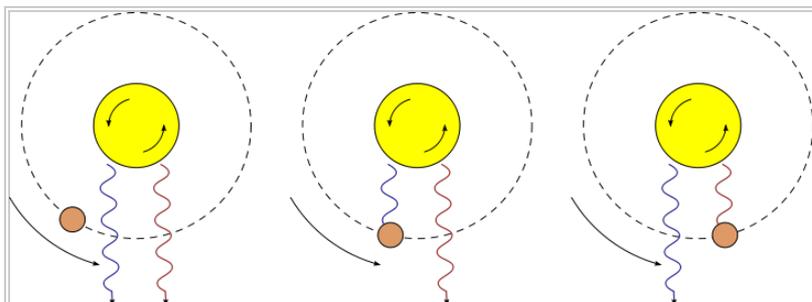


Illustration showing the effect. The viewer is situated at the bottom. Light from the anticlockwise-rotating star is blue-shifted on the approaching side, and red-shifted on the receding side. As the planet passes in front of the star it sequentially blocks blue- and red-shifted light, causing the star's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

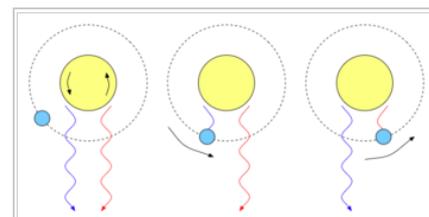
ロシター効果

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に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での偏移が起きる。これを利用して、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

- 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**.
 - 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.

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 .

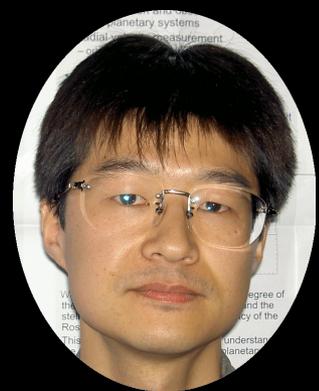
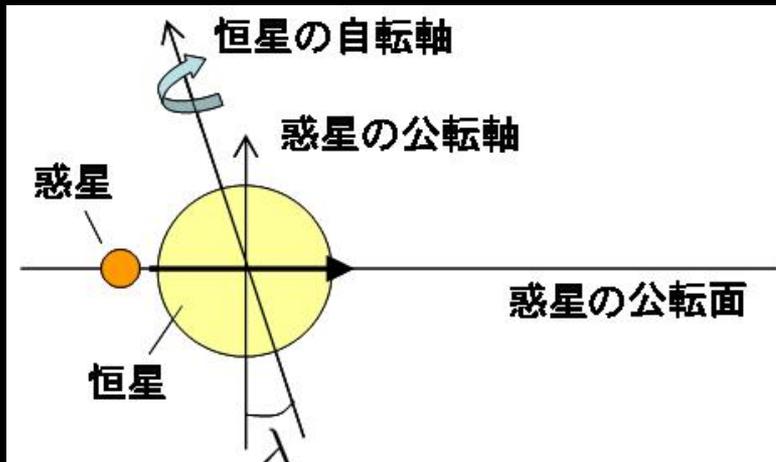
We also note that the future satellites *COROT* and *Kepler* will detect numerous transiting planetary systems, most of which will be important targets for the RM effect in 8–10 m class ground-based telescopes. We hope that our analytic formulae presented here will be a useful template in estimating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

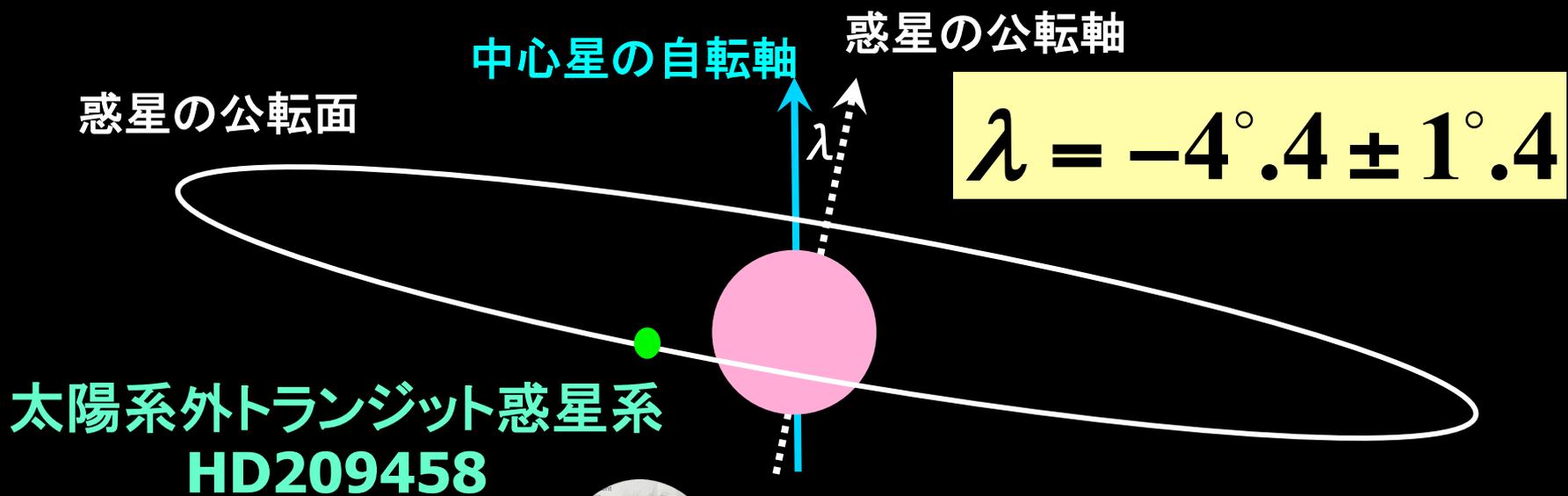
主星自転軸と惑星公転軸のずれが系外惑星の起源を探る重要な手がかり

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)



ロシター効果を利用したHD209458の 主星自転軸と惑星公転軸のずれの発見



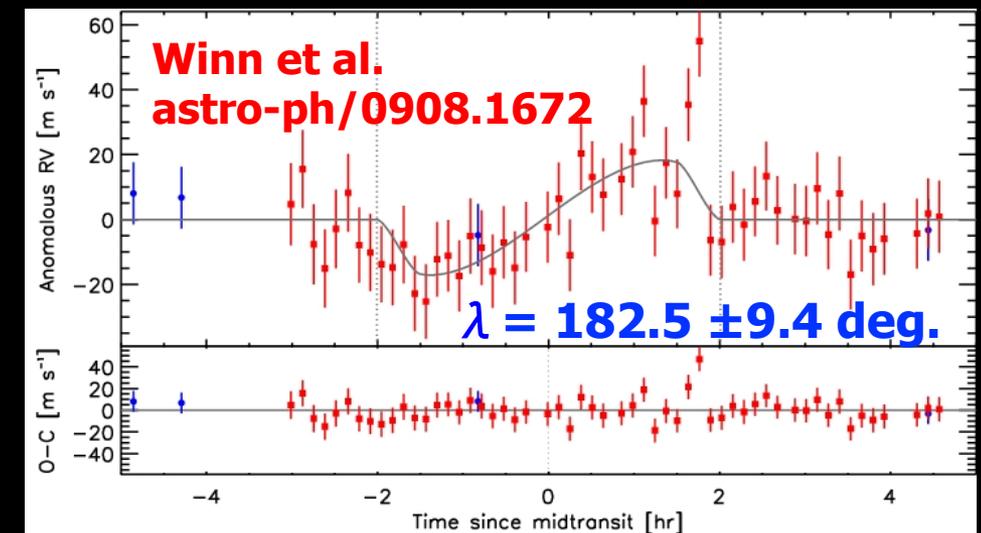
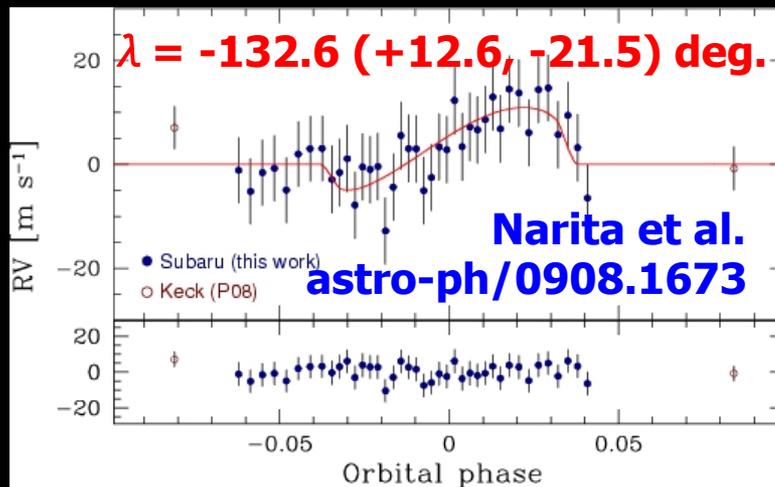
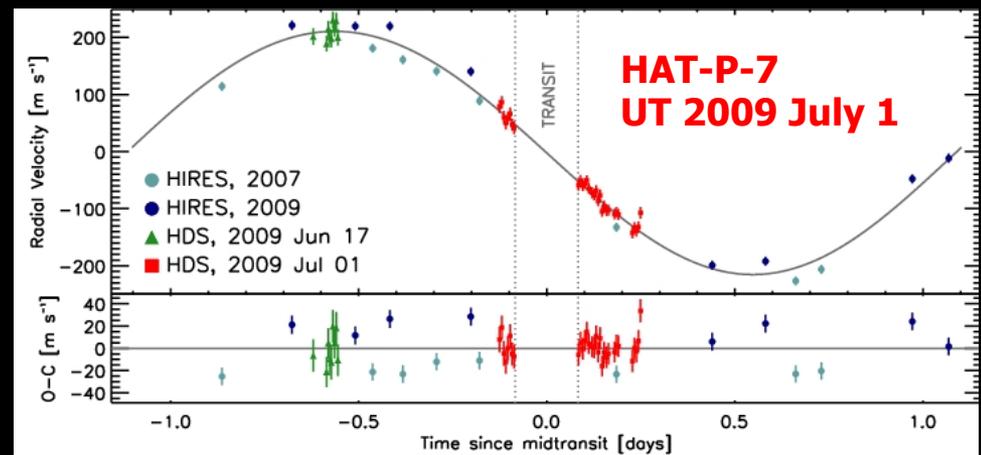
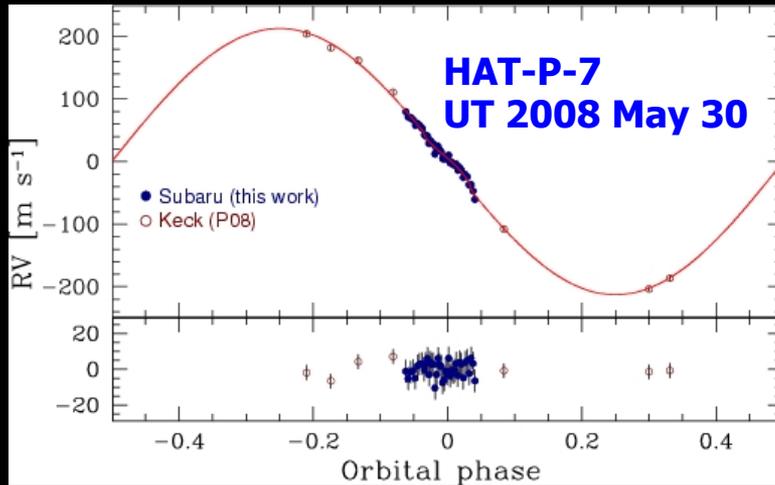
太田泰弘



Josh Winn

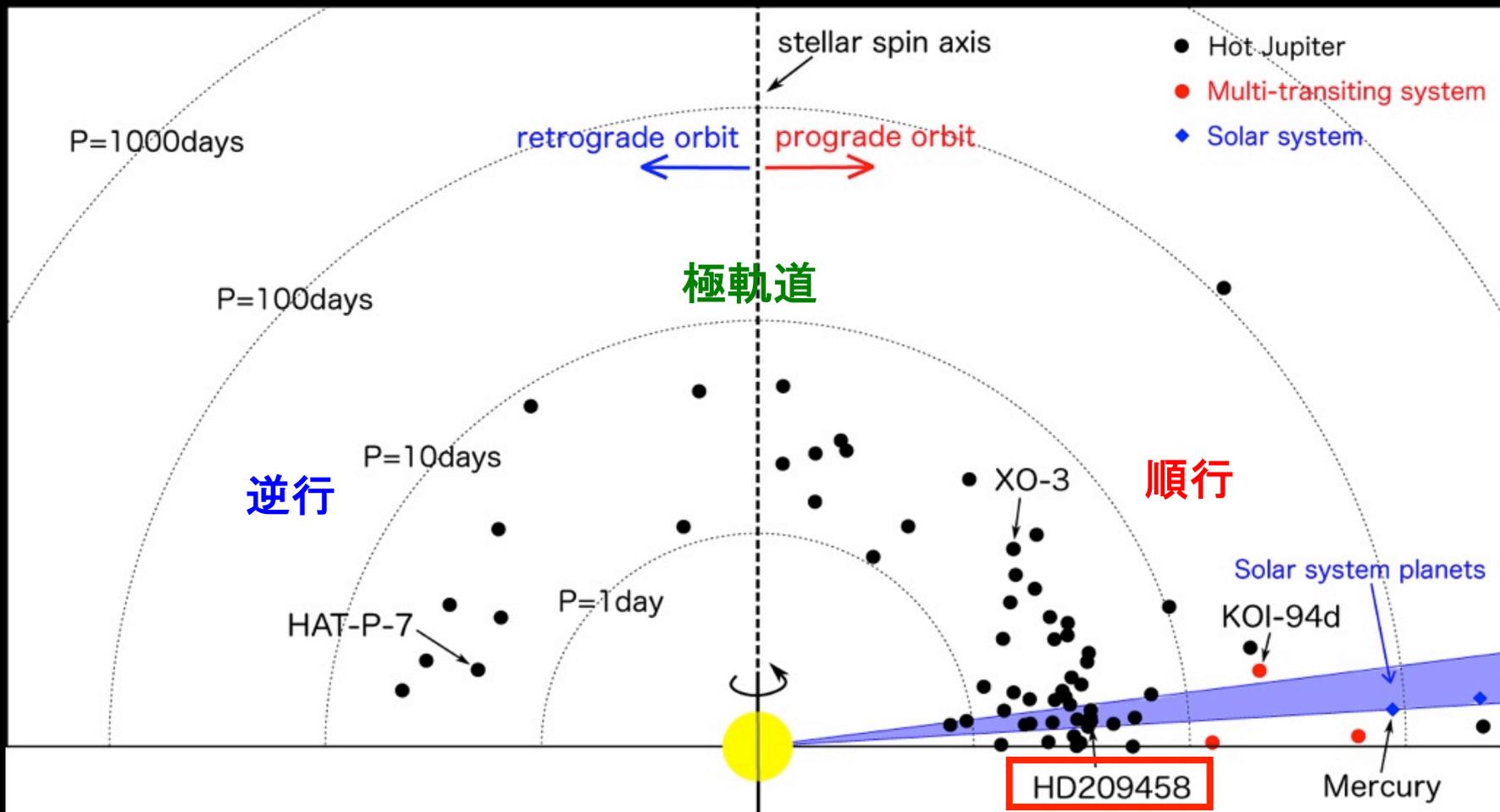
太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた

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
- 逆行軌道の惑星なんて、どうやったら出来るのか???

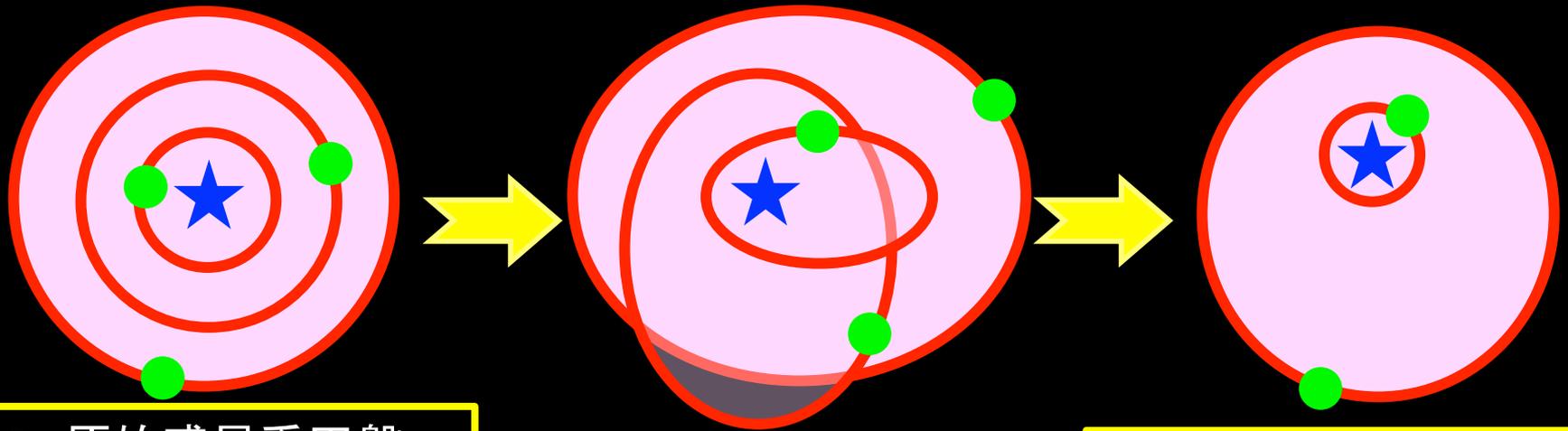
主星自転軸と惑星公転軸のまとめ (天球上の射影なので3次元角度ではない)



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。

Masuda et al. (2013)

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

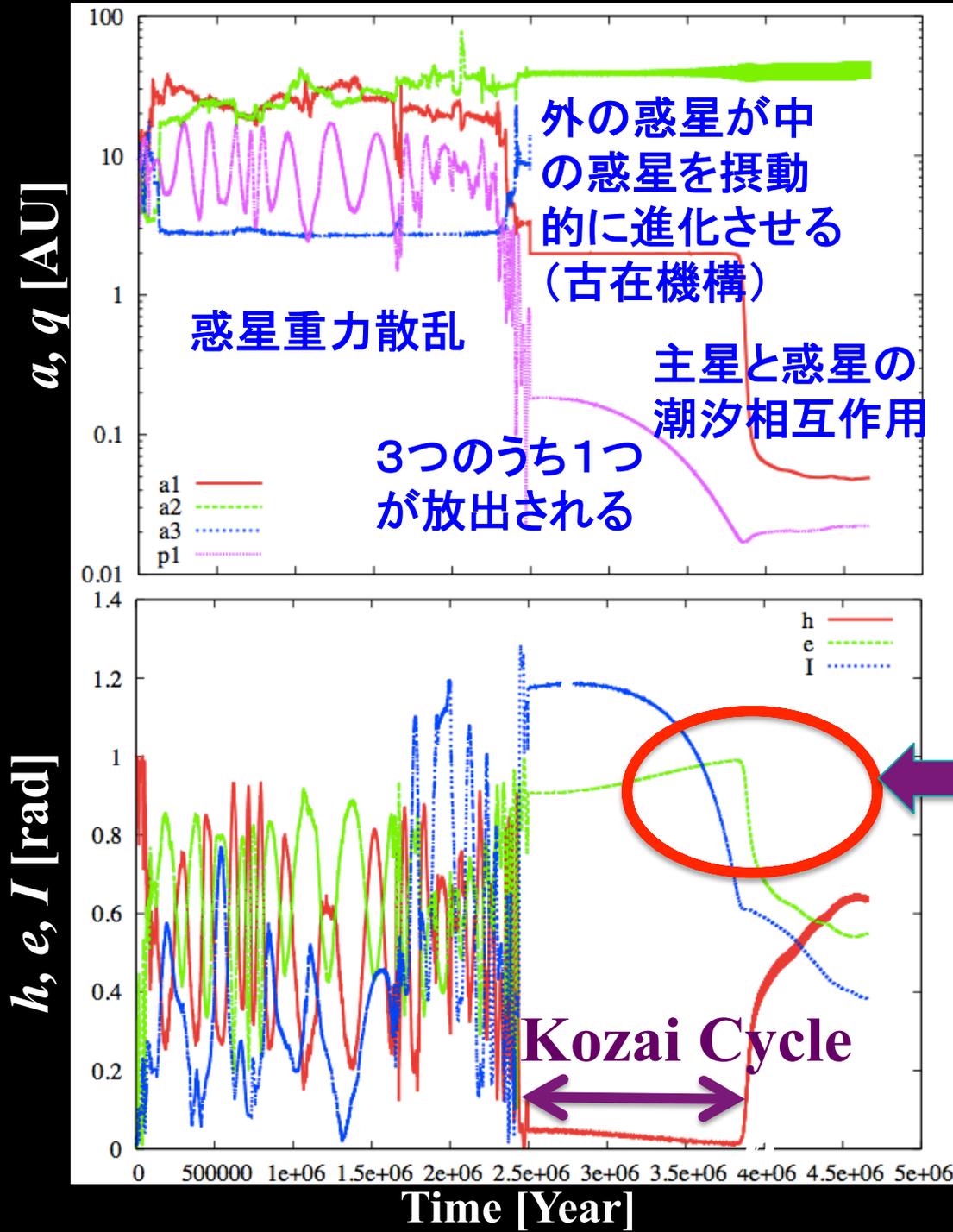
- 古在機構
- 主星自転軸と惑星公転軸のずれ
- 主星・惑星潮汐作用
- 軌道収縮
- 円軌道化
- ホットジュピターの誕生

太陽系形成標準モデル
(京都モデル・林モデル)

3惑星系の数値計算例

古在機構の保存量

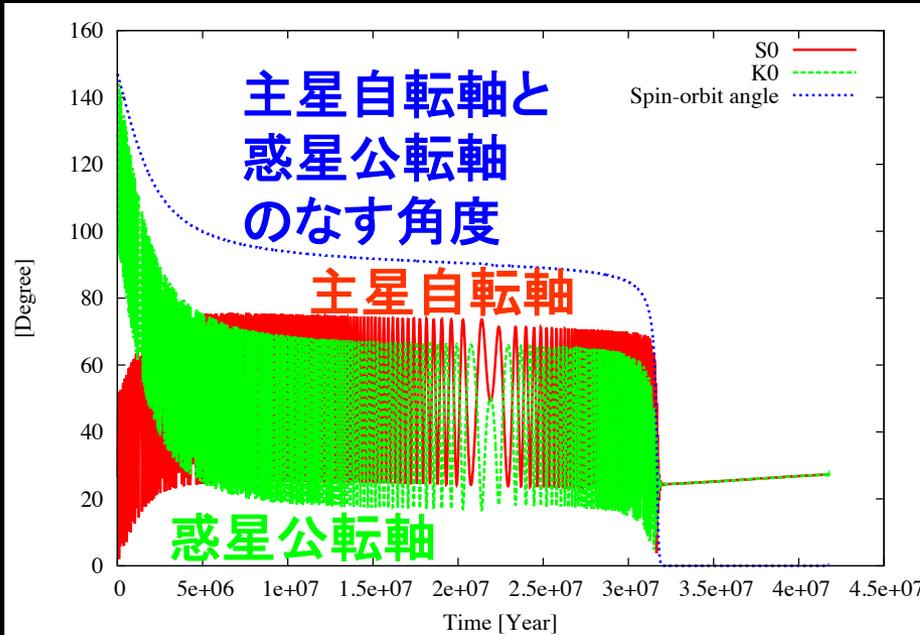
$$h = (1 - e^2) \cos^2 I = \text{const.}$$



Tidal circularization after the Kozai cycle

Xue et al. (2013)

主星と惑星の潮汐相互作用・散逸

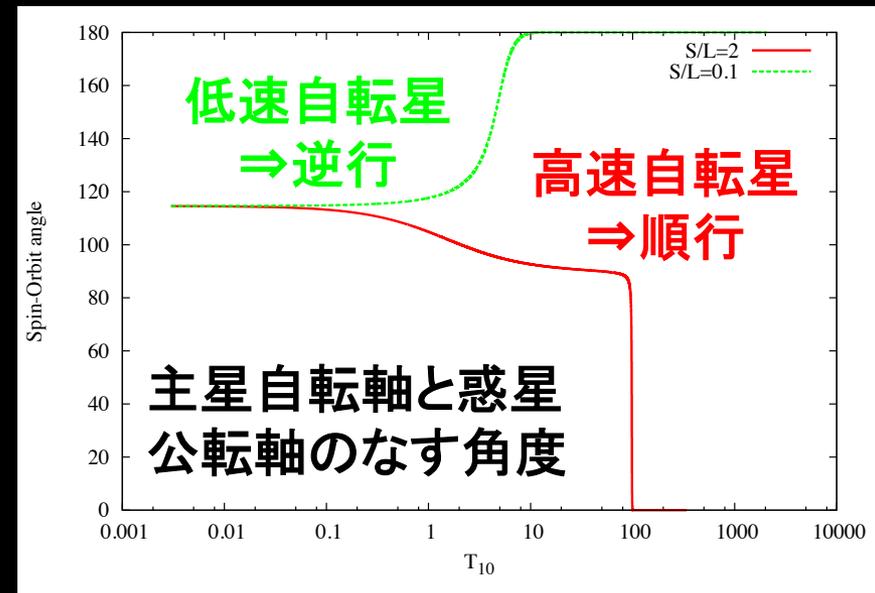


Xue et al. (2013)

主星と惑星の角運動量の大きさの比を変化させたときの、主星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度の時間発展計算例

主星の自転軸と惑星の公転軸の向きの時間発展計算例

順行軌道がもっとも安定だが、逆行軌道に向かう場合もある。極軌道(直交)も一時的には安定となるがやがて順行か逆行に落ち着く



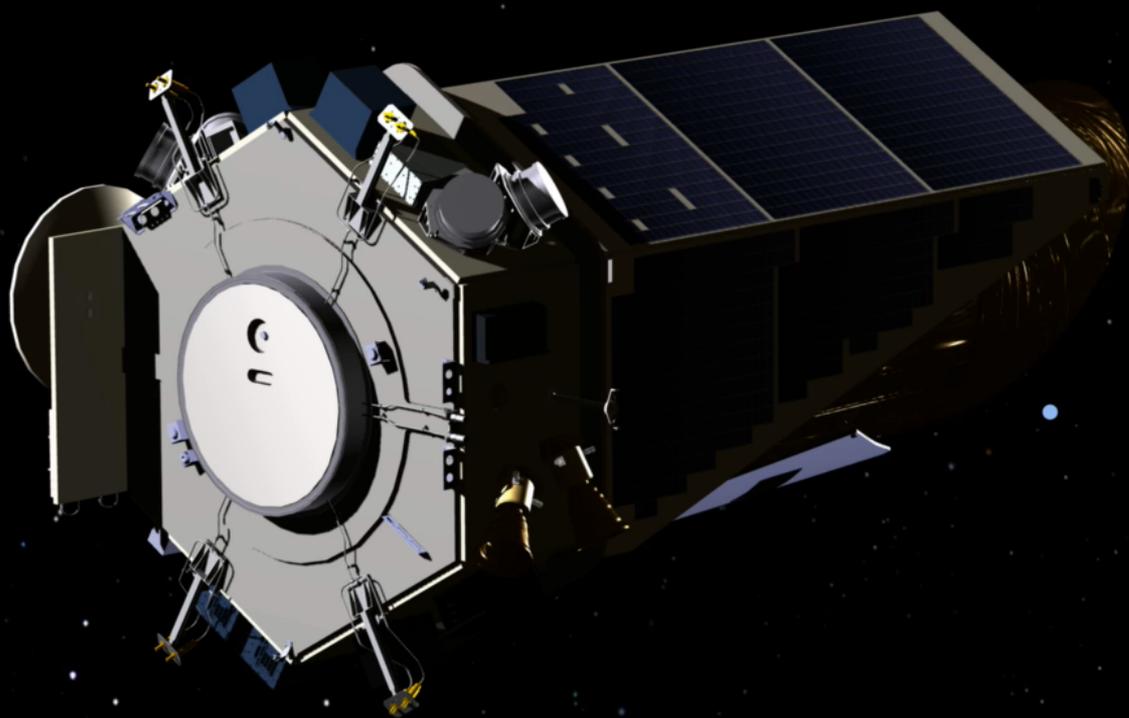
この仮説から予想されるホットジュピター

- 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

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探査

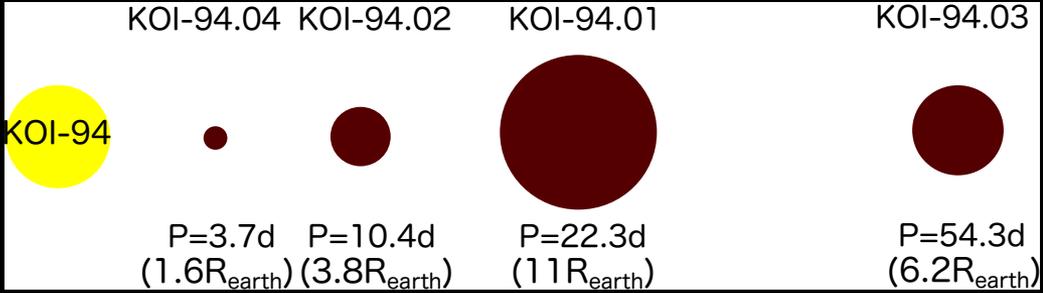
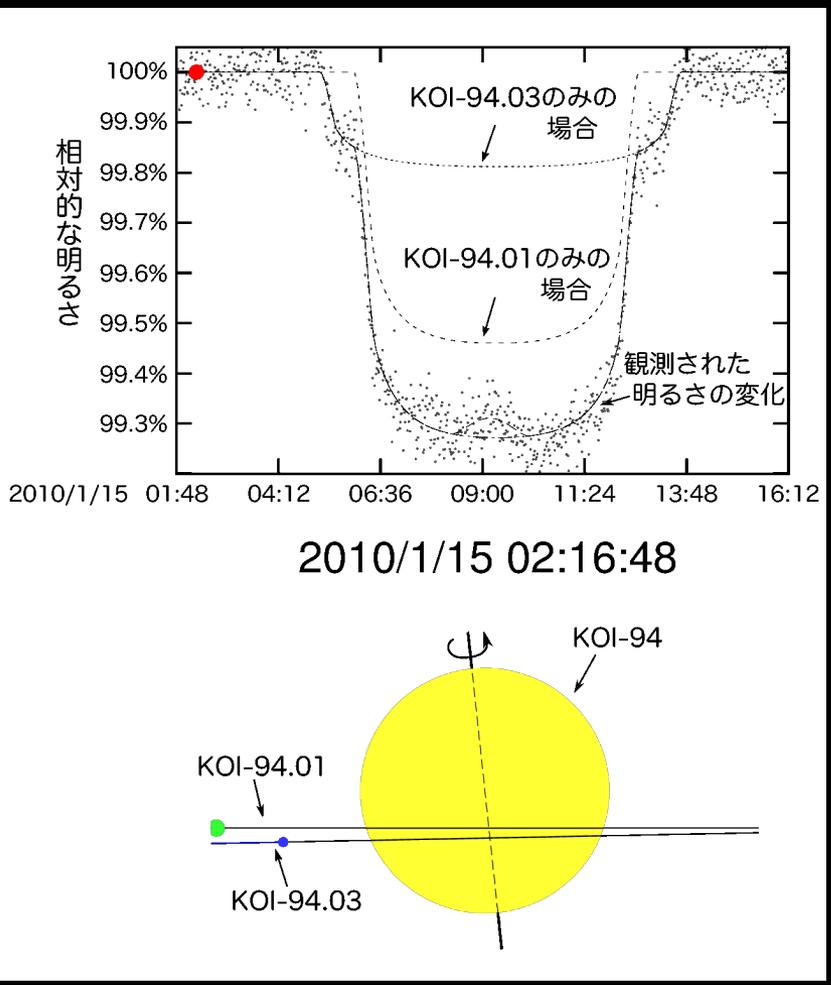


<http://kepler.nasa.gov/>

ケプラー衛星によって発見された 多重トランジット惑星系の意味

- トランジット惑星系245個中40個が多重惑星系
- 惑星移動の過程で、他の惑星は強く散乱・放出されるので、ホットジュピターの周辺に複数個の惑星が残っているとは考えづらい
- 強い重力散乱を経験すれば、複数惑星の公転軸が一致しているはずがない(トランジットしない)
- ましてや、主星の自転軸と惑星の公転軸が平行であるとは限らない(今までロシター効果が測定されているのは惑星が一つしかない系のみ)

多重トランジット惑星系KOI-94: 惑星食の初検出 (Hirano et al. 2012)



- ケプラー衛星測光データの解析から偶然発見
- すばる望遠鏡の分光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
- 今回話したシナリオでは説明不可！ 多重惑星系の進化・惑星移動機構の謎

トランジット惑星系と原子模型 “長岡半太郎への回帰”



■ 長岡の土星型原子モデル

- Nagaoka, H. : Phil. Mag. 7(1904) 445
- 量子論の先駆け

■ トランジット惑星

- 惑星の軌道角運動量 (**L**): 視線速度
- 主星のスピン (**S**): ロシター効果
- 惑星のスピン (**s**): リング、衛星

■ 惑星系から原子物理学へ

■ 原子物理(分光)学から惑星系へ

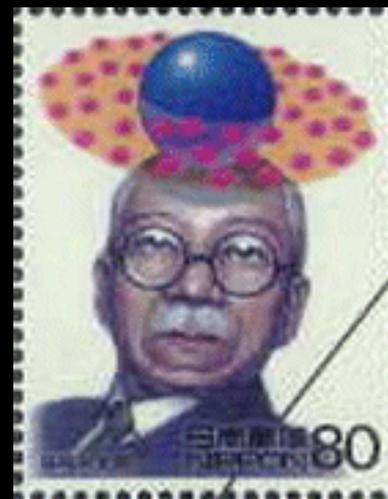


写真 2: 長岡半太郎 (1865-1950)

さらに将来へ:系外惑星から宇宙生物学へ

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995)
 - 惑星大気の実見 (2002)
 - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
 - 惑星可視域反射光の検出 (2009)
-

■ 系外惑星リング、衛星の実見

■ 地球型惑星、居住可能惑星の実見

■ 惑星の直接検出(測光&分光)

■ バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定

■ 地球外生命の実見



おまけ

From *After Dark* to *Beyond Dark*

- 果物がたわわに実り、真ん中には高い山がそびえるハワイのある美しい島に流れ着いた3人の兄弟。夢にでた神様が「とてつもなく重く大きな岩が3つあるはず。それを好きなところまで転がして行け、どこまで行くかはお前達の自由である。高い場所に行けば行くほど遠くを見ることができる」と告げる。
 - 三男：海岸の近く：とても美しいし、魚も捕れる
 - 次男：山の中腹：果物が豊富に実っている
 - 長男：山のとっぺん：霜をなめ苔を食べることで水分と栄養をとるしかない、でも世界は見渡せる

村上春樹『アフターダーク』

Mari offers her opinion:

"To me, the lives chosen by the two younger brothers make the most sense."

- "True," he concedes. *"Nobody wants to go all the way to Hawaii to stay alive licking frost and eating moss.* That's for sure. But the eldest brother was curious to see as much of the world as possible, and he couldn't suppress that curiosity, no matter how big the price was he had to pay."
- *"Intellectual curiosity."*
- "Exactly."

English translation by Jay Rubin

Indeed, we are *the Nobody* !

