

太陽系外惑星から宇宙生物学へ

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2014j.html

物理教室ガイダンス A5 須藤研

2014年5月30日 10:20-10:40

須藤 靖（太陽系外惑星、観測的宇宙論）

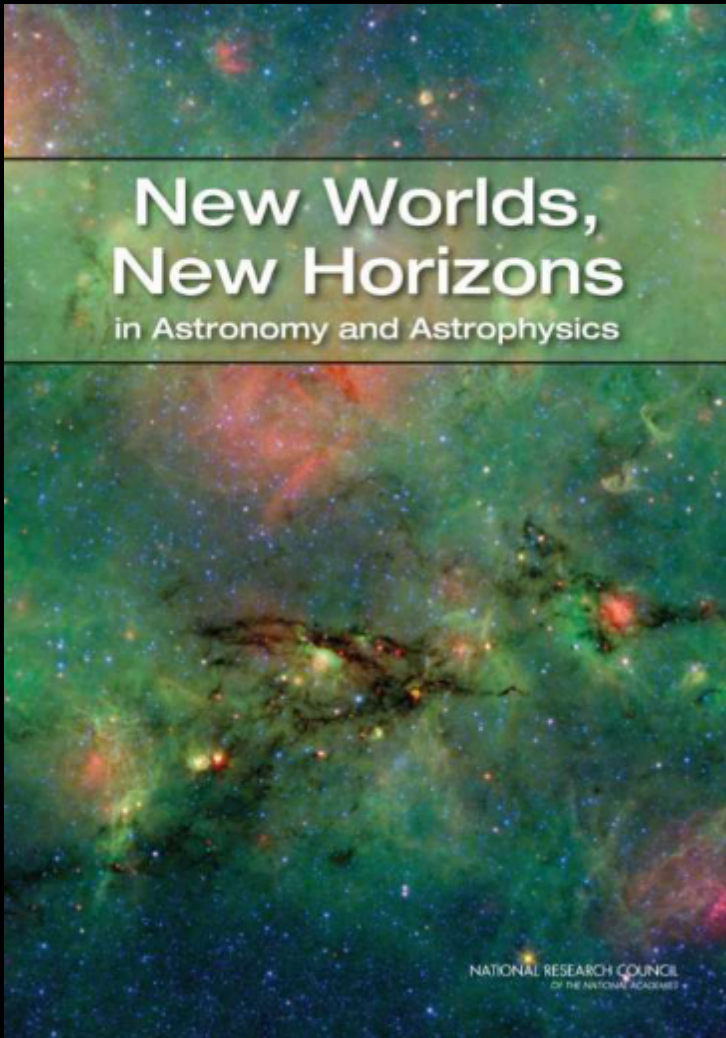
＋大栗真宗（観測的宇宙論）

物理教室の吉田直紀教授、およびビッグバン
センターの横山順一教授のグループと連携
しつつ研究室活動を行っている

東大本郷キャンパスでの 宇宙物理学の理論研究室

- 物理教室：宇宙物理研究室
 - 教授：須藤靖、助教：大栗真宗
 - 教授：吉田直紀、助教：細川隆史
- ビッグバンセンター
 - 教授：横山順一、助教：須山輝明
- 3研究室が共同で研究活動を行っている
 - 木曜日に昼食会、ランチセミナー、定例セミナー
 - 学生間のゼミ、勉強会、議論、雑談、愚痴
 - サマースクール、遠足、飲み会
 - 新着論文紹介(月、水、金)
- IPMUの高田昌広教授のグループとも共同研究

Astro2010: decadal survey



- **Cosmic Dawn ⇒ 吉田**
 - 宇宙の夜明け: 第一世代天体・ブラックホールの探索
- **New Worlds ⇒ 須藤**
 - 新世界: 近傍の居住可能惑星の探索
- **Physics of the Universe ⇒ 横山**
 - 宇宙の物理: 宇宙を支配する科学法則の理解

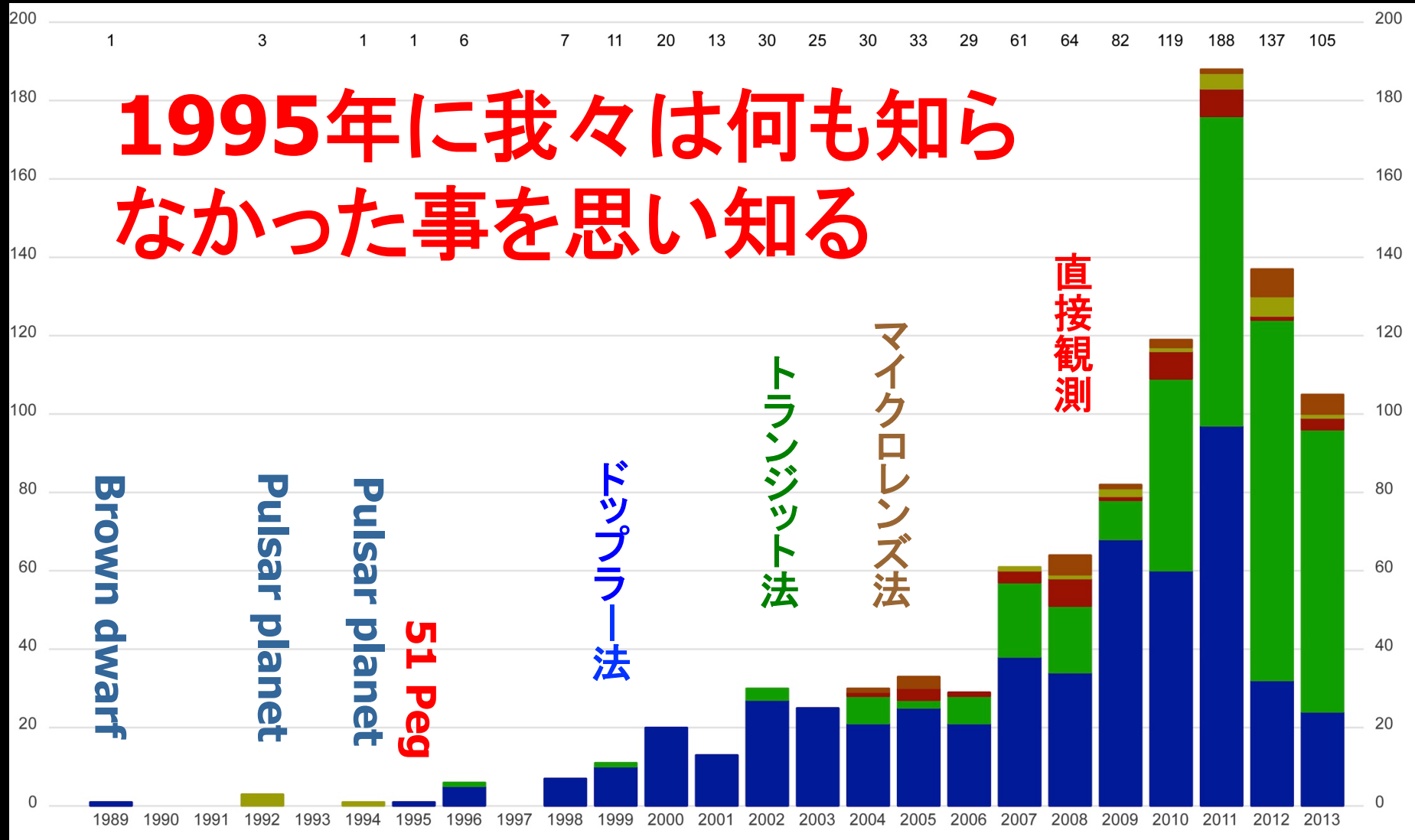
August 13, 2010

http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

須藤研で行っている研究テーマの例

- 3次元銀河地図によるダークエネルギーの解明
- 重力レンズ宇宙論
- 3軸不等ダークマターハローの力学モデル
- 静水圧平衡近似を越えた銀河団の質量推定法
- 多波長全天地図のスタッキング解析による銀河とクエーサーの統計的検出
- 太陽系外惑星系の主星-惑星潮汐相互作用を取り入れた力学モデルの構築
- 系外惑星系の衛星・リングの検出法
- トランジット、星震学、視線速度観測を組み合わせた惑星系の自転・軌道角運動量の進化と起源
- 第2の地球のバイオマーカー探査可能性の探究

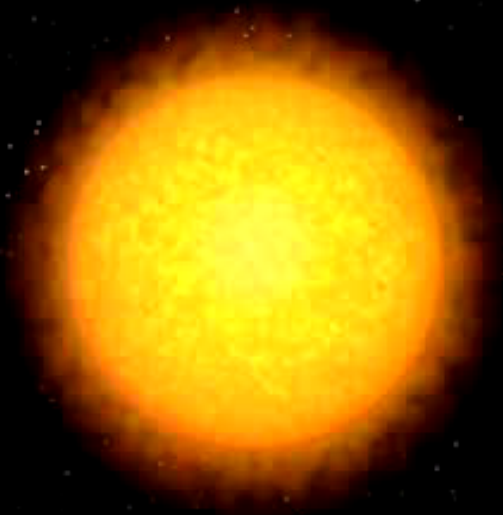
太陽系外惑星発見の歴史年表



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

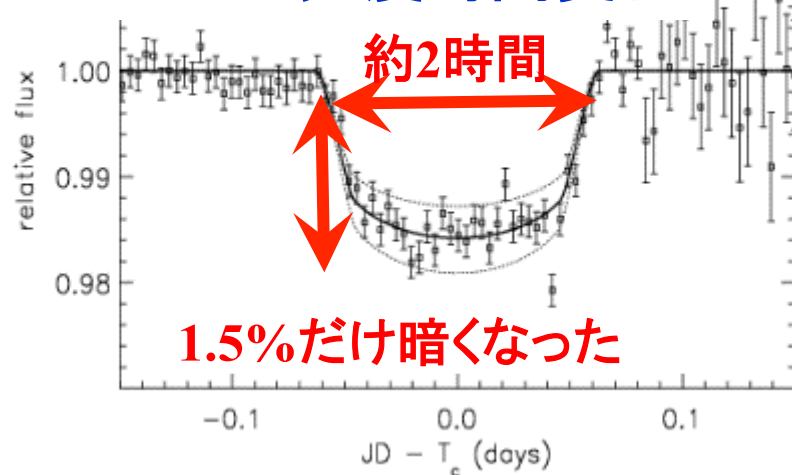


想像図

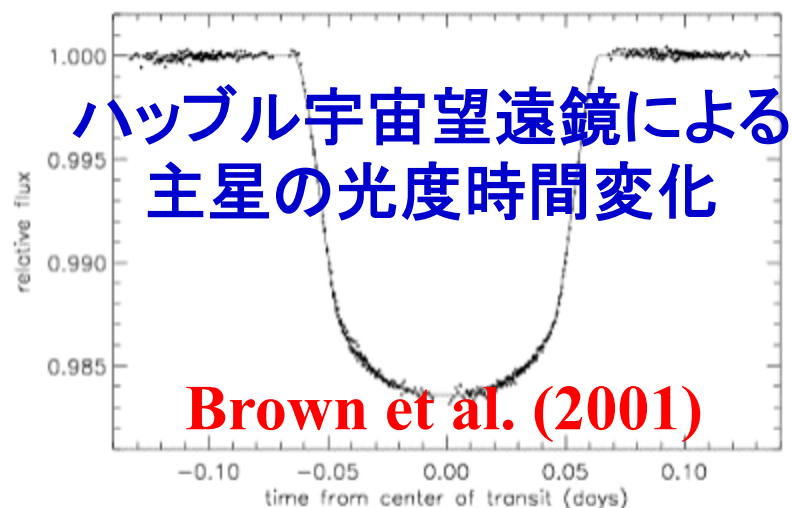
Henry et al. (1999)

Charbonneau et al (2000)

地上望遠鏡による
主星の光度時間変化



ハッブル宇宙望遠鏡による
主星の光度時間変化

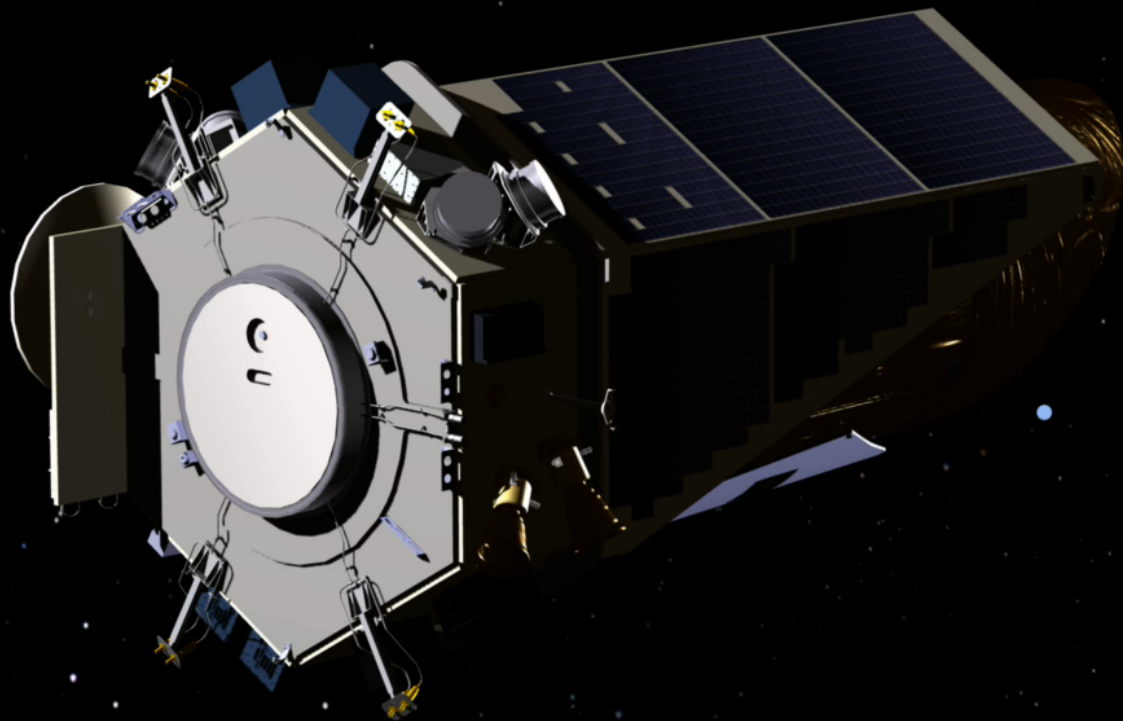


Brown et al. (2001)

Kepler mission (March 6, 2009 launch)

Photometric survey of transiting planets

Searching for terrestrial/habitable planets



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

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 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.

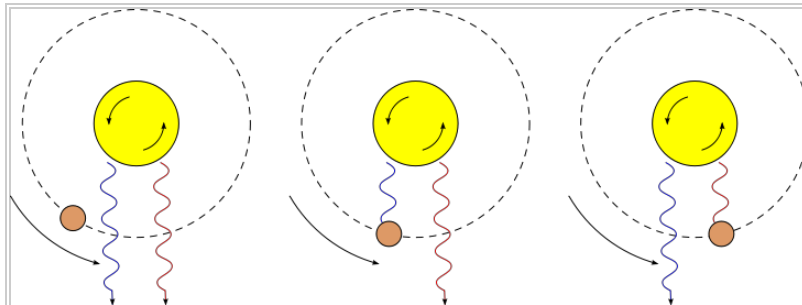


Illustration showing the effect. The viewer is situated at the bottom. Light from the anticlockwise-rotating star is blue-shifted on the approaching side, and red-shifted on the receding side. As the planet passes in front of the star it sequentially blocks blue- and red-shifted light, causing the star's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

en.wikipedia.org/wiki/Rossiter-McLaughlin_effect

1/2

13/06/05

ロシター効果 - Wikipedia

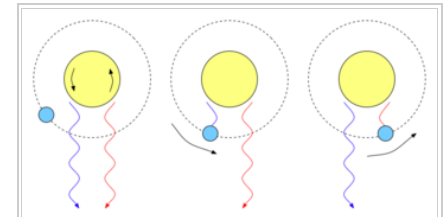
ロシター効果

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った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正常に戻る。

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 .

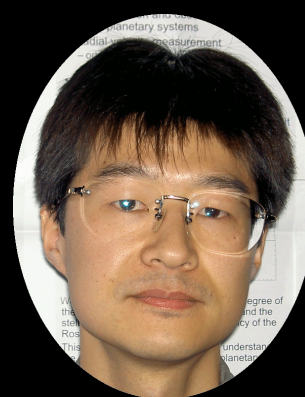
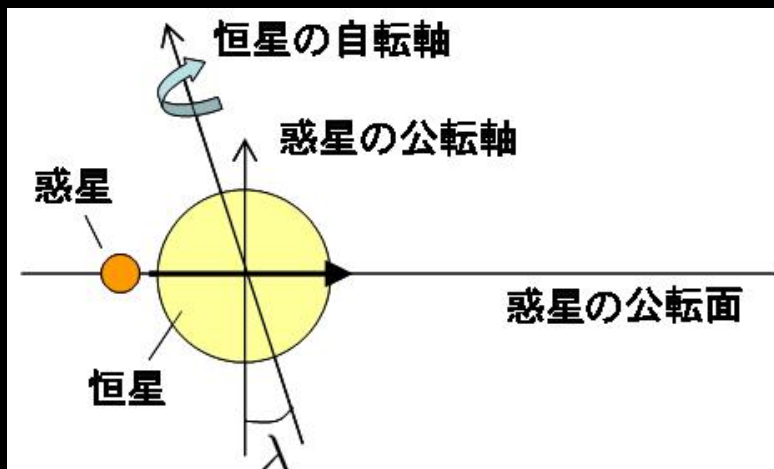
We also note that the future satellites *COROT* and *Kepler* will detect numerous transiting planetary systems, most of which will be important targets for the RM effect in 8–10 m class ground-based telescopes. We hope that our analytic formulae presented here will be a useful template in estimating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

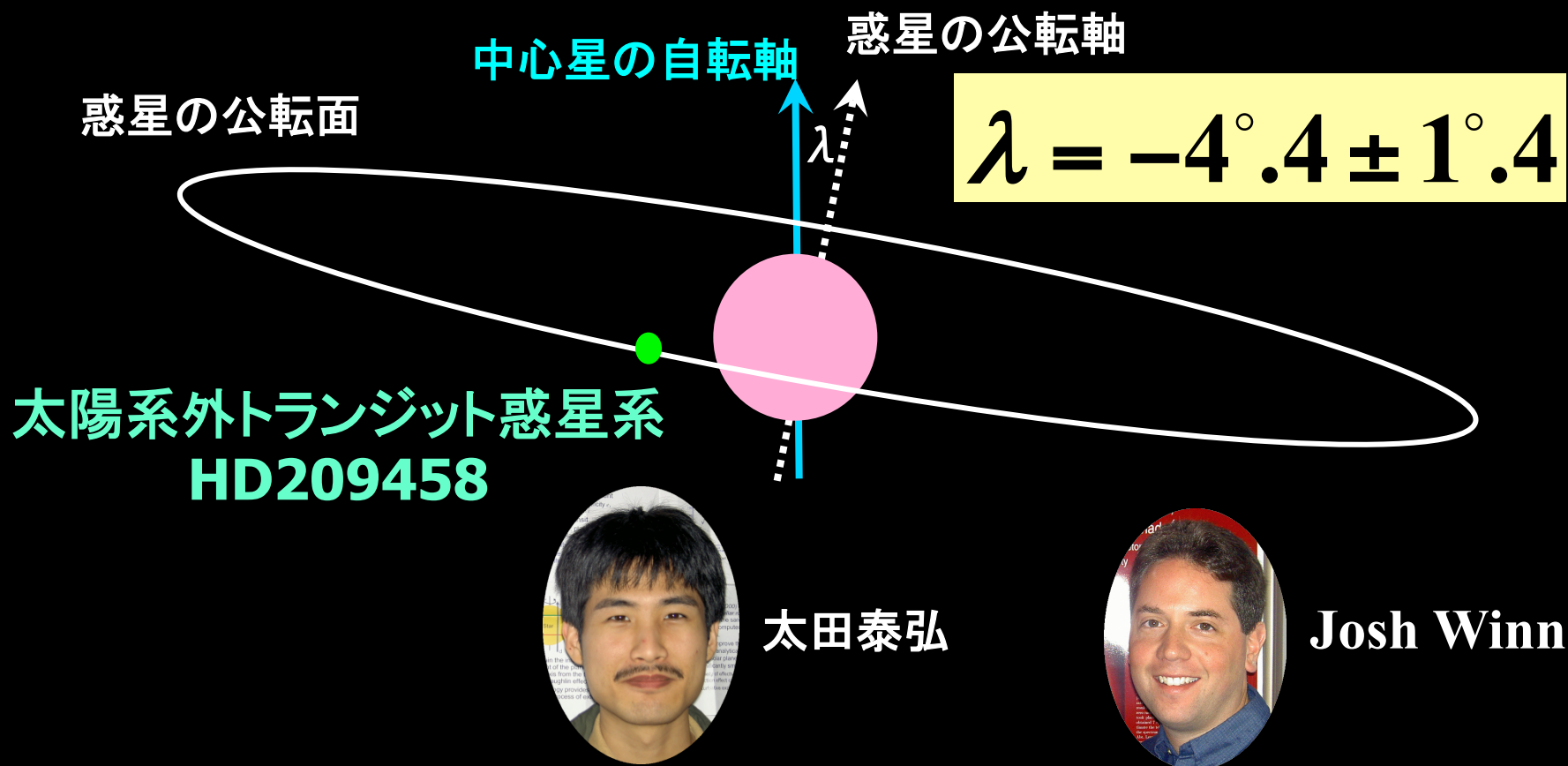
主星自転軸と惑星公転軸のずれが系外惑星の起源を探る重要な手がかり

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)

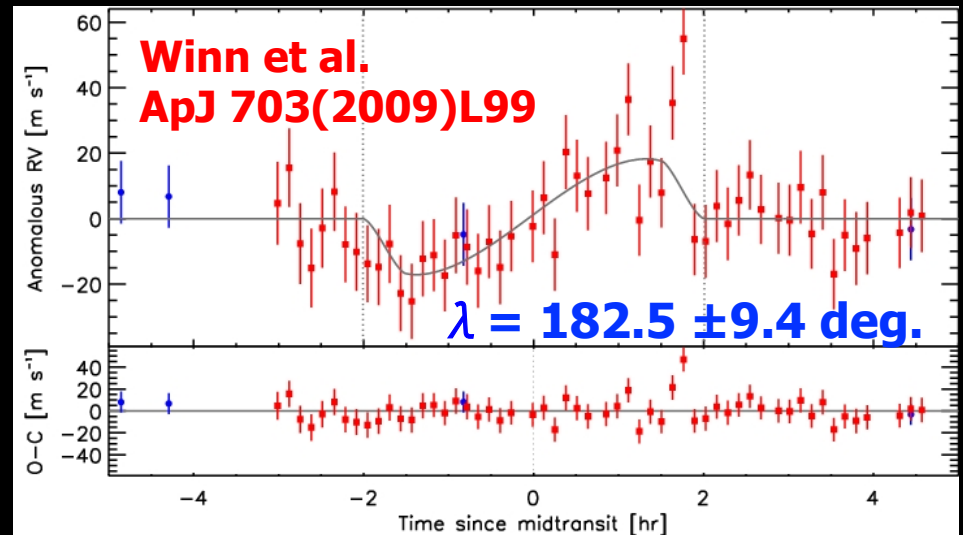
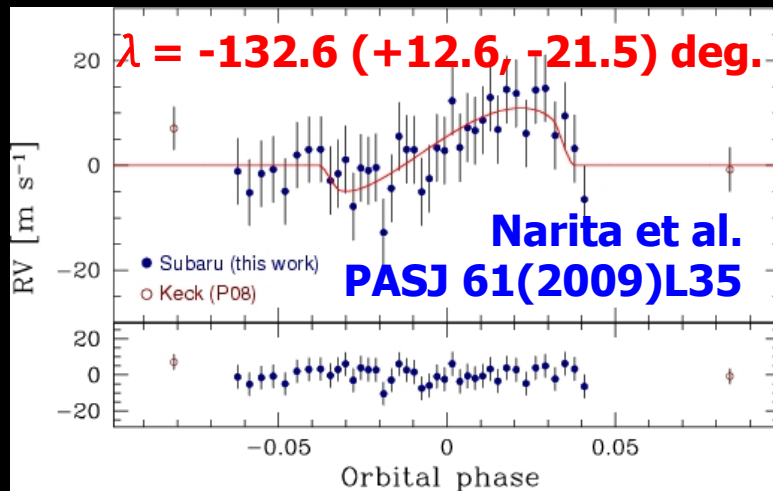
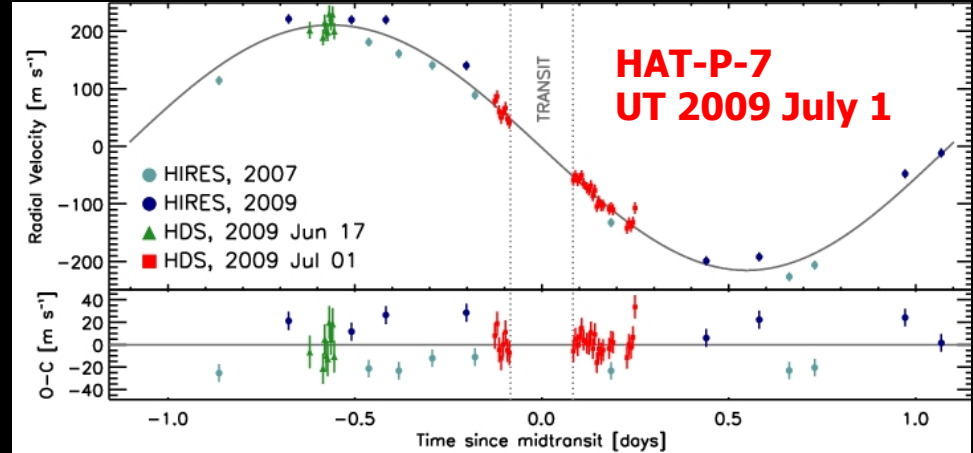
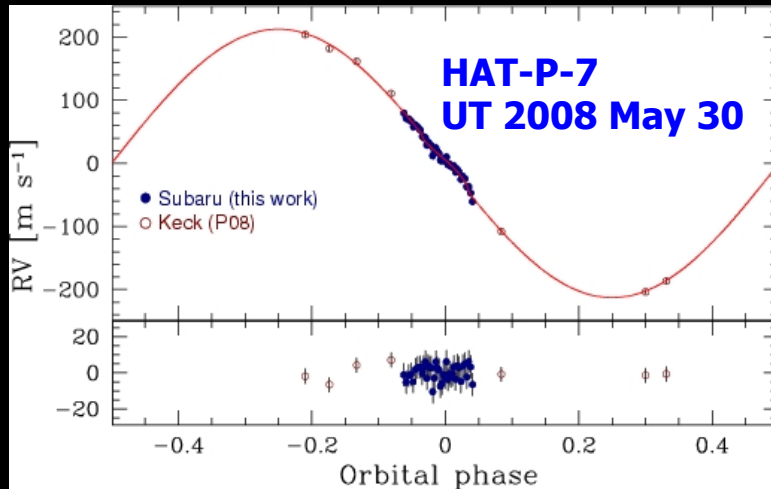


ロシター効果を利用したHD209458の 主星自転軸と惑星公転軸のずれの発見



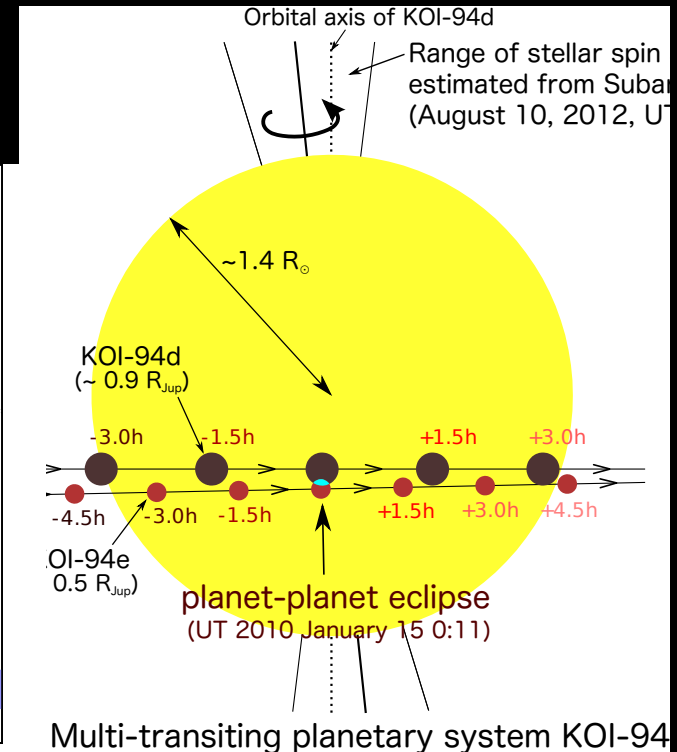
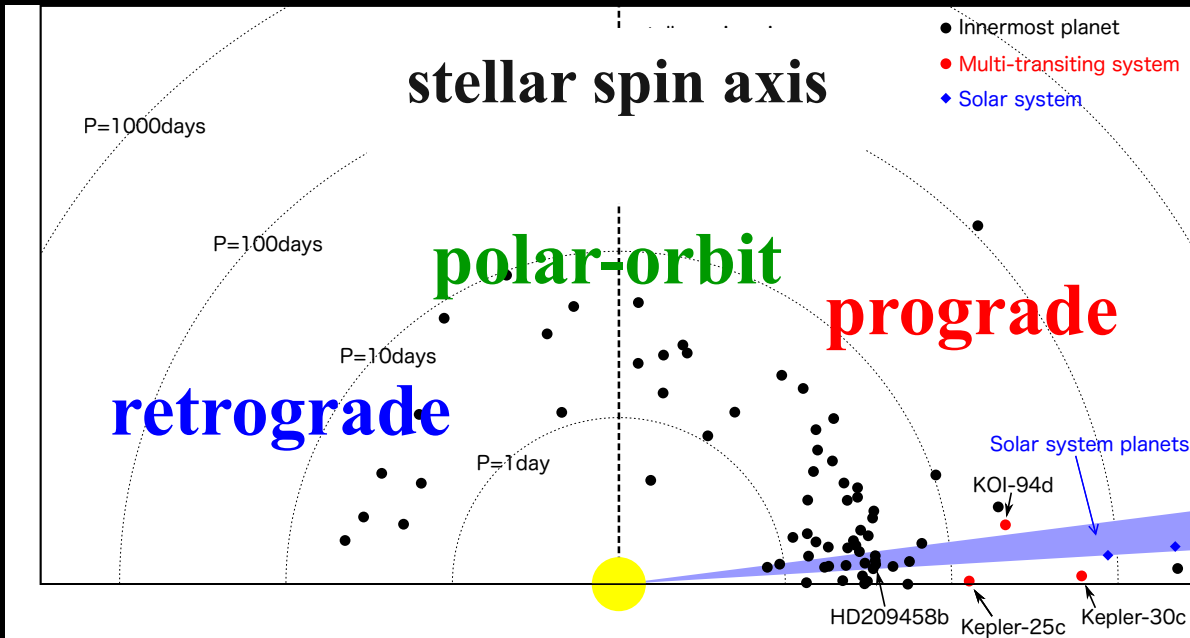
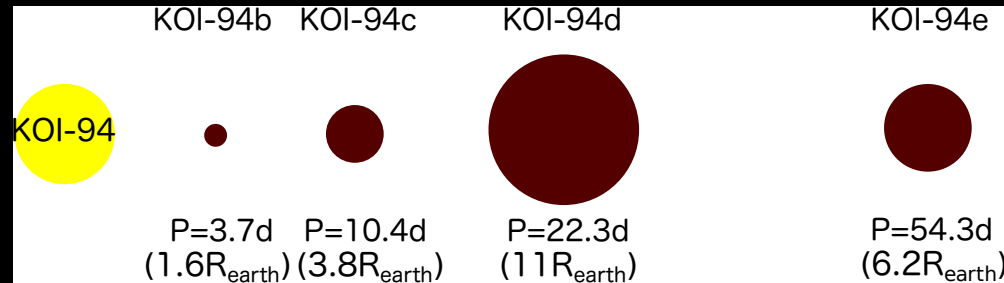
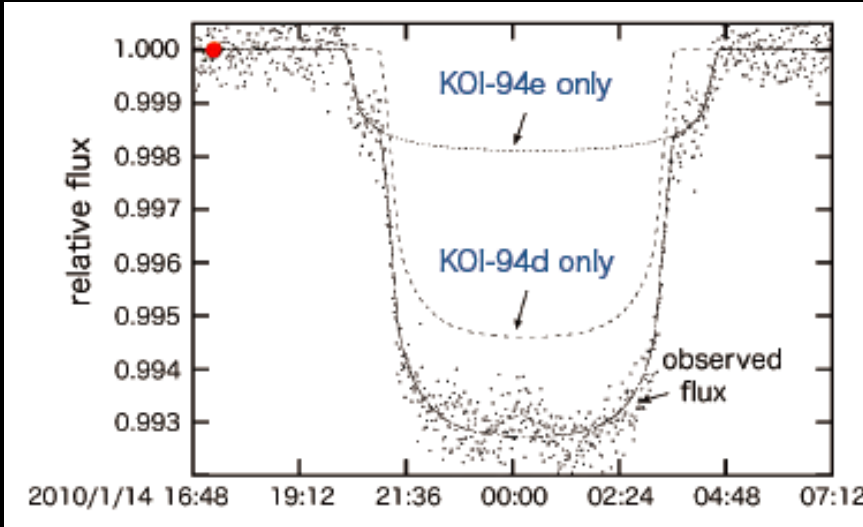
太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた₁₂

逆行する系外惑星(HAT-P-7)の発見



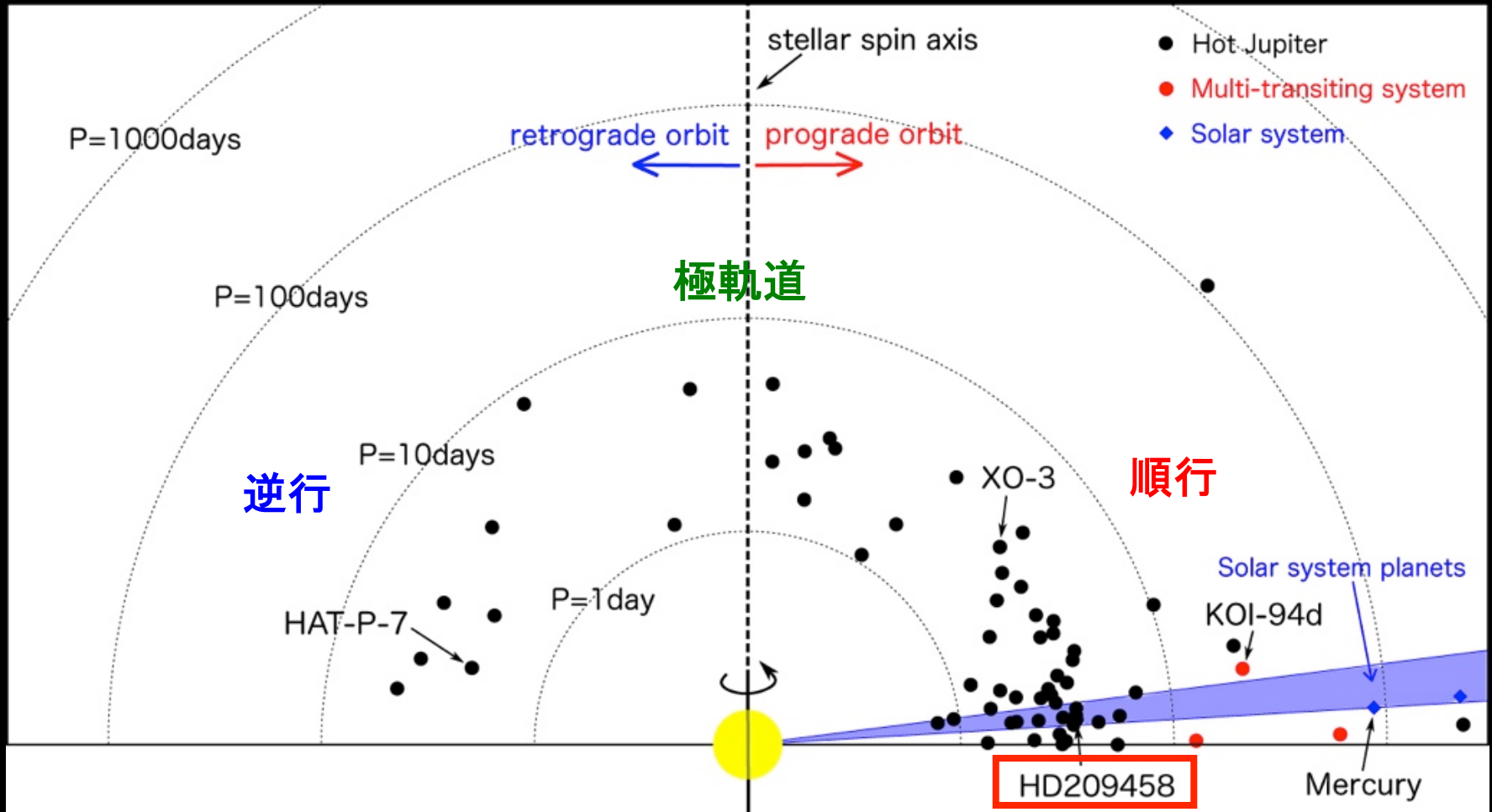
- ともにすばる望遠鏡@ハワイでの成果
- 逆行軌道の惑星なんて、どうやったら出来るのか???

Discovery of planet-planet eclipse and spin-orbit misalignment



Multi-transiting planetary system KOI-94

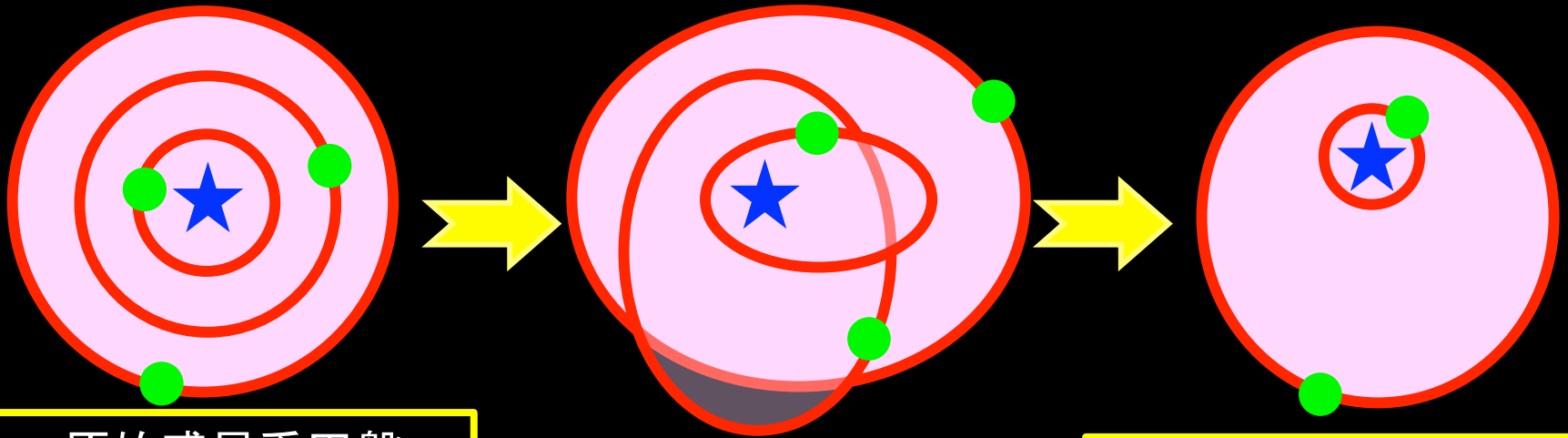
主星自転軸と惑星公転軸のまとめ (天球上の射影なので3次元角度ではない)



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。

Xue et al. (2014)

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

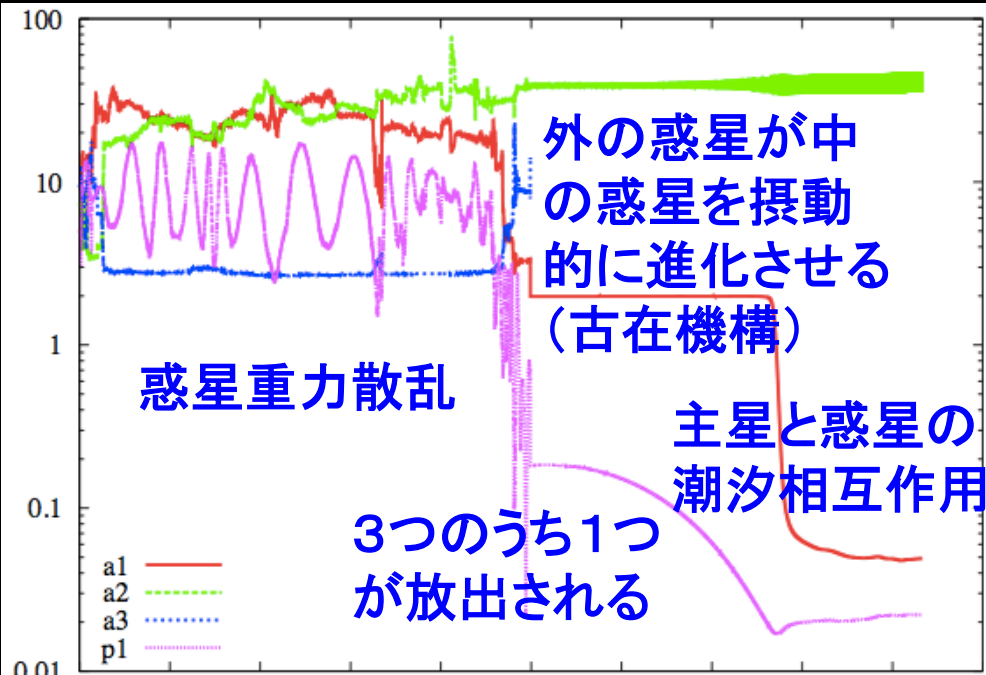
太陽系形成標準モデル
(京都モデル・林モデル)

3惑星系の数値計算例

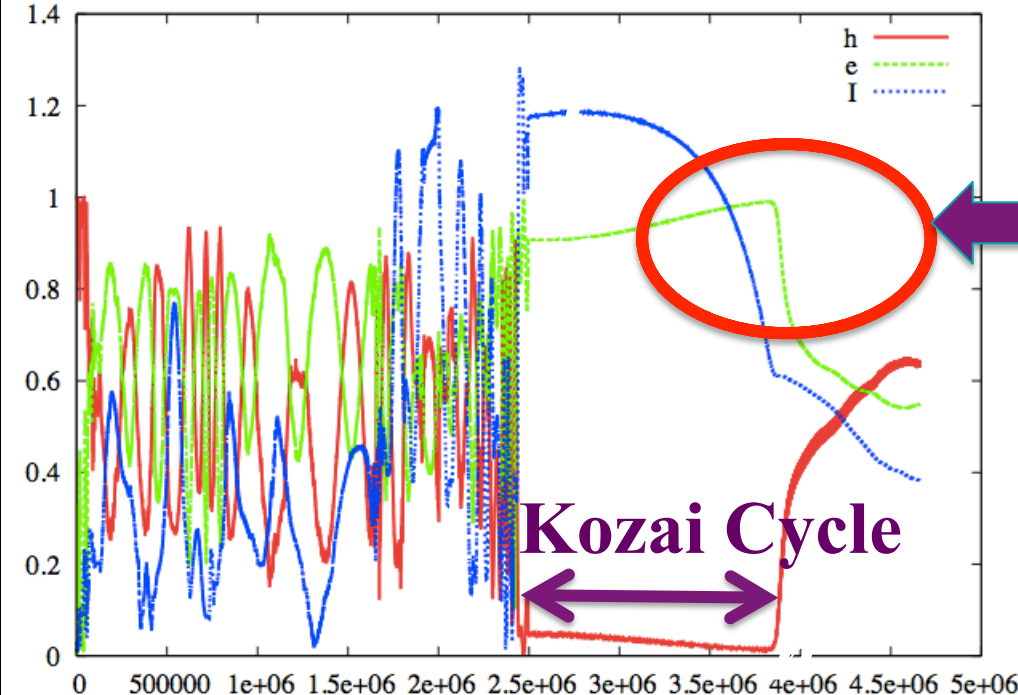
古在機構の保存量

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

a, q [AU]



h, e, I [rad]

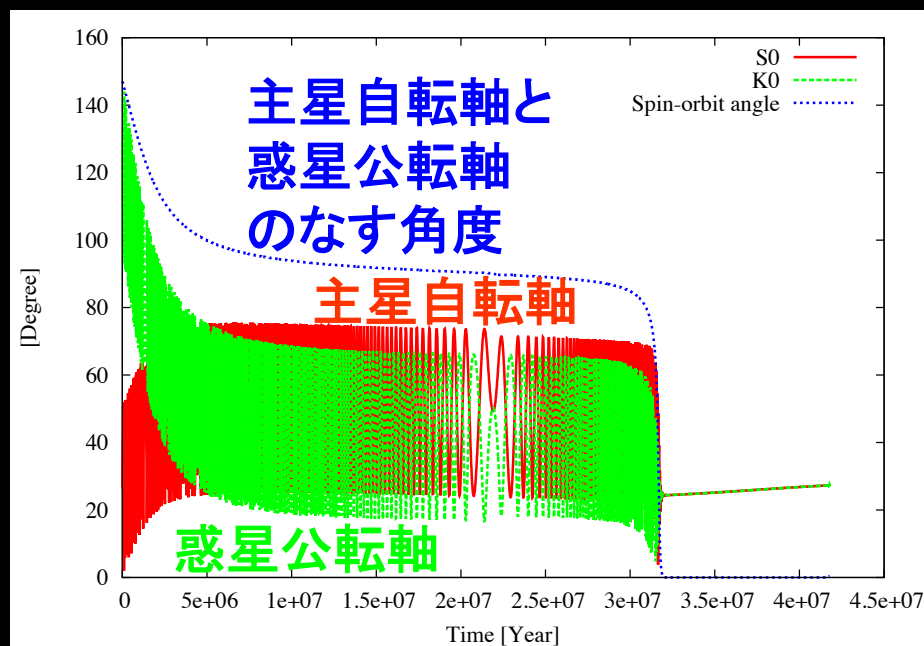


Tidal circularization
after the Kozai cycle

Xue et al. (2013)

Time [Year]

主星と惑星の潮汐相互作用・散逸

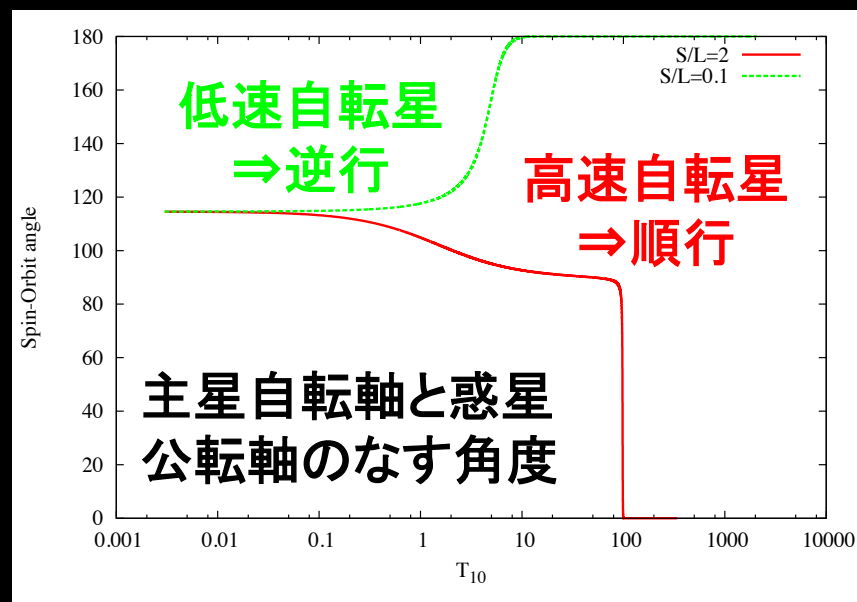


Xue et al. (2013)

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

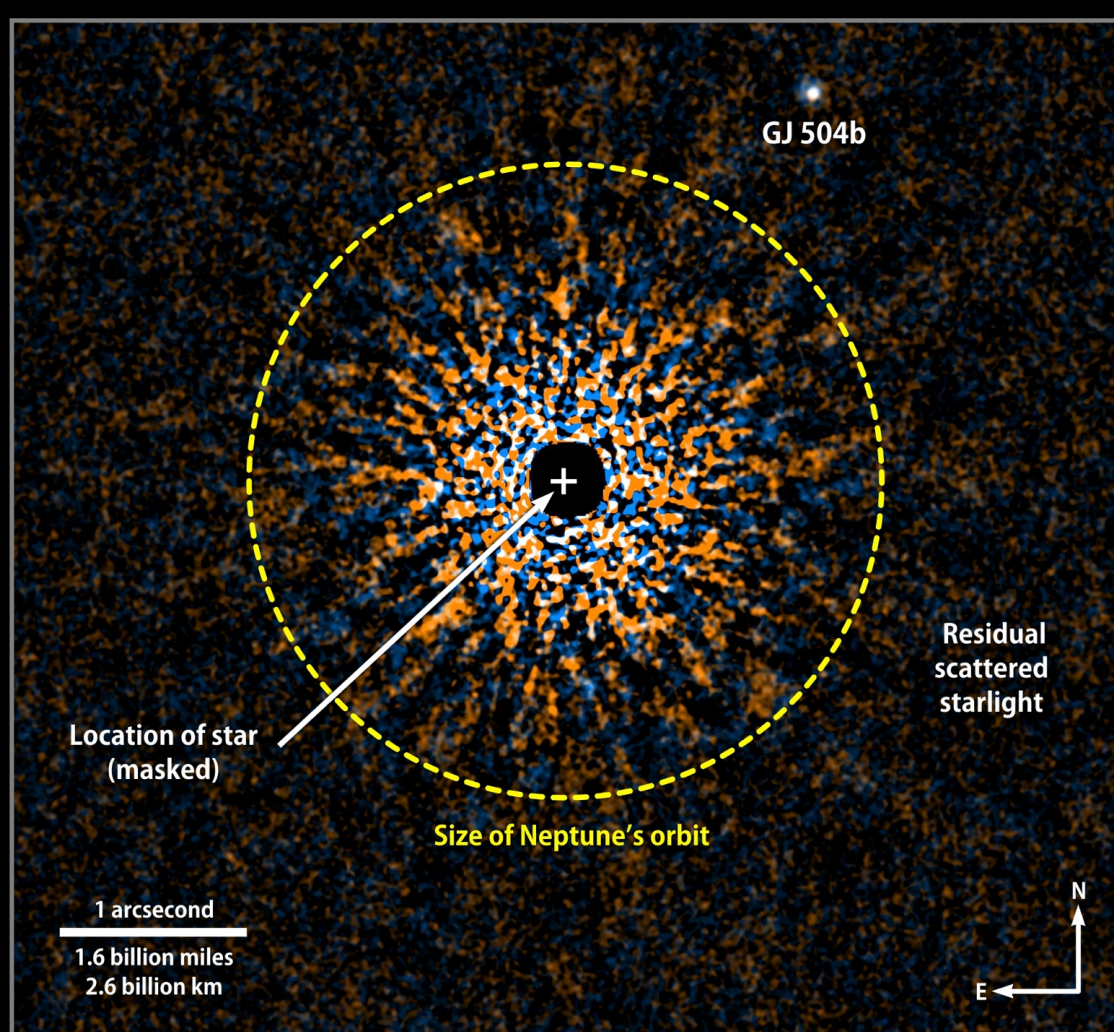
順行軌道がもっとも安定だが、逆行軌道に向かう場合もある。極軌道（直交）も一時的には安定となるがやがて順行か逆行に落ち着く



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

すばる望遠鏡によるガス惑星GJ504b の直接撮像:コロナグラフ技術の進歩



■ 57光年先にある4木星質量の惑星の初直接撮像

■ Kuzuhara et al. ApJ 774 (10213)11

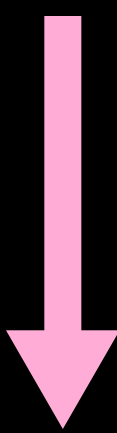
■ すばる望遠鏡SEEDSサーベイ(天文学科の田村先生)の成果

■ 地球型惑星直接撮像への第一歩

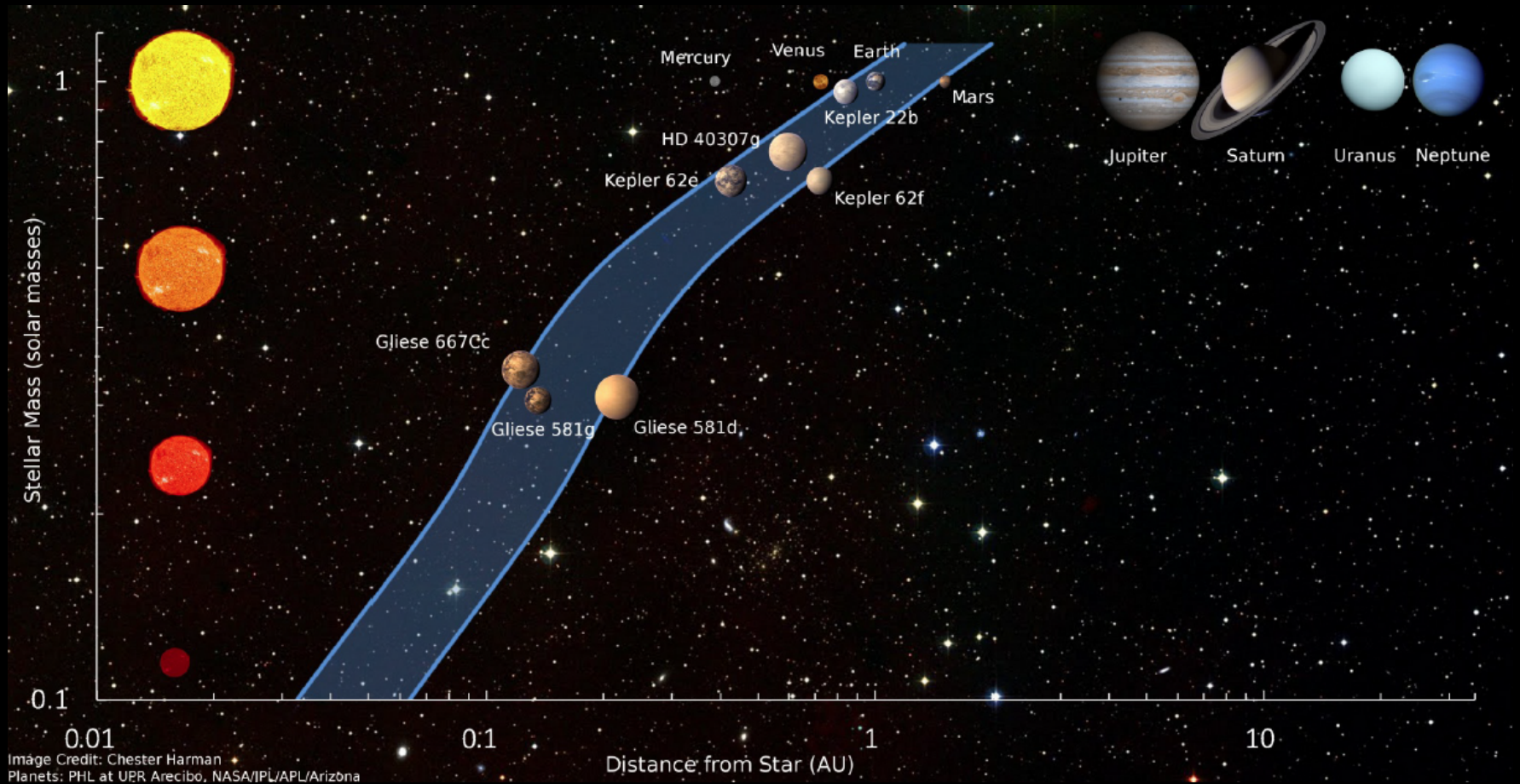
■ 2013年度よりビッグバンセンター 系外惑星プロジェクト(田村+須藤)が発足

系外惑星研究の現在・過去・未来

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995)
 - 惑星大気の実見 (2001)
 - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
 - 惑星可視域反射光の検出 (2009)
-

- 
- 地球型居住可能惑星の実見
 - 系外惑星リング、衛星の実見
 - 地球型惑星の直接検出(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
-

中心星の距離とハビタブルゾーン



Kasting, Kopparapu, Ramirez & Harman: arXiv:1312.1328

地球サイズのハビタブル惑星の存在確率

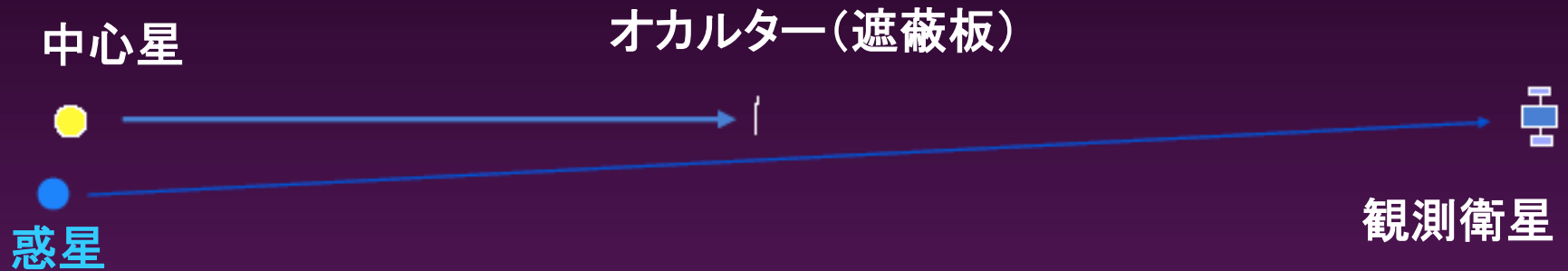
■ GK型星を公転する地球半径の1～2倍の惑星

- 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)
- $5.7 + 2.2 - 1.7$ % (公転周期が200～400日のもの)

Table 1. Occurrence of small planets in the habitable zone

HZ definition	a_{inner}	a_{outer}	$F_{P,\text{inner}}$	$F_{P,\text{outer}}$	f_{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	$\sim 50^{\dagger}$

地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*



<http://newworlds.colorado.edu/>

■ 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点

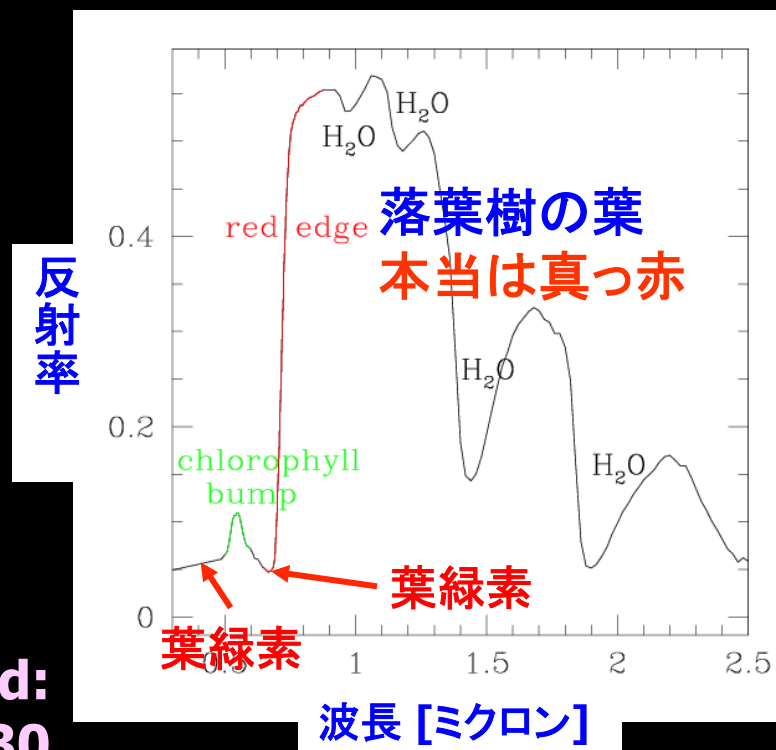
- 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
- 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
- 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
- コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
- 同様の計画がプリンストン大学でも検討中(O₃)

過激(保守的?)なバイオマーカー

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
- **Biomarker** 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



系外惑星上の植物の色？

古いM型星



若いM型星



G型星



F型星



■ Nancy Y.Kiang “*The color of plants on other worlds*”

■ Scientific American April 2008

■ 邦訳：日経サイエンス2008年7月号

第二の地球の色から、海、雲、植生の占める面積の割合を推定する

- 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 - 藤井友香、河原創、樽家篤史、須藤 靖
- 東京大学気候システム研究センター
 - 福田悟、中島映至
- プリンストン大学
 - Edwin Turner

Fujii et al. *Astrophys. J.* 715(2010)866, arXiv:0911.5621
Astrophys. J. 738(2011)184, arXiv:1102.3625

<http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alien-life-100513.html>

A pale blue dot

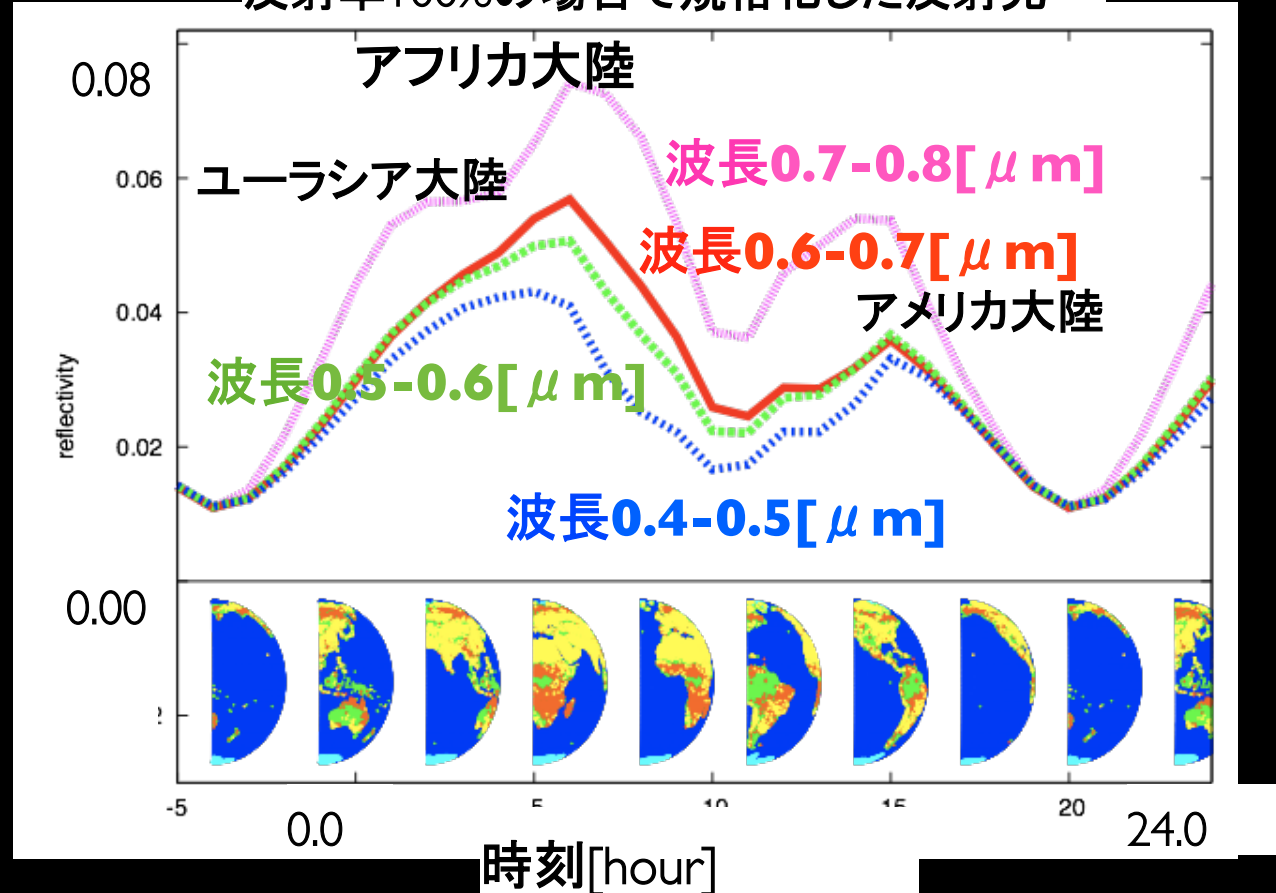


自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

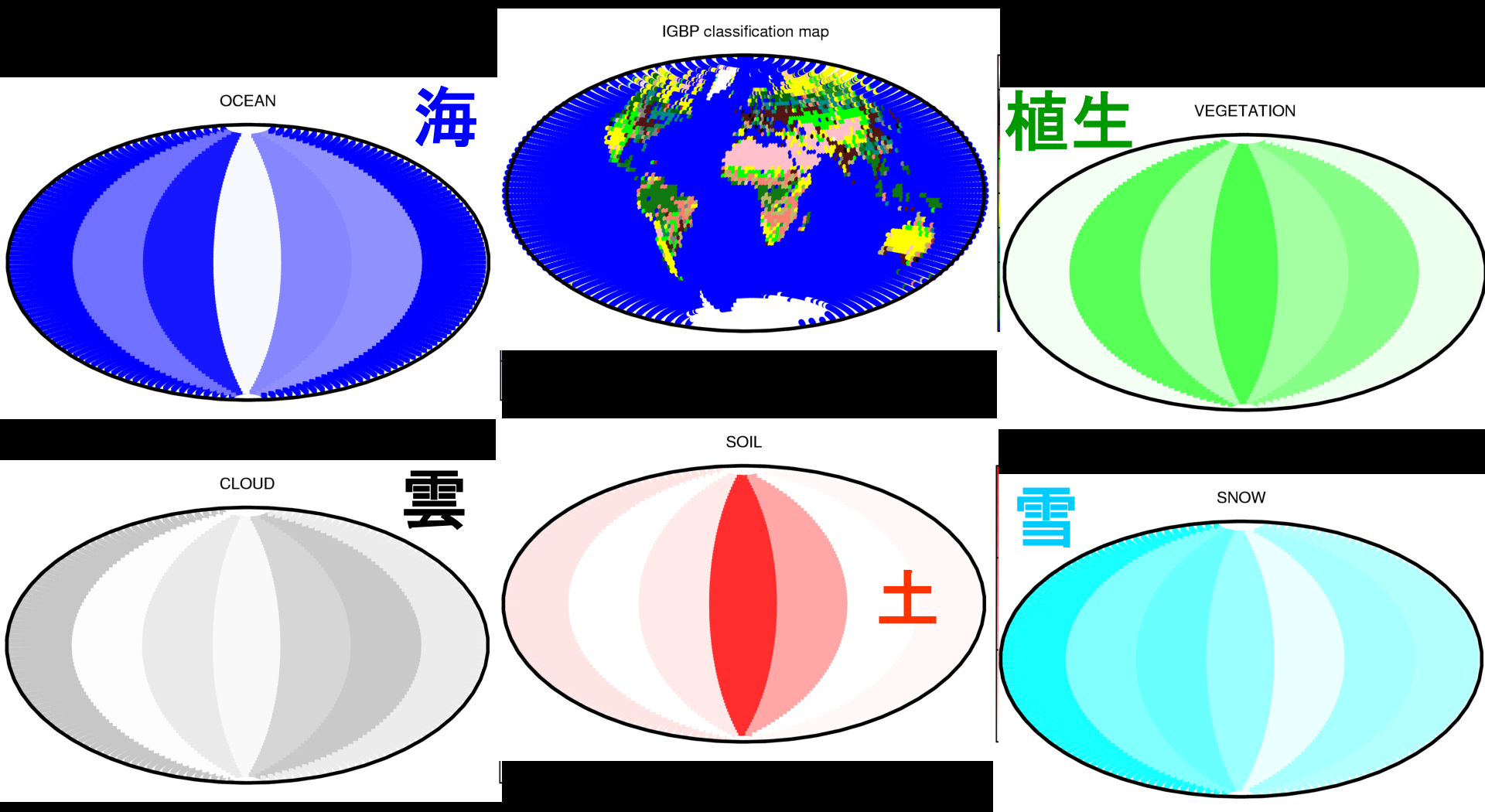
地球は青かった？

反射率100%の場合で規格化した反射光



Fujii et al. (2010)

地球測光観測データから推定された地表面成分の経度分布地図



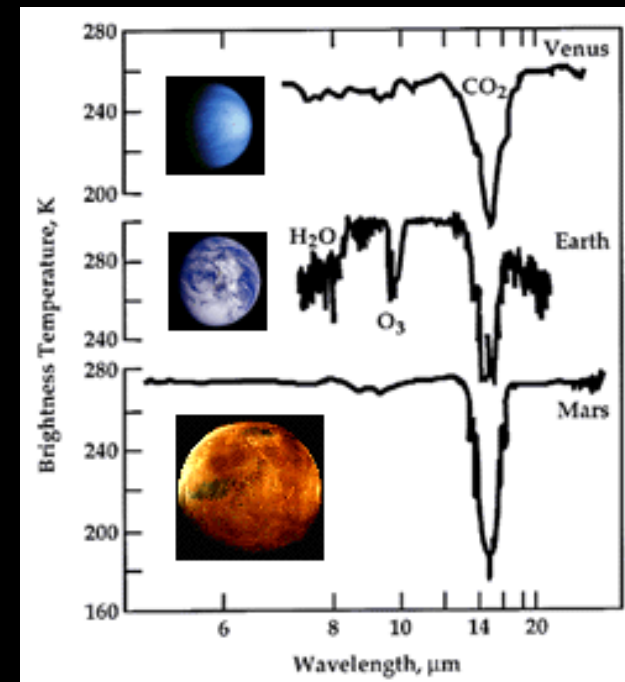
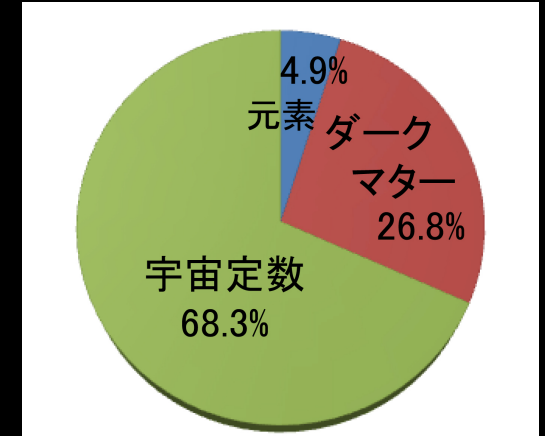
「夜空のむこう」を探ることで、従来全く予想されていなかった新しい科学が発展しつつある

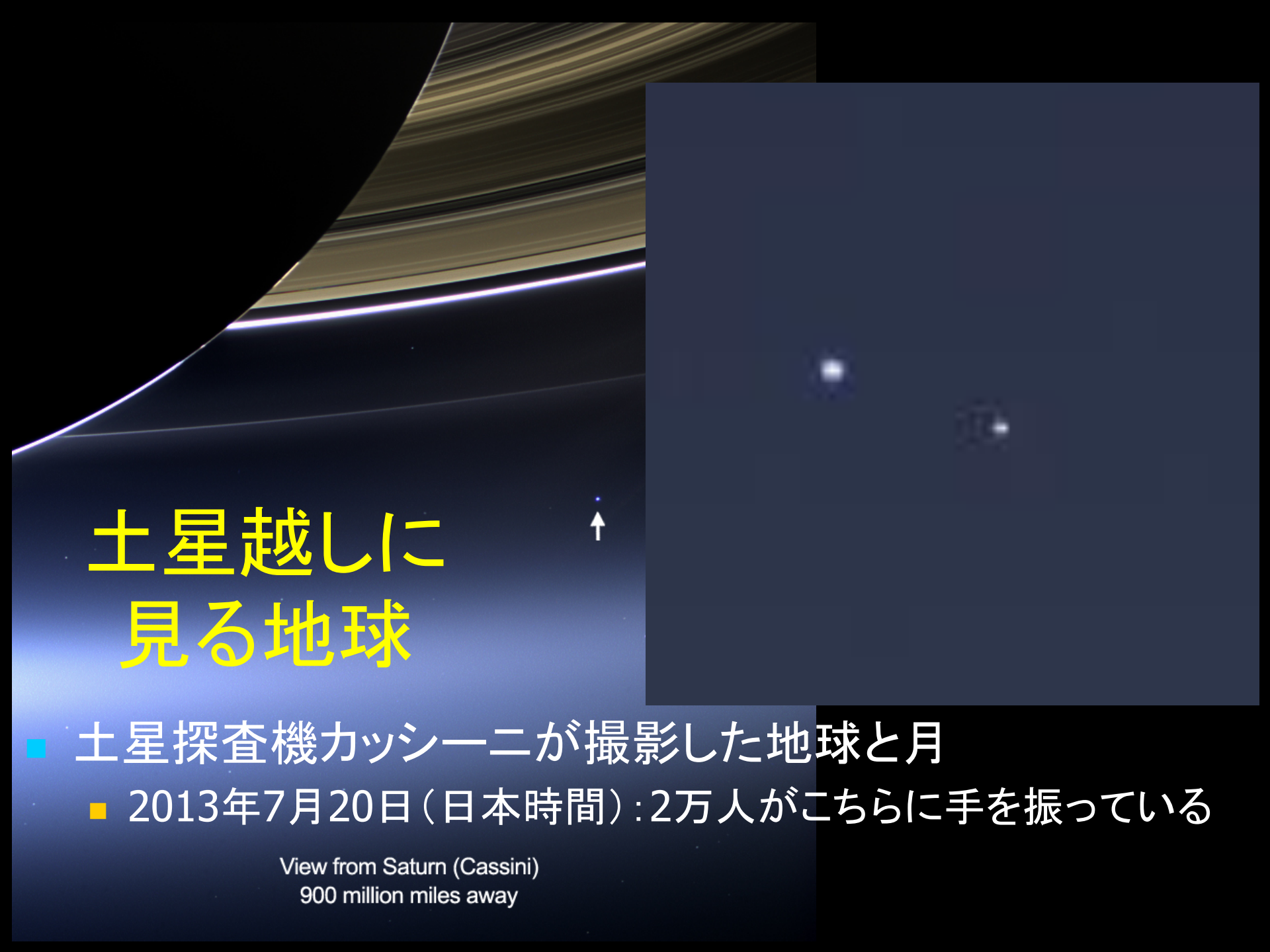
■ 宇宙の果ての観測から微視的世界の新しい階層が発見された

- 宇宙の96%の正体は理解されていない
- 暗黒物質と暗黒エネルギーの解明は新しい自然法則を探る本質的な鍵

■ 天文学から宇宙生物学へ

- 地球型ハビタブル惑星の発見
- バイオマーカーの提案と検出
- 系外惑星リモートセンシング
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを中心星から分離する





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

研究室のモットー

- 普通の人やらない研究をする
 - 人が群がっているようなテーマは極力避ける
- 競争のための研究はしない
 - 研究に「勝ち負け」を持ち込むべきではない
- まだ誰も気づいていない「謎」を発見する
 - 世界の不思議さと奥深さを認識する
 - 正解を与えられるかはどうかは結果論
- 過去の卒業生の学位論文タイトルと進路
 - http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/former_members.htm

一般的なアドバイス

- 須藤研で行われている研究の詳細に関しては、以下のホームページを参照のこと
 - <http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp>
 - <http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mytalks.html>
- 大学院進学を希望する研究室の先生にはメールでアポイントをとり、必ず直接話をうかがうこと
 - 学部とは異なり大学院教育は各研究室単位。特に理系の場合には、公私ともに研究室中心の生活になる。
 - それぞれ独自の伝統、文化、雰囲気があるので、研究テーマはもちろん、それらとの相性も極めて大事