

太陽系外惑星系における星の自転軸と 惑星の軌道公転軸のなす角度の推定

東京大学宇宙理論研究室 D1

平野 照幸

太陽系外惑星研究

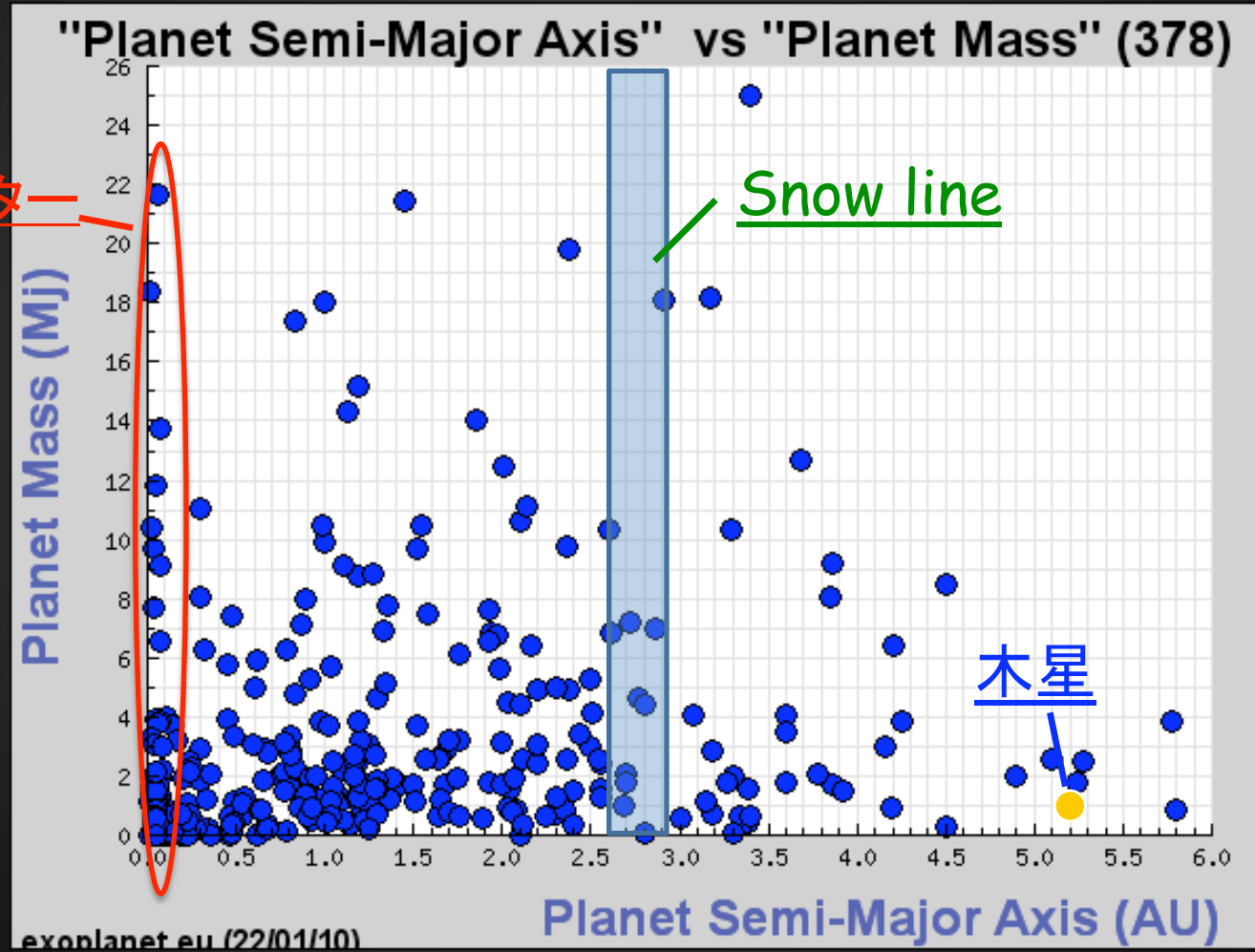
- これまで473個の系外惑星が発見されている

2010年8月1日現在

- 視線速度法 442
 - **トランジット法 91**
- 直接撮像 13
- マイクロレンズ法 10
- パルサータイミング法 8

<http://exoplanet.eu/>

系外惑星の多様性：主星近傍に巨大惑星が多く存在



ホット・ジュピターの形成

現在の標準シナリオ

→ ホット・ジュピターはもともと主星から数AU離れた場所で形成され、後に何らかのメカニズムで主星近傍に移動した



- 惑星を移動させるためのメカニズムとは？
- 観測的検証法は？
 - ex) 軌道離心率 e
 - 主星自転軸と惑星公転軸のなす角 ψ

惑星移動メカニズム

1. 原始惑星と原始惑星系円盤との相互作用

- 原始惑星系円盤との重力相互作用により徐々に主星に落ちてきた (e.g. Lin et al. 1996) → e, ψ ともに小さい

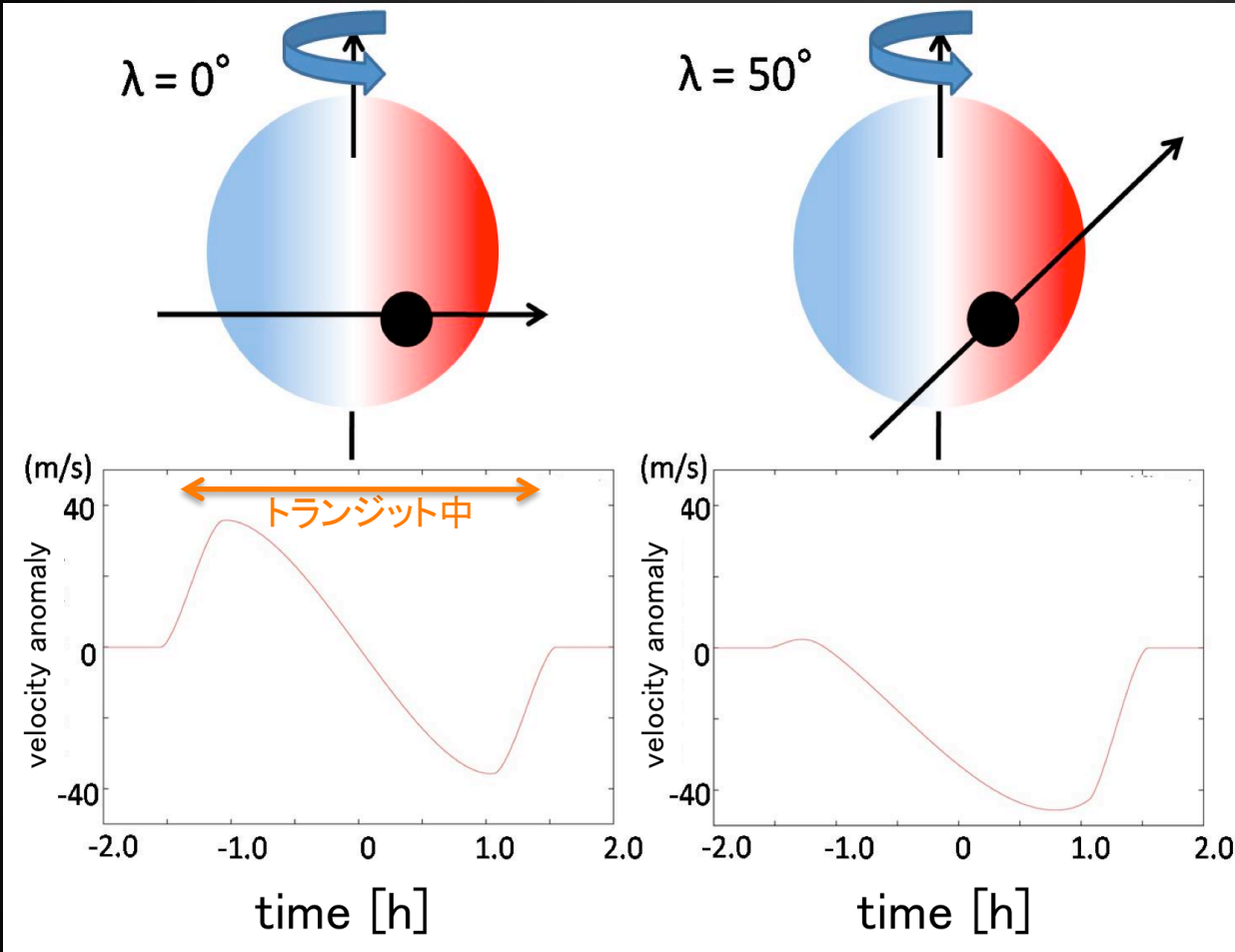
2. 惑星同士の重力散乱＋主星からの潮汐力

- 複数の惑星が形成された後に重力散乱され離心率が上昇。近日点付近で主星からの潮汐力を受け軌道長半径が減少 (e.g. Nagasawa et al. 2008) → e, ψ が大きくなる可能性あり

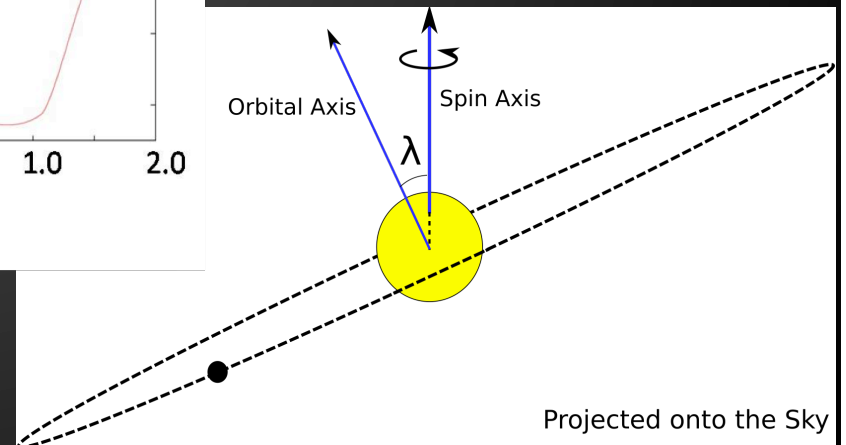
3. 古在効果＋主星からの潮汐力

- 古在効果により軌道傾斜角と離心率が振動する。その後潮汐力により軌道長半径が減少 (e.g. Wu et al. 2007) → e, ψ が大きくなる可能性あり

ロシター効果



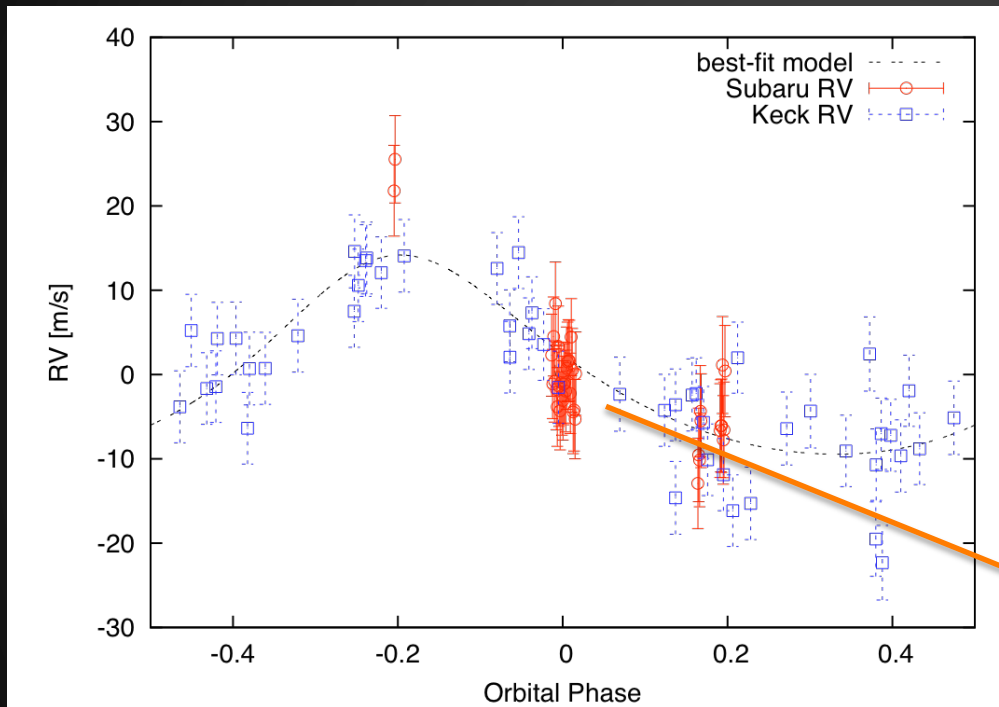
←縦軸: 主星の視線速度の
ケプラー運動からのずれ



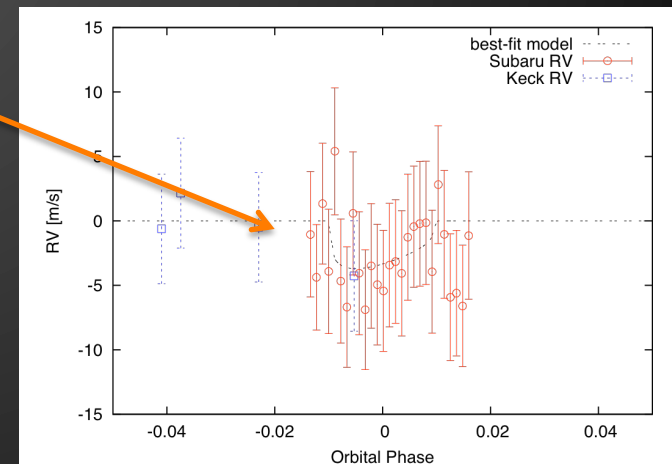
↑ 標準惑星形成モデルの予想

すばるHDSを用いたロシター効果の観測

HAT-P-11b のトランジット前後の視線速度の変動



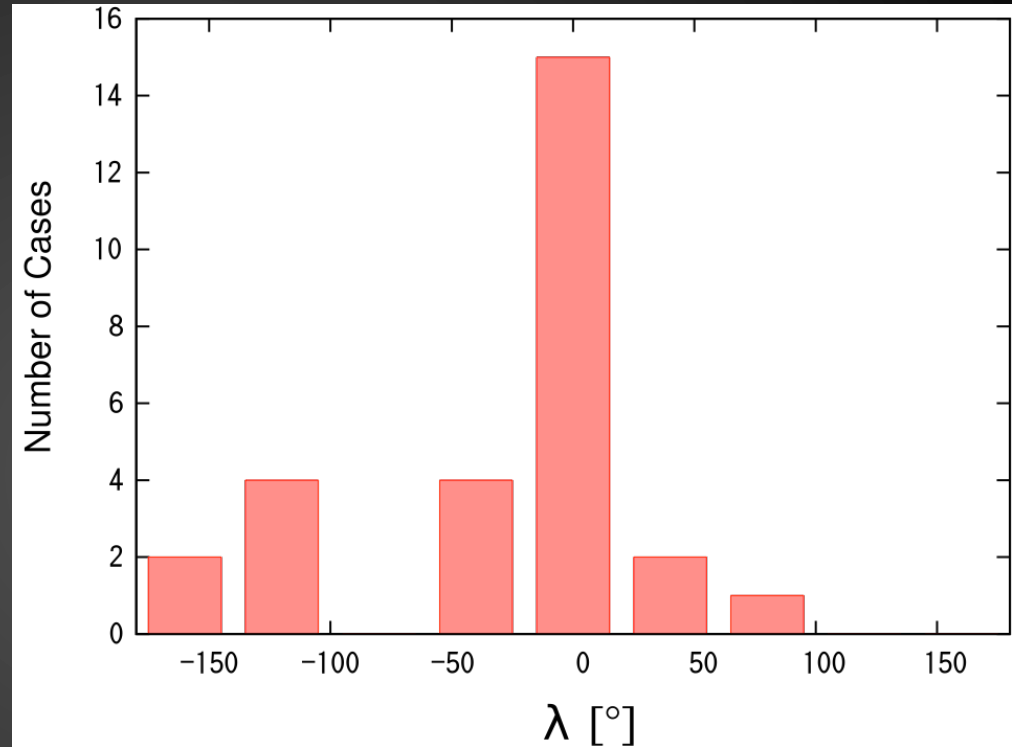
$$\lambda = 102.8 +28.2 -22.8 \text{ deg}$$



T. Hirano, et al. 2010 submitted

観測結果のまとめ

System	T_{eff} [K]	λ [deg]
HD 209458	6070 ± 50	-4.4 ± 1.4
HD 149026	6160 ± 50	-12 ± 15
HD 189733	5040 ± 50	$-0.85^{+0.28}_{-0.32}$
TrES-1	5230 ± 50	30 ± 21
TrES-2	5850 ± 50	-9 ± 12
HAT-P-2	6290 ± 60	$0.2^{+12.2}_{-12.5}$
HAT-P-1	6000 ± 120	3.7 ± 2.1
Corot-2	5600 ± 120	-7.2 ± 4.5
TrES-4	6200 ± 75	-6.3 ± 4.7
HD 17156	6080 ± 56	10.0 ± 5.1
XO-3	6430 ± 50	-37.3 ± 3.7
Corot-1	6000 ± 150	77 ± 11
HAT-P-7	6350 ± 80	182.5 ± 9.4
WASP-3	6400 ± 100	$3.3^{+2.5}_{-4.4}$
WASP-18	6400 ± 100	$-5.0^{+3.1}_{-2.8}$
Corot-3	6700 ± 140	$-37.6^{+22.3}_{-10.0}$
WASP-8	5600 ± 80	$-114.2^{+3.9}_{-4.6}$
WASP-4	5500 ± 150	4^{+34}_{-43}
WASP-6	5500 ± 100	-11^{+18}_{-14}
WASP-2	5200 ± 200	-153^{+15}_{-11}
WASP-5	5700 ± 150	$12.4^{+8.2}_{-11.9}$
WASP-15	6300 ± 100	$-139.6^{+4.3}_{-5.2}$
WASP-17	6600 ± 100	$-147.3^{+5.5}_{-5.9}$
HD 80606	5570 ± 44	42 ± 8
WASP-14	6500 ± 100	-33.1 ± 7.4
Kepler-8	6200 ± 150	-26.9 ± 4.6
WASP-33	7400 ± 200	-107.7 ± 1.6
HAT-P-13	5640 ± 90	-0.9 ± 8.5



➤ 星の自転軸と惑星の軌道公転軸がそろっている系が大半

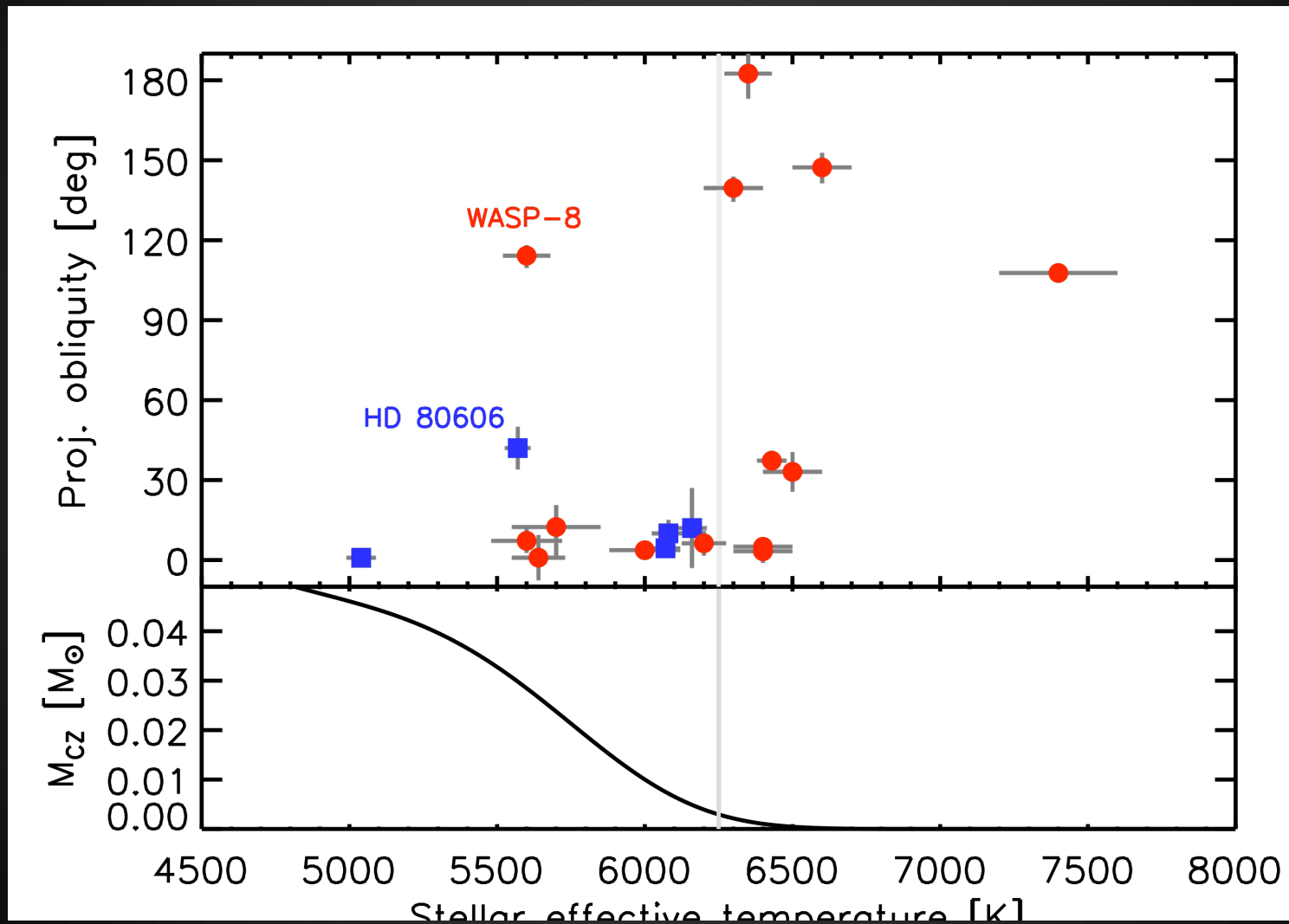
➤ 離心率がnonzeroの系では $\lambda \sim 0^\circ$ から優位にずれているものが多い

惑星のmigration機構への示唆

Spin-orbit angleの測定結果と惑星のmigration

- ✓ λ の少し前までの観測結果は、惑星のmigrationがdisk-planet interactionで主に引き起こされる事を支持していた
- ✓ ところが最近多くの系で大きなspin-orbit misalignmentが報告されるようになった(さらに天球面上ではそろっていても3次元的にはずれているような系も報告されている)
- ✓ ではHot-Jupiterの形成に関わるdominantな機構はいったい何なのか？

星の有効温度とspin-orbit angleの関係



有効温度とspin-orbit angleの関係の解釈

- a. Hot-Jupiterが形成される際はplanet-planet interactionのようなモデルがdominantであるとする
- b. その結果spin-orbit angleは広い値の分布となる(ランダムに近い) (e.g. Nagasawa et al. 2008)
- c. 有効温度の低い(質量の小さい)星がhot-Jupiterを持った場合は、主星の対流層は惑星とinteractionしてobliquityがdampingした可能性がある(対流層だけが公転軸とalign)
 - 質量の大きい星の周りで特にlarge misalignmentが観測される

全体のまとめ・今後の展望

- トランジット中は**ロシター効果**と呼ばれる視線速度の特徴的な変動が起こり、これにより星の自転軸と惑星の軌道公転軸のなす角度 λ を推定する事が出来る
- すばるHDSを含む多くの分光観測により、ロシター効果はこれまで30個程度の系で測定されている
 - ➔ たいていの系では $\lambda \sim 0^\circ$ だが、最近 λ が大きな系が数多く見つかっている
- λ から実際の3次元角 ψ の推定には星の自転傾斜角 i_s が必要であるが、星の微分回転やスペクトル型と自転速度の経験的な関係を用いることである程度 i_s が推定可能となる
- トランジット惑星系の**継続的な観測**は、惑星の形成・進化に関する理論を検証することができ、系外惑星の観測において特に重要である