

星・惑星系の軌道傾斜角分布: 概要と最近の数値計算

平野 信吾

参考文献

[数値計算]

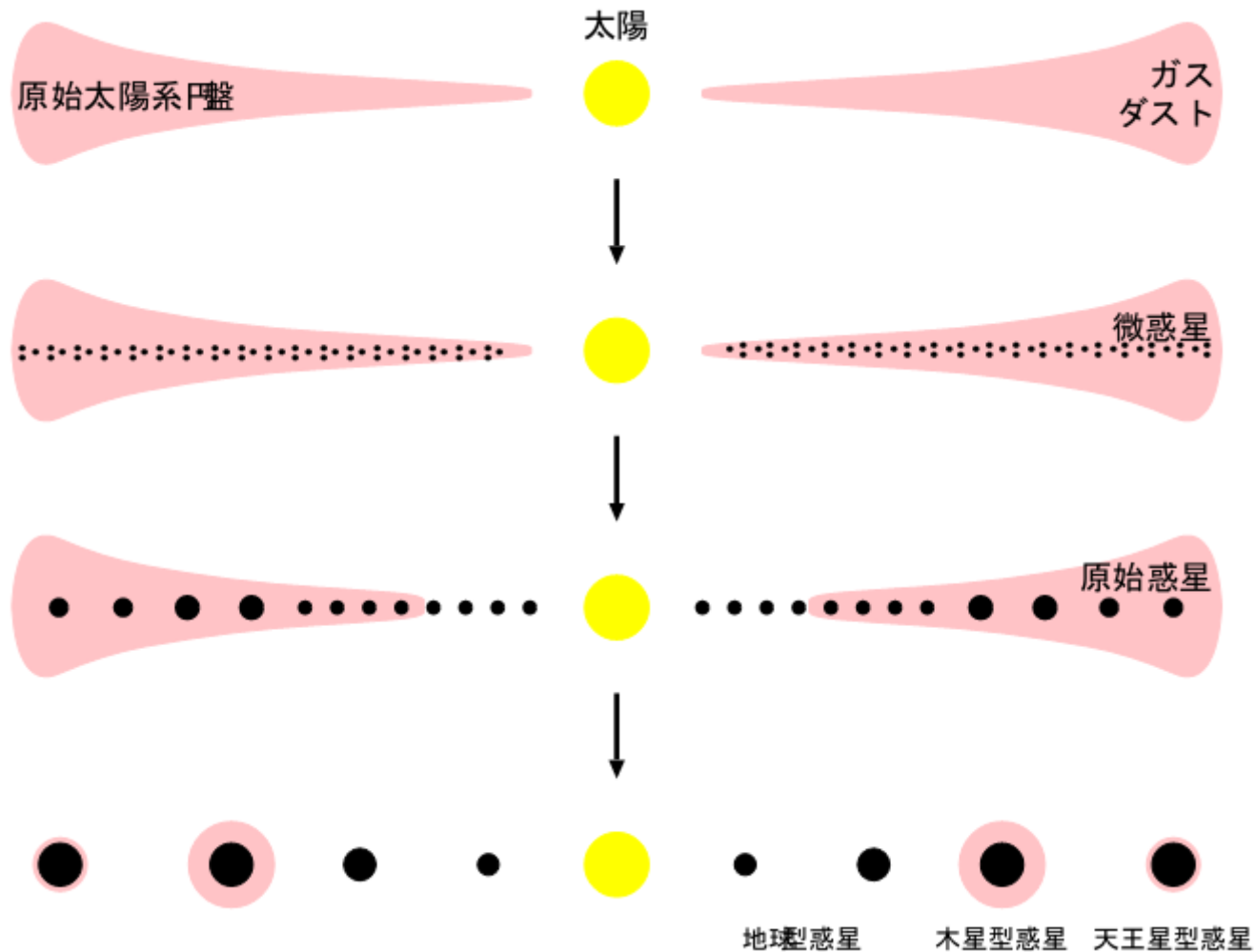
- Bate et al. (2010) <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010MNRAS.401.1505B>
... “Chaotic star formation and the alignment of stellar rotation
with disc and planetary orbital axes”
- Fielding et al. (2015) <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015MNRAS.450.3306F>
... “The turbulent origin of spin-orbit misalignment in planetary systems”
- Spalding et al. (2014) <http://adsabs.harvard.edu/abs/2014ApJ...797L..29S>
... “Alignment of Protostars and Circumstellar Disks during the Embedded Phase”

[観測]

- Winn et al. (2010) <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010ApJ...718L.145W>
... “Hot Stars with Hot Jupiters Have High Obliquities”
- Walkowicz & Basri (2013) <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013MNRAS.436.1883W>
... “Rotation periods, variability properties and ages for Kepler exoplanet candidate host stars”
- McQuillan et al. (2013) <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013ApJ...775L..11M>
... “Stellar Rotation Periods of the Kepler Objects of Interest:
A Dearth of Close-in Planets around Fast Rotators”

星形成 → 惑星形成

“京都モデル”で太陽系形成過程を説明できた



系外惑星系

ペガサス座51伴星bの発見 (1995; ドップラーシフト法)

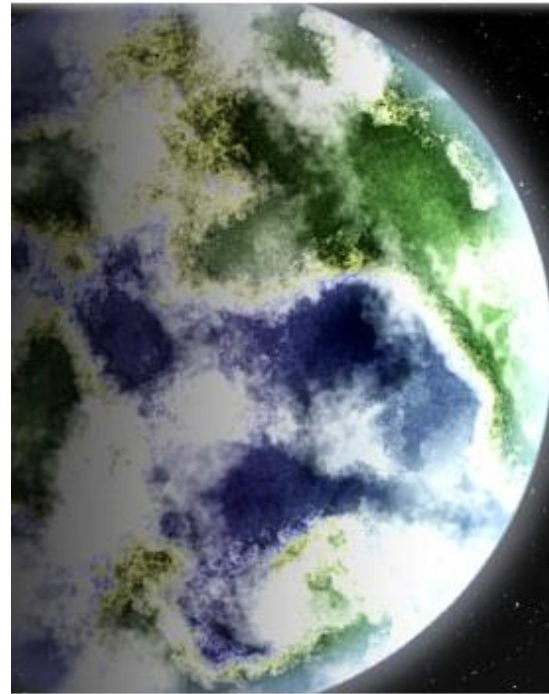
→ その後の観測 (Kepler等) によりサンプル増加

→ 太陽系は1サンプルでしかないことが判明

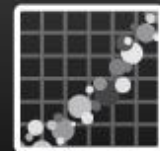
- Hot Jupiter … 軌道長半径 (a) が極端に小さい巨大惑星
- Eccentric Planet … 軌道離心率 (e) が非常に大きな惑星

太陽系形成を説明する“京都モデル”では説明できない

→ 多様性の起源は何か, 太陽系形成論を(一般)惑星系形成論に



Table



Plots

1540**EOD Planets**

Planets with good orbits listed in the Exoplanet Orbit Database

24**Other Planets**

Including microlensing and imaged planets

1564**Total Confirmed
Planets****3771****Unconfirmed Kepler
Candidates****5335****Total Planets**

Confirmed planets + Kepler Candidates

The Exoplanet Data Explorer is an interactive table and plotter for exploring and displaying data from the Exoplanet Orbit Database. The Exoplanet Orbit Database is a carefully constructed compilation of quality, spectroscopic orbital parameters of exoplanets orbiting normal stars from the peer-reviewed literature, and updates the Catalog of nearby exoplanets.

A detailed description of the Exoplanet Orbit Database and Explorers is published [here](#) and is available on [astro-ph](#).

In addition to the Exoplanet Data Explorer, we have also provided the entire Exoplanet Orbit Database in CSV format for a quick and convenient download [here](#). A list of all archived CSVs is available [here](#).

Help and documentation for the Exoplanet Data Explorer is available [here](#). A FAQ and overview of our methodology is [here](#), including answers to the questions "Why isn't my favorite planet/datum in the EOD?" and "Why does site X list more planets than this one?".

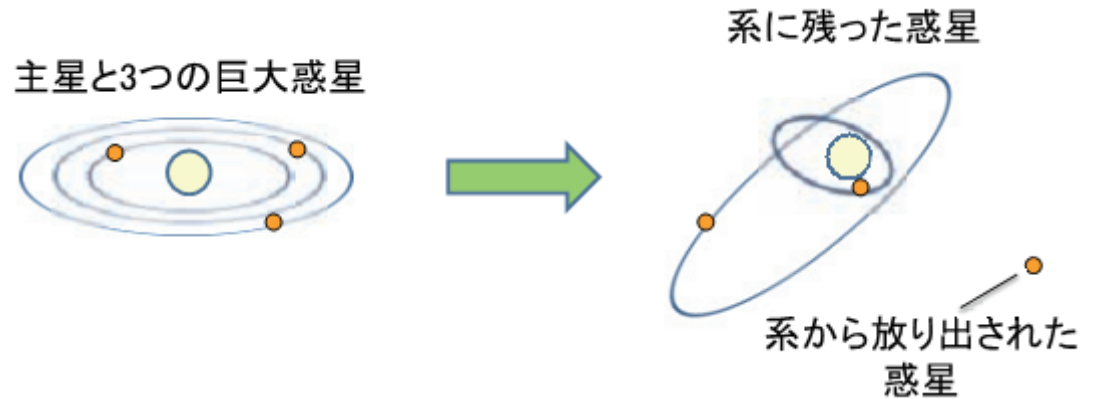
軌道進化理論

円盤相互作用モデル (Type-1, -2 migration)

→ $\{a \downarrow, e=0, \psi=0\}$

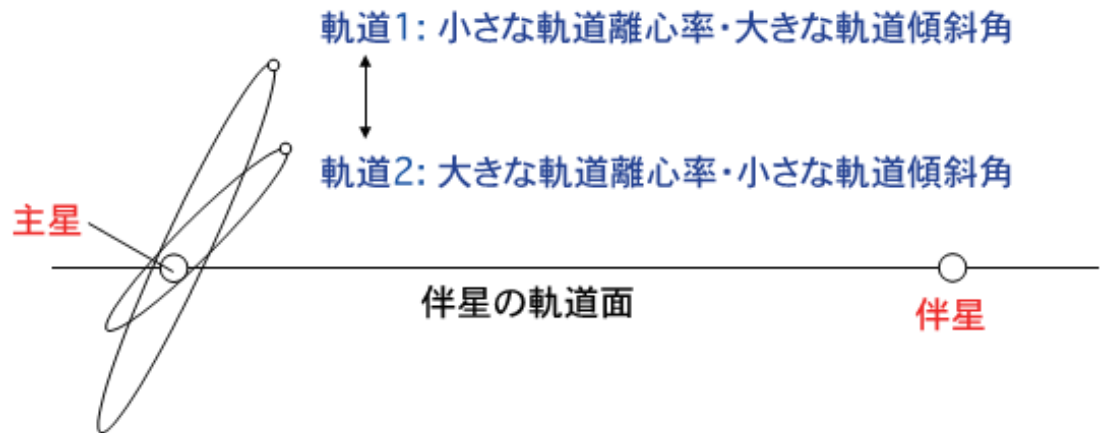
惑星散乱モデル

→ $\{a \downarrow, e \uparrow, \psi \text{大}\}$



古在移動モデル

→ $\{a \downarrow, e \uparrow, \psi \text{大}\}$



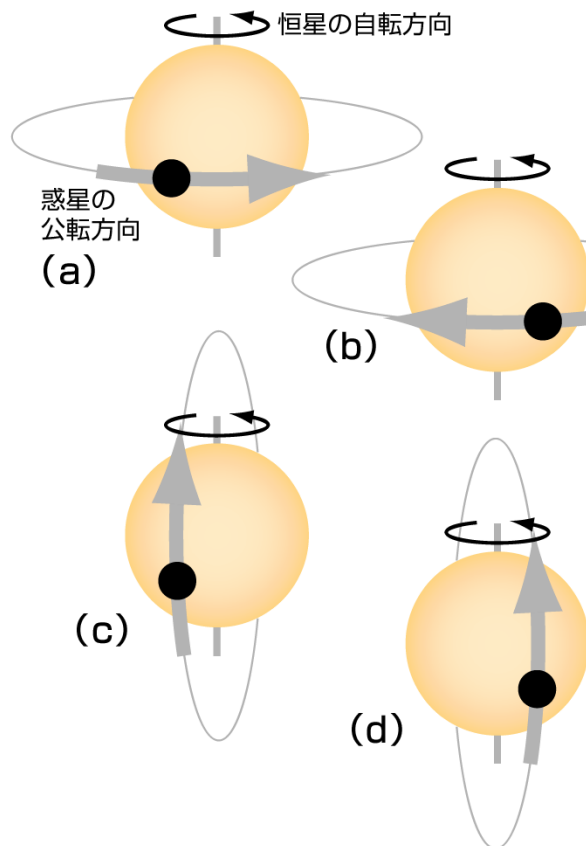
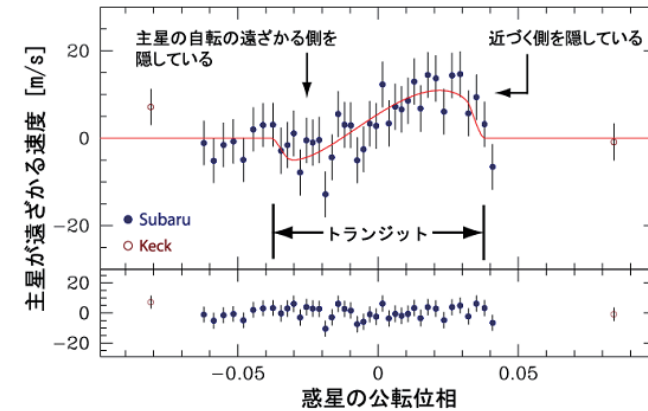
軌道傾斜角(ψ)の決定: ロシター効果

軌道傾斜角は長らく測定されてこなかった

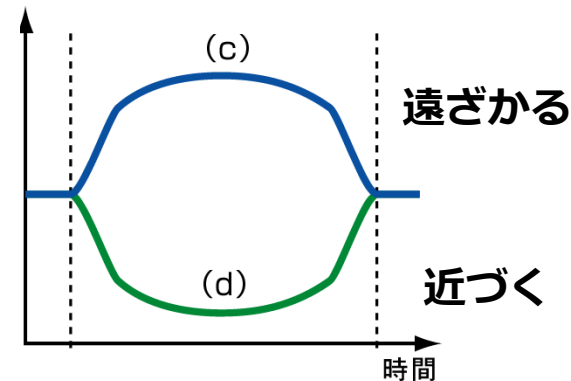
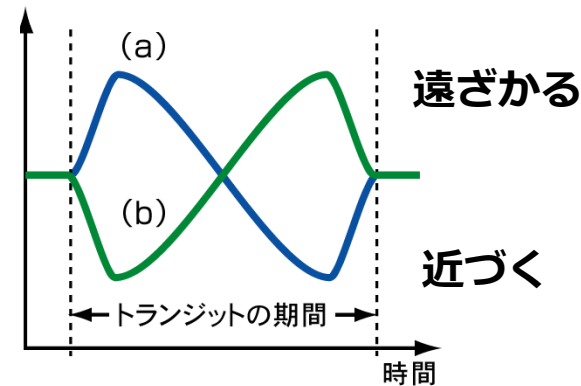
→ ロシター(・マクローリン)効果を用いて決定

→ 逆行する星・惑星系も確認

(e.g., Narita et al. 2009)

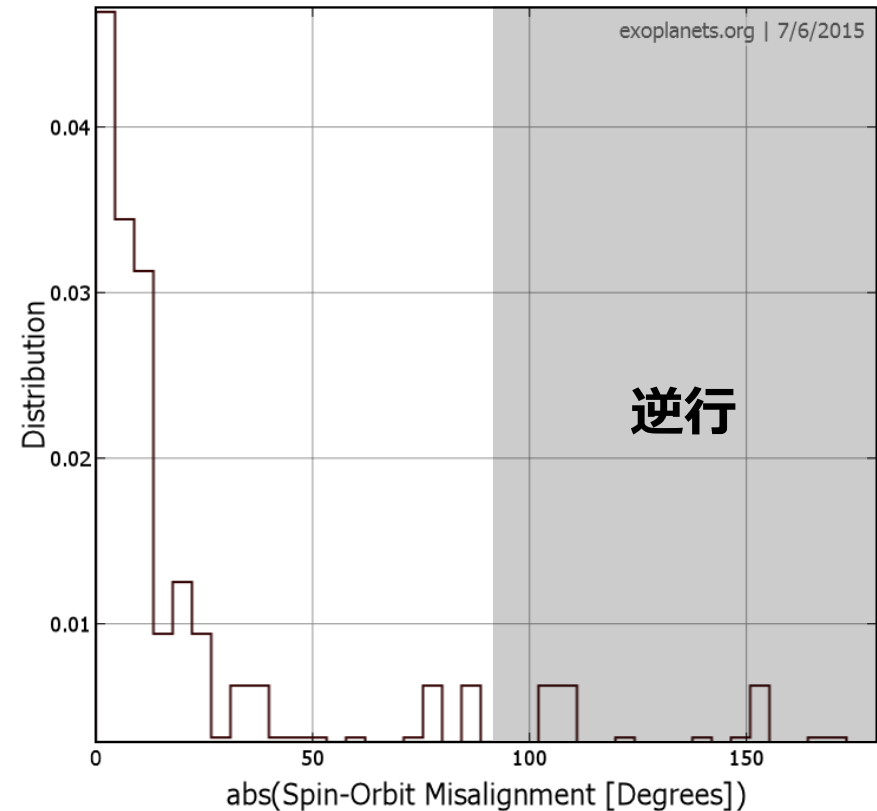
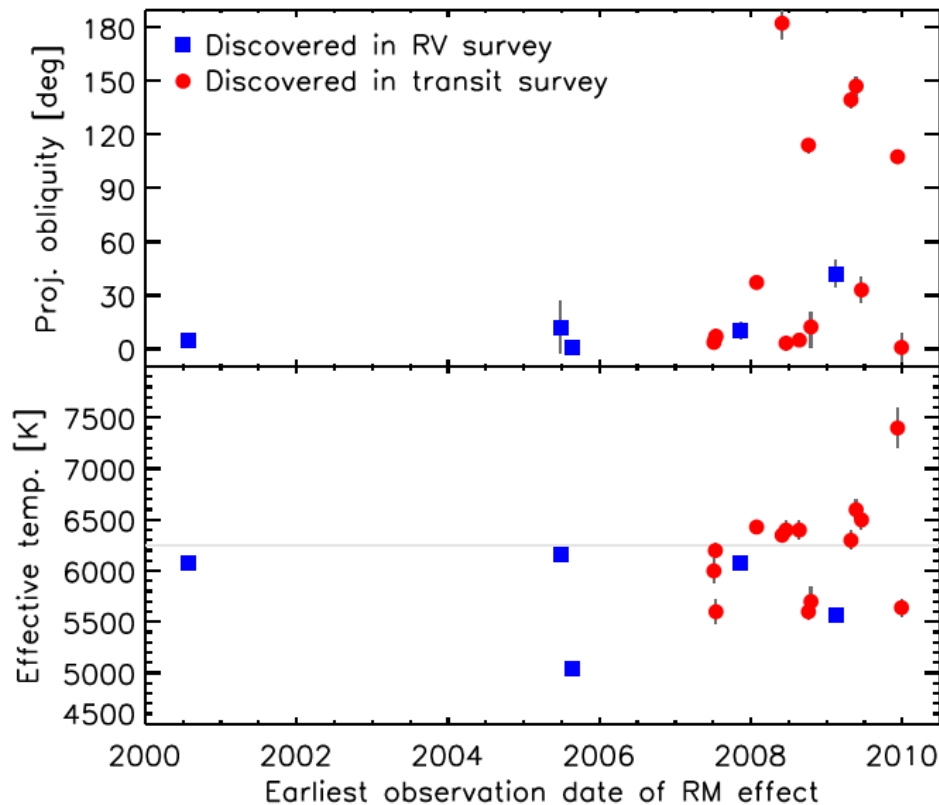


恒星の見かけの速度



軌道傾斜角分布の“発見”

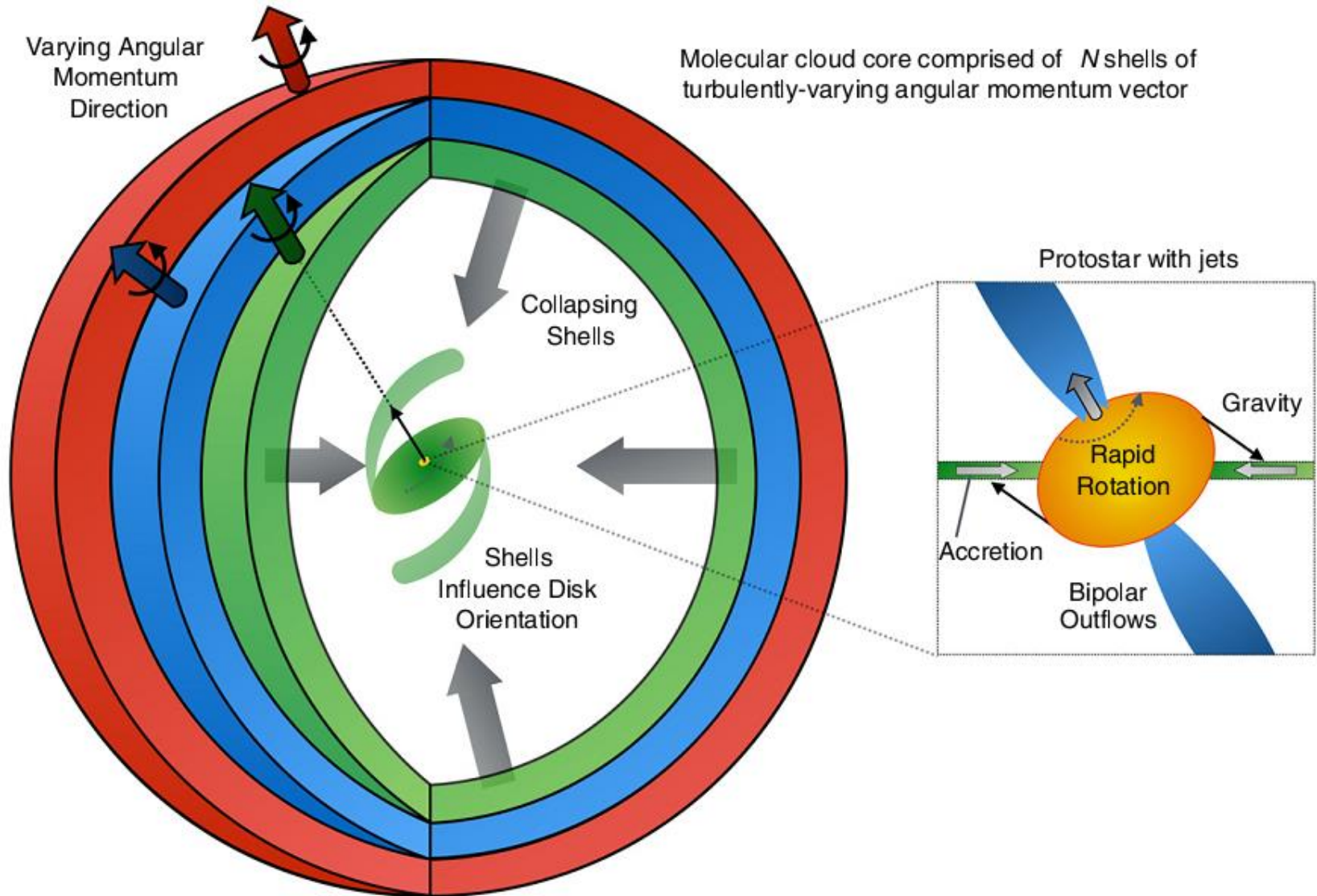
主星自転と惑星公転の軌道傾斜角は必ずしもゼロではない



- 円盤相互作用モデルでは大きな ψ を実現できない
- 惑星散乱・古在移動モデルでは $\psi=0$ 度のまわりにピークは出来ない
- ➔ 単一モデルでは説明できない (新たな理論モデルの必要性)

Primordial origin

“a mechanism for spin-orbit misalignment in hot Jupiters in isolation”



Bate et al. (2010) : 計算設定

原始星への質量・角運動量降着を調べる (円盤内部に注目)

- 原始星コア(sink粒子)へのガス降着を数値シミュレーション
- sink粒子内での降着円盤から中心星へのガス降着をモデル化
- 主星と円盤の回転軸方向の時間発展

円盤回転軸を求める際, 円盤最内部の角運動量ベクトルを用いた

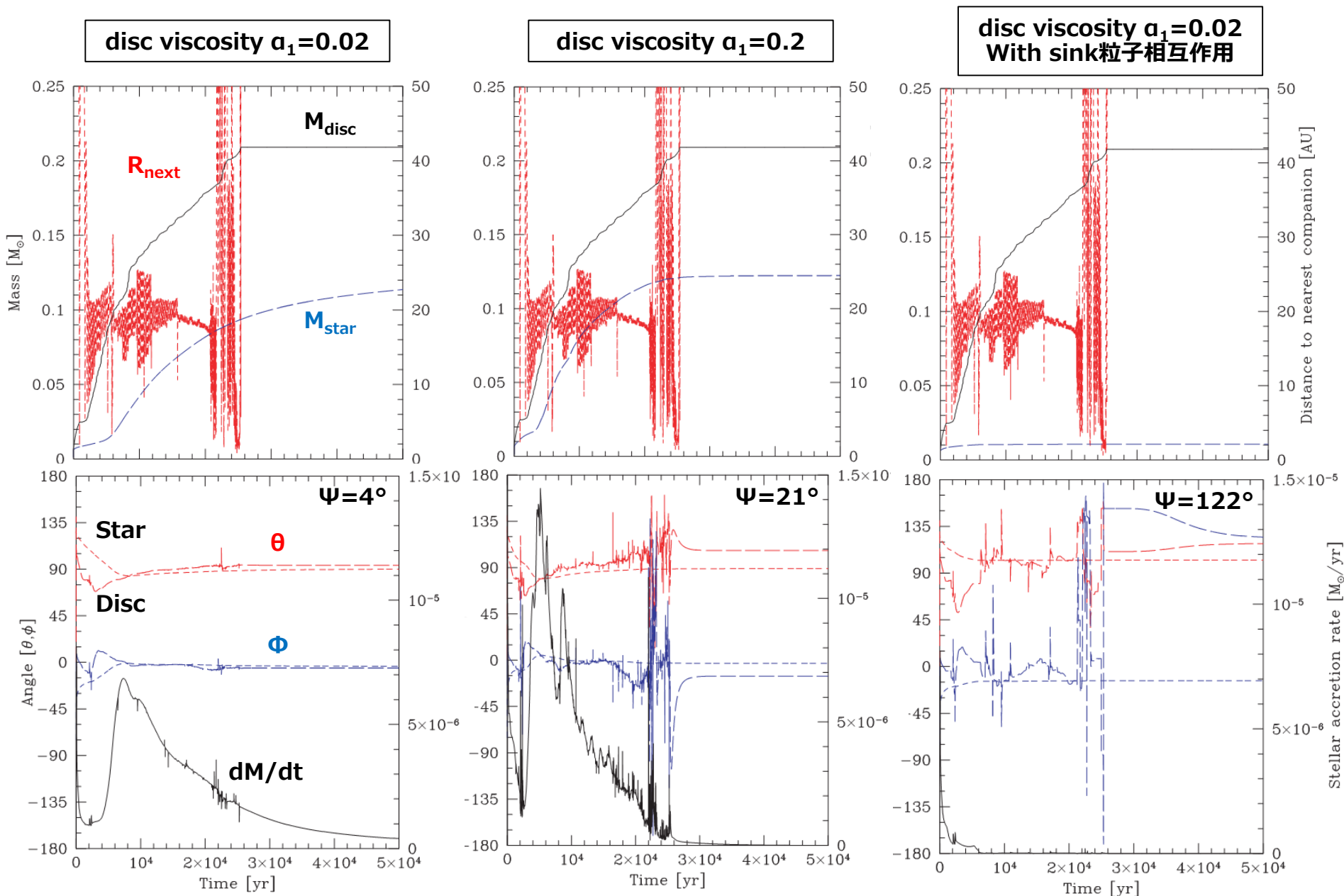
- 降着中は, これが降着ジェット方向になり得る
- 降着終了時の円盤全体の回転方向をよく表す

[注意]

本計算では, 惑星形成時の主星回転速度への影響は無視している

- 主星と星周円盤の磁気凍結

Bate et al. (2010) : 計算結果



Bate et al. (2010) : 議論

主星の表面回転軸は総角運動量に対応するか

- 星が完全対流の場合, 表面回転軸はよく対応
- 角運動量降着は非軸対称なため, 星内部の速度場は複雑になる
- 更に, 主星が $0.4[M_{\odot}]$ 以上になるとコアが輻射層となり, 対流層と切り離される (形成時の回転方向を記憶する)

降着角運動量が多い(=降着半径が大きい)場合, 円盤での散逸によって降着は滑らかに進み, 角度変化も穏やか [計算1]

- 逆の場合, 円盤方向は急激に変化する [計算3]
- 降着ジェットが様々な方向を向くと, 降着を阻害する

回転軸の不一致は, 円盤から切り離された時に決まる

- 惑星系形成には円盤に十分な質量が必要
(そのような大質量円盤は, 軌道傾斜角を作れないのでは?)

Fielding et al. (2015) : 計算設定

Bate et al.の後継

→ hydrodynamicとmagnetohydrodynamic (一様磁場)

円盤分布を直接計算し, 周辺物質との相互作用も解く

→ **ψ 分布** を得る

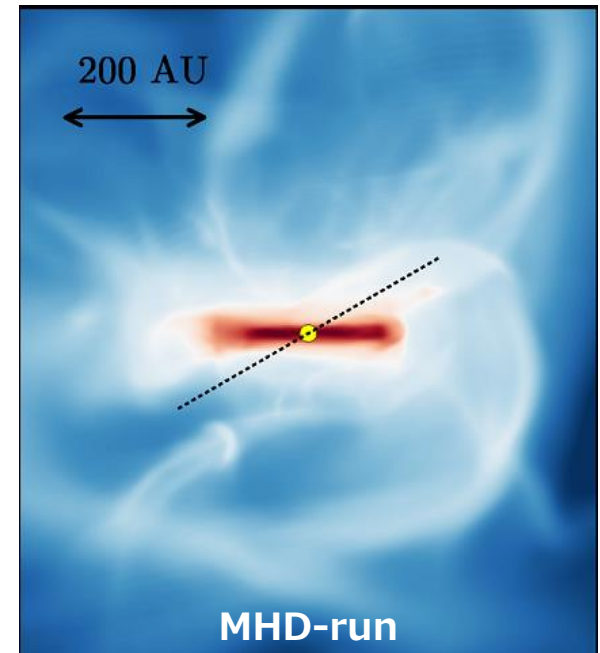
Bate et al.と異なり, 円盤外縁に注目する

→ 軌道傾斜角(分布)が一般に出現

回転軸を変えうる外部原因は無視する

(星形成ガス雲の乱流のみ考慮)

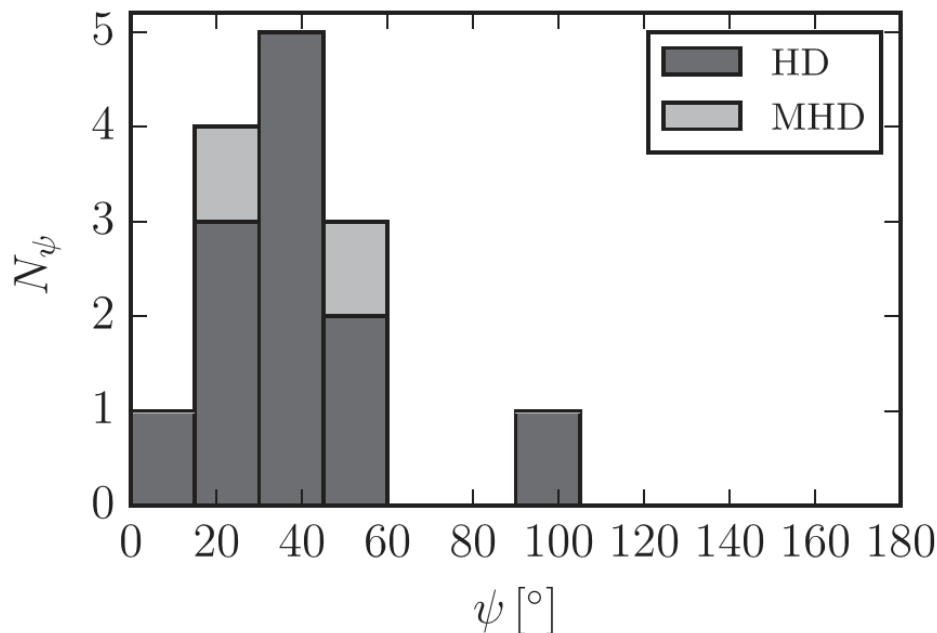
- ガス雲の非軸対称コラプス
- 原始星からの磁気トルク
- 他星接近による重力トルク



Fielding et al. (2015) : 計算結果

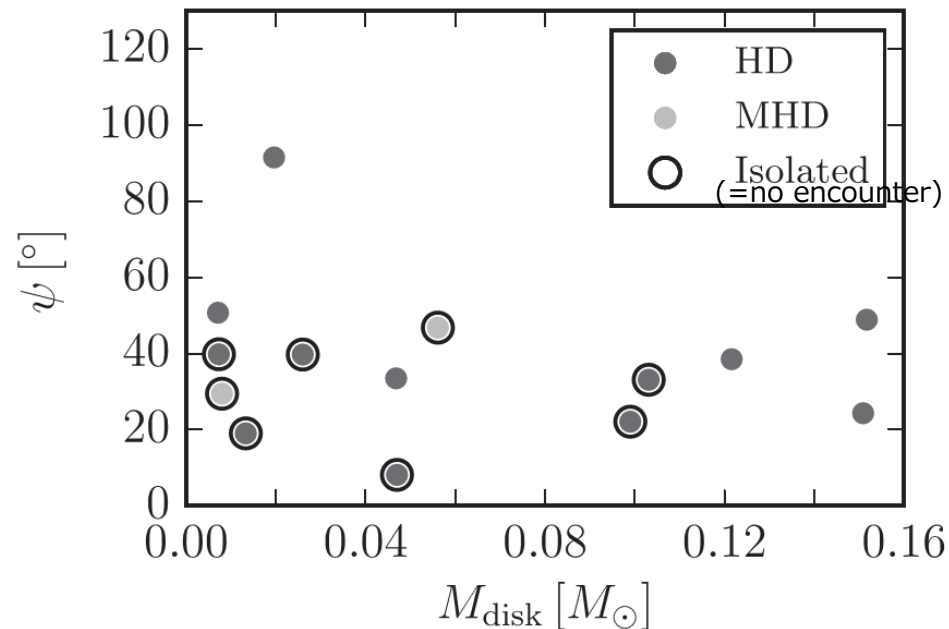
➤ 様々な軌道傾斜角

➤ Bate et al.と異なり, 大質量円盤や 接近遭遇のないケースでも大きな ψ が見られる



Name	t_f/t_{ff}	$M_{*,f}$	$N_{*,f}$	$N_{*,w/disc}$	ϵ_{ff}
MHD	0.87	1.22	5	2	0.03
HD	0.89	19.5	21	12	0.29

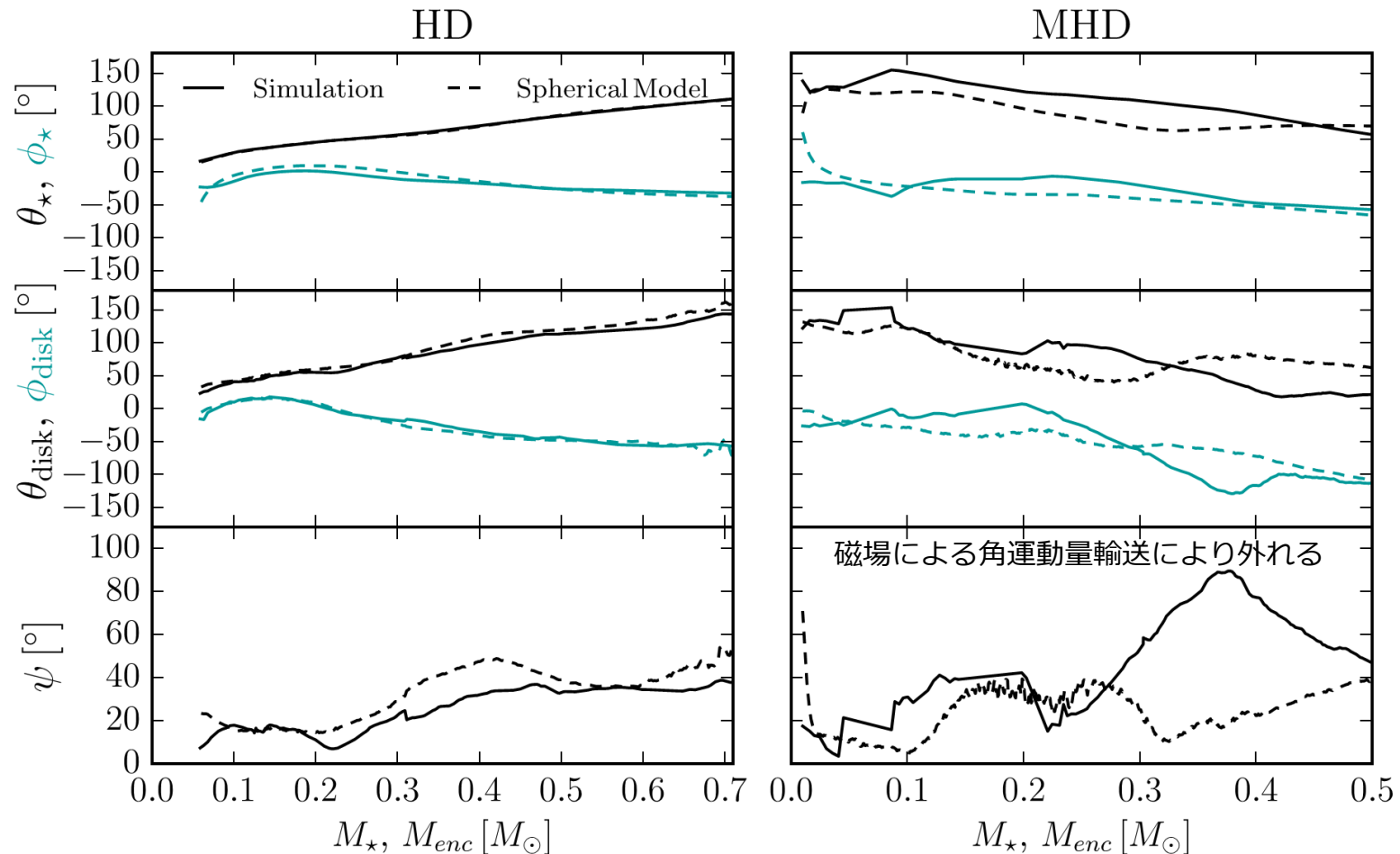
Column 2: the final simulation time divided by the free-fall time. Column 3: the total mass in stars at end of the simulation measured in $M_\odot$. Column 4: number of stars formed with mass above $0.05 M_\odot$. Column 5: number of stars with discs. Column 6: the dimensionless star formation rate (Krumholz & McKee 2005).



Fielding et al. (2015) : モデル(1)

Simple physical model : spherical model $\rightarrow \{L_{\text{star}}, L_{\text{disc}}, R_{\text{disc}}\}$

- 主星の角運動量 $\propto$ 降着ガスの総角運動量 $L_{\star}(M_{\star}) \propto L_{\text{sphere}}(M_{\text{enc}} = M_{\star})$
- 円盤の角運動量 $\propto$ 直近の獲得角運動量 $L_{\text{d}}(M_{\text{d}}) \propto L_{\text{shell}}(M_{\text{shell}} = M_{\text{d}})$

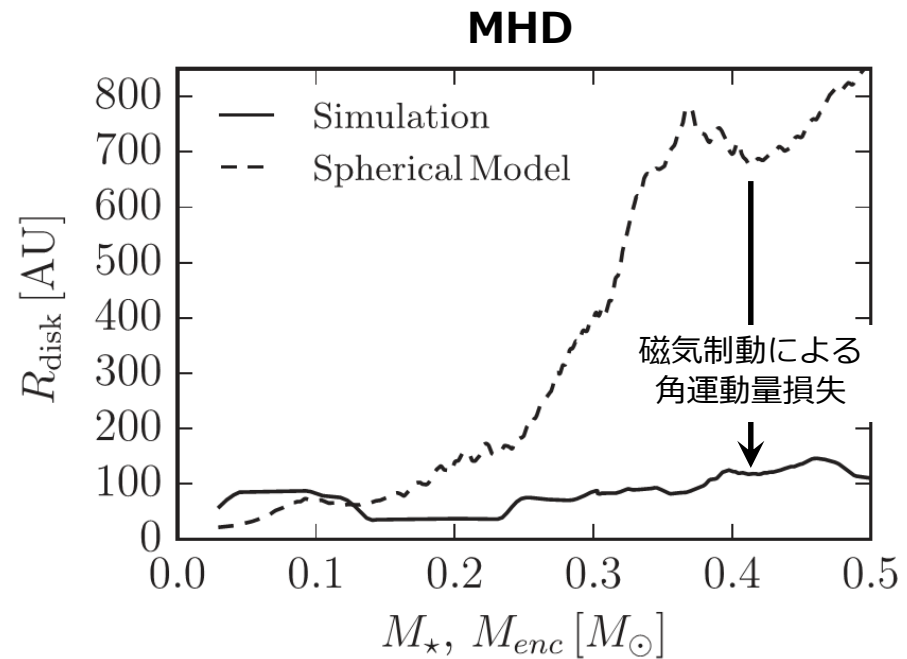
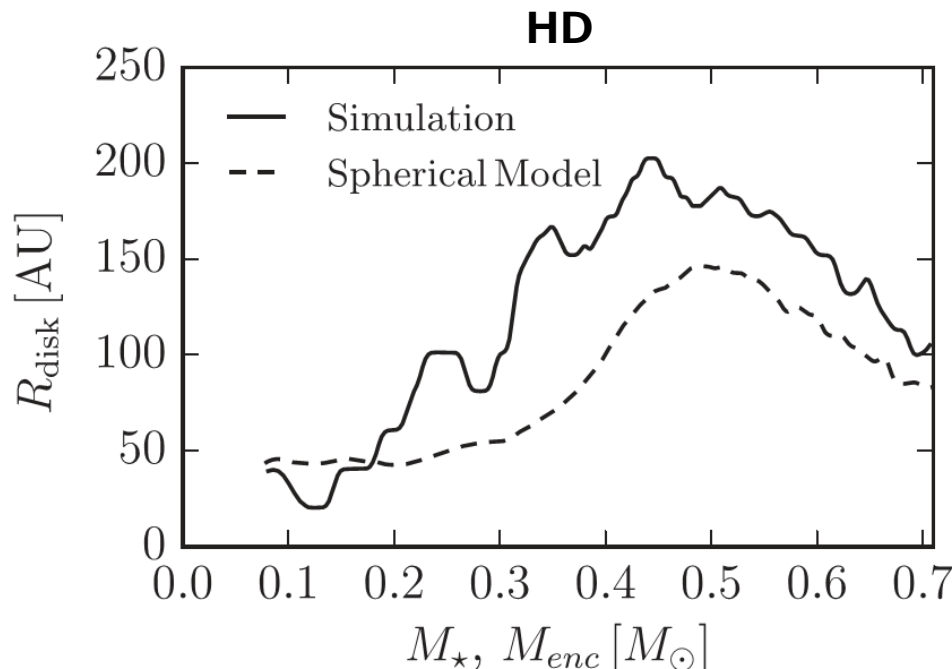


Fielding et al. (2015) : モデル(2)

Simple physical model : spherical model $\rightarrow \{L_{\text{star}}, L_{\text{disc}}, R_{\text{disc}}\}$

➤ 円盤半径を角運動量から決定

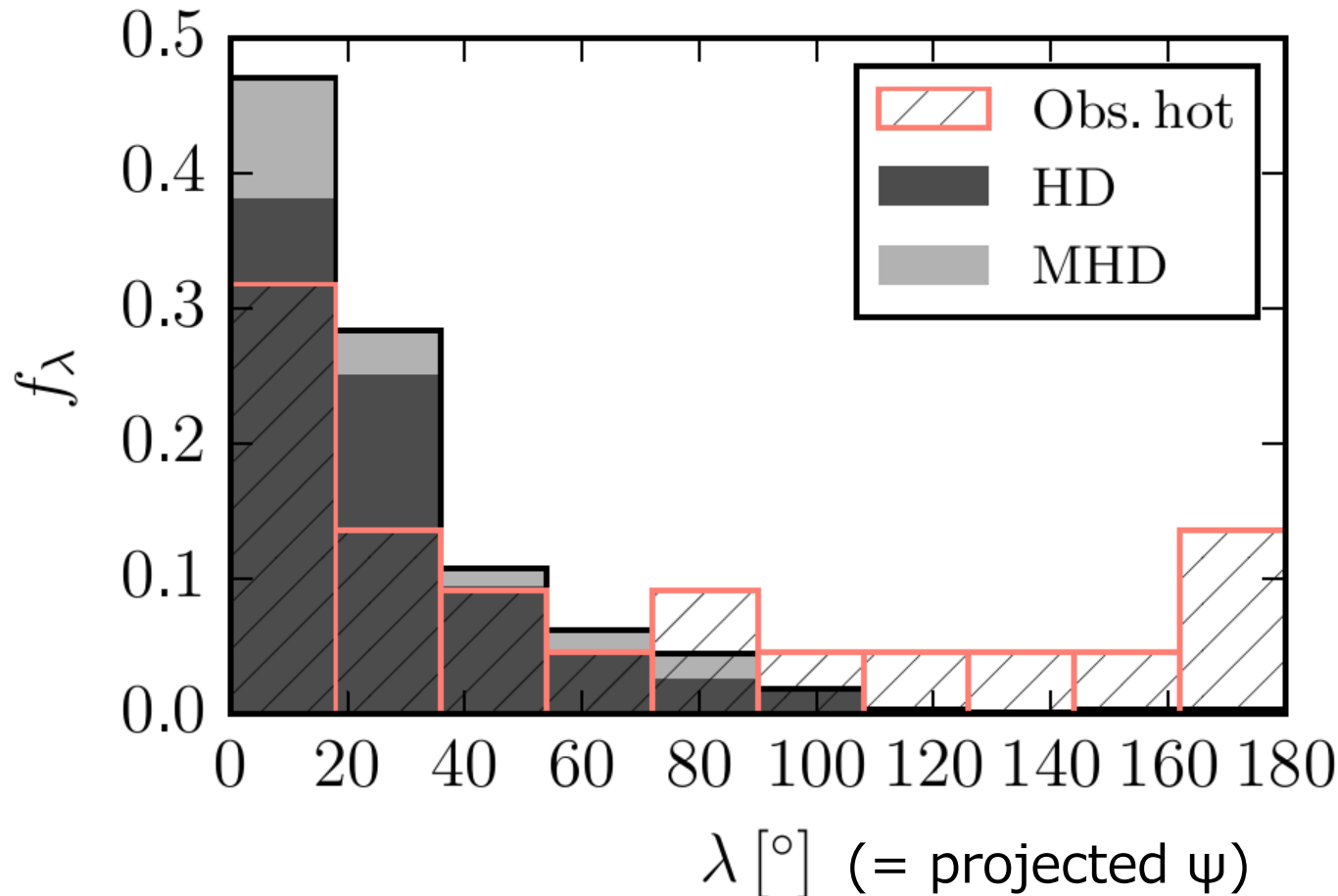
$$L_d = k M_d R_d v_{\text{Kep}} = k M_d \sqrt{GM_\star R_d} \longrightarrow R_d = \frac{L_d^2}{k^2 M_d^2 GM_\star}$$



磁場は軌道傾斜角の妨げになるわけではなく, むしろ強めることもある

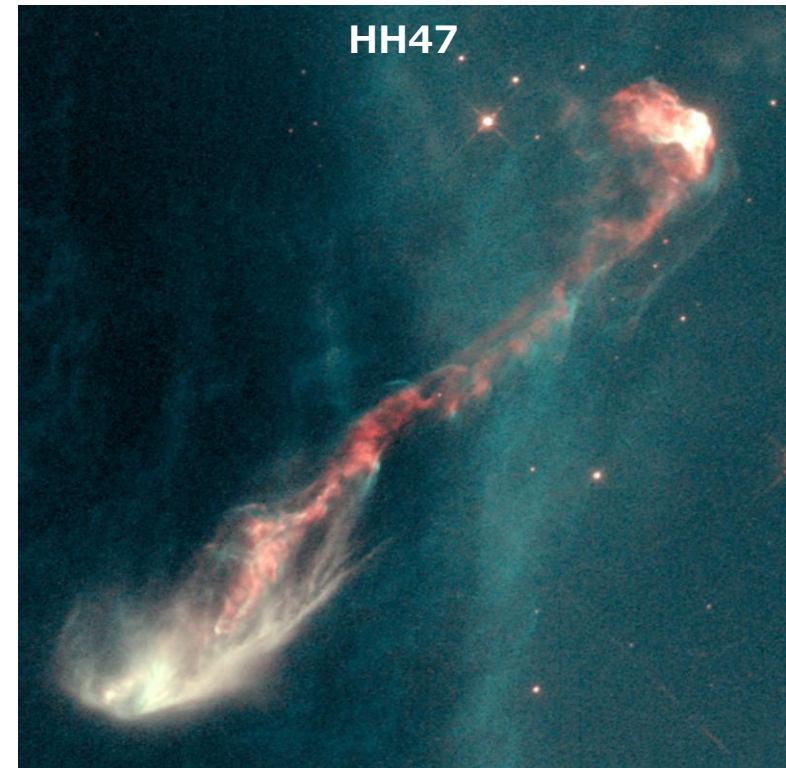
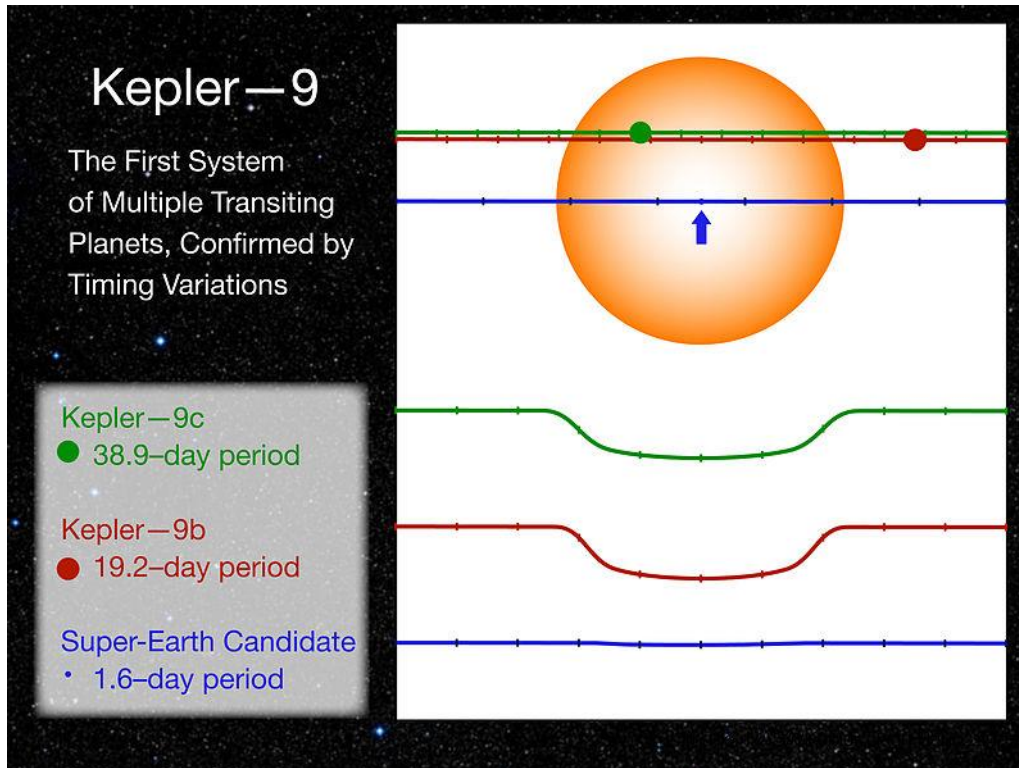
Fielding et al. (2015) : 観測比較

- [注] 今回計算したのは主星-円盤の傾斜角 $\neq$ 主星-惑星の軌道傾斜角
- 原始惑星系円盤形成時, 既に ψ 分布の元は存在する
- ➔ 円盤相互作用モデルだけでmisaligned hot Jupitersを説明可能



Primary originの観測的確認

- 同一平面上に存在する惑星sが軌道傾斜角を持つ場合 (Kepler-9)
- 原始星ジェットが原始惑星系円盤と直角ではない場合 (S字等)

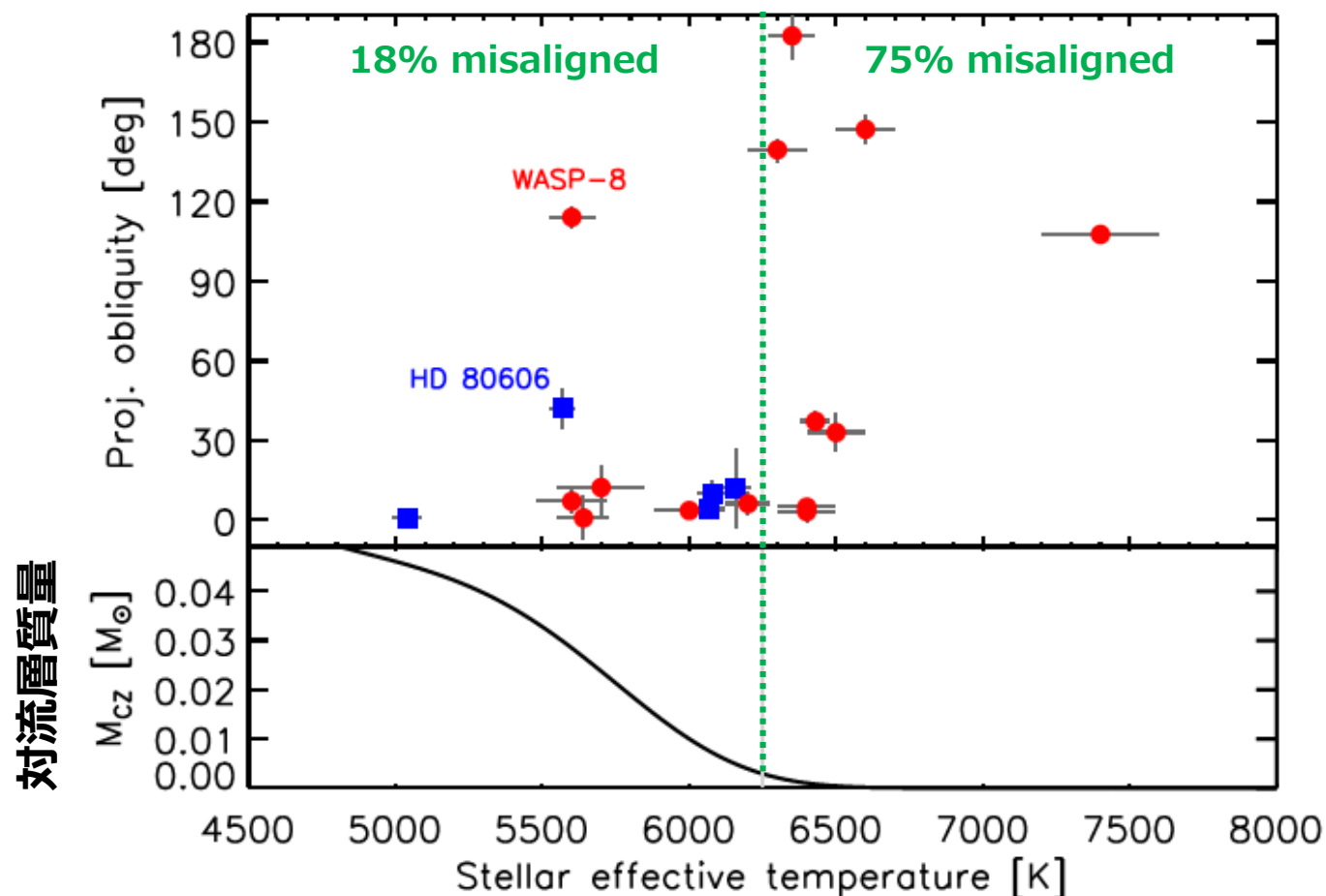


Winn et al. (2010)

主星の温度が 6250[K] 以下の場合、表面对流層が存在

→ 対流層では潮汐散逸によって自転-公転の軸が揃う

→ Ψ が減衰 (Winn+'10; Walkowicz+'13は確認できなかったと主張)



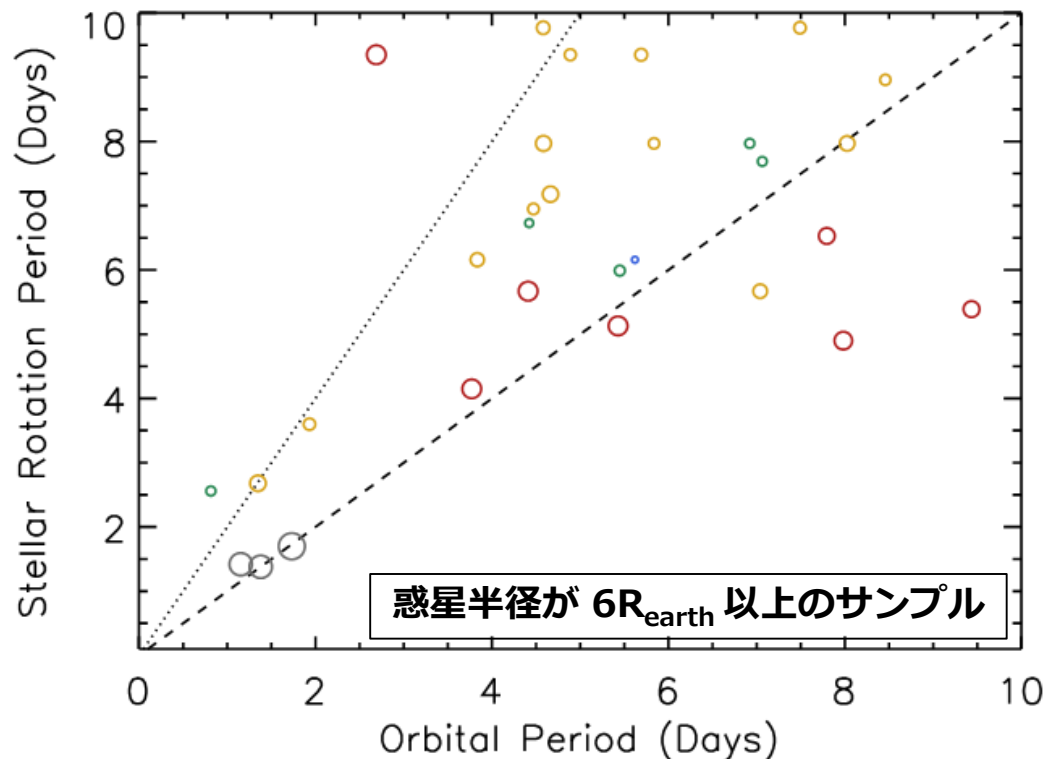
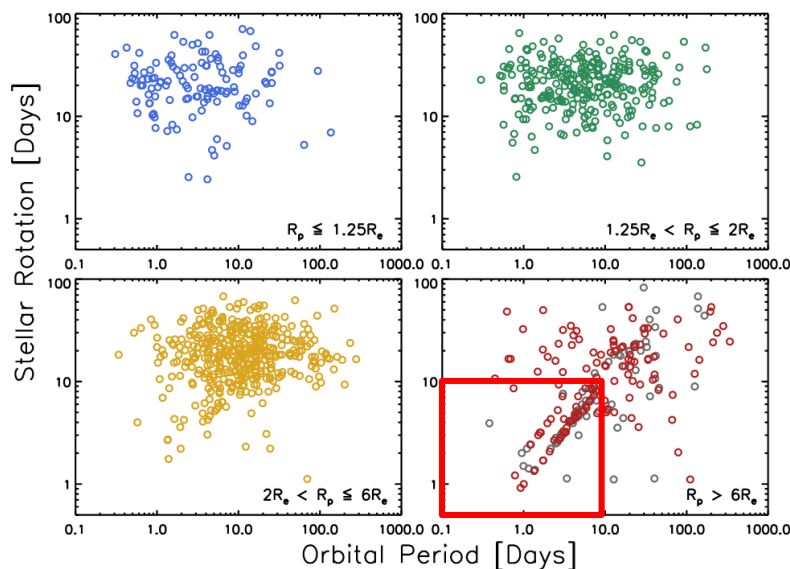
Walkowicz & Basri (2013)

Kepler-9の3 planets systemが同一平面上に存在 ($\psi=45^\circ\pm10^\circ$)

→ 原始惑星系円盤が形成された段階での星-円盤軸の傾斜が原因か

一部の近接惑星系で, 主星の回転周期 = $(1\sim2)\times$ 惑星の自転周期

→ 主星-惑星の潮汐相互作用の兆候か



McQuillan et al. (2013)

3 years Keplerを解析すると, 高速回転主星には近接惑星が存在しない

