

Asynchronous rotation of Earth-mass planets in the habitable zone of lower-mass stars

Jérémy Leconte^{1,2,3*}, Hanbo Wu^{1,4}, Kristen Menou^{2,5}, Norman Murray^{1,4}

- 金星のような厚い大気をもつ場合を除き、低質量星近傍の惑星は同期回転すると考えられてきた
- 大気が惑星の自転速度に与える影響を全球気候モデルで調べた
- 熱潮汐の効果で地球程度の薄い大気をもつ惑星も非同期回転しうる

Planets in the habitable zone of lower-mass stars are often assumed to be in a state of tidally synchronized rotation, which would considerably affect their putative habitability. Although thermal tides cause Venus to rotate retrogradely, simple scaling arguments tend to attribute this peculiarity to the massive Venusian atmosphere. Using a global climate model, we show that even a relatively thin atmosphere can drive terrestrial planets' rotation away from synchronicity. We derive a more realistic atmospheric tide model that predicts four asynchronous equilibrium spin states, two being stable, when the amplitude of the thermal tide exceeds a threshold that is met for habitable Earth-like planets with a 1 bar atmosphere around stars more massive than $\sim 0.5 - 0.7 M_{\odot}$. Thus, many recently discovered terrestrial planets could exhibit asynchronous spin-orbit rotation, even with a thin atmosphere.

背景

- ・熱潮汐は昼夜サイクルを持つ惑星の自転角速度に影響
 - 逆行する金星：同期回転状態に遷移させようとする潮汐摩擦に打ち勝つ影響力をもつ
- ・熱潮汐の振幅に対する単純スケーリング則(Chapman and Lindzen, 1970)

$$\text{振幅} \propto \frac{\text{平均地表面気圧}}{\text{スケールハイト}}$$

- 金星大気では地球大気の50倍の振幅。大気量が多いおかげで同期回転を免れた？
- スケーリング則自体の信頼性、および大気量の熱潮汐が自転に与える影響の強弱との関係性は未保証である
- ・系外惑星のハビタビリティを考えるうえで自転と公転の状態がどう決まるかを知ることは重要
 - 低質量星HZ内の系外惑星がおかれていると考えられている同期回転状態では、ハビタブル環境の保持が困難である
 - ◇ 水の局在化、大気崩壊、炭素循環の不安定化・・・

目的

- ・低質量星のHZ内に存在する比較的薄い大気をもつ地球型惑星について、熱潮汐によって非同期回転状態に保つことが可能かどうかを調べる
- ・より具体的には、恒星放射や地表面気圧をいろいろ変えて、潮汐摩擦によるトルク T_g と熱潮汐によるトルク T_a が打ち消し合い、かつ同期しないような安定な平衡解が存在するかどうかを求める

手法

- ・GCM
 - 表1の恒星放射フラックス F と地表面気圧 P_s 、大気組成を与え、様々な強制周波数 $\sigma = \omega - n$ に対し、 T_a を求めるのに必要な q_0 と ω_0 を計算

Table 1. Characteristics of the thermal tide for various types of atmospheres. Numerical values of the amplitude of the atmospheric quadrupole (q_0) and intrinsic thermal frequency of the atmosphere (ω_0) derived from the global climate model.

Sets of simulations	Model output				
	$F(W.m^{-2})$	p_s (bar)	q_0 (Pa)	ω_0 (s^{-1})	$2\pi/\omega_0$ (days)
Venus	2610	92	201	3.77×10^{-7}	193
Inner habitable zone	1366	1	1180	2.30×10^{-6}	32
		10	4050	1.46×10^{-6}	50
Outer habitable zone (N_2)	450	1	890	1.18×10^{-6}	62
		10	2960	7.17×10^{-7}	101
Outer habitable zone (CO_2)	450	10	2590	9.7×10^{-7}	70

- 軌道離心率, 自転軸傾射角はゼロ
- 地形なし. 地表アルベド 0.2. 地表熱慣性 2000 S.I.
- 放射伝達は相関 k 分布法で計算

・解析的手法

- 大気応答の σ 依存性を radiating slab モデルのアナロジーとして近似的に T_a の解析解を算出
- T_g は潮汐散逸ファクターの σ 依存性を加味した Andrade モデルと依存性を無視した Constant-Q モデルの 2 通りで算出し, 総トルク T_a+T_g を計算

結果と議論

・同じ σ で比較すると, 熱潮汐の振幅は 地球大気 > 金星大気 (Fig.1B)

- Chapman and Lindzen, 1970 (と直観) とは逆の結果. 金星大気では太陽放射の反射と吸収が強く, 地表に到達する割合が少ないことが原因

・惑星の軌道長半径 a をパラメータとして総トルクの ω/n 分布を描くと, 同期回転解のみの場合 (Fig.2A & 2D), 同期回転解+2 つの不安定な非同期回転解の場合 (Fig.2B & 2E), そして同期回転解+2 つの不安定な非同期回転解+2 つの安定な非同期回転解の場合 (Fig.2C & 2F) に分かれる

- 臨界半径 a_c より外側では, 惑星が非同期回転している可能性

・Constant-Q モデルで $F=1366\text{W/m}^2$ で, 地表面気圧 1 bar, 10 bar の場合について a_c を求めると, Fig.3 を得る

- $0.5 M_\odot$ の恒星周りの 1 bar 大気をもつ地球型惑星でも, 同期回転していない可能性がある. (10 bar なら $0.3 M_\odot$ くらいまで)
- 金星条件 (Table.1 参照) よりも非同期回転解をもつための条件が厳しくない (Fig.3, 紫の実線)

・低質量星 HZ 内の地球型系外惑星には同期回転していないものが相当数あって, そういった惑星では地球に近い気候が実現されるかもしれない

・同期回転状態では雲フィードバックにより HZ が広がる可能性が報告されている (Yang et al., 2013). これに基づけば, 本結果は低質量星の HZ を制限することになる

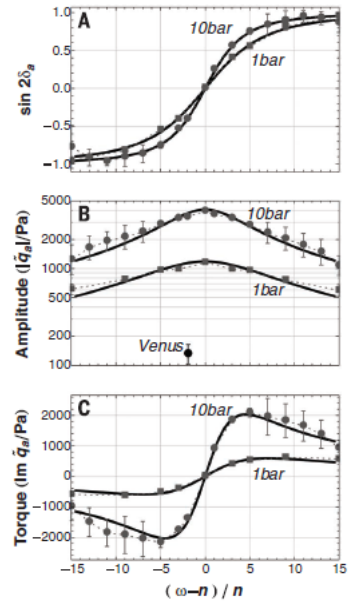


Fig. 1. Frequency dependence of the torque. (A) Sin of the lag angle ($\sin 2\delta_a$), (B) amplitude of the pressure bulge (\tilde{q}_a), and (C) torque [$\text{Im}(\tilde{q}_a)$] as a function of the forcing frequency [$(\omega - n)/n$] computed from the numerical atmospheric model (gray data points) and given by our analytical model (black curve). Results are shown for two pressures (squares, 1 bar; circles, 10 bar) in the 1366W/m^2 case with an orbital period of 225 days. The error bars show the internal variability ($\pm 1\sigma$). The Venusian tide amplitude is shown in (B). Despite its simplicity, the analytical model fairly captures the frequency dependence of the thermal tide response.

$$T_a = -\frac{3}{2}K_a b_a (2\omega - 2n)$$

$$T_g = -\frac{3}{2}K_g b_g (2\omega - 2n)$$

$$K_a \equiv (3M_* R_p^3)/(5\bar{\rho} a^3); K_g \equiv GM_*^2 R_p^5/a^6;$$

$$b_a(2\omega - 2n) = -\sqrt{\frac{10}{3\pi}} \text{Im}[\tilde{q}_a(\omega - n)]$$

$$\tilde{q}_a(\sigma) = -\frac{q_0}{1 + i\sigma/\omega_0}$$

$$T_a(\omega - n, p_s, F) = \frac{3}{2}K_a q_0(p_s, F)$$

$$\times \frac{(\omega - n)/\omega_0(p_s, F)}{1 + [(\omega - n)/\omega_0(p_s, F)]^2}$$

$$a_c = \left(\frac{10\pi}{3}\right)^{1/6} \left(GM_* \bar{\rho} R_p^2 \frac{k_2}{q_0 Q}\right)^{1/3}$$

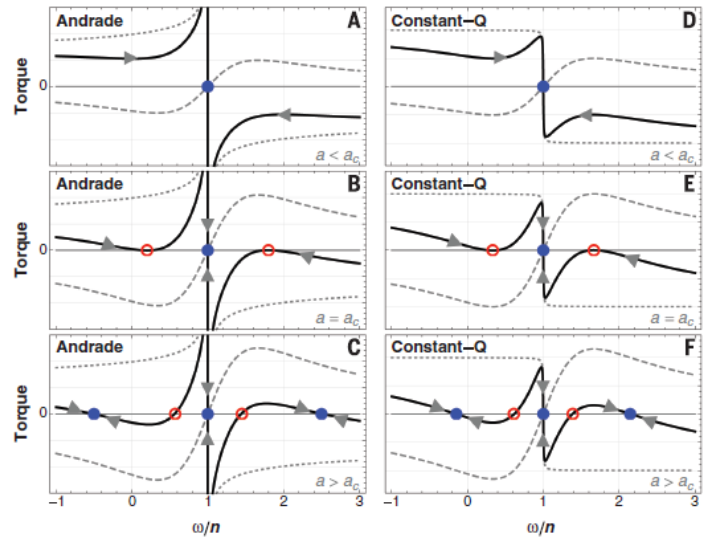


Fig. 2. Equilibrium spin states of the planet. Atmospheric (dashed), gravitational (dotted), and total (solid) torque as a function of spin rate for two tidal models, (A to C) Andrade and (D to F) Constant-Q. Arrows show the sense of spin evolution. (A) and (D) show weak atmospheric torque, only one equilibrium, and synchronous spin state exists (blue circle). (B) and (E) show the bifurcation point ($a = a_c$). In (C) and (F), the atmospheric torque is strong enough to generate four asynchronous equilibrium spin states, two being unstable (red open circles) and two being stable (blue circles; one is retrograde in the case shown). The synchronous spin state remains stable. The figure is to be compared with figure 6 of (24).

Fig. 3. Spin state of planets in the habitable zone. The blue region depicts the habitable zone (14, 25), and gray dots are detected and candidate exoplanets. Each solid black line marks the critical orbital distance (a_c) (Eq. 2) separating synchronous (left, red arrow) from asynchronous planets (right, blue arrow) for $p_s = 1$ and 10 bar (the extrapolation outside the habitable zone is shown with dotted lines). Objects in the gray area are not spun down by tides. The error bar illustrates how limits would shift when varying the dissipation inside the planet ($Q \sim 100$) (21) within an order of magnitude.

