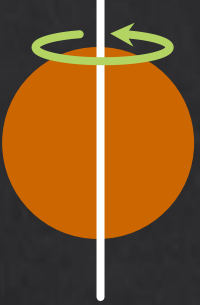


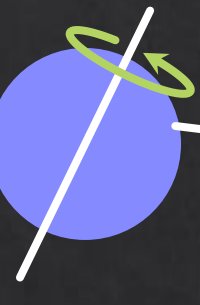
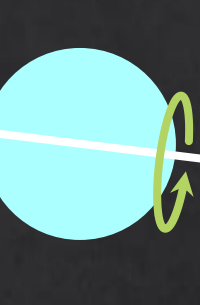



出典[1]	水	金	地	火	木	土	天	海
								
傾き	0.03°	177°	23.4°	25.2°	3.1°	26.7°	97.8°	28.3°
周期	1400 h	5800 h	23.9 h	24.6 h	9.9 h	10.7 h	17.2 h	16.1 h
特徴	金星と天王星を除いて、同じ向きに回っている。 水星と金星の周期だけ異様に長い。							

現在考えられている有カシナリオ (概要)

自転が現在の状態に至るまでの過程は、

- 惑星が誕生したときに、どのような状態にあったのか？
 - 誕生後、現在に至るまでにどのような変化をしたのか？
- の2段階に分けて考える必要がある。

地球型惑星の場合：

- 誕生時には、自転軸の向きはランダムになるようだ。
- 自転軸はカオス理論的に変化する可能性がある。4惑星それぞれが違う運命を辿って現在の状態に至っている。

木星型惑星 (& 天王星型惑星)の場合：

- 誕生時には、傾きが0°に近くなるようだ。
- 現実には、0°に近いのは木星だけ。各惑星の違いの原因を探るのが最新研究。

→次項より詳しく説明します。

全体の文脈は文献[2]と[3]のイントロダクションを大いに参考にしました。

岩石惑星形成は、

- A) 原始惑星系円盤のダスト (ミリスケール) が集まって微惑星 (キロスケール) に成長する。
- B) 微惑星が衝突を繰り返して原始惑星 (千キロスケール) を形成する。
- C) 原始惑星同士が何回か衝突 (ジャイアントインパクト) し、現在の大きさ (1万キロスケール) に至る。という段階を踏むと考えるのが主流 (e.g. [4])。

自転軸は惑星形成の最終段階 C で起きた複数の衝突の仕方によって主に決まる。どのように衝突されるかはランダムなので、自転軸はランダムに決まる。という説 [5] が現在有力。

B の段階で、後述する木星型の場合と同様の理屈で、自転軸が 0° に近づくバイアスがあるかもしれない [6] が、結局 C の段階で、大きなランダム性が生まれる。

- 地球の自転軸は、月が形成された最後のジャイアントインパクト [7] によって決まった [8]。

A) 惑星の**自転軸**は、太陽からの**潮汐力**によるトルクを受けて、コマのような**首振り運動**をしている (**歳差**, 現在の地球の場合は 2.6 万年周期)。



B) 一方で、惑星の**公転軌道**は、**他の惑星**からの重力による様々な周期の摂動を受けて、複雑に**変化**している。

Aの運動を記述する方程式にBの効果を加えると、その解(自転軸の傾き)は、1000万年から1億年のスケールで**カオス理論**的な振る舞いをする事が知られている [9]。

Bの周期のうちの一つとAの周期が偶然共鳴したときに、一定方向のトルクの効果が増幅され、自転軸の傾きが大きく変化する場合があります。

→ 現在の傾きは、誕生時の傾きとは**異なる**と考えるのが自然。

- **火星**の現在の傾きは 25° だが、過去30億年の間に 60° 程度に達していた時代があった可能性が高い [10]。
- **地球**は、大きな**月**を持ったおかげで例外的に**安定**しており、誕生時の傾きがおおよそ**維持**されてきた [8]。

月が無かったら、もっと大きく傾きが変化していただろう [11]。地球環境も違ったかもしれない。

潮汐力とは？

有限の大きさを持つ惑星の各部分は、太陽からの距離がそれぞれ異なるため、異なる重力を受ける。惑星の重心が静止する観測系では、惑星の各部分は遠心力と太陽による重力との差に相当する力を受ける。これを潮汐力と言う。海の潮汐はこの力によって駆動されている。惑星が真球ではないことと関連して、惑星は潮汐力によるトルクを受ける。

- 現在の水星は、太陽を2回公転する間に3回自転するという綺麗な関係にある。公転軌道が太陽に近いことと、極端な楕円であることに関連して、この関係は安定であり、抜け出しにくい (3:2スピン-軌道共鳴, e.g. [2])。
- 水星は誕生時には他の惑星のように速く自転していたが、太陽による潮汐力を受け、潮汐摩擦によって減速し、現在の共鳴状態に至ったと考えられている (e.g. [12])。初めの自転周期が10時間だったとしても、3億年で現在のオーダーに至るという見積もりがある [12]。

3:2スピン-軌道共鳴とは？

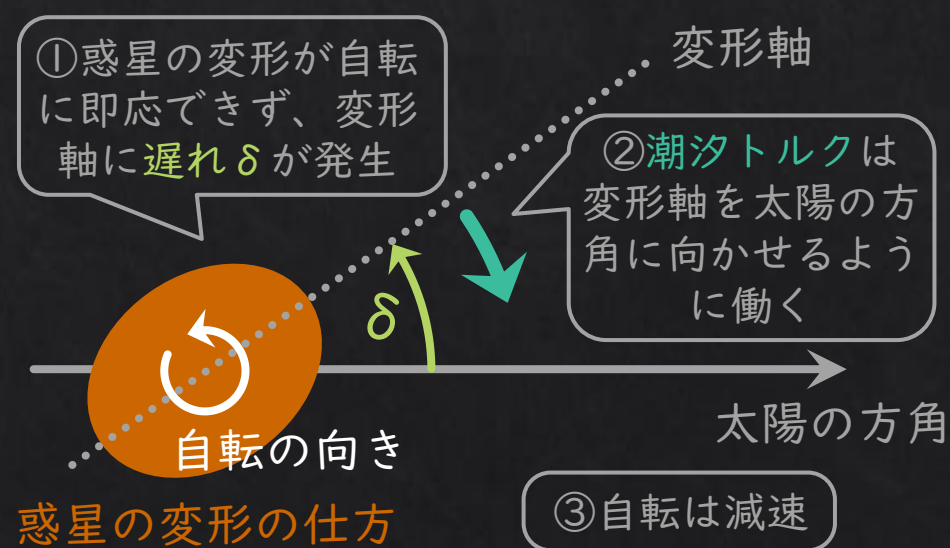
惑星は、自転軸の傾きがゼロで、長軸 (※) が太陽の方を向いているときに、太陽からの潮汐トルクを受けない。楕円公転軌道の近日点では、太陽からの潮汐力が強くなる。この時期に太陽に長軸を向けるような自転が安定する。3:2共鳴では、1公転ごとに1.5自転する (3回翻る) ことで、それを実現している。※慣性モーメントがいちばん小さくなるような軸のこと。

潮汐摩擦とは？

太陽から潮汐力を受けると、惑星は太陽の方向に引き伸ばされる。自転とともに太陽を向く面が移り変わると、惑星は変形し、それに伴って摩擦が発生する。その結果、惑星の回転エネルギーの一部は熱エネルギーに変換される。つまり、自転は減速する (e.g. [13])。

月の自転は、地球からの潮汐力に伴う潮汐摩擦で減速した結果、現在は常に地球に対して同じ面を向けている (潮汐ロック)。水星が太陽に対して潮汐ロックされていない理由は、上述のように、公転軌道が楕円であるために、他の安定状態に落ち着いたから。詳しくは次項で述べるが、金星も同じく潮汐摩擦の影響を受けてきた。金星の場合は厚い大気を持つことと関連して、潮汐ロックを免れていると考えられている。

自転の減速のトルクの観点での説明



- 金星も、太陽からの潮汐力に伴う潮汐摩擦や、金属核とマントルの間の摩擦によって減速し、傾きも垂直(ただし、 180°)に近くなった [14]。

180° への近づき方には、傾きが直に 180° に変化していくパターンと、傾きが 0° に近づいて一度止まり、逆向きに自転を始めるパターンがあるが、どちらの可能性も残されている [14]。

水星ほど太陽に近くないので、潮汐力は弱い。よって、45億年以内に現在の値まで減速するには、誕生時の周期が3日以上でなければならないという見積もりがある [14]。

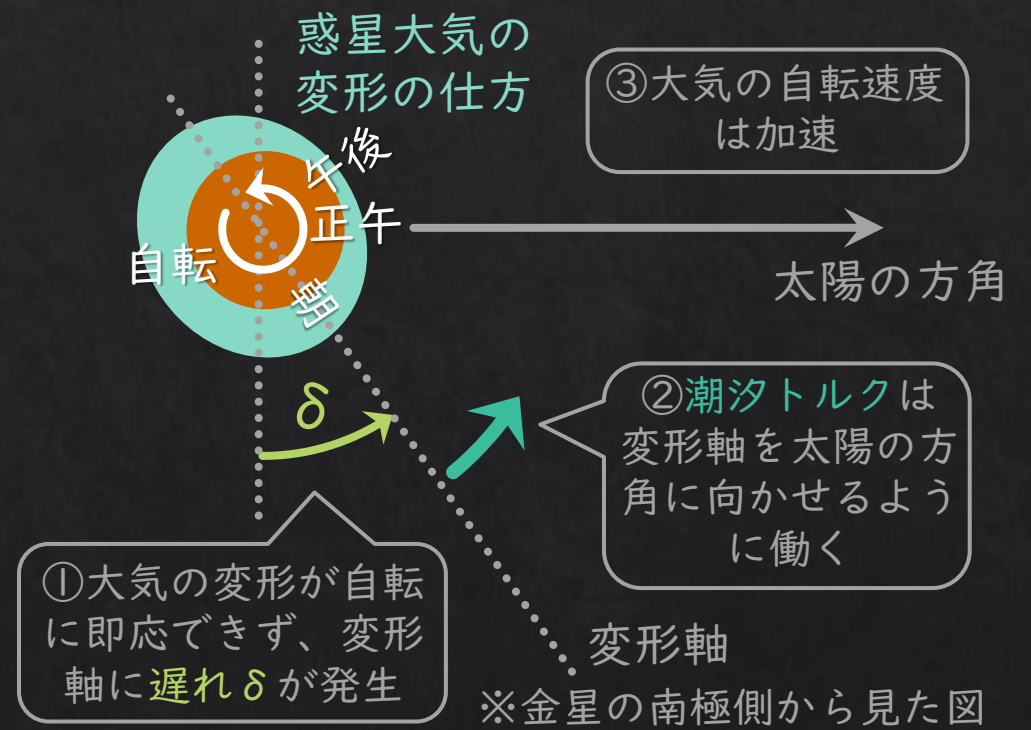
- 金星の特徴は、厚い大気を持つこと。現在は、潮汐摩擦による減速トルクと、大気の熱潮汐による加速トルクが釣り合うような自転周期にあるのかもしれない [15]。

熱潮汐とは？

太陽側の惑星大気は温められて膨張、高圧になり、一部は夜側に逃げる。その結果、いちばん温められている午後の地域の気と、まだ温められていない朝の地域の気との間に、質量のアンバランスが生まれる。これを熱潮汐と言う。太陽が変形した大気に及ぼす潮汐トルクは、大気の自転を加速させる向きに働く。

金星の大気は、固体部分より速く自転している(スーパーローテーション, e.g. [16])。速いところでは、地表の50倍ほどの角速度を持つ。熱潮汐はこの現象の要因のひとつであると考えられている。そうして金星に加えられた角運動量の一部は、地表での摩擦を通じて固体部分にも伝わり、固体部分に働く減速トルクと釣り合っているのだろうと考えられている [15][17]。

加速トルクが働くことの説明



日本の金星探査機『あかつき』が活躍している。

- これらの惑星は、先にできた氷や岩石の核に、原始惑星系円盤の**ガスが降り積もること**でできたと考えるのが標準的 (e.g. [4])。先に核を作る必要はないとする説もある (e.g. [18])。

誕生時の自転は、このときの**降り積もり方**によって決まる。自転軸の傾きは **0° に近くなる** (順回転になる, [19])。

惑星の静止系で考えると、原始惑星のヒル圏 (※) に侵入したガスは、コリオリ力を受け、まるで北半球の台風のようにして、順回転の流れを作りながら惑星に補足される [20]。

※太陽の潮汐力よりも惑星の重力の方が大きい領域。

- 素朴な流体力学シミュレーションでは、現在観測される**周期**よりずっと短い周期の**(速い)** 自転が得られてしまう [19]。現実の2惑星がなぜ遅いのかはまだ謎 (e.g. [21])。2惑星の周期は似ている。他の原始惑星系を観測するに、巨大惑星の形成過程において自転を遅くする未発見の機構がありそう? [22]
- 2惑星の**傾き**も、歳差周期と他の惑星からの摂動周期の共鳴によって**変化してきた**可能性がある。現在の傾きの観測値は、**惑星移動モデル**に制約を与える (e.g. [23])。

惑星移動とは？

惑星の公転軌道半径は、原始惑星系円盤のダストや微惑星、あるいは他の惑星との相互作用などによって、大きく変化し得る (e.g. [4])。太陽系の巨大惑星とは全然違う大きさの軌道にある系外惑星が続々と見つかっているが、それらを説明するために、惑星移動の理論は発展してきた [24]。

太陽系でも、巨大惑星は現在より太陽に近い軌道で形成を始め、他の惑星に影響を及ぼしながら大移動し、現在の軌道に至ったとする説が有力になりつつある (cf. ニースモデル [25], グランド・タックモデル [26])。これらのモデルは、カイパーベルトの構造、隕石重爆撃期の原因、火星が小さい問題、小惑星帯の形成、地球の水の起源などの問題を解決する可能性を持つ。

- 天王星型惑星も、木星型と同じように、岩石や氷の核にガスが降り積もってできたと考えられているが、分からないことも多い。

2惑星は木星型惑星に比べると小さい。なぜ木星型惑星並みの大きさまで成長しなかったのかは、まだよく分かっていない [27]。

→ 形成時の自転軸の傾きは、木星型のように 0° に近かっただろう。

- 天王星の大きな傾きが、惑星形成後期のジャイアントインパクトによってもたらされた可能性がこれまで調べられてきた (e.g. [28]) が、まだ分からないことも多い。

衝突相手は少なくとも地球レベルの大きさだったと見積もられるが、果たしてそんな原始惑星が近くに存在したのか？天王星と海王星が違う衝突を経験したのなら、2惑星の周期が似ているのは単なる偶然か？観測されるような天王星の衛星群は衝突で形成され得るのか？などの指摘がある [29]。

歳差と摂動の共鳴による変化も考慮した研究も現れ始めている [29] が、まだ結論には至っていない。

- 全惑星に共通するような単純なシナリオがあるわけではない。各惑星は個性があり、それぞれ複雑な過程を経て現在に至る。
- 現在の惑星たちは、整然とケプラー運動と自転をしているように見えるが、億年の長い目で見ると、その運動の様子はダイナミックに変化するようだ。
- まだ分からないこともあるが、分かってきたことも多い。多くはコンピュータシミュレーションを用いた研究である。
- まじめに考えるには、剛体力学、解析力学、摂動論、流体力学などの知識が必要になる。これらの知識を応用・実践できる研究領域。
- 観測手法の説明はできなかったが、そもそも各惑星の現在の自転の様子が分かっているのがすごい。
- 今や、夜空に浮かぶ惑星系や原始惑星系を観測し、太陽系と比較できる時代なので、新しい知見が得られることが期待される。
- Google先生やNASA/ADS先生などのおかげで、昔に比べたら格段に調べやすくなっているのだろうが、過去の研究成果をまとめるのは一般にすごく大変…

- [1] Planetary Fact Sheet (NASA サイト内のページ, 2022 年 4 月 26 日閲覧), <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>
- [2] T. Van Hoolst, (2015), 10.04 - Rotation of the Terrestrial Planets, in *Treatise on Geophysics*, 2nd ed., **10**, 121-151, doi: 10.1016/B978-0-444-53802-4.00168-8.
- [3] M. Saillenfest, G. Lari and A. Courtot, (2020), The future large obliquity of Jupiter, *A&A* **640**, A11, doi: 10.1051/0004-6361/202038432.
- [4] P. J. Armitage, (2017), Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems, v6 (講義ノート), doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/0701485.
- [5] E. Kokubo and S. Ida, (2007), Formation of terrestrial planets from protoplanets. II. Statistics of planetary spin, *ApJ*, **671**, 2082, doi: 10.1086/522364.
- [6] H. E. Schlichting and R. Sari, (2007), The effect of semicollisional accretion on planetary spins, *ApJ*, **658**, 593, doi: 10.1086/511129.
- [7] R. M. Canup and E. Asphaug, (2001), Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation, *Nature*, **412**, 708-712, doi: 10.1038/35089010.
- [8] G. Li and K. Batygin, (2014), Pre-late heavy bombardment evolution of the Earth's obliquity, *ApJ*, **795**, 67, doi: 10.1088/0004-637X/795/1/67.
- [9] J. Laskar and P. Robutel, (1993), The chaotic obliquity of the planets, *Nature*, **361**, 608-612, doi: 10.1038/361608a0.
- [10] J. Laskar, A. C. M. Correia, M. Gastineau, F. Joutel, B. Levrard and P. Robutel, (2004), Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars, *Icarus*, **170**, 343-364, doi: 10.1016/j.icarus.2004.04.005.
- [11] G. Li and K. Batygin, (2014), On the spin-axis dynamics of a moonless Earth, *ApJ*, **790**, 69, doi: 10.1088/0004-637X/790/1/69.
- [12] A. C. M. Correia and J. Laskar, (2004), Mercury's capture into the 3/2 spin-orbit resonance as a result of its chaotic dynamics, *Nature*, **429**, 848-850, doi: 10.1038/nature02609.
- [13] A. C. M. Correia and J. Laskar, (2003), Different tidal torques on a planet with a dense atmosphere and consequences to the spin dynamics, *J. Geophys. Res.*, **108**, 5123, doi: 10.1029/2003JE002059.
- [14] A. C. M. Correia and J. Laskar, (2003), Long-term evolution of the spin of Venus: II. numerical simulations, *Icarus*, **163**, 24-45, doi: 10.1016/S0019-1035(03)00043-5.

- [15] A. C. M. Correia, J. Laskar and O. Néron de Surgy, (2003), Long-term evolution of the spin of Venus: I. theory, *Icarus*, **163**, 1-23, doi: 10.1016/S0019-1035(03)00042-3.
- [16] P. L. Read and S. Lebonnois, (2018), Superrotation on Venus, on Titan, and Elsewhere, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **46**, 175–202, doi: 10.1146/annurev-earth-082517-010137.
- [17] J.-L. Margot, D. B. Campbell, J. D. Giorgini, J. S. Jao, L. G. Snedeker, F. D. Ghigo and A. Bonsall, (2021), Spin state and moment of inertia of Venus, *Nature Astronomy*, **5**, 676-683, doi: 10.1038/s41550-021-01339-7.
- [18] S. Paardekooper and A. Johansen, (2018), Giant planet formation and migration, *Space Sci Rev*, **214**, 38, doi: 10.1007/s11214-018-0472-y.
- [19] M. N. Machida, E. Kokubo, S. Inutsuka and T. Matsumoto, (2008), Angular momentum accretion onto a gas giant planet, *ApJ*, **685**, 1220, doi: 10.1086/590421.
- [20] T. Tanigawa and S. Watanabe, (2002), Gas accretion flows onto giant protoplanets: high-resolution two-dimensional simulations, *ApJ*, **580**, 506, doi: 10.1086/343069.
- [21] K. Batygin, (2018), On the terminal rotation rates of giant planets, *AJ*, **155**, 178, doi: 10.3847/1538-3881/aab54e.
- [22] M. L. Bryan, B. Benneke, H. A. Knutson, K. Batygin and B. P. Bowler, (2018), Constraints on the spin evolution of young planetary-mass companions, *Nature Astronomy*, **2**, 138-144, doi: 10.1038/s41550-017-0325-8.
- [23] D. Vokrouhlický and D. Nesvorný, (2015), Tilting Jupiter (a bit) and Saturn (a lot) during planetary migration, *ApJ*, **806**, 143, doi: 10.1088/0004-637X/806/1/143.
- [24] T. K. Henning, C. P. Dullemond, R. S. Klessen and H. Beuther, (2014), Planet-disk interactions and early evolution of planetary systems, in *Protostars and Planets VI* (Tucson: University of Arizona Press), 944, doi: 10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch029.
- [25] D. Nesvorný, (2018), Dynamical evolution of the early solar system, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **56**, 137-74, doi: 10.1146/annurev-astro-081817-052028.
- [26] S. N. Raymond and A. Morbidelli, (2015), The Grand Tack model: a critical review, in *Proceedings of the International Astronomical Union*, **9**(S310), 194-203, doi: 10.1017/S1743921314008254.

- [27] R. Frelikh, and R. A. Murray-Clay, (2017), The formation of Uranus and Neptune: fine-tuning in core accretion, *AJ*, **154**, 98, doi: 10.3847/1538-3881/aa81c7.
- [28] K. Kurosaki and S. Inutsuka, (2019), The exchange of mass and angular momentum in the impact event of ice giant planets: implications for the origin of Uranus, *AJ*, **157**, 13, doi: 10.3847/1538-3881/aaf165.
- [29] Z. Rogoszinski, and D. P. Hamilton, (2020), Tilting ice giants with a spin-orbit resonance, *ApJ*, **888**, 60, doi: 10.3847/1538-4357/ab5d35.