木星型惑星の大気力学と 最近の数値モデルについて

竹広真一

京都大学数理解析研究所

2024年10月11日

CPS セミナー@惑星科学研究センター + オンライン

木星型惑星の大気力学



木星型惑星大気概観

- A 未星型惑星大気力学
 - 基本的な比較
 - 数値計算のための数字
- ③ 木星型惑星大気の数値モデル
 - 「浅い」モデル
 - 「深い」モデル
- ◎ まとめ

木星型惑星大気概観



木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 3/52





太陽系





土星

Welcome to the Planets (NASA) より

「しましま」と「うずうず」がよく見える
 明るい縞(ゾーン,高高度), 暗い縞(ベルト, 低高度)

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 4/52

木星の動画 (カッシーニ探査機)



https://www.nasa.gov/centers/goddard/multimedia/largest/EduVideoGallery.html

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 5/52





Porco et al. (2003), Limaye (1986)

- ▶ 雲の動き ⇒ 風速分布
- ▶ 赤道で 200m/s (時速720km) の西風
- 中高緯度で向きが交互に変わる東西風
 - 「しましま」と風の分布が対応
 - ・ ゾーンは高気圧性, ベルトは低気圧性

竹広真一 (京大数理研)





Sánchez-Lavega et al. (2004)

▶ 赤道で 500m/s (時速1800km)の西風
 ▶ 高緯度で向きが交互に変わる東西風

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

地球・木星の風





地球 (千葉大 CEReS + NCEP データ)

(NASA Welcome to the planets + Cassini $\vec{\tau} - \vec{\gamma}$)

- ▶ 赤道で西風(赤道超回転) ⇔ 地球は赤道東風
- ▶ 中高緯度で多数の東西ジェット風 ⇔ 地球は半球1本のジェット風

木星・土星の極渦



木星 (Juno)



土星 (Cassini)

▶ 木星:小さな多数の渦
 ▶ 土星:六角形構造

https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/17-051.jpg https://media1.s-nbcnews.com/j/newscms/2014_06/162536/saturn-hexagonal-jet-stream_ 222c76fb83cf9099fdb9efdbc9cff5df.nbcnews-ux-2880-1000.jpg

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

木星・土星の風の特徴



赤道西風(赤道超回転)

- ・角運動量保存則に反する?赤道は一番遅くなるはず
- ▶ 中高緯度ジェット風
 - たくさんできるのはなぜ?
- ▶ (極域の渦), (大赤斑)

基本的な比較

似てるところ:「相似」



大気が球殻領域
 自転している

似てないところ



- ▶ 太陽放射 + 内部からのエネルギー
 - ・ 地球は内部(地面)からの熱流がとても小さい
- ▶ 地面がない
 - ・ 地面に当たるもの: ガス-金属相変化の密度変化
- (構成元素:主に水素)

竹広真一 (京大数理研)

「相似」:大きさと自転



http://chuplus.jp/blog/article/detail.php?comment_id=6545&comment_sub_id=0&category_id=282

- 大きい:半径が地球の約 10 倍
- 速く回ってる
 自転周期約 10 時間,回転速度が地球の約2倍

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 14/52

自転の効果の比較

ロスビー数 = 風速/自転速度

$$Ro=rac{U}{\Omega R}=rac{oldsymbol{\mathbb{A}}\dot{R}}{oldsymbol{ extbf{h}}oldsymbol{ extbf{h}}oldsymbol{ extbf{h}}oldsymbol{ extbf{h}}oldsymbol{ hextbf{h}}oldsymbol{ hextbf{h}}e$$

1	地球	木星・土星
Ro	0.2	0.01

自転の効果は地球の 20 倍

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 15/52

木星の内部構造



大規模流のエネルギー源

▶ 入射太陽放射<外向き熱放射 ⇒ 内部熱源
 ● 惑星が縮む, 重いものが落ちている?
 ⇒ 重力エネルギーの解放?



木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 17/52



温度風平衡

$$2\Omega \frac{\Delta U}{H} = g \frac{\Delta \rho}{L}$$

 Ω : 自転速度, g: 重力, H, L: 鉛直・水平距離 自転軸方向の速度差 (ΔU) \sim 水平密度差 ($\Delta \rho$)



▶ Juno の重力場観測:密度差から流れがわかる

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 18/52

Juno 重力場観測結果

- 深さ約 3000km まで表面の流れ が達している
 - 大気表層 (約 1 bar)よりは深い
 - 金属水素層の深さ(約 10000km?)よりは浅い
 - 「浅い」と「深い」の中間?
- ▶ 深いところに流れ ⇒ 原因が深い? とは限らない?



(Kaspi et al. 2018 より)

木星型惑星の大気力学





太陽放射 + 内部熱源 地球 GCM の拡張 球面にへばりついた渦 内部熱源 回転球殻対流 回転軸に沿った渦

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 20/52

ガス・氷惑星大気モデルの種類

▶ 浅いモデル

- 回転 2 次元球面モデル(順圧系,浅水系)
- 回転球面 3 次元プリミティブ方程式系 (薄い大気層,静水圧近似,コリオ リカ鉛直成分のみ)
- 回転球面 3 次元非静力学系

▶ 深いモデル

- ・薄い回転球殻ブシネスク系(非静水圧,コリオリカ3成分)
- 薄い回転球殻非弾性系

観測からの基本的数字

- 説明したい現象
 - 赤道ジェット
 - 空間スケール(幅): O(惑星半径) 木星 ~ 50000 km (40°), 土星 ~ 80000 km (80°).
 - 風速: O(100 m/s)
 - 中高緯度ジェット
 - 空間スケール(幅):木星 \sim 7000 km (7 $^\circ$),土星 \sim 10000 km (10 $^\circ$).
 - 風速:O(10 m/s)
- ▶ 周辺環境
 - ・ 表層大気層 (Weather layer, Showman et al. 2011 より)
 - 厚さ(圧力スケールハイト): *H_p* ~ 20 km

 $(H_p \sim |p/dp/dz| = RT/g \sim 4000 \times 100/20 \sim 20000 \text{ m})$ 安定度, Brünt-Väisälä 振動数 : $N \sim 0.02 \text{ s}^{-1}$

 $(N^2=(g/ heta)(d heta/dz)\sim g^2\kappa/RT\sim 4 imes 10^{-4})$

- 重力波速度: $c_g = NH_p \sim 400 \text{ m/s}$
- 深部大気層(中性大気)
 - 厚さ~10000 km (半径比 0.85-0.9)
 - 安定度は中立,振動数 N = 0
 帯状流の深さ ~ 3000 km

モデル計算のための基本的数字

- ▶ 浅いモデルの縛り:変形半径
 - 音速 $c_s = \sqrt{\gamma RT} \sim 600 \text{ m/s}$
 - 重力波速度: c_g = NH_p ~ 400 m/s
 - ・ 変形半径 L_R = c_g/f ~ 2000 km ~ 2° (木星中緯度)
 ⇒ 0.5° ぐらいの水平解像度 ⇒ 経度緯度格子点数 512×256 以上
- ▶ 深いモデルの縛り:小規模熱対流の空間スケール
 - 深部の小規模熱対流の空間スケールは不明
 - 粘性 ν に依存,線型理論では経度波数 m_c ~ E^{-1/3}, E = ν/ΩD
 渦粘性で想定される値でも, m_c とても大きい(空間スケール小さい) 既存の計算資源では解像不可能。
 - 計算可能なまでに粘性率を予想される値より大きくする.
 - 典型的な値: $E \sim 3 \times 10^{\circ}$, $m_c \sim O(10^2) \Rightarrow$ 水平解像度全波数 $O(10^2)$
 - 薄い球殻だともっと小スケールになり,高解像度必要
 - さらに超粘性を導入して熱対流の空間スケールを大きくしている.
 - 定性的な傾向と力学バランスのレジームに注目しての数値シミュレーション.
 定量的な評価は難しい

「浅い」モデル



木星型惑星の大気力学

- ∢ ∃ ▶ 2024年10月11日

< 行

æ

地球大気 GCM 系列

▶ ガス惑星に転用されている主要な地球大気 GCM

- Flexible Modeling System (FMS), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL): スペクトルモデル
- MITgcm:有限体積法
- DYNAMICO, the Laboratoire Meteorologie Dynamique (LMD):正 20 面体 格子
- planetMPAS, the National Center for Atmospheric Research (NCAR):ボロ ノイ分割格子, 有限体積法
- the NASA Goddard Institute for Space Sciences (GISS)

Schneider and Liu (2009), Liu and Schneider (2010,2011)

- カ学コア: FMS (GFDL)
 - 水平解像度 640×320 (切断全波数 T213)
 - 鉛直解像度 32 層, σ = p/ps 座標で等間隔
 - 上下端密度比 O(10²)

▶ 放射過程

- 2 色灰色大気,
- 光学的厚さ τ が圧力のべき関数: τ = τ₀(p/p₀)ⁿ
- 太陽放射 n = 1, 赤外放射 n = 2

▶ 下端境界

- 下端圧力 ps = 3 bar
- 定常水平一様内部熱流ありなし実験
- σ > 0.8 で線型抵抗(MHD 抵抗) ±16.3°より極側で定数,赤道側で0

▶ 乾燥対流調節

- 時間スケール 6 h で断熱温度に緩和
- エンタルピーを大気柱で保存
- 運動量は混合しない



MHD 抵抗と子午面循環

2024年10月11日 26/52

<u>回転球面</u>3次元プリミティブ方程式系

Schneider and Liu (2009), Liu and Schneider (2010,2011)

- ・乾燥大気計算(相変化物質含まない)
- 下面中高緯度にレイリー摩擦(MHD 抵抗), 赤道域で下面摩擦なし
- 上からの太陽放射による差分加熱、下面からの一様な熱流
- 太陽放射による差分加熱 ⇒ 中高緯度の縞状構造
- 下面からの熱流 ⇒ 赤道超回転
- ジェットの幅は変形半径程度、逆カスケードは生じていない



帯状流分布

竹広真一 (京大数理研)

- Schneider and Liu (2009), Liu and Schneider (2010,2011)
 対流による加熱 ⇒ 赤道で発散流 ⇒ ロスビー波を高緯度に射出
 - ⇒ 赤道超回転





木星型惑星の大気力学





ニュートン冷却の平衡温度分布. 上が鉛直分布, 下が緯度分布.

Lian and Showman (2008)





帯状流(左)と渦による加速(右)

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 30/52

- Lian and Showman (2010)
 - ・ Lian and Showman (2008)の湿潤大気版(相変化物質含む)
 - カ学コア: MITgcm
 - 水平解像度: C128 (Cubed Sphere) = 512x256, C64 = 256x128
 鉛直解像度: 35-38 層
 下面圧力: 100 bar (木星, 土星), 500 bar (海王星)
 - 湿潤過程:水の凝結

$$\frac{d\,q}{dt} = -\frac{q-q_s}{\tau_s}\delta + Q_{deep}$$

過飽和 $(q > q_s)$ なら飽和値に緩和 $(\delta = 1)$ 未飽和 $(q \le q_s)$ なら何もしない $(\delta = 0)$ 深部 $(p > p_c)$ での水蒸気蒸発: $Q_{deep} = (q_{deep} - q)/\tau_{replenish}$ (深部水蒸気量を固 定)

2024年10月11日 31/52

Lian and Showman (2010)

- ▶ Lian and Showman (2008) の湿潤 大気版(相変化物質含む)
- 湿潤対流の相変化に伴う加熱が 大気循環を支配.
 - 木星土星パラメター(3-5 倍の太陽 系組成):赤道加速,20 本ジェッ
 - 天王星海王星パラメター(30 倍の 太陽系組成):3 本ジェット



帯状流分布.上から木星,土星,天王星海王星計

算

木星型惑星の大気力学

- Young et al. (2019a)
 - 乾燥大気計算
 - カ学コア: MITgcm
 - 格子モデル (Arakawa-C grid)
 - 超粘性: 4 次の Shapiro filter (▽⁸)
 - 極域(緯度 45 度以上)で帯状フィルター:小スケールの経度方向の波を消去
 - 計算領域と解像度
 - 水平方向:初期 256×128 (1.4°),後半 512×256 (0.7°) 変形半径スケールで 2,3 点 (256×128)
 - 鉛直方向:33 セル, log p 座標でほぼ等間隔, 下端 18 bar, 上端 0.01 bar
 - 放射
 - 2 色灰色大気(太陽 + 赤外)
 光学的厚さは圧力のべき関数(太陽放射 1 次, 赤外放射 2 次) (Schneider and Liu 2009)
 - 下端からの一様熱フラックス(ありなし実験)
 - その他
 - 鉛直混合過程あり
 - 下端境界:すべての緯度帯に線型抵抗

Young et al. (2019a)

- Case A:下端熱フラックスなし, Case B:下端熱フラックスあり(一様)
- 計算時間: O(10⁵) Earth days
- 中高緯度に交互ジェット(Case A,B): 傾圧不安定
- 順行赤道ジェット(Case B):~ 20 m/s, 順圧不安定 + ロスビー波射出



Young et al. (2019b)

- ・湿潤成分のパッシブ計算(トレーサー)
- Young et al. (2019a) + 湿潤過程, 7 種類の成分
 NH₃ (固/気), H₂S (気), NH₄SH (固), H₂O (固/液/気)
- 実験設定項目
 - 下端熱流あるなし
 - 初期トレーサー分布 (観測, [0.5,2.0,1.0]×Solar)
 - 凝結粒子半径
 - 相変化/NH₄SH反応時間スケール



(a) Run B2 $NH_3(s)$, observed tracers. Colour scale stretched by factor 10 relative to Run B.

(b) Run B2 NH₄SH(s), observed tracers.

(c) Run B2 H₂O(s), observed tracers. Colour scale stretched by factor 0.1 relative to Run B.

下端熱流あり+観測初期トレーサー分布実験の雲分布.NH₃ (左), NH₄SH (中), H₂O (右)

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 35/52

Young et al. (2019b)

- ・ Juno 観測と似たアンモニア分布
 - 赤道の強い子午面循環 (Young et al. 2019a)
 - 初期の緩和過程だけ赤道周辺の細いアンモニア分布がみられる
 - 時間が立つと拡散で広がる



▶ Spiga et al. (2020) : 土星 GCM

- 力学コア: Saturn DYNAMICO (LMD)
 - 正 20 面体格子 (N = 160, 301, 625)
 - 水平解像度約 1/2, 1/4, 1/8 度
 - 鉛直格子間隔, 32 層
- 放射過程
 - line-by-line 計算に基づいた k-distribution 法
 - 吸収物質:炭水化物(メタン,エタン,アセチレン), H₂-H₂, H2-He 衝突吸収,エアロゾル
- 下端境界
 - 下端圧力 3bar, 上端圧力 1 mbar
 - 上端にスポンジ層は入れない (角運動量収支と力学バランスに英表するから)
 - 赤道周辺で 0 となる下端レイリー摩擦 (Schneider and Liu, 2009)
 - 緯度に依存しない内部熱流
 - 湿潤過程なし(?), 放射計算に固定分布入れ込んでるかも(?)

▶ Spiga et al. (2020):土星 GCM, 放射過程



平均帯状風(トーン)と平均温度(コンター)

木星型惑星の大気力学

回転球面非静力学系

▶ Lian and Richardson (2023):非静力学 + 雲対流過程

- ・ 力学コア: planetMPAS (NCAR)
 - 球座標圧縮性非静力学方程式
 - spherical centroidal Voronoi tessellation (CVT), unstructured Voronoi mesh
 - 有限体積法 (FVM) による方程式の評価
 - 水平解像度 0.5°
 - 鉛直解像度 5 km
 - 下端圧力 100 bar
- 物理過程: planetWRF のものを流用
 - 雲水過程(Tiedtke, Kessler)
 - 湿潤対流調節(アンモニア)
 - semi-grey 放射過程(太陽放射+赤外放射, Schneider and Liu, 2009)

回転球面非静力学系

Lian and Richardson (2023)



1 bar 面での帯状風 赤道の赤 ~ +170 m/s, 赤道の紫 ~ -20 m/s. 子午面平均場 (a) 帯状風 (b) 温度 (c) 水蒸気混合比 (d) アンモニア混合比

[m/s]

140

- 84

- 56 10⁴ - 28

- 0

[kg/kg]

-28

0.0288

0.0256

0.0192

0.0128

0.0064

0.0032

0.0000

0.0224 10-1

0.0160 100

112 10-1

10

(a)

-80-60-40-20 0 20 40 60 80

-80-60-40-20 0 20 40 60 80

Latitude (deg)

10-1

101

10-1

100

101

Pressure [bar]

g 10°

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

-80-60-40-20 0 20 40 60 80

-80-60-40-20 0 20 40 60 80

Latitude (deg)

[K]

544

488

376

- 320 - 264

208

- 152

0.0025

0.0022

0.0019

0.0016

0.0012

0.0009

0.0006

0.0003

[ka/ka]

「深い」モデル



木星型惑星の大気力学

-∢ ∃ ▶ 2024年10月11日

æ

薄い回転球殻ブシネスク系

Heimpel and Aurnou (2007)

- 薄い球殻, 1/8セクター計算
- ・超粘性の計算
- 低エクマン数・高レイリー数計算
- ・赤道付近:強い東風(赤道加速) ← レイノルズ応力による運動量輸送
- 中高緯度:縞状パターンの形成 ⇐ 2 次元 β 面乱流 + ラインズ効果?



薄い回転球殻非弾性系

► Gastine et al. (2014)

- *E_k* = 3 × 10⁻⁶ まで徐々に回転を上げる, 超粘性導入
- ・解像度:緯度方向ルジャンドル関数 682 次,動径チェビシェフ193 次 $1/8 \text{ to } p \neq (E_k = 3 \times 10^{-6} \text{ obs})$
- (格子点だと経度×緯度×動径=256×1024×289 ぐらい?)
- 非弾性系でも赤道順行ジェット,中高緯度に縞状構造生成



木星型惑星の大気力学

薄い回転球殻非弾性系

Heimpel et al. (2016)

- 「深い」モデル + 内外の密度差 + 外側に薄い安定成層
- 赤道順行ジェット,中高緯度に縞状構造
- 表層に細かな渦
- 1/4 縦割り領域(全球でない!)



渦度回転軸成分



竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

2024年10月11日 44/52

薄い回転球殻ブシネスク系

▶ Garcia, et al. (2020)

- $\chi = 0.9$, Pr = 0.01, $Ta = 10^{11}$ ($E = 1/\sqrt{Ta} \sim 3 \times 10^{-6}$), Ra/Rac = 10.8, 17.2 (Model1:Saturn/Model2:Jupiter)
- $L_{max} = 500, n_r = 60$
- 超粘性なし, 経度対称性なし
- 高波数に6回経度対称のフィルター?

"filtered $m = m_d > \text{six fold symmetry constraints are imposed"}$

極域の渦に注目

竹広真一



45 / 52

薄い回転球殻非弾性系

Heimpel et al. (2022)

- ・表面付近に安定成層,全球計算,超粘性を適用
- $\chi = 0.9, 0.95, (Pr, E) = (0.3, 10^{-5}), (1, 3 \times 10^{-6})$
- ・時間積分 1000 自転程度(短い!)



帯状平均エントロピー勾配(左上),表面付近鉛直渦度(中上,右上) 平均帯状風(左下),表面東西風(中下),中層鉛直渦度(右下)

竹広真一 (京大数理研)

木星型惑星の大気力学

おまけ:ホットジュピター(潮汐固定ガス惑星)

- Cho et al. (2021), Skinner and Cho (2021,2022)
 - 解像度: T682L20. T341L200
 - ・
 放射過程:仮定した平衡温度への緩和

 - モデル計算時間: T682L20: 3007, T341L200: 20007 $(\tau = 3.025 \times 10^5 \text{ s},$ 自転周期)



47 / 52

まとめ



木星型惑星の大気力学

∃ → 2024年10月11日

æ

< 🗗 >

トピックスまとめ

▶ 大気観測

- 赤道超回転
- 中高緯度の縞構造とジェット
- 極域の渦
- ▶ モデル
 - 浅いモデル:球面上の渦
 - 静力学 or 非静力学
 - 放射過程:平衡温度,2 色灰色, line-by-line
 - 湿潤過程:なし,雲パラメタリゼーション,雲水計算
 - 下端境界:深さと力学境界条件
 - 深いモデル:回転軸方向の渦 (テイラープラウドマンの定理)
 - ブシネスクから非弾性へ
 - より薄い球殻へ
 - エクマン数はあまりあげられてない
 - 表面の安定成層

研究現状

▶ まだ決定的なモデルはない

- 浅いモデル
 - 中高緯度のしましまはそれなりに再現
 赤道ジェットはやはり難しい?
 下面力学境界 and/or 下面熱フラックス ⇒ 順行にできるが深くなさそう
- 深いモデル
 - 赤道ジェットはロバスト
 - 薄い球殻 ⇒ しましまできるが,長時間後消失?
- 大規模渦(大赤斑,極域)と赤道/中高緯度ジェットの同時表現はまだ?
- ▶ これからの研究の動向
 - ・地球の大気モデルの延長,凝結成分,放射過程などより詳細に
 - ・上下の密度差を考慮したモデル,安定成層+より薄い球殻+高解像度で



Busse, F. H., 1983 : A model of mean zonal flows in the major planets. Geophys. Astrophys. Fluid Dyn., 23, 153-174.

- Cho, J. Y-K., Skinner, J. W., Thrastarson, H. Th., 2021: Storms, Variability, and Multiple Equilibria on Hot Jupiters. Astrophys. J. Lett., 913, L32
- Gastine, T., Heimpel, M., Wicht, J., 2014: Zonal flow scaling in rapidly-rotating compressible convection. Phys. Earth Planet. Inter., 232, 36–50.
- Guillot, T., 2005 : The interiors of giant planets: Models and outstanding questions. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 33, 493-530.
- Heimpel, M., Aurnou, J., 2007 : Turbulent convection in rapidly rotating spherical shells: A model for equatorial and high latitude jets on Jupiter and Saturn. Icarus, 187, 540–557.
- Heimpel, M., Gastine, T., Wicht, J., 2015: Simulation of deep-seated zonal jets and shallow vortices in gas giant atmospheres. Nature GeoSci., 9, 19–23.
- Heimpel, M. H., Yadav, R. K., Featherstone, N. A., Aurnou, J. M., 2022 : Polar and mid-latitude vortices and zonal flows on Jupiter and Saturn. Icarus, 379, 114942.
- Y. Kaspi, E. Galanti, W. B. Hubbard, D. J. Stevenson, S. J. Bolton, L. less, T. Guillot, J. Bloxham, J. E. P. Connerney, H. Cao, D. Durante, W. M. Folkner, R. Helled, A. P. Ingersoll, S. M. Levin, J. I. Lunine, Y. Miguel, B. Militzer, M. Parisi, S. M. Wahl, 2018: Jupiter's atmospheric jet streams extend thousands of kilometres deep, Nature, 555, 223–226.

Lian, Y., Showman, A. P., 2008 : Deep jets on gas-giant planets lcarus, 194, 597-615.

- Lian, Y., Showman, A. P., 2010 : Generation of equatorial jets by large-scale latent heating on the giant planets. Icarus, 207, 373–393.
- Limaye, S.S., 1986: Jupiter: New estimates of the mean zonal flow at the cloud level, Icarus, 65, 335-352.
- Liu, J., Schneider, T., 2010 : Mechanisms of jet formation on the giant planets. J. Atmos. Sci., 67, 3652-3672.



- Porco, C.C., West, R.A., McEwen, A., Del Genio, A.D., Ingersol, A.P., Thomas, P., Squyres, S., Dones, L., Murray, C.D., Johnson, T.V., Burns, J.A., Brahic, A., Neukum, G., Veverka, G., Barbara, J.M., Denk, T., Evans, M., Ferrier, J.J., Geissler, P., Helfenstein, P., Roatsch, T., Throop, H., Tiscareno, M., Vasavadal A.R., 2003: Cassini Imaging of Jupiter's Atmosphere, Satellites, and Rings, Science, 299, 1541-1547.
- Pirraglia, J. A., 1984 : Meridional energy balance of Jupiter. Icarus, 59, 169-76.
- Sánchez-Lavega, A., Hueso, R., Pérez-Hoyos, S., Rojas, J. F., French, R. G., 2004: Saturn's cloud morphology and zonal winds before the Cassini encounter, Icarus, 170, 591- 523.
- Schneider, T., Liu, J., 2009 : Formation of jets and equatorial superrotation on Jupiter. J. Atmos. Sci., 66, 579-601.
- Showman, A. P., Cho, J. Y.-K., Menou, K., 2011: Atmospheric Circulation of Exoplanets. In: Seager, S. (Ed.), Exoplanets. University of Arizona Press, pp.471–516.
- Skinner, J. W., Cho, J. Y., 2021: Numerical convergence of hot-Jupiter atmospheric flow solutions. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 504, 5172–5187.
- Skinner, J. W., Cho, J. Y., 2022: Modons on tidally synchronized extrasolar planets. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 511, 3584–3601.
- Sukoriansky, S., Galperin, B., Dikovskaya, N., 2002 : Universal spectrum of two-dimensional turbulence on a rotating sphere and some basic features of atmospheric circulation on giant planets. Phys. Rev. Lett., 89, 124501-1–4.
- Williams, G. P., 1978: Planetary circulations: I. Barotropic representation of Jovian and terrestrial turbulence. J. Atmos. Sci., 35, 1399–1426.
- Young, R. M. B., Read, P. L., Wang, Y., 2019a: Simulating Jupiter's weather layer. Part I: Jet spin-up in a dry atmosphere.
- Young, R. M. B., Read, P. L., Wang, Y., 2019b: Simulating Jupiter's weather layer. Part II: Passive ammonia and water cycles.

< 口 > < 合