

# ホットジュピターの大気蒸発 過程における恒星風の影響

三谷 啓人(東京大学 D1),

Collaborators: 仲谷 峻平(理化学研究所), 吉田 直紀(東京大学)



# CONTENTS

- Introduction:ホットジュピターにおける惑星大気散逸のこれまでの理解
- 恒星風を含む惑星大気散逸の輻射流体シミュレーション
- 水素分子のPumping Heatingによる惑星大気散逸
- まとめ

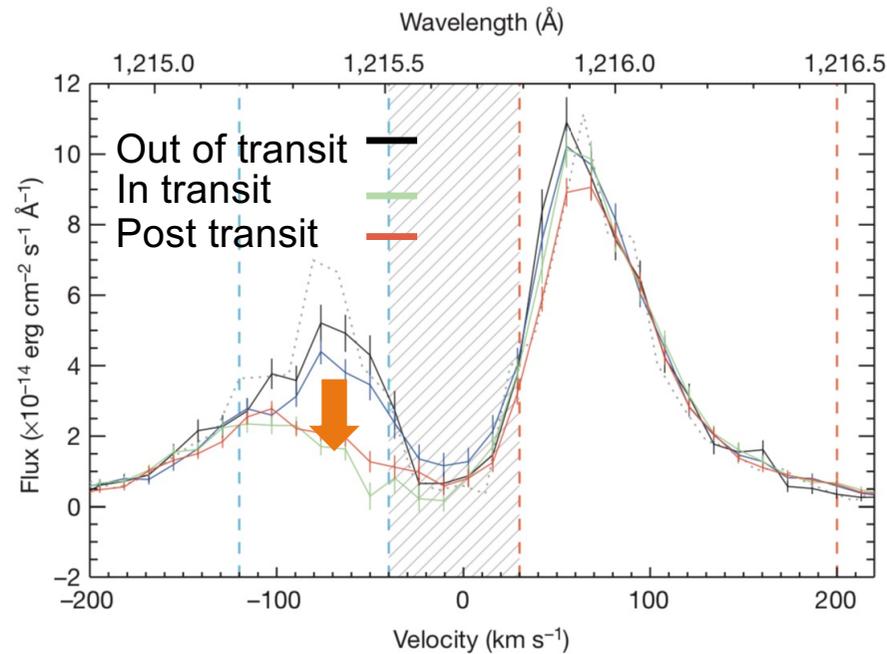
# INTRO:惑星大気散逸の観測

Artistic image of atmospheric escape



NASA/European Space Agency/Alfred Vidal-Madjar  
(Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS)

Ly $\alpha$  Transit observation

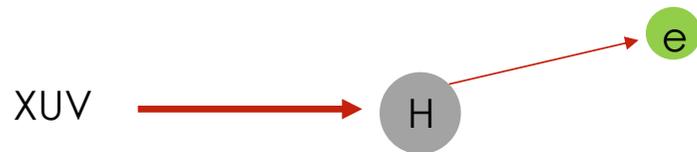


散逸大気による非対称なトランジットシグナルが観測されている

Ehrenreich et al. 2015

# EUVによる加熱がホットジュピターの惑星大気散逸を引き起こす

Photoionization heating

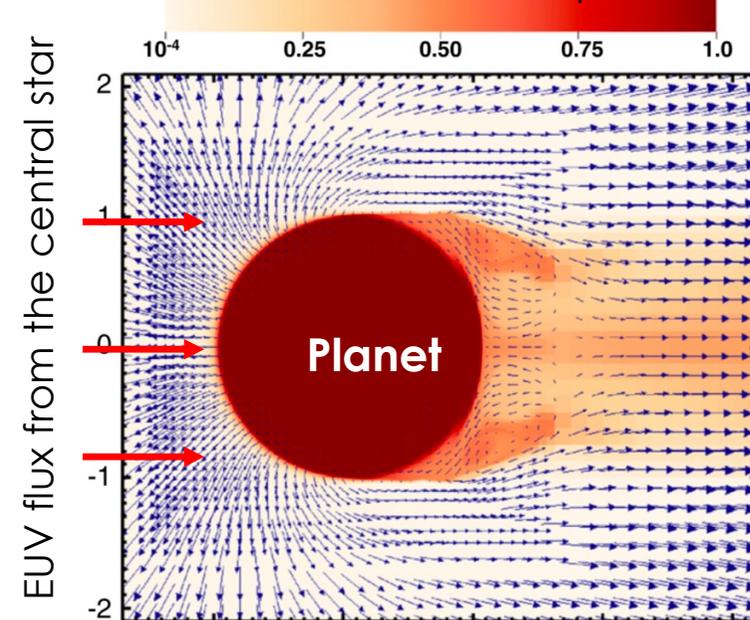


$$\dot{M} = \epsilon \frac{\pi R_p^3 F_{UV}(1\text{AU})}{GM_p} \left( \frac{a_p}{1\text{AU}} \right)^{-2}$$

- **Extreme UV(EUV; >13.6 eV) photoionization heating**による惑星大気散逸
- 質量損失率  $\dot{M} \sim 10^9\text{-}12 \text{ g/s}$ , 典型的なホットジュピターは大気を全ては失わない ( $t_{esc} \sim 10^{12} \text{ yr}$ )

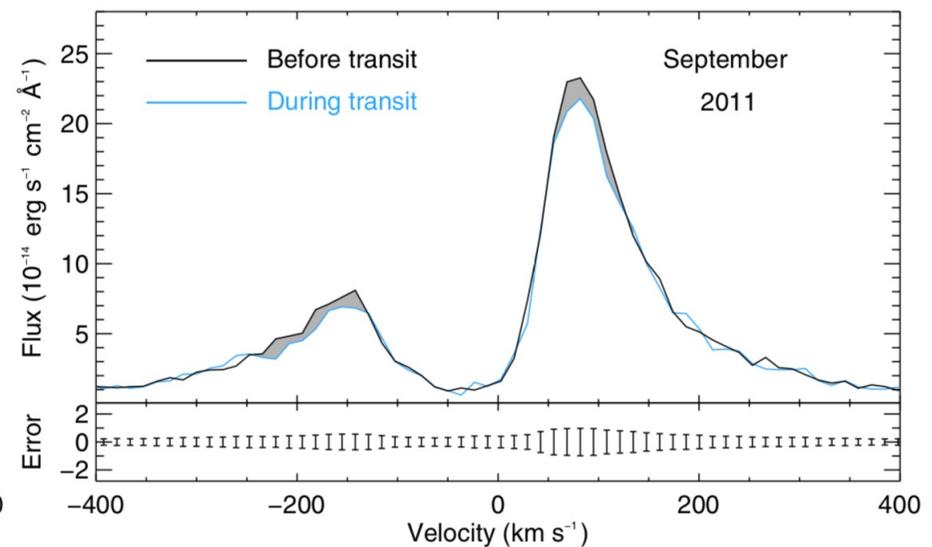
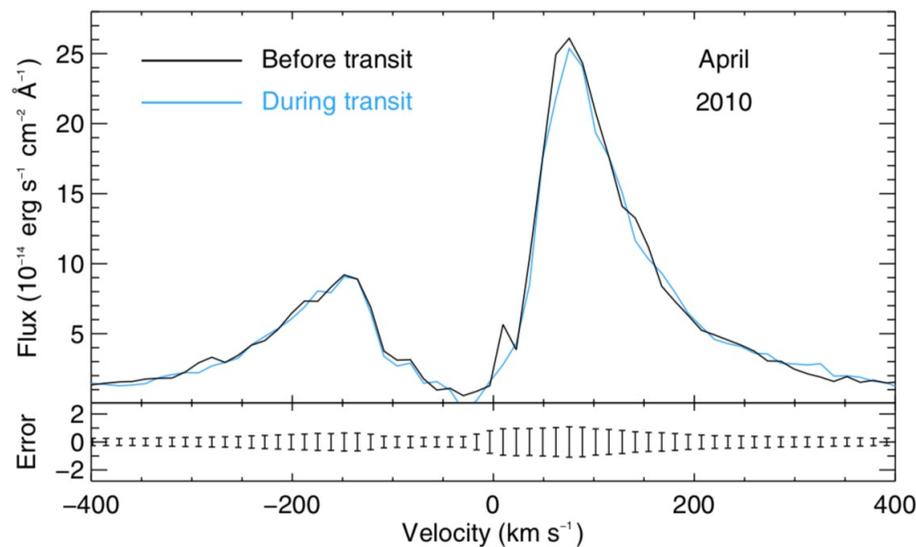
大気散逸の輻射流体シミュレーション

Neutral fraction Tripathi et al. 2015



# いつでも大気散逸があるわけではない？

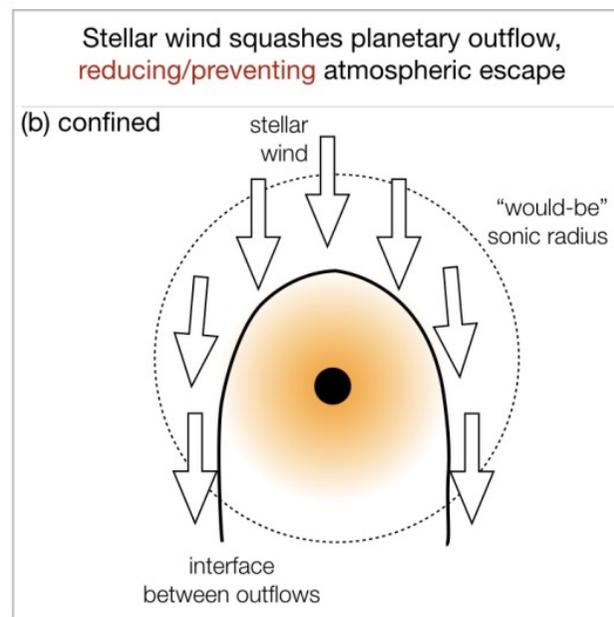
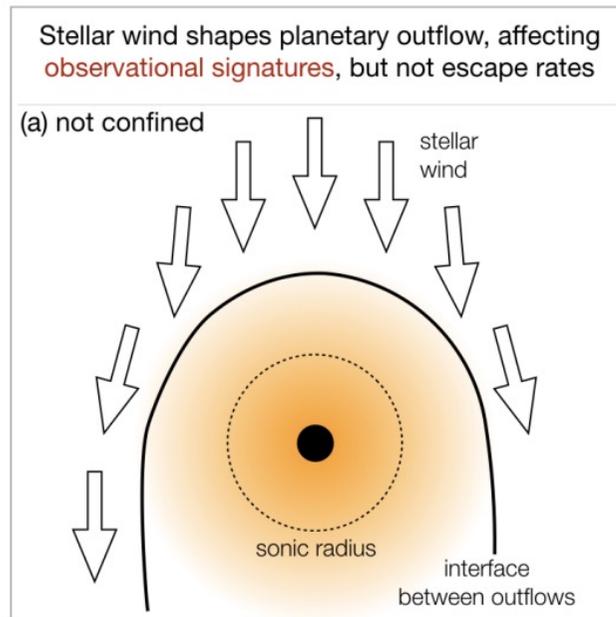
Lecavelier des Etangs et al. 2012



- 同じホットジュピターでも大気散逸によるLy $\alpha$ 吸収がないように見えることがある
- Sub-Neptuneでも大気散逸が見えないものがある( $\pi$  Men c, García Muñoz et al. 2019)

# 恒星風によるホットジュピターにおける 大気散逸過程への影響

Vidotto & Cleary 2020

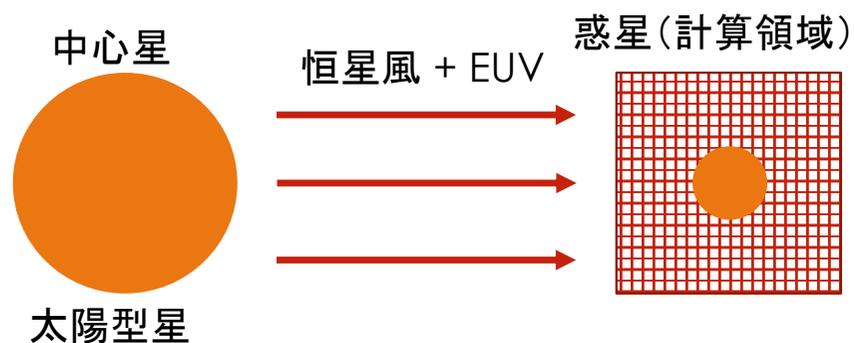


- 大気散逸が見えない場合がある→恒星風が惑星大気を押し込み、大気散逸率が小さくなる？
- 1D計算によって活発な主星の場合は恒星風が重要になることが示唆 (Vidotto & Cleary 2020)
- 1D散逸大気構造+3D恒星風の計算 (Carolan et al. 2020)

恒星風による圧縮が大気散逸やトランジットシグナルへ与える影響を輻射流体シミュレーションを用いて理解したい

# 手法：惑星大気散逸の輻射流体シミュレーション

- 2次元軸対称 輻射輸送+ 非平衡化学反応 (Nakatani et al. 2018a, Nakatani & Yoshida 2019) + 恒星および惑星重力+遠心力
- 太陽型星周りのホットジュピター
- 恒星風は太陽風に合わせた定常的な温度・密度・速度



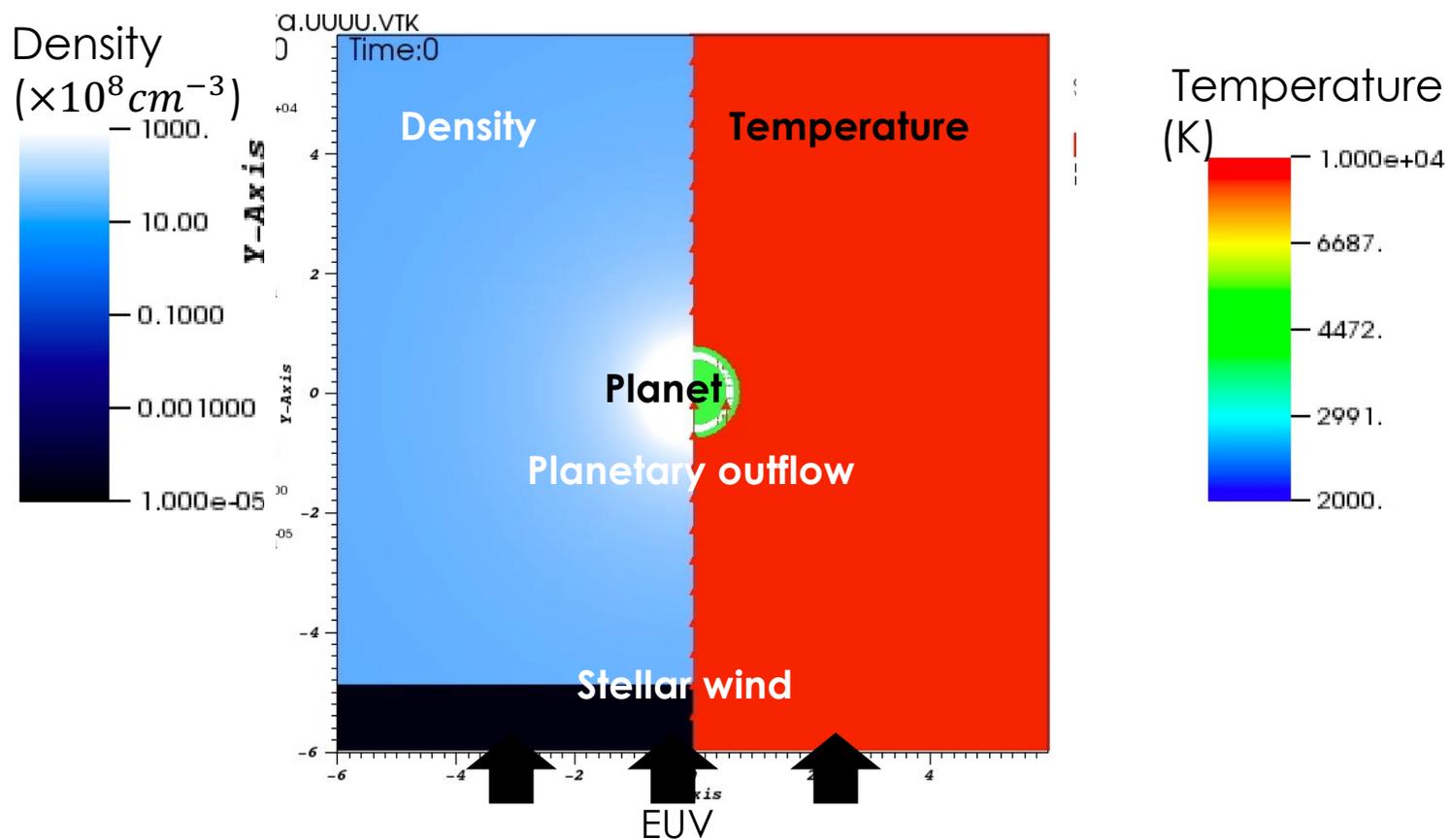
## 主星パラメータ

Star mass	$1M_{\odot}$
Star Radius	$1R_{\odot}$
EUV	$1.4 \times 10^{38}$ photons/s
Wind velocity	540km/s
Wind density	$2.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$
Wind temperature	2MK

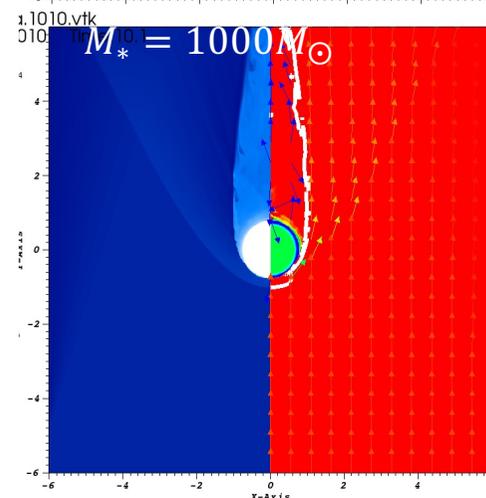
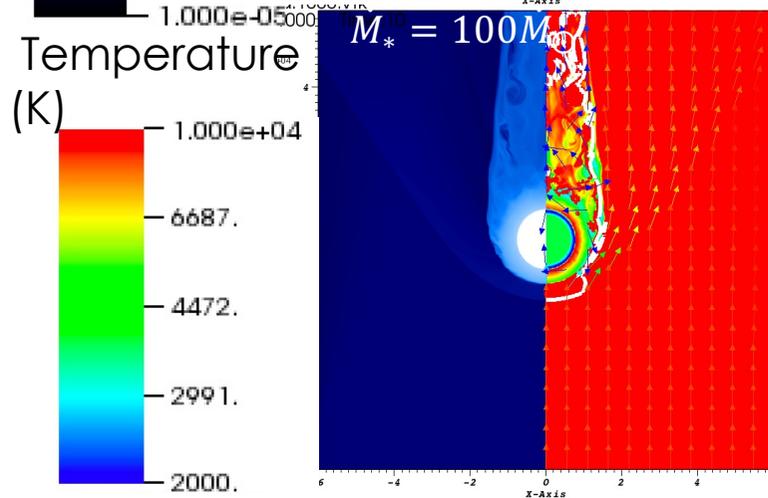
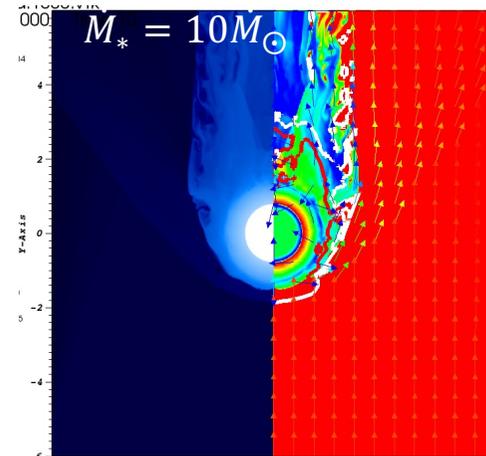
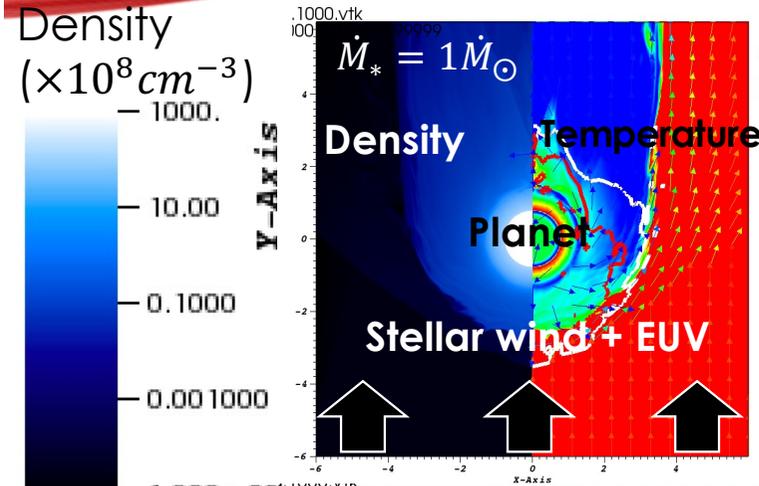
## 惑星パラメータ

planet mass	$0.3M_J$
planet radius	$1R_J$
Semi-major axis	0.045 AU

# 恒星風による惑星大気散逸への影響



# 散逸大気構造の恒星風強度依存性

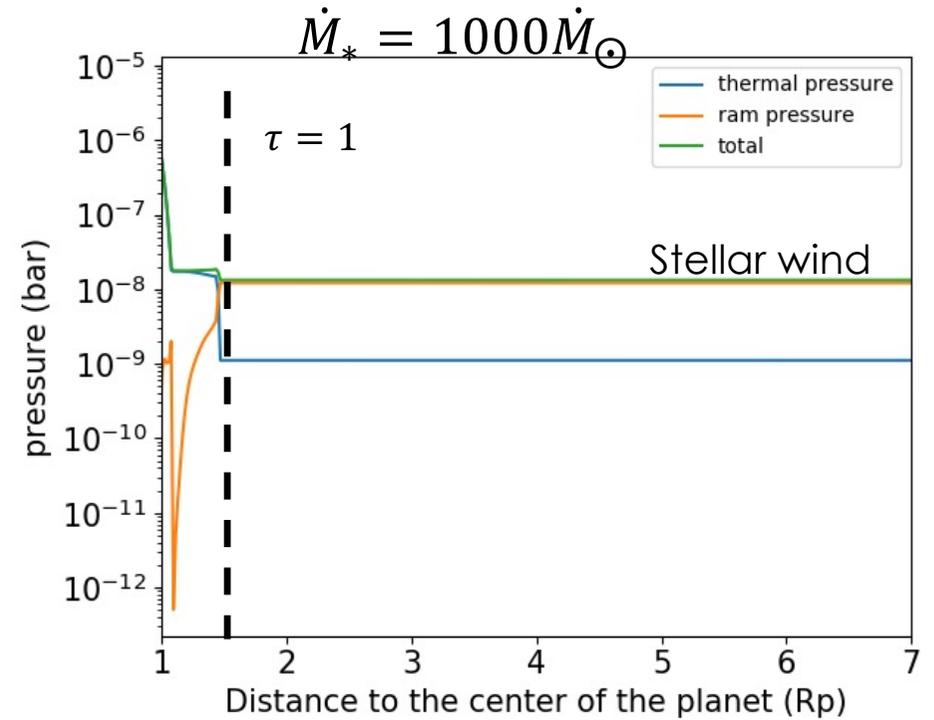
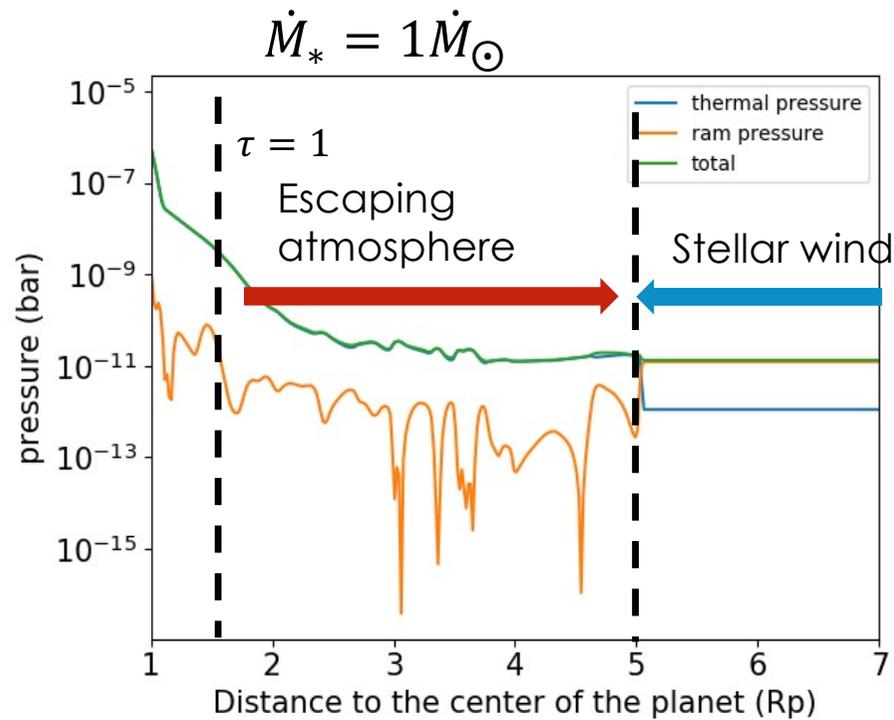


- 恒星風強度を密度のみ変化させて計算
- 恒星風によって散逸大気が押し込められている
- 恒星風強度が強くなるとより強く押し込められている→恒星風が強いとトランジット半径は小さくなる

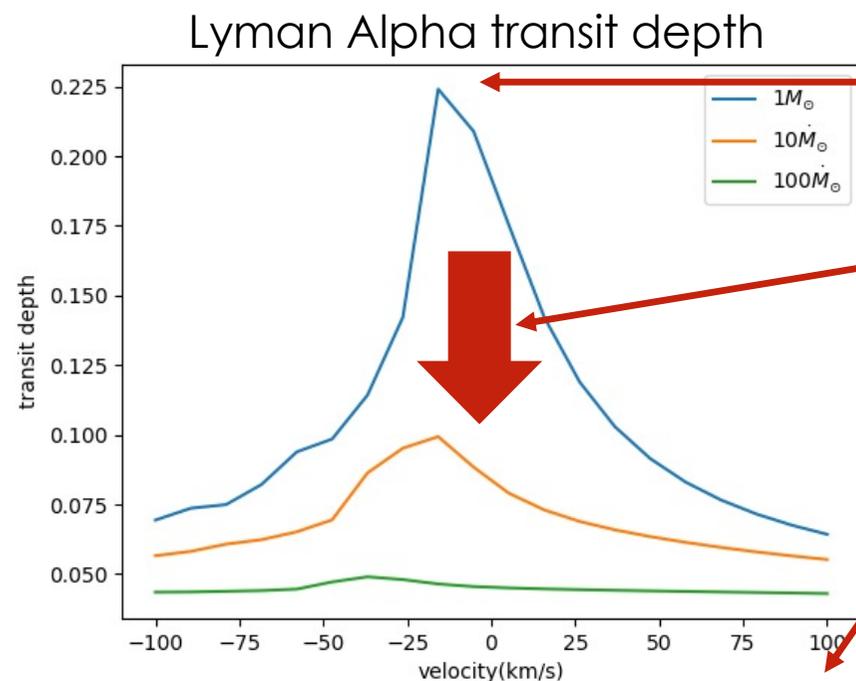
$$\dot{M}_\odot = 2 \times 10^{-14} M_\odot / \text{yr}$$

# 恒星風と散逸大気の圧力釣り合い

- 恒星の質量損失率に依存し、恒星風のram pressureとの釣り合いで決まる



# 恒星風のトランジットシグナルと惑星進化 に対する影響

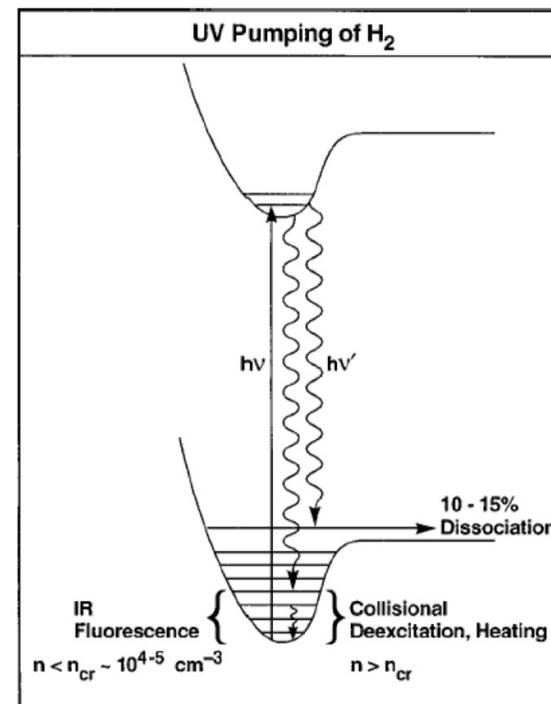


1. ピークは恒星風の影響で $\sim -10\text{km/s}$ に存在
2. 強い恒星風はトランジットシグナルを小さくする
3. 恒星風強度が非常に強い場合 (EUV 加熱によって大気散逸が起こる場所まで恒星風が大気を圧縮できる場合) は質量損失率を小さくするが、それ以外の場合はほとんど変化させない

恒星風強度	$1\dot{M}_{\odot}$	$10\dot{M}_{\odot}$	$100\dot{M}_{\odot}$	$1000\dot{M}_{\odot}$
質量損失率 ( $\times 10^{10}\text{g/s}$ )	2.9	2.2	2.3	0

# 水素分子のPUMPING HEATINGは無視できるのか？

- 従来はXUVによる光電離加熱が駆動する大気散逸が考慮されてきた
- Far-Ultraviolet ( $<13.6\text{eV}$ , Lyman-Werner photons)のような長波長のUVの加熱は？
- FUVによる水素分子のPumping Heating

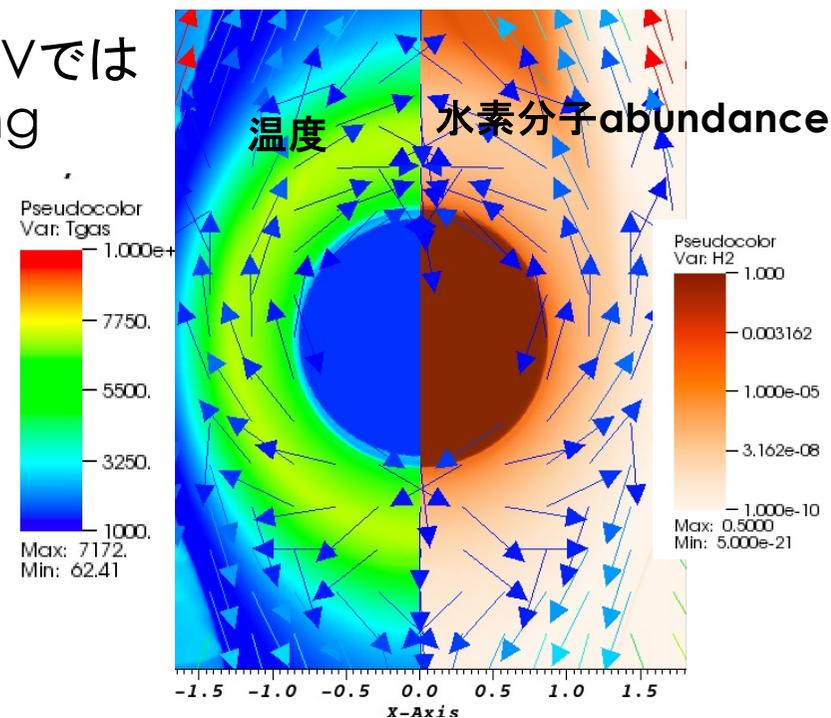
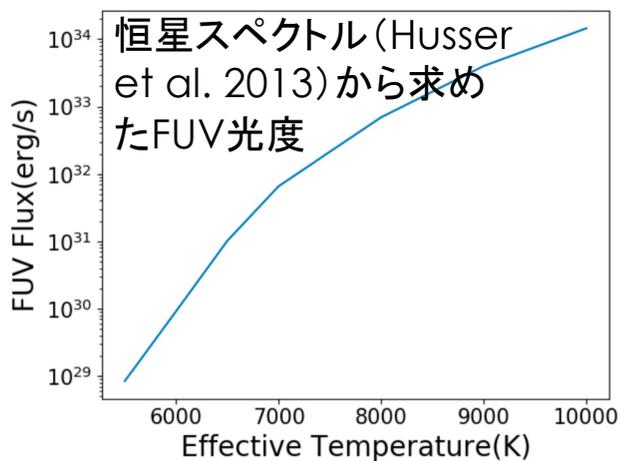


Hollenbach & Tielens 1999

# PUMPING HEATINGは高温の主星周りの ホットジュピターでは重要かもしれない

- FUV光度はA型星のような高温の恒星では非常に強くなる (4-5桁程度)
- 10000Kの主星周りでは $\sim 10^{13} g/s$ の大気散逸 (EUVでは $\sim 10^{11} g/s$ 程度)  $\rightarrow$  FUVの強いA型星ではPumping Heatingによって散逸率が非常に大きくなる

Pumping heating を含む計算  
(Preliminary)



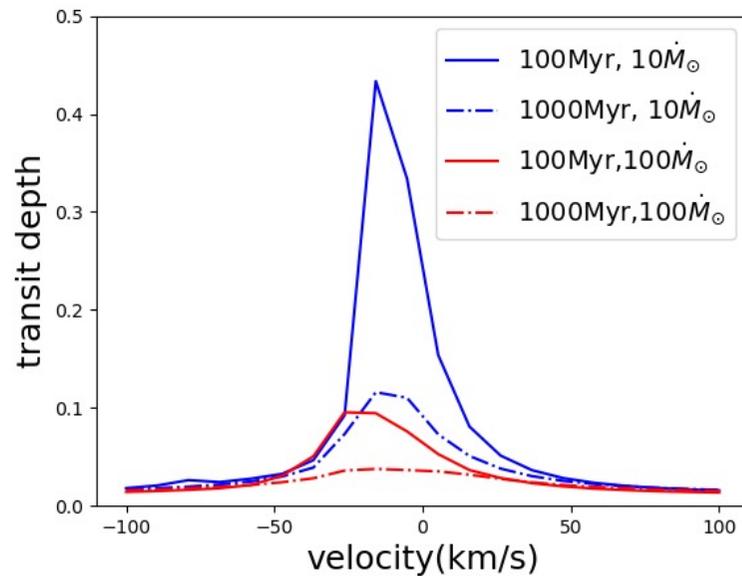


## まとめ

- 主星からのEUV加熱によるホットジュピターの大気散逸過程がよく知られている
- 主星からの恒星風による散逸大気の圧縮を輻射流体シミュレーションを用いて調べた
  - 恒星風のram pressureとの圧力釣り合いによって構造が決まる
  - 非常に恒星風が強い場合を除いて質量損失率には影響がほぼない
  - トランジットシグナルは恒星風パラメータ(質量損失率、速度)に大きく依存する
- 水素分子のPumping Heatingが高温の主星周りでは重要になるかもしれない

## APPENDIX:活発な主星周りでは トランジットシグナルが大きくなる？

- 若い主星の場合はEUV光度が大きいので散逸大気も大きくなる→トランジットシグナルも大きくなる(EUV光度はTu et al. 2015を参考)



主星が若く、EUV光度が強くて恒風が強い( $\dot{M}_* > 100\dot{M}_\odot$ )とLy $\alpha$ トランジットが小さくなり得る