



Interpreting the source temperature of fast and slow winds using a 16 moments multi-species model

Paul Lomazzi¹, Alexis P. Rouillard¹, Simon R. Thomas¹, Nicolas Poirier², Victor Réville¹, Michael Lavarra¹

¹ IRAP, Université Toulouse III - Paul Sabatier, CNRS, CNES, Toulouse, France, *Email: plomazzi@irap.omp.eu

² Rosseland Center for Solar Physics, University of Oslo, Norway



Composition du vent solaire : H \approx 90-95%, He \approx 5-9%, ions mineurs \approx 1% (O, C, Mg, Ne, Fe, N, Si,S)

→ H domine la dynamique

He -> Impact important sur la dynamique [voir poster de S.Thomas]

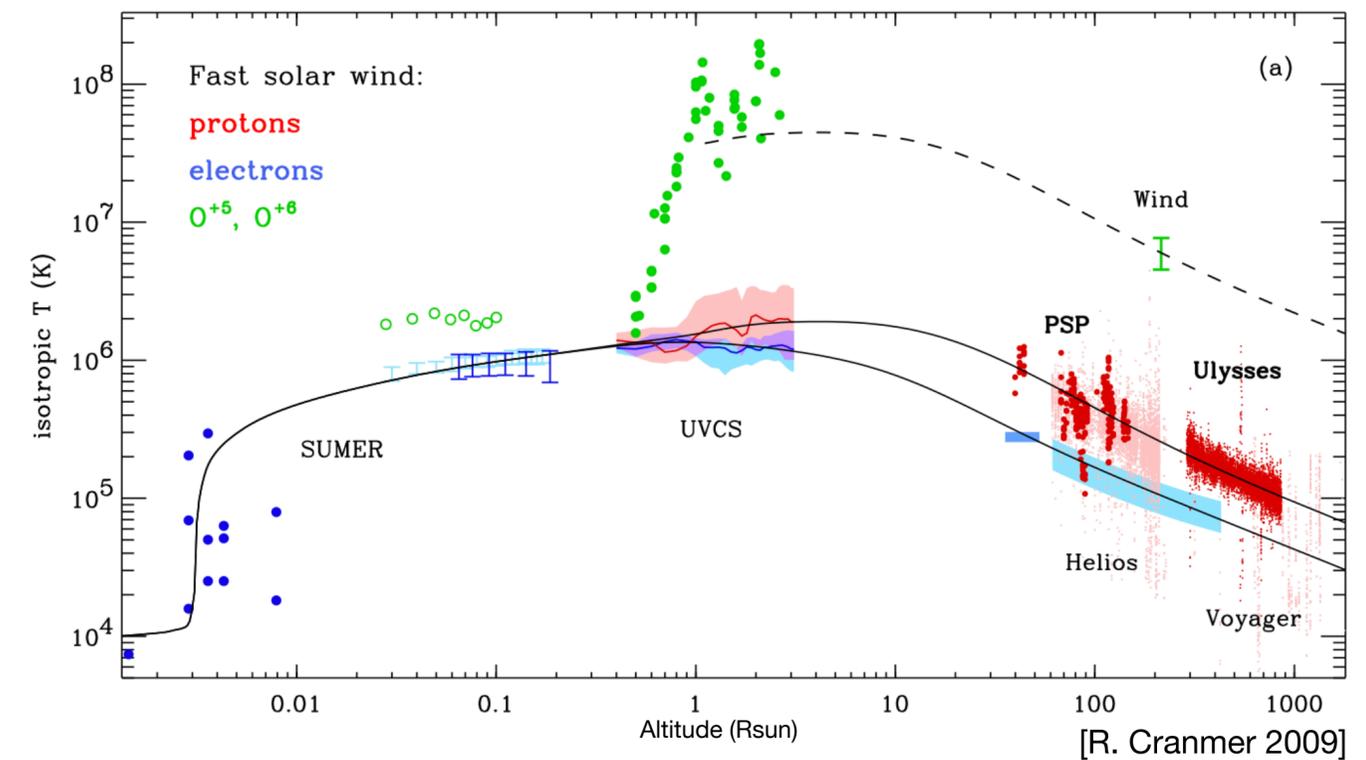
Ions mineurs -> Très faible impact sur la dynamique (can have an impact on radiative cooling -> high number of electrons)

En revanche -> Agissent comme des traceurs des processus ayant lieu dans l'atmosphère

Contraint les mécanismes de chauffage

L'état de charge donne des informations sur les conditions à la source, notamment la température

L'état de charge est fixé dans la partie encore collisionnelle de la couronne → "Frozen-in"



Calcul des états de charges à l'aide d'un modèle simple

Continuity equation $\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla(n_i u_i) = n_e(n_{i-1}C_{i-1} - n_i(C_i + R_{i-1}) + n_{i+1}R_i)$

Hypothesis : **Steady state** ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$),
same velocities for all the species
($u_i = u$)



Ionisation rate C(Te) **Recombination rate R(Te)**

$$u \frac{\partial y_i}{\partial r} = n_e (y_{i-1} C_{i-1} - y_i (C_i + R_{i-1}) + y_{i+1} R_i), \quad \text{where} \quad y_i \equiv \frac{n_i}{\sum_{i=0}^Z n_i}$$

Ionic fraction

Competition between t_{ion} and t_{exp} -> Thermal equilibrium or "Frozen-in"

$$t_{\text{ion}} \equiv \frac{1}{n_e(C_i + R_{i-1})}; \quad t_{\text{exp}} \equiv \left| \frac{u}{n_e} \frac{\partial n_e}{\partial r} \right|^{-1}$$

Y-Ko et al. suggèrent que l'état de charge est modifié par : **différentiel de vitesse entre les ions**
particules supra-thermiques

-> **Nécessité de comparer avec un modèle plus complet**



ISAM (Irap Solar Atmospheric Model)

[Marchaudon, Belly 2015]
[Lavarra PhD 2021]
[Poirier PhD 2022]



ISAM est un code **1D multi-espèces** incluant les équations d'évolution des **flux de chaleurs** parallèles et perpendiculaires

Le système d'équations fluides est obtenu par intégrations successives de l'équation de Boltzmann où la fonction de distribution est supposée perturbée autour d'une fonction Bi-Maxwellienne

$$\frac{\partial}{\partial t} f_s + \mathbf{v}_s \cdot \nabla_r f_s + \frac{1}{m_s} \mathbf{F}_s \cdot \nabla_v f_s = \frac{\delta f_s}{\delta t} \quad f_s = f_s^{BM} (1 + \chi_s)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} u_s + u_s \nabla_{\parallel} u_s + \underbrace{\frac{\nabla_{\parallel} n_s k_b T_s^{\parallel}}{\rho_s}}_{\text{Pressure}} + \underbrace{\frac{k_b}{m_s} (T_s^{\parallel} - T_s^{\perp}) \frac{1}{A} \nabla_{\parallel} A}_{\text{Mirror force}} + \underbrace{\frac{GM_{\odot}}{r^2} \cos(\theta)}_{\text{Gravity}} - \frac{1}{m_s n_s} F_s = \underbrace{\frac{\delta u_s}{\partial t}}_{\text{Particle collisions}}$$

Il permet de:

- Modéliser le vent depuis la base de la chromosphère au vent solaire
- Modéliser l'**anisotropie de température**
- Résoudre **H, e, He, O, Mg, Fe, ..** ions et neutres
- Prendre en compte les différents types de collisions (ion-neutre (résonante et non-résonante), ion-ion, neutre-neutre) [Nicolas Poirier PhD Thesis 2022]
- Prendre en compte l'**ionisation** et la **recombinaison**

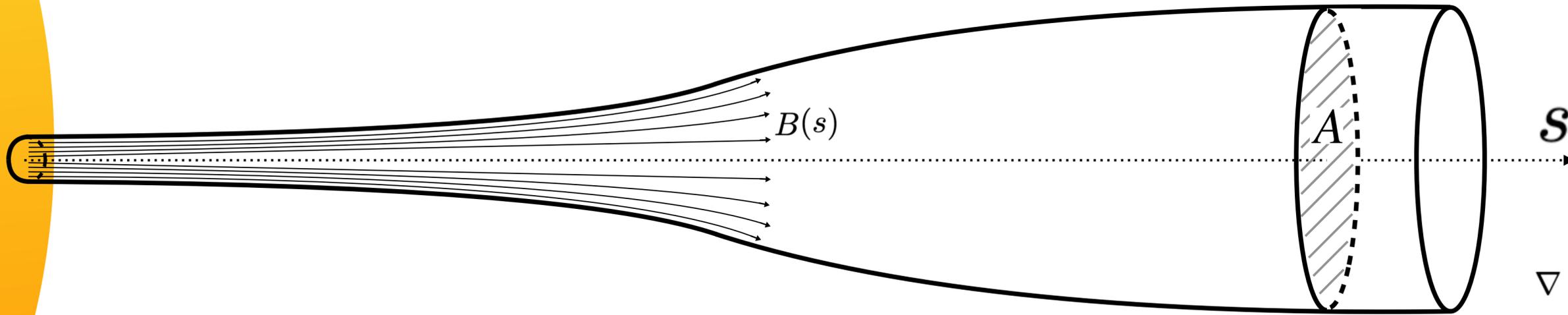
$$\frac{\delta u_s}{\delta t} = \frac{1}{n_s m_s} \left[\underbrace{\sum_{t \neq s} n_s m_s v_{st} (u_t - u_s)}_{\text{Friction force}} + \underbrace{\sum_{t \neq s} v_{st} \frac{z_{st} \mu_{st}}{k_b T_{st}} \left(\frac{q_s^{\parallel} + 2q_s^{\perp}}{2} - \frac{q_t^{\parallel} + 2q_t^{\perp}}{2} \frac{n_s m_s}{n_t m_t} \right)}_{\text{Thermal force}} \right]$$

Pour simuler le vent solaire, on joue sur 2 paramètres :

L'expansion du champ magnétique et le **profil de chauffage**



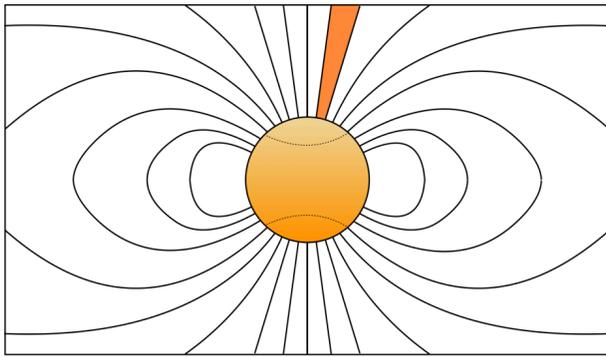
Facteur d'expansion et chauffage



$$f(r) = \frac{f_{\max} e^{(r-R_1)/\sigma} + f_1}{e^{(r-R_1)/\sigma} + 1}$$

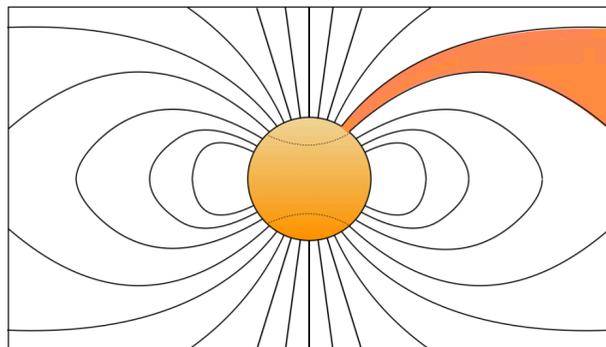
[Kopp&Holzer,1976]

$$\nabla \cdot (*) = \frac{1}{A(s)} \frac{\partial}{\partial s} (A(s) *) = B \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{*}{B} \right)$$



Vent rapide provenant des trous coronaux

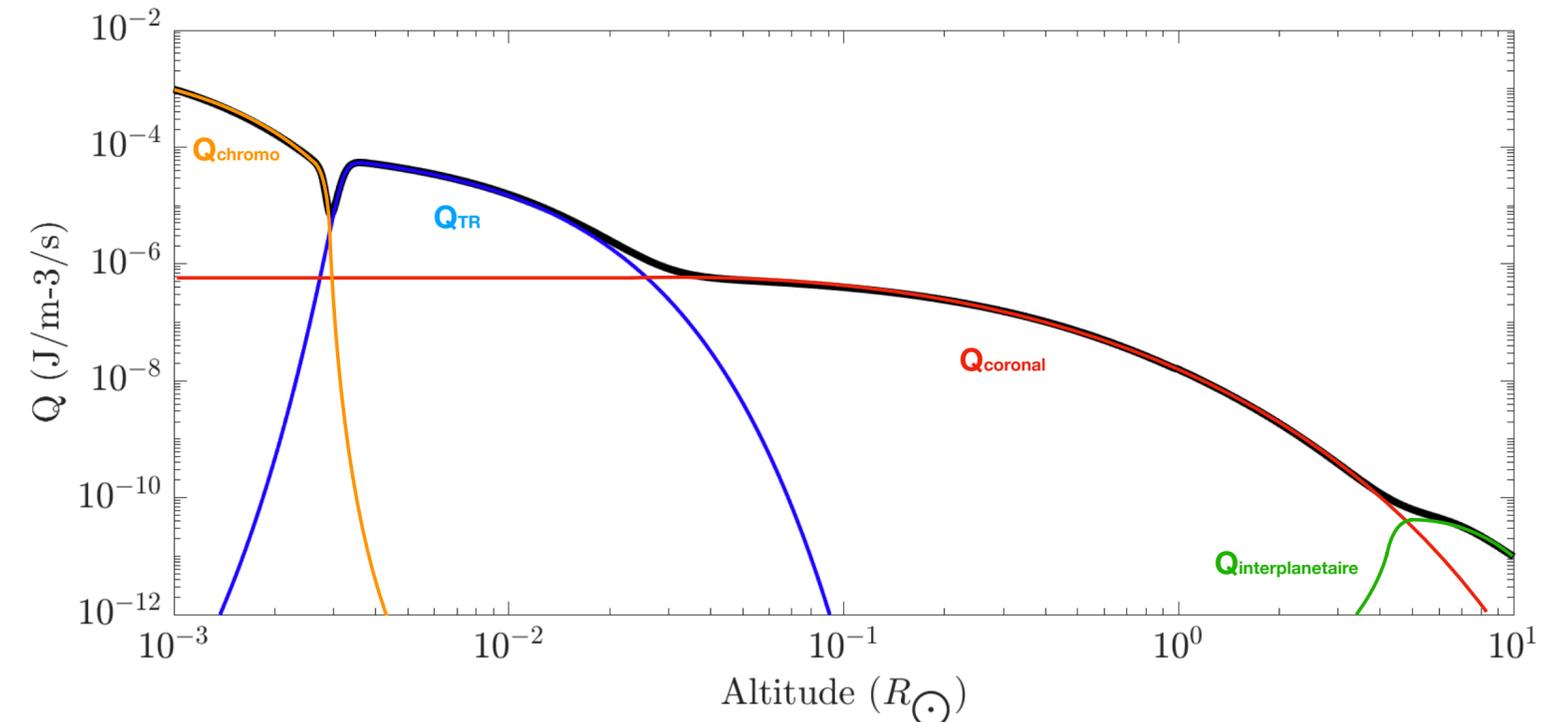
Faible facteur d'expansion



Vent lent provenant de la bordure de trous coronaux

Fort facteur d'expansion

$$F_h = F_{B0} \left(\frac{A_0}{A} \right) \exp \left[-\frac{s - R_{\odot}}{H_f} \right] \quad \text{Withbroe (1998)}$$



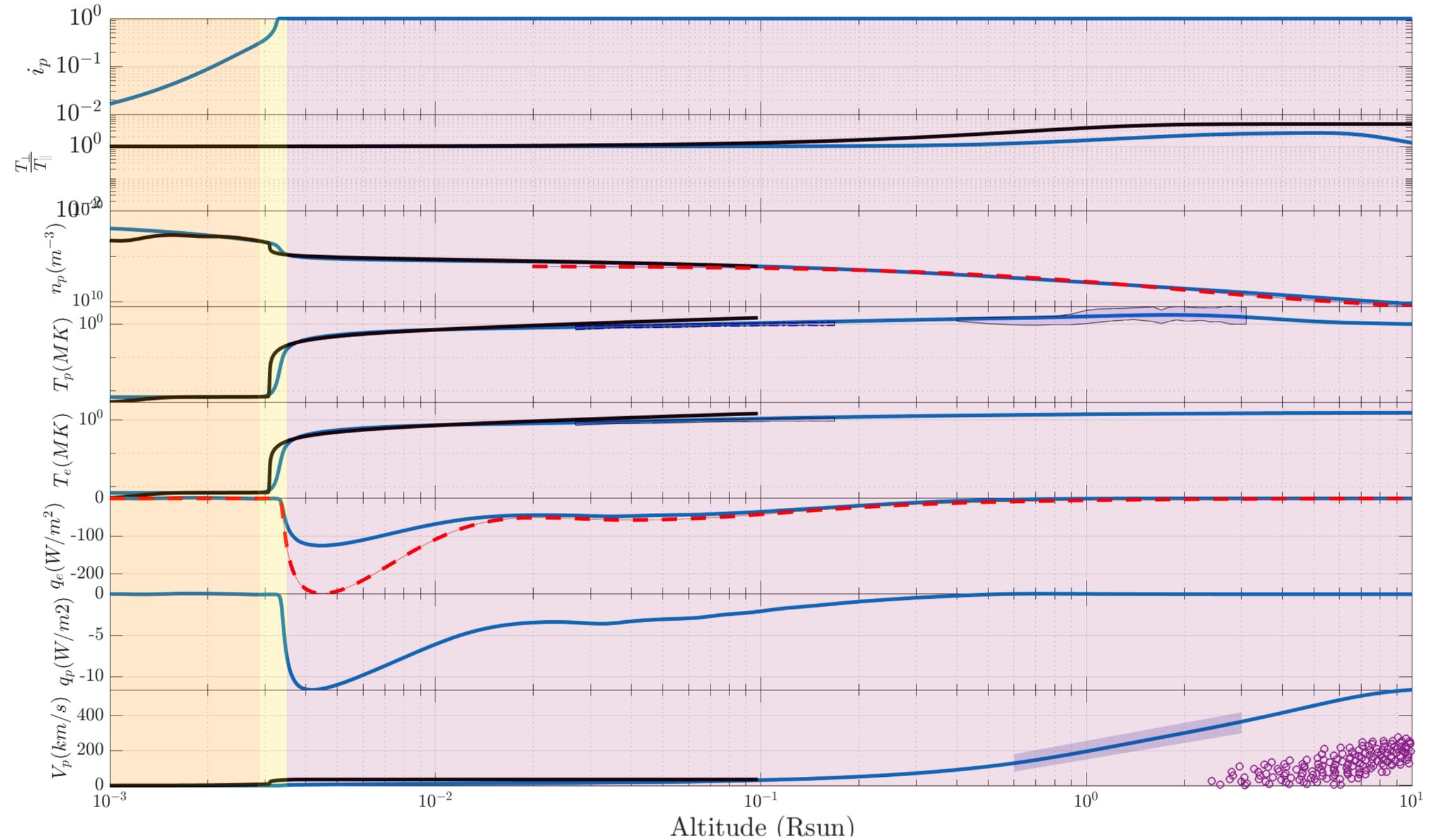
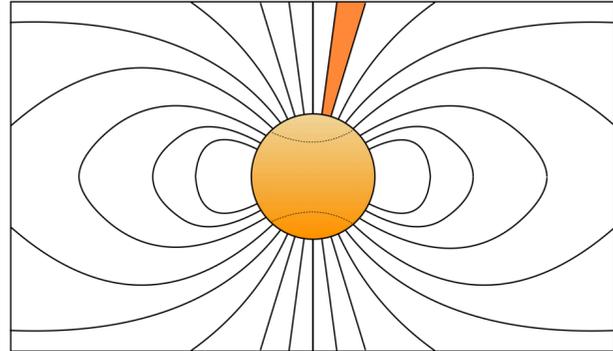


Figure 1: Some parameters from Fast wind simulation. ISAM Ionisation fraction, temperature anisotropy, density, temperature and velocity profiles (blue line) are compared with the Avrett chromospheric model⁶ (Black lines). Temperatures are compared with SUMER off-limb electron temperatures from Landi (2008)⁷ (blue patches in the low corona) and with UVCS (Cranmer 2008)⁸ (blue patches in the high corona). Velocity is also compared with UVCS in the high corona.

Vent lent provenant de la bordure des trous coronaux

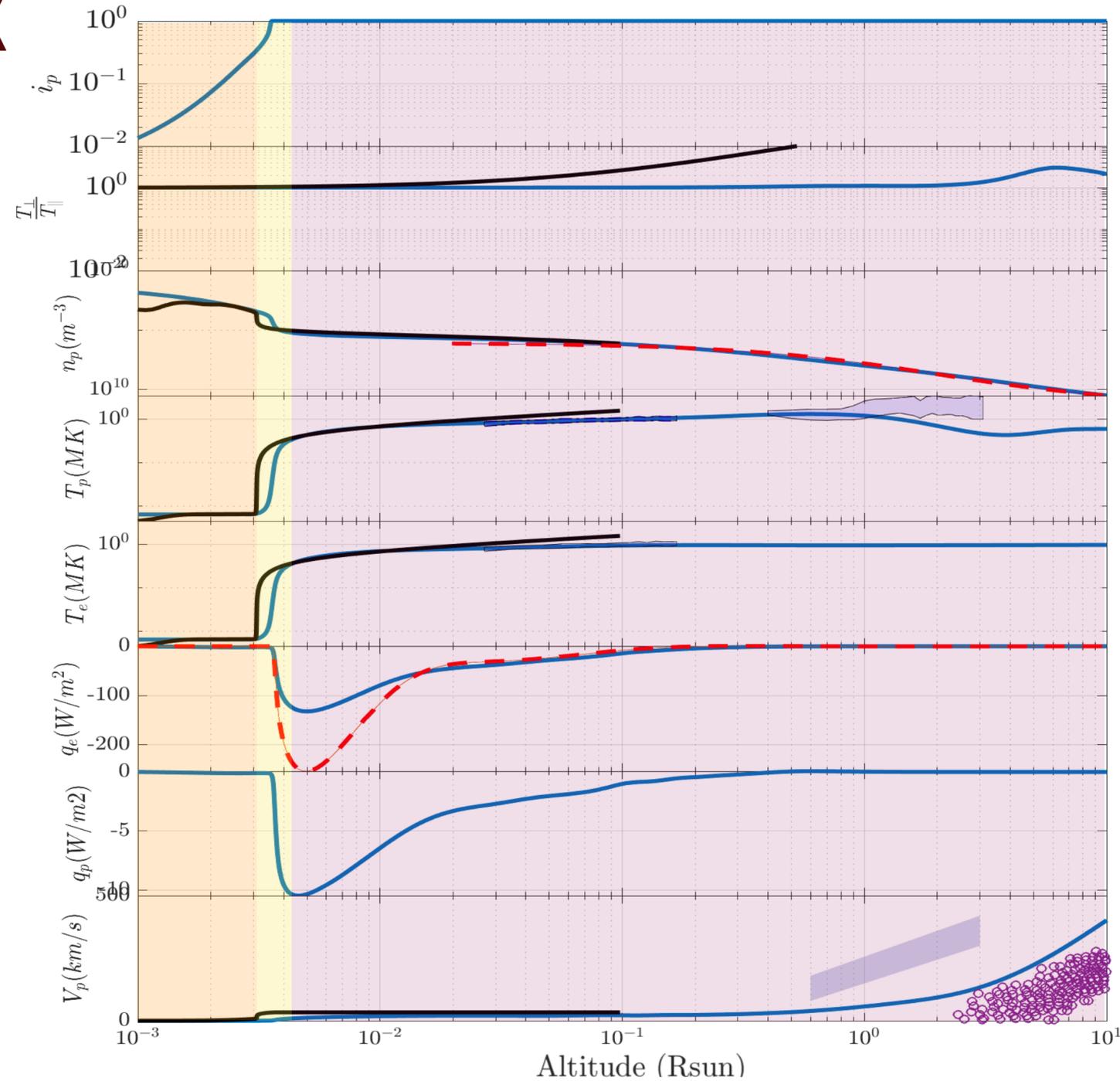
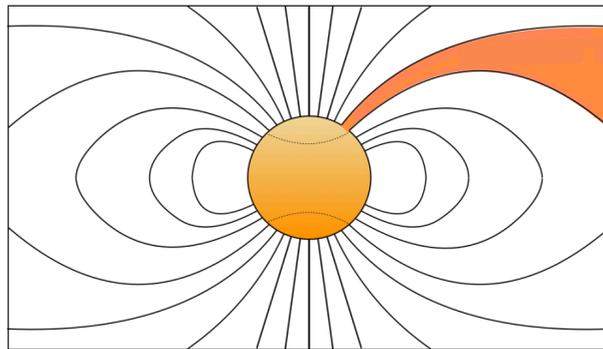


Figure 1: Some parameters from Slow wind simulation. ISAM Ionisation fraction, temperature anisotropy, density, temperature and velocity profiles (blue line) are compared with the Avrett chromospheric model⁶ (Black lines). Temperatures are compared with SUMER off-limb electron temperatures from Landi (2008)⁷ (blue patches in the low corona) and with UVCS (Cranmer 2008)⁸ (blue patches in the high corona). Velocity is also compared with UVCS in the high corona.

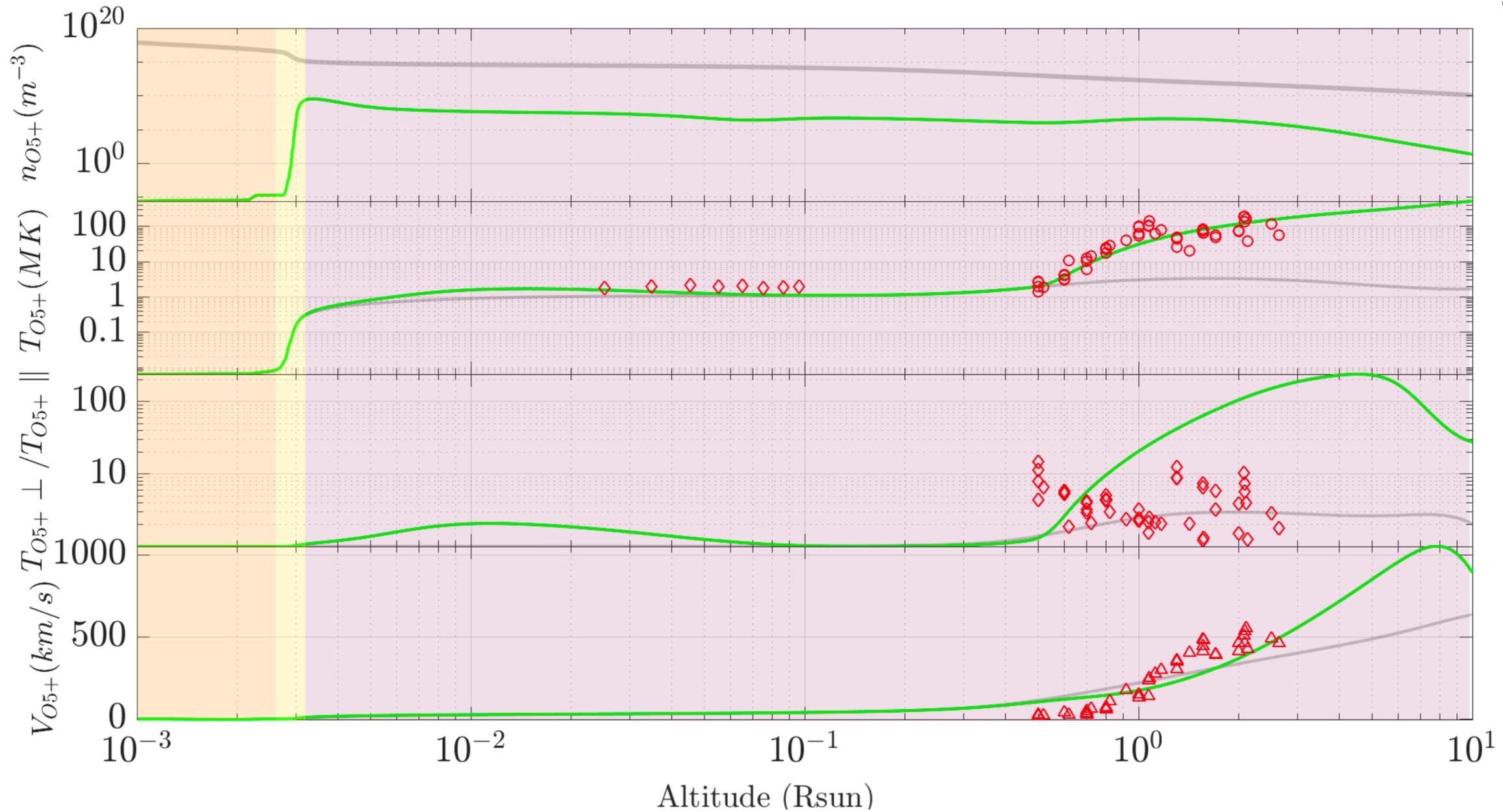


Figure2: Density, temperature, temperature anisotropy and velocity of OVI from ISAM (green lines) compared with SUMER off-limb kinetic temperatures (Landi & Cranmer 2009) (red diamond in the low corona) and with UVCS (Cranmer et al. 2008) (red markers in the high corona). Density, temperatures, temperature anisotropy and velocity of protons are plotted in grey lines for comparison.

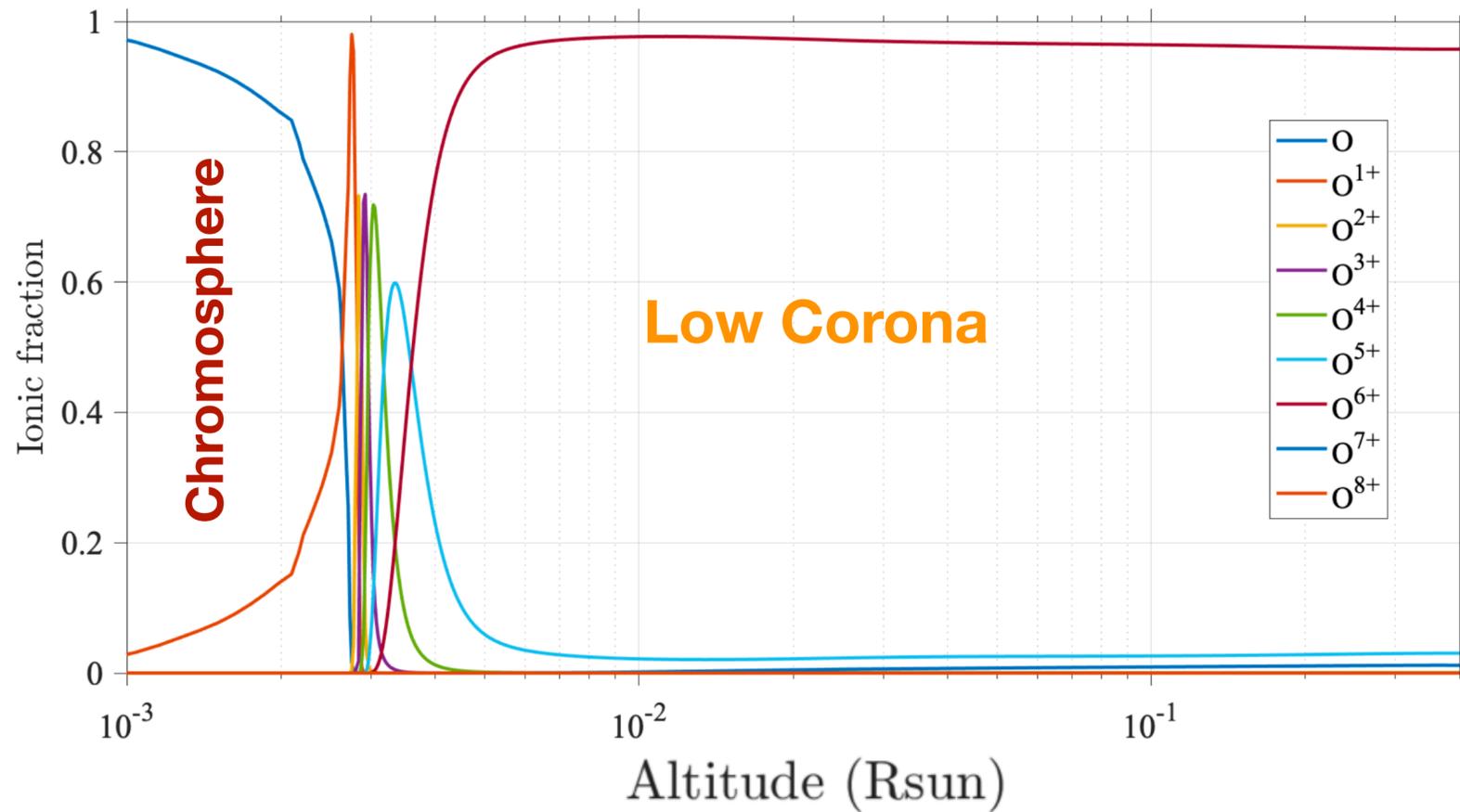


Figure 3: Ionic Fraction of Oxygen as a function height above the solar surface (in solar radii). Only O5+, O6+ and O7+ have a non-negligible density in the corona

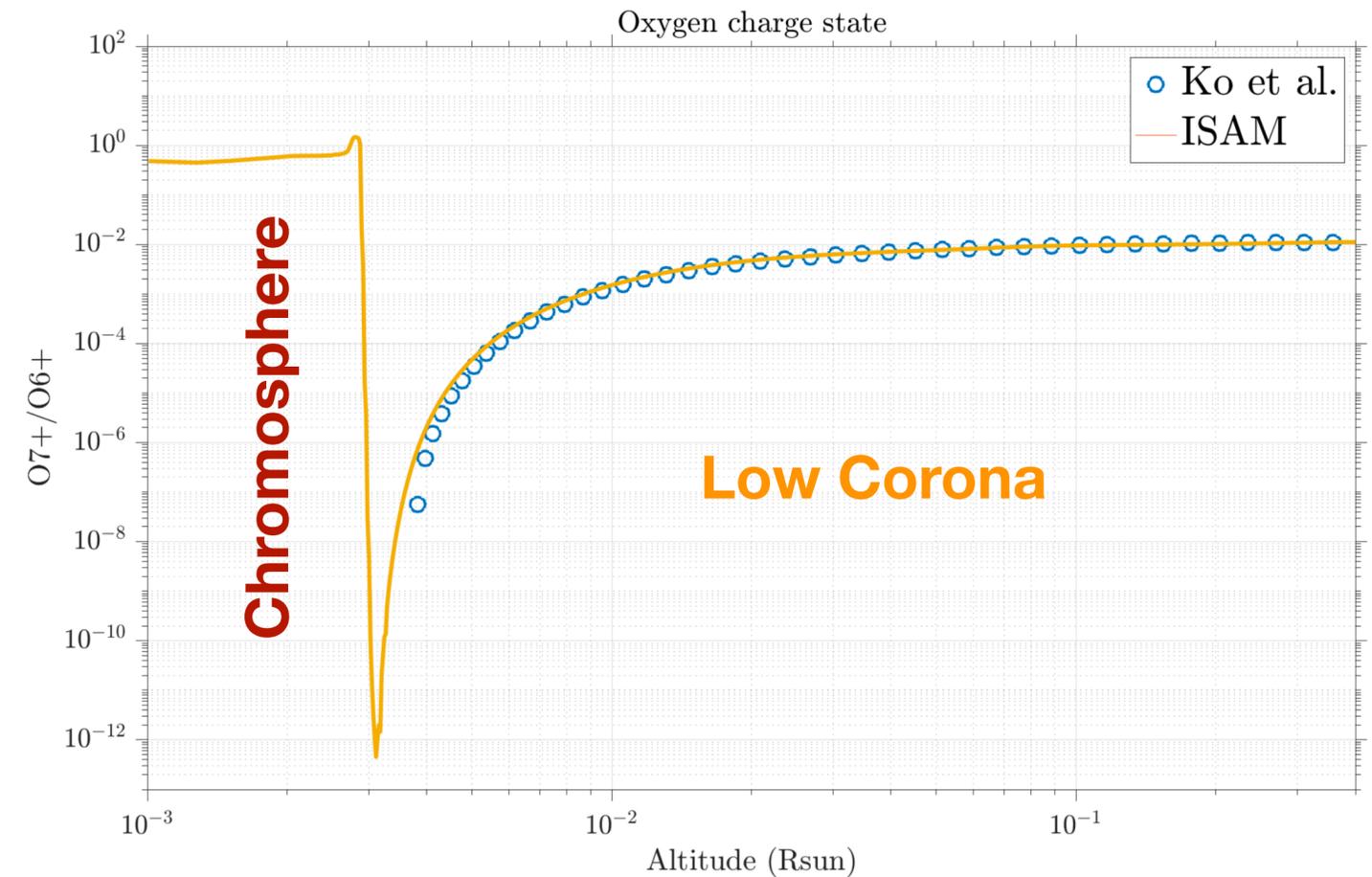
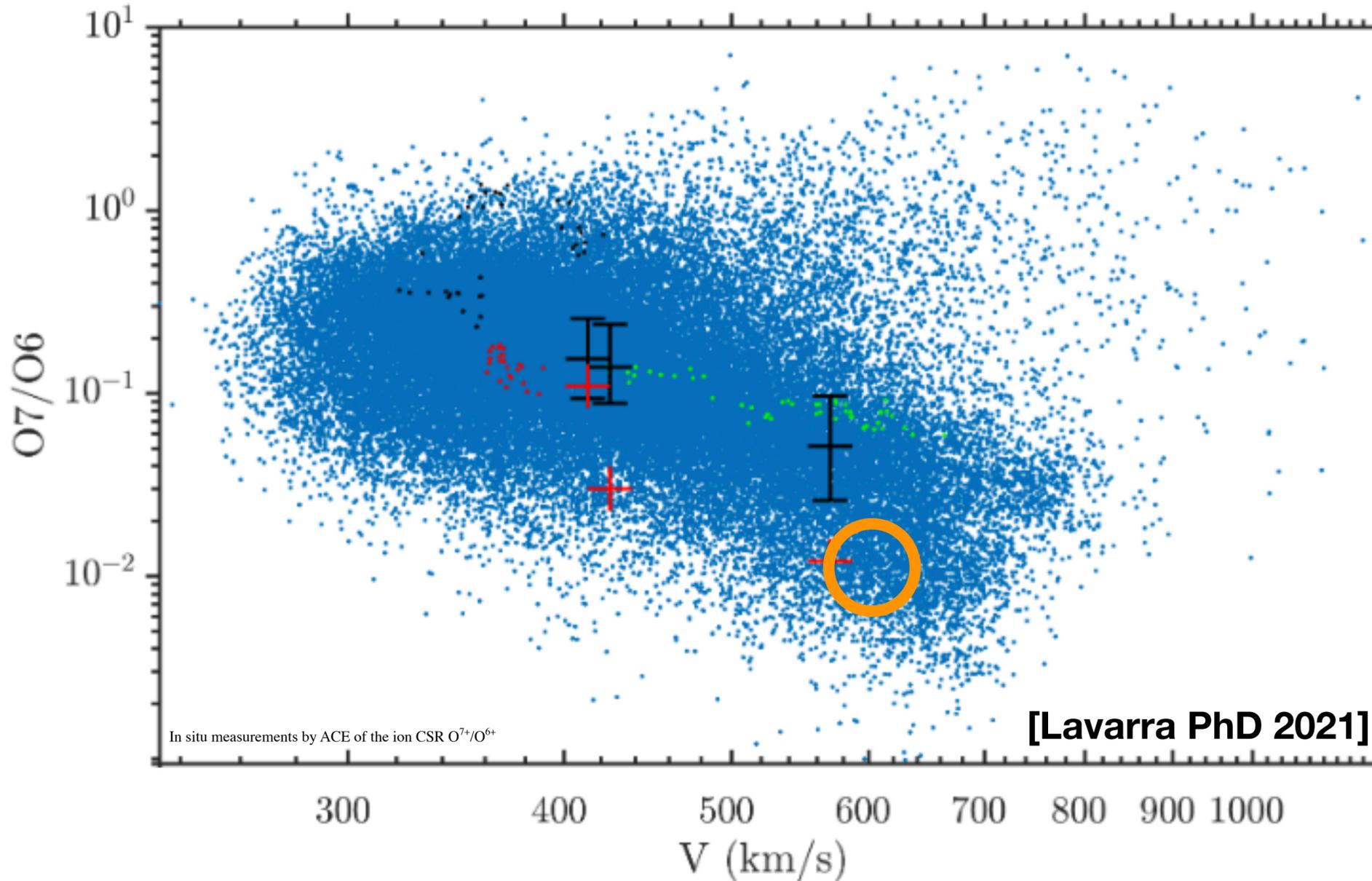
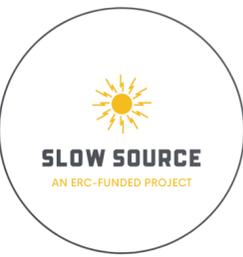


Figure 4: Charge State ratio of O7+/O6+ as calculated by ISAM (yellow line) and by Ko et al. method (blue circle)

Les vitesses des différents ions sont très proches grâce à la friction, l'hypothèse de Y-K Ko et al. est vérifiée.



On trouve un état de charge $O7+/O6+$
en accord avec les états de charges de
vents rapides



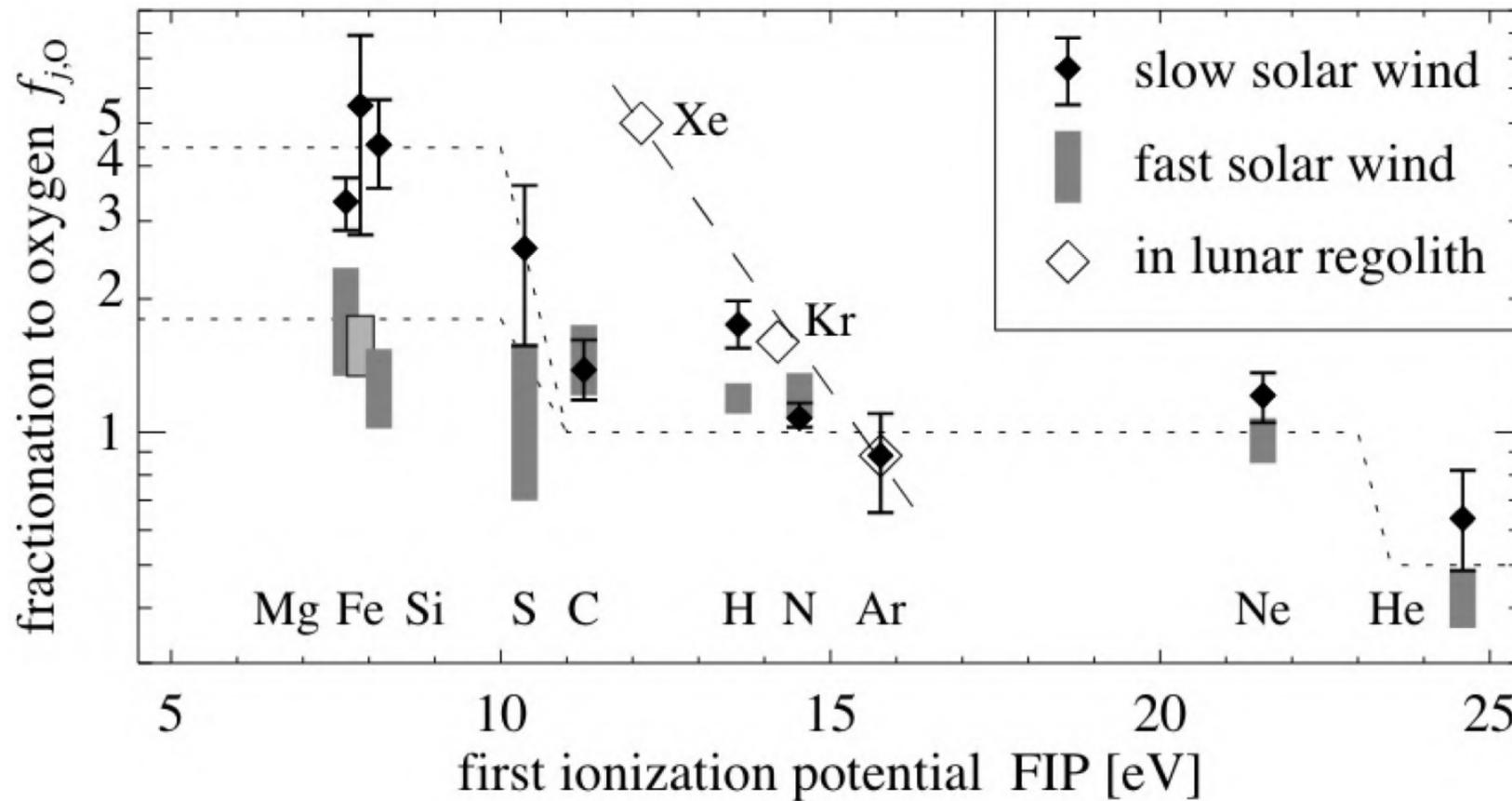
Thank you



Travaux futurs : effet FIP et regulation d'abondance

$$\text{FIP bias} = \frac{A_X/A_O |_{z=z_i}}{A_X/A_O |_{z=z_0}}$$

[Peter et al. 1998]



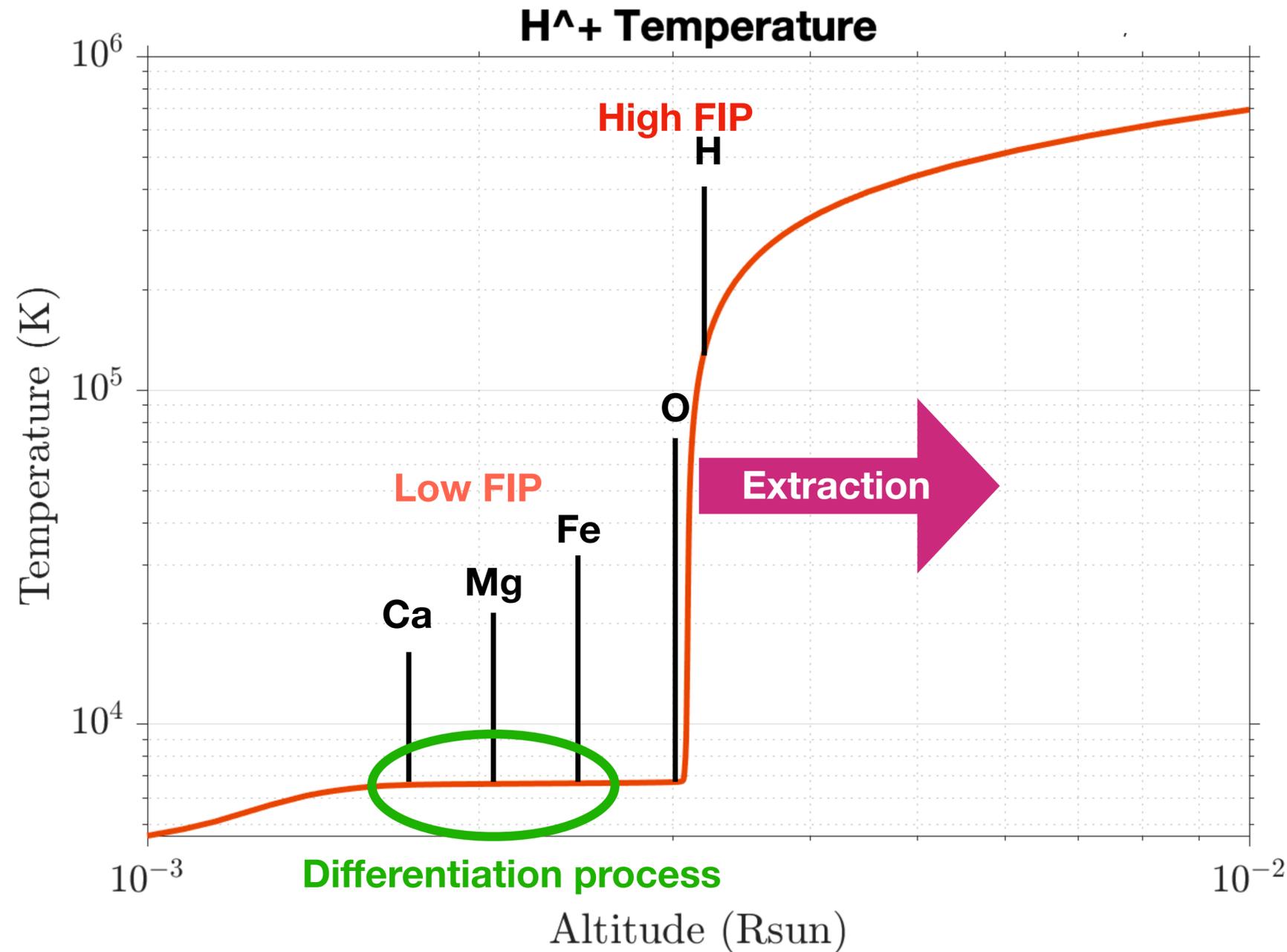
Haut FIP -> O, H etc..

Bas FIP -> Mg, Fe etc..

Enrichment of low 'FIP' elements (<10eV e.g. Fe, Mg)

Mass independent process

Travaux futurs : effet FIP et regulation d'abondance



Les différentes couches de l'atmosphère sont **couplées** et **ne peuvent être considérées indépendantes**

Chromosphère encore **partiellement neutre** et **collisionnelle**

- > **Chauffage** (Ondes compressive, reconnection magnétique..)
- > **Refroidissement radiatif** (Lyman)

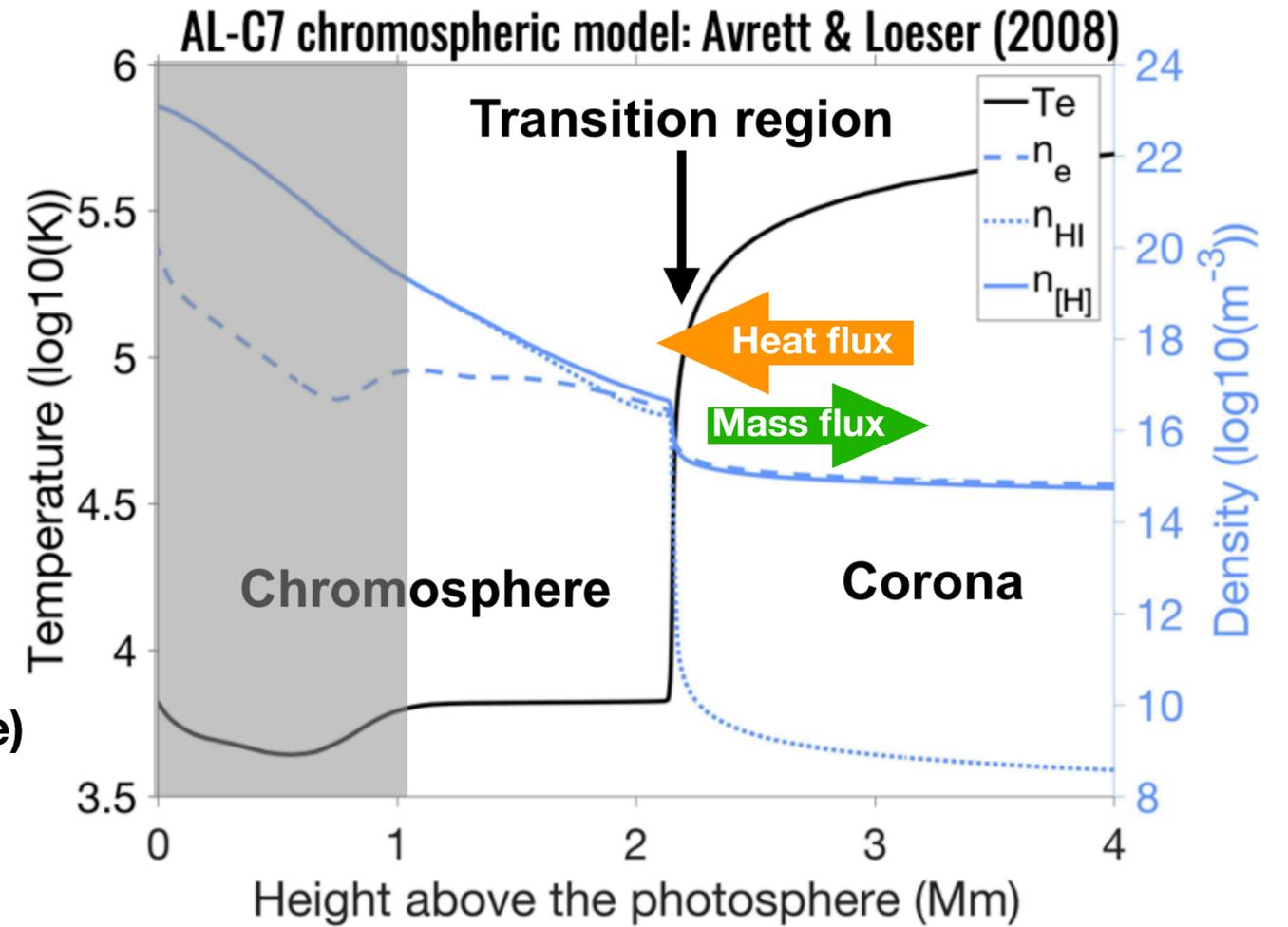
Lorsqu'il ne reste plus de neutres -> hausse de la température :
Region de transition (équilibre des pressions)

Couronne **totalément ionisée** (partiellement collisionnelle en basse altitude)

- > **Chauffage** (Resonance ion-cyclotron, stochastique..)
- > **Flux de chaleur** -> **transporte l'énergie vers la chromosphère**



Augmente le flux de masse dans le vent solaire (évaporation chromosphérique)



[N.Poirier 2023]

Le **champ magnétique** contrôle le profil de chauffage

$$H \propto f_{\text{exp}}^{-1.1} \quad [\text{Pinto \& Rouillard 2017}]$$

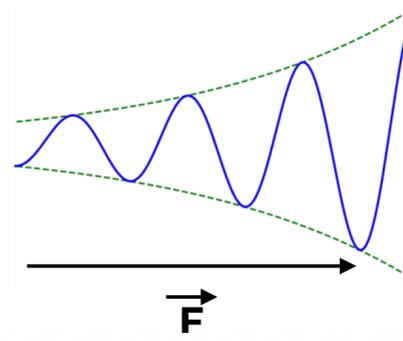
$$F \propto B_0$$



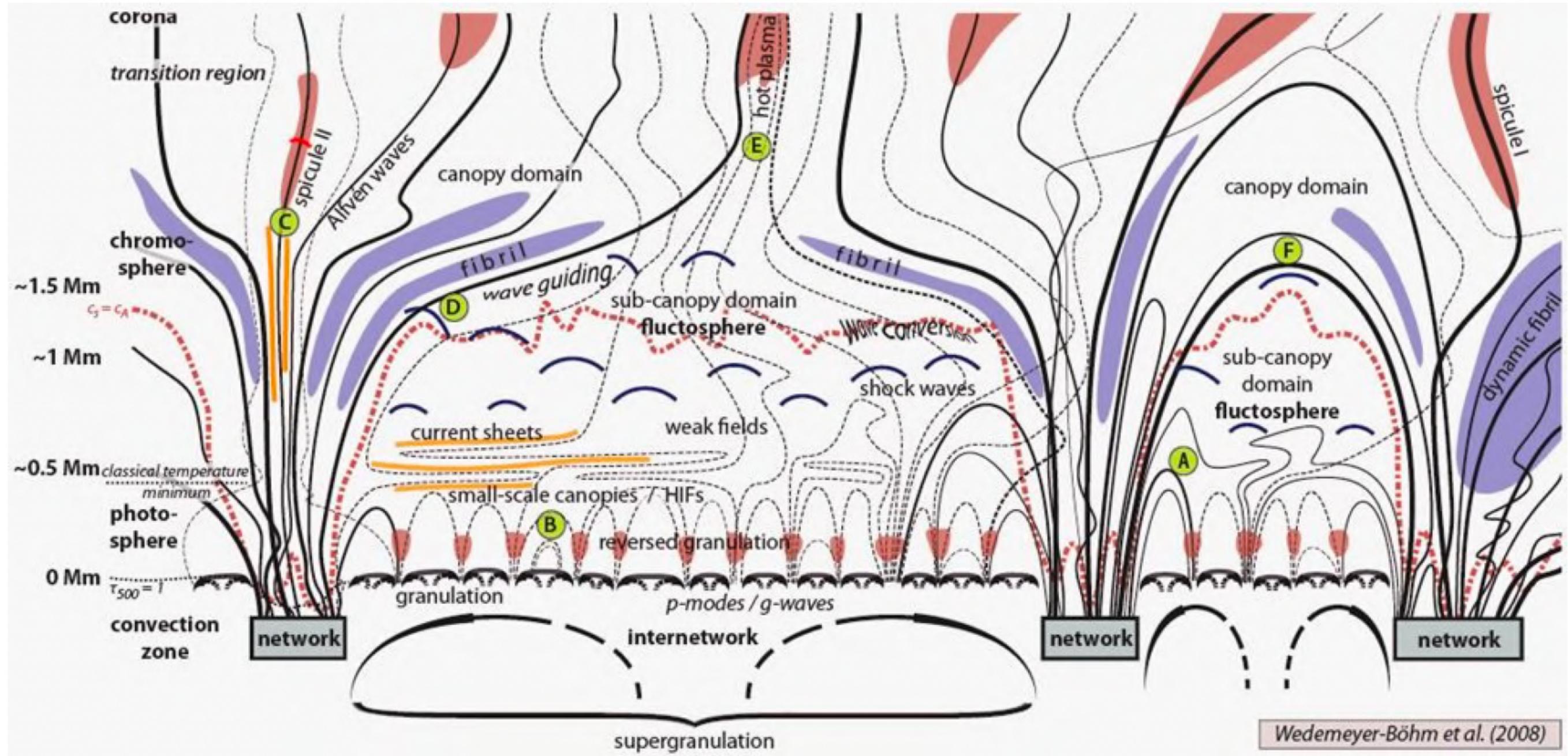
Chauffage en basse couronne augmente le flux de masse

Chauffage après le point sonique va augmenter la vitesse du vent

$$a_{w,s} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{\langle \delta E^2 \rangle}{2|B|^2} \right]$$



[Laming 2015]



The Sun : the importance of minor ions

