



Modelos Cromosféricos en Estrellas de Tipo Solar Utilizando la Emisión Térmica a Longitudes de Onda Milimétrica, Sub-Milimétrica e Infrarroja

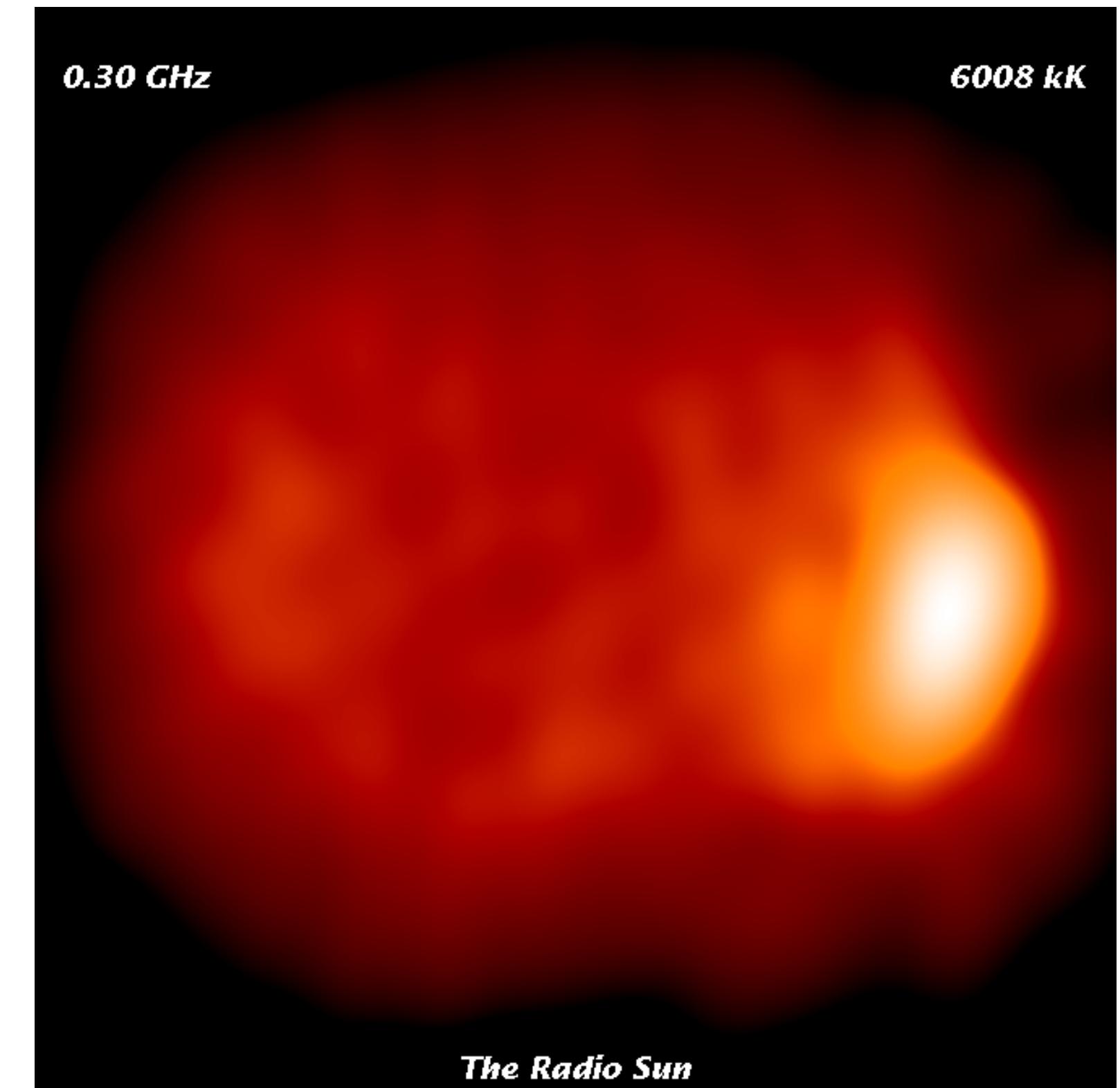
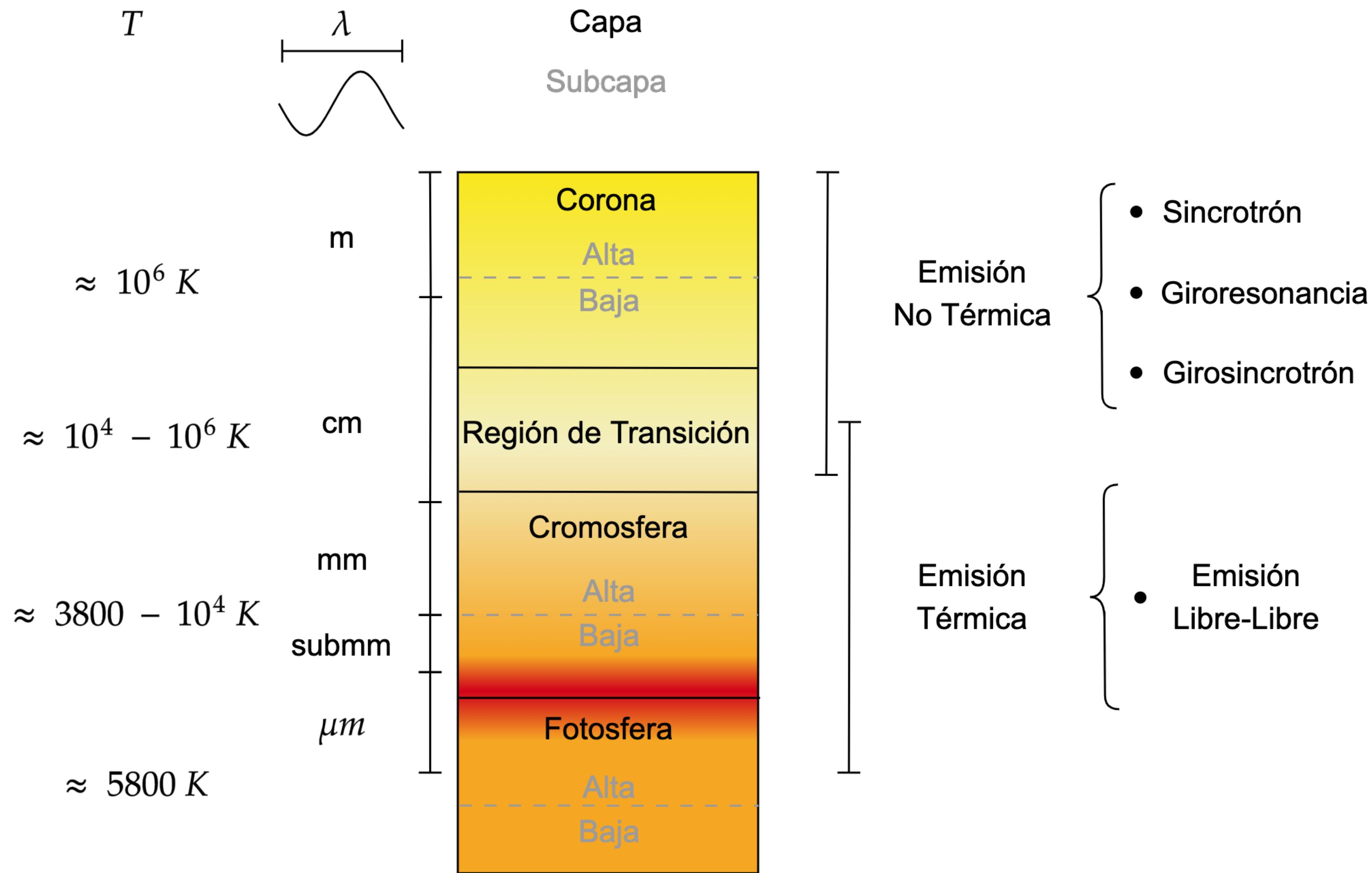
Francisco Tapia Vázquez¹, Víctor De la Luz² y Luis Zapata¹

¹ Instituto de Radioastronomía y Astrofísica, UNAM, Campus Morelia

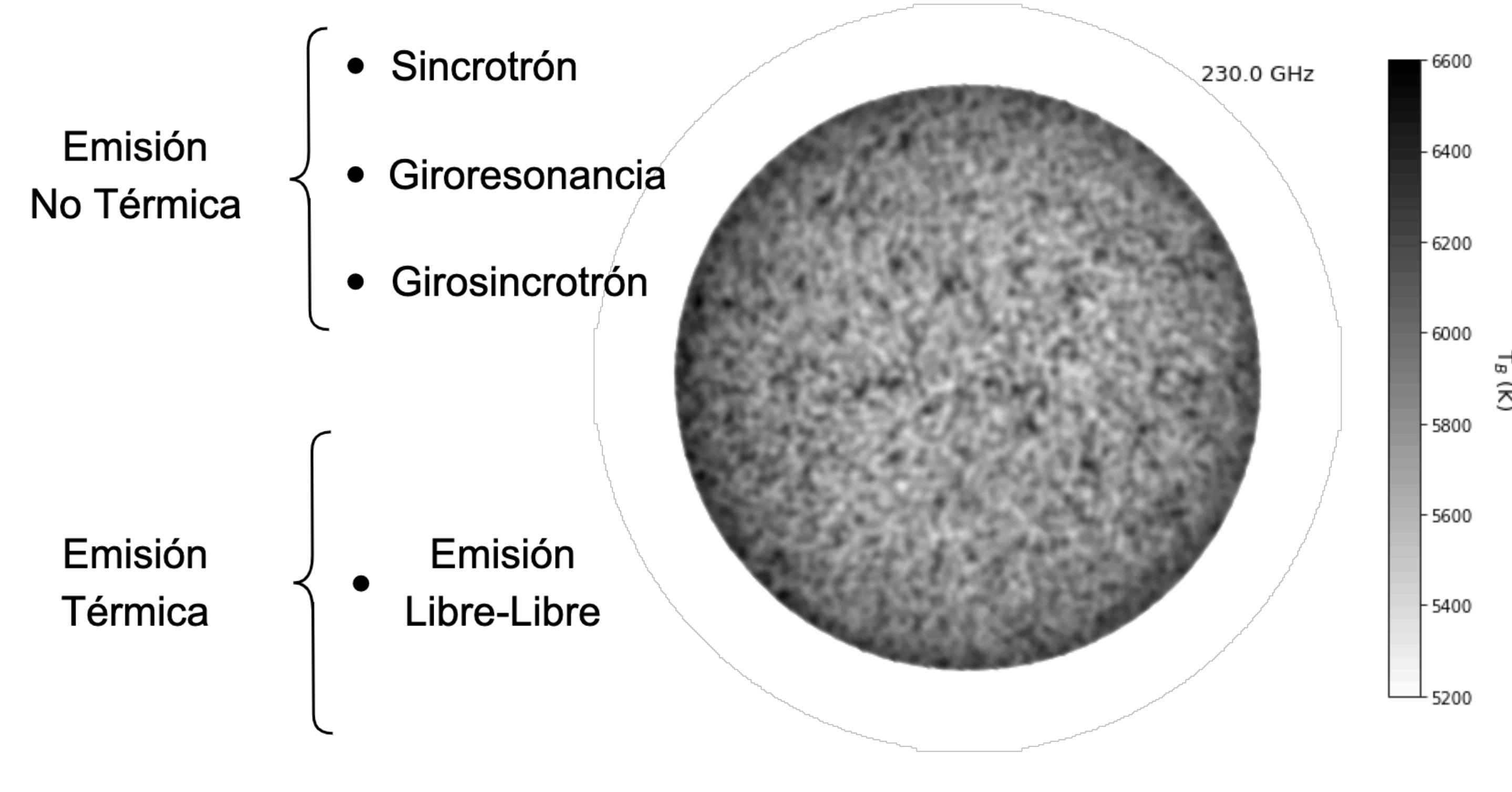
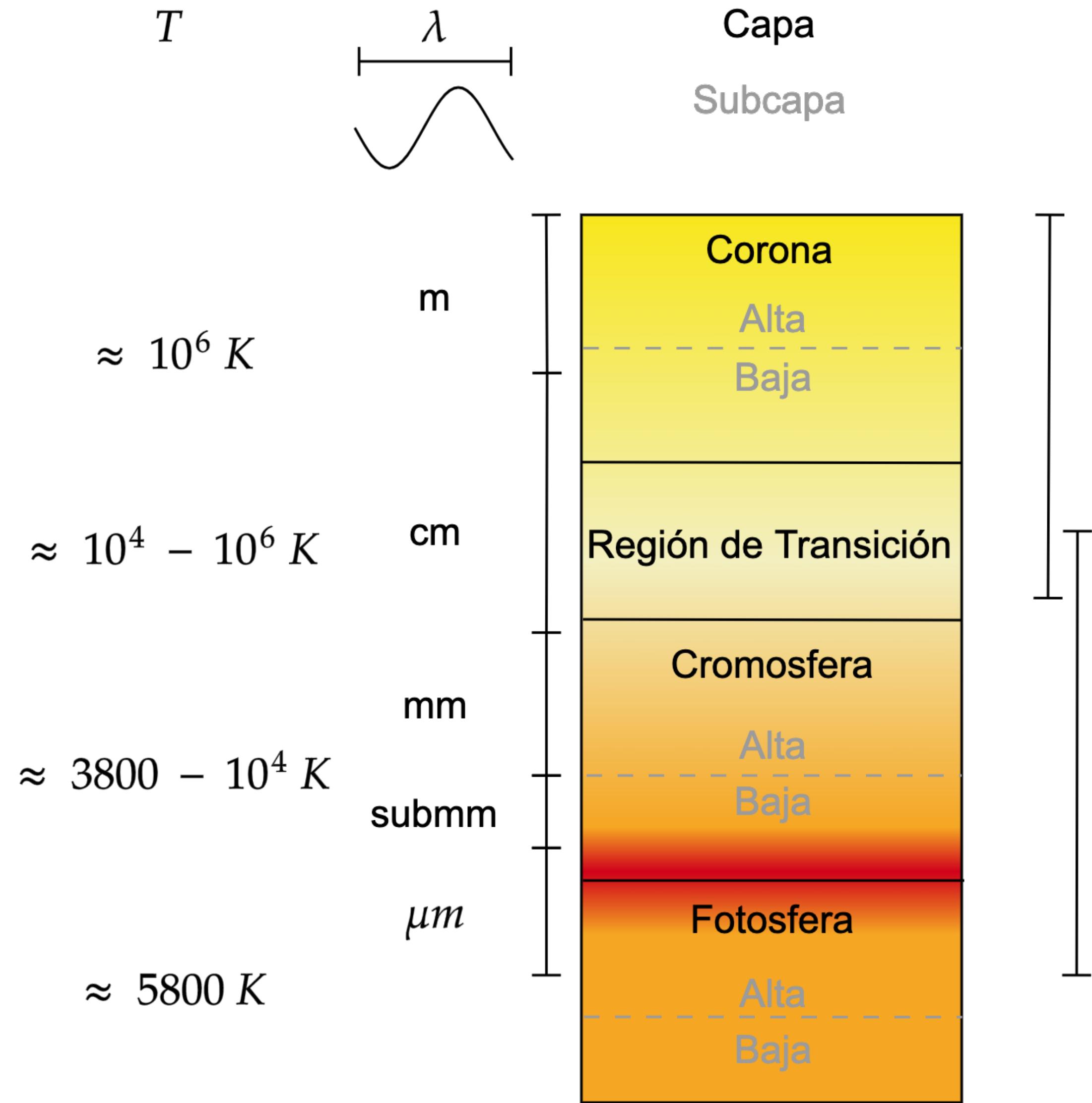
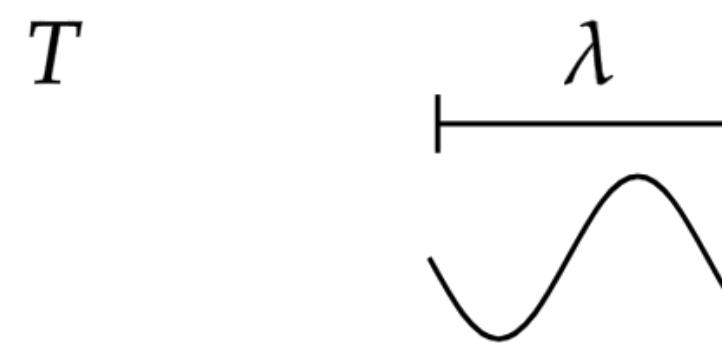
² Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, UNAM, Campus Morelia

Junio/2021

Atmósfera Solar

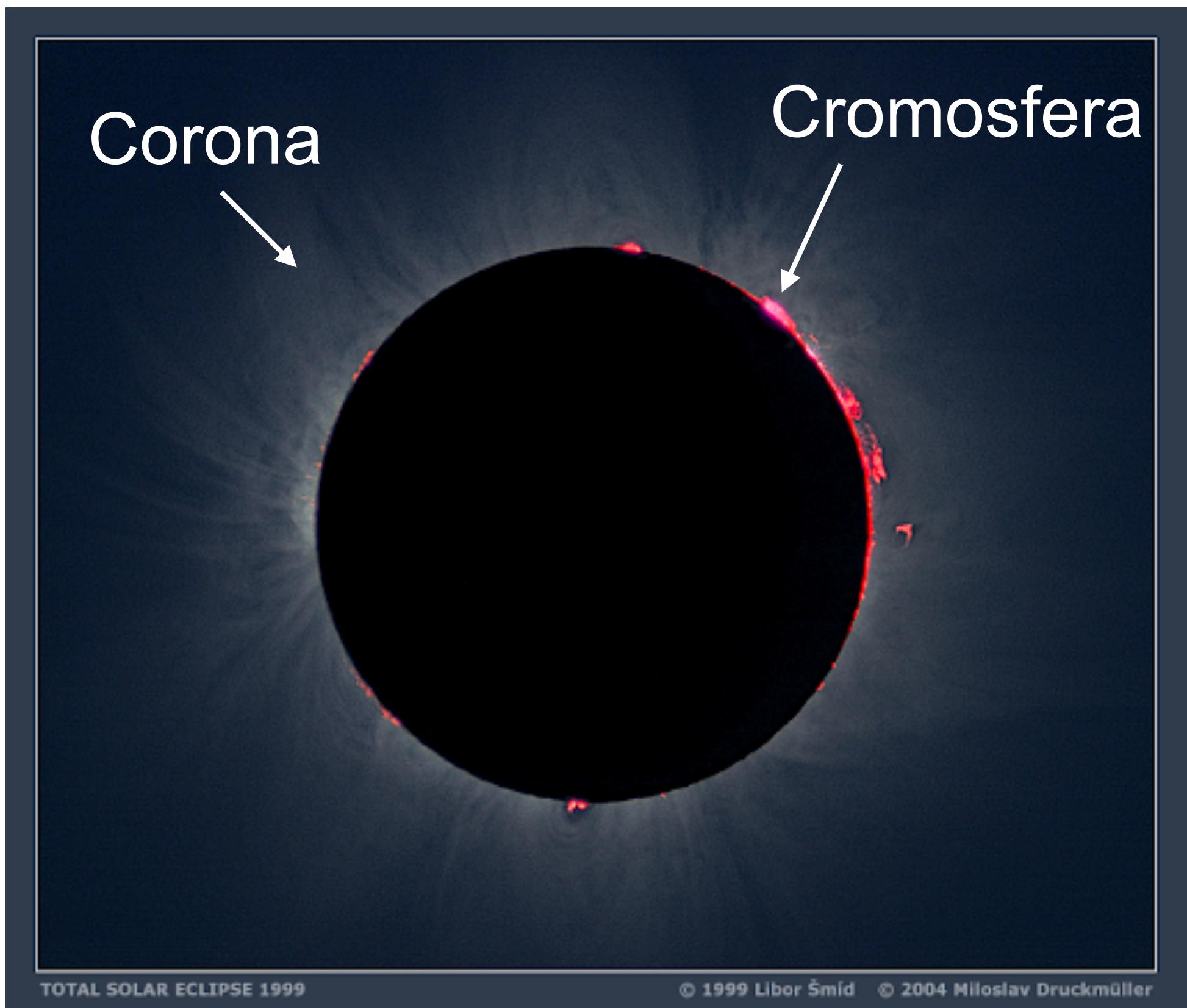


Atmósfera Solar



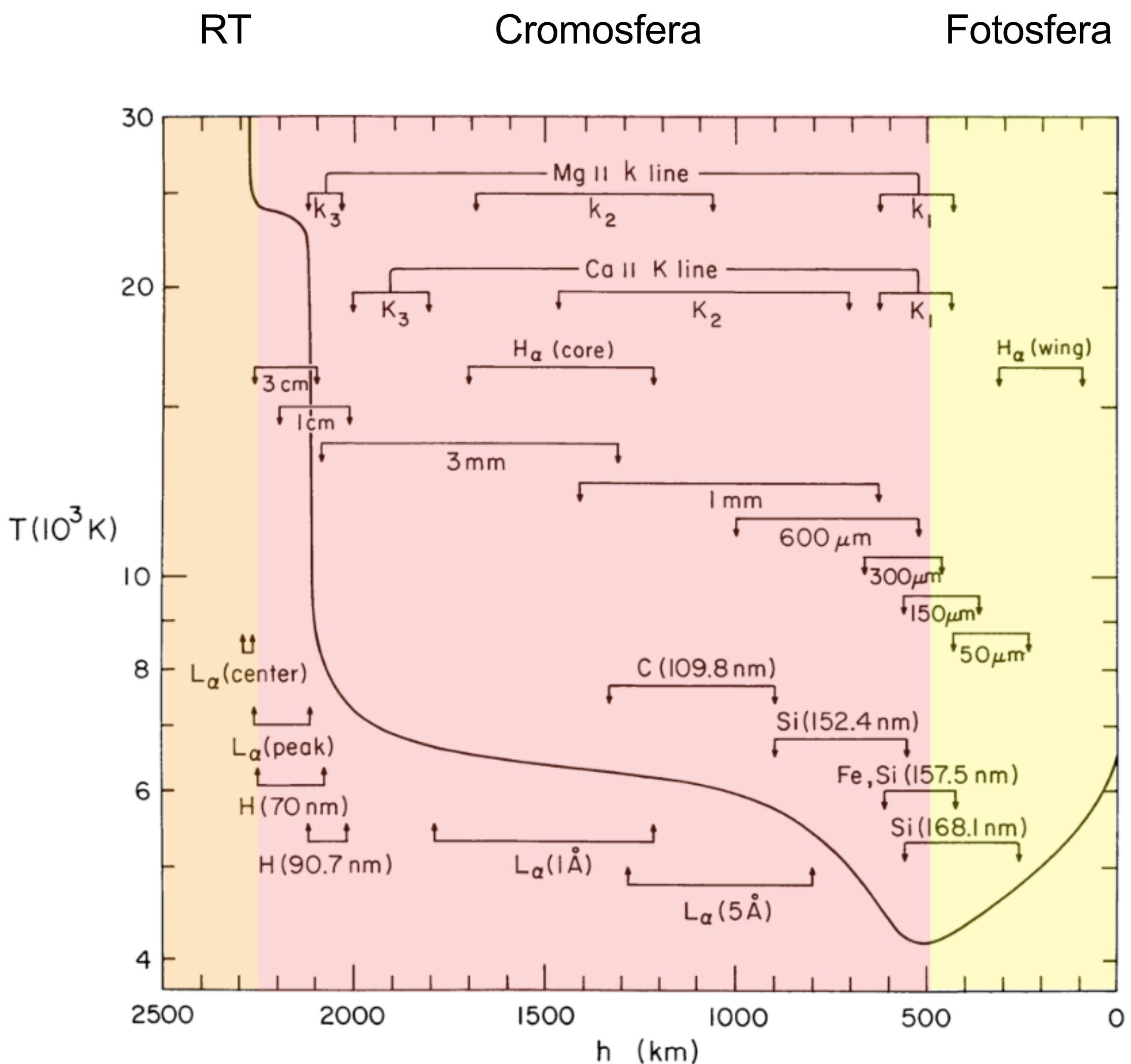
La Cromosfera

- Los primeros modelos identificaron dos regiones: una caliente y una fría (Van de Hulst, 1953; Athay, 1959).
- La región fría se asoció con la cromosfera debió a que las temperaturas de brillo eran similares a las que se obtenían con las líneas de CaII y H α (Pagel, 1964).
- La cromosfera se define como la capa atmosférica en donde las líneas de absorción cambian a marcadas líneas de emisión de átomos neutros y parcialmente ionizados (Linsky, 2017).
- Las observaciones muestran que el principal mecanismo de emisión en el continuo es Bremsstrahlung térmico (Gay, 1970; Kundu, 1971).
- La emisión a 800 GHz sugiere la existencia de una región de baja temperatura (Gezari et al., 1973).
- Observaciones de CO restringen un mínimo de temperatura de por lo menos 4400 K (Goldberg and Müller, 1953).



Modelos Cromosféricos

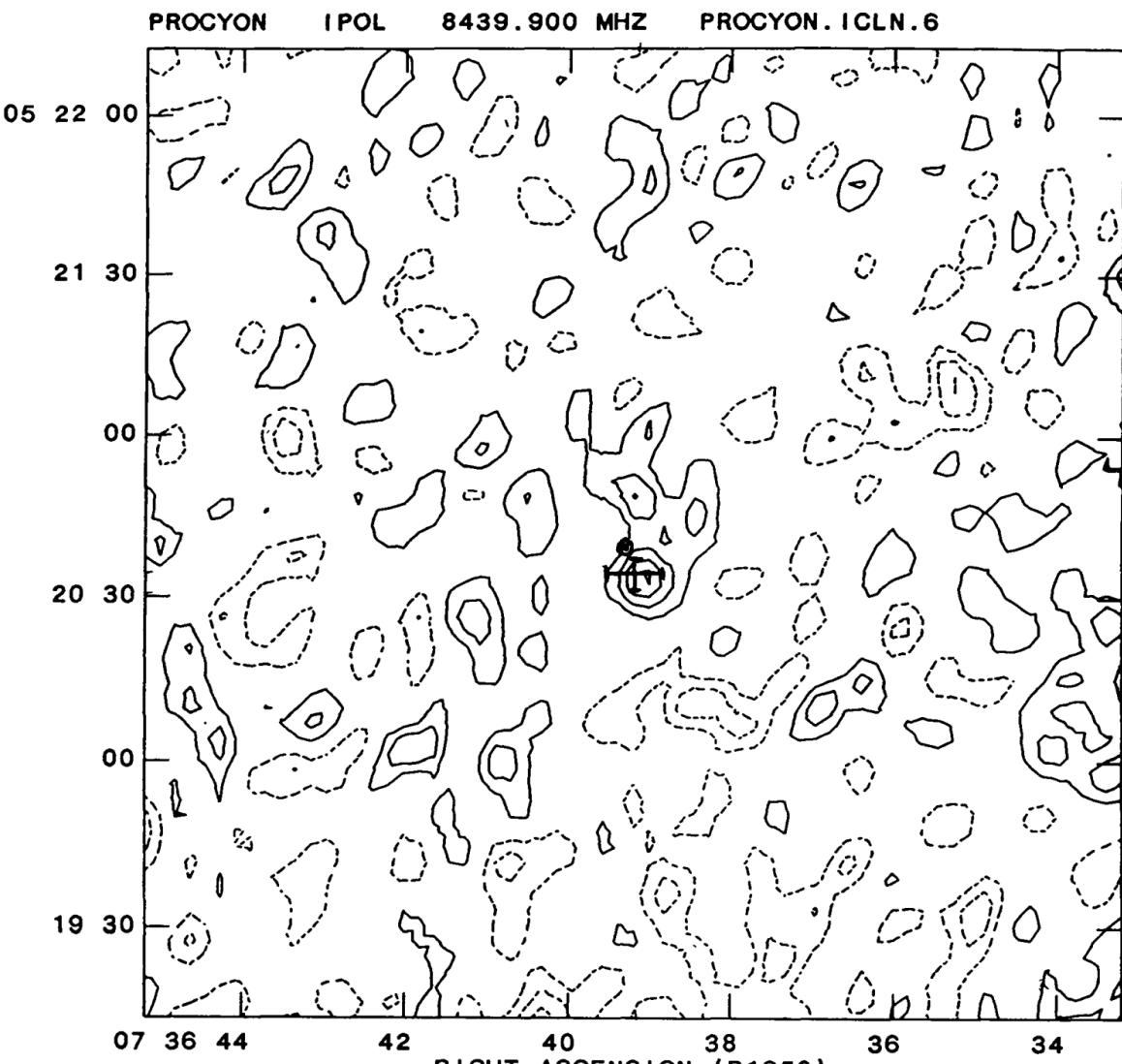
- Vernazza et al., (1981) publicó el primer modelo unificado de la atmósfera exterior del Sol.
- El modelo se calculó con la aproximación del equilibrio hidrostático utilizando el equilibrio estadístico para resolver la ecuación de transferencia radiactiva.
- Se ajustó a las observaciones en óptico y UV.
- Las observaciones en radio solo se utilizaron para la validación del modelo.
- Los modelos atmosféricos que siguen esta metodología son llamados modelos VAL.



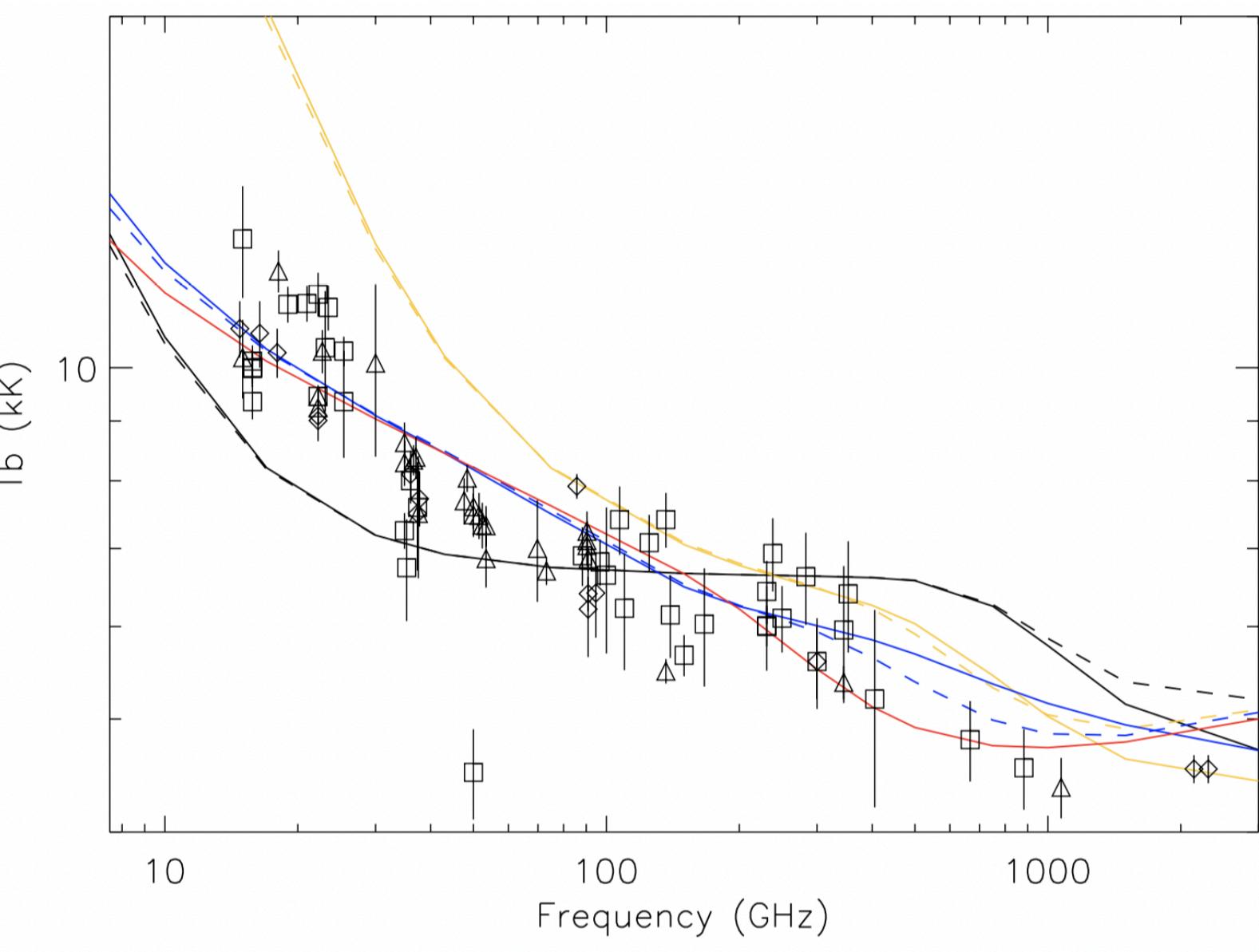
(Vernazza et al., 1981)

Modelos Cromosféricos

- El aumento en la sensibilidad de los receptores permitió un monitoreo constante del Sol con un rango espectral más amplio.
- Drake et al. (1993) detectó por primera vez la emisión térmica de una estrella a 8.5 GHz.
- Los modelos solares basado en radio, mm y submm mostraron discrepancia con los basados en UV (Loukitcheva et al., 2004).
- Modificando la estructura de temperatura, se puede ajustar el espectro sintético al observado (Loukitcheva et al., 2004, Selhorst et al., 2005; De la Luz, 2016; Liseau et al., 2016).



(Drake et al., 1993)



(De La Luz et al., 2016)

Modelos Cromosféricos: μm , mm, cm vs UV

Propiedad	μm , mm, cm	Espectroscopía UV
Diagnóstico del plasma	Continuo, rotación del CO y líneas de recombinación.	NLTE (PRD para líneas de emisión ópticamente gruesas).
Características espectrales	Emisión Libre-Libre (continuo).	Líneas de emisión (He I, Ca II h y K, Mg II h y K, etc.).
¿Se puede inferir la térmica estructura de los datos?	$T_B(\lambda) = \int T_e dh \approx T_e(< h >)$	$I_\nu = \int S_\nu dh \neq \int B_\nu(T_e) dh$
Regiones de formación	Desde Fotosfera alta hasta la cromosfera alta.	Fotosfera (alas), Cromosfera (picos), Región de transición (núcleo)
Efecto de los electrones no MB y las desviaciones del equilibrio por ionización	Posibles desviaciones del equilibrio de ionización del H (afecta la escala de profundidad óptica)	Importante para algunas líneas (por ejemplo, líneas He I, He II, TR)

Modelos Basados en Observaciones μm , mm, cm

A&A 594, A109 (2016)
DOI: [10.1051/0004-6361/201629135](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629135)
© ESO 2016



ALMA's view of the nearest neighbors to the Sun

The submm/mm SEDs of the α Centauri binary and a new source

R. Liseau¹, V. De la Luz², E. O'Gorman³, E. Bertone⁴, M. Chavez⁴, and F. Tapia²

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 875:55 (6pp), 2019 April 10
© 2019. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0e7f>



The MESAS Project: Long-wavelength Follow-up Observations of Sirius A

Jacob Aaron White¹ , J. Aufdenberg², A. C. Boley³ , M. Devlin⁴, S. Dicker⁴, P. Hauschildt⁵, A. G. Hughes³, A. M. Hughes⁶, B. Mason⁷, B. Matthews⁸ , A. Moór¹, T. Mroczkowski⁹ , C. Romero⁴ , J. Sievers¹⁰, S. Stanchfield⁴, F. Tapia^{11,12}, and D. Wilner¹³

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES, 246:5 (8pp), 2020 January
© 2020. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab5f0a>



Nonlinear Convergence of Solar-like Stars Chromospheres Using Millimeter, Submillimeter, and Infrared Observations

F. Tapia-Vázquez¹ and V. De la Luz²

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 894:76 (11pp), 2020 May 1
© 2020. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8467>



The MESAS Project: ALMA Observations of the F-type Stars γ Lep, γ Vir A, and γ Vir B

Jacob Aaron White¹ , F. Tapia-Vázquez² , A. G. Hughes³ , A. Moór^{1,4}, B. Matthews⁵ , D. Wilner⁶ , J. Aufdenberg⁷, A. M. Hughes⁸ , V. De la Luz⁹ , and A. C. Boley³

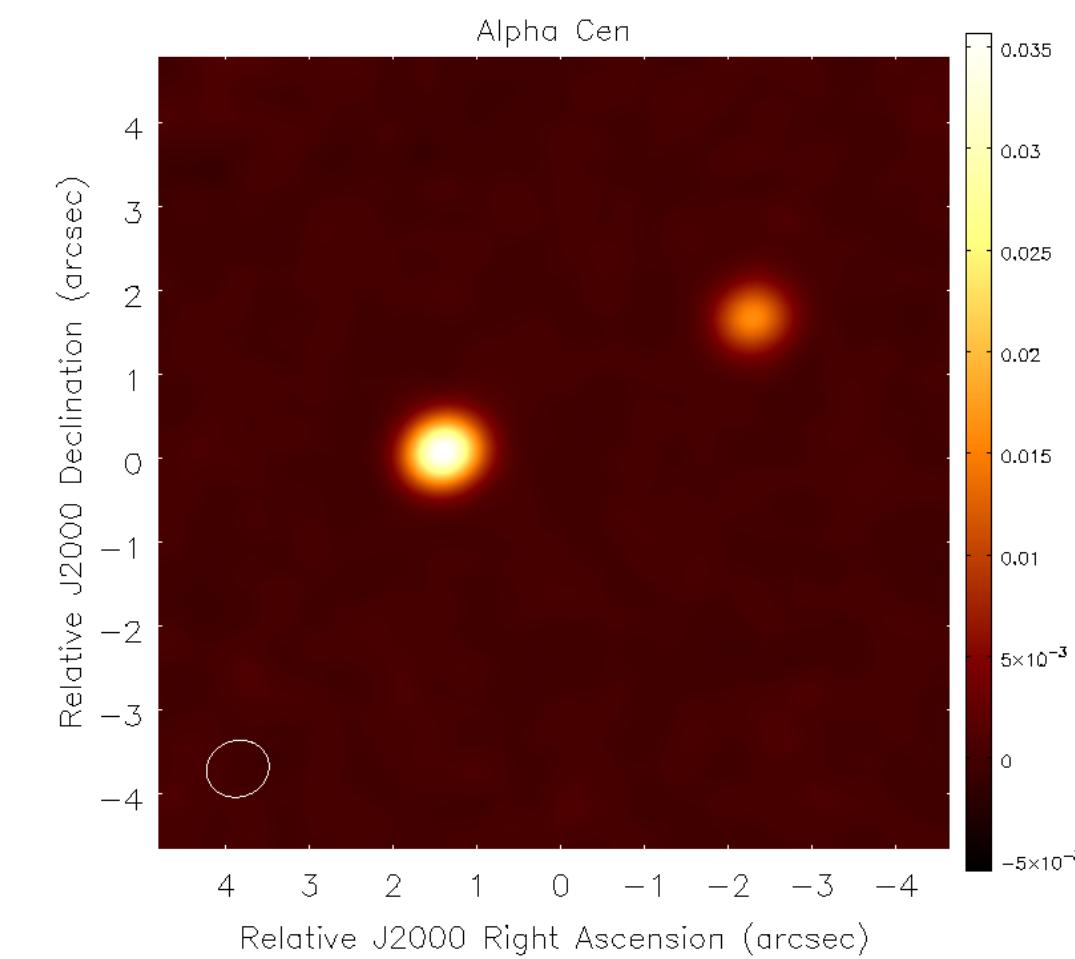
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 912:L5 (8pp), 2021 May 1
© 2021. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/abf6da>

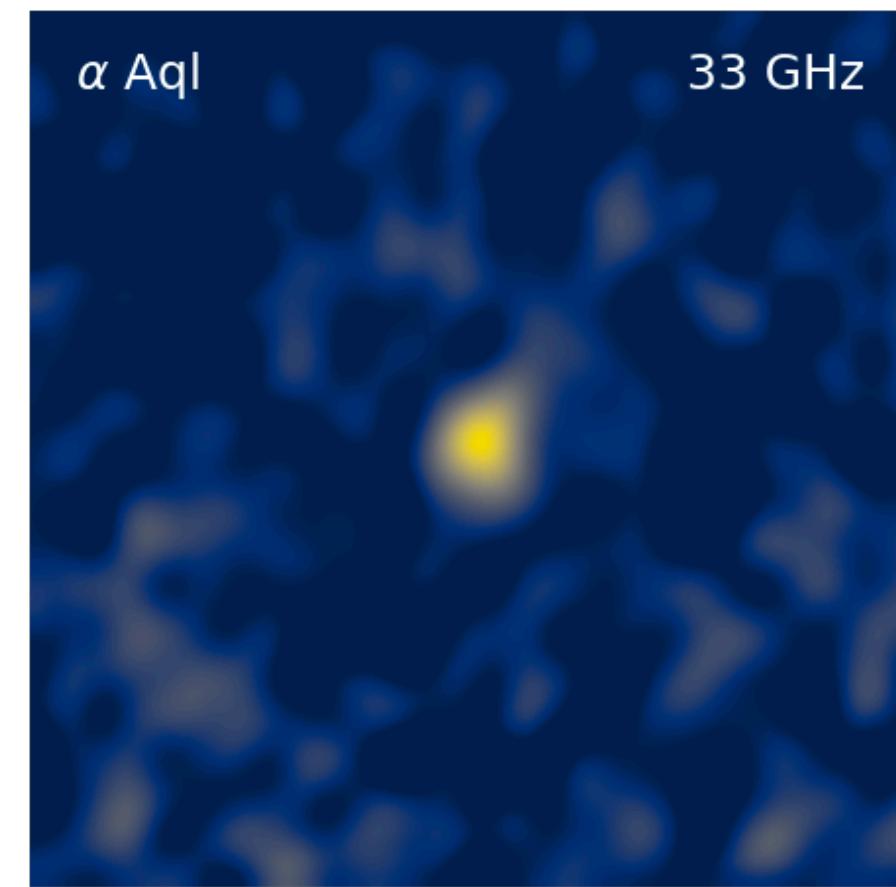


The First Radio Spectrum of a Rapidly Rotating A-type Star

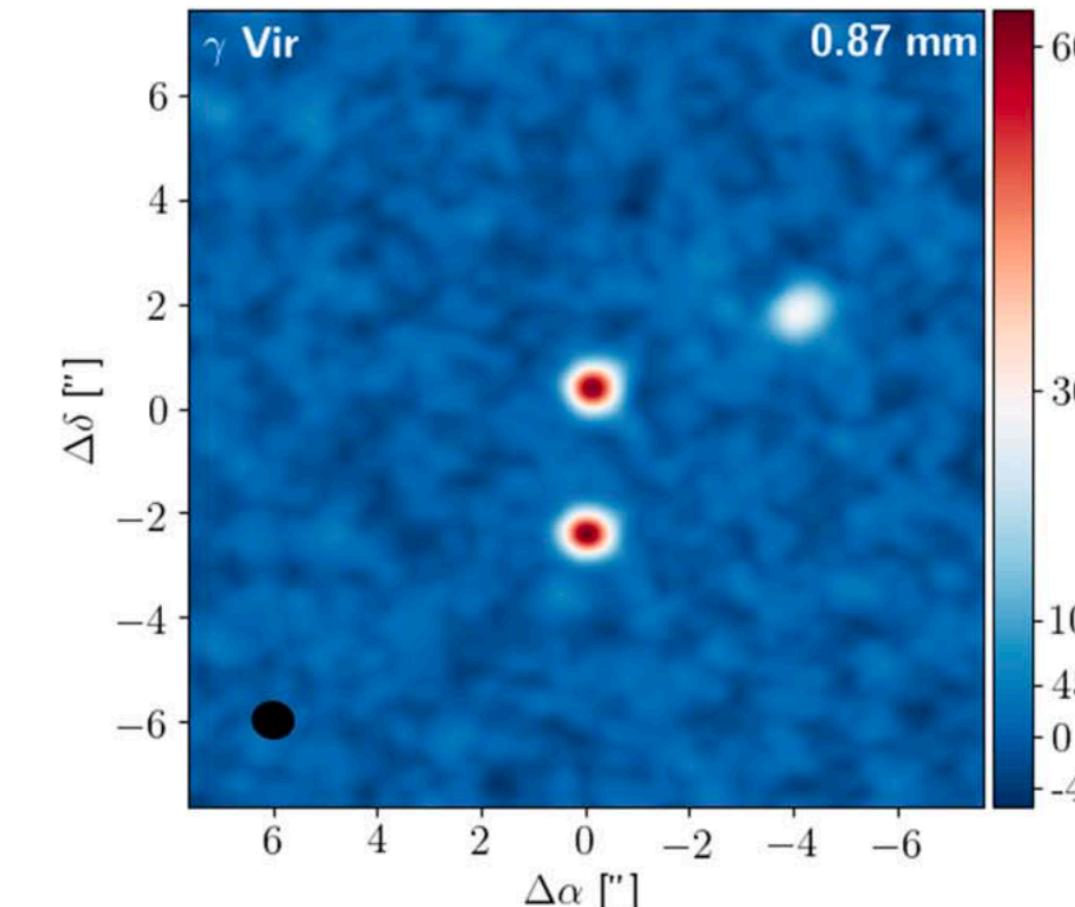
Jacob Aaron White^{1,14} , F. Tapia-Vázquez^{2,3} , A. G. Hughes⁴ , A. Moór^{5,6}, B. Matthews⁷ , D. Wilner⁸ , J. Aufdenberg⁹, O. Fehér¹⁰ , A. M. Hughes¹¹ , V. De la Luz^{3,12} , A. McNaughton^{9,13} , and L. A. Zapata²



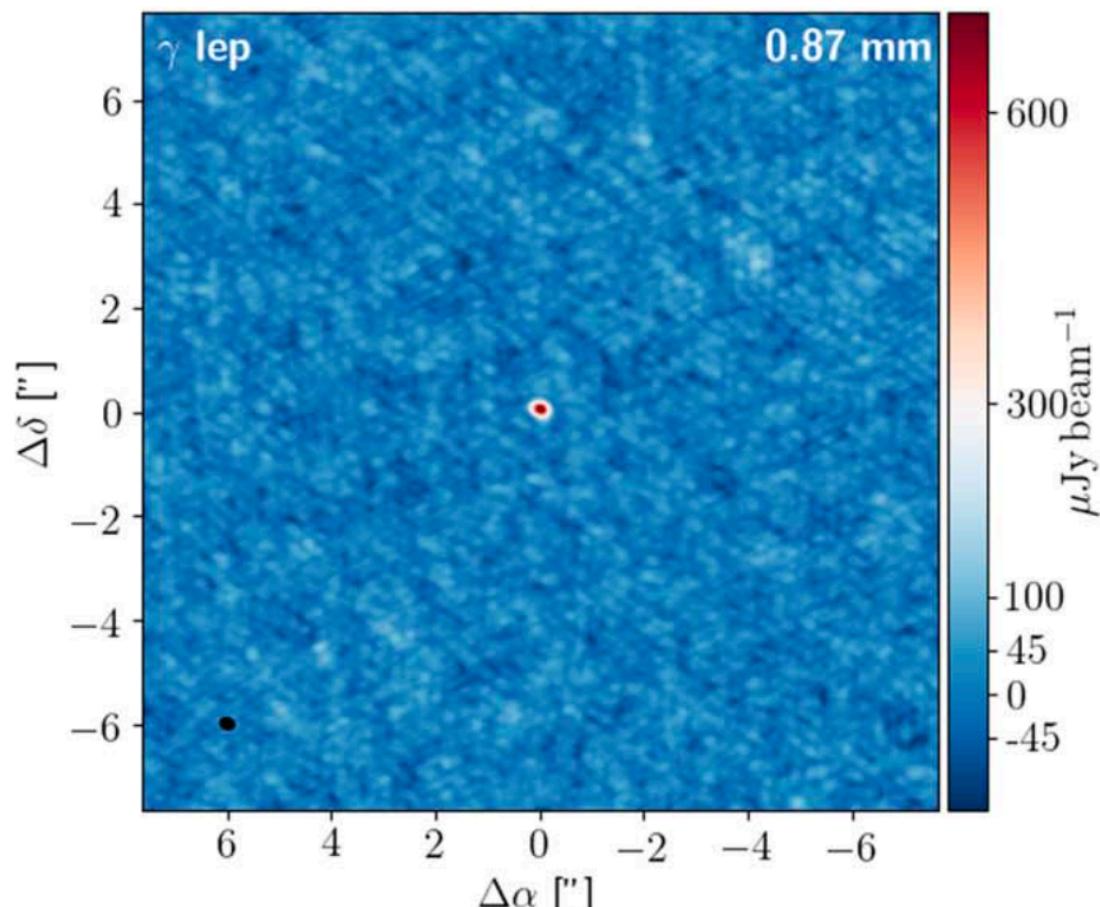
(Liseau et al., 2016)



(White et al., 2021)

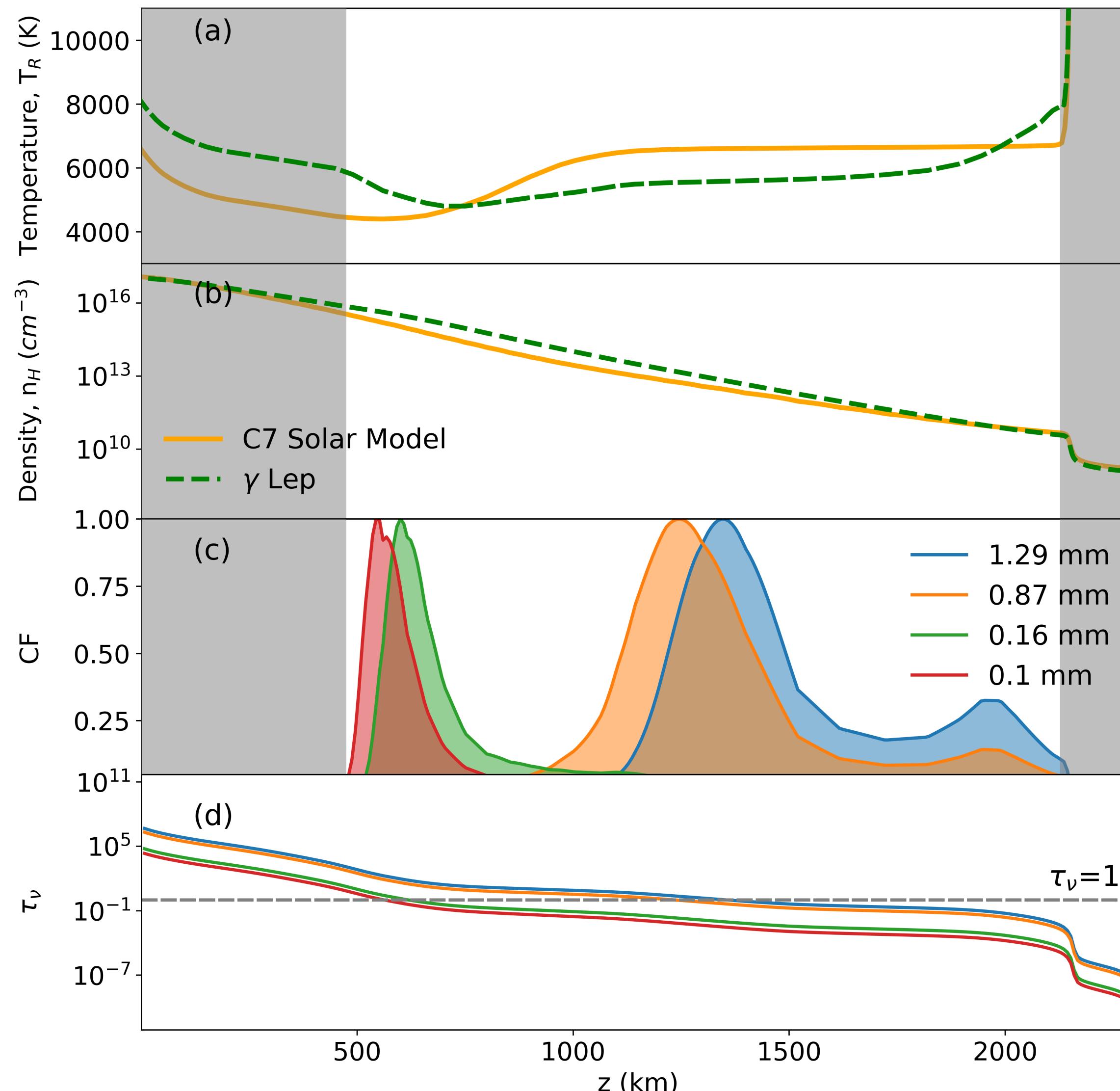


(White et al., 2020)



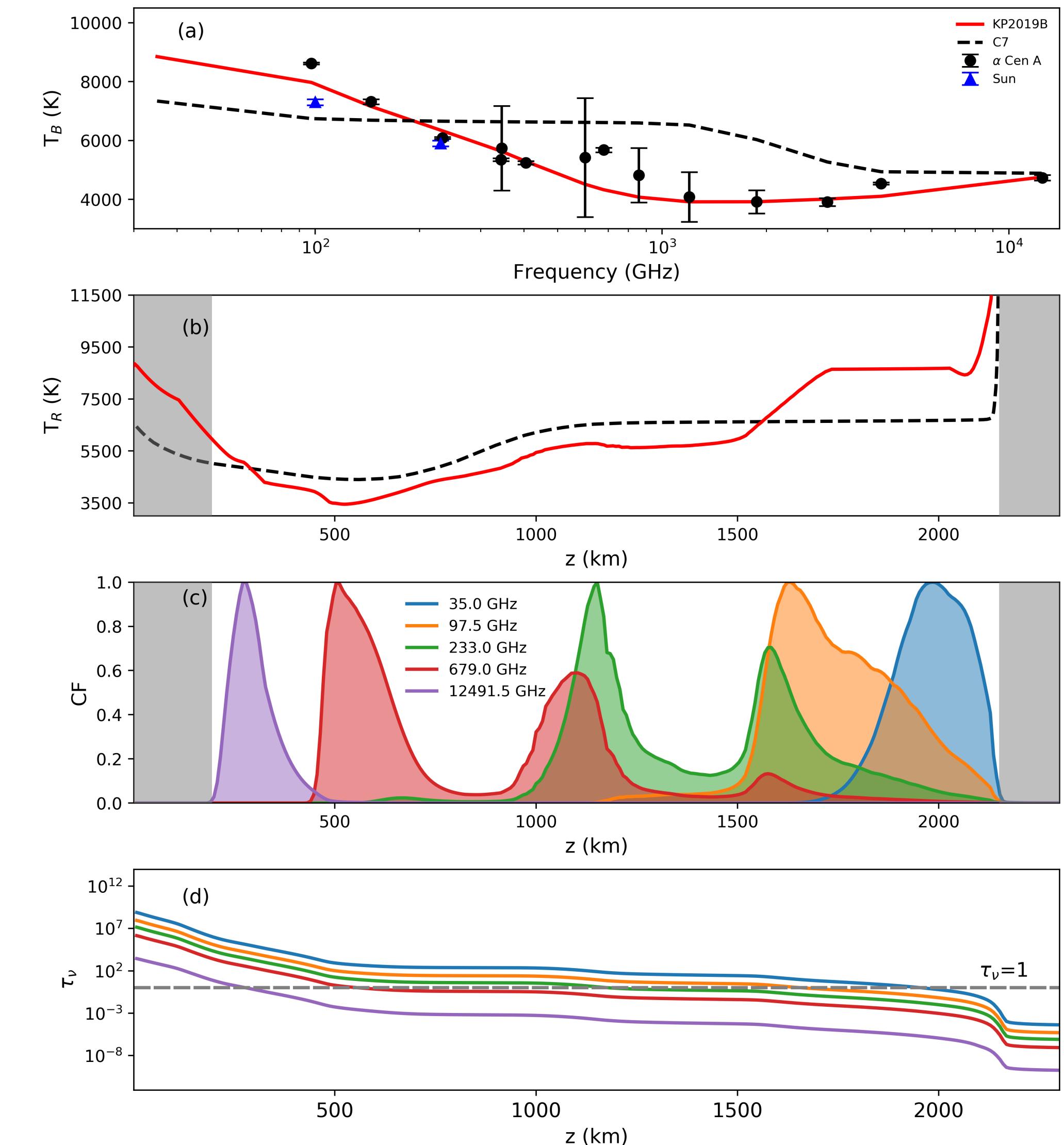
(White et al., 2020)

Metodología KINICH-PAKAL



(White et al., 2020)

9



(Tapia-Vázquez & De la Luz, 2020)

Hipótesis

Utilizando un modelo de convergencia no lineal, es posible adaptar un modelo cromosférico solar a las observaciones de estrellas de tipo solar para determinar sus condiciones de temperatura, presión y densidad.

Objetivo General

Determinar las condiciones físicas de la región atmosférica estelar conocida como Cromosfera utilizando el modelo KP y las recientes observaciones entre los 30 GHz y los 12500 GHz de estrellas cercanas con temperaturas efectivas entre los 5200 K y 7600 K que corresponden a la clasificación espectral A, F, G y K de secuencia principal.

Objetivos Particulares

- 1 Optimizar el método de ajuste no lineal KP.
- 2 Crear una base de datos con observaciones de estrellas de tipo solar a longitudes de onda infrarrojas, submilimétricas, milimétrica y de radio.
- 3 Crear una malla de observaciones que incluya la temperatura efectiva, temperatura de brillo y frecuencia.
- 4 Crear una malla de modelos cromosféricos que incluya la temperatura radial en función de la altura sobre la fotosfera y la temperatura efectiva.
- 5 Determinar la influencia del perfil de densidad en el cálculo de la temperatura radial.
- 6 Caracterizar las condiciones físicas de la cromosfera en función de la temperatura efectiva de la estrella.

Observaciones

- Base datos del Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), Very Large Array (VLA), del telescopio espacial Herschel y otros radiotelescopios que se encuentren el rango de los 30 GHz hasta los 12500 GHz.
- Para la selección de las estrellas, se toman en cuenta que no tenga un exceso de emisión en infrarrojo, lo cual podría indicar la presencia de un disco de escombros a su alrededor (Montesinos et al., 2016), estar en secuencia principal y con temperatura efectiva entre 5200 K y 7600 K.
- Estas observaciones servirán para hacer una malla de interpolación.

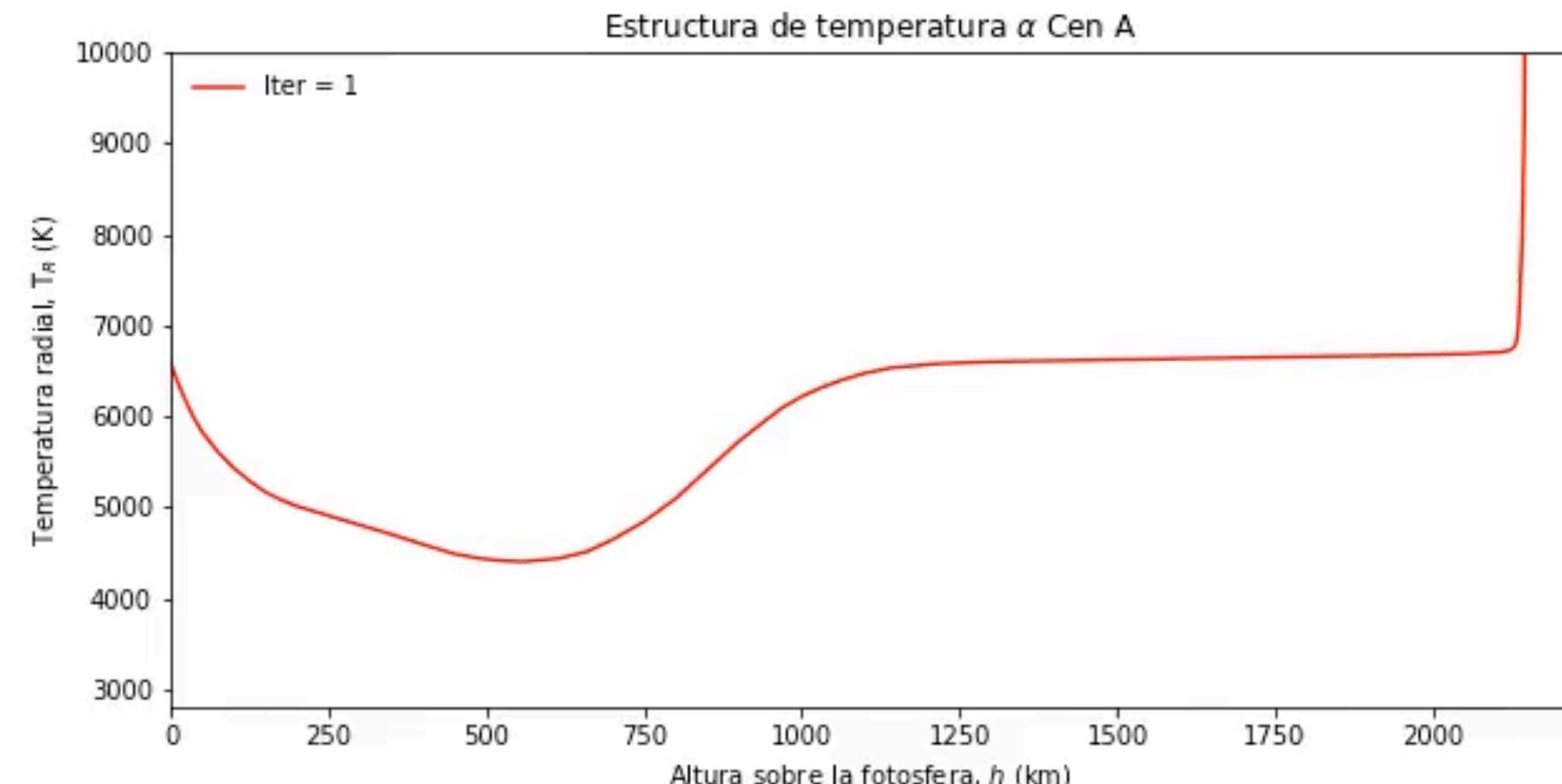
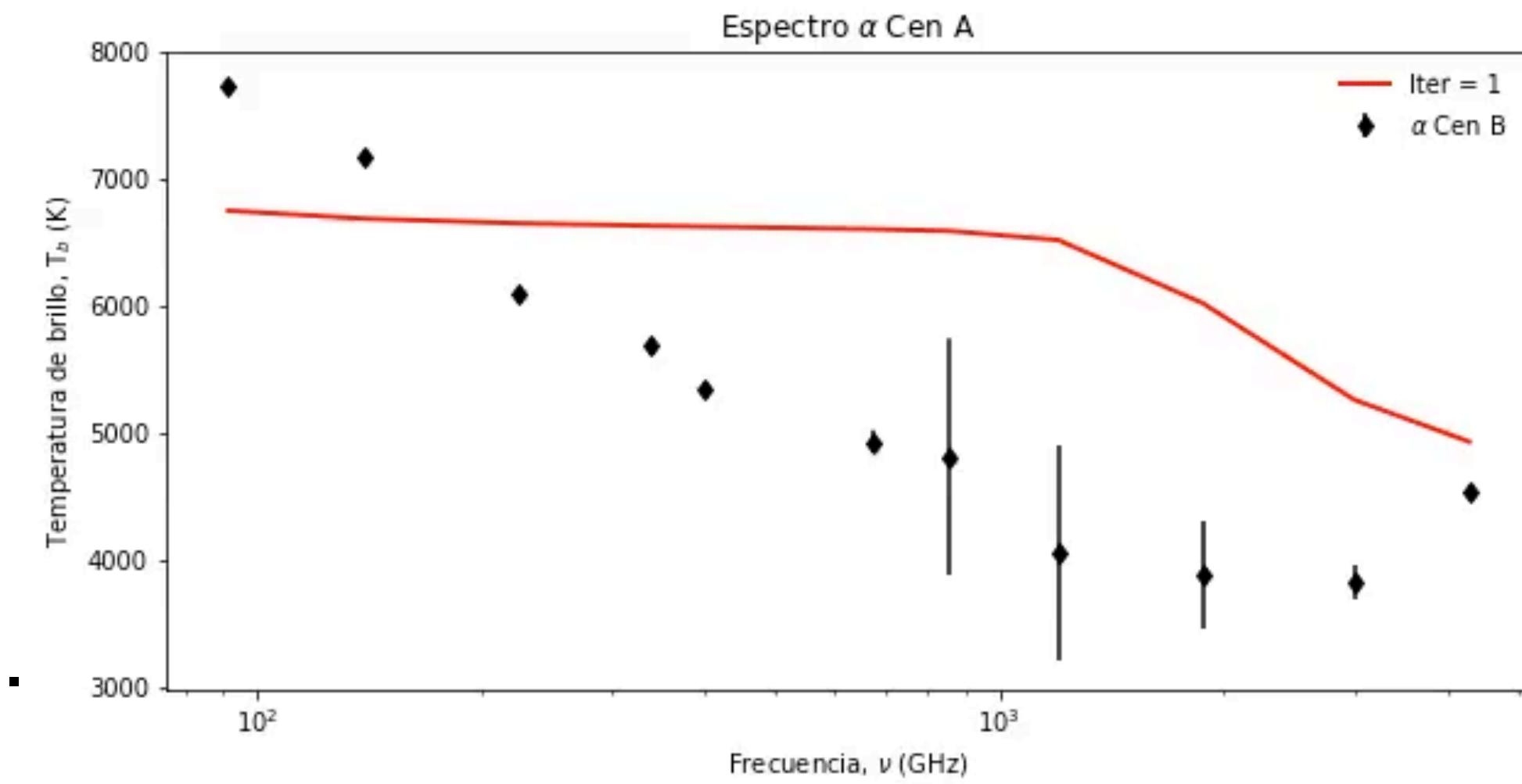
Estrella	Tipo Espectral	Radiotelescopio/Telescopio
α Aql	A7V	Herschel, NOEMA, VLA
γ Vir A	F0V	ALMA
γ Vir B	F0V	ALMA
γ Lep	F6V	Herschel, ALMA
η Cas A	F9V	VLA
χ^1 Ori	G1V	ALMA, VLA
Sol	G2V	ALMA, VLA
α Cen A	G2V	ALMA, ATCA,
τ Cet	G8V	VLA
40 Eri A	K0V	VLA
α Cen B	K1V	ALMA, ATCA

Kinich-Pakal

Metodología de ajuste atmosférico utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt

$$P = \text{LsqFit}(f, x, y, p0),$$

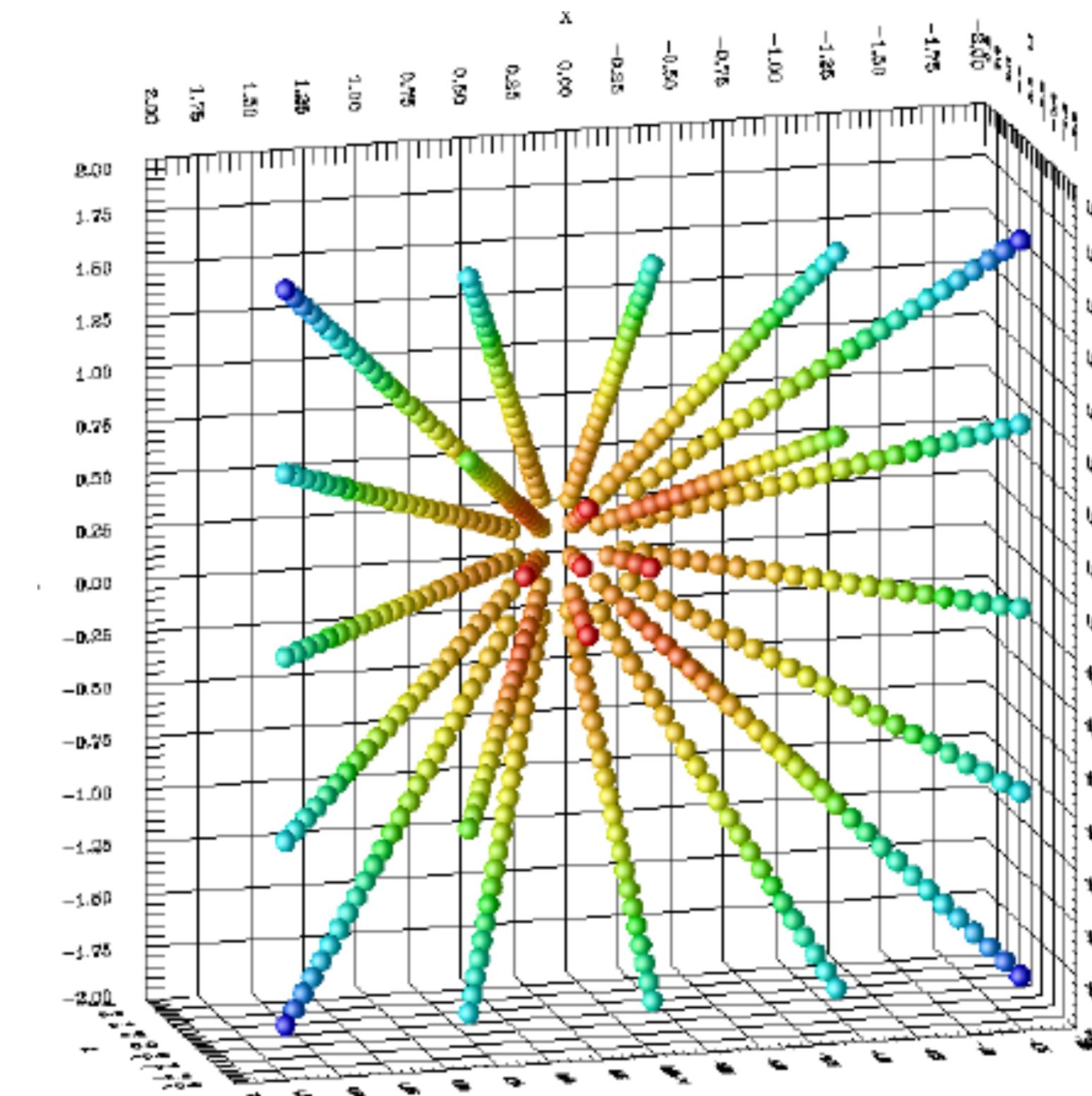
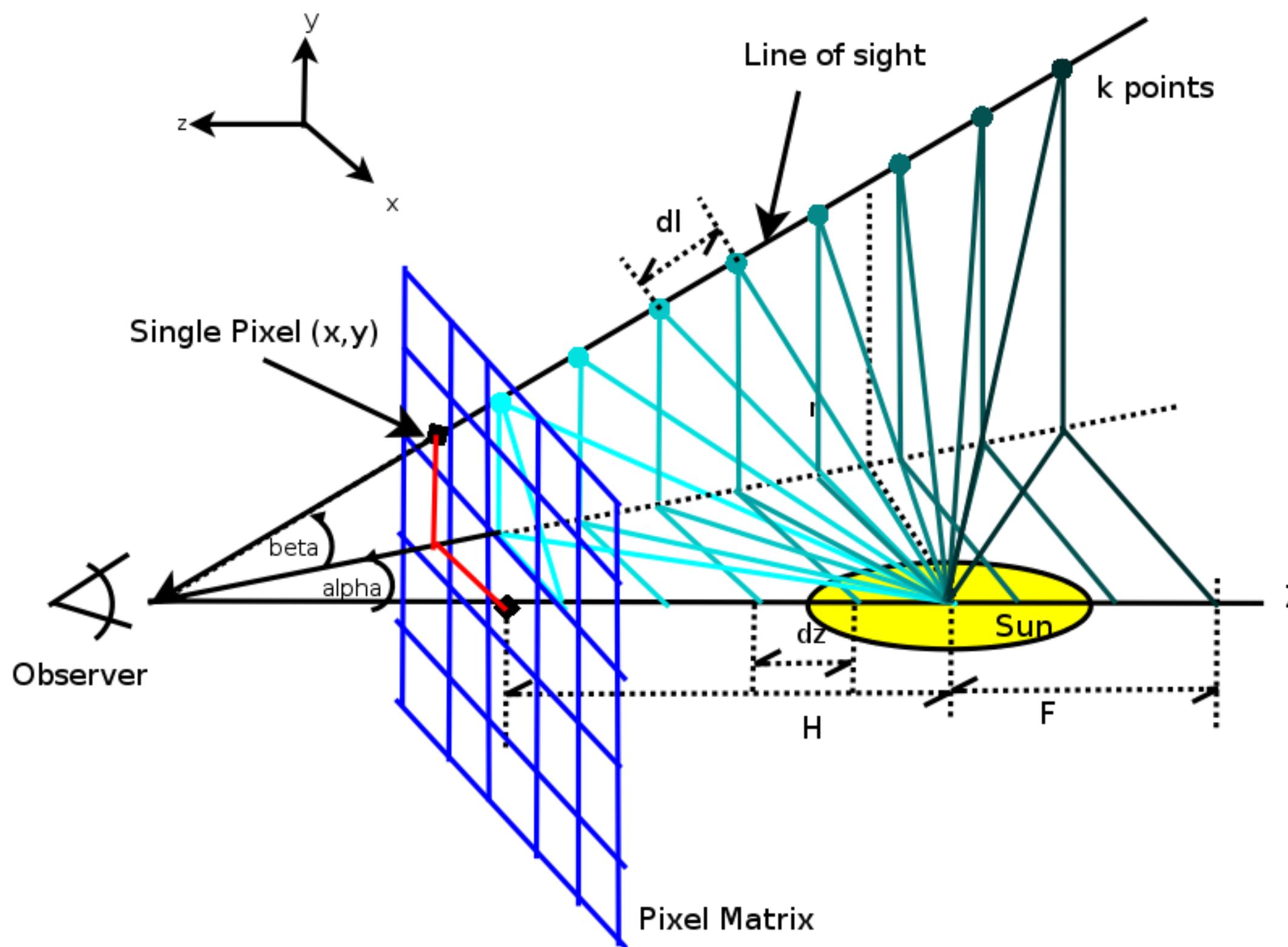
- f: Función de ajuste (PakalMPI)
- x: Frecuencias observadas ν_i (35 GHz - 12500 GHz).
- y: Observaciones T_{bi} (ALMA, GTM, VLA, Herschel).
- p0: Perfil de temperatura inicial (C7).
- P: Modelo cromosférico.



Función de Ajuste: PAKALMPI

- Modelo desarrollado para producir espectros sintéticos de atmósferas estelares, con la capacidad de reproducir sus condiciones físicas en LTE y NLTE a longitudes de ondas que van del infrarrojo al milimétrico (De la Luz et al., 2010; De la Luz et al., 2011).
- Para producir un espectro sintético se tiene en cuenta:
 - Modelo Geométrico
 - Funciones de opacidad
 - Modelo atmosférico:
 - ▶ Temperatura
 - ▶ Presión
 - ▶ Densidad
 - ▶ Metalicidad ($1 = H + He + z$)
 - ▶ Coeficiente de despegue
 - Equilibrio hidrostático
 - Ecuación de transferencia radiativa

PakalMPI: Modelo Geométrico



El modelo resuelve la ecuación de transferencia radiativa para cada línea de visión.

(De La Luz et al., 2010)

PakalMPI: Funciones de Opacidad

- Bremsstrahlung Térmico (Dulk, 1985)



- Bremsstrahlung Térmico Inverso (Golovinskii and Zon, 1980)

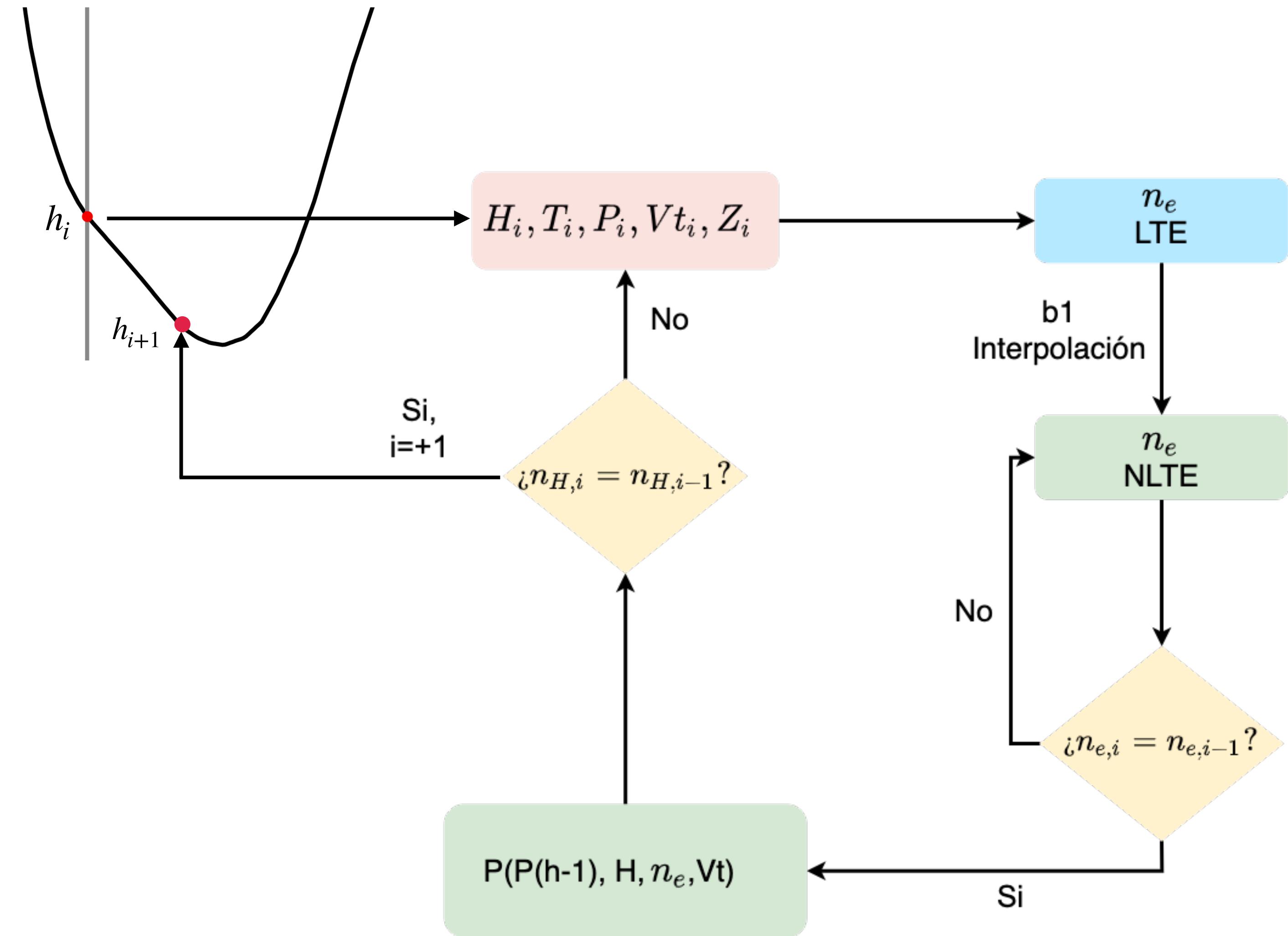


- Interacción Neutra (Zheleznyakov, 1996)



PakalMPI: Equilibrio Hidrostático

- Método iterativo para encontrar el equilibrio hidrostático.
- Lee los parámetros de temperatura, densidad, presión y metalicidad del modelo cromosférico inicial.
- Calcula la densidad electrónica en NLTE.
- Calcula la presión de Hidrógeno.
- Calcula la densidad de Hidrógeno.



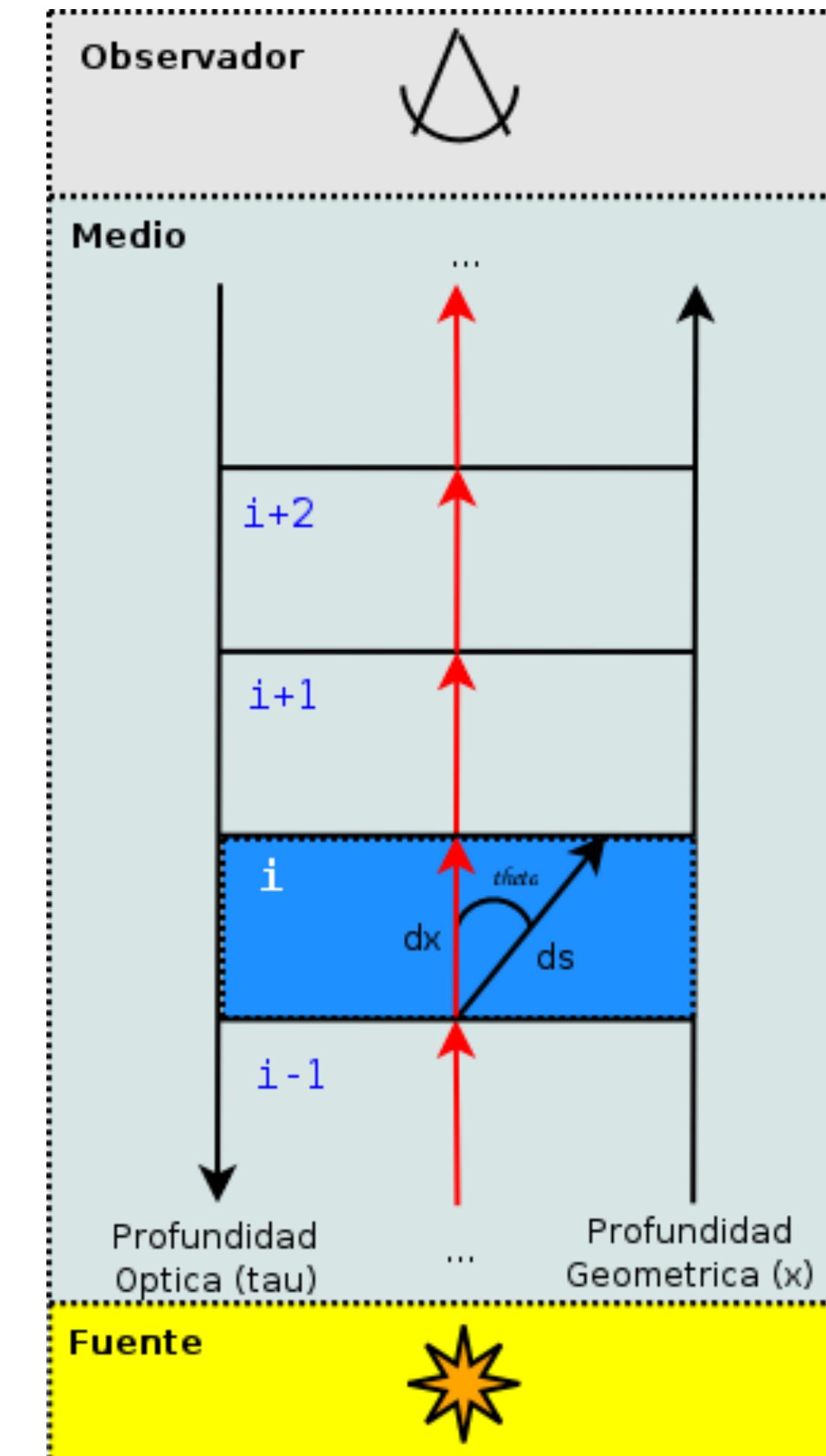
PakalMPI: Ecuación de Transferencia Radiativa

Resuelve la ecuación de transferencia radiativa

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa_\nu I_\nu + \epsilon_\nu$$

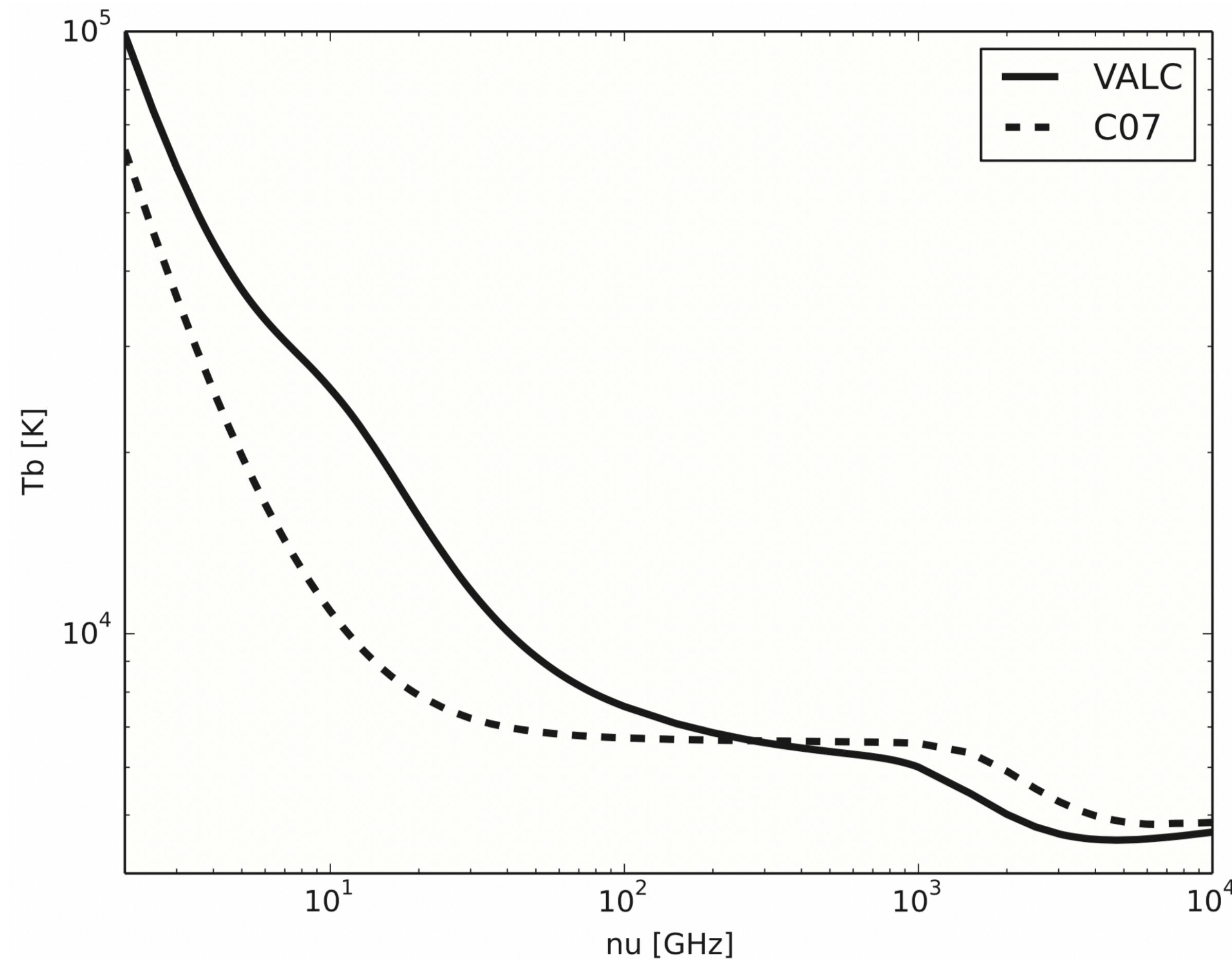
Utilizando la aproximación de una atmósfera plano paralela

$$I_\nu = I_\nu e^{-\tau} + S_\nu (1 - e^{-\tau})$$



(De La Luz et al., 2010)

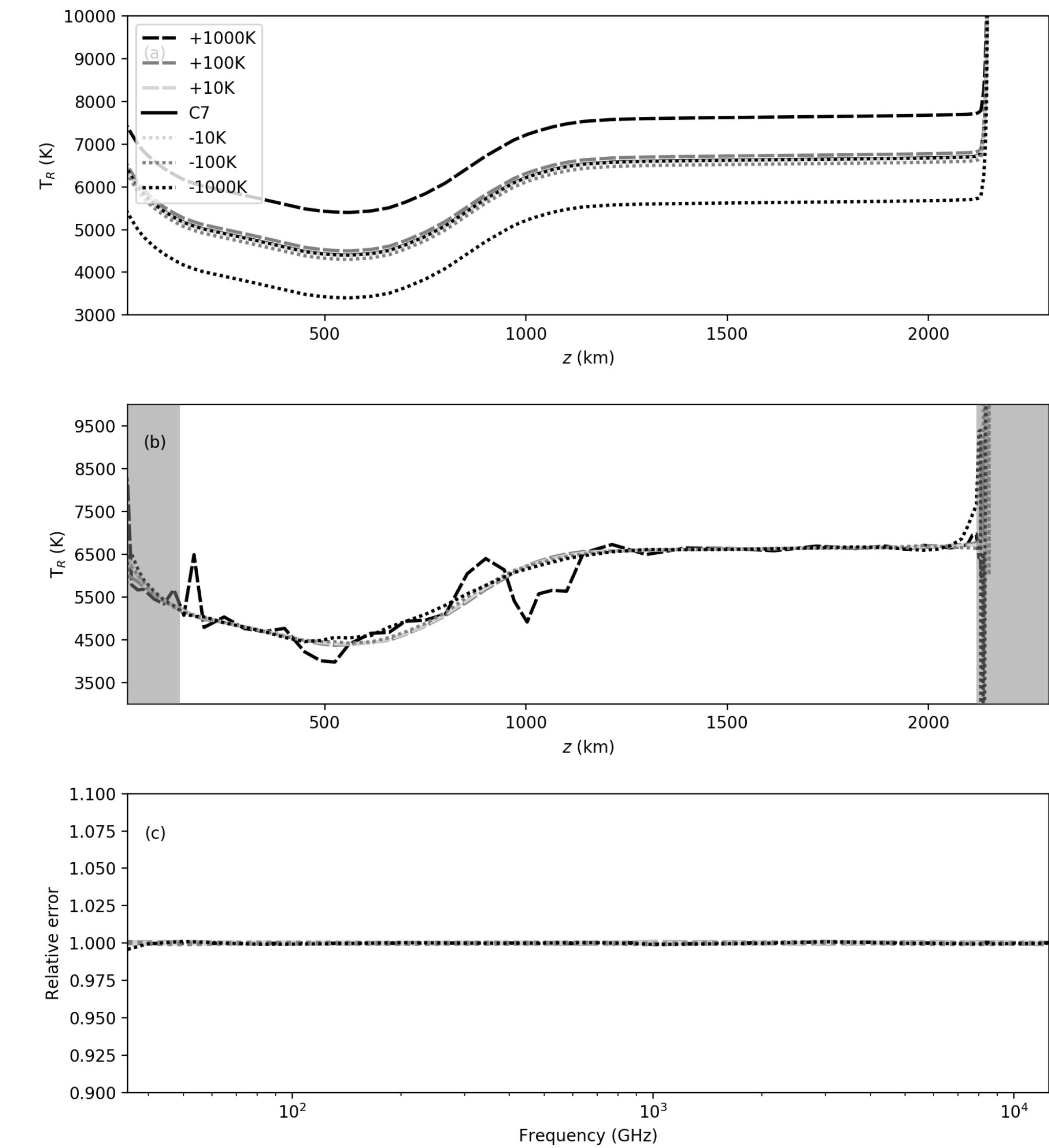
PakalMPI: Espectro Sintético



Espectro sintético obtenido después de resolver la ecuación de transferencia radiativa. (De La Luz et al., 2010)

Condiciones Iniciales

- En Tapia-Vázquez & De la Luz (2020) y White et al. (2020) se determinó que el modelo solar C7 (Avrett and Loeser, 2008) funciona como condición inicial de Kinich-Pakal para estrellas de tipo solar cuyas temperaturas efectivas se encuentran entre los 4700 K y los 7600 K.



(Tapia-Vázquez & De la Luz, 2020)

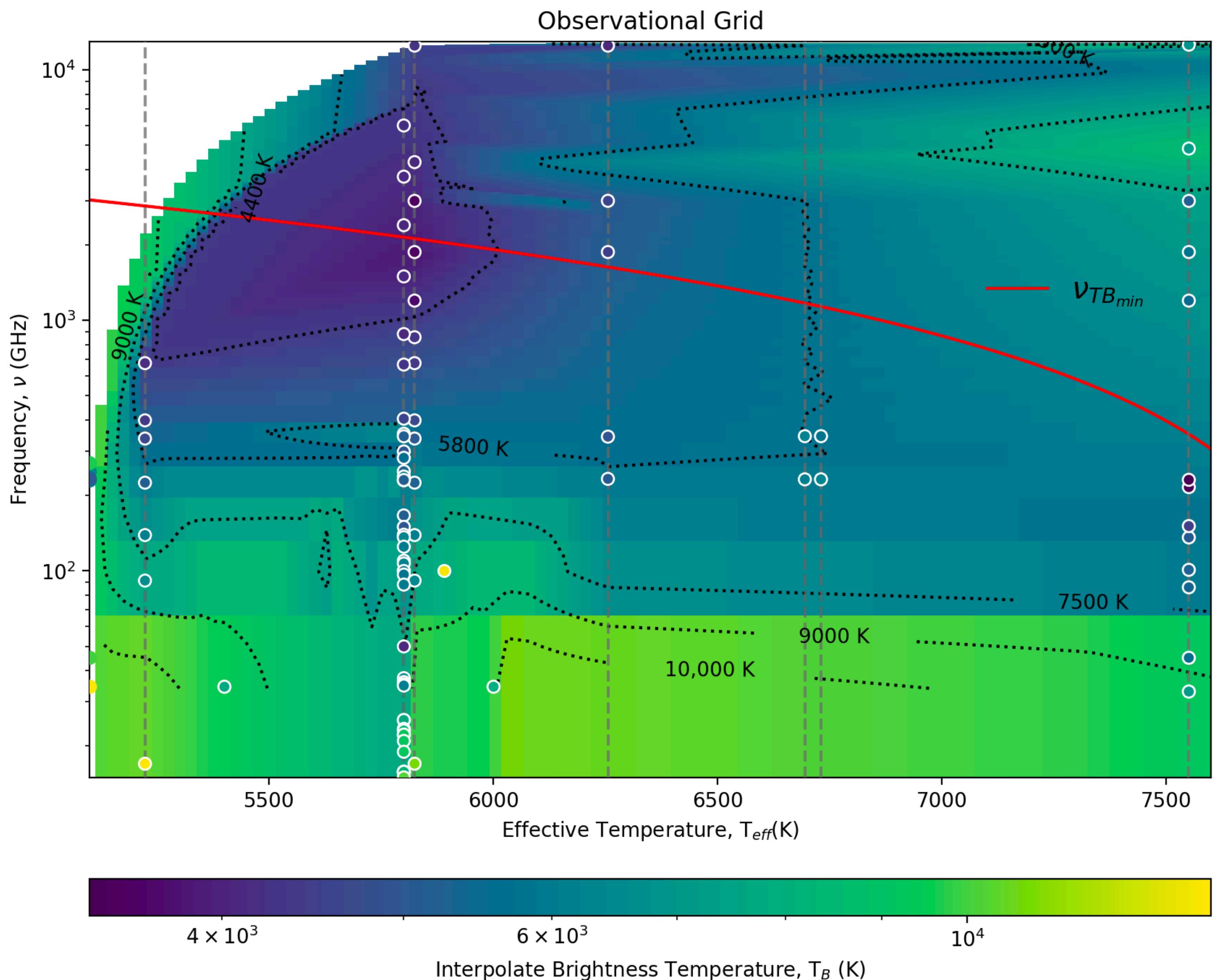
Malla Observacional

- Permite estudiar de manera empírica, el comportamiento de la radiación.
- El límite observacional entre la fotosfera y la cromosfera esta dado por:

$$\nu_{T_B \min}(T_{\text{eff}}) = a \log(b T_{\text{eff}}) + c$$

Donde:

- $a = -6.81 \times 10^3$
- $b = 1.41 \times 10^{-3}$
- $c = 1.65 \times 10^4$



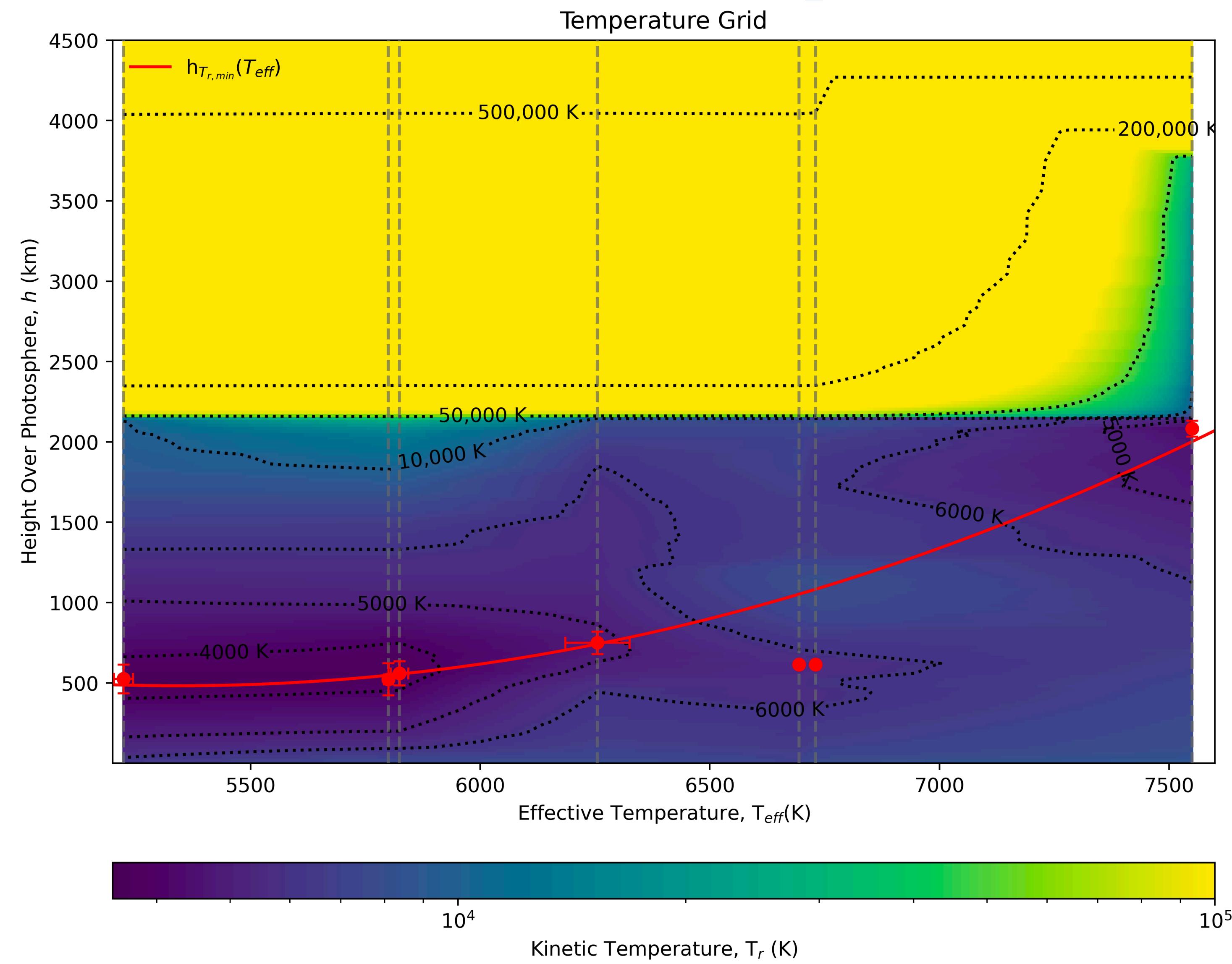
Malla de Condiciones Físicas: Temperatura

- Permite caracterizar la atmósfera en función de su temperatura.
- El mínimo de temperatura permite establecer el límite entre la fotosfera y la cromosfera.
- Este límite está dado por

$$h_{T_{r,min}}(T_{eff}) = aT_{eff} + bT_{eff}^2 + c$$

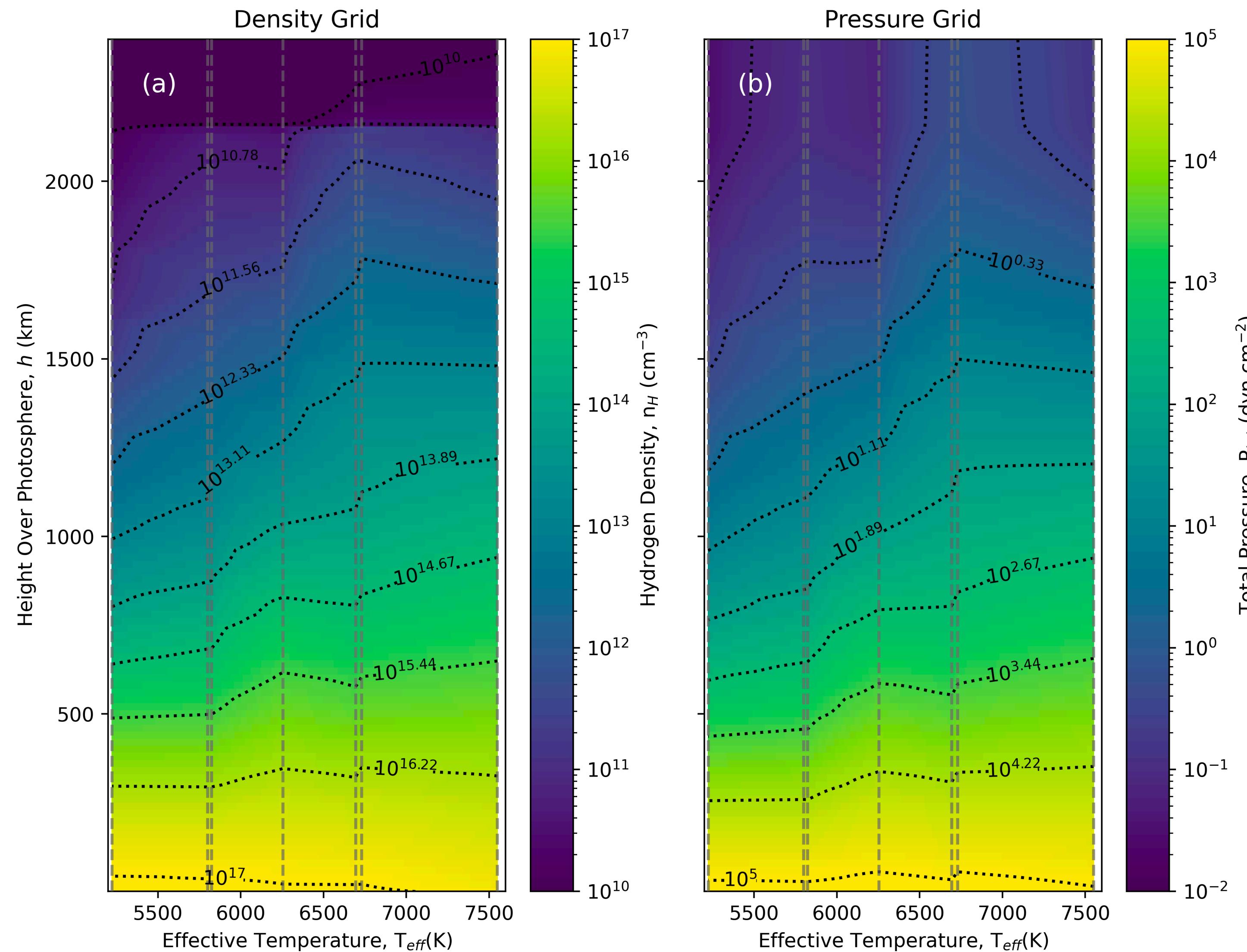
Donde:

- ▶ $a = -3.33$
- ▶ $b = 3.11 \times 10^{-4}$
- ▶ $c = 9.37 \times 10^3$



Malla de Condiciones Físicas: Densidad y Presión

- Las mallas de densidad y presión, muestran que conforme aumenta la temperatura efectiva, la atmósfera se extiende.
- Los valores de densidad y presión son similares al Sol.
- La densidad muestra una tendencia hacia una atmósfera más extensa.
- Un análisis detallado de la estructura de densidad se encuentra en proceso.



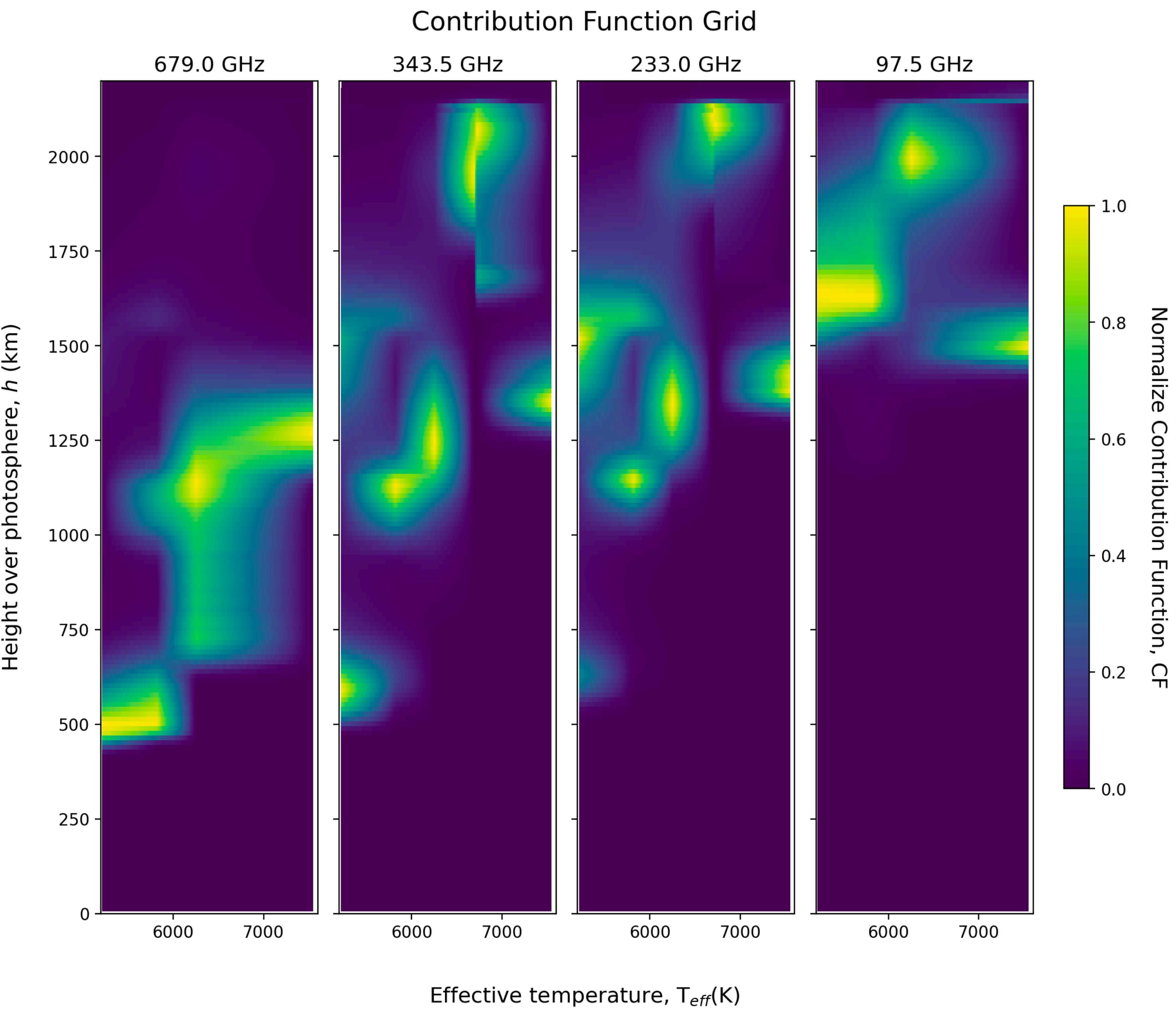
Función de contribución

- Permite determinar la región de emisión.

$$CF = j_\nu \exp(-\tau_\nu)$$

$$j_\nu = \kappa_\nu B(T)$$

$$\tau_\nu = \int \kappa_\nu dz$$



Conclusiones

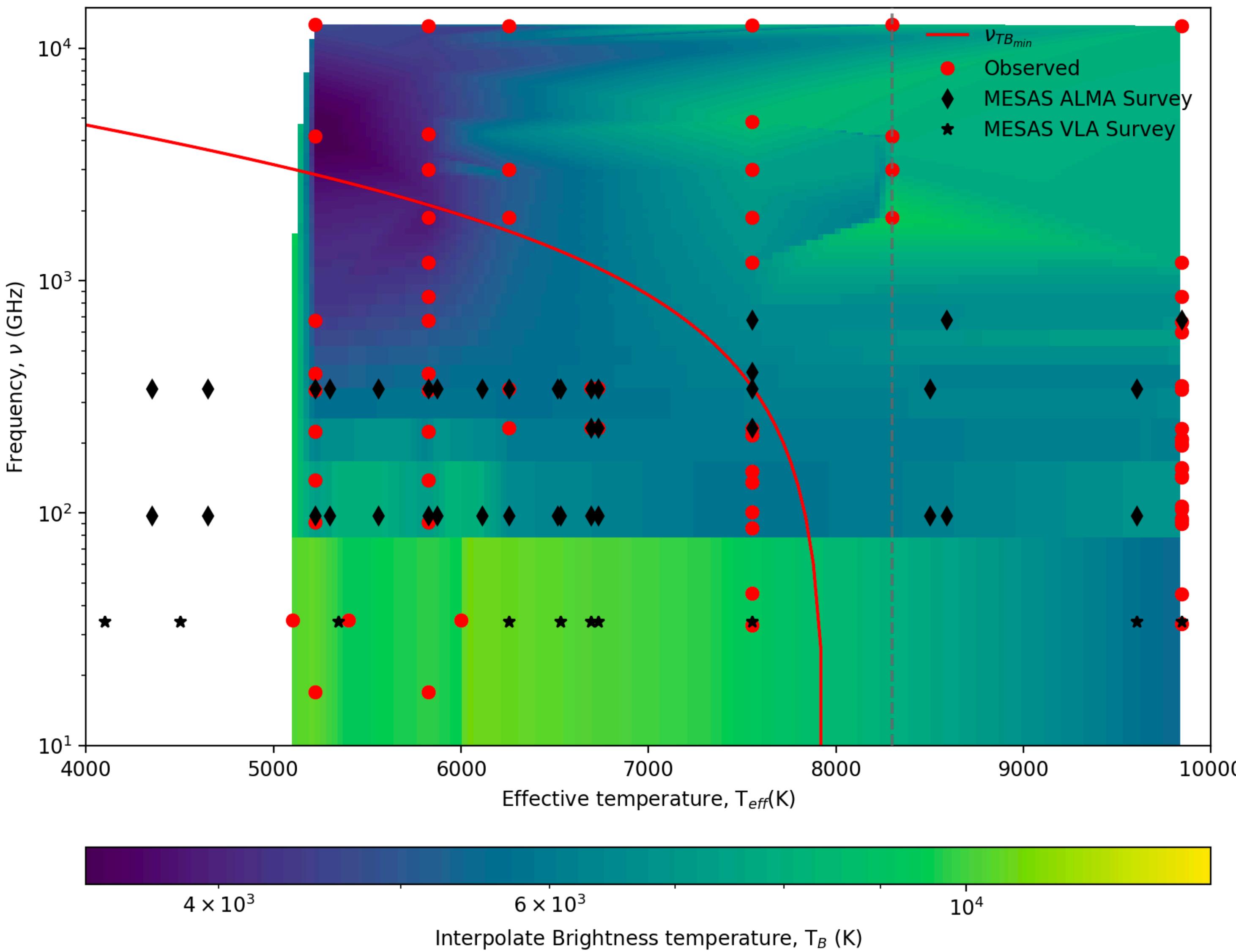
- Construimos una malla observacional para estudiar de forma empírica el comportamiento de la radiación a través de diferentes tipos espetrales.
- Mostramos que la frecuencia a la cual se observa la $T_{B_{min}}$ tiene una dependencia logarítmica con la temperatura efectiva de la estrella.
- Utilizando la metodología KP, obtuvimos un conjuntos de modelos cromosféricos, con los cuales, construimos las mallas de condiciones físicas (temperatura, densidad y presión).
- Demostramos que existe una relación cuadrática entre la altura a la cual se encuentra el mínimo de temperatura cinética y la temperatura efectiva de la estrella.
- Encontramos que el ancho de la cromosfera aumenta conforme la temperatura efectiva de la estrella incrementa.
- Generamos mallas de la función de contribución para las diferentes frecuencias de ALMA.
- Mostramos que en algunos casos, la radiación se genera en distintas regiones de la atmósfera.

Etapas por Completar

- Terminar el análisis de densidad.
- Terminar y enviar el artículo científico asociado a este trabajo.
- Si las condiciones sanitarias lo permiten, realizar un estancia de investigación.
- Redacción de la tesis.

Trabajo Futuro

- Extender el estudio a estrellas de tipos espectrales A, M, L y en diferentes estados evolutivos.
- Continuar con los estudios de convergencia de KINICH-PAKAL.
- Síntesis de población a longitudes de onda que van desde el lejano infrarrojo hasta el milimétrico.
- Estudiar el impacto en la emisión producidos por la velocidad de turbulencia y el perfil de metalicidad.



Cronograma

Semestre 1	Semestre 2	Semestre 3	Semestre 4	Semestre 5	Semestre 6
Revisión de la bibliografía	Revisión de la metodología Kinich-Pakal.	Análisis de la densidad en los modelos cromosféricos solares.	Calcular los modelos cromosféricos	Estancia de investigación.	Redacción de tesis.
Búsqueda en la base de datos de radiotelescopios de observaciones de estrellas de tipo solar.	Procesamiento de las observaciones encontradas en las bases de datos de los radio telescopios.	Programación de la malla de interpolación para la observaciones y los modelos.	Caracterizar la cromosfera en función de la temperatura efectiva.	Establecer una función analítica entre la temperatura efectiva y el mínimo de temperatura.	Redacción y envío del artículo de investigación relacionado con el tema de investigación.
Redacción y envío del artículo "Nonlinear Convergence of Solar-like Stars Chromospheres Using Millimeter, Submillimeter, and Infrared Observations".	Redacción y envío del artículo "The MESAS Project: ALMA Observations of the F-type Stars γ Lep, γ Vir A, and γ Vir B".	Presentación del examen de candidatura	Asistir a un congreso internacional.	Redacción de tesis.	Diseño de un programa de observación para trabajos futuros.

¡Gracias!

Bibliografía

- Athay, R. G. 1959, in IAU Symposium, Vol. 9, URSI Symp. 1: Paris Symposium on Radio Astronomy, ed. R. N. Bracewell, 98
- Avrett, E. H., & Loeser, R. 2008, ApJS, 175, 229
- De la Luz, V. 2016, ApJ, 825, 138
- De la Luz, V., Lara, A., Mendoza-Torres, J. E., & Selhorst, C. L. 2010, ApJS, 188, 437–446
- De la Luz, V., Lara, A., & Raulin, J.-P. 2011, ApJ, 737, 1
- De la Luz, V. D. L., Raulin, J.-P., & Lara, A. 2012, ApJ, 762, 84
- Drake, S. A., Simon, T., & Brown, A. 1993, ApJ, 406, 247
- Dulk, G. A. 1985, ARA&A, 23, 169
- Gay, J. 1970, A&A, 6, 327
- Gezari, D. Y., Joyce, R. R., & Simon, M. 1973, AAP, 26, 409
- Golovinskii, P. A., & Zon, B. A. 1980, Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, 50, 1847
- Kundu, M. R. 1971, SoPh, 21, 130
- Linsky, J. L. 2017, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 55, 159
- Liseau, R., De la Luz, V., O'Gorman, E., et al. 2016, A&A, 594, A109
- Loukitcheva, M., Solanki, S. K., Carlsson, M., & Stein, R. F. 2004, A&A, 419, 747

Bibliografía

- Matthews, L.D. 2019, PASP, 131, 016001
- Montesinos, B., Eiroa, C., Krivov, A. V., et al. 2016, AAP, 593, A51
- Pagel, B. E. J. 1964, ARA&A, 2, 267
- Selhorst, C. L., Silva, A. V. R., & Costa, J. E. R. 2005, A&A, 433, 365
- Tapia-Vázquez, F., & De la Luz, V. 2020, ApJS, 246, 5
- Van de Hulst, H. C. 1953, The Chromosphere and the Corona (Chicago Press), 207
- Vernazza, J. E., Avrett, E. H., & Loeser, R. 1981, APJS, 45, 635
- White, J. A., Tapia-Vázquez, F., Hughes, A. G., et al. 2020, ApJ, 894, 76
- White, J. A., Tapia-Vázquez, F., Hughes, A. G., et al. 2021, ApJL, 912, L5
- Zheleznyakov, V. V. 1996, Radiation in Astrophysical Plasmas, Vol. 204 (Springer)