



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

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

PROYECTO DOCTORAL

Presenta

Francisco Tapia Vázquez

Instituto de Radioastronomía y Astrofísica

Directores de Tesis

Dr. Victor Hugo De la Luz Rodríguez

Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia

Dr. Luis Alberto Zapata González

Instituto de Radioastronomía y Astrofísica

Morelia Michoacán, Junio 2020

# Introducción

A finales del siglo XIX la detección de ondas de radio por Heinrich Hertz (Hertz, 1889) abrió el camino para realizar los primeros intentos de detección de radio emisión proveniente del espacio. Utilizando la teoría de Planck, desarrollada en 1900, se pudo determinar de forma teórica la cantidad de radiación que se puede recibir del Sol suponiendo que es un cuerpo negro. Para longitudes de onda en el rango de 10 cm a 30 m (Radio), la teoría predecía una emisión tan débil, que la instrumentación de la época no podría detectarla. Así lo demuestran los intentos de Jansky para detectar por primera vez la radio emisión del Sol a 20.5 MHz (Jansky, 1932).

Fue hasta el 26 febrero de 1942, durante la Segunda Guerra Mundial, cuando el ejército británico reportó una fuerte interferencia en los radares que operaban a 50 MHz. Un análisis detallado, mostró que esta radiación provenía del Sol (Hey, 1946). El primer cálculo de temperatura de brillo del Sol, fue reportado por Reber (1946) a 480 MHz, donde se determinó que la temperatura era de alrededor de  $10^6$  K, similar a la temperatura que se obtuvo proveniente de observaciones previas utilizando líneas de emisión de átomos altamente ionizados (Edlén and Swings, 1942). La región observada fue nombrada como la corona solar. Tras el paso de la guerra, diversos institutos de investigación en Australia, Gran Bretaña, Canadá y Estados Unidos intensificaron el estudio de la atmósfera solar (Covington and Broten, 1954; Christiansen and Warburton, 1955; Coates, 1957). Durante la década de los 50, varios trabajos demostraron que la temperatura de brillo del Sol disminuía conforme la frecuencia de los receptores utilizados en las observaciones aumentaba (Hagen, 1951; Coates, 1958), lo que mostraba la complejidad de la atmósfera superior del Sol. Este tipo de comportamiento no podía ser explicado con un simple cuerpo negro. Para modelar esta emisión, Van de Hulst (1953), Athay (1959) y Allen (1963) propusieron modelos teóricos en donde coexistían una componente caliente y una fría. La componente fría fue asociada a la cromosfera debido a que presentaba temperaturas que coincidían con las observaciones en  $H\alpha$  y en la línea H y K del CaII (Pagel, 1964). Basado en su modelo, Zheleznyakov (1965) identificó que a 50 GHz se encontraría una región de baja temperatura. Sin embargo, las primeras observaciones milimétricas y sub-milimétricas (Gay, 1970; Kundu, 1971; Gezari et al., 1973) mostraron que el principal mecanismo de emisión es Bremsstrahlung térmico y es así como se pudo predecir que esta región de baja temperatura tenía que encontrarse a una frecuencia mayor, alrededor de 800 GHz y una temperatura de brillo de alrededor de 4800 K, semejante a la temperatura de 4400 K que se obtuvo a partir de observaciones de la línea de CO realizadas por telescopios ópticos infrarrojos un par de décadas antes (Goldberg and Müller, 1953).

Para la década de los 70, existían las suficientes observaciones solares, en longitudes de onda desde el ultravioleta (UV) hasta el radio, lo que permitió realizar el primer modelo unificado de la atmósfera superior del Sol (Vernazza et al., 1973, 1976, 1981). Estos modelos, llamados VAL, publicados a comienzo de los 80, se calcularon con la aproximación del equilibrio hidrostático y utilizando el equilibrio estadístico para resolver la ecuación de transferencia radiativa tanto en el continuo como en las líneas de emisión y absorción. La hipótesis más fuerte utilizada en estos modelos, es que los flujos horizontales son mucho menores que los verticales por lo que la aproximación 1D es válida (Fontenla et al., 2006). Los modelos VAL utilizaron principalmente observaciones en el Visible y en el UV (Skylab) para ajustar el perfil teórico de temperatura y únicamente utilizaron las observaciones a longitudes de onda de radio, milimétricas y submilimétricas para validar el modelo. Es decir, las observaciones de baja frecuencia no se utilizaron para el proceso de convergencia de los modelos atmosféricos. En el modelo promedio del Sol (VALC), destaca la región conocida como el mínimo de temperatura (4400 K a 515 km sobre la fotosfera). Esta región fue obtenida a partir de las líneas de emisión de H y K del CaII.

En paralelo al desarrollo de los modelos teóricos (Linsky, 1980; Fontenla et al., 1990, 1991, 1993), se fueron desarrollando instrumentos cada vez más sofisticados. Uno de los más exitosos hasta ahora, es el Very Large Array (VLA), el cual permitió observar con regularidad el Sol y algunas estrellas cercanas en frecuencias que van desde los 74 MHz hasta los 50 GHz (von Hoerner, 1975). Estas observaciones hicieron posible estudiar los mecanismos de emisión de radiación en las estrellas (Dulk, 1985). Se identificó que

los principales mecanismos de emisión en estas frecuencias, son Bremsstrahlung térmico, giroresonancia, emisión de plasma y sincrotrón. Aunque el VLA representó un gran avance en el entendimiento de los procesos de emisión, aún presentaba limitaciones observacionales para estudiar con más detalle la atmósfera de las estrellas. El VLA no puede realizar observaciones sub-milimétricas debido al rms de la superficie de sus platos y a la opacidad del sitio. Las observaciones submilimétricas deben ser realizadas en alta montaña donde la columna de vapor de agua precipitable es tan baja que permite realizar observaciones a muy alta frecuencia (Masson, 1994).

Los primeros modelos atmosféricos del Sol basados en observaciones sub-milimétricas fueron publicados por Loukitcheva, M. et al. (2004); Selhorst et al. (2005); De la Luz et al. (2010). Estos modelos presentaban diferencias con respecto a los calculados por observaciones UV (Avrett and Loeser, 2008), ya que los modelos UV obtenían temperaturas de brillo más altas, especialmente, en la región del mínimo de temperatura. De la Luz et al. (2014) demostró que si se modificaba la estructura vertical de temperatura en la región del mínimo de temperatura, era posible obtener un mejor espectro a longitudes de onda submilimétricas. Además, estos nuevos modelos demostraron que el espesor de la cromosfera y la densidad electrónica, es mayor que en los modelos basados en observaciones UV (De la Luz, 2016).

Con la puesta en marcha del Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), se pudo observar por primera vez la cromosfera de una estrella diferente al Sol y desarrollar el primer modelo cromosférico estelar basado en observaciones a longitudes de onda infrarrojas, submilimétricas y milimétricas (Liseau et al., 2013, 2016) utilizando un modelo de emisión fuera de equilibrio termodinámico local (De la Luz et al., 2012). La participación en la primera modelación de una cromosfera estelar, nos mostró la importancia de tener una metodología para el cálculo de las condiciones físicas de atmósferas estelares utilizando las observaciones de estos nuevos instrumentos.

Esta metodología llamada Kinich-Pakal (KP), fue desarrollada y publicada por Tapia-Vázquez and De la Luz (2020) (ver Figura 1). El método está basado en un sistema de convergencia no lineal (Levenberg-Marquardt), que utiliza el código PakalMPI como función paramétrica. PakalMPI es un código ampliamente probado en física solar que puede calcular el espectro de emisión resolviendo la Ecuación de Transferencia Radiativa (ETR) utilizando el Equilibrio Estadístico (NLTE) y las funciones de opacidad para Bremsstrahlung térmico, Bremsstrahlung Inverso y  $H^-$  (De la Luz et al., 2010, 2012, 2014; De la Luz, 2016). Gracias a Kinich-Pakal se han podido calcular las cromosferas de  $\alpha$  Cen A,  $\gamma$  Lep,  $\gamma$  Vir A y  $\gamma$  Vir B, utilizando las últimas observaciones de ALMA Tapia-Vázquez and De la Luz (2020); White et al. (2020).

Recientemente, ALMA hizo públicas las observaciones milimétricas del Sol con una resolución angular excepcional (White et al., 2017; Bastian et al., 2018; Loukitcheva, 2019) lo que proveerá de una mayor fuente de información a los modelos cromosféricos solares y de estrellas de tipo solar.

## Hipótesis

La emisión observada a longitudes de onda milimétricas, sub-milimétricas e infrarrojas de la cromosfera solar no corresponde a la emisión de un cuerpo negro por lo que se requiere un modelo de convergencia no lineal, resolver el equilibrio estadístico (NLTE) y la ecuación de transferencia radiativa en una atmósfera estratificada para una mejor aproximación. Todos estos modelos han sido desarrollado durante los últimos años y han sido probados para el caso del Sol y en solo algunas estrellas de tipo solar. Debido a la puesta en marcha de infraestructura en radioastronomía sub-milimétrica, cada vez encontramos con más observaciones cromosféricas de estrellas de diferentes clases espectrales. Estas nuevas observaciones nos permiten utilizar por primera vez las herramientas teóricas desarrolladas para la emisión solar en el milimétrico, sub-milimétrico e infrarrojo en un contexto estelar más amplio.

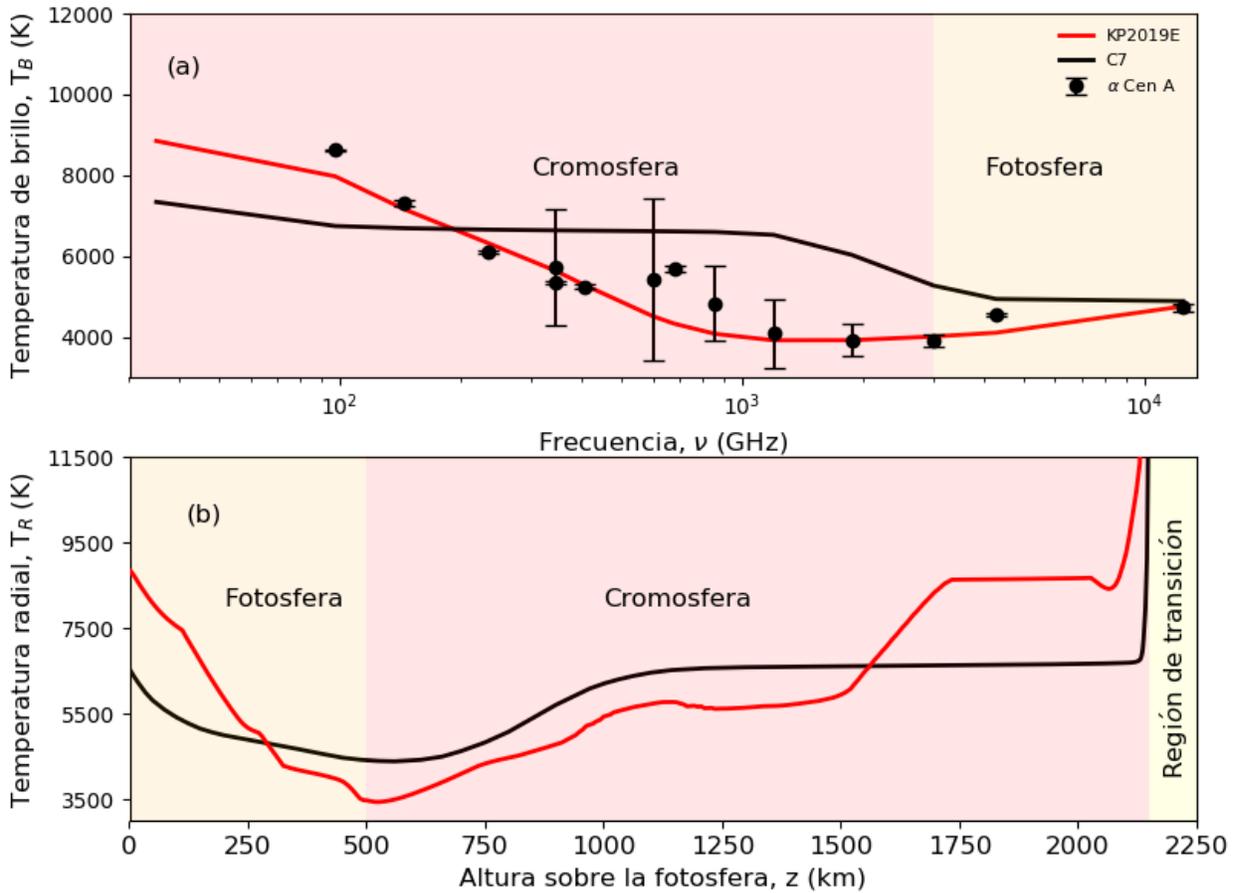


Figura 1: Modelo cromosférico obtenido con KP (Tapia-Vázquez and De la Luz, 2020). (a) Los puntos negros representan el espectro observado de  $\alpha$  Cen A. La línea negra es el espectro sintético generado con el modelo cromosférico solar C7 y la línea roja es el espectro obtenido con KP. Se muestran las capas atmosféricas donde la radiación se origina. (b) La línea negra es el perfil de temperatura del modelo C7 y la línea roja es el perfil de temperatura de  $\alpha$  Cen A obtenido con KP. Al modificar el perfil de temperatura inicial (línea negra) utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt, KP puede ajustar el espectro sintético al observado y de esta manera, conocer las condiciones físicas de la cromosfera.

## Objetivo

Determinar las condiciones físicas de la región atmosférica estelar conocida como Cromosfera utilizando el modelo KP y las recientes observaciones entre los 35 GHz y los 12500 GHz de estrellas con temperaturas efectivas entre los 5000 K y 7000 K que corresponden a la clasificación espectral F, G y K de secuencia principal.

## Objetos Particulares

1. Optimizar el método de ajuste no lineal KP.
2. Crear un 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 efectiva, la altura sobre la fotosfera y la temperatura radial en función de la altura.
5. Determinar la influencia del perfil de densidad en el calculo de la temperatura radial.
6. Caracterizar las condiciones físicas de la cromosfera en función de la temperatura efectiva de la estrella.

## Metodología

A continuación mencionamos las principales herramientas metodológicas que utilizaremos en este proyecto, las cuales incluyen las observaciones, el método de convergencia, las condiciones iniciales y la creación de la malla de observaciones y modelos.

## Observaciones

Las observaciones se obtendrán de la base datos del Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), Very Large Array (VLA), del telescopio espacial Herschel y otros radiotelescopios que se encuentren en el rango de los 35 GHz hasta los 12500 GHz. En caso de ser necesario, se reducirán los datos y se convertirá el flujo observado en temperatura de brillo, lo que permitirá estudiar la emisión del plasma. Estas observaciones servirán para hacer una malla de interpolación. Para la selección de las estrellas, se toman en cuenta que no tenga un exceso de emisión en infrarrojo, lo cual indicaría la presencia de un disco de escombros a su alrededor (Montesinos et al., 2016), estar en secuencia principal y con temperatura efectiva entre 5000 K y 7000 K. Las estrellas que hasta el momento se han encontrado y procesado sus datos, se detallan en la Tabla 1.

Estrella	Tipo Espectral	Radiotelescopio/Telescopio
$\gamma$ Vir A	F0V	ALMA <sup>1</sup>
$\gamma$ Vir B	F0V	ALMA
$\gamma$ Lep	F6V	ALMA, Herschel <sup>2</sup>
$\eta$ Cas A	F9V	VLA <sup>3</sup>
$\chi^1$ Ori	G1V	ALMA, VLA
Sol	G2V	ALMA, VLA
$\alpha$ Cen A	G2V	ALMA, ATCA <sup>4</sup> , Herschel
$\tau$ Cet	G8V	VLA
40 Eri A	K0V	VLA
$\alpha$ Cen B	K1V	ALMA, ATCA, Herschel
$\epsilon$ Eri	K2V	ALMA, VLA, SCUBA <sup>5</sup> , GTM*

Tabla 1: Estrellas de tipo solar con observaciones a longitudes de onda que van desde el infrarrojo al radio. \*Base de datos no disponible. <sup>1</sup><https://almascience.nrao.edu/asax/> <sup>2</sup><http://archives.esac.esa.int/hsa/whsa/> <sup>3</sup><https://archive.nrao.edu/archive/advquery.jsp> <sup>4</sup><https://atoa.atnf.csiro.au/query.jsp> <sup>5</sup><https://www.cadc-ccda.hia-ih.nrc-cnrc.gc.ca/en/jcmt/>

## Modelo de Convergencia: Kinich-Pakal

Para obtener los modelos cromosféricos estelares, se utilizará la metodología KP (Tapia-Vázquez and De la Luz, 2020). Esta metodología consiste en ajustar un modelo cromosférico solar utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt para generar un espectro de emisión sintético que pueda reproducir las observaciones obtenidas con diversos radiotelescopios en frecuencias que van desde los 33 GHz hasta los 12500 GHz.

Para producir el espectro de emisión sintético a las frecuencias previamente mencionadas, KP utiliza el código PAKALMPI (De la Luz et al., 2010). Este código utiliza la aproximación a una atmósfera plano paralela en equilibrio hidrostático, calcula la densidad electrónica fuera del equilibrio termodinámico local para el hidrógeno haciendo la interpolación del coeficiente despegue  $b_1$  y en equilibrio termodinámico local para otros 21 átomos. Utiliza las funciones de opacidad Bremsstrahlung térmico, Bremsstrahlung inverso y  $H^-$  (Dulk, 1985; Golovinskii and Zon, 1980; Zheleznyakov, 1996) y finalmente, resuelve la ecuación de transferencia radiativa para obtener un espectro de emisión sintético.

Para realizar el ajuste con KP, es necesario cambiar el valor del radio estelar y la gravedad superficial para poder equilibrar hidrostáticamente la atmósfera de estrella. Además, debemos establecer los límites de convergencia del algoritmo de Levenberg-Marquardt para garantizar que obtendremos el mejor modelo cromosférico.

## Condiciones Iniciales

En Tapia-Vázquez and De la Luz (2020) y White et al. (2020) pudimos determinar que el modelo solar C7 (Avrett and Loeser, 2008) funciona como condición inicial de KP para estrellas de tipo solar cuyas temperaturas efectivas se encuentran entre los 4700 K y los 7000 K. Por lo tanto, utilizaremos este modelo como condición inicial para obtener los modelos cromosféricos.

## Malla de Observaciones y Modelos

Para aumentar la resolución de las observaciones, es necesario estimar los valores de la temperatura de brillo en función de la frecuencia y la temperatura efectiva como se muestra en la Figura 2a. Esta malla de observaciones, se utilizará como entrada para la metodología KP y generar un conjunto de modelos cromosféricos.

Para determinar como están cambiando las condiciones físicas de la cromosfera en función de la temperatura efectiva, se creará una malla de modelos cromosféricos. Esta malla nos servirá también para estudiar detalladamente la región del mínimo de temperatura.

## Resultados Esperados

Con la realización de este proyecto, se espera obtener un conjunto de atmósferas estelares precalculadas en función de la temperatura efectiva, lo que permitirá estudiar a detalle las condiciones físicas de las cromosferas estelares. Además, con la malla de observaciones, se espera obtener una mejor modelación del espectro estelar a longitudes de onda milimétricas, sub-milimétricas e infrarrojas.

Estos modelos sentarán las bases para trabajos futuros en donde se busca obtener con precisión la ubicación y cantidad de energía no radiativa a partir de la estructura térmica de temperatura, lo cual representa el primer paso para comprender los mecanismos físicos que permiten la existencia de la cromosfera. Así mismo, una mejor modelación del espectro estelar, permitirá optimizar el tiempo de observación de estrellas de tipo solar en radio telescopios a frecuencias que van desde los 35 GHz hasta los 12500 GHz.

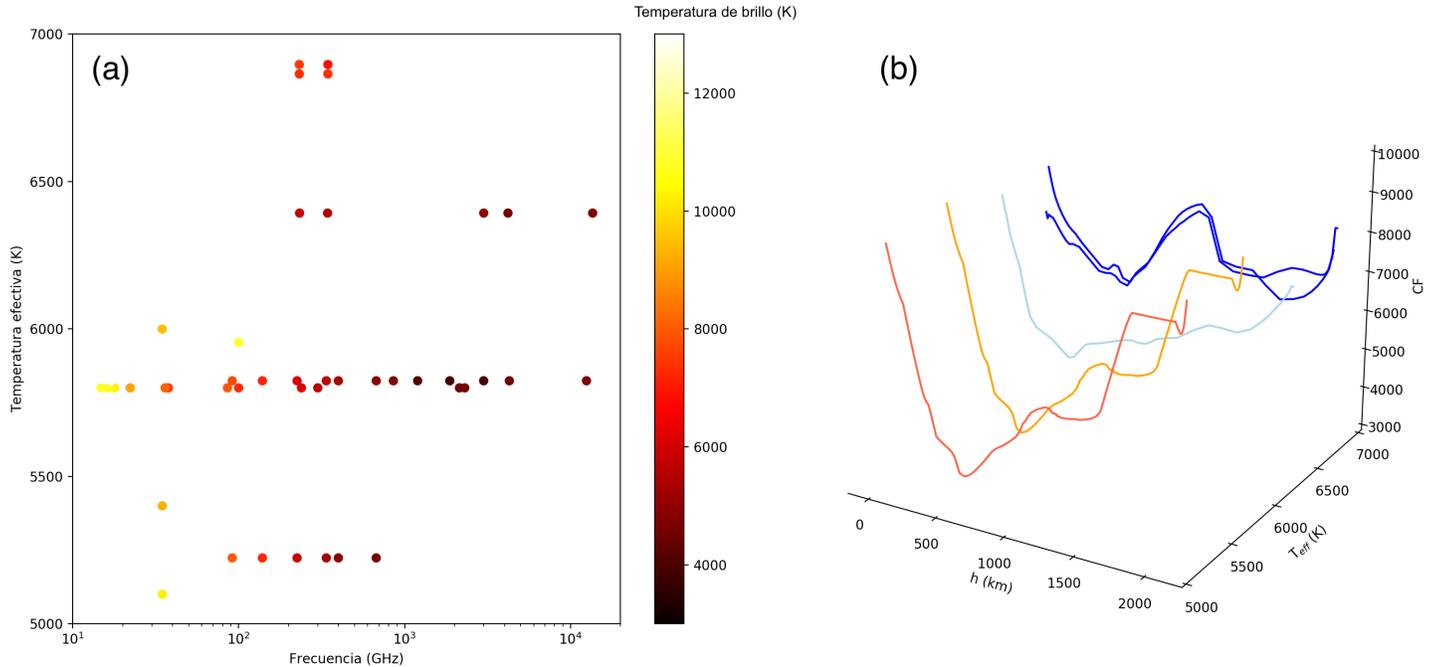


Figura 2: Malla de observaciones y modelos cromosféricos precalculados. (a) Malla de observaciones obtenidas con diversos radiotelescopios. En el eje Y se muestra la temperatura efectiva de la estrella, en el eje X la frecuencia y la barra muestra la escala de temperatura de brillo. (b) Conjunto de modelos cromosféricos obtenidos con KP en función de la temperatura efectiva. En el eje X se muestra la temperatura efectiva de la estrella, en el eje Y la altura sobre la fotosfera y en el eje Z la temperatura del plasma conocida también como la temperatura radial ( $T_r$ ).

## Índice Tentativo

1. Cromosferas Estelares
  - 1.1. La Cromosfera
  - 1.2. Diagnóstico Espectral
    - 1.2.1. Líneas de Emisión
    - 1.2.2. UV
    - 1.2.3. Infrarrojo
    - 1.2.4. Milimétrico y Submilimétrico
    - 1.2.5. Radio
  - 1.3. Modelos Semiempíricos Cromosféricos
    - 1.3.1. Modelos Hidrostáticos
    - 1.3.2. Modelos Hidrodinámicos
    - 1.3.3. Modelos Magnetohidrodinámicos
  - 1.4. Termodinámica de la Cromosfera
    - 1.4.1. Equilibrio Termodinámico
    - 1.4.2. Equilibrio Estadístico
  - 1.5. Funciones de Opacidad
  - 1.6. Ecuación de Transferencia Radiativa
2. Modelos Numéricos
  - 2.1. PAKALMPI
  - 2.2. KINICH PAKAL
  - 2.3. Interpolación multivariable
3. Datos Observacionales
4. Malla de Atmósferas Estelares
  - 4.1. Implementación
  - 4.2. Calibración de Malla
  - 4.3. Casos de prueba
5. Discusión y Conclusiones
6. Apéndices
  - A Documentación
  - B Código
7. Bibliografía

# Cronograma Detallado

## Semestre 1:

- Revisión de la bibliografía.
- Búsqueda en la base de datos de radiotelescopios de observaciones de estrellas de tipo solar.
- Redacción y envío del artículo "Nonlinear Convergence of Solar-like Stars Chromospheres Using Millimeter, Submillimeter, and Infrared Observations".

## Semestre 2:

- Revisión de la Metodología Kinich-Pakal.
- Procesamiento de las observaciones encontradas en las bases de datos de los radio telescopios.
- Redacción y envío del artículo "The MESAS Project: ALMA Observations of the F-type Stars  $\gamma$  Lep,  $\gamma$  Vir A, and  $\gamma$  Vir B".

## Semestre 3:

- Análisis de la densidad en los modelos cromosféricos solares.
- Programar la malla de interpolación para las observaciones y los modelos.
- Presentar el examen de candidatura.

## Semestre 4:

- Calcular los modelos cromosféricos.
- Caracterizar la cromosfera en función de la temperatura efectiva.
- Asistir a un congreso internacional.

## Semestre 5:

- Estancia de investigación.
- Establecer una función analítica entre la temperatura efectiva y el mínimo de temperatura.
- Redacción de Tesis.

## Semestre 6:

- Redacción de Tesis.
- Redacción y envío del artículo de investigación relacionado con el tema de investigación.
- Diseño de un programa de observación para trabajos futuros.

Junto con las actividades académicas, se realizarán actividades de divulgación programadas por el departamento de divulgación del Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (IRyA).

## Bibliografía

- Allen, C. W. (1963). Local Physics of the Corona. In *The Solar Corona*, volume 16 of *IAU Symposium*, page 1.
- Athay, R. G. (1959). A model of the chromosphere from radio and optical data. In Bracewell, R. N., editor, *URSI Symp. 1: Paris Symposium on Radio Astronomy*, volume 9 of *IAU Symposium*, page 98.
- Avrett, E. H. and Loeser, R. (2008). Models of the Solar Chromosphere and Transition Region from SUMER and HRTS Observations: Formation of the Extreme-Ultraviolet Spectrum of Hydrogen, Carbon, and Oxygen. *ApJS*, 175(1):229–276.
- Bastian, T. S., Bárta, M., Brajša, R., Chen, B., Pontieu, B. D., Gary, D. E., Fleishman, G. D., Hales, A. S., Iwai, K., Hudson, H., Kim, S., Kobelski, A., Loukitcheva, M., Shimojo, M., Skokić, I., Wedemeyer, S., White, S. M., and Yan, Y. (2018). Exploring the Sun with ALMA. *The Messenger*, 171:25–30.
- Christiansen, W. N. and Warburton, J. A. (1955). The Distribution of Radio Brightness over the Solar Disk at a Wavelength of 21 Centimetres. III. The Quiet Sun-Two-Dimensional Observations. *Australian Journal of Physics*, 8:474.
- Coates, R. J. (1957). *a Millimeter-Wavelength Investigation of the Solar Chromosphere*. PhD thesis, THE JOHNS HOPKINS UNIVERSITY.
- Coates, R. J. (1958). A Model of the Chromosphere from Millimeter Wave-Length Observations. *ApJ*, 128:83.
- Covington, A. E. and Broten, N. W. (1954). Brightness of the Solar Disk at a Wave Length of 10.3 Centimeters. *ApJ*, 119:569.
- De la Luz, V. (2016). The chromospheric solar limb brightening at radio, millimeter, sub-millimeter, and infrared wavelengths. *The Astrophysical Journal*, 825(2):138.
- De la Luz, V., Chavez, M., Bertone, E., and Castro, G. G. D. (2014). The relation between the radial temperature profile in the chromosphere and the solar spectrum at centimeter, millimeter, submillimeter, and infrared wavelengths. *Solar Physics*, 289(8):2879–2889.
- De la Luz, V., Lara, A., Mendoza-Torres, J. E., and Selhorst, C. L. (2010). Pakal: A three-dimensional model to solve the radiative transfer equation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 188(2):437–446.
- De la Luz, V. D. L., Raulin, J.-P., and Lara, A. (2012). The chromospheric solar millimeter-wave cavity originates in the temperature minimum region. *The Astrophysical Journal*, 762(2):84.
- Dulk, G. A. (1985). Radio emission from the sun and stars. *ARA&A*, 23:169–224.
- Edlén, B. and Swings, P. (1942). Term Analysis of the Third Spectrum of Iron (Fe III). *ApJ*, 95:532.
- Fontenla, J. M., Avrett, E., Thuillier, G., and Harder, J. (2006). Semiempirical Models of the Solar Atmosphere. I. The Quiet- and Active Sun Photosphere at Moderate Resolution. *ApJ*, 639(1):441–458.
- Fontenla, J. M., Avrett, E. H., and Loeser, R. (1990). Energy Balance in the Solar Transition Region. I. Hydrostatic Thermal Models with Ambipolar Diffusion. *ApJ*, 355:700.
- Fontenla, J. M., Avrett, E. H., and Loeser, R. (1991). Energy Balance in the Solar Transition Region. II. Effects of Pressure and Energy Input on Hydrostatic Models. *ApJ*, 377:712.

- Fontenla, J. M., Avrett, E. H., and Loeser, R. (1993). Energy Balance in the Solar Transition Region. III. Helium Emission in Hydrostatic, Constant-Abundance Models with Diffusion. *ApJ*, 406:319.
- Gay, J. (1970). Balloon Observations in the Submillimeter Region. *A&A*, 6:327.
- Gezari, D. Y., Joyce, R. R., and Simon, M. (1973). Measurement of the Solar Brightness Temperature at 345  $\mu$ , 450  $\mu$  and 1000  $\mu$ . *AAP*, 26:409.
- Goldberg, L. and Müller, E. A. (1953). Carbon Monoxide in the Sun. *ApJ*, 118:397.
- Golovinskii, P. A. and Zon, B. A. (1980). Bremsstrahlung during collision of electrons with negative ions. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 50:1847–1851.
- Hagen, J. P. (1951). Temperature Gradient in the Sun’s Atmosphere Measured at Radio Frequencies. *ApJ*, 113:547.
- Hertz, h. (1889). The Forces of Electric Oscillations Treated According to Maxwell’s Theory. by Dr. H. Hertz: II. *Nature*, 39(1010):450–452.
- Hey, J. S. (1946). Solar Radiations in the 4-6 Metre Radio Wave-Length Band. *Nature*, 157(3976):47–48.
- Jansky, K. G. (1932). Directional studies of atmospherics at high frequencies. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 20(12):1920–1932.
- Kundu, M. R. (1971). Solar Radio Emission at 1.2 mm Wavelength. *SoPh*, 21(1):130–136.
- Linsky, J. L. (1980). Stellar chromospheres. *ARAA*, 18:439–488.
- Liseau, R., De la Luz, V., O’Gorman, E., Bertone, E., Chavez, M., and Tapia, F. (2016). ALMA’s view of the nearest neighbors to the Sun. The submm/mm SEDs of the  $\alpha$  Centauri binary and a new source. *A&A*, 594:A109.
- Liseau, R., Montesinos, B., Olofsson, G., Bryden, G., Marshall, J. P., Ardila, D., Bayo Aran, A., Danchi, W. C., del Burgo, C., Eiroa, C., Ertel, S., Fridlund, M. C. W., Krivov, A. V., Pilbratt, G. L., Roberge, A., Thébault, P., Wiegert, J., and White, G. J. (2013).  $\alpha$  Centauri A in the far infrared. First measurement of the temperature minimum of a star other than the Sun. *A&A*, 549:L7.
- Loukitcheva, M. (2019). First solar observations with ALMA. *Advances in Space Research*, 63(4):1396–1403.
- Loukitcheva, M., Solanki, S. K., Carlsson, M., and Stein, R. F. (2004). Millimeter observations and chromospheric dynamics\*. *A&A*, 419(2):747–756.
- Masson, C. R. (1994). Atmospheric Effects and Calibrations. In Ishiguro, M. and Welch, J., editors, *IAU Colloq. 140: Astronomy with Millimeter and Submillimeter Wave Interferometry*, volume 59 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 87–95.
- Montesinos, B., Eiroa, C., Krivov, A. V., Marshall, J. P., Pilbratt, G. L., Liseau, R., Mora, A., Maldonado, J., Wolf, S., Ertel, S., Bayo, A., Augereau, J. C., Heras, A. M., Fridlund, M., Danchi, W. C., Solano, E., Kirchschrager, F., del Burgo, C., and Montes, D. (2016). Incidence of debris discs around FGK stars in the solar neighbourhood. *AAP*, 593:A51.
- Pagel, B. E. J. (1964). The Structure of the Solar Chromosphere. *ARA&A*, 2:267.
- Reber, G. (1946). Solar Radiation at 480 Mc./sec. *Nature*, 158(4026):945.

- Selhorst, C. L., Silva, A. V. R., and Costa, J. E. R. (2005). Solar atmospheric model with spicules applied to radio observation. *A&A*, 433(1):365–374.
- Tapia-Vázquez, F. and De la Luz, V. (2020). Nonlinear Convergence of Solar-like Stars Chromospheres Using Millimeter, Submillimeter, and Infrared Observations. *ApJS*, 246(1):5.
- Van de Hulst, H. C. (1953). *The Chromosphere and the Corona*, page 207. Chicago Press.
- Vernazza, J. E., Avrett, E. H., and Loeser, R. (1973). Structure of the Solar Chromosphere. Basic Computations and Summary of the Results. *ApJ*, 184:605–632.
- Vernazza, J. E., Avrett, E. H., and Loeser, R. (1976). Structure of the solar chromosphere. II. The underlying photosphere and temperature-minimum region. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 30:1–60.
- Vernazza, J. E., Avrett, E. H., and Loeser, R. (1981). Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet sun. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 45:635–725.
- von Hoerner, S. (1975). Radio telescopes for millimeter wavelength. *A&A*, 41(3-4):301–306.
- White, J. A., Tapia-Vázquez, F., Hughes, A. G., Moór, A., Matthews, B., Wilner, D., Aufdenberg, J., Hughes, A. M., la Luz, V. D., and Boley, A. C. (2020). The MESAS project: ALMA observations of the f-type stars  $\gamma$  lep,  $\gamma$  vir a, and  $\gamma$  vir b. *ApJ*, 894(1):76.
- White, S. M., Iwai, K., Phillips, N. M., Hills, R. E., Hirota, A., Yagoubov, P., Siringo, G., Shimojo, M., Bastian, T. S., Hales, A. S., Sawada, T., Asayama, S., Sugimoto, M., Marson, R. G., Kawasaki, W., Muller, E., Nakazato, T., Sugimoto, K., Brajša, R., Skokić, I., Bárta, M., Kim, S., Remijan, A. J., de Gregorio, I., Corder, S. A., Hudson, H. S., Loukitcheva, M., Chen, B., De Pontieu, B., Fleishmann, G. D., Gary, D. E., Kobelski, A., Wedemeyer, S., and Yan, Y. (2017). Observing the Sun with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): Fast-Scan Single-Dish Mapping. *SoPh*, 292(7):88.
- Zheleznyakov, V. V. (1965). Model of the Lower Chromosphere Based on Radio Data. *sovast*, 8:819.
- Zheleznyakov, V. V. (1996). *Radiation in Astrophysical Plasmas*, volume 204. Springer.