

ESTUDIO DEL ÚLTIMO ECLIPSE CROMOSFÉRICO DE  $\zeta$  AURIGAE,  
OTOÑO 2019

Propuesta de trabajo de grado para optar al título de Física

**Natalia Lucía Oliveros Gómez<sup>1,2</sup>**

Director: Ph.D Klaus-Peter Schröder <sup>3</sup>

Co-Director: Ph.D Luis Alberto Núñez<sup>1,2</sup>

Co-Director: M.Sc Faiber Danilo Rosas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación GIRG

<sup>2</sup>Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales

<sup>3</sup>Grupo de Investigación en Física Estelar, Universidad de Guanajuato

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2020

# Índice

<b>1. Grupo de Investigación de la Universidad de Guanajuato</b>	<b>3</b>
<b>2. Lugar dentro de los proyectos del grupo de investigación</b>	<b>4</b>
<b>3. Problema de investigación</b>	<b>4</b>
<b>4. Justificación</b>	<b>6</b>
<b>5. Objetivos</b>	<b>7</b>
<b>6. Metodología</b>	<b>8</b>
<b>7. Resultados esperados</b>	<b>8</b>
<b>8. Condiciones y recursos que ofrece el grupo de investigación</b>	<b>9</b>
8.1. Recursos observacionales . . . . .	9
8.2. Recursos computacionales . . . . .	9
8.3. Recursos de experiencia . . . . .	10
8.4. Recursos Económicos . . . . .	10
<b>9. Cronograma de Actividades</b>	<b>10</b>
<b>10. Anexos</b>	<b>12</b>

<b>Título de la propuesta:</b> Estudio del último eclipse cromosférico de $\zeta$ Aurigae, otoño 2019		
<b>Nombre del estudiante:</b> Natalia Lucía Oliveros Gómez		
<b>Código:</b> 2160778	<b>E-mail:</b> onatalialucia@gmail.com	<b>Cel:</b> 3123154756
<b>Nombre del grupo de Investigación:</b> Física Estelar de la Universidad de Guanajuato		
<b>Dirección:</b> Callejón de Jalisco S/N, Col. Valenciana , CP: 36023 Guanajuato, Gto, México. Departamento de Astronomía		
<b>Tel:</b> 1 473 732 0006	<b>E-mail:</b> astrokp85@gmail.com	
<b>Líneas de investigación desarrolladas por el grupo:</b> Atmósferas estelares, evolución estelar, sistemas binarios		
<b>Profesor de la Escuela de Física que dirigirá el trabajo:</b> Ph.D Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez		
<b>Profesional del grupo de investigación que servirá de tutor:</b> Ph.D Klaus-Peter Schröder		

## Resumen

Debido a la importancia de los sistemas binarios en la astrofísica, los cuales proveen con precisión cantidades físicas que permiten un conocimiento amplio de la dinámica estelar y la evolución de las estrellas. En el presente proyecto se realiza un análisis de la variación de la densidad de masa columnar con la altura en la cromosfera de la estrella principal del sistema binario  $\zeta$  Aurigae durante el eclipse observado en otoño de 2019. Se hace un estudio de la variabilidad temporal de la línea de calcio ionizado K de CaII (3934 Å), usando espectros con relación S/N de 200-300 y resolución de  $\sim 20000$  obtenidos por TIGRE-HEROS; con lo cual se generan curvas de crecimiento para hacer un análisis de la cromosfera que al ser comparado con eclipses anteriores del mismo sistema, durante la estancia se busca proponer un modelo que explique el cambio de densidad de masa columnar con la altura en la cromosfera de la estrella gigante y la dinámica del sistema.

**Palabras clave:** Estrellas binarias eclipsantes, cromosfera estelar, curvas de crecimiento, espectroscopia.

## 1. Grupo de Investigación de la Universidad de Guanajuato

El grupo de investigación de *Física Estelar*, al cual pertenece el Ph.D Klaus-Peter Schröder y el MSc. Faiber Rosas, tiene como líneas de estudio, el análisis del nacimiento, evolución y muerte de las estrellas frías y las estrellas masivas. Los proyectos e investigaciones se hacen aplicando los principios de la física para modelar el interior de la estrella, su atmósfera y su viento, así como las interacciones en sistemas estelares binarios y en sistemas planetarios. Además del uso modelos teóricos para explicar fenómenos físicos, también se analizan datos observacionales del telescopio TIGRE <sup>1</sup> [1], para obtener propiedades intrínsecas de estrellas frías.

De manera más específica, para estrellas masivas, la investigación se centra en la estructura de los vientos estelares, modelar efectos de rotación, inestabilidades intrínsecas, interacciones en sistemas binarios y evolución estelar. Se busca determinar con precisión parámetros principales como temperatura efectiva, gravedad superficial y composición química, con el uso de modelos fotosféricos generados con el código PHOENIX <sup>2</sup> [2] y análisis de espectros del telescopio TIGRE. Al implementar tanto simulaciones como análisis de datos observacionales, se puede comprender aún mejor la actividad y evolución de estrellas como el Sol, que en el caso en que solo se usara uno de estos métodos. Para el caso de estrellas jóvenes, la investigación tiene un enfoque en el cálculo de la emisión de polvo en sistemas circumplanetarios que las rodean; esto permite caracterizar la distribución de material en los discos, que a su vez tiene que ver con la presencia de planetas.

---

<sup>1</sup>El telescopio TIGRE es una de las herramientas por las cuales se tiene un convenio bilateral entre la Universidad de Guanajuato - México, la Universidad de Hamburgo - Alemania y la Universidad de Liège - Bélgica.

<sup>2</sup>Código que permite modelar atmósferas estelares y espectros teóricos de diferentes tipos de estrellas.

## 2. Lugar dentro de los proyectos del grupo de investigación

Este proyecto se realizará en el marco de pasantía de investigación y está enfocado en analizar es la densidad de masa columnar, que según la astrofísica se refiere a la densidad de átomo de un elemento en el camino óptico de la luz desde la estrella hasta el punto de observación en un área determinada. Con ayuda del análisis de espectros tomados por el telescopio TIGRE los cuales cambian en el proceso de interacción de atmósferas durante el eclipse del sistema Zeta Aurigae. Al realizar estos análisis se están teniendo en cuenta áreas en las que trabaja el grupo como la interacción de sistemas estelares binarios y por ende el área de atmósferas estelares, ya que se analizará la cromosfera de la estrella gigante fría del sistema, implementando códigos de simulación para este tipo de estrellas [3]. También se tendrá en cuenta parámetros principales que necesitan alta precisión como: temperatura efectiva, gravedad superficial y composición química.

El sistema binario antes mencionado fue estudiado por el profesor Klaus-Peter Schröder, en los años 80 [4], y además investigaciones actuales relacionadas con sistemas binarios [5] y relación con la dinámica cromosférica estelar [6],[7]. Además Faiber Rosas también estudió este sistema binario con un enfoque en la gravedad superficial recientemente [8]. Por lo tanto, con la experiencia en dichos tema y en el sistema Zeta Aurigae, resulta relevante retomar estos estudios, ya que en la actualidad se tiene más conocimiento en el área y mejores tecnologías que en aquella época, lo cual permite desarrollar análisis más concretos.

## 3. Problema de investigación

Los sistemas de estrellas binarias eclipsantes están formados por dos estrellas cuyo plano orbital está orientado hacia la Tierra. Por lo tanto, cuando se miden espectros de estos sistemas, en el transcurso del eclipse las componentes espectrales de cada estrella se superponen, haciendo que los espectros individuales no puedan ser reconocibles. Sin embargo, se puede hacer una sustracción espectral para cada estrella si se tienen espectros de la estrella principal sin eclipsar y así comparar con los espectros durante el eclipse. Cuando se logra la separación de espectros en sistemas binarios son una herramienta de los astrónomos para obtener información de cantidades físicas fundamentales de las estrellas, como radios estelares, velocidades orbitales, masas de manera muy precisa, consideraciones geométricas del eclipse y temperaturas efectivas [9].

En el transcurso del tiempo se han hecho análisis de sistemas binarios eclipsantes, en especial donde una de las componentes estelares es una estrella gigante fría. Además, estas estrellas nos permiten obtener información para conocer de manera más clara los fenómenos físicos que ocurren en la cromosfera de las estrellas. Cuando la estrella compañera se aproxima a la estrella gigante roja, en los espectros debido al eclipse se pueden apreciar líneas de absorción adicionales que revelan cambios en temperatura, densidad, extensión y movimiento de la cromosfera, que es la región estelar de transición turbulenta entre la fotosfera (superficie de la estrella) y la corona (donde se transporta y pierde materia por vientos solares). Los datos

obtenidos en el proceso del eclipse son de alta relevancia en la física estelar ya que con los sistemas binarios se obtiene una forma de medir la masa estelar directamente con el uso de las leyes de Kepler y por ende se pueden calibrar trayectorias estelares evolutivas con mayor precisión.

El sistema binario a analizar en este proyecto es Zeta Aurigae, el cual está compuesto por  $\zeta$  Aur A, una supergigante roja de tipo espectral K5II; y  $\zeta$  Aur B una estrella de la secuencia principal de tipo espectral B7V [10]. Éste sistema se encuentra ubicado en la constelación de Auriga y en él se presenta el fenómeno de eclipses atmosféricos, los cuales se pueden observar a simple vista, ya que durante los eclipses la magnitud de  $\zeta$  Aur A disminuye a +3,99 en la banda V. Otra de las características relevantes de este sistema, además de su brillo; es que tiene un largo periodo orbital. Este sistema resulta relevante, ya que hasta el momento no ha sido muy analizado y no se tienen muchos datos observacionales del mismo debido a sus propiedades geométricas.

En trabajos anteriores se han hecho análisis de fotometría y espectroscopia de este sistema con el enfoque de observar el cambio de las líneas de absorción durante el eclipse, dando información importante respecto a la geometría del eclipse, velocidades radiales, masa estelar y luminosidad [4]. También se han hecho análisis a partir de *curvas de crecimiento experimentales* [11], las cuales son gráficos del ancho equivalente de la línea ( $\log(W_\lambda)$ ) se relaciona con la profundidad de la línea en el espectro ( $\log(\tau)$ ) que se refiere a la fuerza de la línea en el espectro. Estas curvas se hacen teniendo en cuenta modelos de densidad e intentando analizar la estructura cromosférica partiendo de la ionización, turbulencia y cambios en la temperatura efectiva. Sin embargo, aún no hay conclusiones específicas de lo que pasa en la atmósfera estelar respecto al cambio en la densidad de masa columnar de átomos del elemento analizado en la fotosfera y cromosfera a medida que cambia la altura, es decir, cambio en la densidad de átomos de H por área por camino óptico entre la estrella y el observador [12]. Inicialmente en los espectros se observaba que todas las líneas metálicas tienen el mismo comportamiento, es decir, que la ionización no cambia con respecto a la altura de la atmósfera, donde para bajas alturas la ionización de los metales es casi completa. Pero en el caso de las líneas de absorción de H y Ca II K (que son las líneas más afectadas durante los eclipses) cambia la ionización media rápidamente con la altura en un factor de 100 con respecto a los demás metales, es decir, que las líneas de Ca II K son un caso anómalo en los eclipses y no se conoce la razón física de que esto suceda [11].

De acuerdo a los trabajos citados anteriormente, surge la necesidad de hacer un análisis que verifique investigaciones de hace más de 30 años, desde un enfoque espectroscópico de la densidad de columna cromosférica, la cual tiene una dependencia con la altitud del eclipse. Y de esta forma intentar aclarar fenómenos que antes no podían ser explicados con los modelos de la época según las observaciones espectroscópicas, como por ejemplo la dinámica envuelta en la cromosfera por medio de perfiles de densidad.

Es muy importante en este planteamiento el uso de espectroscopia, ya que las líneas de absorción varían con la densidad. En la parte alta se observan algunas líneas fuertes y en la parte baja de la atmósfera hay muchas líneas débiles. En el caso de espectros puros se pueden medir mientras no esté eclipsado, con las líneas H y K de Ca II (396,847 nm y 393,368

nm) de la fotosfera que son bastante anchas y se comprueba la emisión central de la estrella gigante, estas líneas estándar tienen características de tipo tardío, ya que es una estrella K y se puede definir una escala  $\lambda$ . También se pueden medir mediante perfiles de dispersión. Para los espectros compuestos, es decir durante el eclipse, se observan cambios en el espectro, estos son de dispersión media y se observan como “ruido” en la contribución al espectro puro de la gigante donde las líneas K desvanecen y se observa que por la presencia de la estrella B7 se tienen líneas anchas e intensas de Ca II que cambian su ancho y fuerza durante el eclipse y no es fácil de hacer una distinción de componentes estelares; además no es posible saber cómo hacer la sustracción de espectros para obtener el de la estrella B. En el eclipse total hay una fuerte absorción mayor de Ca II K y por ende más cantidad de líneas de absorción cromosférica, y es la oportunidad de hacer la sustracción de los espectros de la gigante para hacer las respectivas curvas de crecimiento experimentales.

## 4. Justificación

Durante el siglo pasado la visión de la astronomía pasó de ser una ciencia puramente observacional basada en modelos empíricos a una en donde los fundamentos no solo son experimentales sino también teóricos por medio de principios físicos, dando así paso a la actual astrofísica. Dicha revolución permitió usar el universo como un enorme laboratorio natural, en el que podemos probar nuestras teorías físicas en condiciones extremas (temperaturas altas o bajas, densidades, presiones), que no podemos realizar y probar en laboratorios artificiales. De esta manera, la astronomía y la astrofísica se ha convertido en un campo muy importante de la física.

Para realizar el análisis cromosférico de este sistema binario, a pesar de que es un tema del área de la astronomía, es natural conocer la estrecha relación que tiene esta rama con la física, por lo tanto aunque desde la UIS no se trabaje explícitamente en astronomía o al menos no en análisis de datos observacionales es imprescindible aplicar conceptos físicos, lo cual certifica las competencias como física en la universidad. Dentro de los conceptos físicos empleados en el estudio de sistemas binarios está la espectroscopia, donde es muy importante conocer la interacción fotón-átomo que incluye tipos de absorción, dispersión de resonancia, emisión (re-emisión). También la transferencia radiativa es indispensable al observar el proceso durante el paso de la radiación por la atmósfera de una estrella; adicionalmente cabe resaltar el papel de la teoría atómica al analizar los cambios en la atmósfera estelar (por procesos de ionización y demás).

Por otro parte, desde la rama observacional, dos características fundamentales para la detección y el estudio de sistemas de estrellas binario son el brillo y el periodo. El primero se relaciona con la capacidad de detección por astrónomos observacionales mientras que el segundo es inversamente proporcional a la cantidad de datos, ya que normalmente los estudios de observación requieren de tiempo en observatorios para poder hacer relaciones y comparaciones temporales. En estos sistemas la relación más óptima son altos brillos y bajos periodos. Sin embargo Zeta Aurigae aunque tiene un alto brillo, también tiene un alto periodo (972 días) [13] de tal manera no se tienen muchos datos al respecto, por lo que se ha dificultado su

estudio, haciendo que actualmente exista una brecha entre la literatura de 30 años [4], [14], [11], [15]. Debido a esto, resulta importante retomar o tener en cuenta algunos de los resultados que se han obtenido y verificarlos para presentar mejoras o aportes a algunos desarrollos respecto a este sistema binario, como en el caso de la densidad columnar. Cabe resaltar que debido a distancia entre las estrellas del sistema binario (4,2 UA) [4] los efectos relativistas no toman relevancia y este se puede tratar como un sistema clásico.

Debido a la ausencia de nuevos datos observacionales, solo se tienen modelos fenomenológicos propuestos para el sistema [4] y análisis de la atmósfera estelar [14], [11] en el que se consideran leyes de decaimiento exponencial como se muestra en la ecuación (1) para relacionar escalas de densidad columnar ( $n$ ) y altura ( $h$ ).

$$n(h) = n_o \exp(-h/\alpha) \quad (1)$$

Sin embargo debido a las recientes medidas del telescopio el TIGRE eclipse de otoño del 2019 con mejor resolución espectral  $\sim 20000$  y relación S/N 200-300, se han observado variaciones de densidad no uniforme respecto a la ionización de metales y con estas variaciones se pueden afectar posibles conclusiones de la dinámica de la cromosfera de las estrellas, incluyendo la geometría del eclipse, masa estelar, luminosidad, velocidad radial, temperatura efectiva y densidad columnar. Motivados por esto resulta relevante verificar lo que se ha concluido hasta el momento y si es necesario proponer otro modelo de densidad que se ajuste mejor a los parámetros geométricos del eclipse y que tenga en cuenta dichas variaciones como el caso de ionización de elementos en la atmósfera, reduciendo así las incertidumbres.

Adicionalmente debido a mi aspiración en hacer una maestría en astronomía es muy importante tener la oportunidad de trabajar con datos reales de un observatorio astronómico internacional, además de datos del repositorio Gaia de la ESA [16], los cuales son datos de paralaje con mayor precisión actualmente, permitiendo calcular luminosidades estelares muy acertadas [17]. Para hacer el análisis de estos datos es necesario tener en cuenta consideraciones relevantes y aplicar modelos físicos para reducir datos y comprender fenómenos de la física que se encuentran en ellos con el enfoque astronómico de la rama de física estelar.

## 5. Objetivos

### Objetivo General

- Comparar la absorción cromosférica y el cambio de la densidad de columna  $N(h)$  del eclipse del sistema binario  $\zeta$  Aurigae de otoño 2019 con un antiguo eclipse de 1987.

### Objetivos Específicos



1. Cuantificar el valor del ancho ( $W_\lambda$ ) de las líneas claves (Ca II e H) y la absorción cromosférica ( $\tau$ ) de las dos estrellas
2. Realizar un análisis de las *curvas de crecimiento* observacionales
3. Deducir la densidad de masa columnar.

## 6. Metodología

Para alcanzar los objetivos específicos, se proponen una serie de actividades que están relacionadas con cada uno de los objetivos específicos de acuerdo al número asignado anteriormente:

- 1.1 Instalar y aprender a usar herramientas computacionales para análisis de espectros:
  - iSpec: Genera síntesis espectrales, permite encontrar parámetros estelares mediante ajuste de líneas espectrales y ajuste del continuo usando modelos [18], [19].
  - Código que permite analizar la absorción de la línea K de Ca II, permite medir el ancho de línea y el área bajo la curva
  - Código de evolución estelar: Genera trayectorias evolutivas para determinar masas y edades de las estrellas en un diagrama HR [20], [21].
- 1.2 Clasificar la líneas cromosféricas de la estrella gigante y la secundaria
- 1.3 Obtener un registro de los espectros en orden temporal y calcular en cada caso la altitud proyectada de la compañera sobre la fotosfera del gigante
- 1.4 Usar el espectro puro de la gigante durante la totalidad del eclipse para sustraer los espectros compuestos para obtener y obtener el espectro puro la compañera, en el cual se vean las líneas cromosféricas
- 1.5 Cuantificar el ancho equivalente de las líneas cromosféricas (área de línea de absorción dividido por el continuo local)
- 2.1 Graficar curvas de crecimiento para cada sesión del eclipse (estrella individual parcial ‘tanto entrada como salida’ y total). Igualmente para el hidrógeno y para el Ca II
- 3.1 Comparar diferentes parámetros (*ionización, temperaturas efectiva, ancho doppler, número de átomos, velocidades radiales*) con la densidades de columna  $N(h)$
- 3.2 Deducir un sencillo modelo de la densidad de columna en cada caso

## 7. Resultados esperados

Como resultado principal está identificar las diferencias y/o similitudes entre los análisis realizados del sistema Zeta Aurigae de [14], [11] con relación a los datos obtenidos del eclipse

de otoño del 2019. Para poder argumentar el comportamiento de los espectros en función del tiempo durante el eclipse. Además de explicar las posibles causas del cambio en las hipótesis sobre la dinámica del sistema durante los últimos 30 años. Teniendo en cuenta que la tecnología desde esa época a la actualidad ha cambiado y las herramientas que se tienen ahora son mucho más eficientes en aspectos técnicos.

Otro de los resultados es una posible verificación del efecto Wilson-Bappu, correlación entre el ancho medido de la línea Ca II K ( $W_0$ ) que depende de la luminosidad de la estrella y por ende de la gravedad superficial; y de la temperatura efectiva y la magnitud visual absoluta de la estrella ( $M_v$ ) debido al mecanismo de la física estelar. Este efecto se analizó para el sistema  $\zeta$  Aurigae en [8] donde se observa que en el análisis de espectros con el ensanchamiento de líneas se está verificando el cambio en la gravedad superficial. Teniendo en cuenta que la densidad de masa columnar y la gravedad superficial, tienen una relación inversamente proporcional, indirectamente se está relacionando el cambio espectral con el objetivo principal del proyecto, así que con ayuda de las curvas de crecimiento y un análisis profundo de los efectos físicos que se están presentando en este sistema, se puede verificar esta relación entre estas cantidades físicas.

Los resultados mencionados anteriormente son relevantes en el ámbito de la astronomía ya que al conocer la dinámica cromosférica, ya sea de una o un sistema de estrellas, es posible tener mayor precisión de sus parámetros físicos relevantes y esto a su vez aporta correcciones a las curvas estelares evolutivas [20].

Por último es importante la experiencia que se adquiere durante este proceso en el área de la física, aportando a su vez hacia la formación futura como astrofísica, además también me permite hacer parte de una colaboración internacional para escribir un artículo científico en una revista arbitrada donde se vean reflejados los resultados más importantes que se obtengan del sistema Zeta Aurigae.

## 8. Condiciones y recursos que ofrece el grupo de investigación

### 8.1. Recursos observacionales

El grupo de investigación de Física estelar brinda los datos que se usarán para resolver este proyecto, los cuales fueron tomados por el telescopio el TIGRE, explicado en sesiones anteriores por el convenio con la Universidad de Hamburgo, en Alemania y la Universidad Liège, en Bélgica.

### 8.2. Recursos computacionales

Los códigos que se implementarán para el desarrollo de este proyectos fueron hechos por Doctores que pertenecen al grupo de Investigación de física estelar de Universidad de Guanajuato

y a las universidades con las que se tiene el convenio.

### 8.3. Recursos de experiencia

Adicional a esto es donde se encuentran los especialistas en el área de astronomía estelar, los cuales han trabajado durante años con este mismo sistema binario y los temas que se tendrán en cuenta para esta investigación.

### 8.4. Recursos Económicos

El grupo de investigación brinda las instalaciones del grupo en el cual tendré un lugar de trabajo dentro de la Universidad en la estancia de cuatro meses.

## 9. Cronograma de Actividades

La estancia en la universidad de Guanajuato dura 4 meses. Sin embargo luego de la estancia es posible que continúe trabajando en el análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto.

Actividad	Duración en semanas	Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.1	9																												
1.2																													
1.3																													
1.4																													
1.5																													
2.1	4																												
3.1	8																												
3.2																													
Documentación																													

## Referencias

- [1] JHMM Schmitt, K-P Schröder, Grégor Rauw, A Hempelmann, M Mittag, JN González-Pérez, S Czesla, U Wolter, D Jack, P Eenens, et al. Tigre: A new robotic spectroscopy telescope at guanajuato, mexico. *Astronomische Nachrichten*, 335(8):787–796, 2014.
- [2] P Hauschildt and E Baron. Cool stellar atmospheres with phoenix. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 7:140, 2005.

- [3] M Mittag, JHMM Schmitt, and K-P Schröder. Ca ii h+ k fluxes from s-indices of large samples: a reliable and consistent conversion based on phoenix model atmospheres. *Astronomy & Astrophysics*, 549:A117, 2013.
- [4] K.P. Schröder R.E.M. Griffin, R.F. Griffin and D. Reimers. Optical spectra  $\zeta$  aurigae binary systems: I. the 1987 eclipse of  $\zeta$  aurigae. *Astronomy and Astrophysics*, 1989.
- [5] James Fisher, Klaus-Peter Schröder, and Robert Connon Smith. What a local sample of spectroscopic binaries can tell us about the field binary population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 361(2):495–503, 2005.
- [6] K-P Schröder, M Mittag, MI Pérez Martínez, M Cuntz, and JHMM Schmitt. Basal chromospheric flux and maunder minimum-type stars: the quiet-sun chromosphere as a universal phenomenon. *Astronomy & Astrophysics*, 540:A130, 2012.
- [7] M Mittag, K-P Schröder, A Hempelmann, JN González-Pérez, and JHMM Schmitt. Chromospheric activity and evolutionary age of the sun and four solar twins. *Astronomy & Astrophysics*, 591:A89, 2016.
- [8] Faiber Danilo Rosas. Efecto Wilson-Bappu en estrellas frías: Relación física entre el ancho de línea K de Ca II y la gravedad superficial, 2019.
- [9] Klaus-Peter Schröder, Hilmar W Duerbeck, and Johannes Viktor Feitzinger. Stars and stellar systems. In *Handbook of Practical Astronomy*, pages 573–695. Springer, 2009.
- [10] VI Shenavrin, OG Taranova, and AE Nadzhip. VizieR online data catalog: Long-term (1984-2008) jhkln photometry of stars (shenavrin+, 2011). *VizieR Online Data Catalog*, 808, 2011.
- [11] O. C. Wilson and Helmut A. Abt. Chromospheric structure of the k-type component of zeta aurigae. *Astronomy and Astrophysics*, 1989.
- [12] George B Rybicki and Alan P Lightman. *Radiative processes in astrophysics*. John Wiley & Sons, 2008.
- [13] Kenneth Osborne Wright. The zeta aurigae stars. *Vistas in Astronomy*, 12:147–182, 1970.
- [14] R.F. Griffin K.P. Schröder, R.E.M. Griffin. Optical spectra  $\zeta$  aurigae binary systems: Ii. the lower chromosphere of  $\zeta$  aurigae. *Astronomy and Astrophysics*, 1989.
- [15] Joel A Eaton. On the chromospheric structure of zeta aurigae. *The Astrophysical Journal*, 404:305–315, 1993.
- [16] José Manuel Carrasco Martínez. *Diseno y caracterización del sistema fotométrico de la misión Gaia de la Agencia Espacial Europea*. Universitat de Barcelona, 2006.
- [17] Diego Fustes Villadóniga. Extracción de conocimiento en bases de datos astronómicas mediante redes de neuronas artificiales: aplicaciones en la misión gaia. 2014.
- [18] S Blanco-Cuaresma, C Soubiran, Ulrike Heiter, and P Jofré. Determining stellar atmospheric parameters and chemical abundances of fgk stars with ispec. *Astronomy & Astrophysics*, 569:A111, 2014.

- [19] Sergi Blanco-Cuaresma. Modern stellar spectroscopy caveats. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486(2):2075–2101, 2019.
- [20] Onno R Pols, Klaus-Peter Schröder, Jarrod R Hurley, Christopher A Tout, and Peter P Eggleton. Stellar evolution models for  $z=0.0001$  to  $0.03$ . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 298(2):525–536, 1998.
- [21] Klaus-Peter Schröder, Onno R Pols, and Peter P Eggleton. A critical test of stellar evolution and convective core ‘overshooting’ by means of  $\zeta$  aurigae systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 285(4):696–710, 1997.

## 10. Anexos

Carta de aceptación en el programa de movilidad para el semestre 2020-1.