

Observaciones astronómicas usando PUCHEROS, el primer espectrógrafo construido en Chile

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Johanna Coronado¹, Alumna de quinto año

Leonardo Vanzi², Profesor Asociado

Krzysztof Helminiak³, Postdoctorando

¹DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

²DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y CENTRO DE ASTRO-INGENIERÍA

³DEPARTAMENTO DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

INTRODUCCIÓN

Los **espectrógrafos** son instrumentos que entregan una gran cantidad de información en astronomía pues, al observar un espectro, se puede medir y obtener las líneas características de un elemento químico en particular y de esta forma, por ejemplo, inferir qué elemento está presente en una determinada estrella o galaxia o, también, como es el caso de este trabajo de investigación, medir las velocidades radiales a las que se mueven las estrellas a partir de los espectros observados.

PUCHEROS es un espectrógrafo echelle de alta resolución para el espectro visible, desarrollado en el Centro de Astro-Ingeniería UC [1], siendo el primer instrumento astronómico construido completamente en Chile. Presenta un gran desafío al ser diseñado para trabajar con un telescopio relativamente pequeño, el ESO-50 cm, ubicado en el Observatorio Docente UC Santa Martina. Además, abre las puertas a desarrollar investigación científica a nivel de pregrado y postgrado e, incluso, brinda la oportu-

tunidad de complementar observaciones realizadas con telescopios de mayor tamaño.

Los componentes ópticos y el detector CCD (Charge-Coupled Device) fueron adquiridos en EE.UU., pero la mayoría de los componentes mecánicos fueron diseñados y construidos en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalurgia UC [2]. La señal de entrada de PUCHEROS es alimentada por una fibra óptica, lo que permite instalarlo en un entorno estable y controlado, alejado del telescopio, mejorando la precisión en las mediciones. El rango espectral va desde 4.000 a 7.000 Angstroms alcanzando una resolución $\lambda/\Delta\lambda$ de 20.000. La luz de la estrella ingresa al instrumento a través de una interfaz telescopio-fibra óptica. En ella un espejo metálico con un diafragma circular, permite el ingreso de la luz al instrumento y la adquisición de una imagen de la porción de cielo observada.

El espectrografo constituye una herramienta muy útil y eficiente en el estudio y caracterización de estrellas variables brillantes que no requieren ser observadas con telescopios de mayor tamaño. Esto permite usar telescopios pequeños como instrumento efectivo de investigación. En tal contexto se desarrolla este proyecto de investigación cuyo objetivo es la caracterización del desempeño del instrumento y la observación de dos sistemas binarios nunca antes caracterizados, a partir de los cuales se logró obtener modelos y parámetros físicos importantes, como la masa y el radio de las estrellas.

METODOLOGÍA

Para desarrollar este trabajo se llevaron a cabo observaciones en el Observatorio Docente UC durante el primer semestre de 2012 y, también, se utilizaron datos tomados previamente en el primer y segundo semestre de 2011. Para obtener una buena estimación de la **eficiencia** se observó un espectro con tiempo de exposición de 600 segundos de Eta Hydrae, una estrella estándar espectrofotométrica, y se realizaron observaciones de dos estrellas **binarias eclipsantes**, HD 76196 y HD 120778. A partir de las observaciones de los espectros fue posible calcular las velocidades radiales y obtener modelos físicos que permiten obtener uno de los parámetros más relevantes de una estrella: la masa, que determina su evolución, vida y muerte, así como, también, el radio y las temperaturas para ambas estrellas que componen el sistema.

Las observaciones del espectro de una estrella estándar espectrofotométrica, cuya densidad de flujo luminoso es conocido a partir de las mediciones obtenidas por Hamuy et al. [4], nos permiten estimar la eficiencia del espectrógrafo. Este cálculo es muy útil porque da a conocer qué tan bueno es el desempeño del espectrógrafo, lo que permite ir optimizando las observaciones.

Para calcular la eficiencia del espectrógrafo se convirtieron las magnitudes obtenidas de Ref. [3] a flujo, en unidades que sean comparables al flujo luminoso que se obtienen de los espectros observados con PUCHEROS, tomando en cuenta el área recolectora de luz del telescopio y el tiempo de exposición de la observación. Teniendo ambas cantidades expresadas en las mismas unidades, se realiza una comparación, dividiendo el flujo teórico, que se espera obtener de la fuente, por el que efectivamente se mide. Con las mediciones obtenidas, se elaboró el Gráfico 1, que muestra la eficiencia para el mejor, para el promedio y para el peor de los casos.

Para obtener los modelos de los sistemas binarios se calcularon las velocidades radiales, usando TODCOR [4]. TODCOR es un algoritmo que permite hacer una correlación cruzada para obtener el corrimiento Doppler de las dos estrellas del sistema binario y, a partir de esto, estimar las velocidades radiales. Luego, usando el software llamado PHOEBE (PHysics Of Eclipsing BinariEs) se obtuvieron los modelos físicos. PHOEBE es una implementación del código de Wilson-Devinney [5] y permite ajustar un modelo a partir de velocidades radiales y curvas de luz simultáneamente.

Las binarias eclipsantes son objetos de estudio interesantes pues, a partir de los eclipses y las curvas de luz, se puede tener información adicional (ángulo de inclinación, período de los eclipses), la que se complementa con la información que se obtiene a partir de las velocidades radiales y, así, permite tener un modelo físico completo. Las curvas de luz se obtienen a partir de datos de fotometría y dan información de los eclipses, lo que permite, en conjunto con las velocidades radiales, encontrar los parámetros físicos y orbitales de los sistemas. En este caso, sólo fue necesario medir los espectros empleando PUCHEROS, ya que los datos de fotometría están disponibles en el catálogo de ASAS [6], que es público.

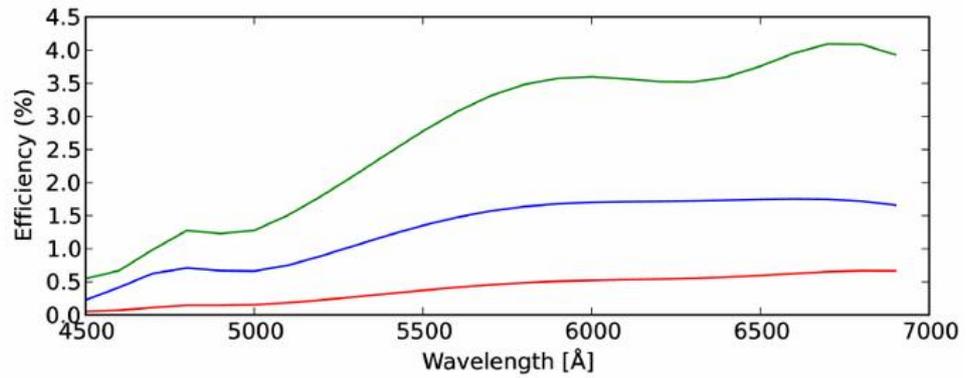


Figura 1: Eficiencia de PUCHEROS. Cada línea representa la medición de la eficiencia para diferentes noches. La línea verde representa la mejor eficiencia medida, mientras que la línea roja corresponde a la más baja. La línea azul corresponde al valor promedio de todas las mediciones de la eficiencia del instrumento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados más relevantes de este trabajo se encuentran expresados en las figuras 1, 2 y 3. En la Figura 1 se puede ver, en verde, la mayor eficiencia obtenida para todas las mediciones, que alcanza aproximadamente el 3,5%. En azul se muestra la eficiencia promedio obtenida, de aproximadamente un 1,6%; y en rojo, la peor medición, que alcanza aproximadamente un 0,5%. Una mayor eficiencia se podría obtener si se mejora el sistema de **guiding** del telescopio que, introduce una fuente de error al hacer las observaciones, pues parte de la luz se sale de la fibra en algún momento durante la observación y se pierde.

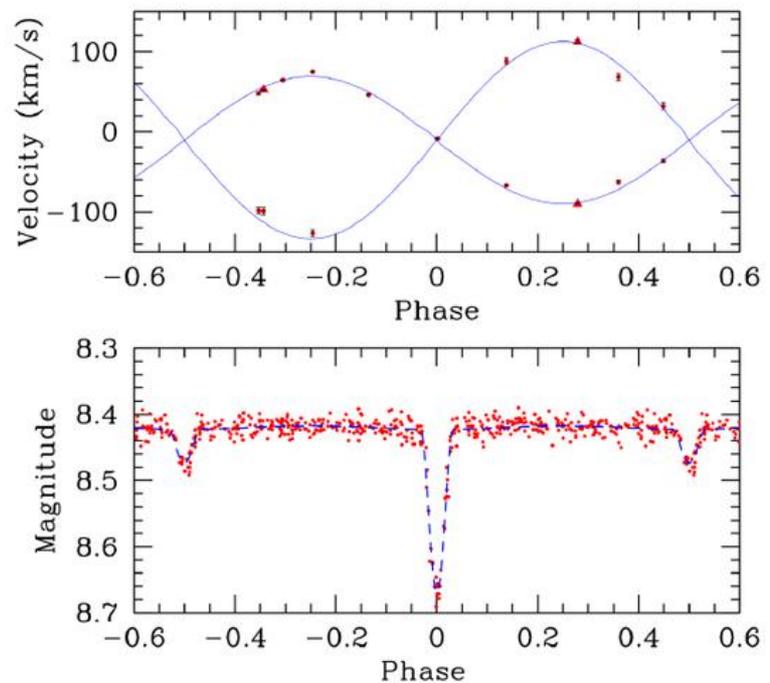


Figura 2: Modelo obtenido para estrella HD 120778. El panel superior corresponde a la velocidad radial, en función de la fase para los dos componentes del sistema binario. El panel inferior muestra la curva de luz, con la disminución característica en la magnitud, en función de la fase.

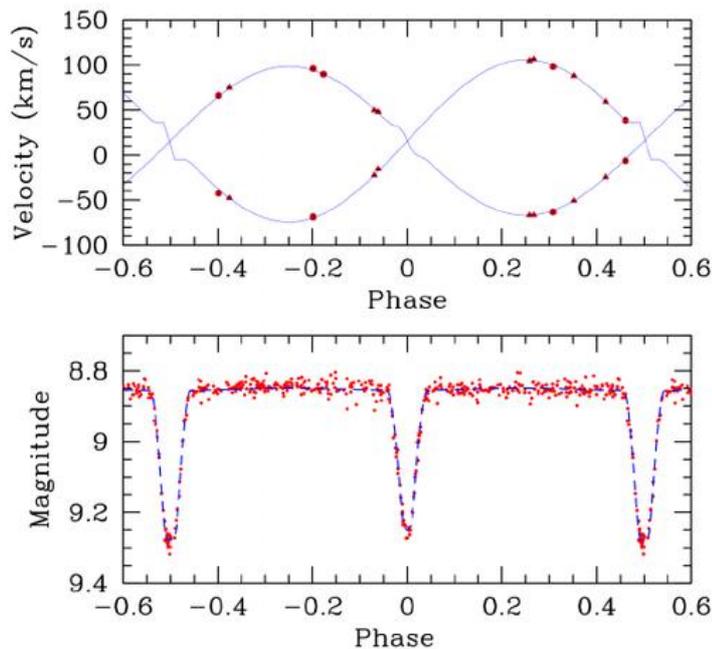


Figura 3: Modelo obtenido para estrella HD 76196. El panel superior corresponde a la velocidad radial, en función de la fase para los dos componentes del sistema binario. El panel inferior muestra la curva de luz, con la disminución característica en la magnitud, en función de la fase.

En la Figura 2 se puede ver el modelo obtenido para HD 120778. El panel superior muestra el modelo obtenido a partir de las velocidades radiales. La curva azul muestra el modelo sintético obtenido con PHOEBE, el que se ajusta bien a los datos. Los círculos muestran mediciones de PUCHEROS y los triángulos, mediciones obtenidas con otro instrumento (CORALIE en el telescopio Euler de 1,2 m ubicado en observatorio La Silla). El panel inferior muestra las mediciones para la curva de luz y el modelo en azul obtenido con PHOEBE. Los parámetros estimados más importantes fueron la masa y el radio para el sistema: 1,34 masas solares con un radio de 1,59 radios solares para la estrella primaria, y 0,86 masas solares y un radio de 0,92 radios solares, para la estrella secundaria.

En la Figura 3 se observa el modelo obtenido para HD 76196. El panel superior, en azul, muestra el modelo sintético calculado con PHOEBE para las velocidades radiales. Los círculos muestran mediciones de PUCHEROS y los triángulos, mediciones obtenidas con otros 2 instrumentos (CORALIE y UCLES). La Figura inferior muestra el modelo, en azul, obtenido con PHOEBE para la curva de luz. Se obtuvo una masa de 1,68 masas solares y un radio de 3,43 radios solares, para la estrella primaria, y una masa de 1,54 masas solares y un radio de 2,48 radios solares, para la estrella secundaria.

Cabe destacar que, a pesar que el cálculo de la eficiencia mostró que se pueden hacer mejoras para obtener espectros con mejor señal, el análisis y la obtención de los modelos de las binarias eclipsantes demuestran que el desempeño del instrumento es bastante bueno, en comparación con instrumentos ubicados en telescopios más grandes pues, al analizar las Figuras 2 y 3, se observa que las mediciones en velocidades radiales, independiente del instrumento usado, generan un buen modelo.

CONCLUSIONES

El presente trabajo da cuenta de resultados científicos obtenidos con PUCHEROS, el primer instrumento astronómico construido completamente en Chile. Como parte de este trabajo se midió el desempeño del espectrógrafo y se pudo comprobar, por primera vez, su potencial en la realización de una investigación científica. Como resultado principal, se obtuvo una eficiencia promedio de un 1,6%, la que queda limitada por la pérdida de luz que tiene el sistema, debida principalmente a que el sitio donde se realizaron las observaciones está ubicado cerca de una gran ciudad. También se pudo comparar los resultados obtenidos con PUCHEROS con las mediciones de otros instrumentos y telescopios de mayor tamaño, comprobando que PUCHEROS tiene un muy buen desempeño, permitiendo estimar velocidades radiales con gran precisión y acorde a los valores obtenidos con otros espectrógrafos. El trabajo realizado a partir de estas velocidades ha permitido medir parámetros físicos de dos sistemas de estrellas binarias nunca antes caracterizados, tales como la masa y el radio.

Los resultados obtenidos a partir de este trabajo son parte de una memoria de tesis de pregrado en Astronomía presentada en agosto de 2012.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

En este trabajo se utilizó el siguiente principio fundamental, obtenido de Hamuy et al. [2] para convertir de magnitud a flujo:

$$m_v = -2,5 \log_{10} [f_v] - 48,590$$

Donde m_v corresponde a la magnitud y f_v es el flujo monocromático en $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$. A partir de esta ecuación se obtiene f_v , que está en notación de frecuencia, pero es necesario en notación de longitud de onda f_λ . Ahora, con el flujo expresado en $\text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Angstroms}^{-1}$ se puede obtener el número de fotones a partir de la siguiente relación:

$$N = \frac{f_\lambda \Delta S \Delta t}{h\nu}$$

Donde ΔS es el área recolectora del telescopio expresada en cm^2 , Δt es el tiempo de exposición de las observaciones y $h\nu$ es la energía de un fotón, donde h es la constante de Planck cuyo valor es $6,62 \times 10^{-27} \text{ ergs s}^{-1}$.

GLOSARIO

Binaria Eclipsante: Corresponde a una clase especial de estrellas variables. Son estrellas que presentan variaciones en su brillo aparente, cuya variación se puede detectar en un intervalo de tiempo durante las observaciones. Una estrella, periódicamente, eclipsa a la otra y, durante este tiempo, el brillo total del sistema decrece. La variación en el brillo se debe a un efecto geométrico y no a un cambio físico en las estrellas. La estrella más masiva se denomina como la estrella primaria y, la menos masiva, como la estrella secundaria.

Eficiencia: La eficiencia total del sistema, incluyendo telescopio y espectrógrafo, se define como la relación entre el número de fotones que ingresan por el espejo principal y los que son detectados por la CCD (Charge-coupled Device).

Espectrógrafo: Es un instrumento que, por medio de un objeto dispersor (como un prisma, o una grilla de difracción), dispersa la luz proveniente de un objeto en las longitudes de onda que lo componen. De esta forma se obtiene lo que se conoce como un espectro.

Guiding: Sirve para mantener centrado en el detector el objeto de interés astronómico. En general es controlado por un computador. En el caso de PUCHEROS, el guiage debe hacerse de forma manual.

PUCHEROS: Pontificia Universidad Católica High Echelle Resolution Optical Spectrograph.

AGRADECIMIENTOS

PUCHEROS ha sido financiado por el proyecto FONDECYT número 1095187. El observatorio UC Santa Martina es operado por el Departamento de Astronomía y Astrofísica UC y el Centro de Astro-Ingeniería UC. Se agradece el apoyo y la colaboración del personal técnico y científico del Observatorio UC, José Miguel Fernández y Maurizio Baffico, y del Departamento de Mecánica y Metalurgia UC, Prof. Diego Celentano, Prof. Magdalena Walczak, Sr. Luis Valdés y Sr. José González. El programa de Instrumentación Astronómica del Centro de Astro-Ingeniería recibe apoyo del proyecto CONICYT Anillo ACT-86.

REFERENCIAS

1. VANZI, L., ET AL. PUCHEROS: a cost-effective solution for high resolution spectroscopy with small telescopes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(4): pp. 2770-2777, 2012.
2. CHACÓN, J., VANZI, L., ÁVILA, G. Design of Echelle Spectrograph for small telescopes with commercially available components. *SPIE Digital Library* [en línea]. 20 de julio de 2010. [fecha de consulta: 26 de octubre 2012]. Disponible en: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=750861>
3. HAMUY, M., ET AL. Southern Spectrophotometric Standards. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 104: pp. 533-552, 1992.
4. ZUCKER, S., MAZEH, T. Study of Spectroscopic Binaries with TODCOR. I. A new two-dimensional correlation algorithm to derive the radial velocities of the two components. *The Astrophysical Journal*, 420: pp. 806-810, 1994.
5. PRŠA, A. PHOEBE Scientific Reference. V 0.30. Villanova University College of Arts and Sciences, pp. 173, 2011.
6. CATÁLOGO ASAS. ASAS [en línea]. Disponible en: <http://www.astrouw.edu.pl/asas/?page=catalogues>.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Johanna Coronado
- 2 Profesor Leonardo Vanzi
- 3 Krzysztof Helminiak

