

Análisis de la periodicidad de la estrella pulsante tipo Delta Scuti V650 Tauri

Marlon Javier Interiano Urquía

marlonint@gmail.com

Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Resumen

Se presentan los resultados fotométricos de cinco noches de observación, obtenidos en noviembre de 2008, para la estrella pulsante tipo δ Scuti V650 Tauri. Aplicando análisis de Fourier a los datos observados, se detectaron con precisión tres frecuencias principales de pulsación $f_1 = 377.6\mu\text{Hz}$, $f_2 = 197.2\mu\text{Hz}$ y $f_3 = 411.7\mu\text{Hz}$. Finalmente, se compararon los resultados obtenidos con trabajos realizados anteriormente por otros astrónomos.

I. INTRODUCCIÓN

Las oscilaciones estelares son una poderosa herramienta para el estudio los interiores estelares, debido a que los modos de frecuencia están relacionados directamente con las propiedades de la estrella y dan fuertes restricciones sobre los modelos estelares y por lo tanto de las teorías de evolución. Sin embargo, la observación de los pulsos estelares requiere extensos conjuntos de datos con el fin de lograr frecuencias precisas.

Un buen escenario para llevar a cabo estudios sísmicos son las estrellas pulsantes de período corto en cúmulos abiertos. Dado que los miembros de un cúmulo se formaron al mismo tiempo en el pasado, en el presente comparten propiedades estelares similares como la edad, composición química y la distancia. Por medio de ajuste de isocronas es posible fijar la edad y masas estelares.

Esto ha motivado, por ejemplo, un número de estudios observacionales sobre las estrellas δ Scuti del cúmulo abierto de las Pléyades (Figura 1). En particular, seis variables δ Scuti han sido descubiertas en el cúmulo de las Pléyades hasta ahora y la mayoría de ellas han sido estudiadas intensamente en los últimos años: V647 Tauri, HD 23628, V534 Tauri, V624 Tauri, HD 23194 y V650 Tauri.(1)

La estrella V650 Tauri (HD 23643, $V=7^m.79$, A7), fue identificada como una variable pulsante de período corto por Breger(2). Observaciones fotométricas CCD de un sitio fueron llevadas a cabo por Kim & Lee(3), entre noviembre y diciembre de 1993, obteniendo cuatro frecuencias.

En el presente trabajo se han reducido y analizado cinco noches de observación de imágenes CCD, obtenidas en noviembre de 2008 en la estación de Xing Long en China, para la estrella V650 Tauri. Se desea determinar con precisión los períodos de oscilación presentes en los datos y analizar la evolución de la estrella comparando con estudios realizados anteriormente sobre esta estrella.



Figura 1: M45: Cúmulo de las Pléyades.(4)

II. OSCILACIONES ESTELARES

I. Estrellas variables

Las estrellas con magnitudes¹ cambiantes son llamadas variables. Estrictamente hablando, todas las estrellas son variables. La estructura y brillo de una estrella cambia conforme esta evoluciona. Aunque, estos cambios son usualmente lentos, algunas etapas evolutivas pueden ser extremadamente rápidas. En ciertas etapas evolutivas, también habrá variaciones periódicas, por ejemplo pulsaciones de las capas externas de la estrella.(4)

La variación de la magnitud como una función del tiempo es llamada curva de luz de la estrella (Figura 2). De esto, obtenemos la amplitud de la variación de magnitud y su período, si la variación es periódica.

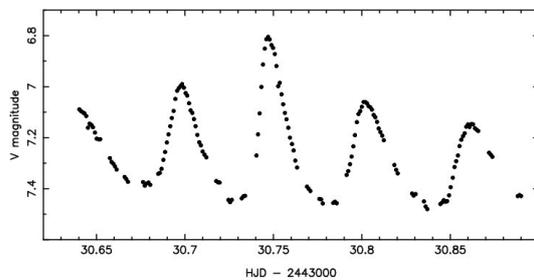


Figura 2: Curva de luz de la variable SX Phe(5)

II. Clasificación de estrellas variables

La clasificación de las variables es basada en la forma de la curva de luz, en la clase espectral y en los movimientos radiales observados. Las variables son usualmente divididas en tres tipos principales: pulsantes, eruptivas y eclipsantes. Estamos interesado en el primer tipo. En las variables pulsantes, las variaciones son debidas a la expansión y contracción de las capas externas. Estas variables son gigantes o supergigantes que han alcanzado una etapa inestable en su evolución.(4)

III. Variables pulsantes

Las longitudes de onda de las líneas espectrales de las variables pulsantes cambia confor-

¹En astronomía, magnitud es la medida del brillo de una estrella.

me las variaciones de brillo (Cuadro 1). Estos cambios son debidos al efecto Doppler, mostrando que las capas externas de las estrellas están pulsando.(4)

Cuadro 1: Principales características de las variables pulsantes. P, período de pulsación en días. Δm , amplitud de pulsaciones en magnitudes.

Variable	P	Espectro	Δm
Cefeidas	1-135	F-KI	<2
RR Lyrae	<1	A-F8	<2
Delta Scuti	0.05-7	A-F	<1
β Cefeidas	0.1-0.6	B1-B3	>0.3
Mira	80-1000	M-C	>2.5
RV Tauri	30-150	G-M	<4
Semiregular	30-1000	K-C	<4.5
Irregular	-	K-M	<2

El período de pulsación corresponde a una frecuencia propia de la estrella. Justo como un diapasón vibrando con una frecuencia característica cuando se golpea, una estrella tiene una frecuencia fundamental de vibración. Además de la frecuencia fundamental otras frecuencias, sobretonos, son posibles. La variación de brillo observado puede ser entendida como una superposición de todos estos tonos de vibración. La principal causa de la variación de la luz es la variación periódica de la temperatura superficial. La luminosidad² de una estrella depende sensiblemente de su temperatura efectiva, $L \propto T_e^4$. Entonces un pequeño cambio en la temperatura efectiva lleva a una gran variación de su brillo.(4)

IV. Astrosismología: Teoría de las oscilaciones estelares

Cuando se perturba un sistema en equilibrio su respuesta suele ser vibratoria en forma de pequeñas oscilaciones alrededor de dicho equilibrio. Estas vibraciones, si son estacionarias, se suelen llamar modos propios de oscilación porque sus frecuencias determinan la estructura física del sistema que las soporta. La astrosismología es la disciplina que trata

²En astronomía, la luminosidad es la potencia (cantidad de energía por unidad de tiempo) emitida en todas direcciones por un cuerpo celeste.

de obtener información del interior estelar a través del estudio de los modos propios de oscilación presentes en las estrellas pulsantes.(5)

Las oscilaciones estelares corresponden a ondas estacionarias que se propagan dentro de la estrella a través de cavidades resonantes que al verse afectadas por cambios locales de presión, densidad, temperatura y composición química, nos permiten inferir sobre las condiciones físicas que imperan en el interior estelar.

Las oscilaciones estelares van a depender de la fuerza recuperadora que haga que el sistema retorne a la posición de equilibrio hidrostático. Las dos fuerzas principales que intervienen en la respuesta oscilatoria de las estrellas pulsantes son las derivadas de la presión y de la gravitación. Cuando la presión actúa como fuerza restauradora se habla de **modos acústicos** o **modos p**. En caso contrario, cuando la gravedad es la fuerza recuperadora, nos referimos a **modos gravitatorios** o **modos g**. Cada modo de oscilación estará caracterizado por su período, o por su frecuencia, y por una terna de valores (n, l, m) que resultan de la distribución espacial del modo en la estrella la cual se describe a través de armónicos esféricos.(5)

Para obtener información sobre la estructura estelar a partir de los modos de oscilaciones se requieren tres etapas principalmente:

1. Detección de un gran número de frecuencias de pulsación con gran precisión,
2. Identificación de los modos de oscilación, es decir asignarle los valores correctos de n, l y m ;
3. Determinación precisa de los parámetros físicos de las estrellas objetivo que permitan construir modelos de estructura estelar en equilibrio realistas a partir de los cuales se calculan las frecuencias teóricas que al final se comparan con las observaciones.

Dado que la resolución espectral en los espectros de amplitudes depende inversamente del tiempo de observación T : $\Delta\nu \sim 1/T$, la detección de las frecuencias de oscilación con alta precisión requiere una cobertura observacio-

nal lo más amplia posible que permita conseguir series temporales largas y prácticamente ininterrumpidas.(5)

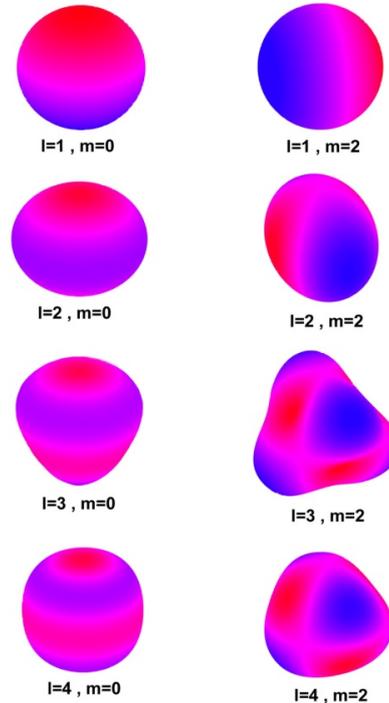


Figura 3: La identificación correcta de los modos es una de las tareas principales de la astrosismología.

III. ESTRELLAS PULSANTES TIPO DELTA SCUTI (δ SCT)

Las estrellas tipo δ Scuti son variables pulsantes localizadas en la parte baja de la franja de inestabilidad de las Cefeidas, donde la secuencia principal intercepta a la franja de inestabilidad o abandonando la franja de inestabilidad hacia la rama de subgigantes.(6)

Son estrellas con tipo espectral entre A2-F5, clase de luminosidad entre III-V, tienen una masa entre 1.5 y 2.5 M_{\odot} ³, una temperatura efectiva entre 6500 y 8000 K. Las estrellas tipo δ Scuti presentan períodos de oscilación típicos entre 30 minutos y 5 horas. El interés general por las estrellas δ Scuti radica en que presentan una transición entre las Cefeidas y

³ M_{\odot} : Masa solar. $M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ (4)

el gran océano de pulsadores no radiales⁴ que se encuentran en la parte baja de la franja de inestabilidad en el diagrama HR⁵.(6)

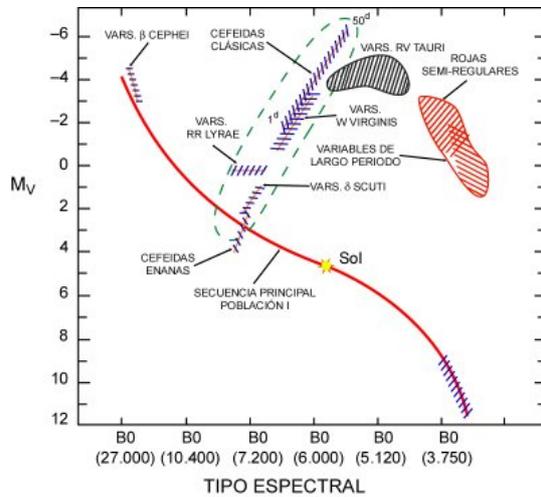


Figura 4: Diagrama H-R de estrellas pulsantes.

La mayoría de los modos de pulsación presentes en las δ Scuti tienen amplitudes mayores a 1 mmag, lo cual hace posible el estudio de los mismos fotométricamente desde tierra. Además, la posición de las mismas en o ligeramente por encima de la secuencia principal, permite una comparación astrosismológica entre los modos observacionales y los teóricos obtenidos de modelos estelares en una región donde la estructura estelar se considera relativamente conocida. Por otro lado, al ser estrellas en un estado evolutivo muy temprano en el que comienzan a abandonar la secuencia principal quemando hidrógeno en un núcleo convectivo mediante el ciclo CNO o empezando a quemarlo en capa antes de entrar plenamente en la fase de subgigante no presentan peculiaridades como campos magnéticos intensos o abundancias químicas anormales(6).

⁴Las estrellas variables presentan dos tipos de pulsaciones. Si ocurre simétricamente en toda la superficie estelar de forma que la estrella conserva su forma esférica, se dice que realiza una **Pulsación radial**; y si sus pulsaciones son de tal manera que se producen ondas en todas las direcciones de la superficie estelar dando lugar a múltiples períodos y modelos complejos de oscilación, realiza una **Pulsación no radial** (7)

⁵El diagrama de **Hertzsprung-Russell** (comúnmente abreviado como **diagrama H-R**) muestra el resultado de numerosas observaciones sobre la relación existente entre la magnitud absoluta de una estrella y tipo espectral (clasificación estelar por su color y temperatura).(8)

IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

I. Observación y reducción de los datos

Las imágenes CCD analizadas fueron obtenidas durante 5 noches de observación en noviembre de 2008 para la estrella pulsante tipo δ Scuti V650 Tauri, en la Estación de Xing Long en China, con un telescopio 60-cm de diámetro. Se utilizó un filtro V de Johnson.

El proceso de reducción de las imágenes CCD, se hace con el objetivo de remover las contribuciones no deseadas que contaminan las mediciones. Estas contribuciones, se suman de manera intrínseca en el preciso momento de la adquisición de los datos y provienen de diferentes orígenes, formando el llamado ruido, que está presente en cualquier medición.

Estas contribuciones indeseables podemos separarlas en tres tipos: (a) ruido de lectura, (b) señal térmica y (c) variaciones de sensibilidad del propio detector. Para remover estos defectos no deseados, se emplean imágenes de calibración **Bias**, conteniendo el patrón de ruido generado al momento de la lectura del chip; **Darks**, con el valor de la señal térmica; y por último las imágenes **Flats** para la corrección de la sensibilidad en la superficie del detector.

La reducción básicamente consta en la sustracción del valor de la imagen Bias en todas las imágenes, sustracción de las imágenes Dark para remover la corriente oscura, si existe tal y por último, dividir entre una imagen Flat o la respuesta del detector a una fuente uniforme. Por razones estadísticas, es mejor considerar un ensamble de imágenes de calibración, de cada tipo y combinados de manera específica para obtener el valor más fiel a utilizar en las operaciones. Esto es, una combinación de imágenes Bias, llamada a veces **Master Bias**, una combinación de imágenes Dark como **Master Dark** y una última combinación de imágenes Flat también como **Master Flat**.

Para la reducción de las imágenes se usó **C-Munipack-2.0**, un paquete de software destinado a la observación de estrellas variables. La Figura 5 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos con esta herramienta.

Cuadro 2: *Parámetros de V650 Tauri y las estrellas de comparación usadas.*

Estrella	Ascensión Recta	Declinación	Tipo Espectral	m_V
V650 Tau	03 47 26	+23 40 42	A3V	7.79
HD 23654	03 47 36	+23 36 32	K0D	7.78
HD 23609	03 47 17	+23 43 36	F5D	6.97
HD 23632	03 47 20	+23 48 12	A1V	7.02

II. Fotometría diferencial

Para determinar la variabilidad de la estrella problema se debe obtener su **curva de luz** usando **fotometría diferencial**, la cual se basa en el uso de, al menos, dos estrellas distintas: una que se denomina estrella de calibración y otra que se llama estrella de chequeo; ambas estrellas han de ser astros de brillo y color bien determinados en algún sistema fotométrico con la particularidad de no ser variables.

La técnica es muy sencilla: con cualquier fotómetro (fotoeléctrico o CCD) se determina qué diferencia de magnitud existe entre la estrella de calibración y la de chequeo con respecto a la variable, el único astro que ha de cambiar de brillo con el tiempo. Al representar la magnitud obtenida en función del tiempo (Curva de luz diferencial) se comprueba que la estrella variable cambia de brillo de modo regular con un cierto período, mayor o menor en función del tipo.

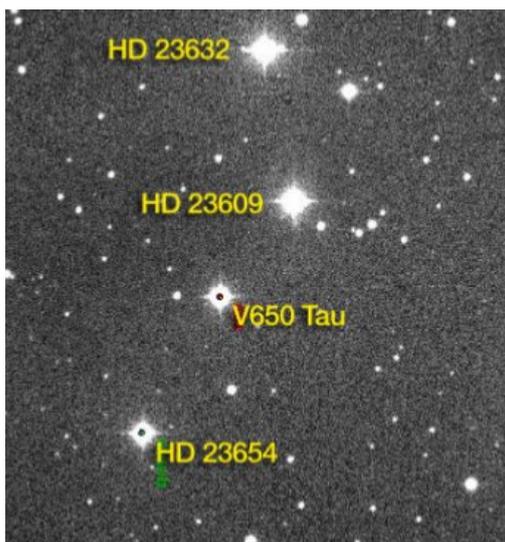


Figura 5: *Imagen de campo reducida*

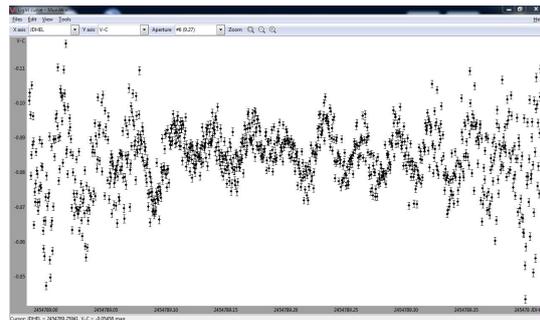


Figura 6: *Curva de luz diferencial.*

Siempre usando **C-Munipack-2.0** se obtuvieron curvas de luz diferenciales, tomando tres estrellas diferentes de comparación. El Cuadro 2 muestra los parámetros físicos de estas estrellas y en la Figura 6 se muestra una de las curvas de luz diferenciales obtenidas. Esta curva de luz solo muestra un día de observación, el procedimiento final es obtener una curva de luz generalizada, de todos los días observados, con cada estrella de comparación (tres curvas de luz).

III. Análisis periódico

Para el análisis periódico se utilizó el paquete **Period04(9)**, un programa especialmente dedicado al análisis estadístico de grandes series de tiempo astronómico. El programa ofrece herramientas para extraer frecuencias individuales del contenido multiperódico de series temporales.

El análisis multi-periódico se realizó por medio de un método de Fourier estándar y ajuste de mínimos cuadrados, usando la fórmula de ajuste estándar (1). Una Transformada Discreta de Fourier produce el pico más alto en el espectro de frecuencias, el cual puede ser identificado como una frecuencia de pulsación. La figura 7 muestra uno de los espectros de

Cuadro 3: Frecuencias detectadas en el análisis de las curvas de luz diferenciales y la comparación con los resultados obtenidos por Kim & Lee (3).

V650 Tau-Comp. 1		V650 Tau-Comp. 2		V650 Tau-Comp. 3		Kim & Lee	
f(μ Hz)	A(mmag)	f(μ Hz)	A(mmag)	f(μ Hz)	A(mmag)	f(μ Hz)	A(mmag)
377.6	5.785	377.6	6.019	377.5	5.810	377.7	3.72
197.4	2.451	197.2	2.371	23.50	2.361	197.3	2.61
411.8	2.194	411.8	2.397	197.2	2.614	292.8	1.67
23.85	2.358	22.32	1.588	213.5	1.377	333.0	1.34

amplitudes encontrado.

$$f(t) = Z + \sum_i A_i \sin(2\pi(\Omega_i t + \Phi_i)) \quad (1)$$

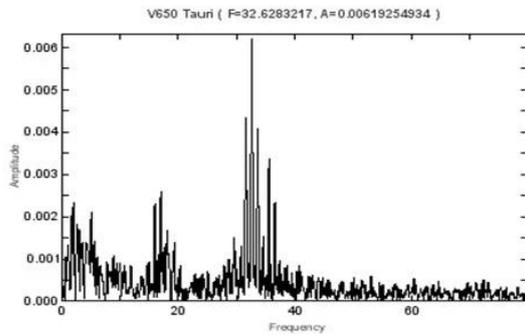


Figura 7: Espectro de amplitudes

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de reducir las imágenes de las cinco noches de observación, se hizo la fotometría diferencial usando cada una de las tres estrellas de comparación (Cuadro 2 y Figura 5). Uniendo las cinco noches de observación, se obtienen tres curvas de luz diferenciales (una con cada estrella de comparación) a las que se les hace un análisis periódico para obtener las frecuencias de los pulsos. Los resultados se enlistan en el Cuadro 3. Se detectaron con precisión tres frecuencias principales de pulsación $f_1 = 377.6 \mu\text{Hz}$, $f_2 = 197.2 \mu\text{Hz}$ y $f_3 = 411.7 \mu\text{Hz}$

Es importante señalar que al momento de realizar el análisis periódico se encuentran múltiples frecuencias, sin embargo no todas son ocasionadas por pulsaciones intrínsecas a la estrella.

Para decidir cuál de los picos detectados en el espectro de amplitudes puede ser considerado como algo intrínseco a la estrella se sigue el criterio de Breger(10), quién demostró que la relación señal-ruido (en amplitud) debe ser de al menos 4 con el fin de garantizar que la frecuencia extraída es significativa.(1).

Para valorar los alcances de este trabajo, fue comparado con resultados obtenidos anteriormente. En 1996, Kim and Lee(3) encontraron cinco frecuencias para V650 Tauri que se muestran en el Cuadro 3.

Podemos notar que se han logrado replicar las dos frecuencias más altas, aunque con un diferencia sustancial entre la amplitud para el caso de $f = 377.7 \mu\text{Hz}$ entre los dos estudios. Esto puede implicar un cambio de amplitud en estos años. Comportamientos similares de variaciones en amplitudes, ya han sido observados en otras estrellas δ Scuti por Breger y otros autores. Una de las causas más notables de este comportamiento, es debido a la evolución de la estrella en el diagrama HR. Primero, esto podría resultar de la transferencia de energía entre los modos de pulsación. Segundo, este fenómeno podría ser causado por la falta de cobertura de nuestras mediciones. Una campaña observacional multisitio podría mejorar estos resultados y aumentar el nivel de confianza.

En siguiente paso de esta investigación, será construir modelos sísmicos sencillos para obtener información sobre el estado evolutivo de la estrella (es decir, su masa, radio, edad, metalicidad, etc.) tratando de reproducir las frecuencias observacionales.

VI. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue producto de la investigación desarrollada para completar el curso de Seminario de Investigación de la Carrera de Física (UNAH). Mis agradecimientos para el Dr. Lester Fox Machado, astrónomo de soporte del Observatorio de San Pedro Mártir en Baja California (México), quién me asesoró durante el desarrollo de este trabajo y me facilitó los datos usados.

REFERENCIAS

- [1] Fox, Michel and Zurita, “Astero-seismology of delta scuti star v650 tauri,” *Rev-MexAA*, vol. 40, pp. 237–238, 2011.
- [2] M. Breger, “Pulsating variables in the pleiades cluster,” *ApJ*, vol. 176, pp. 367–371, 1972.
- [3] Kim and Lee, “Ccd photometry of a δ scuti variable in an open cluster: V650 tau in the pleiades,” *Astronomy and Astrophysics*, vol. 310, pp. 831–836, 1996.
- [4] O. P. D. Karttunen, Kroger, *Fundamental Astronomy*. Springer, 5 ed., 2006.
- [5] C.-D. Aerts, *Asteroseismology*. Springer, 2010.
- [6] M. Breger, “Delta scuti and related stars,” vol. 210, 2000.
- [7] http://es.wikipedia.org/wiki/Estrella_variable_pulsante.
- [8] http://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Hertzsprung-Russell.
- [9] P. Lenz and M. Breger, “Period04 user guide,” *Comm. in Asteroseismology*, vol. 146, p. 53, 2005.
- [10] M. Breger, “Nonradial pulsation of the delta-scuti star bu-cancri in the praesepe cluster,” *Astronomy and Astrophysics*, vol. 271, pp. 482–486, 1993.