

El Sistema 55 Cancri: Un Vistazo a sus Componentes Estelares y Planetarios

María José Lambis Valenzuela
*Universidad de Antioquia, Instituto de Física
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Medellín*

The 55 Cancri planetary system, located in the constellation Cancer, includes at least five exoplanets, most notably 55 Cancri b and 55 Cancri e. The latter is a super-Earth with a minimum mass 11 times that of Earth and orbits its star at an extremely short distance, completing a cycle in approximately 18 hours. Analyses using radial velocity techniques and photometry were performed to determine the orbital parameters and physical properties of the exoplanets. Precise measurements of the radius of 55 Cnc e and the orbital period of 55 Cnc b, c were obtained. For 55 Cancri e, an orbital period of 0.99 ± 0.0010 days and a semi-major axis of ± 0.00007 UA were recorded. However, significant discrepancies in the orbital period were identified, suggesting possible errors in the methodology. The photometric data showed high dispersion, making it difficult to identify clear transits. The photometric data presented high dispersion, making it difficult to identify clear transits. Despite the inconsistencies, the results are crucial to understanding the formation and evolution of planetary systems, as well as to assessing the habitability of these worlds. The research has been carried out using telescopes such as Kepler, Hobby-Eberly and Spitzer, revealing unusual features, such as the high temperature of 55 Cancri e, which raises questions about its atmosphere and climate. It highlights the need to improve observation and analysis techniques to obtain more precise measurements and advance the search for potentially habitable exoplanets.

Keywords: 55 Cancri, super-Earth, radial velocity, photometry, exoplanet, planetary systems, Hobby-Eberly.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema 55 Cancri, también conocido como Rho 1 Cancri, en la constelación de Cáncer, es uno de los sistemas planetarios extrasolares más fascinantes y estudiados. Alrededor de la estrella 55 Cancri A, ligeramente más pequeña que el Sol, orbitan al menos cinco planetas confirmados, descubiertos gracias a la técnica de velocidad radial[1].

El primer planeta en ser detectado fue 55 Cancri b en 1997 [2][3]. En los siguientes cinco años se descubrieron 55 Cancri c y 55 Cancri d. Posteriormente, en 2004, se anunció el hallazgo de 55 Cancri e, una supertierra con una masa mínima 11 veces mayor que la de la Tierra [13]. Este exoplaneta destaca por su órbita extremadamente cercana a su estrella [3]. Finalmente, en 2008 se detectó 55 Cancri f, un mundo potencialmente habitable situado en la zona de habitabilidad de 55 Cancri A [12][16].

Los planetas de este sistema han sido estudiados en detalle utilizando diversos métodos de observación. El análisis de las variaciones en la velocidad radial de 55 Cancri A, causadas por el efecto Doppler, al ser una relación entre la longitud de onda (o frecuencia) de la luz y la velocidad del emisor, abre la posibilidad de medir la velocidad (radial) de una estrella en función del tiempo.

En el caso de los exoplanetas, en general sólo es observable la velocidad radial de la estrella madre, porque la relación de flujo planeta-estrella es muy pequeña (10^{-5}). Las observaciones de esta que cubren todas las fases orbitales permiten medir el período orbital P, la excentricidad e y la semiamplitud K1 del RV. [12]

A partir de estos observables, se puede calcular la llamada 'masa mínima' $m_p \text{ sen } i$ permitiendo determinar

las masas mínimas de los planetas [12]. Además, el tránsito de 55 Cancri e frente a su estrella, observado con el telescopio espacial Spitzer, reveló que este planeta tiene una densidad media significativamente menor [6].

En las primeras búsquedas de exoplanetas, las observaciones para detectar tránsitos eran limitadas, con períodos de observación de sólo unos pocos días y una precisión relativamente baja. Esto resultaba en la identificación preferente de planetas gigantes que orbitan cerca de sus estrellas, los cuales generalmente presentan órbitas casi circulares. En este contexto, Seager y Mallén-Ornelas (2003) desarrollaron un modelo que proporciona una solución única para determinar los parámetros de un sistema estelar y planetario a partir de la curva de luz de uno o más tránsitos, siendo especialmente efectivo para estas órbitas. Este modelo utiliza fórmulas

aritméticas que permiten obtener estimaciones rápidas y útiles, además de facilitar la estimación de la densidad estelar solo con los datos de la curva de luz. [13] [18]

Este estudio busca estimar con cierta precisión los parámetros orbitales de estos planetas utilizando métodos de observación como el tránsito y la velocidad radial. Al comprender mejor las dinámicas de este sistema, se espera contribuir a la investigación sobre la formación y evolución de exoplanetas, así como a la búsqueda de mundos potencialmente habitables.

Los hallazgos en el sistema 55 Cancri han contribuido significativamente a nuestra comprensión de la diversidad y las características de los exoplanetas. Particularmente, 55 Cancri destaca por su composición inusual, rica en carbono, y por las condiciones extremas en su superficie, con temperaturas de hasta 2.700°C [1][4]. Estos estudios plantean preguntas intrigantes sobre la formación, evolución y supervivencia de los planetas en sistemas estelares distintos al nuestro.

2. DETECCIÓN DE EXOPLANETAS

2.1 MÉTODO DE VELOCIDAD RADIAL

El método de velocidad radial es una técnica utilizada para detectar exoplanetas (planetas alrededor de otras estrellas). Se basa en medir las variaciones periódicas en la velocidad radial de una estrella, es decir, la componente de su velocidad a lo largo de la línea de visión del observador.

Cuando un planeta orbita una estrella, la estrella también se mueve en una pequeña órbita alrededor del centro de masa del sistema. Esto causa que la estrella se acerque y se aleje periódicamente del observador, lo que produce un corrimiento Doppler en la luz de la estrella. Midiendo estos cambios en la longitud de onda de las líneas espectrales de la estrella, se puede calcular su velocidad radial. [12]

Las variaciones de velocidad radial son más grandes para planetas masivos y cercanos a su estrella, ya que inducen perturbaciones mayores. Actualmente, los instrumentos pueden medir variaciones del orden de 1 m/s, lo que permite detectar planetas gigantes gaseosos en órbitas cercanas. [13][14]

Sin embargo, el método tiene limitaciones. Solo proporciona un límite inferior de la masa del planeta, ya que el ángulo de inclinación de la órbita es desconocido. Además, es más sensible a planetas masivos y cercanos, por lo que la detección de planetas similares a la Tierra alrededor de estrellas como el Sol es aún un desafío. [18]

Este método proporciona información sobre las características puramente dinámicas de los planetas, en

particular, sus masas y periodos orbitales. Además, la masa de un planeta puede ser estimada a partir de la semiamplitud que genera en la curva de velocidad radial de su estrella. La ecuación de semiamplitud se deriva de la relación entre la velocidad radial con la posición en la órbita. Suponiendo una órbita circular, dicha semiamplitud será [12]:

$$K = \frac{v_{r,max} - v_{r,min}}{2} \quad (1)$$

donde $v_{r,max}$ y $v_{r,min}$ corresponden a los valores máximo y mínimo de velocidad radial. Alternativamente, se usa la tercera ley de Kepler y se expresa la fórmula anterior de manera más práctica [12]:

$$K_1 = \frac{28.4329 \text{ ms}^{-1} m_p \sin i}{\sqrt{1-e^2} M_{Jup}} \left(\frac{M_*}{M_\odot}\right)^{-2/3} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}}\right)^{-1/3} \quad (2)$$

Donde m_p es la masa del planeta, i es la inclinación orbital (el ángulo entre el plano de la órbita del exoplaneta y la línea de visión del observador), e es la excentricidad de la órbita del exoplaneta, M_* la masa de la estrella, M_\odot es la masa del sol, M_{Jup} es la masa de Júpiter y P es el periodo orbital del exoplaneta.

2.2 MÉTODO DE TRANSITO

El método de tránsito es una técnica fundamental en la detección de exoplanetas, consistente en observar la variación de brillo de una estrella cuando un planeta pasa por delante de ella desde nuestra perspectiva. Este método permite determinar el tamaño del planeta, el período orbital y la excentricidad de su órbita, a través de la curva de luz generada durante el tránsito. La profundidad del tránsito, es decir, la disminución del brillo estelar, está directamente relacionada con el tamaño del planeta. Además, la observación de múltiples tránsitos periódicos indica la presencia de varios planetas orbitando la misma estrella. Sin embargo, este método tiene limitaciones, como la necesidad de que el plano orbital del planeta esté alineado con nuestra línea de visión a la estrella y la pequeña señal de tránsito que puede verse enmascarada por variaciones en el brillo estelar. [13][20]

Por otra parte, la curva de luz muestra la relación entre el radio del exoplaneta y su estrella anfitriona, mediante la ecuación [6][11]:

$$\delta = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2 \quad (3)$$

Donde, R_p es el radio del planeta, R_* es el radio de la estrella y δ es la profundidad de la caída de flujo, este parámetro se calcula restando al máximo y mínimo del ajuste hecho a los datos de la curva de luz.

3. OBSERVACIONES DEL SISTEMA 55 CNC

El sistema 55 Cancri consta de dos estrellas, siendo la más prominente 55 Cancri A, una estrella de tipo espectral G8V que se asemeja al Sol. A su lado, se encuentra una compañera más pequeña, que es una enana roja. Este sistema se encuentra a aproximadamente 41 años luz de la Tierra en la constelación de Cáncer. Alrededor de 55 Cancri A orbitan cinco planetas conocidos. Estos se han identificado principalmente a través del método del tránsito utilizado por telescopios espaciales como Kepler y TESS, detecta pequeñas disminuciones en el brillo de la estrella cuando un planeta pasa frente a ella y el método de velocidad radial, que se centra en el análisis de las fluctuaciones en la velocidad de 55 Cancri A, generadas por la atracción gravitacional de los planetas que la orbitan. Este enfoque ha sido llevado a cabo con la ayuda de instrumentos como el telescopio Hobby-Eberly, ubicado en el Observatorio McDonald en Texas, conocido por su gran apertura y su diseño optimizado para la espectroscopía, lo que le permite realizar observaciones de alta precisión. Por otro lado, tenemos el MicroObservatory Donald situado en el Cerro Tololo en Chile, forma parte de una red de telescopios automatizados y el espectrógrafo Hamilton Echelle, se encuentra en el Observatorio Lick en California, es conocido por su alta resolución y su capacidad para descomponer la luz estelar en sus componentes espectrales. Además del telescopio espacial Hubble y el satélite MOST (Microvariability and Oscillations of Stars) que han facilitado mediciones precisas de las variaciones en la luz de la estrella y la dinámica de los cuerpos en su entorno [2][4]. Entre estos instrumentos destacan cada uno desempeñando un papel crucial en la investigación de este sistema estelar.

Entre ellos, 55 Cancri e se destaca como un planeta de tipo supertierra, que orbita extremadamente cerca de su estrella, completando una vuelta en aproximadamente 18 horas. Este fue descubierto en 2004, detectado originalmente por el método de velocidad radial utilizando espectroscopía de alta resolución, lo que permitió determinar su masa mínima de aproximadamente 8 veces la de la Tierra. En 2011, observaciones de tránsito con el telescopio espacial Spitzer permitieron medir su radio, que resultó ser 2,08 veces el de la Tierra. Esto implica una densidad media menor a la esperada, sugiriendo que 55 Cnc e podría estar compuesto en gran parte por agua.[4][11]

Es conocido por su superficie extremadamente caliente, con temperaturas que alcanzan hasta 2,500 grados Celsius

en su lado diurno, mientras que el lado nocturno puede bajar a 1,100 grados Celsius. Las condiciones de este son extremas, lo que plantea preguntas sobre la posibilidad de una atmósfera y la dinámica de su clima. La investigación sobre este sistema ha sido facilitada por telescopios como el Spitzer de la NASA, que ha permitido a los científicos mapear las temperaturas de la superficie del planeta y estudiar su composición y características, lo que proporciona información valiosa sobre la formación y evolución de sistemas planetarios similares en el universo [15].

Este planeta es parte de un sistema más amplio que incluye otros cuerpos celestes, como 55 Cancri b, un gigante gaseoso, y 55 Cancri c, que se asemeja a Neptuno.[13] Cada uno de estos orbitan a diferentes distancias de sus estrella central, ejercen fuerzas gravitacionales entre sí, lo que puede causar perturbaciones en sus órbitas y presentan características únicas que reflejan la complejidad de los sistemas planetarios múltiples. [16]

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL SISTEMA 55 CNC

4.1 DATOS Y CURVA DE VELOCIDAD RADIAL OBTENIDA DE 55 CNC E

Los datos observacionales de velocidad radial fueron recopilados de Nasa Exoplanet Archive [15] y proporcionados por McArthur y otros (2004). Estos fueron procesados dando como resultado un gráfico de dispersión que no proporciona una información concreta. Sin embargo, medir el desplazamiento Doppler del espectro de la estrella a lo largo del tiempo se traduce en una serie temporal de velocidad radial de la estrella.

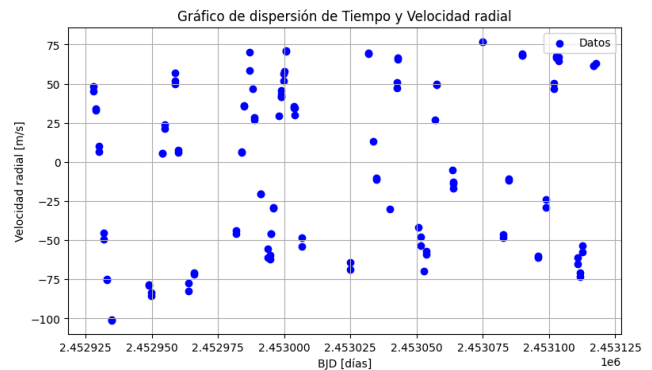


FIG. 1. Serie de tiempo de velocidad radial del exoplaneta 55 Cnc e.

El análisis mediante el periodograma de Lomb-Scargle es una forma eficaz de estudiar la estructura espectral de series temporales irregulares, en este caso se hizo uso de Lomb-

Scargle Power. Por consiguiente, el gráfico resultante brinda información de la potencia espectral en función de la frecuencia. El periodograma permite identificar las frecuencias (o períodos) presentes en la señal de velocidad radial, lo cual ayuda a detectar la presencia de planetas extrasolares.[10][19]

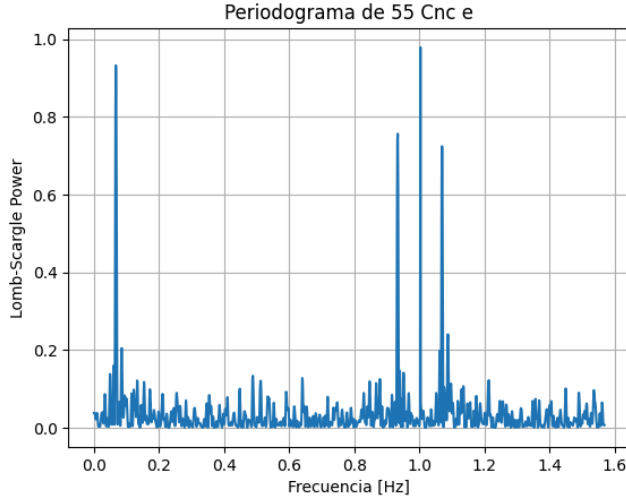


FIG. 2. Periodograma de los datos de 55 Cnc e.

El pico más prominente corresponde al máximo de los datos de frecuencia, sin embargo para hallar el periodo orbital del exoplaneta, se hace uso de la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{f} \quad (4)$$

donde P es el periodo, esta tendrá unidades de días y f la frecuencia. Por ende, el periodo orbital es de:

$$P_{55 \text{ Cnc } e} = 0.99 \pm 0.00105 \text{ días}$$

Resalta el hecho que el segundo pico más prominente de frecuencia, corresponde a el periodo del exoplaneta 55 Cnc b, con un valor de $P_{55 \text{ Cnc } b} = 14.65 \text{ días}$. Esto se debe a que este planeta es un Júpiter caliente, es decir, un planeta con una masa similar a la de Júpiter pero que orbita muy cerca de su estrella madre, por ende tiene un efecto gravitacional significativo en la estrella que se manifiesta claramente en el periodograma.

Ahora, teniendo el dato del periodo orbital y haciendo uso de la tercera ley de Kepler en su forma simplificada es posible calcular su semieje mayor haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$P^2 = a^3 \quad (5)$$

donde las unidades del periodo son en años y el semieje mayor en unidades astronómicas. En consecuencia, el semieje mayor es:

$$a = 0.019 \pm 0.00007 \text{ UA}$$

Por otra parte, se asume que las órbitas de los planetas alrededor de la estrella son periódicas, por ende las velocidades radiales deben corresponder a una función periódica y pueden ser ajustadas mediante funciones seno o coseno de la forma [12]:

$$V_R(t) = A \sin(2\pi * t + fase) + offset \quad (6)$$

con el objetivo de hallar la amplitud, fase, frecuencia y periodo, donde el offset se ajusta de acuerdo a los datos. Posteriormente, los datos se colocaron en fase para hacer un ajuste senoidal a los mismos y obtener la curva de velocidad radial, además, se halla la semiamplitud de esta de (1):

$$K = 8.14 \pm 3.55 \text{ m/s}$$

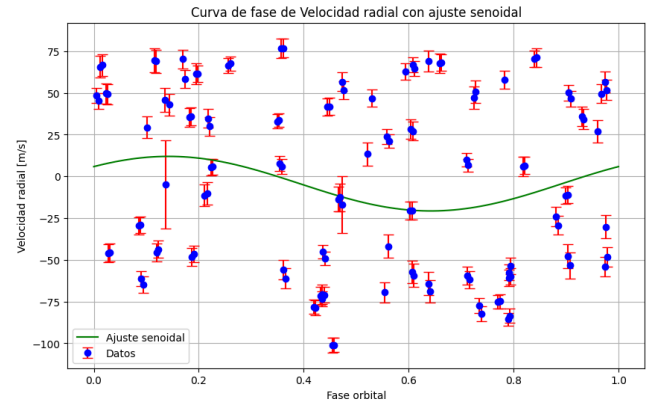


FIG. 3. Curva de velocidad radial de 55 Cnc e. Mejor ajuste del modelo.

La curva de velocidad radial refleja la presencia y las propiedades de un planeta que orbita a su alrededor. Si la órbita del planeta es casi circular, la curva de velocidad radial tendrá una forma sinusoidal, mientras que una órbita excéntrica deformará esta onda. En sistemas con múltiples planetas, la curva de velocidad radial será más compleja, pudiendo mostrar señales de resonancia entre los períodos orbitales.[12]

Los datos de la masa de la estrella anfitriona, excentricidad e inclinación se toman del Nasa Exoplanet Archive [5], así

$M_* = 0.96$ (Rosenthal et al. 2021), $e = 0$ (Endl et al. 2012), $i = 89.59$ (Bourrier et al. 2018), despejando de (2) la masa del planeta será:

$$m_p = 0.035 \pm 0.530 M_{Jup}$$

4.2 DATOS Y CURVA DE VELOCIDAD RADIAL OBTENIDA DE 55 CNC B

De manera análoga se analizaron los datos para el exoplaneta 55 Cnc b, se muestra en la Fig. 4 la relación entre el tiempo (en días Julián Baricéntrico, BJD) y la velocidad radial (en m/s).

Aunque en este caso se asume la excentricidad como cero la dispersión de los puntos alrededor de una tendencia general también puede proporcionar información sobre la excentricidad de la órbita del planeta. Una mayor dispersión indica una órbita más excéntrica. Además, la gráfica permite identificar posibles anomalías o valores atípicos en los datos, que podrían ser causados por errores de medición o perturbaciones de otros cuerpos en el sistema planetario.

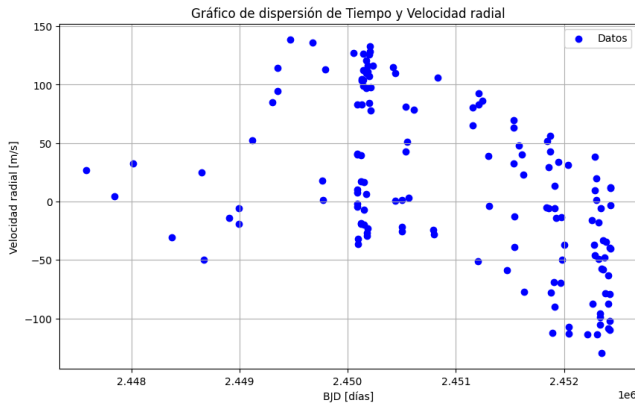


FIG. 4. Serie de tiempo de velocidad radial del exoplaneta 55 Cnc b.

Del mismo modo, se halló el periodograma para este exoplaneta, en el cual se pone en evidencia la frecuencia fundamental $f_{fun} = 0.068254$ Hz del 55 Cnc b y las frecuencias armónicas que corresponden a los exoplanetas 55 Cnc c y f con un valor de $f_{arm} = 0.022614$ Hz y $f_{arm} = 0.003814$ Hz. [19]

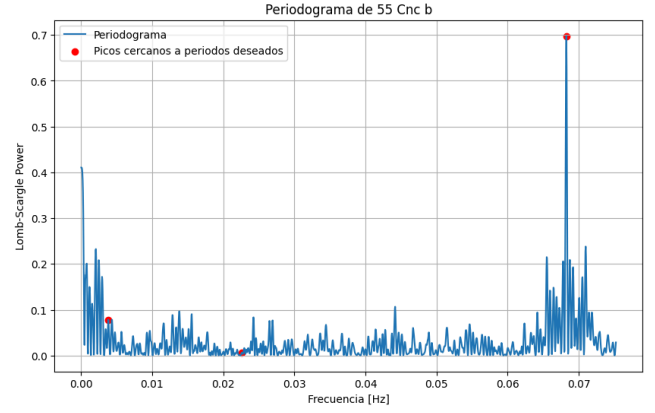


FIG. 5. Periodograma para el exoplaneta 55 Cnc b, resalta la frecuencia fundamental y los armónicos correspondientes a las frecuencias de los exoplanetas 55 Cnc c y f.

Por consiguiente, de (4) los períodos junto con sus errores relativos son:

$$P_{55\ Cnc\ b} = 14.65 \pm 0.0008\ \text{días}$$

$$P_{55\ Cnc\ c} = 44.22 \pm 0.0038\ \text{días}$$

$$P_{55\ Cnc\ f} = 262.21 \pm 0.009\ \text{días}$$

Se hizo uso de la tercera ley de Kepler para hallar los semiejes mayores junto con sus errores calculados por derivadas parciales.

De (5) y teniendo en cuenta que, P (yr):

$$a_{55\ Cnc\ b} = 0.116 \pm 0.0004\ UA$$

$$a_{55\ Cnc\ c} = 0.241 \pm 0.0008\ UA$$

$$a_{55\ Cnc\ f} = 0.791 \pm 0.0027\ UA$$

De igual forma, además de la representación gráfica de los datos de tiempo y velocidad radial, es importante ajustar una curva que modele adecuadamente el comportamiento observado. Este ajuste permite extraer información más detallada sobre las propiedades orbitales del exoplaneta 55 Cnc b. [17]

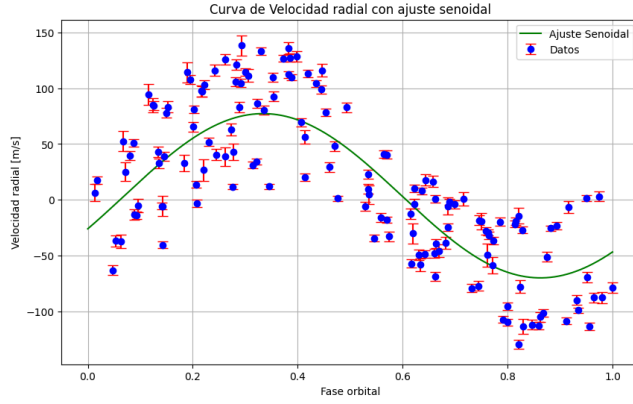


FIG. 6. Curva de velocidad radial para el exoplaneta 55 Cnc b. Mejor ajuste del modelo.

Por ende, este nos brinda de (1) la semiamplitud:

$$K = 73.8 \pm 4.5 \text{ m/s}$$

A partir de los parámetros orbitales medidos en la curva de velocidad radial, se puede calcular la llamada "masa mínima" del exoplaneta ($m_p \sin i$). Esta masa depende de la inclinación (i) del plano orbital con respecto a la línea de visión, pero proporciona una cota inferior para la masa real del planeta. [12]

Los datos de la masa de la estrella anfitriona, excentricidad e inclinación se toman del Nasa Exoplanet Archive [15], así $M_* = 0.96$ (Rosenthal et al. 2021), $e = 0$ (Bourrier et al. 2018), $i = 89.73$ (Nelson et al. 2014) despejando de (2) la masa del planeta será:

$$m_p = 0.86 \pm 0.64 M_{Jup}$$

4.3 DATOS FOTOMÉTRICOS DEL TRÁNSITO DE 55 CNC E

Los datos de fotometría fueron obtenidos de los Catálogos Hipparcos y Tycho. Catálogos astrométricos y fotométricos de estrellas derivados de la misión de astrometría espacial HIPPARCOS de la ESA, proporcionados por la NASA. [15]

La presencia de datos muy dispersos en la Fig.7 sugiere que la información recopilada sobre las propiedades estelares y planetarias del sistema 55 Cancri no es concluyente o presenta un alto nivel de incertidumbre. Esto puede deberse a varias razones, por ejemplo [20]:

- Limitaciones en las técnicas de observación utilizadas
- Dificultades para obtener mediciones precisas de las variables relevantes.
- Complejidad inherente del sistema estelar y planetario.

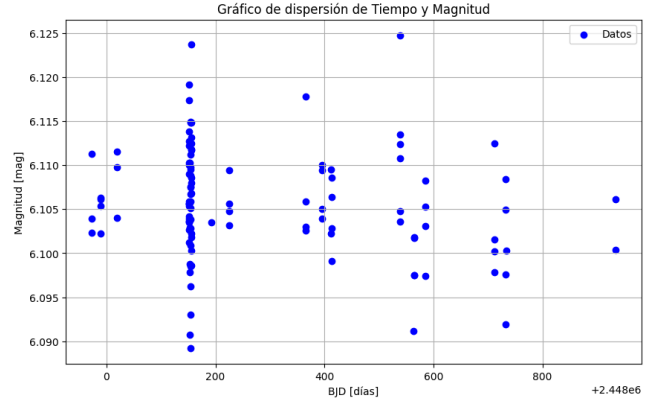


FIG. 7. Datos fotométricos el exoplaneta 55 Cnc e.

Por otro lado, la ausencia de una curva de luz clara y bien definida indica que no se ha podido detectar con certeza los tránsitos de los planetas frente a la estrella 55 Cancri A. Por ende, se normalizaron los datos y a su vez se buscó suavizarlos para poder generar unos datos menos dispersos, sin embargo, sigue sin ser una curva de luz clara. Esto puede deberse a [17]:

- Problemas en la alineación del sistema planetario con respecto a la Tierra.
- Dificultad para distinguir las variaciones de brillo de la estrella causadas por los tránsitos de las fluctuaciones inherentes a la estrella.
- Las observaciones no hayan sido lo suficientemente precisas que haya ruido en los datos que impida identificar patrones claros.

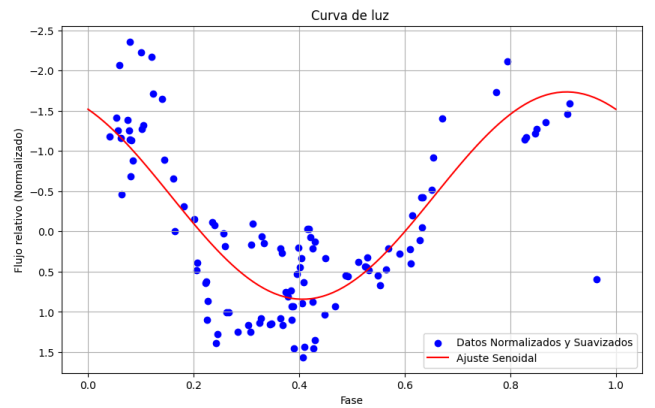


FIG. 8. Curva de luz para del exoplaneta 55 Cnc b. Fotometría del telescopio espacial Hubble. McArthur y otros (2004).

Se hace uso de (3) para hallar el radio:

$$R_p = 0.204 \pm 0.0005 R_{Jup}$$

Por otro lado, el modelo de Seager & Mallén-Ornelas (2003), con el cual se tuvo en cuenta algunas consideraciones como: una órbita del planeta circular, $m_p \ll M_*$ y la compañera es oscura en comparación a la estrella y los tránsitos deben presentar fondos planos en la curva de luz. [13] [20]

5. ANÁLISIS COMPARATIVO E IMPLICACIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Al comparar los resultados obtenidos con la literatura, se observa que para el caso de 55 Cnc e, el periodo no se ajusta a ninguno de los valores teóricos proporcionados. Esto sugiere que puede haber un error en el proceso de medición, en la interpretación de los datos, o en la metodología utilizada para obtener tu resultado. En consecuencia, se observa que el semieje mayor, tiene un error absoluto de 0.004.

Para el caso de la semiamplitud existe una discrepancia significativa entre el resultado (8.14 ± 3.55) y los otros valores, lo que sugiere un posible error sistemático en la metodología utilizada para obtener este dato. Lo que plantea la necesidad de mejorar los procedimientos experimentales y de análisis para obtener resultados más precisos y reproducibles utilizando el método de velocidad radial. En consecuencia de (2), el resultado de la masa presenta una gran incertidumbre en comparación con el resultado teórico, lo que sugiere que la masa puede no ser muy precisa. La amplia desviación estándar de ± 0.530 implica que el valor real podría variar considerablemente, lo que dificulta la comparación con otros valores teóricos.

Por último, el radio es el que mejor se ajusta. Este resultado presenta una incertidumbre muy baja, lo que indica que la medición del radio es bastante precisa. La desviación estándar de ± 0.0005 sugiere que el valor real del radio está muy bien definido y que hay confianza en la exactitud de esta medición.

Así mismo, para el caso del exoplaneta 55 Cnc b, los resultados coinciden en el valor del período orbital, lo que indica una alta consistencia entre las mediciones. La diferencia en la incertidumbre entre los dos resultados es mínima, lo que sugiere que los métodos utilizados, basados en la técnica de velocidad radial y haciendo uso de la librería astroquery de python, han sido aplicados correctamente. Además, la capacidad de medir períodos orbitales con alta precisión tiene implicaciones significativas para entender la formación y evolución de sistemas planetarios, así como para evaluar la habitabilidad de los planetas en órbita.

Por consiguiente, para el semieje mayor, la desviación estándar de ± 0.0004 sugiere que el valor real está bien definido. El rango de error del Resultado 1 es muy estrecho, lo que proporciona confianza en su precisión. El Resultado 2 también es confiable, aunque con un rango ligeramente más amplio. El Resultado 3, debido a su mayor incertidumbre, plantea preguntas sobre su fiabilidad en comparación con los otros dos.

Finalizando con la semiamplitud, este resultado presenta una incertidumbre relativamente alta en comparación con los otros dos. La desviación estándar de ± 4.5 indica que el valor real podría variar considerablemente, lo que sugiere que esta medición podría estar influenciada por factores externos o ruido en los datos.

Exoplaneta	55 Cnc b	55 Cnc e
Periodo P[días] Obtenido Teórico [2][3] Teórico [13]	14.65 ± 0.0008 14.65 ± 0.0001 14.67 ± 0.01	0.99 ± 0.0010 0.74 ± 0.0000014 2.81 ± 0.002
Semieje mayor a [UA] Obtenido Teórico [2][3] Teórico [13]	0.116 ± 0.0004 0.113 ± 0.0006 0.115 ± 0.003	0.019 ± 0.00007 0.015 ± 0.00005 0.038 ± 0.001
Semiamplitud K [m/s] Obtenido Teórico [2][3] Teórico [13]	73.8 ± 4.5 71.4 ± 0.2 67.4 ± 0.8	8.14 ± 3.55 6.02 ± 0.23 6.66 ± 0.81
Masa $m_p [M_{Jup}]$ Obtenido Teórico [16]	0.86 ± 0.64 0.84 ± 0.131	0.035 ± 0.530 0.025 ± 0.00082
Radio $R_p [R_{Jup}]$ Obtenido Teórico [7]		0.204 ± 0.0005 0.194 ± 0.009

Tabla. 1. Estimación de los parámetros orbitales de los exoplanetas 55 Cnc b y e, teniendo en cuenta los valores teóricos esperados.

Del mismo modo para el exoplaneta 55 Cnc c, la diferencia entre los dos resultados del periodo orbital es de 0.09 días, lo que, aunque puede parecer pequeña, es significativa en el contexto de las incertidumbres. Ambos

resultados están dentro de rangos de error aceptables, pero no se superponen, lo que indica que podría haber una discrepancia que merece atención. Sin embargo, el resultado obtenido es bastante preciso. En consecuencia, para el semieje mayor ambos resultados tienen el mismo valor central (0.24), lo que sugiere que el semieje mayor ha sido medido de manera consistente. Sin embargo, la diferencia en la incertidumbre indica que el primer resultado es más preciso que el segundo.

Por último, para el periodo obtenido de 55 Cnc f, indica una incertidumbre muy baja de ± 0.009 . La pequeña desviación estándar sugiere que esta medición es extremadamente precisa y que el método utilizado para obtener este valor ha proporcionado un resultado confiable. Sin embargo, el resultado teórico presenta una incertidumbre considerablemente mayor de ± 0.29 . Aunque el valor central es cercano al primero, la gran desviación estándar indica que esta medición es menos precisa y puede estar influenciada por más variabilidad en los datos o en las condiciones experimentales.

En consecuencia, comparando ambos semiejes mayores la diferencia entre los dos resultados es de aproximadamente 0.02 unidades, lo que, en el contexto de las incertidumbres, es significativo. El primer resultado es más alto y más preciso, mientras que el segundo presenta una mayor variabilidad.

Exoplaneta	55 Cnc c	55 Cnc f
Periodo P[días] Obtenido Teórico [2]	44.22 ± 0.0038 44.31 ± 0.0042	262.21 ± 0.009 259.88 ± 0.29
Semieje mayor a [UA] Obtenido Teórico [2]	0.24 ± 0.0008 0.24 ± 0.0013	0.79 ± 0.0027 0.77 ± 0.0043

Tabla. 2. Estimación de los parámetros orbitales de los exoplanetas 55 Cnc c y f, mediante la información del periodograma de 55 Cnc b.

6. CONCLUSIONES

Las investigaciones del sistema planetario múltiple 55 Cancr i han proporcionado información valiosa sobre la composición, atmósfera, dinámica orbital e interacciones de los exoplanetas con su estrella anfitriona. A través de la recopilación y análisis de datos, se han formulado diversas teorías que buscan explicar la naturaleza de estos y su evolución a lo largo del tiempo.

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes derivadas de este trabajo e investigaciones, que no solo iluminan las características específicas de 55 Cancr i e, sino que también contribuyen a un entendimiento más amplio de la formación y dinámica de este sistema planetario en el universo:

- Si bien 55 Cancr i es un sistema binario, la separación entre sus estrellas es tan grande que no influye significativamente en la formación y características de los planetas que orbitan a 55 Cancr i A. La binariedad del sistema es un dato curioso, pero no parece tener un impacto directo en la evolución y habitabilidad potencial de sus exoplanetas.
- La mayoría de los planetas en este sistema han sido detectados utilizando el método de velocidad radial, que ha permitido identificar la influencia gravitacional de los planetas sobre su estrella madre. Este método ha sido crucial para confirmar la existencia de los planetas y estimar sus masas mínimas, aunque presenta limitaciones en la determinación de características más precisas.
- La combinación de métodos de detección ha enriquecido la comprensión de 55 Cancr i e. Mientras que la velocidad radial ha sido esencial para su detección inicial y estimación de masa, el método de tránsito ha permitido una caracterización más detallada de su estructura y composición. Esta sinergia es vital para el estudio de otros exoplanetas, ya que cada método aporta información única y complementaria.
- Se identificaron discrepancias significativas en el período orbital, semieje mayor y semiamplitud de 55 Cancr i e, lo que sugiere posibles errores en la metodología de medición y análisis de datos. Los resultados obtenidos no se ajustan a los valores teóricos, indicando la necesidad de revisar las técnicas de observación.
- Las observaciones de las curvas de velocidad radial también han permitido estudiar las interacciones entre los planetas del sistema 55 Cancr i. La influencia gravitacional de 55 Cancr i b, por ejemplo, puede afectar la órbita de 55 Cancr i e, lo que resalta la importancia de considerar la dinámica del sistema en su conjunto.
- Las curvas de velocidad radial han proporcionado información crucial sobre los parámetros orbitales de 55 Cancr i e y b, incluyendo sus masas mínimas y semi amplitudes. Por ejemplo, 55 Cancr i b tiene una masa mínima de aproximadamente 0.8 veces la masa de Júpiter, mientras que 55 Cancr i e tiene un radio estimado de 0.2 veces el radio de Júpiter. Estas estimaciones son esenciales para comprender la naturaleza y composición de estos exoplanetas.

- La alta dispersión en los datos fotométricos dificultó la identificación de tránsitos claros, lo que sugiere que se deben mejorar las técnicas de recolección y análisis de datos. También podría indicar fenómenos astrofísicos no considerados, como la actividad estelar que afecta las mediciones.

Referencias

- [1] Abundancias Químicas en Estrellas. (s/f). Instituto de Astrofísica de Canarias • IAC. Recuperado el 26 de julio de 2024, de https://iac.edu.es/es/proyectos/abundancias-quimicas-en-estrellas?base_route_name=entity.node.canonical&verriden_route_name=entity.node.canonical&page=4&page_manager_page=node_view&page_manager_page_variant=node_view-panels_variant-6&page_manager_page_variant_weight=10
- [2] Bourrier, V., Dumusque, X., Dorn, C., Henry, G. W., Astudillo-Defru, N., Rey, J., ... & Ehrenreich, D. (2018). The 55 Cancri system reassessed. *Astronomy & Astrophysics*, 619, A1.
- [3] Butler, R. P., Marcy, G. W., Williams, E., Hauser, H., & Shirts, P. (1997). Three new “51 Pegasi-type” planets. *The Astrophysical Journal*, 474(2), L115.
- [4] 55 Cancri e – En español. (s/f). Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System. Recuperado el 26 de julio de 2024, de <https://exoplanets.nasa.gov/alien-worlds/exoplanet-travel-bureau/cancri-e-guided-tour-es/>
- [5] de Astrofísica Teórica, G. (2008). Análisis de la Velocidad radial de HD 161471 (Doctoral dissertation, Universidad de Los Andes).
- [6] Demory, B. O., Gillon, M., Deming, D., Valencia, D., Seager, S., Benneke, B., ... & Udry, S. (2011). Detection of a transit of the super-Earth 55 Cancri e with warm Spitzer. *Astronomy & Astrophysics*, 533, A114.
- [7] Endl, M., Robertson, P., Cochran, W. D., MacQueen, P. J., Brugamyer, E. J., Caldwell, C., ... & Gullikson, K. (2012). Revisiting p1 Cancri e: A new mass determination of the transiting super-Earth. *The Astrophysical Journal*, 759(1), 19.
- [8] Organización Europea para la Investigación Astronómica en el Hemisferio Sur (ESO). (2009, 21 de abril). El método de velocidad radial [Vídeo]. <https://www.eso.org/public/spain/videos/eso0915g/>
- [9] Hacker, A. (2022). Modelos de velocidad radial para la detección de planetas extrasolares de baja masa.
- [10] Lomb-Scargle Periodograms — Astropy V6.1.1. (s. f.). <https://docs.astropy.org/en/stable/timeseries/lombscargle.html>.
- [11] López-Morales, M., Karjalainen, R., Hrudkova, M., & Jayawardhana, R. (2014). GROUND-BASED TRANSIT OBSERVATIONS OF THE SUPER-EARTH 55 Cnc e. *Astrophysical Journal Letters*, 797(2).
- [12] Lovis, C., & Fischer, D. (2010). Radial velocity techniques for exoplanets. *Exoplanets*, 27-53.
- [13] McArthur, B. E., Endl, M., Cochran, W. D., Benedict, G. F., Fischer, D. A., Marcy, G. W., ... & Harrison, T. E. (2004). Detection of a Neptune-mass planet in the p1 Cancri system using the Hobby-Eberly Telescope. *The Astrophysical Journal*, 614(1), L81.
- [14] Monzón, C. V. (2021). Detección, dinámica y habitabilidad de exoplanetas y exosatélites (Doctoral dissertation, Universidade de Santiago de Compostela).
- [15] NASA Exoplanet Archive. (s/f). Caltech.edu. Recuperado el 26 de julio de 2024, de <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
- [16] Nelson, B. E., Ford, E. B., Wright, J. T., Fischer, D. A., von Braun, K., Howard, A. W., ... & Dindar, S. (2014). The 55 Cancri planetary system: fully self-consistent N-body constraints and a dynamical analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(1), 442-451.
- [17] Reyes, J. G. A. (2014). Ajuste simultáneo a curvas de luz y velocidad radial para sistemas en tránsito. Obtenido de Ajuste simultáneo a curvas de luz y velocidad radial para sistemas en tránsito.
- [18] Rosenthal, L. J., Fulton, B. J., Hirsch, L. A., Isaacson, H. T., Howard, A. W., Dedrick, C. M., ... & Wright, J. T. (2021). The California Legacy Survey. I. A catalog of 178 planets from precision radial velocity

monitoring of 719 nearby stars over three decades. The Astrophysical Journal Supplement Series, 255(1), 8.

[19] VanderPlas, J. T. (2018). Understanding the lomb–scargle periodogram. The Astrophysical Journal Supplement Series, 236(1), 16.

[20] Winn, J. N. (2010). Transits and occultations. arXiv preprint arXiv:1001.2010.