

Caracterización del sistema HD 196385 mediante imagen directa, velocidad radial y astrometría

L.H. García¹, R. Petrucci^{1,2}, E. Jofré^{1,2} & M. Gómez^{1,2}

¹ Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Contacto / luciano.garcia.030@unc.edu.ar

Resumen / En este trabajo se presenta una caracterización de la órbita relativa de HD 196385B combinando datos de imagen directa, mediciones de velocidad radial y movimientos propios de las misiones *Hipparcos* y *Gaia*. Para realizar el ajuste simultáneo de los datos se utilizó el código *orvara*. De los ajustes se obtuvieron rangos de valores posibles para el semieje mayor, la masa de la componente secundaria, período, excentricidad, inclinación, argumento del periastro y longitud del nodo ascendente. Tanto para el semieje (37_{-8}^{+11} UA) como para la masa de la secundaria ($0.24_{-0.06}^{+0.10}$ $M_{\odot}$) se halló un buen acuerdo con estimaciones anteriores en la literatura con sólo datos de velocidad radial e imagen directa. Por otro lado, la inclinación de la órbita, el argumento del periastro y la longitud del nodo ascendente resultaron pobremente delimitados por este ajuste. Esto podría deberse a la cantidad de mediciones disponibles actualmente. Dado el período relativamente largo de ~ 166 años, la imagen directa se presenta como una técnica viable para establecer cotas más fuertes a los parámetros orbitales.

Abstract / In this paper we present a characterization of the relative orbit of HD 196385B combining data from direct imaging, radial velocity, and proper motions from the *Hipparcos* and *Gaia* missions. To perform a joint fit of the data, we used the code *orvara*. From the fit, we obtained ranges of possible values for the major semi-axis, the mass of the secondary component, period, eccentricity, inclination, the argument of the periastron and longitude of the ascending node. Both the semi-axis (37_{-8}^{+11} AU) and the mass of the companion ($0.24_{-0.06}^{+0.10}$ $M_{\odot}$) showed a good agreement with previous estimates using only radial velocity and direct imaging data. On the other hand, the inclination of the orbit, the argument of periastron and longitude of the ascending node were poorly constrained by this fit. This could be due to the few currently available data. Given the relatively long period of ~ 166 years, direct imaging appears as a viable technique to place stronger constraints on the orbital parameters.

Keywords / binaries: visual — techniques: high angular resolution — techniques: radial velocities — astrometry — stars: individual (HD 196385A)

1. Introducción

En los últimos años, cada vez más estrellas son estudiadas en búsqueda de compañeros de masa sub-estelar (y estelar) utilizando técnicas como tránsitos, velocidad radial (VR), imagen directa, etc. A esto, se suma la posibilidad de incorporar mediciones de movimientos propios de las misiones *Hipparcos* (van Leeuwen, 2007) y *Gaia* (Gaia Collaboration et al., 2021) para obtener aceleraciones en el plano del cielo que podrían ser inducidas por objetos orbitantes (astrometría absoluta). La combinación de datos provenientes de diferentes técnicas permite estimar parámetros orbitales más confiables que aquellos que resultan de aplicar un solo método (Rickman et al., 2022). En particular, las masas obtenidas de esta manera son independientes de hipótesis asumidas en modelos evolutivos de objetos de masa sub-estelar (o estelar), por lo que constituyen una herramienta muy poderosa para verificar dichos modelos (ver, por ejemplo, Franson et al., 2022).

En García et al. (2022) (G22 de aquí en adelante) reportamos el descubrimiento de una estrella de baja

masa orbitando a HD 196385A detectada mediante imagen directa con el instrumento *Gemini Planet Imager* (GPI, Macintosh et al., 2014). Combinando las mediciones de separación angular y ángulos de posición de las imágenes con mediciones de VR de la literatura realizamos una caracterización inicial de la órbita relativa de la componente secundaria (HD 196385B). En este trabajo, extendemos esa caracterización incorporando astrometría absoluta. En la sección 2 describimos brevemente las características de HD 196385A y el método utilizado para los ajustes orbitales. En la sección 3 se presentan los resultados obtenidos comparando con los de G22. Finalmente, en la sección 4 presentamos nuestras conclusiones.

2. Características de HD 196385A y ajustes orbitales

La Tabla 1 lista algunas características de HD 196385A. Esta estrella fue seleccionada debido a que Borgniet et al. (2017) detectaron tendencias en sus curvas de VR que indican la presencia de objetos en órbitas de largo

Tabla 1: Parámetros relevantes de HD 196385A.

HD 196385A	
V^* (mag)	6.38 ± 0.01
$\pi^\dagger$ (mas)	20.91 ± 0.24
μ_α Gaia [†] (mas yr ⁻¹)	73.04 ± 0.03
μ_α Gaia-Hip [‡] (mas yr ⁻¹)	73.633 ± 0.022
μ_δ Gaia [†] (mas yr ⁻¹)	-16.41 ± 0.02
μ_δ Gaia-Hip [‡] (mas yr ⁻¹)	-15.383 ± 0.012
masa [♣] (M _☉)	1.53 ± 0.27
*SIMBAD	
[†] Gaia EDR3 (Gaia Collaboration et al., 2021)	
[‡] Hipparcos-Gaia (EDR3) Catalog of Accelerations (Brandt et al., 2021)	
[♣] Stassun et al. (2019)	

período. En las imágenes obtenidas por G22, se detectó una fuente puntual a una distancia angular de $0.802''$ de HD 196385A, lo que equivale a una separación proyectada de ~ 38 UA. Un análisis combinado de las imágenes, espectros de baja resolución, y mediciones de VR mostró que HD 196385 sería un sistema binario con una componente secundaria estelar de baja masa. En la Tabla 1 también se listan los movimientos propios extraídos de Gaia EDR3 Gaia Collaboration et al. (2021) (μ_α Gaia, μ_δ Gaia) y los movimientos propios calculados a partir de las diferencias de posición entre Hipparcos y Gaia, dividida por el intervalo de tiempo transcurrido entre las épocas de las mediciones de cada misión (μ_α Gaia-Hip, μ_δ Gaia-Hip). Estos valores fueron tomados del catálogo de aceleraciones Hipparcos-Gaia (Hipparcos-Gaia EDR3 Catalog of Accelerations HGCA, Brandt, 2021). Las diferencias entre los movimientos propios de Gaia y aquellos de largo término (μ_α Gaia-Hip, μ_δ Gaia-Hip), podrían ser consecuencia de una aceleración inducida por la fuente detectada en las imágenes de GPI.

Para caracterizar la órbita relativa de HD 196385B realizamos un ajuste conjunto de las separaciones y ángulos de posición en las imágenes con GPI de G22 (astrometría relativa), mediciones de VR de la estrella central del instrumento HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher, Trifonov et al., 2020) que se extienden por 5.2 años, e incorporando variaciones en los movimientos propios del catálogo HGCA (astrometría absoluta). Los ajustes se realizaron con el código *orvara* (Brandt et al., 2021). *orvara** es un paquete escrito en lenguaje python que utiliza un enfoque de cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) para generar y muestrear distribuciones de parámetros orbitales ajustando de manera simultánea datos de VR, astrometría relativa y astrometría absoluta con la posibilidad de utilizar sólo uno de estos conjuntos de datos. En este trabajo, se ajustaron el semieje mayor de la órbita (a), el período (P), las masas de las componentes primaria (m_{pri}) y secundaria (m_{sec}), la excentricidad (e), la inclinación de la órbita (i), el argumento del periastró (ω), y la longitud del nodo ascendente (Ω). Se ejecutaron 10^6 pasos con 20 temperaturas y 1000

Tabla 2: Medianas e intervalos de confianza resultantes del ajuste en este trabajo junto a los valores de G22.

Parámetro	Mediana $\pm$ 68 %	95 %	G22
a (UA)	37^{+11}_{-8}	24–66	36^{+4}_{-3}
P (años)	166^{+79}_{-53}	89–398	161^{+25}_{-20}
m_{pri} (M _☉)	1.5 ± 0.3	1.0–2.1	—
m_{sec} (M _☉)	$0.24^{+0.10}_{-0.06}$	0.13–0.42	$0.30^{+0.06}_{-0.05}$
e	0.4 ± 0.3	0.0–0.9	0.5 ± 0.1
i (°)	65^{+9}_{-21}	29–79	66^{+17}_{-14}
ω (°)	127^{+117}_{-77}	11–347	231 ± 20
Ω (°)	224^{+29}_{-5}	6–351	193^{+19}_{-22}

walkers guardando uno de cada 100 pasos. Para generar las distribuciones resultantes descartamos los primeros 1000 pasos guardados lo que resulta en un *burn-in* de 100000 pasos para asegurarnos de que las cadenas están listas para ser utilizadas en el análisis. Para la distancia al sistema y masa de la componente primaria se adoptaron los valores iniciales de la Tabla 1.

3. Resultados

La Tabla 2 resume los resultados obtenidos para los parámetros ajustados. Allí se listan las medianas de las distribuciones resultantes, junto con los intervalos de confianza del 68 % y 95 %. Utilizamos las medianas como valores representativos de cada parámetro y los intervalos de confianza del 68 % como una medida de las incertezas. Para comparación también se listan los valores obtenidos por G22 combinando sólo datos de VR y astrometría relativa. Las distribuciones resultantes para m_{pri} , m_{sec} , a , e e i se muestran en la Figura 1 junto con 50 de las órbitas generadas.

Para el semieje de la órbita encontramos una mediana de 37^{+11}_{-8} UA con un período de 166^{+79}_{-53} años. Estos valores, si bien mayores que los obtenidos por G22, están en buen acuerdo dentro del intervalo de confianza del 68 %. Además, en el caso de a , el valor resultante de este nuevo ajuste es comparable con la separación proyectada en las imágenes de GPI (38.3 ± 0.1 UA). Para la masa de la componente secundaria se obtuvo $0.24^{+0.10}_{-0.06}$ M_☉, similar a la masa obtenida por G22 dentro del intervalo de confianza del 68 %. También es comparable al valor de 0.28 ± 0.03 M_☉ estimado por G22 utilizando modelos de atmósferas estelares. Para la componente primaria se obtuvo $m_{\text{pri}} = 1.5 \pm 0.3$ M_☉ en acuerdo con el valor publicado por Stassun et al. (2019). La distribución de excentricidades relativamente plana que se observa en la Figura 1, muestra que los posibles valores de e resultaron pobremente delimitados por nuestro ajuste con un intervalo de confianza del 68 % entre $e = 0.1$ y $e = 0.7$, mayor que el obtenido en G22 entre $e = 0.4$ y $e = 0.6$. No obstante, el valor de la mediana $e = 0.4$ obtenido aquí es comparable con la estimación de G22.

La inclinación de la órbita muestra también un rango relativamente amplio de valores posibles, aunque el

*Disponible en: <https://github.com/t-brandt/orvara>

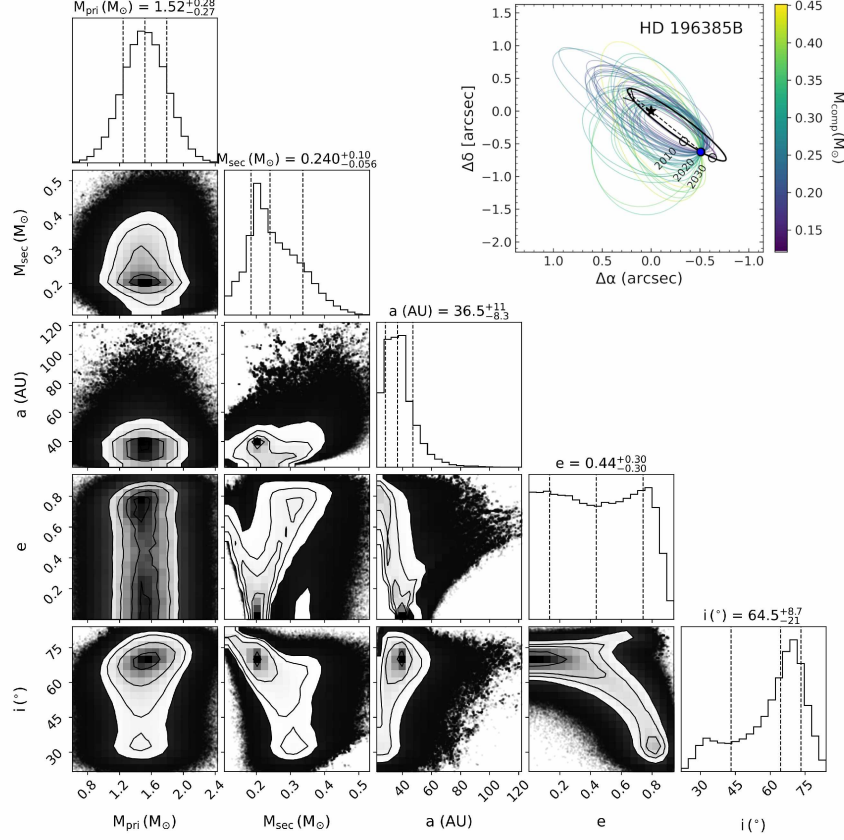


Figura 1: Distribuciones individuales y conjuntas para m_{pri} , m_{sec} , a , e e i . Las líneas verticales de trazos representan las medianas e intervalos de confianza del 68%. El panel superior a la derecha ilustra 50 de las órbitas generadas. La línea continua de color negro representa la órbita más probable mientras que la de trazos corresponde a la línea de los nodos de dicha órbita. La estrella es la posición de la componente primaria. Los círculos vacíos son posiciones para la componente secundaria en los años 2010, 2020 y 2030.

valor de la mediana de 65^{+9}_{-21} , es comparable al estimado por G22. La incorporación de los datos de *Hipparcos* y *Gaia* pareciera favorecer órbitas con inclinaciones por debajo de la media de acuerdo a la distribución de la Figura 1. Para el argumento del periastro el intervalo de confianza del 68% resultó amplio ($50\text{--}244^\circ$) con una mediana de 127° . Por último, Ω también resultó pobremente determinado: $\Omega = 224^{+29}_{-5}$. Este valor es comparable con el obtenido por G22 aunque solo dentro del 95% del rango de confianza.

4. Conclusiones

Si bien las incertezas en este trabajo no representan una mejora respecto de las incertezas en G22, recuperar valores similares a los obtenidos anteriormente incorporando un nuevo conjunto de datos da cierta confianza de que estos valores serían representativos de los reales. Por otro lado, la inclinación de la órbita, el argumento del periastro y la longitud del nodo ascendente resultaron pobremente delimitados por este nuevo ajuste. Este comportamiento también se observa en G22. La razón podría estar en que la cantidad de datos disponibles aún no es suficiente para poner límites

más fuertes sobre estos parámetros. Si consideramos el período de ~ 166 años, las mediciones de VR cubren un $\sim 3\%$ del mismo. Dado el período de este sistema, la obtención de nuevas imágenes se presenta como una de las opciones más inmediatas para establecer restricciones más fuertes a estos ajustes.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer a Timothy Brandt por su sugerencia de incorporar astrometría de *Hipparcos* y *Gaia* y la asistencia para utilizar el código *orvara*.

Referencias

- Borgniet S., et al., 2017, A&A, 599, A57
- Brandt G.M., et al., 2021, AJ, 162, 301
- Brandt T.D., 2021, ApJS, 254, 42
- Franson K., et al., 2022, AJ, 163, 50
- Gaia Collaboration, et al., 2021, A&A, 649, A9
- García L.H., et al., 2022, MNRAS, 515, 4999
- Macintosh B., et al., 2014, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 111, 12661
- Rickman E.L., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2209.12957
- Stassun K.G., et al., 2019, AJ, 158, 138
- Trifonov T., et al., 2020, A&A, 636, A74
- van Leeuwen F., 2007, A&A, 474, 653