



Distribución de masas de algunos sistemas exoplanetarios

A. Terluk¹ & R. Gil-Hutton^{1,2}

¹ Departamento de Geofísica y Astronomía, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNSJ, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Received: 09 February 2024 / Accepted: 18 May 2024

©The Authors 2024

Resumen / Se analizó la distribución de masa de un conjunto de exoplanetas que forman parte de sistemas planetarios que han sido clasificados según su arquitectura. Además, se analizó la distribución de masa de aquellos exoplanetas de la muestra que fueron detectados mediante el método de tránsitos teniendo en cuenta un significativo sesgo observacional, y se determinó que ambas distribuciones pueden describirse mediante una ley de potencia.

Abstract / The mass distribution of a set of exoplanets that are part of planetary systems classified according to their architecture was analyzed. Furthermore, the mass distribution of those exoplanets in the sample that were detected using the transit method, taking into account a significant observational bias, was analyzed, and it was determined that both distributions can be described by a power law.

Keywords / methods: numerical

1. Introducción

El estudio de los sistemas exoplanetarios se fundamenta en dos procesos que además de ser complementarios, se retroalimentan mutuamente: las observaciones de exoplanetas y los modelos de formación y evolución planetaria. Los datos observacionales reportados hasta la fecha permiten llevar a cabo un análisis estadístico de la distribución de exoplanetas sobre sus diferentes propiedades físicas y dinámicas y a su vez estos resultados son útiles para validar los modelos de formación y evolución planetaria, ya que estos deberían ser capaces de reproducir las distribuciones observadas.

Particularmente, conocer la distribución de masas planetarias puede proporcionar información valiosa sobre los diferentes procesos físicos y dinámicos que intervienen en la creación de planetas como procesos de acreción, inestabilidades en el disco e interacciones gravitacionales, entre otros, y por ende nos acercaría a un mejor entendimiento de los procesos de formación y evolución planetaria.

Diferentes autores han estudiado la distribución general de masas para exoplanetas obtenidas de diferentes muestras, determinando que las mismas pueden describirse mediante una ley de potencias. Marcy et al. (2005) analizaron 104 de los 152 exoplanetas detectados hasta ese momento mediante el método de velocidad radial, hasta ese momento, demostrando que la distribución de los exoplanetas seleccionados sobre masa mínima ($m \sin i$) puede aproximarse mediante una ley de potencias $dN(m)/dm \propto m^{-1.0}$. En la misma línea, a partir del estudio de 167 planetas detectados mediante el método de velocidad radial, Butler et al. (2006) demostraron que la distribución de masa mínima puede ser aproximada por una ley de potencias $dN(m)/dm \propto m^{-1.1}$. Para este análisis Butler et al. (2006) utilizaron datos

que no fueron corregidos por ningún efecto de selección.

Cumming et al. (2008) consideraron 182 planetas y aproximaron la distribución de masa con dependencia también del período P , con la forma descrita por $\partial N/(\partial \ln(m) \partial \ln(P)) \propto m^{-0.31} P^{0.26}$ (que puede interpretarse como $dN/dm \propto m^{-1.31}$).

En un estudio reciente, Ananyeva et al. (2020) analizaron la distribución de masa observada de exoplanetas detectados mediante la técnica de tránsito. Los planetas se dividieron en dos grupos, por un lado los descubiertos por Kepler y por otro, los descubiertos mediante observaciones terrestres y CoRoT. Considerando una serie de efectos de selección, determinaron que la distribución de masa para los exoplanetas del grupo Kepler puede aproximarse por $dN/dm \propto m^{-1.90 \pm 0.06}$ mientras que para el grupo restante la distribución puede ser aproximada por $dN/dm \propto m^{-2.12 \pm 0.12}$.

Por otro lado, un trabajo de Mishra et al. (2023) plantea un marco novedoso para estudiar la estructura de un sistema exoplanetario a nivel de sistema. Este marco permite caracterizar, cuantificar y clasificar la arquitectura de un sistema planetario individual en cuatro clases diferentes: Similar, Ordenado, Anti-ordenado y Mixto, en función de la disposición y distribución de varias cantidades planetarias como masa, radio, densidad, entre otras, dentro de un único sistema planetario.

En este trabajo se estudia la distribución de masas de los exoplanetas que forman parte de sistemas multiplanetarios observados y clasificados por Mishra et al. (2023). Se considera esta selección de exoplanetas con el objetivo inicial de cotejar nuestros resultados con los obtenidos en la literatura para diferentes muestras de exoplanetas seleccionados de manera diferente al propuesto por este autor. Además, con la perspectiva a futuro de realizar un análisis más detallado de la distribución de masas de los exoplanetas que forman parte de las cla-

ses “Similar” y “Ordenada” dado que son las clases más numerosas.

En la sección 2 se discutirán los datos disponibles y el ajuste realizado y en la sección 3 se detallan los resultados y las conclusiones.

2. Datos y ajuste

2.1. Distribución de masas de exoplanetas

Mishra et al. (2021) plantean que la disposición de múltiples planetas y la distribución colectiva de sus propiedades físicas alrededor de la estrella anfitriona caracteriza la arquitectura de un sistema planetario. Para respaldar dicho esquema de clasificación, desarrollaron un catálogo de sistemas planetarios observados Mishra et al. (2023). Cada sistema planetario incluido en el catálogo debe cumplir con dos criterios: tener al menos cuatro planetas conocidos y contar con masas determinadas para al menos cuatro de esos planetas. De esta manera, el catálogo de Mishra et al. (2023) incluye a 41 sistemas exoplanetarios con un total de 194 exoplanetas.

En la Fig. 1 se presenta la distribución de masa para este conjunto particular de 194 exoplanetas, los cuales han sido detectados mediante diferentes técnicas y por tanto, para construir dicho histograma no se ha hecho distinción entre masa y masa mínima.

La Fig. 2 muestra la distribución acumulativa de masa en escala logarítmica y su aproximación a una función de ley de potencia. Puede observarse que no toda la distribución sigue una ley de potencia (visualmente tal función sigue una línea recta en ejes logarítmicos) sino que la “linealidad” se cumple para valores de masas contenidos entre $m_{min} = 0.006M_J$ y $m_{max} = 9.106M_J$. Esto puede deberse principalmente a factores de sesgo observacional. Se realiza un ajuste sobre dicha región mediante regresión lineal por mínimos cuadrados para recuperar la pendiente de la recta cuyo valor es la estimación del parámetro de escala α . Por lo tanto, esta distribución se puede aproximar mediante una ley de potencia $d(N \geq m)/d\log(m) \propto m^{-0.48 \pm 0.008}$ ($d(N \geq m)/d(m) \propto m^{-1.48 \pm 0.008}$). La desviación estándar para el valor del exponente también surge de la rutina de ajuste de mínimos cuadrados.

2.2. Distribución de masas de exoplanetas en tránsito

Como se mencionó anteriormente, existen factores relacionados con el modo en que se realiza la observación que pueden distorsionar la forma que obtiene la distribución real de masa. Estos efectos pueden hacer que la distribución observada no sea completamente representativa de la distribución real. Además, tales efectos son diferentes para las diversas técnicas de detección, e incluso dentro de una misma técnica para los diferentes programas de observación.

Uno de los métodos que puede verse afectado es el que detecta exoplanetas mediante tránsitos. El método consiste en el estudio de disminuciones periódicas en la intensidad de la luz de una estrella, causadas por el paso de un planeta entre la estrella y el observador. Es claro,

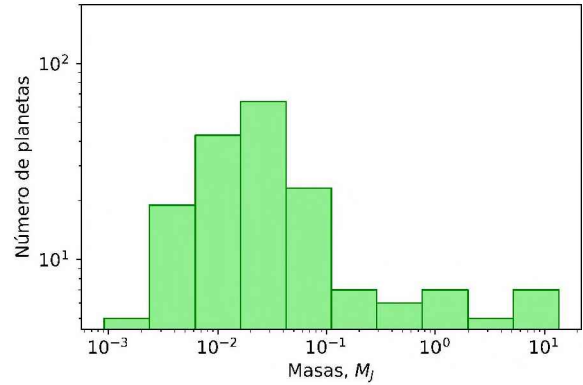


Fig. 1. Distribución de masa de los 194 exoplanetas que conforman los 41 sistemas exoplanetarios clasificados.

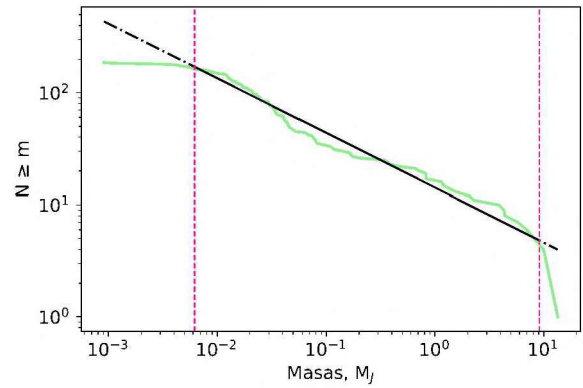


Fig. 2. En verde: distribución acumulativa de masas para los 194 exoplanetas considerados. En negro: ajuste a dicha distribución sobre la región donde la curva sigue una ley potencia $d(N \geq m)/d\log(m) \propto m^{-0.48 \pm 0.008}$. Las rectas verticales en línea de puntos corresponden a los valores m_{min} y m_{max} que delimitan dicha región.

que este método solo identifica aquellos planetas que, desde la perspectiva del observador en la Tierra, pasan frente al disco de su estrella anfitriona. Esto implica que la inclinación del plano orbital i del planeta con respecto a la línea de visión del observador debe ser muy cercana a 90° . Si el plano orbital está demasiado inclinado con respecto a la línea de visión, el planeta no pasará frente a la estrella y no se observará un tránsito.

Debido a que las inclinaciones orbitales están distribuidas aleatoriamente, la mayoría de exoplanetas no son detectados en tránsito. Dada la naturaleza del método existe un fuerte sesgo, favoreciendo la detección de planetas de mayor tamaño y cercanos a la estrella anfitriona. Por este motivo es necesario corregir por este sesgo para obtener una distribución de masas razonable.

Del total de exoplanetas considerados, se seleccionó un total de 92 exoplanetas que han sido detectados por el método de tránsitos y para los que se cuenta con mediciones de masa. La Fig. 3 muestra la distribución de masa correspondiente. Para estudiar dicha distribución y, con la finalidad de recuperar una distribución de masa

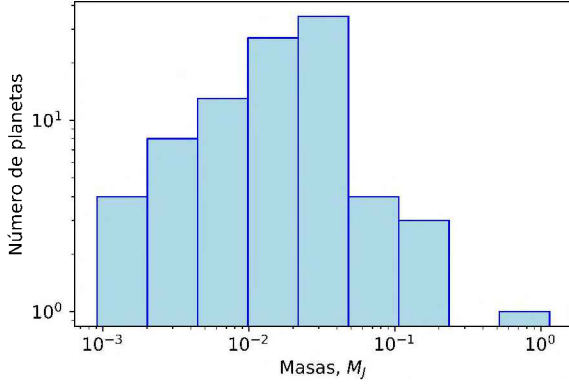


Fig. 3. Distribución de masa de los 92 exoplanetas detectados por el método de tránsitos.

más próxima a la verdadera, se corrige por el sesgo observacional que implica la probabilidad de detectar un tránsito planetario siguiendo las ecuaciones utilizadas en Ananyeva et al. (2020).

Según Winn (2014), la probabilidad geométrica p de una configuración de tránsito es:

$$p = \left(\frac{r_* \pm r}{a} \right) \left(\frac{1 + e \sin w}{1 - e} \right) \quad (1)$$

Siendo r_* y r , el radio de la estrella anfitriona y el radio del planeta respectivamente, a semieje mayor de la órbita del planeta, e excentricidad y w argumento del pericentro.

Si el radio del planeta es mucho más pequeño que el radio estelar ($r \ll r_*$) y la excentricidad es cercana a cero ($e \approx 0$), la ecuación (1) se reduce a:

$$p = r_*/a \quad (2)$$

Siguiendo el planteo propuesto por Ananyeva et al. (2020), a cada planeta en tránsito de la muestra considerada se le asigna un peso estadístico, definido como w_i , que es inversamente proporcional a la probabilidad de una configuración de tránsito: $w_i = 1/p \approx a/r_*$.

La Fig. 4 muestra la distribución de masa acumulativa en escala logarítmica (y su respectivo ajuste) para los exoplanetas en tránsito sin considerar el factor de sesgo observacional, mientras que la Fig. 5 muestra la distribución de masa acumulativa teniendo en cuenta el parámetro w_i . Los resultados obtenidos para las aproximaciones con una función de ley de potencia a la distribución de masas sin tener en cuenta y teniendo en cuenta el parámetro w_i son: $d(N \geq m)/d\log(m) \propto m^{-1.45 \pm 0.04}$ y $d(N \geq m)/d\log(m) \propto m^{-0.79 \pm 0.01}$, respectivamente.

3. Resultados y conclusiones

Estudiar la distribución estadística de las masas de exoplanetas es importante para comprender la variedad planetaria, así como para evaluar y perfeccionar los modelos de formación y evolución planetaria. Las observaciones de esta distribución nos brindan la oportunidad de poner a prueba y mejorar los modelos teóricos existentes, además de comparar sus predicciones con los datos

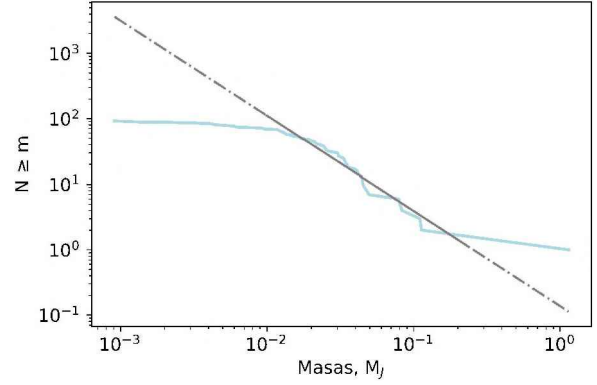


Fig. 4. En celeste: distribución acumulativa de masas para los 92 exoplanetas en tránsito, sin tener en cuenta la probabilidad geométrica de observar un tránsito. En gris: su respectivo ajuste a una ley de potencia $d(N \geq m)/d\log(m) \propto m^{-1.45 \pm 0.04}$.

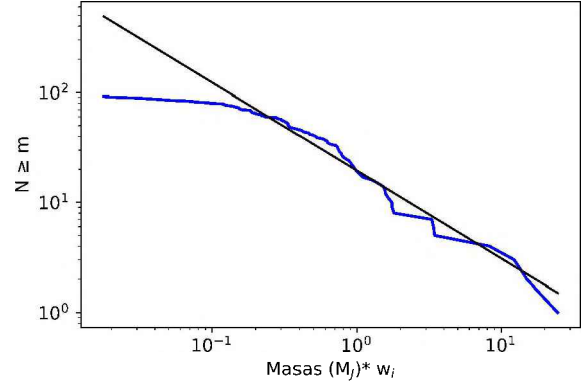


Fig. 5. La curva azul representa la distribución acumulativa de masa para los 92 exoplanetas detectados mediante el método de tránsitos corregida por el coeficiente w_i . En negro: su respectivo ajuste a una ley de potencia $d(N \geq m)/d\log(m) \propto m^{-0.79 \pm 0.01}$.

observados. Este enfoque permite avanzar en la comprensión de los procesos físicos involucrados en la formación y evolución de los planetas.

En este trabajo, se analizó la distribución de masas de un total de 194 exoplanetas obtenidos del catálogo generado por Mishra et al. (2023). Esta muestra representa aproximadamente solo el 3 % de los exoplanetas reportados hasta la fecha. Se determinó que la distribución de masas puede describirse mediante una ley de potencia: $d(N \geq m)/d\log(m) \propto m^{-0.48 \pm 0.008}$ ($d(N \geq m)/dm \propto m^{-1.48 \pm 0.008}$). Para este estudio tanto la distinción entre masa y masa mínima, como factores de selección observacional fueron ignorados.

Además se estudió la distribución de masas de los exoplanetas de la muestra que fueron detectados mediante el método de tránsitos y se corrigió dicha distribución teniendo en cuenta la probabilidad de configuración de un tránsito. Se encontró que esta distribución puede aproximarse también mediante una ley de potencia:

$d(N \geq m)/d\log(m) \propto m^{-0.79 \pm 0.01}$ ($d(N \geq m)/dm \propto m^{-1.79 \pm 0.01}$). Es importante destacar que esta aproximación no logra representar adecuadamente el extremo izquierdo de la distribución. Esto podría atribuirse a las limitaciones en la detección, ya que esta región corresponde a exoplanetas de baja masa, los cuales son más difíciles de detectar y medir con precisión. La fracción de exoplanetas en tránsito con masas medidas, mediante la técnica de velocidad radial, por ejemplo, está limitada por el hecho de que es más fácil medir la masa de planetas gigantes masivos que la de planetas más pequeños.

Como se mencionó anteriormente se espera a futuro realizar un análisis de la distribución de masas sobre las diferentes arquitecturas planetarias, con la finalidad de estudiar si estos resultados podrían sugerir ciertos mecanismos de formación predominantes y explorar como estas distribuciones se relacionan con otras característi-

cas físicas y dinámicas del sistema planetario.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo financiero de CONICET a través del PIP 112-202001-01227 y de la Universidad Nacional de San Juan mediante un subsidio de CICITCA para el período 2023-2024

Referencias

- Ananyeva V.I., et al., 2020, *Icarus*, 346, 113773
 Butler R.P., et al., 2006, *ApJ*, 646, 505
 Cumming A., et al., 2008, *PASP*, 120, 531
 Marcy G., et al., 2005, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 158, 24
 Mishra L., et al., 2021, *A&A*, 656, A74
 Mishra L., et al., 2023, *A&A*, 670, A68
 Winn J.N., 2014, *Transits and occultations*