

Caracterización de la alta atmósfera de exoplanetas que sufren escape atmosférico hidrodinámico

Autor: Manuel Lampón González-Albo (mlampon@iaa.es)

Tesis doctoral dirigida por: Manuel López Puertas

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) / Universidad de Granada

Fecha de lectura: 24 de marzo de 2021

Se estima que un gran número de planetas sufre escape atmosférico hidrodinámico en alguna etapa de su vida. Los planetas que se encuentran en esta etapa de gran expansión atmosférica pueden experimentar un gran cambio en su masa, en su radio, en su composición atmosférica e incluso pueden evolucionar a una clase planetaria diferente. Por lo tanto, este mecanismo juega un papel crucial en la formación y evolución de los planetas, así como en el origen de la diversidad planetaria observada.

La falta de observaciones en planetas que están sufriendo escape hidrodinámico dificulta seriamente su caracterización atmosférica y limita la comprensión de este proceso. Una de las principales deficiencias en el conocimiento de este tipo de escape es la falta de confirmación de los tres regímenes hidrodinámicos que han sido identificados de forma teórica: limitado por la energía, limitado por recombinación y limitado por el número de fotones (en inglés, *energy-limited*, *recombination-limited* y *photon-limited*), ya que actualmente no se ha obtenido ninguna prueba observacional de su existencia. Sin embargo, recientemente se han tomado medidas de alta resolución de las líneas de absorción del triplete de He I a 10830 Å en planetas intensamente irradiados por su estrella, por lo que se abre una nueva ventana para el estudio del escape atmosférico.

La finalidad de esta tesis es contribuir al conocimiento en el ámbito de las ciencias planetarias a través del estudio de la alta atmósfera de planetas gigantes que sufren escape atmosférico hidrodinámico. Nuestros objetivos son 1) mejorar la caracterización de la alta atmósfera de una muestra de exoplanetas que están experimentando escape hidrodinámico. Esta muestra está compuesta por los exoplanetas tipo Júpiter caliente HD209458b y HD189733b, y por el exoplaneta tipo Neptuno caliente GJ3470b; 2) realizar un análisis comparativo entre estos exoplanetas con el fin de comprender mejor el proceso de escape hidrodinámico; y 3) investigar su régimen hidrodinámico. Para alcanzar los objetivos de la tesis, hemos participado en el proyecto CARMENES He I, una colaboración dentro del Consorcio de CARMENES para observar el He I en atmósferas exoplanetarias mediante el espectrógrafo de alta resolución CARMENES. Como parte del grupo de trabajo dedicado al estudio de atmósferas, hemos sido de los primeros a nivel mundial en obtener este tipo de medidas. Para analizar estas observaciones, hemos desarrollado un modelo hidrodinámico 1D con simetría esférica para describir la alta atmósfera de los exoplanetas, y lo hemos acoplado a un modelo termodinámico de desequilibrio para el cálculo de la población del He triplete. Además, hemos realizado un modelo de transferencia radiativa de alta resolución para calcular el espectro sintético de las líneas del triplete de He y analizar el espectro de absorción medido. De este análisis extraemos información de parámetros atmosféricos tales como la tasa de pérdida de masa, la temperatura de la termosfera y el perfil de densidad del triplete de He. Para romper la degeneración existente entre algunos de

estos parámetros, hemos utilizado observaciones previamente publicadas de la línea Lyman-alpha de estos exoplanetas.

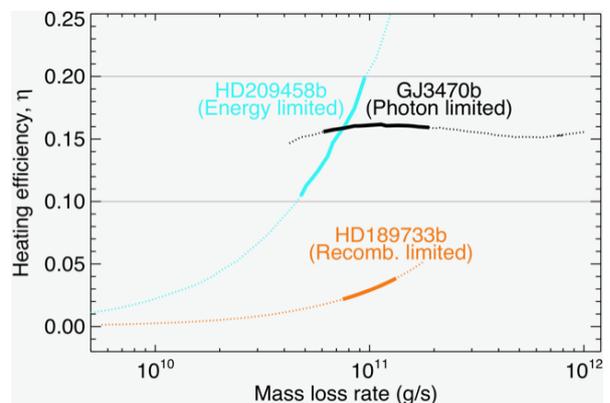
Entre los resultados obtenidos, encontramos que la alta atmósfera de HD189733b es caliente y compacta, tiene una temperatura máxima de 12100-12800 K y una composición determinada por la proporción H/He = $(99,2/0,8) \pm 0,1$, se escapa con una velocidad baja, está altamente ionizada y sufre una tasa de pérdida de masa de $(0,98-1,15) \times 10^{11} \text{ g s}^{-1}$. Por el contrario, la alta atmósfera de GJ3470b está muy extendida, es relativamente fría, con una temperatura máxima de $5100 \pm 900 \text{ K}$, tiene un H/He = $(98,5/1,5) \pm 1,5$, se expande a velocidad muy alta, está moderadamente ionizada y pierde masa a un ritmo de $(1,87 \pm 1,13) \times 10^{11} \text{ g s}^{-1}$. La alta atmósfera de HD209458b parece un caso intermedio entre las de HD189733b y GJ3470b, ya que está moderadamente extendida, tiene una temperatura máxima de $7625 \pm 500 \text{ K}$; tiene un H/He = 98/2; escapa a una velocidad moderada y pierde masa a un ritmo de $(0,71 \pm 0,29) \times 10^{11} \text{ g s}^{-1}$.

Atendiendo a los perfiles de densidad del H, encontramos que mientras la recombinación es el proceso que gobierna en toda la atmósfera de HD189733b, la advección domina completamente en la de GJ3470b, no siendo ninguno de estos procesos despreciable en la alta atmósfera de HD209458b. Aparte de obtener buenas estimaciones de los principales parámetros atmosféricos de estos exoplanetas, hemos podido confirmar que GJ3470b sufre escape hidrodinámico.

Además, hemos proporcionado la primera estimación observacional de la proporción de H/He en un exoplaneta. Nuestras estimaciones de H/He en los tres exoplanetas sugieren que la alta atmósfera de planetas gigantes que sufren escape hidrodinámico tienden a tener una masa molecular media muy baja (H/He mayor que 97/3).

Por otro lado, presentamos pruebas observacionales de los diferentes regímenes hidrodinámicos en atmósferas ricas en hidrógeno. En concreto, mostramos que HD209458b se encuentra en el régimen limitado por la energía, HD189733b en el régimen limitado por la recombinación y GJ3470b en el limitado por el número de fotones. De acuerdo con estos resultados, proponemos estos exoplanetas como arquetipos para sus respectivos regímenes. Concluimos que este trabajo mejora significativamente la caracterización de la alta atmósfera de los exoplanetas que componen nuestra muestra, al igual que mejora nuestro conocimiento sobre el proceso de escape atmosférico hidrodinámico.

Tesis disponible en: https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/iaa_2021_tesis_m_lampon.pdf



Eficiencia de calentamiento de la alta atmósfera del planeta respecto a su tasa de pérdida de masa. Esta relación muestra la eficiencia con la que se genera el escape atmosférico del planeta a partir del flujo estelar incidente y revela a su vez el régimen hidrodinámico en el que se encuentra cada uno de los exoplanetas estudiados.