

## Acerca del origen de la contaminación por metales en las atmósferas de enanas blancas

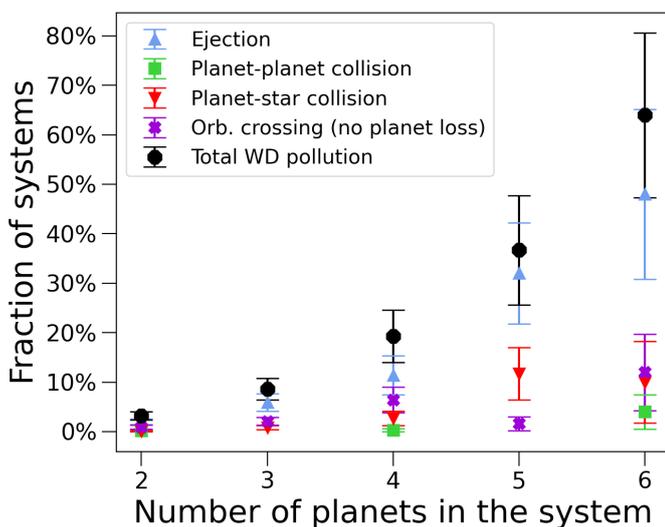
Autor: Raúl Felipe Maldonado Sánchez  
 Tesis doctoral dirigida por: Miguel Chávez, Eva Villaver y Emanuele Bertone  
 Centro: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica  
 Fecha de lectura: 9 de diciembre de 2020

Esta tesis tiene el objetivo de entender el origen de la contaminación atmosférica por metales observada en el 25-50% de enanas blancas. Debido a que diversas evidencias observacionales respaldan la acreción de cuerpos rocosos como el mecanismo más aceptado para explicar este fenómeno y sabiendo que la evolución estelar naturalmente previene la existencia de material a pocos radios solares de la enana blanca, el paradigma actual involucra a los planetas que sobreviven la evolución de la estrella central y los cuerpos dispersados a órbitas cercanas de la enana blanca como los responsables de producir la contaminación atmosférica en la enana blanca. Tomando en cuenta la hipótesis de que los planetas sobreviven las diferentes etapas evolutivas de su estrella central orbitando a distancias lejanas y que la interacción dinámica entre ellos produce procesos de dispersión planeta-planeta que mandan cuerpos a las proximidades de la enana blanca, en donde las fuerzas de marea de la estrella pueden destrozarlos y así aumentar la probabilidad de que los escombros caigan a la atmósfera estelar, en esta tesis se simulan 5830 sistemas planetarios con dos y más planetas, cuyas arquitecturas orbitales se basan en los cientos de sistemas planetarios de múltiples planetas detectados orbitando estrellas de secuencia principal, escalados de una forma que su dinámica original se mantiene. Con este procedimiento restringimos y al mismo tiempo expandimos el espacio de parámetros físico y orbital de las configuraciones planetarias respecto a trabajos previos en la misma línea de investigación. Esta es la primera vez que se realizan simulaciones dinámicas restringidas por parámetros derivados de los sistemas observados. Las simulaciones dinámicas se han realizado mediante el uso de una versión actualizada del paquete de N-cuerpos MERCURY, que toma en cuenta los cambios de masa y radio de la estrella central en las diferentes etapas de la evolución estelar. Cada

sistema se ha simulado desde la secuencia principal hasta la fase de enana blanca por 10 Gyr.

Como resultado principal, hemos encontrado que el 3,2% y 8,6% de simulaciones dinámicamente activas (con pérdidas de planetas, cruce de órbitas y/o dispersión orbital) en la fase de enana blanca con dos y tres planetas, respectivamente, no pueden reproducir el 25-50% de enanas blancas contaminadas por metales. Sin embargo, la fracción de sistemas inestables con cuatro, cinco y seis planetas (19,2%, 36,7% y 64%, respectivamente) sí reproduce la prevalencia observada de enanas blancas contaminadas. Por lo tanto, a mayor multiplicidad planetaria, mayor es la probabilidad de tener una inestabilidad dinámica capaz de lanzar planetas o planetesimales a distancias de pocos radios solares de la enana blanca (ver figura). También encontramos que sistemas con alta multiplicidad de planetas producen eventos de dispersión planeta-planeta que lanzan un número no despreciable de planetas (en el rango de masas de súpertierra a Saturno) a distancias  $\leq 10$  radios Roche o incluso cruzan el radio de Roche de la enana blanca hasta que algunos de ellos colisionan con la superficie estelar. La alta multiplicidad de planetas explica naturalmente la existencia de planetas con órbitas muy cercanas a la enana blanca, como el planeta joviano recientemente descubierto WD 1856 b, que tiene una órbita de 1,4 días, sin la necesidad de invocar mecanismos adicionales, tales como el von Zeipel-Lidov-Kozai o la fase de envoltorio común. Entre otros resultados, tenemos que las inestabilidades dinámicas, tales como pérdidas planetarias o cruce de órbitas en los sistemas con múltiples planetas, ocurren en mayor número durante el primer Gyr del tiempo de enfriamiento de la enana blanca, y este número decrece a medida que la enana blanca envejece. Además, encontramos que simulaciones teniendo al menos un planeta gigante ( $M > 100 M_{\oplus}$ ) tienden a desestabilizarse más rápido que las simulaciones con planetas más pequeños ( $M \leq 100 M_{\oplus}$ ), las cuales presentan inestabilidades dinámicas en escalas de Gyr. Finalmente, obtenemos que la mayoría de las simulaciones inestables en la fase de enana blanca pierden planetas mediante eyecciones planetarias. Sin embargo, en sistemas con alta multiplicidad planetaria, los planetas remanentes en el sistema permanecen dinámicamente activos, aún después de la eyección planetaria, produciendo múltiples cruces de órbitas y dispersión orbital, eventos dinámicos capaces de desestabilizar cuerpos menores como planetesimales presentes en el sistema.

Los resultados derivados de esta tesis han sido publicados en tres artículos arbitrados (Maldonado et al., 2020a, MNRAS, 497, 4091; Maldonado et al., 2020b, MNRAS, 499, 1854; Maldonado et al., 2021, MNRAS, 501, L43).



Número relativo de sistemas con múltiples planetas con respecto al número total de simulaciones que pierden planetas por inestabilidades dinámicas así como simulaciones con cruce de órbitas que no pierden ningún planeta durante 10 Gyr. Además, presentamos el número total de simulaciones que pueden contribuir a la contaminación de enanas blancas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar del método de resampling Bootstrap. Cada tipo de inestabilidad es marcada con diferente símbolo y color (Maldonado et al. 2021).