



EVA VILLAVER

EL FUTURO DEL SISTEMA SOLAR

CUANDO EL SOL AGOTE SU COMBUSTIBLE NUCLEAR SUFRIRÁ CAMBIOS ESTRUCTURALES QUE TENDRÁN UNA PROFUNDA INFLUENCIA EN LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR. ALGUNOS PLANETAS SERÁN ENGULLIDOS, OTROS EVAPORADOS Y LAS ÓRBITAS DE LOS QUE SOBREVIVAN SE VERÁN MODIFICADAS. EN ESTE ARTICULO SE HACE UN REPASO DE LO QUE SERÁ EL FUTURO DE NUESTRO SISTEMA PLANETARIO.

En los últimos años hemos explorado los confines del Sistema Solar y tenemos la certeza, por primera vez en la historia de la humanidad, de la existencia de planetas orbitando otras estrellas. Hemos aterrizado en la superficie de un cometa y detectado las huellas químicas de asteroides desintegrándose en la superficie de enanas blancas. Podemos deducir la composición química y características de soles distantes y predecir su evolución. El reto continúa en intentar determinar cómo fue el pasado de nuestro planeta, y las condiciones que dieron origen a la vida. Aquí expon-



Impresión artística de un sistema planetario con un disco doble y asteroides. (NASA/JPL-Caltech)

dremos algunas de las claves que se pueden extraer de las predicciones de futuro para la vida y nuestro planeta cuando el Sol agote su combustible nuclear.

LA VIDA DE UNA ESTRELLA: UNA BATALLA CONTRA EL COLAPSO

Hacer una analogía entre la vida de las estrellas y la de los seres humanos es sencillo, desde la perspectiva de que las limitadas estrellas también nacen, viven y mueren.

Pero mientras que no podemos predecir cómo será la vida de un ser humano debido a los múlti-



Artículo exclusivo colaboración de la Sociedad Española de Astronomía

ples parámetros que entran en juego, sí podemos hacerlo y con muy poca información (su masa al nacer) en el caso de las estrellas.

La masa de una estrella es su huella de identidad característica. Cuando una estrella nace lo hace con una cantidad de combustible y de su capacidad para procesarlo depende que pueda mantener un equilibrio delicado con la fuerza de

la gravedad. Así, en el Sol, la energía liberada en su núcleo como consecuencia de la transformación de hidrógeno en helio por fusión nuclear impide el colapso gravitatorio de esa enorme bola de material donde cabe más de trescientas mil veces la masa de nuestro planeta.

Debido a la conversión continua de materia en energía por reacciones nucleares nuestra estrella pierde masa a un ritmo de unos cuatro millones de toneladas por segundo. También emite un viento en su superficie que en esta etapa es muy tenue, pero que libera partículas, electrones, protones e incluso núcleos de helio, a un ritmo de 1,5 millones de toneladas por segundo. En los 4500 millones de años de la vida del Sol ha perdido una cantidad de masa equivalente a cinco Tierras.

La evolución de una estrella no es otra cosa que una batalla constante contra la fuerza de gravedad. Mientras exista una fuente de energía estable la estrella se encuentra en equilibrio, pero cuando se agota el combustible la estrella ha de buscar una nueva fuente para impedir el colapso. La continua conversión de materia en energía que tiene lugar en el núcleo de la estrella tiene sus consecuencias. Se estima que en poco más de 4000 millones de años se agotará el combustible de hidrógeno y cuando lo haga la estrella tendrá que reajustarse a un nuevo estado de equilibrio. En una primera fase lo hará expandiendo su envoltura externa y quemando hidrógeno fuera del núcleo. Habrá nacido una gigante roja.

En la fase de gigante roja la envoltura estelar se hace enorme y muy turbulenta, mientras que su núcleo se contrae. La contracción del núcleo permite que la estrella alcance temperaturas suficientes para quemar el siguiente combustible nuclear: el helio. Y la estrella de nuevo experimenta una fase de equilibrio estable mientras se está produciendo la transformación de helio en núcleos de carbono y oxígeno en el núcleo. Pero no por mucho tiempo.

Estrellas que nacen con masas similares al Sol no pueden detener el colapso del núcleo generando energía con la transformación de otros elementos químicos más pesados que el helio. Se puede decir que tras la quema del helio estamos ante el principio del fin.

La estrella vuelve a transformarse en gigante. El núcleo se contrae de nuevo pero en este caso el colapso lo detiene un estado de la materia ca-

paz de generar presión: un gas de electrones degenerados. Pero más interesante que el núcleo es el comportamiento de la envoltura ya que estamos ante una estrella muy fría y altamente inestable que es capaz de formar moléculas complejas y material sólido y que está perdiendo material a un ritmo muy elevado (la estrella R Sculptoris se encuentra en esa etapa). Una estrella en esta fase tiene un viento mil millones de veces más elevado que el Sol en la actualidad, llegando a perder el equivalente a la masa del planeta Júpiter en diez años (o unas treinta veces la masa de la Tierra en un año). En pocos millones de años a ese ritmo lo único que quedará de la estrella será un núcleo muy caliente.

Cuando la radiación de este núcleo ioniza el material que ha sido previamente eyectado, este brilla y tenemos lo que conocemos como nebulosa planetaria.

El núcleo desprovisto de nuevas fuentes de energía se irá enfriando paulatinamente. Nos encontraremos entonces ante una de las formas de materia más densas conocidas (solo superada por las estrellas de neutrones o los agujeros negros), una enana blanca.

SISTEMAS PLANETARIOS: ¿SOBREVIVIRÁ NUESTRO PLANETA LA EVOLUCIÓN DEL SOL?

Aunque la incertidumbre sobre el futuro del Sistema Solar planea sobre nuestras cabezas desde que sabemos que la fuente de energía en el interior del Sol tiene una vida limitada, la cuestión ha resurgido con fuerza en los últimos años. Hemos ampliado la perspectiva y levantado la mirada más allá de lo puramente antropocéntrico. Por supuesto que nos interesa el destino que le depara a la roca cubierta de agua líquida en la que habitamos, pero el estudio de sistemas planetarios alrededor de estrellas evolucionadas nos proporciona acceso directo además a otros procesos. Estudiando planetas que orbitan futuros soles podemos obtener información muy valiosa acerca de la formación de planetas y la composición química de las rocas que los forman.

En el proceso de formación planetaria entran en juego muchas variables (la masa de la estrella y su composición química son de los más importantes), por ello la necesidad de observar planetas alrededor de un gran número de estrellas. Podría pensarse que con miles de planetas confirmados hasta

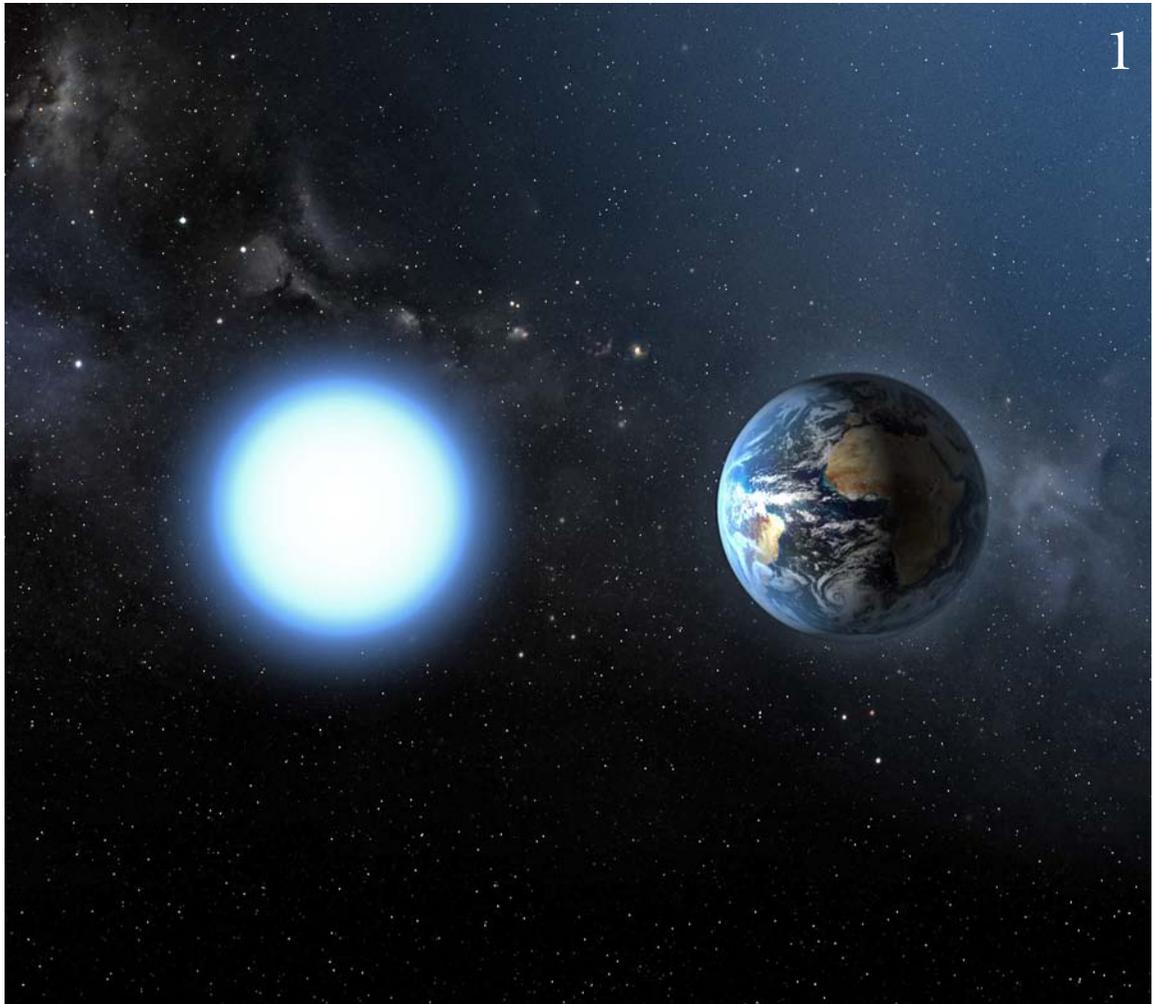


FIGURA 1. Una enana blanca es un objeto muy denso del tamaño del planeta Tierra. Un planeta orbitando una enana blanca tendría que hacerlo muy cerca de la estrella para estar en la zona habitable donde existe la posibilidad de agua líquida en su superficie. (NASA/S. Charbinet). **FIGURA 2.** La estrella R Sculptoris, una estrella gigante recientemente observada con el *Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array* (ALMA) muestra una estructura espiral generada por el denso viento estelar emitido por la estrella. (ALMA -ESO/NAOJ/NRAO-). **FIGURA 3.** Representación artística de una estrella ingiriendo un planeta. (Vanderbilt University)





la fecha estamos en una buena posición para entender cómo las partículas sólidas coagulan en forma de rocas para dar lugar a los planetesimales que por colisión formen cuerpos más grandes en los discos protoplanetarios. Y así es en gran medida, aunque todavía quedan muchos interrogantes por despejar.

De las observaciones hasta la fecha se deduce que el contenido en metales pesados de la nube donde se formó la estrella favorece la formación de planetas como Júpiter y no parece tener influencia en la formación de planetas más pequeños como la Tierra. Pero la influencia de la masa de la estrella en la formación de planetas ha sido, hasta la fecha, más difícil de dilucidar porque la mayor parte de los planetas detectados orbitan alrededor de estrellas con masas similares a la del Sol. Solo cuando la estrella evoluciona a gigante roja los métodos de detección basados en la velocidad radial vuelven a tener la sensibilidad para detectar planetas alrededor de estrellas masivas. Son esas estrellas, en general más viejas que el Sol, las que proporcionan las claves de procesos importantes en la formación planetaria y de la posible evolución de nuestra estrella y el Sistema Solar en su conjunto.

Centrémonos en el Sol. A medida que la composición química de su núcleo se vaya modificando experimentará un aumento de la cantidad de energía que emite. Este proceso viene ocurriendo desde su nacimiento hace 4500 millones de años

FIGURA 4. La imagen representa cómo sería el cielo nocturno visto desde la Tierra dentro de 3750 millones de años a medida que la galaxia de Andrómeda se aproxima a su trayectoria de colisión con nuestra Galaxia. (NASA, ESA, Z. Levay y R. van der Marel, STScI, T. Hallas y A. Mellinger)

FIGURA 5. NGC 7392, también conocida como la nebulosa de la Hélice, es una de las nebulosas planetarias más cercanas a la Tierra. Para tener una idea de la escala, todo el Sistema Solar no sería visible en el centro de la imagen. (NASA/JPL-Caltech)

y ha provocado que la cantidad de energía que el Sol emitía al nacer fuese un 30 % menor que la actual. Obviamente, una de las preguntas fundamentales que cabe hacerse es cómo reaccionará nuestra frágil atmósfera a un aumento sostenido de la luminosidad del Sol en los próximos miles de millones de años.

La temperatura promedio de la Tierra se ha venido manteniendo constante a pesar de que el Sol en su infancia era una estrella más fría. El mecanismo que ha venido operando, el efecto invernadero, y los varios mecanismos complejos de retroalimentación disponibles no serán suficientes para soportar el aumento de la energía irradiada por el Sol en el futuro. A medida que el núcleo del Sol se vaya transformando en helio aumentará progresivamente la temperatura en la superficie de la Tierra, se evaporarán los océanos y probablemente desaparecerá la posibilidad de vida en superficie de nuestro planeta que se verá transformado en una roca caliente y desnuda. Y esto es so-



lo es el principio del ocaso de nuestro Sistema Solar y de su estrella.

La transformación del Sol en gigante roja viene asociada con un aumento de su tamaño. De tal modo que el planeta más interior del Sistema Solar, Mercurio, no tendrá posibilidades de escapar de su destino de ser literalmente engullido por un Sol gigante. Lo mismo ocurrirá con Venus.

La suerte del resto de planetas interiores, la Tierra y Marte, no es tan obvia de determinar pues depende fundamentalmente del equilibrio entre dos fuerzas: las fuerzas de marea y el cambio de órbita asociado al viento estelar. Las fuerzas de marea en estrellas gigantes rojas que rotan muy despacio tienen la tendencia a mover la órbita del planeta a posiciones más cercanas a la superficie de la estrella. Mientras que el viento de la estrella, que irá aumentando en intensidad con la evolución, provoca que a medida que el Sol, o cualquier estrella, reduce su masa, todo objeto en órbita se tiende a alejar de la superficie de la estrella por conservación del momento angular. Es este equilibrio delicado entre dos fuerzas, una que tiende a acercar la órbita del planeta y la otra que tiende a alejarlo, lo que en definitiva determinará que la Tierra y Marte terminen, probablemente, siendo engullidos por el Sol. Y todo ello a pesar de que el radio de la estrella nunca llegue hasta la órbita de estos planetas. Y decimos probablemente porque estas dos fuerzas dependen de parámetros que hasta la fecha llevan asociadas

grandes incertidumbres y que son muy difíciles de calcular con precisión.

Los planetas exteriores del Sistema Solar solo experimentarán en este caso el efecto de la disminución de la masa de la estrella y, por tanto, su órbita se alejará una pequeña cantidad hasta que la estrella encienda el siguiente combustible nuclear: el helio. Se han encontrado ya decenas de planetas orbitando estrellas en la fase de gigante roja. Su estudio permite no solo extender la diversidad de planetas extrasolares conocidos sino también poner fuertes restricciones a los parámetros de esas fuerzas de marea y del viento estelar.

Es fácil intuir que cualquier planeta que penetre en la envoltura estelar es destruido. Si no se evapora debido a las altas temperaturas llegará rápidamente al núcleo donde se fusionará completamente. Solo se espera que planetas muy grandes, objetos conocidos como enanas marrones, sobrevivan a este proceso tras desestabilizar las capas externas y provocar literalmente la rotura de la estrella. Se piensa que algunos sistemas planetarios descubiertos alrededor de estrellas que han evolucionado más allá de la fase de gigante roja han sufrido este destino: el sistema planetario descubierta en V391 Pegasi es un ejemplo.

La siguiente etapa de gigante tiene efectos todavía más drásticos que la primera sobre los sistemas planetarios. Ya que las estrellas pierden la mayor parte de su masa en esta etapa, el efecto sobre el aumento de la órbita planetaria es más radical. Es de esperar que Júpiter se mueva más allá de la órbita de Saturno, que este lo haga más allá de la órbita de Urano, Urano más allá de Neptuno y que Neptuno tenga una órbita similar a los asteroides del cinturón de Kuiper. Todo ello asumiendo que el sistema de planetas múltiples no se desestabilice dinámicamente y que los planetas que han sobrevivido a ser tragados por la envoltura experimenten una especie de partida de billar de resultados difícilmente predecibles.

Simulaciones numéricas muestran que la probabilidad de que esto ocurra no es en absoluto despreciable con planetas que pueden ser lanzados a la superficie de la estrella, planetas que pueden chocar con otros y formar otro más grande o planetas que pueden ser eyectados fuera del Sistema Solar para convertirse en objetos flotando aislados en la Galaxia. Este proceso de desestabilización planetaria es similar al que puede ocurrir cuando

nuestra Galaxia colisione con la galaxia de Andrómeda. La colisión entre las dos mayores galaxias del Grupo Local tendrá lugar en 4000 millones de años y no se espera que destruya el Sol pero sí que lo lance junto con todo el Sistema Solar a otra órbita más alejada del centro de la Galaxia.

Pero todavía nuestra estrella no va a dejar tranquilo a lo que quede del Sistema Solar, ya que tras la segunda fase de gigante la estrella se transforma en nebulosa planetaria. Llegados a este punto, no tenemos que preocuparnos por modificaciones de la órbita debidas al cambio de propiedades de la estrella (solo existe la posibilidad de inestabilidades causadas por sistemas múltiples).

Aunque todo planeta que haya sobrevivido hasta esta fase mantendrá una órbita estable alejada de su órbita inicial, todavía no estará a salvo. La estrella central de la nebulosa planetaria es muy caliente, de hecho son de las estrellas más calientes del universo pudiendo alcanzar temperaturas de 300 000 grados y como tal será capaz de evaporar todo planeta gaseoso que se encuentre en su proximidad.

Hasta la fecha no se han detectado directamente planetas orbitando estrellas tan evolucionadas como las que han generado nebulosas planetarias, sin embargo, en la nebulosa de la Hélice se ha observado un disco de material que podría interpretarse como el remanente evolucionado de un cinturón de asteroides. Lo que no deja de ser una evidencia indirecta de la existencia de sistemas planetarios, o de su supervivencia en etapas muy tardías. Lo mismo ocurre con las enanas blancas.

Existen un gran número de evidencias observacionales que apuntan a la existencia de sistemas planetarios orbitando enanas blancas. No hay ninguna detección directa de planetas alrededor de este tipo de estrellas pero sí lo hay de material de composición planetaria que ha sido lanzado recientemente a la superficie de la enana blanca y de discos de material gaseoso rodeando la estrella. Para provocar ambos fenómenos es necesaria la presencia de planetas en órbitas alejadas que lancen el material a la superficie de la estrella. La composición química de este material es similar al de los meteoritos del Sistema Solar.

¿PODRÍA TENER LA VIDA UNA SEGUNDA OPORTUNIDAD?

Cuando todavía no nos hemos librado del fantasma de una guerra nuclear a escala global nos enfrentamos a un calentamiento global del planeta

inducido por la acción del hombre. Por ello se hace difícil plantearse una evolución de la atmósfera de nuestro planeta, o de las condiciones de la vida en superficie, que sobreviva la acción humana a largo plazo. Sin embargo, es sencillo hacer el ejercicio de determinar bajo qué circunstancias la evolución de las estrellas permitirá la existencia de agua líquida en superficie durante el tiempo suficiente para que la vida tal y como la conocemos pueda tener una segunda oportunidad. Para este ejercicio deberemos mirar fundamentalmente dos parámetros: las escalas de tiempo estables en la vida de la estrella y la posibilidad de tener planetas a la distancia adecuada para que haya agua líquida en superficie.

La evolución de la estrella en las etapas descritas anteriormente es relativamente rápida si la comparamos con el tiempo requerido para que la vida evolucione (asumiendo que tarda lo mismo que la primera que se desarrolló en la Tierra).

Solo la fase de enana blanca sería lo suficientemente larga y estable para que se den las condiciones favorables para que la vida tenga una segunda oportunidad. Además, el planeta en esta etapa tendría que estar muy cerca de la estrella para tener la temperatura adecuada en superficie. Para llevar un planeta a una órbita cerca de una enana blanca necesitaríamos involucrar mecanismos como evolución en un sistema binario o inestabilidades planetarias, que por otro lado son necesarios para explicar la acreción de meteoritos observados en estas estrellas. Por tanto, una segunda oportunidad para la vida no queda del todo descartada a pesar del futuro poco prometedor que nos espera en este planeta. Es más, siendo optimistas podemos pensar que si la vida contra todo pronóstico ha surgido en la superficie del planeta una vez, quizá pueda sobrevivir en forma de microorganismos en un futuro. Esos microorganismos serían transportados de planeta en planeta (o a sus lunas) hasta que en un futuro se vuelvan a dar las condiciones necesarias para el desarrollo de la complejidad. (A)



Eva Villaver, departamento de Física Teórica, Universidad Autónoma de Madrid.