

Otros Mundos

-Spitzer, Kepler, HARPS, HST, JWST-

Julio Solís García



Revista Digital de ACTA

2025

Publicación patrocinada por



ACTA representa en CEDRO los intereses de los autores científico-técnicos y académicos. Ser socio de ACTA es gratuito.

Solicite su adhesión en acta@acta.es

Otros Mundos -Spitzer, Kepler, HARPS, HST, JWST-

© 2025, Julio Solís García

© 2025,  ACTA

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Se autorizan los enlaces a este artículo.

ACTA no se hace responsable de las opiniones personales reflejadas en este artículo.

SITUACIÓN ACTUAL EN EL ESTUDIO DE LOS EXOPLANETAS

"Si el conocimiento puede crear problemas, no es con la ignorancia con la que podamos resolverlos"
Isaac Asimov (1920-1992), profesor de bioquímica, divulgador científico y escritor de ciencia ficción.

De acuerdo con la definición acordada por la Unión Astronómica internacional, un planeta es un cuerpo celeste que está en órbita alrededor de una estrella, que tiene masa suficiente para que su gravedad le haya permitido adoptar una forma aproximadamente esférica, y que haya limpia- do su vecindario de objetos más pequeños, es decir que no comparta su órbita con otros objetos de tamaño similar.

Una vez que los planetas se forman en discos protoplanetarios que rodean a las estrellas, no van a permanecer siempre en el mismo lugar, y es imposible saber qué aspecto tendrá un sistema planetario una vez maduro sólo con observar los planetas en estado embrionario. El gas del disco es absorbido por los planetas más grandes, aunque una parte se disipa en el espacio, y a medida que los planetas crecen y acumulan masa, se mueven e interactúan con otros planetas del disco. Los planetas recién formados pueden orbitar en trayectorias de colisión entre sí, ya que la ausen- cia de gas facilita el movimiento alrededor de la estrella.

Los planetas más grandes pueden empujar a los más pequeños hacia la estrella o incluso sacarlos del sistema estelar. Ésta es una de las posibles explicaciones de la existencia de los «planetas errantes» o planetas que no orbitan alrededor de las estrellas y que vagan a través del espacio interestelar de la galaxia.

Las nubes de gas y polvo alrededor de las estrellas se convierten en guijarros, que van creciendo, chocando y rompiéndose de nuevo en un proceso que va dando lugar a cuerpos mayores como asteroides, cometas y planetas. La presencia del gas ayuda a las partículas de material sólido a mantenerse unidas. Algunas se rompen, pero otras resisten, y estos son los componentes básicos de los planetas que se denominan "planetesimales". El polvo que rodea a una estrella es funda- mental para la formación de objetos celestes a su alrededor, y contiene elementos como el car- bono, el hierro y otros muchos que contribuyen a la formación de sistemas planetarios.

Cuando una estrella se encuentra en una fase de desarrollo temprana en el disco protoplanetario, también conocida como "fase T Tauri", está expulsando vientos extremadamente calientes domi- nados por partículas cargadas positivamente, llamadas protones, y átomos neutros de helio. Aunque gran parte del material del disco sigue cayendo sobre la estrella, pequeños grupos de partículas de polvo "afortunadas" chocan entre sí, aglutinándose en objetos más grandes que da- rán lugar a los planetesimales.

Allí donde el disco es más frío, lo suficientemente lejos de la estrella como para que el agua pue- da congelarse, diminutos fragmentos de hielo se unen al polvo, dando lugar a sucias bolas de nieve que pueden acumularse en gigantescos núcleos planetarios. Estas regiones más frías tam- bién permiten que las moléculas de gas se ralenticen lo suficiente como para ser atraídas hacia cuerpos planetarios. Así es como se cree que se formaron Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, los gigantes gaseosos de nuestro Sistema Solar, formándose en primer lugar, y rápidamente en los primeros 10 millones de años Júpiter y Saturno.

En las partes más calientes del disco, más cerca de la estrella, comienzan a formarse planetas rocosos (terrestres), a los que ya no les queda mucho gas para acumular, una vez formados los gigantes helados.

Los planetas rocosos como Mercurio, Venus, la Tierra y Marte pueden tardar decenas de millones de años en formarse tras el nacimiento de la estrella, pero los detalles sobre el lugar exacto en el que los planetas suelen formarse en los discos protoplanetarios sigue siendo un misterio y un área de investigación en curso.

Una vez que se forman planetas alrededor de una estrella, se habla de sistemas planetarios, que se definen como conjuntos de objetos ligados gravitatoriamente que orbitan alrededor de una estrella. Pueden estar formados por uno o varios planetas, pero también pueden incluir planetas enanos, asteroides, satélites naturales, meteoroides y cometas. El Sol y sus planetas, incluida la Tierra, se conocen como Sistema Solar. Los términos sistema «extrasolar» y sistema «exoplaneta» se refieren a sistemas planetarios distintos del nuestro.

Para fijar ideas y a modo de resumen, un exoplaneta es cualquier planeta situado más allá de nuestro Sistema Solar, orbitando otras estrellas, la mayoría de ellos, aunque algunos exoplanetas "flotan" libremente y no están ligados a ninguna estrella, denominándoseles en este caso planetas interestelares o errantes.

En el momento de escribir estas líneas el número de exoplanetas confirmados alcanza la cifra de 5933, correspondientes a 4565 sistemas planetarios, aunque los científicos estiman en miles de millones el número de los que existen en el Cosmos.

La mayoría de los exoplanetas descubiertos hasta ahora se encuentran en una región relativamente pequeña y cercana de nuestra galaxia, la Vía Láctea ("cercana" significa a miles de años luz de nuestro Sistema Solar, remarcando que la luz viaja por el espacio a 300 000 km/s). Esto es lo más lejos que los telescopios actuales han podido sondar. Incluso el exoplaneta conocido más cercano a la Tierra, "Próxima Centauri b", se encuentra a unos 4 años luz. Gracias al telescopio espacial Kepler de la NASA y al JWST, sabemos que hay más planetas que estrellas en la Galaxia.

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es la espesa corriente de estrellas que atraviesa el cielo en las noches más claras. Su espiral contiene al menos 100 000 millones de estrellas, entre ellas nuestro Sol. Y si cada una de esas estrellas tiene no sólo un planeta, sino todo un sistema de ellos, como en el caso de nuestro Sol, entonces el número de planetas en la galaxia es realmente astronómico: ya hablamos de los trillones. Es cierto que encontraremos estrellas solitarias, sin planetas, pero incluso contabilizándolos, la cifra de sistemas planetarios es abrumadora, probablemente de billones de exoplanetas, sin embargo, encontrarlos no es fácil.

Los planetas suelen tener un brillo millones de veces más tenues que las estrellas alrededor de las que orbitan, y se encuentran a una distancia increíblemente grande. Las dificultades para observar planetas extrasolares se deben a cuatro hechos básicos:

- ✓ Los planetas no producen luz propia, excepto cuando se han formado recientemente (es decir, cuando son jóvenes).
- ✓ Se encuentran a una distancia enorme de nosotros.
- ✓ Se pierden en el resplandor cegador de sus estrellas progenitoras.
- ✓ Sus tamaños y masas suelen ser mucho, mucho más pequeños que los de las estrellas alrededor de las que orbitan.

Es bastante raro que los astrónomos vean un exoplaneta a través de sus telescopios de la misma manera que se puede ver Marte a través de un telescopio desde la Tierra. A esto se le llama ima-

gen directa, y solo se han encontrado unos pocos exoplanetas de esta manera (y estos tienden a ser planetas gigantes gaseosos jóvenes que orbitan muy lejos de sus estrellas).

La mayoría de los exoplanetas se encuentran mediante métodos indirectos: midiendo el oscurecimiento de una estrella por el paso de un planeta frente a ella, o monitorizando el espectro de una estrella en busca de signos reveladores de que un planeta está tirando de su estrella y provocando un sutil desplazamiento Doppler de su luz.

Los observatorios astronómicos especializados descubren miles de planetas observando los «tránsitos», es decir, el ligero oscurecimiento de la luz de una estrella cuando su pequeño planeta pasa entre ella y nuestros telescopios. Otros métodos incluyen la lente gravitacional, la velocidad radial y la obtención de imágenes directas.

La Humanidad lleva miles de años especulando sobre estas posibilidades, pero la nuestra es la primera generación que sabe, con certeza, que los exoplanetas están realmente ahí fuera (Figura 01).

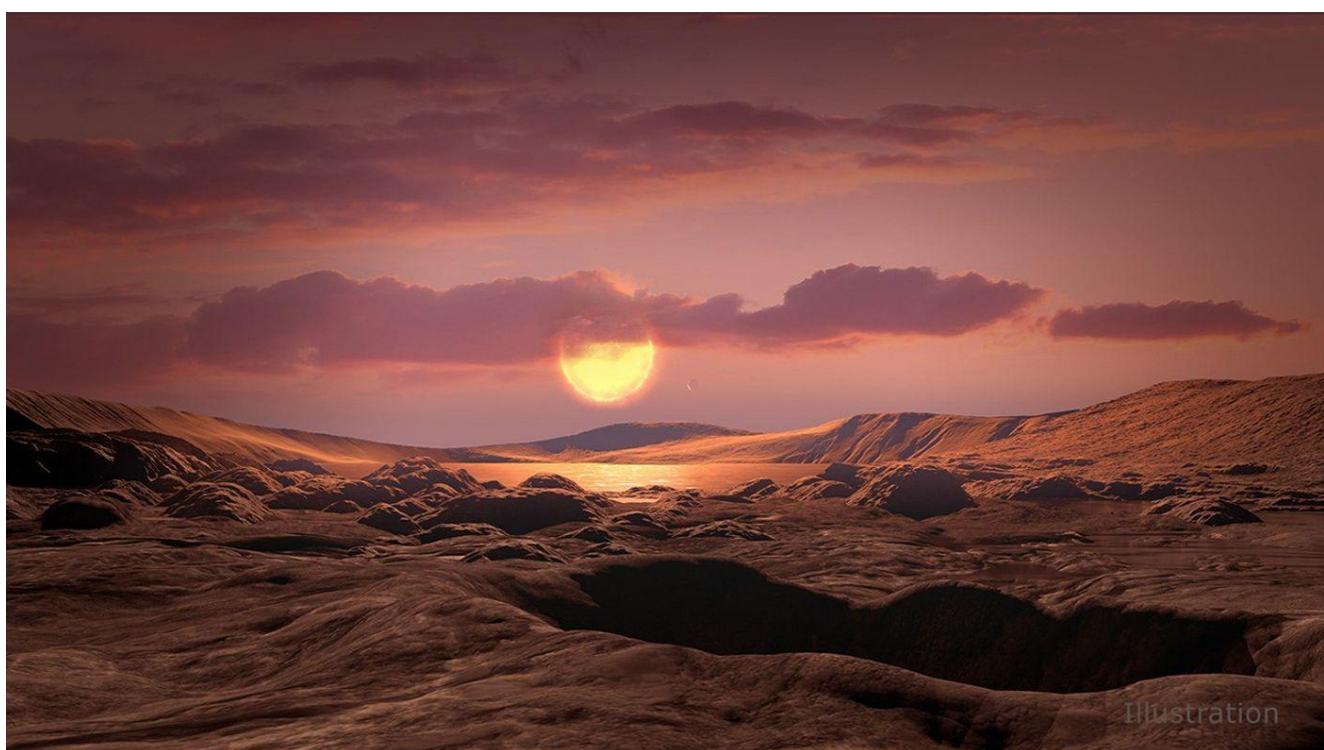


Figura 01: Concepto artístico del aspecto que podría tener el exoplaneta Kepler-1649c desde su superficie.
Imagen: NASA/Centro de Investigación Ames/Daniel Rutter

De hecho, están muy lejos, la mayoría de los planetas extrasolares hallados hasta ahora se encuentran a cientos o miles de años luz. Sin embargo, se ha descubierto que nuestra estrella vecina más cercana, Próxima Centauri, posee al menos un planeta, probablemente rocoso. Se encuentra a unos 4 años luz, es decir, a más de 40 billones de kilómetros. El planeta extrasolar "Proxima Centauri b" tiene una masa compatible con el hecho de que sea ligeramente más grande que la Tierra. Basándonos en lo que sabemos sobre los exoplanetas y los planetas de nuestro Sistema Solar con una masa similar a la de la Tierra, lo más probable es que se trate de un planeta de tipo terrestre. "Proxima Centauri b" orbita en la «zona habitable» de su estrella, lo que significa que podría tener agua líquida en su superficie si tuviera una atmósfera que lo permitiera. Los cálculos sugieren que un lado del exoplaneta Proxima b está siempre orientado hacia su estrella, lo que daría lugar a una atmósfera y un clima muy diferentes a los que tenemos en la Tierra. Su estrella madre, Próxima Centauri, es una enana roja tenue que emite unas 600 veces

menos luz que nuestro Sol. Aunque no se sabe mucho de este mundo, su órbita cercana y la inestabilidad de su estrella reducen las posibilidades de que sea habitable.

Como hemos señalado, Próxima Centauri es la estrella más cercana a la Tierra después de nuestro Sol, pero sigue estando unas 9.000 veces más lejos que el planeta Neptuno. Si una compañía aérea ofreciera un vuelo hasta allí en avión, tardaría 5 millones de años en llegar.

Lo positivo del momento actual en la investigación exoplanetaria y en el estudio de planetas situados fuera de nuestro Sistema Solar, es que podemos observarlos, medir su temperatura, analizar sus atmósferas y, tal vez algún día, detectar señales de vida ocultas en los píxeles de luz capturados de estos mundos oscuros y distantes. Lo malo es que aún no tenemos forma de llegar a ellos, y no dejaremos huellas en ellos en un futuro próximo (lo mismo para ellos esto último también es una buena noticia).

Los primeros exoplanetas se descubrieron a principios de la década de 1990, pero el primero en irrumpir en la escena mundial fue "51 Pegasi b" en el año 1995, un "Júpiter caliente" que orbita alrededor de una estrella similar al Sol a 50 años luz de distancia. Desde entonces se han descubierto varios miles más.

CÓMO SE BUSCAN LOS EXOPLANETAS

"Aún tiene que probarse que la inteligencia tenga algún valor para la supervivencia"
Arthur C. Clarke (1917-2008), físico, matemático, escritor de ciencia ficción, inventor y novelista británico.

Como se ha mencionado, la primera detección confirmada de un exoplaneta no llegaría hasta la década de 1990, aunque las primeras pruebas de la existencia de exoplanetas datan de 1917, cuando Adriaan van Maanen identificó la primera enana blanca «contaminada», aunque la importancia del hallazgo no se reconoció hasta el año 2014. Después, los descubrimientos de exoplanetas crecieron rápidamente en los años siguientes, con el lanzamiento del telescopio espacial Kepler y finalmente con los telescopios espaciales Hubble y James Webb.

La misión Kepler se diseñó específicamente para explorar nuestra región de la Vía Láctea y descubrir cientos de planetas del tamaño de la Tierra, o más pequeños, en la zona habitable o cerca de ella (también llamada «zona de Ricitos de Oro», el área alrededor de una estrella donde los planetas rocosos podrían tener agua líquida en la superficie) y determinar la fracción de estrellas que podrían tener tales planetas a su alrededor. Después de que la segunda de las cuatro ruedas giroscópicas de Kepler fallara en 2013, Kepler completó su misión principal ese mes de noviembre y comenzó su misión extendida, K2. La nave espacial se retiró en 2018, pero los datos de Kepler se siguen utilizando para encontrar exoplanetas (más de 2.700 confirmados hasta ahora).

Respecto al telescopio espacial Spitzer de la NASA (2013-2020), que no fue diseñado para buscar exoplanetas, hay que mencionar que sus instrumentos infrarrojos lo convirtieron en un excelente explorador de exoplanetas. Se utilizó en el notable descubrimiento del sistema TRAPPIST-1, en el que se determinó la presencia de un número sin precedentes de siete planetas en la zona habitable de la estrella.

En 2018 se lanzó el Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) como sucesor de Kepler para descubrir exoplanetas en órbita alrededor de las estrellas enanas más brillantes, el tipo de estrella más común en nuestra galaxia.

El telescopio espacial James Webb de la NASA y el futuro telescopio espacial Nancy Grace Roman prometen mucho sobre lo que podemos aprender de los exoplanetas, y a través de sus espectrógrafos y de la lectura de las señales luminosas en busca de información, los astrónomos esperan aprender más sobre las atmósferas de los exoplanetas y las condiciones de los mismos.

Cuando desde un observatorio en tierra o en órbita se descubre un probable planeta extrasolar pasa automáticamente a la categoría de "candidato", denominándose exoplaneta "confirmado" cuando se demuestra que lo es a través de estudios posteriores.

Es posible que algunos candidatos resulten ser «falsos positivos», considerándose «confirmado» cuando se verifica mediante una observación adicional con al menos otros dos telescopios. Actualmente hay miles de candidatos a exoplanetas a la espera de confirmación, ya que el tiempo en los telescopios se considera un recurso escaso y precioso, y se necesita mucho tiempo de cálculo para determinar qué objetivos investigar. Éste es un campo en el que los científicos aficionados pueden trabajar con los datos de la NASA para ayudar a afinar los objetivos e incluso descubrir exoplanetas. Mientras que los ordenadores pueden pasar por alto un tránsito aislado, los humanos pueden detectar pequeñas caídas de brillo en los datos que podrían indicarnos que hay un planeta por descubrir.

Los nombres de los exoplanetas pueden parecer largos y complicados al principio, sobre todo si se comparan con nombres como Venus y Marte. Sin embargo, hay una lógica detrás de su sistema de nomenclatura que es importante para la forma en que los científicos catalogan miles de exoplanetas. Los astrónomos diferencian entre las «designaciones» alfanuméricas y los «nombres propios» alfabéticos. Todas las estrellas y exoplanetas tienen designaciones, pero muy pocos tienen nombres propios.

Utilicemos como ejemplo el "HD 189733 b". La primera parte del nombre suele ser el telescopio o estudio que lo encontró, o catálogo en el que se encuentra. En este caso, «HD» significa «Henry Draper Catalogue», un catálogo estelar muy utilizado. El número 189733 es el orden en el que la estrella fue catalogada por posición (la 189.733^a estrella añadida al catálogo). La letra «b» minúscula representa el planeta, en el orden en que fue encontrado. El primer planeta encontrado siempre se denomina b, y los siguientes c, d, e, f, etc.

La estrella en torno a la que orbita el exoplaneta suele ser la «A» no declarada del sistema, lo que puede ser útil si el sistema contiene muchas estrellas, que a su vez pueden designarse B o C. (Las letras mayúsculas se refieren a las estrellas, dejando para los planetas las minúsculas.) Si se encuentran a la vez varios exoplanetas en torno a la misma estrella, el planeta más cercano a su estrella se denomina b, y los planetas más distantes, c, d, e, etc.. como se ya se ha dicho.

Otro ejemplo de nombre de exoplaneta es "Kepler-16 b", donde "Kepler" es el nombre del telescopio que observó el sistema, 16 es el orden en que se catalogó la estrella y «b» es el planeta más cercano a la estrella. Si nombráramos a la Tierra como exoplaneta, se llamaría "Sol d" (Sol es el nombre de nuestra estrella, y empezando por Mercurio como "b", la Tierra es el tercer planeta, así que "d").

En los últimos años, la Unión Astronómica Internacional, que es la autoridad internacional para la denominación de los objetos celestes, ha iniciado el proceso de adopción de nombres propios para los exoplanetas. El primer lote de exoplanetas con nombre propio procede de un concurso abierto al público, e incluye unas 15 estrellas y 20 exoplanetas. A partir del concurso, el primer

exoplaneta gigante descubierto en 1995 (51 Peg b) recibió el nombre de "Dimidium" y su estrella anfitriona (51 Peg) el de "Helvetios".

Los científicos utilizan habitualmente cinco métodos para descubrir exoplanetas, las dos técnicas principales son los métodos de tránsito y de velocidad radial, pero hay tres más:

➤ **Tránsito**

En el Sistema Solar podemos observar tránsitos de Mercurio y Venus, por ejemplo, que son como eclipses de Sol que no llegan a ocultar el disco solar, dada la enorme diferencia de tamaño entre estos planetas y nuestra estrella, y también la distancia entre ellos y a su vez con la Tierra. Fobos y Deimos, satélites de Marte, también experimentan eclipses o tránsitos al pasar por delante del disco solar, visto desde la superficie marciana, pero que dada su forma irregular y su pequeño tamaño, sería más apropiado llamarlo tránsito que eclipse.

Un eclipse solar es uno de los acontecimientos astronómicos más espectaculares que puedan observarse desde la Tierra. Se produce cuando la Luna pasa directamente por delante del Sol, bloqueando su luz.

Lo mencionado respecto a eclipses o tránsitos, muestra el fundamento del procedimiento seguido mediante el método de tránsito para encontrar exoplanetas. Cuando un planeta pasa directamente entre un observador y la estrella alrededor de la cual gira, bloquea parte de su luz. Durante un breve periodo de tiempo, la estrella se vuelve más tenue, y aunque es un cambio minúsculo, resulta suficiente para que los astrónomos puedan detectar la presencia de un exoplaneta alrededor de una estrella lejana.

Los astrónomos denominan «curva de luz» al registro gráfico del nivel de luz que se observa en la estrella, cuando un planeta pasa por delante de ella y bloquea parte de su luz, la curva de luz muestra esta disminución del brillo.

El tamaño y la longitud de un tránsito pueden decírnos mucho sobre el planeta que lo provoca, por ejemplo, los planetas más grandes bloquean más luz, por lo que crean curvas de luz más profundas. Además, cuanto más lejos está un planeta de su estrella, más tiempo tarda en orbitar y pasar por delante de la misma. Por tanto, cuanto más dure un tránsito, más lejos estará el planeta de su estrella.

Las curvas de luz se complican cuando hay más de un planeta en tránsito en un sistema estelar, y esas curvas de luz combinadas pueden darnos la misma información que una sola, sólo que a los astrónomos les cuesta más trabajo distinguir cada curva de luz del resto para diferenciar cada planeta.

El método del tránsito no sólo es útil para encontrar planetas, también puede darnos información sobre la composición de la atmósfera de un planeta o su temperatura. Cuando un exoplaneta pasa por delante de su estrella, parte de la luz estelar atraviesa su atmósfera, y los científicos pueden analizar el espectro electromagnético de ese haz luminoso para obtener valiosas pistas sobre su composición. Gracias a este método, se ha encontrado desde metano hasta vapor de agua en las atmósferas de otros planetas. Este método (tránsito) ha tenido un éxito espectacular en la búsqueda de nuevos exoplanetas.

La misión Kepler de la NASA, que buscó planetas mediante el método del tránsito entre 2009 y 2013, descubrió miles de posibles exoplanetas y proporcionó a los astrónomos valiosa información sobre la distribución de los exoplanetas en la Galaxia.

Siguiendo este método se han descubierto 4427 planetas extrasolares hasta el momento presente.

➤ **Velocidad Radial**

Una forma de entender la interacción gravitatoria entre un planeta y una estrella es imaginar un juego de tira y afloja. Por un lado está la estrella, un objeto masivo con un campo gravitatorio muy potente, y por otro está el planeta, mucho más pequeño y con mucha menos fuerza gravitatoria. Ya sabemos quién gana este juego: la estrella. Por eso los planetas orbitan alrededor de las estrellas y no al revés.

Pero, aunque el planeta sea pequeño, su fuerza gravitatoria sigue teniendo la capacidad de afectar el comportamiento de su estrella anfitriona, haciendo que se tambalee un poco, aunque ese efecto sea mucho menos pronunciado que el que la estrella ejerce sobre el planeta.

Como cabe imaginar, cuanto más grande es el planeta, mayor es el efecto que tiene sobre su estrella. Los planetas pequeños, como la Tierra, hacen que sus estrellas sólo se tambaleen un poco, mientras que los planetas más grandes, como Júpiter, tienen un efecto mucho mayor.

Ese «bamboleo» de una estrella puede decírnos si tiene planetas, cuántos hay y de qué tamaño son.

Por otro lado, los planetas en órbita hacen que las estrellas oscilen en el espacio en todas las direcciones, cambiando el color de la luz que ven los astrónomos al observarlas cuando ese movimiento las hace alejarse o acercarse de nosotros. Dicho de otra forma, las estrellas se ven afectadas por el tirón gravitatorio de sus planetas en órbita, y cuando se observan a través de un telescopio y se analiza el espectro de luz de la estrella, si la estrella se mueve en la dirección del observador, aparecerá desplazada hacia el azul, y si se aleja del observador, se desplazará hacia el rojo, debido al efecto "Doppler".

Todos, en nuestra vida cotidiana, hemos experimentado alguna vez el efecto Doppler. ¿Has notado alguna vez cómo el sonido de una ambulancia que pasa por la calle se hace más agudo a medida que se acerca y más grave a medida que se aleja? La razón es que cuando un objeto que emite energía, como el altavoz de una ambulancia, se acerca a ti, las ondas se agrupan y se aplastan. Y cuando el objeto se aleja, las ondas se estiran.

Estos cambios en la longitud de onda modifican la forma en que percibimos la energía que vemos o escuchamos. Cuando las ondas sonoras se juntan suenan más agudas, y cuando las ondas de luz visible se juntan se ven más azules. Por el contrario, cuando las ondas sonoras se estiran suenan más graves, y cuando las ondas de luz visible se estiran hacen que un objeto parezca más rojizo. Este cambio de color se denomina "desplazamiento al rojo", y los científicos pueden utilizarlo para saber si un objeto en el cielo se está moviendo hacia nosotros o se está alejando.

El método de la velocidad radial fue uno de los primeros métodos exitosos para encontrar exoplanetas, y sigue siendo uno de los más productivos. A menudo, este método se utiliza para confirmar planetas encontrados con otros métodos, siendo un paso adicional que puede demostrar que un exoplaneta existe.

Muchos astrónomos y telescopios de todo el mundo utilizan este método para descubrir exoplanetas, pero dos observatorios notables donde se lleva a cabo este trabajo son los telescopios Keck, en Hawái, y el Observatorio La Silla, en Chile.

Mediante este procedimiento para la detección de exoplanetas (método de la velocidad radial) se han descubierto 1130 exoplanetas hasta el momento.

➤ **Microlente Gravitacional**

Entre sus muchas ideas, Albert Einstein replanteó el concepto de gravedad, definiéndolo menos como una misteriosa atracción entre objetos y más como una propiedad geométrica del espacio-tiempo (Relatividad General). En otras palabras, los objetos grandes deforman el "tejido" del espacio. Este efecto hace que la luz se distorsione y cambie de dirección cuando se ve afectada por la gravedad de un objeto masivo, como una estrella o un planeta.

Este cambio de dirección puede provocar cosas muy interesantes, como sorprendentes efectos ópticos, por ejemplo. A veces, la gravedad puede curvar y enfocar la luz como la lente de una lupa o unas gafas, y ese efecto de microlente gravitatoria se produce cuando la gravedad de una estrella o planeta enfoca la luz de otra estrella más lejana, de forma que temporalmente parece más brillante (Figura 02).



Figura 02: Se muestran dos vistas desde el Hubble del cúmulo masivo de galaxias Cl 0024+17 (ZwCl 0024+1652). A la izquierda está la vista en luz visible con arcos azules de aspecto extraño que aparecen entre las galaxias amarillentas. Se trata de imágenes ampliadas y distorsionadas de galaxias situadas muy por detrás del cúmulo. Su luz es desviada y amplificada por la inmensa gravedad del cúmulo en un proceso llamado lente gravitacional. A la derecha, se ha añadido un sombreado azul para indicar la ubicación de un material invisible denominado materia oscura, que es necesario desde el punto de vista matemático para explicar la naturaleza y la ubicación de las galaxias que se ven por efecto de la lente gravitatoria.
Imagen: NASA, ESA, M.J. Jee y H. Ford (Universidad Johns Hopkins)

Los niveles de luz descienden una vez superado el efecto causado por el "planeta lente", pero siguen aumentando después debido a la acción de lente de la estrella. Una vez que la "estrella lente" se desplaza fuera de la posición óptima, el brillo de la estrella más distante se desvanece.

Para un astrónomo, un evento de lente se parece a una estrella lejana que se vuelve gradualmente más brillante, en un periodo de tiempo de un mes más o menos, y luego se desvanece. Si un planeta se ve afectado por la lente, experimenta un breve destello de luz que se produce du-

rante este proceso de brillo y oscurecimiento. Salvando las distancias, algo similar a la aparición de una estrella nova en el cielo.

Los astrónomos no pueden predecir cuándo ni dónde se producirán estos fenómenos, por eso tienen que observar grandes zonas del cielo durante un largo periodo de tiempo. Cuando observan que una estrella se ilumina y luego se oscurece, siguiendo el patrón de los objetos que actúan como lentes, analizan los datos para obtener información sobre el tamaño estimado de la estrella.

A veces, los planetas que flotan libremente en el espacio, es decir, que no orbitan alrededor de una estrella, provocan fenómenos de microlente gravitacional que los astrónomos registran. Estos sucesos nos dan una idea de lo comunes que son estos planetas en la galaxia.

Utilizando este método de detección de exoplanetas, se ha llegado a un total de 247 descubiertos.

➤ **Imagen Directa**

Los exoplanetas están muy lejos y son millones de veces más débiles que las estrellas en torno a las que orbitan. No es de extrañar, pues, que sea muy difícil fotografiarlos o verlos de la misma forma que, por ejemplo, se hace con Júpiter o Venus.

El principal problema al que se enfrentan los astrónomos al intentar obtener imágenes directas de los exoplanetas, es que las estrellas en torno a las que orbitan son millones de veces más brillantes que sus planetas. Cualquier luz reflejada en el planeta, o radiación térmica procedente del mismo, queda "ahogada" por las enormes cantidades de radiación procedentes de su estrella anfitriona. Es como intentar encontrar la luz de una cerilla junto al faro de un coche desde 500 metros, por ejemplo, o la luz de una vela junto a un foco en un estadio de deportes por la noche.

En un día luminoso, es posible utilizar unas gafas de sol, el parasol del coche o simplemente la mano para bloquear el resplandor del sol y poder ver otras cosas. Este es el mismo principio que rige en los instrumentos diseñados para obtener imágenes directas de exoplanetas. Utilizan diversas técnicas para bloquear la luz de las estrellas que podrían tener planetas en órbita. Una vez reducido el resplandor de la estrella, se pueden observar mejor los objetos que la rodean y que podrían ser exoplanetas.

Existen dos métodos principales que utilizan los astrónomos para bloquear la luz de una estrella, uno, llamado coronografía, utiliza un dispositivo dentro de un telescopio para bloquear la luz de una estrella antes de que llegue al detector del telescopio. Los coronógrafos se construyen como complementos internos de los telescopios y ahora se utilizan para obtener imágenes directas de exoplanetas desde observatorios terrestres. El otro método consiste en utilizar una «pantalla estelar», un dispositivo que se coloca para bloquear la luz de una estrella incluso antes de que entre en el telescopio. En el caso de los telescopios espaciales que buscan exoplanetas, el parasol sería una nave espacial independiente, diseñada para situarse a la distancia y en el ángulo adecuados para bloquear la luz de la estrella que los astrónomos están observando.

La imagen directa se encuentra aún en su fase inicial como método de búsqueda de exoplanetas, pero existen grandes esperanzas de que acabe convirtiéndose en una herramienta clave para encontrar y caracterizar exoplanetas. Los futuros instrumentos de imagen directa podrían tomar fotografías de exoplanetas que nos permitirían identificar patrones atmosféricos, océanos y masas continentales. Utilizando este método se han descubierto un total de 83 planetas hasta ahora.

➤ **Astrometría**

Como hemos visto en el apartado del método "Velocidad Radial", los desplazamientos Doppler no son la única forma que tienen los astrónomos de encontrar estrellas que se tambalean debido a la fuerza de gravedad de sus planetas. El bamboleo transversal también puede ser observable en forma de cambios en la posición aparente de la estrella en el cielo. En otras palabras, los científicos pueden detectar la posición de la estrella moviéndose en el espacio en sentido transversal y no solo radial.

La astrometría, como se denomina este método, sigue siendo increíblemente difícil de realizar. Las estrellas se desplazan una distancia tan ínfima que es muy difícil detectarlo con precisión, especialmente cuando los exoplanetas son pequeños, del tamaño de la Tierra.

Para rastrear el movimiento de estas estrellas, los científicos toman una serie de imágenes de las mismas junto a otras estrellas cercanas en el cielo. En cada imagen, comparan las distancias entre estas estrellas de referencia y la estrella cuyo movimiento están tratando de detectar. Si la estrella objetivo se ha movido en relación con las otras estrellas, los astrónomos pueden analizar ese movimiento en busca de señales de exoplanetas.

La astrometría requiere una óptica extremadamente precisa, y es especialmente difícil de realizar desde la superficie de la Tierra, porque nuestra atmósfera distorsiona y curva la luz. Con el uso de los observatorios en órbita, se ha dado un paso de gigante en el descubrimiento y confirmación de planetas extrasolares soslayando ese pernicioso efecto atmosférico, a pesar de lo cuál solamente se han descubierto 5 planetas extrasolares siguiendo este método.

Tipos de Planetas Extrasolares

El tamaño y la masa desempeñan un papel crucial en la determinación de los tipos de planetas. También hay variedades dentro de las clasificaciones de tamaño/masa. Los científicos han observado, además, lo que parece ser una extraña brecha en la secuencia de tamaños de los planetas, denominada "valle del radio" o brecha de Fulton, en honor a Benjamín Fulton, autor principal de un artículo que la describe.

Para explicar este extraño desfase en el tamaño de los planetas (la brecha de Fulton) es necesario comprender mucho mejor cómo se forman los sistemas planetarios.

Los datos del telescopio espacial Kepler de la NASA muestran que los planetas de un tamaño entre 1,5 y 2 veces el de la Tierra son raros, lo que los situaría entre las supertierras. Es posible que esta brecha represente una división crítica en la formación de planetas, resultando que los planetas que alcanzan este tamaño atraen rápidamente gruesas atmósferas de hidrógeno y helio y se convierten en planetas gaseosos, mientras que los planetas más pequeños, que no alcanzan ese límite, no son lo suficientemente grandes como para albergar una atmósfera de ese tipo y siguen siendo principalmente cuerpos rocosos terrestres. Por otra parte, los planetas más pequeños que orbitan cerca de sus estrellas, podrían ser los núcleos de mundos similares a Neptuno a los que se les ha despojado de sus atmósferas.

Al medir el tamaño, masa y densidad de los exoplanetas, podemos observar composiciones que van desde rocosas (como la Tierra y Venus) hasta ricas en gas (como Júpiter y Saturno). En algunos planetas puede predominar el agua o el hielo, mientras que en otros predomina el hierro o el carbono. Se han identificado mundos de lava cubiertos de mares fundidos, planetas hinchados

con una densidad similar a la de la espuma de poliestireno y densos núcleos de planetas que aún orbitan alrededor de sus estrellas.

Los planetas situados más allá de nuestro Sistema Solar presentan una gran variedad de tamaños, desde gigantes gaseosos, mayores que Júpiter, hasta pequeños planetas rocosos del tamaño de la Tierra o Marte. Pueden estar tan calientes como para hacer hervir el metal, o tan fríos como para estar a pocos grados del cero absoluto. Pueden orbitar sus estrellas a tan corta distancia que un "año" dura sólo unos días (terrestres), y pueden orbitar varios soles a la vez. Algunos exoplanetas son incluso vagabundos sin estrella que le cobije, viajando en solitario por la Galaxia en una oscuridad permanente.

Cada tipo de planeta varía en su aspecto interior y exterior en función de su composición. Los gigantes gaseosos son planetas del tamaño de Saturno o Júpiter, el mayor planeta de nuestro Sistema Solar, o incluso mucho mayores. Dentro de estas grandes categorías se esconde una mayor variedad, como los júpiteres calientes, por ejemplo, que fueron uno de los primeros tipos de planetas descubiertos, y que son gigantes gaseosos que orbitan tan cerca de sus estrellas que sus temperaturas superficiales alcanzan los miles de grados centígrados. En ocasiones no resulta fácil diferenciar a este tipo de planetas de las "estrellas marrones", con las que comparten algunas características.

Los planetas neptunianos tienen un tamaño similar al de Neptuno o Urano en nuestro Sistema Solar. Es probable que tengan una mezcla de composiciones diversas en su interior, pero todos tendrán atmósferas exteriores dominadas por el hidrógeno y el helio, y núcleos rocosos. También se han descubierto mini-Neptunos, planetas más pequeños que Neptuno y más grandes que la Tierra. No existen planetas de este tamaño o tipo en nuestro Sistema Solar.

Las super-Tierras son planetas típicamente terrestres que pueden o no tener atmósfera, siendo más masivos que la Tierra, pero más ligeros que Neptuno.

Los planetas terrestres son del tamaño de la Tierra o más pequeños, compuestos de roca, silicatos, agua y carbono. Las investigaciones en marcha determinarán si algunos de ellos poseen atmósferas, océanos u otros signos de habitabilidad.

Hasta ahora los científicos han clasificado los exoplanetas en los siguientes tipos (Figura 03):

- **Gigantes gaseosos**

Similares a Júpiter y Saturno, pero a menudo mucho más grandes y cercanos a sus estrellas, estos exoplanetas tienen gases arremolinados sobre un núcleo sólido, en lugar de una superficie exterior sólida y dura.

Un gigante gaseoso es un gran planeta compuesto principalmente por hidrógeno y helio. Estos planetas, como Júpiter y Saturno en nuestro Sistema Solar, no tienen superficies rígidas y sólidas diferenciadas de la atmósfera, sino una extensa capa de gases envolviendo un núcleo sólido. Los exoplanetas gigantes gaseosos pueden ser mucho mayores que Júpiter y estar mucho más cerca de sus estrellas que cualquier otro planeta de nuestro sistema solar.

Desde la antigüedad, nuestra comprensión de cómo se formaban y evolucionaban los planetas se basaba en los ocho planetas de nuestro Sistema Solar (hasta el año 2006 eran nueve). Pero en los últimos 25 años, el descubrimiento de más de 5.600 exoplanetas, o planetas fuera de nuestro Sistema Solar, cambió todo eso.

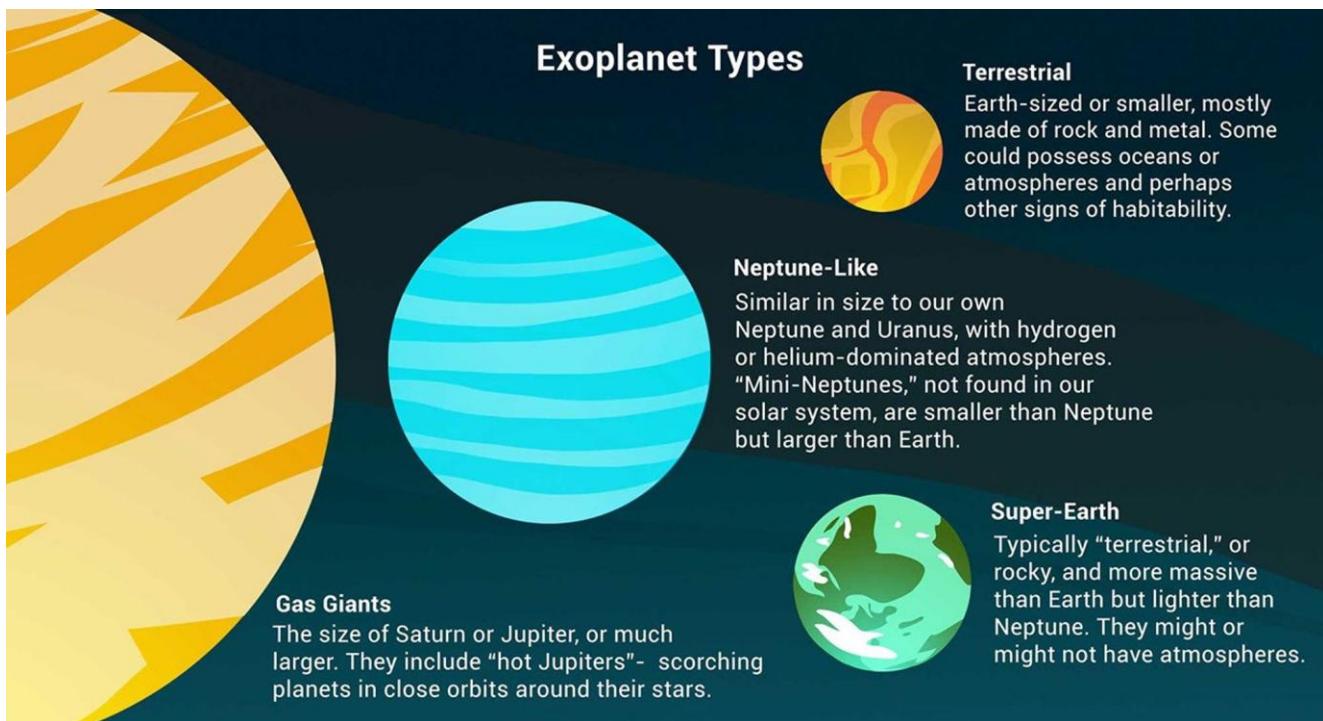


Figura 03: La variedad es un tema importante en los descubrimientos de exoplanetas durante el último cuarto de siglo, como se muestra en esta ilustración. La mayoría se han descubierto mediante el método del «tránsito», es decir, observando las sombras más pequeñas cuando un planeta cruza la cara de su estrella.

Imagen: NASA/JPL-Caltech.

Los gigantes gaseosos más cercanos a sus estrellas suelen llamarse «Júpiter calientes», y fueron uno de los primeros tipos de exoplanetas descubiertos: gigantes gaseosos como Júpiter, pero que orbitan tan cerca de sus estrellas que sus temperaturas alcanzan los miles de grados centígrados.

Estos grandes planetas tienen órbitas tan próximas a sus estrellas que provocan un pronunciado «bamboleo» en las mismas, tirando de sus anfitriones estelares de un lado a otro, y causando un cambio medible en el espectro de luz de las estrellas. Esto hizo que los Júpiter calientes fueran más fáciles de detectar en los primeros tiempos de la caza de planetas mediante el método de la velocidad radial.

De tamaño similar a Júpiter, estos planetas dominados por el gas orbitan muy cerca de sus estrellas progenitoras, rodeándolas en tiempos tan breves como 18 horas. No tenemos nada parecido en nuestro Sistema Solar, donde los planetas más cercanos al Sol son rocosos y orbitan mucho más lejos.

La presencia de anillos en todos los planetas gigantes gaseosos de nuestro Sistema Solar, que pueden ser muy polvorrientos (Júpiter), muy helados (Saturno) o muy ricos en compuestos del carbono (Urano y Neptuno), sugiere que los anillos también pueden ser comunes alrededor de exoplanetas gigantes gaseosos fríos que orbitan otras estrellas. Se ha detectado un sistema de anillos muy grande alrededor de un exoplaneta candidato, J1407 b; sin embargo, los anillos cubren decenas de millones de kilómetros. Puede tratarse de un disco de material que forma exolunas en lugar de un sistema de anillos similar al de Saturno.

¿Estos exoplanetas se forman cerca de sus estrellas, o más lejos antes de migrar hacia el interior? Y si estos gigantes migran, ¿qué revelaría esto sobre la historia de los planetas de nuestro Sistema Solar? Estas y otras muchas incógnitas forman parte de los proyectos de investigación

de los científicos, que tendrán que observar muchas de estos gigantes calientes en una fase muy temprana de su formación.

La detección del exoplaneta HIP 67522 b, que se cree que es el Júpiter caliente más joven jamás encontrado (en junio de 2020), podría ampliar nuestros conocimientos en poco tiempo. Orbita alrededor de una estrella bien estudiada de unos 17 millones de años, lo que significa que el Júpiter caliente es probablemente sólo unos pocos millones de años más joven, mientras que la mayoría de los Júpiter calientes conocidos tienen más de mil millones de años. El planeta tarda unos siete días en orbitar su estrella, que tiene una masa similar a la del Sol. Situado a sólo unos 490 años luz de la Tierra, HIP 67522 b tiene unas 10 veces el diámetro de la Tierra, o cerca del de Júpiter. Su tamaño indica claramente que se trata de un planeta dominado por gas. Este descubrimiento permite albergar esperanzas de encontrar más Júpiter calientes jóvenes y conocer mejor cómo se forman los planetas en el universo.

A este respecto, existen tres hipótesis principales sobre cómo los Júpiter calientes se acercan tanto a sus estrellas progenitoras. Una es que simplemente se forman allí y no se mueven, pero es difícil imaginar la formación de planetas en un entorno tan intenso. El calor abrasador no sólo vaporizaría la mayoría de los materiales, sino que las estrellas jóvenes suelen entrar en erupción con explosiones masivas y vientos estelares que podrían dispersar los planetas emergentes.

Otra hipótesis, quizás más probable, es que los gigantes gaseosos se desarrollen más lejos de su estrella madre, más allá de un límite llamado línea de nieve, donde el frío es suficiente para que se formen hielo y otros materiales sólidos. Los planetas similares a Júpiter están compuestos casi exclusivamente de gas, pero contienen núcleos sólidos, y sería más fácil que esos núcleos se formaran más allá de la línea de nieve, donde los materiales congelados podrían aglutinarse como una bola de nieve en crecimiento. Esta hipótesis supone que los Júpiter calientes se acercan a sus estrellas, pero ¿cuál sería la causa y el momento de la migración? Una de las ideas postula que los Júpiter calientes inician su viaje al principio de la historia del sistema planetario, cuando la estrella aún está rodeada por el disco de gas y polvo a partir del cual se formaron tanto ella como el planeta. En este escenario, la gravedad del disco interactuando con la masa del planeta podría interrumpir la órbita del gigante gaseoso y provocar su migración hacia el interior.

La tercera hipótesis sostiene que los Júpiter calientes se acercan a su estrella más tarde, cuando la gravedad de otros planetas alrededor de la estrella puede impulsar la migración. El hecho de que HIP 67522 b ya esté tan cerca de su estrella siendo tan joven indica que esta tercera hipótesis probablemente no se aplica en este caso. Pero un solo caso, como el mencionado, de Júpiter caliente muy joven, no basta para zanjar el debate sobre cómo se forman todos ellos.

En 2007, los astrónomos del telescopio espacial Spitzer de la NASA descubrieron que los planetas gigantes gaseosos se forman rápidamente, en los primeros 10 millones de años de vida de una estrella similar al Sol, pudiendo originarse en el disco de escombros rico en gas que rodea a una estrella joven. Un núcleo producido por colisiones entre asteroides y cometas proporciona una semilla, y cuando este núcleo alcanza suficiente masa, su atracción gravitatoria atrae rápidamente gas del disco para formar el planeta.

Los científicos, utilizando el Spitzer y telescopios terrestres, han buscado rastros de gas alrededor de 15 estrellas diferentes similares al Sol, la mayoría con edades comprendidas entre 3 y 30 millones de años. Con la ayuda del espectrómetro infrarrojo de Spitzer, pudieron buscar gas relativamente caliente en las regiones interiores de estos sistemas estelares, una zona comparable a la que hay entre la Tierra y Júpiter en nuestro Sistema Solar. También utilizaron radiotelescopios terrestres para buscar gas más frío en las regiones exteriores de estos sistemas, un área comparable a la zona alrededor de Saturno y más allá.

Todas las estrellas del estudio realizado, incluidas las más jóvenes, tienen menos del 10% de la masa de Júpiter en gas arremolinado a su alrededor en el disco protoplanetario, lo que indica que los planetas gigantes gaseosos como Júpiter y Saturno ya han tenido que formarse en estos jóvenes sistemas planetarios, en caso de existir.

- **Neptunianos**

De tamaño similar a Neptuno o Urano, estos exoplanetas suelen tener atmósferas dominadas por hidrógeno y helio alrededor de núcleos rocosos de metales pesados. Los exoplanetas neptunianos tienen un tamaño unas cuatro veces el tamaño de la Tierra y una masa 17 veces mayor que la terrestre. Sus núcleos, con una mezcla de materiales diversos, serían rocosos con metales más pesados. También se están descubriendo mini-Neptunos, planetas más pequeños que Neptuno y más grandes que la Tierra, aunque no existen planetas como éstos en nuestro Sistema Solar.

Aunque Urano y Neptuno están compuestos principalmente de hidrógeno y helio, ambos contienen también agua, amoníaco y metano. Dado que estas tres sustancias químicas suelen encontrarse congeladas en forma de hielo en el frío exterior del Sistema Solar, Urano y Neptuno suelen denominarse «gigantes de hielo» (aunque sus interiores son lo suficientemente cálidos como para que los "hielos" que contienen no estén congelados). Los investigadores descubrieron un exoplaneta gigante de hielo a una distancia de 25 000 años luz en 2014. No sabemos mucho sobre su composición, de qué está hecho o qué elementos están presentes en su atmósfera, pero se encuentra en una órbita similar a la de Urano respecto a su estrella.

La composición de los planetas lejanos es difícil de analizar, aunque los telescopios espaciales, como el Hubble de la NASA (y el antiguo Spitzer), obtienen información sobre las atmósferas de los planetas analizando la luz de las estrellas. Cuando la luz de las estrellas atraviesa la atmósfera de un planeta, los átomos y moléculas absorben la luz en determinadas longitudes de onda, bloqueándola parcialmente de la vista del telescopio, y cuanta más luz bloquea la atmósfera de un planeta, más grande, profunda y espesa es. Analizando la luz procedente del exoplaneta en diferentes longitudes de onda, lo que se denomina espectroscopia, los investigadores pueden determinar qué moléculas están presentes en la atmósfera.

El satélite TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) de la NASA, está diseñado para descubrir planetas menores que Neptuno que transiten por estrellas lo suficientemente brillantes como para permitir observaciones espectroscópicas de seguimiento, que puedan proporcionar información acerca de los componentes atmosféricos.

Los exoplanetas neptunianos suelen tener nubes espesas que impiden el paso de la luz, ocultando la firma de las moléculas de la atmósfera, siendo el telescopio espacial James Webb, el que está obteniendo las mejores imágenes de las atmósferas de los exoplanetas hasta la fecha.

Los astrónomos han logrado encontrar un exoplaneta del tamaño de Neptuno con cielos despejados, denominado "HAT-P-11b", descubierto en el año 2017. Sin nubes que bloquearan la visión, pudieron identificar moléculas de vapor de agua en su atmósfera. Este planeta es gaseoso con un núcleo rocoso, muy parecido a nuestro Neptuno, y es posible que su atmósfera presente nubes a mayor profundidad, pero las observaciones combinadas del Hubble, Spitzer y Kepler mostraron que la región superior está libre de nubes. Esta buena visibilidad permitió a los científicos detectar las moléculas señaladas (Figura 04).

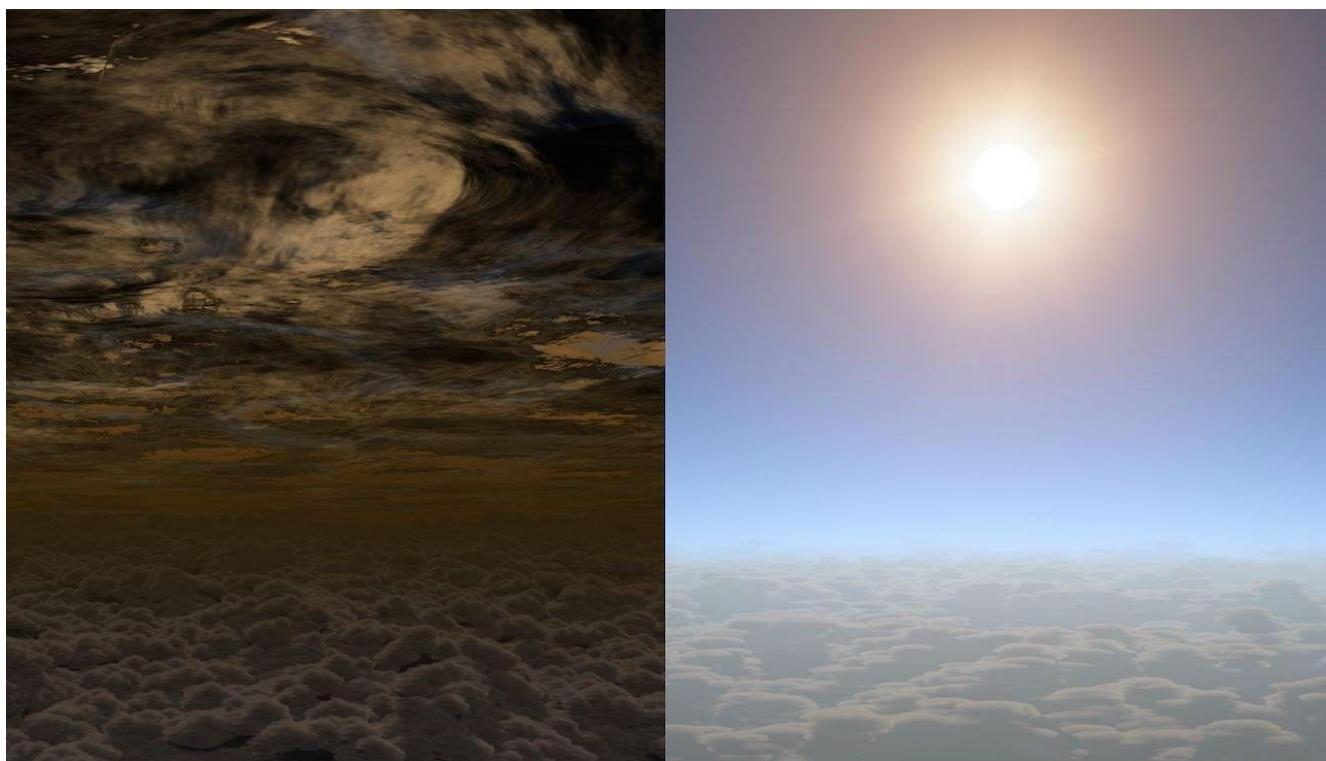


Figura 04: Los científicos han descubierto cielos despejados en un exoplaneta del tamaño de Neptuno, gracias a la potencia combinada de los telescopios espaciales Hubble, Spitzer y Kepler de la NASA. A la derecha se ilustra la vista de este planeta, si fuera posible introducir una nave espacial en sus capas gaseosas. La imagen de la izquierda muestra las altas capas de nubes de muchos exoplanetas neptunianos que impiden detectar moléculas en sus atmósferas.

Imagen: NASA/JPL-Caltech.

Ya sabemos que los astrónomos han encontrado planetas calientes del tamaño de Júpiter y supertierras incandescentes en órbitas cercanas a sus estrellas. Pero los llamados «Neptunos calientes», cuyas atmósferas se calientan a más de 1.700 K, han sido mucho más difíciles de encontrar. De hecho, hasta ahora sólo se han encontrado un puñado de Neptunos calientes.

La mayoría de los exoplanetas del tamaño de Neptuno conocidos, como HAT-P-11b, son simplemente «cálidos», porque orbitan más lejos de sus estrellas que los que se encuentran en la región en la que los astrónomos esperarían encontrar Neptunos calientes. La misteriosa escasez de Neptunos calientes sugiere que, o bien estos mundos extraterrestres son raros, o bien fueron abundantes en un tiempo, pero se han transformado desde entonces (Figura 05).

Hace unos años, astrónomos que utilizaban el Hubble descubrieron que uno de los Neptunos más calientes conocidos (GJ 436b) está perdiendo su atmósfera. No se espera que ese planeta se evapore, pero otros Neptunos más calientes podrían no haber tenido tanta suerte. La intensa radiación de una estrella puede calentar una atmósfera hasta el punto de escapar de la atracción gravitatoria del planeta, como un globo aerostático sin ataduras. El gas que escapa forma una nube gigante alrededor del planeta que se disipa en el espacio.

Este podría ser el caso de un planeta llamado GJ 3470b, un «Neptuno muy caliente» que está perdiendo su atmósfera a un ritmo 100 veces más rápido que el de GJ 436b. Ambos planetas se encuentran a unos 5,5 millones de kilómetros de sus estrellas. Esta distancia es la décima parte de la que separa Mercurio, el planeta más interior de nuestro Sistema Solar, del Sol. Una de las razones por las que GJ 3470b puede estar evaporándose más rápidamente que GJ 436b es que no sea tan denso, por lo que su atmósfera recalentada es menos capaz de aferrarse gravitatoriamente al planeta.

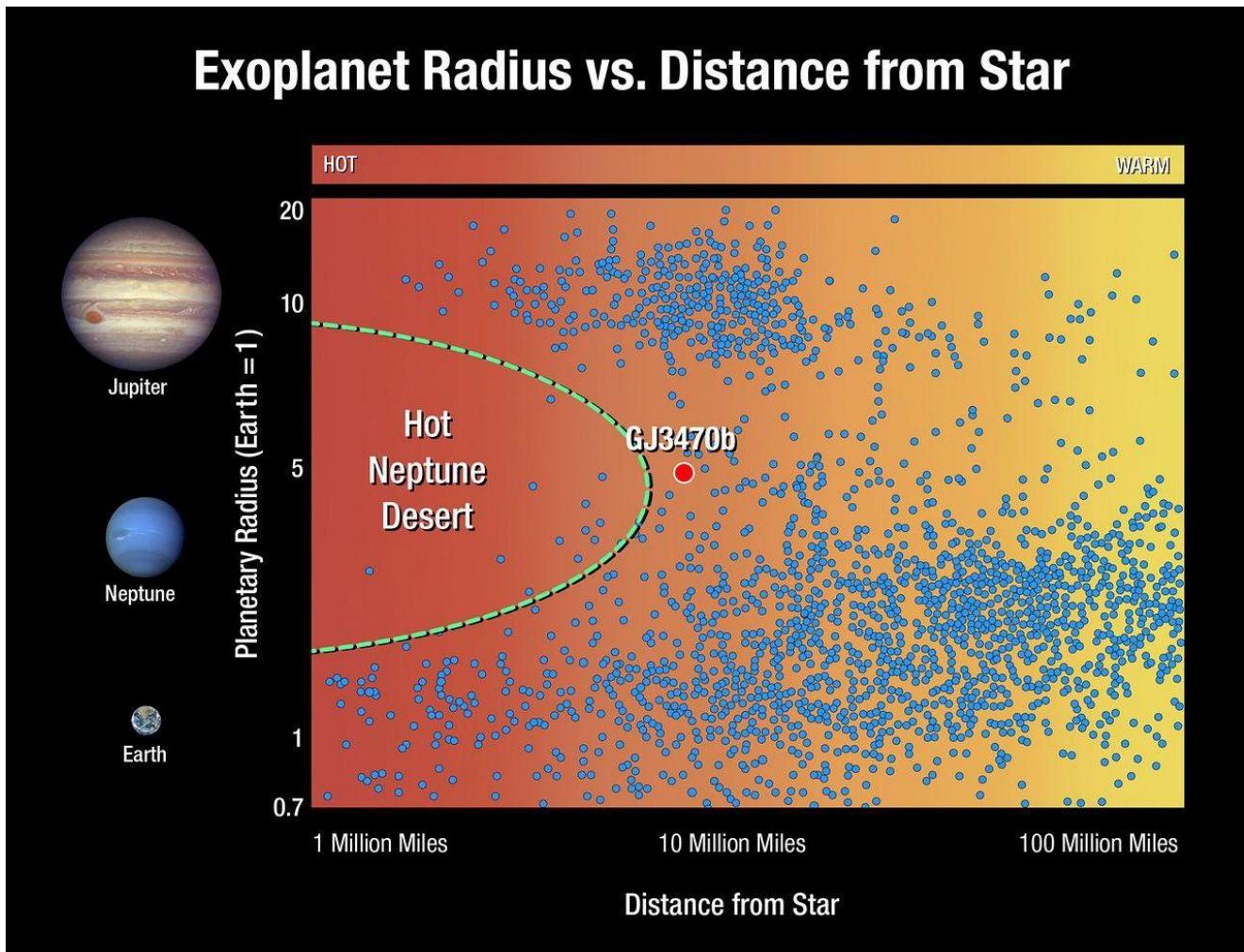


Figura 05: Este gráfico muestra los exoplanetas en función de su tamaño y distancia a su estrella. Cada punto representa un exoplaneta. Los planetas del tamaño de Júpiter (situados en la parte superior del gráfico) y los planetas del tamaño de la Tierra y las llamadas super-Tierras (en la parte inferior) se encuentran tanto cerca como lejos de sus estrellas. Pero los planetas del tamaño de Neptuno (en el centro del gráfico) escasean cerca de sus estrellas. El llamado desierto de Neptunos calientes muestra que estos mundos extraterrestres son raros, o que fueron abundantes en un tiempo, pero han desaparecido. La detección de que GJ 3470b, un Neptuno caliente en el límite del desierto, está perdiendo rápidamente su atmósfera, lo que sugiere que los Neptunos más calientes pueden haberse erosionado hasta convertirse en super-Tierras rocosas más pequeñas.

Imagen: NASA, ESA y A. Feild (STScI)

Ambos planetas orbitan estrellas enanas rojas, pero GJ 3470b orbita una estrella mucho más joven, de sólo 2.000 millones de años, en comparación con la estrella de GJ 436b, de entre 4.000 y 8.000 millones de años. La estrella más joven es más energética, por lo que bombardea el planeta con una radiación más abrasadora que la que recibe GJ 436b.

El hallazgo de dos Neptunos evaporados y calientes refuerza la idea de que la versión más caliente de estos mundos, habitualmente distantes, puede ser una clase de planetas en transición. Puede que el destino final de los Neptunos calientes y muy calientes sea reducirse hasta convertirse en mini-Neptunos, planetas con atmósferas pesadas dominadas por hidrógeno, más grandes que la Tierra pero más pequeños que Neptuno. O puede que se reduzcan aún más y se conviertan en super-Tierras, versiones más masivas y rocosas de la Tierra.

En 2016, un estudio descubrió que los mundos con masa de Neptuno pueden ser el tipo más común de planeta que se forma en los reinos helados y exteriores de los sistemas planetarios. Los investigadores se centraron en planetas hallados mediante la técnica llamada microlente gravita-

cional, y el estudio proporcionó información relevante acerca de los tipos de planetas que esperan ser encontrados lejos de una estrella anfitriona, donde los científicos sospechan que los planetas se forman más eficientemente, llegando a la conclusión de que los planetas con masa de Neptuno, en estas órbitas exteriores, son unas 10 veces más comunes que los planetas con masa de Júpiter en órbitas similares a la de Júpiter.

Observando la frecuencia de planetas en comparación con las proporciones de masa de planetas y estrellas, y las distancias entre ellos, se ha determinado que los mundos fríos, de masa neptuniana, son probablemente los tipos más comunes de planetas más allá de la llamada línea de nieve, la distancia desde una estrella más allá de la cual el agua permanece congelada durante la formación planetaria. En el Sistema Solar, se cree que la línea de nieve estaba situada a unas 2,7 veces la distancia de la Tierra al Sol, lo que la sitúa en el centro del cinturón principal de asteroides actual.

- **Supertierras**

Las supertierras son planetas típicamente terrestres que pueden o no tener atmósfera. Son más masivos que la Tierra, pero más ligeros que Neptuno. Suelen tener el doble del tamaño de la Tierra aproximadamente, y hasta 10 veces su masa (Figura 06).

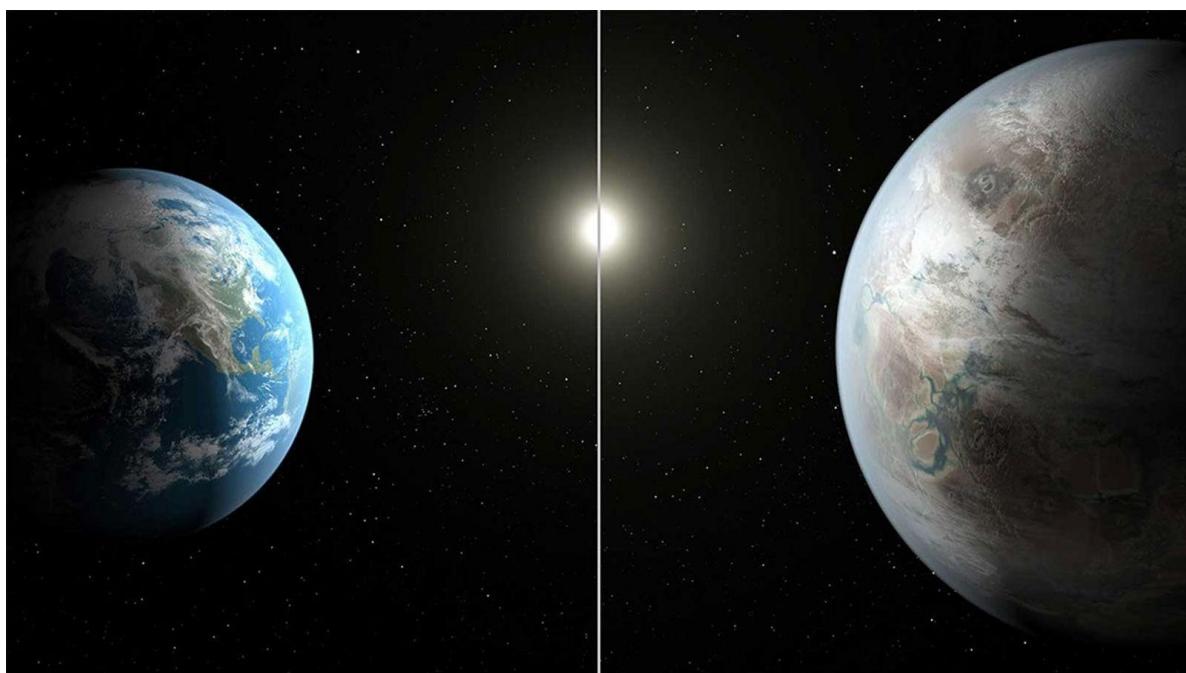


Figura 06: Este concepto artístico compara la Tierra (izquierda) con Kepler-452b, que es un 60 por ciento más grande. La ilustración representa una posible apariencia de Kepler-452b; los científicos no saben si el planeta tiene océanos y continentes como la Tierra. Ambos planetas orbitan alrededor de una estrella de tipo G2 con aproximadamente la misma temperatura; sin embargo, la estrella que alberga a Kepler-452b tiene 6.000 millones de años, 1.500 millones más que nuestro Sol. A medida que las estrellas envejecen, se hacen más grandes, cálidas y brillantes, como se representa en la ilustración. La estrella de Kepler-452b parece un poco más grande y brillante. Imagen: NASA/Ames/JPL-Caltech/T. Pyle

El término «supertierra» hace referencia únicamente al tamaño de un exoplaneta -mayor que la Tierra y menor que Neptuno-, pero no sugiere que sean necesariamente similares a nuestro planeta. La verdadera naturaleza de estos planetas sigue rodeada de incertidumbre porque no tenemos nada parecido en nuestro Sistema Solar y, sin embargo, son comunes entre los planetas encontrados hasta ahora en nuestra galaxia.

En las últimas tres décadas, hemos descubierto todo tipo de planetas extraños que no sabíamos que existían, y que no tienen análogos en nuestro Sistema Solar. Aún no conocemos lo suficiente sobre estos planetas como para saber en qué momento podrían dejar de tener una superficie rocosa. Pero en el rango de 3 a 10 veces la masa de la Tierra, podría haber una amplia variedad de composiciones planetarias, incluyendo mundos de agua, planetas bola de nieve o planetas que, como Neptuno, están compuestos en gran parte de gas denso. Los exoplanetas situados en el límite superior del tamaño de la super-Tierra también pueden denominarse sub-Neptunos o mini-Neptunos.

En 2019, el Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) de la NASA descubrió una super-Tierra y dos mini-Neptunos orbitando una estrella débil y fría a unos 73 años luz de distancia, en la constelación austral de "Pictor". Esta estrella enana de tipo M es un 40% más pequeña que el Sol, tanto en tamaño como en masa, y su temperatura superficial es un tercio más fría que la del Sol.

El planeta más interno, TOI 270 b, es probablemente una supertierra rocosa un 25% mayor que la Tierra, que orbita alrededor de la estrella cada 3 días y medio, a una distancia 13 veces superior a la que Mercurio orbita alrededor del Sol. Basándose en estudios estadísticos de exoplanetas conocidos de tamaño similar, el equipo científico estima que TOI 270 b tiene una masa unas 1,9 veces mayor que la de la Tierra.

Los otros dos planetas, TOI 270 c y d, son, respectivamente, 2,4 y 2,1 veces mayores que la Tierra y orbitan la estrella cada 5,7 y 11,4 días. Aunque sólo tienen la mitad del tamaño de Neptuno, ambos pueden ser similares en cuanto a composición, dominados por gases en lugar de rocas, y probablemente con masas de 7 y 5 veces la masa de la Tierra, respectivamente, lo que los convierte en mini-Neptunos.

Los investigadores esperan que una mayor exploración de la estrella TOI 270, pueda ayudar a explicar cómo se formaron dos de estos mini-Neptunos junto a un mundo de tamaño casi terrestre, sin descartar que otras investigaciones puedan revelar la existencia de más planetas en ese sistema. Si el planeta d tiene un núcleo rocoso cubierto por una gruesa atmósfera, su superficie sería demasiado cálida para la presencia de agua líquida, considerada un requisito clave para un mundo potencialmente habitable, aunque estudios posteriores podrán, en su caso, descubrir otros planetas rocosos a distancias ligeramente mayores de la estrella, donde temperaturas más frías podrían permitir la acumulación de agua líquida en sus superficies.

Las observaciones del telescopio espacial Spitzer de la NASA dieron lugar al primer mapa de temperaturas de una supertierra en 2016, que revela oscilaciones extremas de temperatura de un lado a otro del planeta, e insinúa una razón para ello: los flujos de lava. La supertierra "55 Cancri e" está relativamente cerca de la Tierra, a 41 años luz, y orbita muy cerca de su estrella, girando a su alrededor cada 18 horas. Debido a su proximidad a la estrella, el planeta tiene rotación capturada, al igual que nuestra Luna respecto a la Tierra. Esto significa que un lado de 55 Cancri e, denominado lado diurno, siempre se está expuesto al intenso calor de su estrella, mientras que el lado nocturno permanece en la oscuridad y es mucho más frío.

Spitzer observó el planeta con su visión infrarroja durante un total de 80 horas, observándolo orbitar alrededor de su estrella en múltiples ocasiones. Estos datos permitieron a los científicos cartografiar los cambios de temperatura en todo el planeta. Para su sorpresa, descubrieron una drástica diferencia de temperatura de 1.300 K de un lado a otro del planeta. El lado más caliente tiene casi 2.700 K y el más frío 1.400 K.

Uno de los últimos descubrimientos interesantes, es el de una supertierra que orbita alrededor de una estrella relativamente cercana, similar al Sol, y que podría tratarse de un mundo habitable pero con cambios extremos de temperatura, desde un calor abrasador hasta un frío glacial.

El planeta, recién confirmado, es el más externo de los tres detectados hasta ahora alrededor de una estrella llamada HD 20794, a solo 20 años luz de la Tierra. Su órbita de 647 días es comparable a la de Marte en nuestro Sistema Solar, pero es muy excéntrica, lo que hace que el planeta se acerque lo suficiente a la estrella como para experimentar un calentamiento descontrolado durante parte de su año, y luego lo aleja lo suficiente como para congelar cualquier agua potencial en su superficie. El planeta ha estado oscilando entre estos extremos aproximadamente cada 300 días, durante, probablemente, miles de millones de años.

El planeta pasa una buena parte de su año en la «zona habitable» alrededor de su estrella, la distancia orbital que permitiría la formación de agua líquida en la superficie en condiciones atmosféricas adecuadas, pero debido a su órbita excéntrica, queda fuera del límite interior de la zona habitable cuando está más cerca de la estrella, y fuera del borde exterior cuando está más lejos. En su punto más cercano, la distancia del planeta a la estrella es comparable a la distancia de Venus al Sol; en su punto más lejano, es casi el doble de la distancia de la Tierra al Sol. El planeta es posiblemente rocoso, como la Tierra, pero podría ser una versión más pesada, unas seis veces más masivo que nuestro planeta. La estrella HD 20794 y su grupo de posibles planetas han sido objeto de numerosos estudios, pero el equipo internacional de astrónomos que confirmó la existencia del planeta exterior, dirigido por Nicola Nari, de Light Bridges S.L. y el Instituto de Astrofísica de Canarias, examinó más de 20 años de datos para determinar las órbitas y las masas probables de los tres planetas de ese sistema planetario.

Los científicos se basaron en datos de dos instrumentos terrestres de precisión: HARPS, el buscador de planetas de alta precisión por velocidad radial en La Silla, Chile, y ESPRESSO, el espectrógrafo Echelle para exoplanetas rocosos y observaciones espectroscópicas estables en el Cerro Paranal, Chile. Ambos instrumentos, conectados a potentes telescopios, miden pequeños cambios en el espectro de luz de las estrellas, causados por la gravedad de los planetas que tiran de la estrella hacia adelante y hacia atrás mientras orbitan.

Pero esos pequeños cambios en el espectro de la estrella también pueden ser causados por "impostores": manchas, erupciones u otras actividades en la superficie de la estrella, que se desplazan a medida que la estrella gira y se hacen pasar por planetas en órbita. El equipo científico pasó años analizando minuciosamente los cambios en el espectro, o datos de «velocidad radial», en busca de cualquier signo de ruido de fondo o incluso de vibraciones de los propios instrumentos. Confirmaron que la estrella HD 20794 era bastante tranquila, no propensa a explosiones que pudieran confundirse con signos de planetas en órbita.

La relativa cercanía de HD 20974, a solo 20 años luz de distancia, su brillo y su bajo nivel de actividad superficial, por no mencionar los salvajes cambios de temperatura de su tercer planeta, podrían convertir a este sistema en un candidato ideal para ser examinado por el "Observatorio de Mundos Habitables de la NASA" (HWO), que entrará en servicio durante las próximas décadas.

El equipo científico internacional que confirmó la existencia de esta supertierra excéntrica, estaba dirigido por la investigadora Nicola Nari, de Light Bridges S.L. y del Instituto de Astrofísica de Canarias, e incluía al Dr. Michael Cretignier, de la Universidad de Oxford, quien fue el primero en captar la señal del posible planeta en el año 2022. Su artículo, «Revisiting the multi-planet system of the nearby star HD 20794», fue publicado en línea por la revista *Astronomy and Astrophysics* en el mes de enero de este año 2025.

- **Terrestres**

Los planetas terrestres son del tamaño de la Tierra o menores, compuestos de rocas, silicatos, agua y carbono. Nuevas investigaciones determinarán si algunos de ellos poseen atmósferas, océanos u otros signos de habitabilidad.

En nuestro Sistema Solar, la Tierra, Marte, Mercurio y Venus son planetas terrestres o rocosos. Para los planetas fuera de nuestro Sistema Solar, se consideran terrestres los que tienen entre la mitad y el doble del tamaño de la Tierra, y otros pueden ser incluso más pequeños (Figura 07).

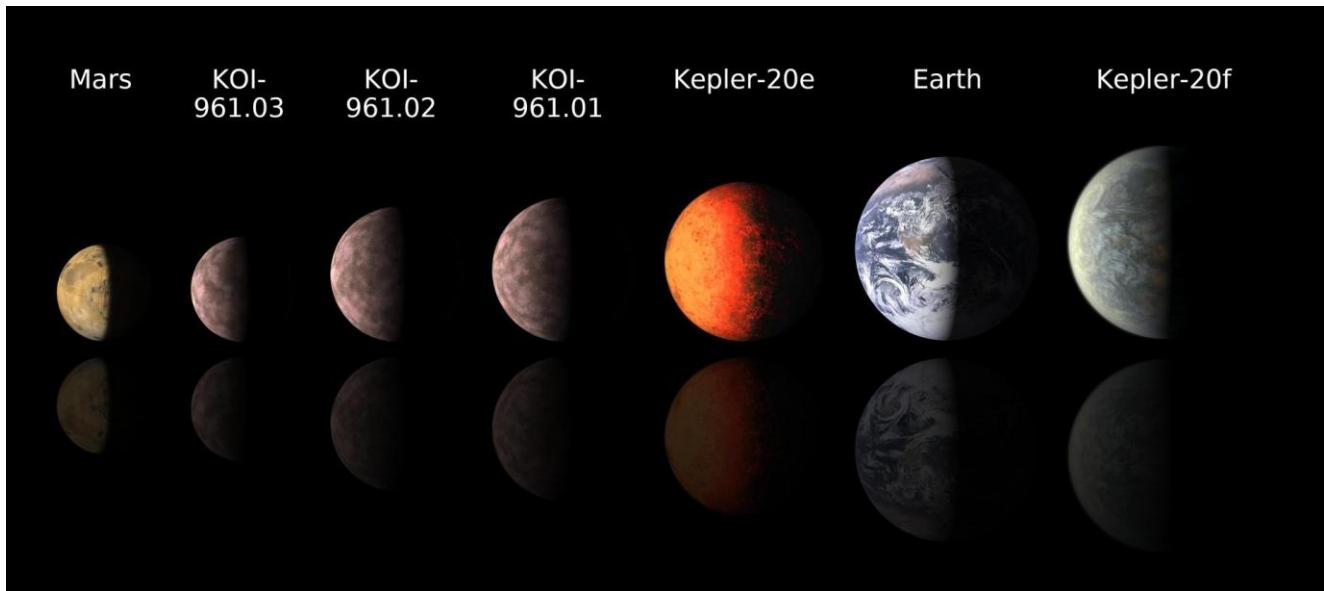


Figura 07: Algunos exoplanetas de tipo terrestre recientemente descubiertos, en comparación con la Tierra y Marte. Imagen: NASA/JPL-Caltech

En general, los planetas terrestres tienen una composición en la que predomina la roca o/y el hierro, y una superficie sólida o líquida. Estos mundos lejanos pueden tener atmósferas gaseosas, pero no es una característica definitoria.

Hemos encontrado planetas rocosos del tamaño de la Tierra, a la distancia adecuada de sus estrellas madre para albergar agua líquida (lo que se conoce como zona habitable). Aunque estas características no garantizan la existencia de un mundo habitable -todavía no podemos saber si estos planetas poseen realmente atmósferas u océanos-, pueden ayudarnos a orientarnos en la dirección correcta.

Los futuros telescopios espaciales podrán analizar la luz de algunos de estos planetas, buscando agua o una mezcla de gases que se parezca a nuestra propia atmósfera, y conoceremos mejor las temperaturas de la superficie. A medida que vayamos "marcando" elementos de la lista de habitabilidad, estaremos cada vez más cerca de encontrar un mundo con signos reconocibles de vida.

En el año 2017, la NASA anunció el descubrimiento de la mayor cantidad de planetas del tamaño de la Tierra encontrados en la zona habitable de una sola estrella, llamada TRAPPIST-1. Este sistema de siete mundos rocosos -todos ellos con potencial para albergar agua en su superficie- es un descubrimiento emocionante en la búsqueda de vida en otros mundos. El estudio futuro de este sistema planetario único podría revelar condiciones adecuadas para la vida.

En febrero de 2018, un análisis más detallado de los siete planetas sugirió que algunos podrían albergar mucha más agua que los océanos de la Tierra, en forma de vapor de agua atmosférico para los planetas más cercanos a su estrella, agua líquida para otros y hielo para los más lejanos. Esta investigación ha permitido determinar con mayor precisión la densidad de cada planeta, lo que convierte a TRAPPIST-1 en el sistema planetario más exhaustivamente conocido aparte del nuestro.

Es imposible saber exactamente cómo es cada planeta, porque están muy lejos y son muy débiles en comparación con su estrella anfitriona. Por ejemplo en nuestro Sistema Solar, la Luna y Marte tienen casi la misma densidad, pero sus superficies son totalmente distintas.

A partir de los datos disponibles, los científicos piensan que este sistema planetario podría describirse en una primera aproximación de la siguiente manera:

Es probable que TRAPPIST-1b, el planeta más interior, tenga un núcleo rocoso rodeado de una atmósfera mucho más densa que la de la Tierra, y también es probable que TRAPPIST-1c tenga un interior rocoso, pero con una atmósfera más fina que la del planeta b. TRAPPIST-1d es el más ligero de los planetas de este sistema, con un 30% de la masa de la Tierra, pero los científicos no saben con certeza si posee una gran atmósfera, un océano o una capa de hielo; los tres elementos dotarían al planeta de una «envoltura» de sustancias volátiles, lo que tendría sentido para un planeta de su densidad (menos de la mitad que la Tierra).

A los científicos les sorprendió que TRAPPIST-1e fuera el único planeta del sistema ligeramente más denso que la Tierra, lo que sugiere que podría tener un núcleo de hierro más grande que el nuestro. Al igual que TRAPPIST-1c, no tiene necesariamente una atmósfera gruesa, océano o capa de hielo, lo que hace que estos dos planetas sean distintos en el sistema. Es un misterio por qué TRAPPIST-1e tiene una composición mucho más rocosa que el resto de los planetas, pero en términos de tamaño, densidad y cantidad de radiación que recibe de su estrella, es el planeta más parecido a la Tierra.

TRAPPIST-1f, g y h están lo suficientemente lejos de la estrella que los alberga como para que el agua que pudieran poseer en sus superficies se congele en forma de hielo. Si tienen atmósferas delgadas, es poco probable que contengan las moléculas pesadas de la Tierra, como el dióxido de carbono.

LAS ESTRELLAS DE LOS PLANETAS EXTRASOLARES

"La belleza de la vida no hace referencia a los átomos que la componen, sino a la forma en que estos átomos se juntan"

Carl Edward Sagan (1934-1996), astrónomo, cosmólogo, astrofísico, astrobiólogo y divulgador científico norteamericano.

Las estrellas son los componentes básicos de las galaxias; su edad, distribución y composición trazan la historia, dinámica y evolución de su galaxia. Las estrellas son responsables de la producción y distribución de elementos pesados como el carbono, el nitrógeno y el oxígeno.

Cada tipo de estrella tiene una zona habitable diferente. Como se ha visto, se trata del área alrededor de una estrella donde las condiciones son las adecuadas, ni demasiado calientes ni demasiado frías, para que exista agua líquida en la superficie de un planeta. (Por esta razón, la zona

habitável de una estrella suele denominarse informalmente «zona Ricitos de Oro», nombre tomado de un cuento de hadas infantil del norte de Europa escrito en 1837).

Estadísticamente, debería haber más de 100 000 millones de planetas (siendo muy conservadores) de muy diversos tamaños y características en nuestra galaxia, la Vía Láctea.

Los organismos complejos surgieron en la Tierra hace sólo 500 millones de años, y los humanos modernos llevamos aquí sólo 200 000 años, un abrir y cerrar de ojos en las escalas de tiempo cosmológicas.

La Tierra dejará de ser habitable para las formas superiores de vida en poco más de 1.000 millones de años, a medida que el Sol se caliente y seque nuestro planeta. Por ello, las estrellas ligeramente más frías que nuestro Sol -llamadas enanas naranjas- se consideran mejores para la vida avanzada. Pueden mantener su fusión nuclear de forma constante durante decenas de miles de millones de años. Esto abre un vasto espacio de tiempo para que la evolución biológica lleve a cabo infinidad de experimentos que den lugar a formas de vida robustas. Además, por cada estrella como nuestro Sol, hay tres veces más enanas naranjas en la Vía Láctea.

Un tipo de estrella aún más abundante, las enanas rojas (también conocidas como estrellas enanas M), tienen una vida aún más larga. Los planetas situados en la zona habitable de una enana roja, comparativamente estrecha y muy próxima a la estrella, están expuestos a niveles extremos de radiación de rayos X y ultravioleta, que pueden ser cientos de miles de veces más intensos que los que recibe la Tierra del Sol, por lo que los planetas de las zonas habitables de las enanas rojas pueden quedar totalmente secos y sus atmósferas pueden desaparecer muy pronto. Las enanas rojas suelen "calmarse" al cabo de unos miles de millones de años, pero sus primeros estallidos podrían impedir que sus planetas evolucionen para ser más hospitalarios.

Las estrellas nacen de vastas nubes de gas y polvo, conocidas como nebulosas, que se encuentran dispersas por el interior de las galaxias. A lo largo de miles o millones de años, la gravedad puede hacer que las zonas más densas de una nebulosa colapsen por su propio peso. Al colapsar una nube, en su mayor parte de hidrógeno, el material de su centro comienza a calentarse, y ese núcleo caliente de la nube en colapso, conocido como «protoestrella», es una estrella embrionaria. Algunas de estas nubes giratorias de gas y polvo en colapso se dividen en dos o tres acumulaciones diferenciadas que forman estrellas. Esto explicaría por qué la mayoría de las estrellas de la Vía Láctea nacen en parejas o en sistemas múltiples. Sin embargo, no todo este material acaba formando parte de la estrella: el polvo restante puede convertirse en planetas y lunas, asteroides y cometas, o simplemente puede permanecer como polvo.

A medida que pasan millones de años, la temperatura del núcleo de una protoestrella alcanza un punto en el que puede comenzar la fusión nuclear. La estrella entonces inicia la etapa más larga de su vida, llamada «secuencia principal». La mayoría de las estrellas de la Galaxia, incluido nuestro Sol, se clasifican como estrellas de secuencia principal. Se trata de un estado en el que la fusión nuclear en la estrella es estable y el hidrógeno se convierte en helio. Este proceso libera una gran cantidad de energía que mantiene la estrella caliente y brillante, y ejerce una presión hacia el exterior contra la increíble masa de material que, de otro modo, provocaría el colapso de la estrella sobre sí misma. El noventa por ciento de la vida de una estrella transcurre en la fase de secuencia principal.

Cuando miramos el cielo nocturno, es posible percibir que algunas estrellas brillan más que otras. El brillo de una estrella está relacionado con la cantidad de energía que emite, así como con su distancia a la Tierra. Las estrellas también varían en color, que va ligado a su temperatura, las más calientes parecen azules o blancas, mientras que las más frías parecen naranjas o rojas. Los astrónomos utilizan estas características para clasificar las estrellas de la secuencia principal en

categorías según su color y temperatura: O (azul), B (blanco azulado), A (blanco), F (blanco amarillento), G (amarillo), K (naranja) y M (rojo), de más calientes a más frías. Las estrellas que se encuentran al final de su vida están fuera de la secuencia principal. Entre ellas se incluyen las supergigantes, las gigantes rojas y las enanas blancas (Figura 08).

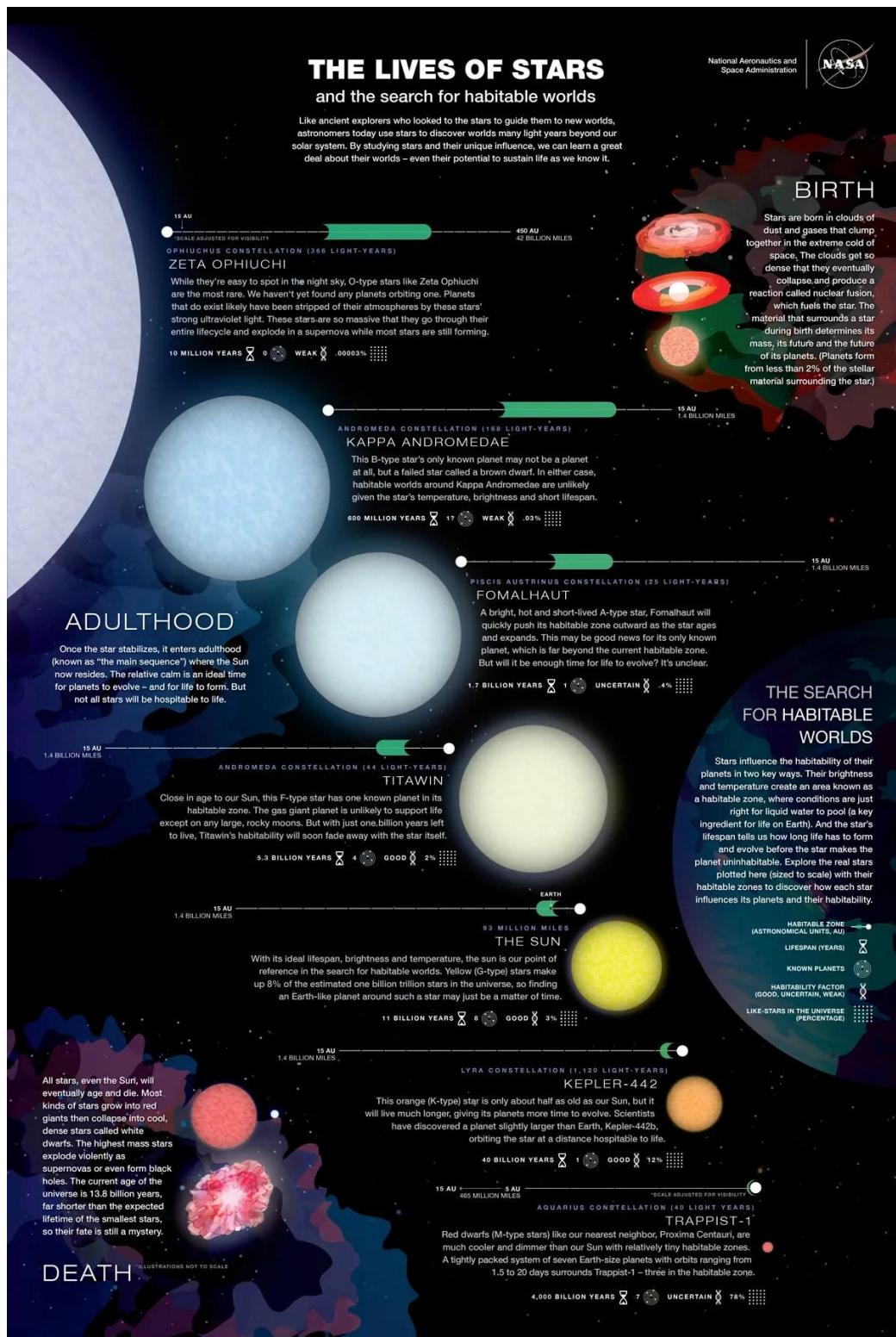


Figura 08: Clases espectrales y otras características de los principales tipos de estrellas. Imagen: NASA, ESA y Z. Levy (STScI)

Nuestro Sol se clasifica como una estrella de la secuencia principal, de tipo G (G2V), enana amarilla. Se prevé que nuestro Sol permanecerá en la fase de secuencia principal durante unos cuantos miles de millones de años más.

Las estrellas pueden vivir miles de millones de años, pero su vida puede ser más corta o más larga dependiendo de su tamaño (técnicamente, su masa). Cuanto más grande (o más masiva) es la estrella, más corta es su vida, ya que las estrellas más masivas consumen su combustible nuclear más rápidamente.

Como hemos visto anteriormente, el gas y el polvo que se arremolinan alrededor de una estrella durante su formación, son fundamentales para la formación de planetas a su alrededor. El polvo contiene elementos pesados como el carbono y el hierro, que forman los núcleos de los planetas.

Los científicos creen que los planetas comienzan como granos de polvo más pequeños que el grosor de un cabello humano, que surgen del gigantesco disco de gas y polvo protoplanetario con forma de rosquilla que rodea a las estrellas jóvenes. La gravedad y otras fuerzas provocan que el material dentro del disco colisione. Si la colisión es lo suficientemente suave, el material se fusiona y crece como bolas de nieve que ruedan, y con el tiempo, las partículas de polvo se combinan para formar guijarros, que evolucionan hasta convertirse en rocas del tamaño de un kilómetro. A medida que estos planetesimales, o planetas en formación, orbitan alrededor de su estrella, despejan el material de su trayectoria, dejando zonas de espacio casi vacío, salvo por restos de polvo fino. Al mismo tiempo, la estrella devora el gas cercano mientras empuja el material más lejano aún más lejos. Después de unos pocos millones de años, el disco se habrá transformado por completo, y gran parte de él habrá tomado la forma de nuevos mundos.

Cuando una estrella normal como nuestro Sol se queda sin hidrógeno para mantener la fusión nuclear, la estrella comienza a colapsar, pero la compactación de una estrella hace que se caliente de nuevo y sea capaz de fusionar el poco hidrógeno que queda en capas interiores que envuelven su núcleo. Esta capa de hidrógeno en combustión expande enormemente las capas externas de la estrella, y cuando esto ocurre, la estrella se convierte en una gigante roja. Cuando nuestro Sol entre en la fase de su vida de gigante roja, dentro de unos 5.000 millones de años, será tan grande que Mercurio quedará completamente engullido dentro del Sol.

Nuestro Sol gigante roja seguirá consumiendo helio y produciendo carbono. Cuando se agote el helio, el Sol volverá a sucumbir a la gravedad, y cuando el núcleo se contraiga, se producirá una gran liberación de energía, y el Sol se convertirá en una gigante aún más grande, con un radio que superará la órbita de la Tierra (Figura 09).

Después de aproximadamente mil millones de años como gigante roja, el Sol habrá expulsado sus capas externas hasta que, finalmente, quede expuesto su núcleo estelar. Esta ceniza estelar muerta (en términos de fusión nuclear) pero aún ferozmente caliente, se denomina "enana blanca".

Las enanas blancas tienen aproximadamente el tamaño de la Tierra, a pesar de contener la masa de una estrella como el Sol. La presión de los electrones que se mueven rápidamente evita que estas estrellas sigan colapsando, y cuanto más masivo es el núcleo, más densa es la enana blanca que se forma. Las enanas blancas se desvanecen en el olvido a lo largo de muchos miles de millones de años a medida que se enfrian gradualmente... *"Todos esos momentos se perderán en el tiempo, como lágrimas en la lluvia, ...es hora de morir"*, permítanme la licencia de mencionar el conocidísimo monólogo de Roy Batty en la película Blade Runner.

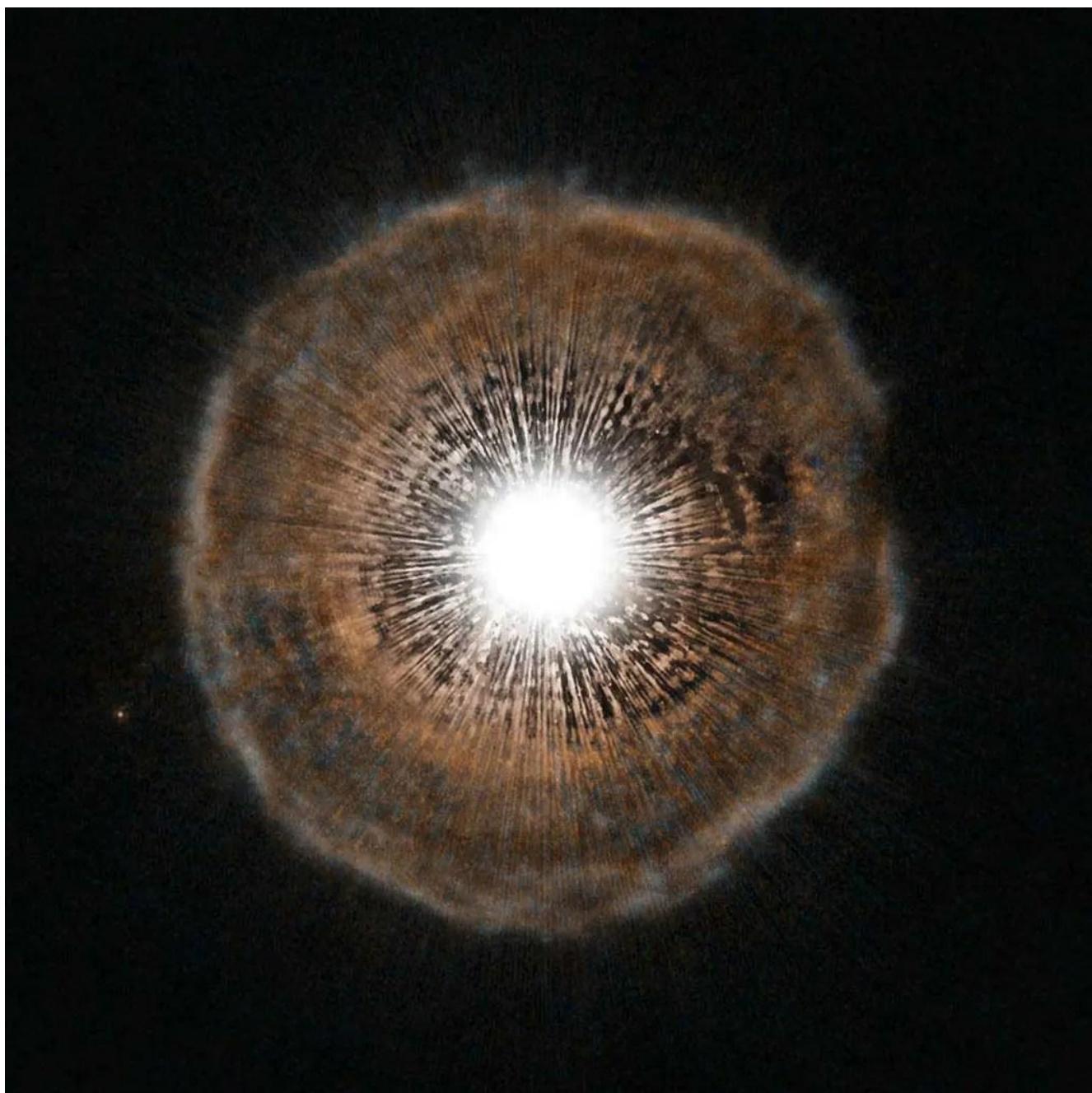


Figura 09: *U Camelopardalis*, o *U Cam* para abreviar, es una estrella que se acerca al final de su vida. Cuando las estrellas se quedan sin combustible, se vuelven inestables. Cada pocos miles de años, *U Cam* expulsa una capa casi esférica de gas cuando la capa de helio que rodea su núcleo comienza a fundirse. El gas expulsado por la estrella es claramente visible en esta imagen como una tenue burbuja de gas que rodea a la gigante roja. Imagen:ESA/NASA

Este destino solo espera a aquellas estrellas con una masa de hasta aproximadamente 1,4 veces la masa de nuestro Sol. Por encima de esa masa, la presión de los electrones no puede sostener el núcleo contra un colapso mayor y esas estrellas sufren un destino diferente.

Si una enana blanca se forma en un sistema estelar binario o múltiple, puede experimentar una desaparición más accidentada como "estrella nova". Nova significa «nuevo» en latín; antiguamente se pensaba que las novas eran estrellas nuevas en proceso de formación. Hoy en día, sabemos que son estrellas muy antiguas: enanas blancas. Si una enana blanca está lo suficientemente cerca de una estrella compañera, su gravedad puede arrastrar materia (principalmente hidrógeno) de las capas externas de esa estrella compañera hacia sí misma, acumulándose en su

superficie. Cuando se ha acumulado suficiente hidrógeno en la superficie, se produce una explosión de fusión nuclear, lo que hace que la enana blanca se ilumine considerablemente y expulse el material restante. En pocos días, el brillo se apaga y el ciclo comienza de nuevo. A veces, las enanas blancas especialmente masivas (las que se acercan al límite de 1,4 masas solares) pueden acumular tanta masa de esta manera que colapsan y explotan por completo, convirtiéndose en lo que se conoce como una "supernova".

Las estrellas con una masa mayor de ocho veces la de nuestro Sol están destinadas a morir en una explosión titánica llamada igualmente "supernova", que no es simplemente una nova más grande. En una nova, solo explota la superficie de la estrella, pero en una supernova, el núcleo de la estrella colapsa y luego explota. En las estrellas masivas, una compleja serie de reacciones nucleares conduce a la producción en su núcleo de elementos cada vez más pesados hasta llegar al hierro, y una vez alcanzado ese elemento, la estrella ha exprimido toda la energía que puede obtener de la fusión nuclear. La estrella ya no tiene forma de sostener su propia masa mediante nuevos procesos de fusión nuclear, y el núcleo de hierro colapsa. En cuestión de segundos, el núcleo se contrae de unos 8.000 km de diámetro a solo unos 20 km, y la temperatura se dispara a 100 000 millones de grados o más. Las capas externas de la estrella comienzan inicialmente a colapsar junto con el núcleo, pero rebotan con la enorme liberación de energía y son lanzadas violentamente hacia afuera. Las supernovas liberan una cantidad de energía casi inimaginable, tanta que durante días o semanas el brillo de una supernova puede superar al de toda una galaxia. Del mismo modo, en estas explosiones se producen todos los elementos naturales de número atómico superior al del hierro, junto a una rica variedad de partículas subatómicas.

Si el núcleo estelar en colapso en el centro de una supernova contiene entre 1,4 y 3 masas solares, el colapso continúa hasta que los electrones y los protones se combinan para formar neutrones, dando lugar a una estrella de neutrones. Debido a que contienen tanta masa concentrada en un volumen tan pequeño, las estrellas de neutrones son increíblemente densas, dando lugar a una intensa fuerza gravitatoria en su superficie. Al igual que las enanas blancas, si una estrella de neutrones se forma en un sistema estelar múltiple, puede acumular gas al arrancarlo de sus compañeras cercanas.

Las estrellas de neutrones también tienen potentes campos magnéticos que pueden acelerar las partículas atómicas alrededor de sus polos magnéticos, produciendo potentes haces de radiación. Esos haces barren el espacio como enormes reflectores a medida que la estrella gira. Si uno de esos haces está orientado de manera que apunta periódicamente hacia la Tierra, lo observamos como pulsos regulares, muy breves, de radiación que se producen cada vez que el polo magnético barre nuestra línea de visión. En este caso, la estrella de neutrones se conoce como "púlsar".

Si el núcleo estelar colapsado tiene una masa superior a tres masas solares, colapsa por completo y forma un agujero negro: un objeto infinitamente denso cuya gravedad es tan fuerte que nada puede escapar, ni siquiera la luz.

Dado que nuestros instrumentos están diseñados para detectar fotones, los agujeros negros solo pueden detectarse de forma indirecta. Las observaciones indirectas son posibles porque el campo gravitatorio de un agujero negro es tan potente que cualquier material cercano —a menudo las capas externas de una estrella compañera— es atrapado y arrastrado hacia él. A medida que la materia entra en espiral en un agujero negro, forma un disco, llamado disco de acreción, que se calienta a temperaturas enormes, emitiendo grandes cantidades de rayos X y rayos gamma que indican la presencia de la compañera oculta subyacente.

Los agujeros negros que están inactivos y no se «alimentan» activamente de discos de acreción también pueden detectarse indirectamente observando los movimientos de las estrellas cercanas. Por ejemplo, los astrónomos detectan el agujero negro supermasivo en el centro de la Vía Láctea

observando cómo las estrellas cercanas giran a velocidades asombrosas, solo posibles bajo la influencia de un objeto increíblemente masivo, pero invisible.

El polvo y los restos que dejan las novas y las supernovas, así como las gigantes rojas que expulsan sus capas externas, acaban mezclándose con el gas y el polvo interestelar circundante, formando nuevas nebulosas. Los productos creados al final de la vida de las estrellas enriquecen las galaxias con elementos pesados y compuestos químicos complejos. Con el tiempo, esos materiales se reciclan, proporcionando los componentes básicos para nuevas generaciones de estrellas y sistemas planetarios.

Algunos exoplanetas tienen soles similares al nuestro. Kepler-452b es un ejemplo de planeta que orbita alrededor de una estrella como nuestro Sol (Figura 10). Tanto nuestro Sol como Kepler-452 son estrellas enanas G, que representan sólo el 3% de las estrellas del universo. Más comunes son las estrellas enanas M, pequeñas estrellas rojas que constituyen el 75% de todas las estrellas que conocemos, como en el caso de los sistemas planetarios TRAPPIST-1 y Próxima Centauri.

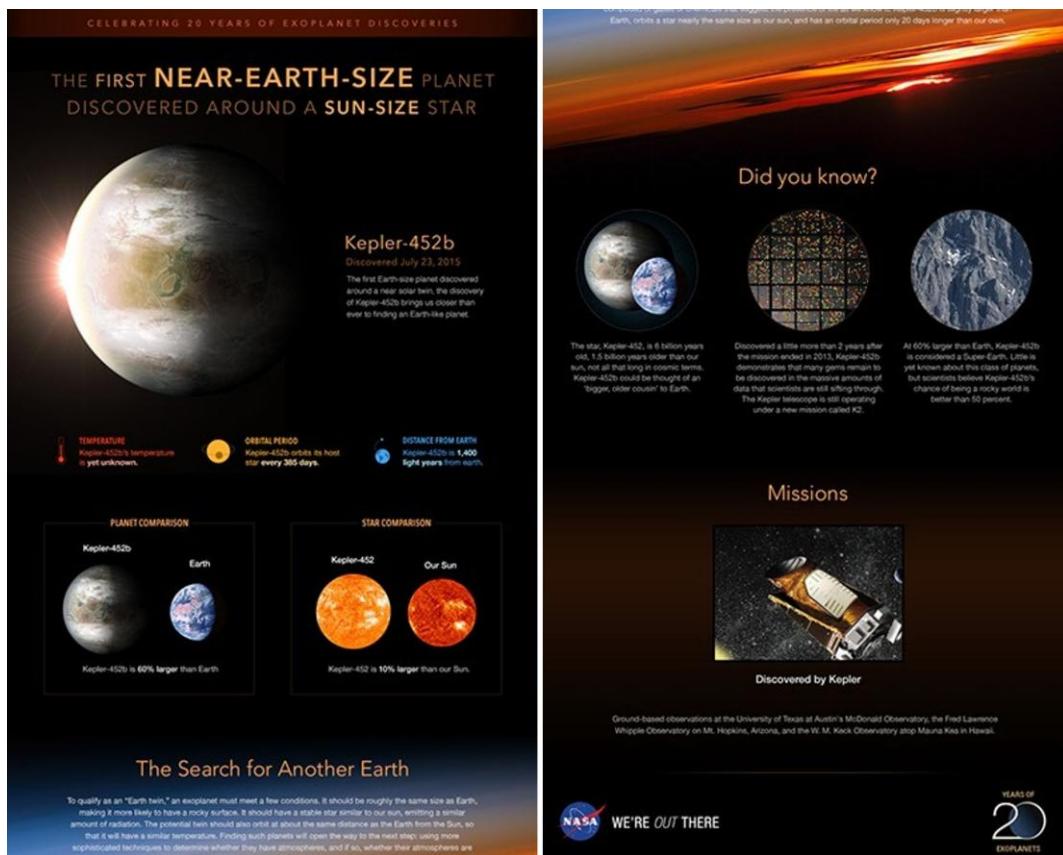


Figura 10: Primer planeta del tamaño de la Tierra descubierto alrededor de un gemelo solar cercano, el descubrimiento de Kepler-452b nos acerca más que nunca a la búsqueda de un planeta similar a la Tierra. Imagen: NASA

Los científicos han encontrado planetas alrededor de cinco tipos de estrellas que van del rojo al blanco azulado, pasando por el naranja. Algunos planetas incluso orbitan alrededor de dos o tres estrellas a la vez (Nota: «Enana» es en realidad el nombre de una estrella adulta de tamaño normal, lo que las distingue de las estrellas gigantes. Un ejemplo de estrella gigante es Rigel, la supergigante azul de la constelación de Orión).

¿ESTAMOS SOLOS EN EL COSMOS?

"Con tan solo mirarnos a nosotros mismos podemos ver cómo la vida inteligente podría resultar ser algo que no nos gustaría conocer"
Stephen W. Hawking (1942-2018), físico teórico, cosmólogo, astrofísico y divulgador científico inglés.

Cuanto más estudiamos, más cambian nuestros conocimientos y nuestra perspectiva sobre el Cosmos. Un análisis de los descubrimientos del telescopio espacial Kepler de la NASA indicaba que entre el 20 y el 50 por ciento de las estrellas del cielo podrían tener pequeños planetas potencialmente rocosos en sus zonas habitables. Datos más recientes muestran que el número es probablemente menor, entre 2 y 12 por ciento.

A primera vista, puede parecer decepcionante: menos mundos rocosos y potencialmente habitables entre los miles de exoplanetas encontrados hasta ahora. Pero eso no cambia una de las conclusiones más sorprendentes tras más de 20 años de observación: Los planetas en la zona habitable son comunes.

Se necesitan muchos más datos, incluida una mejor comprensión de la relación entre el tamaño de un planeta y su composición. Según una investigación publicada en octubre de 2020, alrededor de la mitad de las estrellas de temperatura similar a la de nuestro Sol podrían tener un planeta rocoso capaz de albergar agua líquida en su superficie.

Se calcula que nuestra galaxia alberga unos 300 millones de estos mundos potencialmente habitables, según los resultados de un estudio realizado con datos de Kepler. Algunos de estos exoplanetas podrían incluso ser nuestros vecinos interestelares: cuatro podrían encontrarse a menos de 30 años luz de nuestro Sol y el más cercano, a unos 20 años luz de nosotros.

Esta investigación nos ayuda a comprender la posibilidad de que estos planetas tengan los elementos necesarios para albergar vida. Se trata de una parte esencial de la astrobiología, el estudio de los orígenes y el futuro de la vida en nuestro universo.

La búsqueda de vida más allá de la Tierra no ha hecho más que empezar, pero la ciencia tiene una primera respuesta alentadora: hay muchos planetas en la Galaxia, muchos de ellos con similitudes con el nuestro. También se está buscando vida en nuestro Sistema Solar, en particular en algunas lunas de Júpiter, como Europa o Ganímedes, que tienen océanos subsuperficiales, o en Titán y Encélado, lunas de Saturno.

Las observaciones desde tierra y desde el espacio han confirmado la existencia de miles de planetas más allá de nuestro sistema solar, y la cifra de varios cientos de miles de millones en muchísimas galaxias es más que probable. ¿Es la vida en el cosmos algo frecuente y común? ¿O es increíblemente rara?

En los miles de años que la Humanidad lleva contemplando el cosmos, somos la primera generación en saber con certeza que las estrellas más allá de nuestro Sol están repletas de planetas. Los hay de muchos tipos y una buena parte de ellos son del tamaño de la Tierra, sin embargo, como ocurre con la mayoría de las cuestiones científicas, las respuestas que se van encontrando a estas cuestiones sólo generan más preguntas: ¿Cuál de estos exoplanetas alberga alguna forma de vida? ¿Con qué rapidez se inicia la vida? ¿Y cuánto dura?

El inquietante silencio del universo tiene nombre propio: la «paradoja de Fermi». El físico Enrico Fermi planteó la famosa pregunta ¿dónde está todo el mundo?, Incluso a velocidades de viaje lentas, los miles de millones de años de existencia del universo dan tiempo suficiente para que

formas de vida inteligentes y tecnológicas recorran la galaxia, pero más sorprendente aún es no haber recibido señales de radio, por ejemplo, o en otras frecuencias del espectro electromagnético, muchísimo más eficientes en cuanto a comunicaciones interestelares o intergalácticas. ¿Por qué, entonces, el cosmos está tan silencioso?

Mientras tanto, los descubrimientos de exoplanetas en las últimas dos décadas han completado algunos de los términos de la tan debatida Ecuación de Drake (Figura 11), una cadena de números que algún día podría decírnos cuántas civilizaciones inteligentes podemos esperar encontrar. La mayoría de sus términos siguen en blanco -la fracción de planetas con vida, con vida inteligente, con tecnología detectable-, pero la propia ecuación sugiere que algún día podríamos llegar a una respuesta. Resulta al menos un poco más esperanzador que el silencio de Fermi.

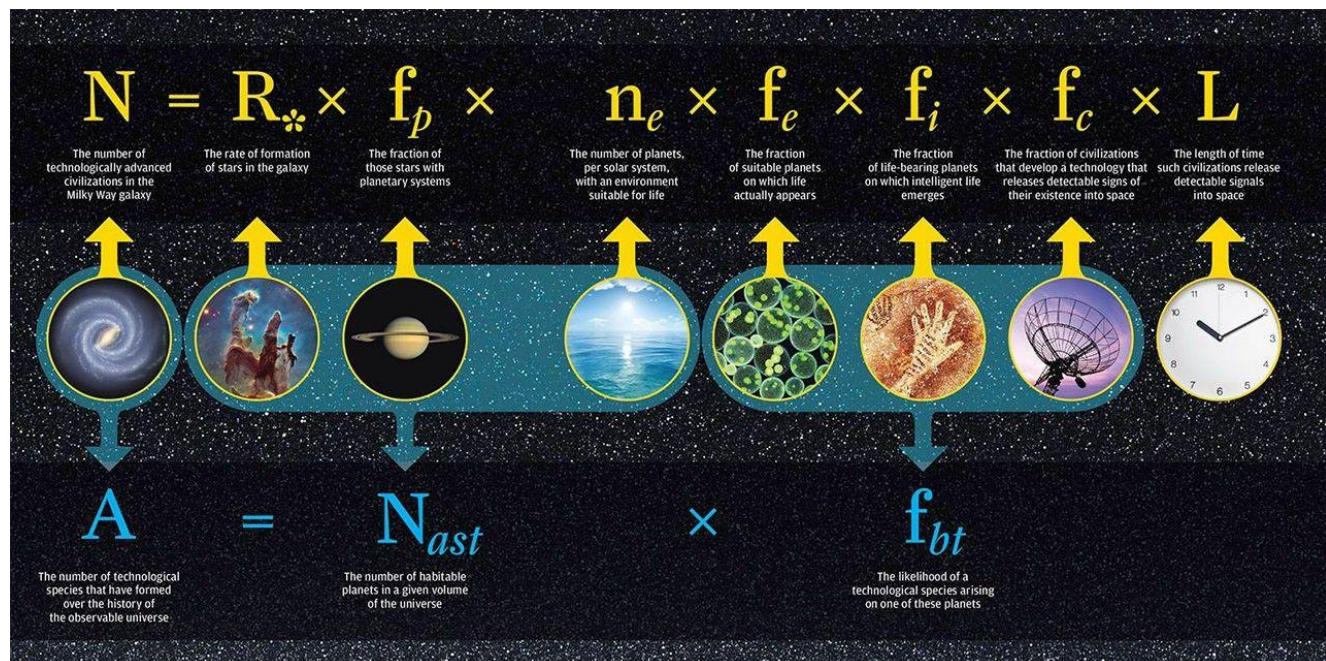


Figura 11: Ecuación de Drake revisada. Imagen: Universidad de Rochester

Nos encontramos en una encrucijada en la búsqueda de vida extraterrestre. Hemos encontrado miles de planetas en nuestra Vía Láctea, una gran parte de ellos del tamaño de la Tierra y orbitando en las «zonas habitables» de sus estrellas. Sabemos que la Galaxia alberga miles de millones de planetas. Nuestros telescopios espaciales y terrestres, así como nuestra tecnología de teledetección, son cada vez más potentes. Sin embargo, hasta ahora, la única vida que conocemos está aquí mismo, en casa. De momento, miramos al vacío con la esperanza de que alguien nos devuelva la mirada.

Búsqueda de vida fuera del Sistema Solar

La existencia de vida más allá de la Tierra es una de las cuestiones más profundas de todos los tiempos. La respuesta nos cambiará para siempre, ya revele un universo rico en vida, uno en el que la vida es rara y frágil, o incluso un universo en el que no podemos encontrar vida alguna.

La búsqueda de una respuesta también está revelando detalles importantes sobre nuestro propio lugar en el universo: de dónde venimos, cómo surgió la vida y, tal vez, hacia dónde nos dirigimos.

Los próximos años y décadas nos acercarán cada vez más a lo último en autorreflexión: una imagen especular de nuestro propio planeta Tierra. Un mundo pequeño, rocoso, con nubes, océanos y una atmósfera con indicios de posible vida. Podría tratarse de una combinación de gases - oxígeno, dióxido de carbono y metano- que, por sí solos, no nos dicen gran cosa, pero que juntos lo dicen todo.

Un mundo así podría estar a cientos de años luz de distancia, quizás fuera de nuestro alcance para siempre, pero las pruebas moleculares que leamos en su atmósfera, utilizando una tecnología cada vez más aguda, podrían darnos la respuesta que llevamos esperando desde los albores de la Humanidad: No, no estamos solos.

El objetivo último del Programa de Exoplanetas de la NASA es encontrar señales inequívocas de vida actual, aunque en términos cosmológicos ya sabemos que el término "actual" hay que tomarlo con mucha prudencia, la simultaneidad en el Universo es un concepto algo difuso.

Los propios cielos de los exoplanetas podrían albergar tales señales, a la espera de ser reveladas mediante el análisis detallado de las atmósferas de planetas situados mucho más allá de nuestro Sistema Solar.

Cuando analizamos la luz "disparada" por una estrella a través de la atmósfera de un planeta lejano, técnica conocida como espectroscopía de transmisión, el efecto se parece a un código de barras. Los trozos que faltan en el espectro luminoso nos indican qué ingredientes están presentes en la atmósfera alienígena. Un patrón de huecos negros podría indicar metano, otro, oxígeno. Verlos juntos podría ser un argumento de peso a favor de la presencia de vida. O podríamos leer un "código de barras" que mostrara la combustión de hidrocarburos (en otras palabras, smog), o poner de manifiesto biofirmas que apuntaran claramente a procesos metabólicos propios de los seres vivos.

Para que un mundo tenga vida tal y como la conocemos, entendemos que necesitaría agua líquida en la superficie, sin embargo, podría no parecerse en nada a la Tierra. Lo más adecuado es que el exoplaneta estuviera en la «zona habitable» de la estrella que orbita, donde no esté ni demasiado cerca ni demasiado lejos de su estrella. También llamada zona de Goldilocks (Ricitos de Oro), que como sabemos es el área alrededor de una estrella en la que podría existir agua líquida en planetas a lo largo de escalas de tiempo geológicas, y donde su atmósfera podría contener el equilibrio adecuado de gases que podrían sustentar la vida. En nuestro Sistema Solar, la zona Goldilocks se extiende entre las órbitas de Venus y Marte, aunque Venus se sale algo por el interior y la zona se va alejando del Sol poco a poco con el tiempo.

Los científicos de la NASA que buscan vida más allá de la Tierra forman un amplio equipo que investiga todos los escenarios, los externos al Sistema Solar, pero también en nuestro sistema planetario, como por ejemplo formas de vida antiguas o extremas en la Tierra. Podrían encontrarse indicios de vida en Marte, en Europa, la luna de Júpiter, o en Encélado, una de las lunas de Saturno, y las posibles misiones futuras se encuentran en fase preliminar o de planificación. Una mejor comprensión de la vida terrestre primitiva, o incluso de los seres vivos «extremófilos», podría servir de base a nuestros intentos de detectar vida más allá de nuestro planeta. Y para conocer realmente los exoplanetas lejanos es necesario conocer las estrellas en torno a las que orbitan; un mayor conocimiento de nuestro Sol nos ayudará a conocer otras estrellas.

Cuando se buscan exoplanetas posiblemente habitables, es útil empezar por mundos similares al nuestro. Pero, ¿qué significa «similares»? Se han detectado muchos planetas rocosos en el rango de tamaño de la Tierra: un punto a favor de la posible vida. Basándonos en lo que hemos observado en nuestro propio Sistema Solar, los mundos grandes y gaseosos como Júpiter parecen mucho menos propensos a ofrecer condiciones de habitabilidad.

Pero la mayoría de esos mundos del tamaño de la Tierra se han detectado orbitando estrellas enanas rojas; los planetas del tamaño de la Tierra en órbitas amplias alrededor de estrellas similares al Sol son mucho más difíciles de detectar.

Y, por supuesto, cuando hablamos de exoplanetas habitables, en realidad estamos hablando de sus estrellas, la fuerza dominante en cualquier sistema planetario. Las zonas habitables potencialmente capaces de albergar planetas con vida son más amplias en las estrellas más calientes. Las enanas rojas, más pequeñas y tenues, el tipo más común en nuestra galaxia la Vía Láctea, tienen zonas habitables mucho más estrechas, como en el sistema TRAPPIST-1. Los planetas situados en la zona habitable de una enana roja, comparativamente más estrecha y muy próxima a la estrella, están expuestos a niveles extremos de radiación de rayos X y ultravioleta (UV), que pueden ser hasta cientos de miles de veces más intensos que los que recibe la Tierra del Sol.

La vida en otros planetas podría no parecerse a nada a la terrestre, podría ser una vida muy exótica y completamente desconocida, aunque sus fundamentos bioquímicos no nos fueran tan ajenos. Pero tiene sentido, al menos al principio, buscar algo parecido a la bioquímica y biología molecular que se ha dado en la Tierra. La vida tal y como la conocemos debería ser más fácil de buscar para nosotros en un primer intento, y la zona habitable es nuestra mejor opción inicial.

Las similitudes con la Tierra son un primer paso alentador en la búsqueda de vida extraterrestre. Basándonos en lo que hemos observado en nuestro propio Sistema Solar, los mundos grandes y gaseosos como Júpiter parecen mucho menos propensos a ofrecer condiciones de habitabilidad.

Sin embargo, la mayoría de estos mundos del tamaño de la Tierra se han detectado orbitando estrellas enanas rojas, y no tanto estrellas similares al Sol, mucho más difíciles de detectar. El inconveniente es que estas enanas rojas tienen unas condiciones potencialmente mortales, especialmente en sus años más jóvenes, como por ejemplo la eyeción frecuente de potentes llamaradas desde su superficie. Estas erupciones podrían esterilizar planetas en órbita cercana en los que la vida apenas haya comenzado a afianzarse. Es un ataque contra la vida.

Dado que nuestro Sol ha albergado vida en la Tierra durante casi 4.000 millones de años, la sabiduría convencional sugeriría que las estrellas como él serían las principales candidatas en la búsqueda de otros mundos potencialmente habitables. Sin embargo, ya sabemos que las estrellas amarillas de tipo G, como nuestro Sol, tienen una vida más corta y son menos comunes en nuestra galaxia. Mejores candidatas para la vida avanzada parecen las estrellas enanas naranjas, de vida más larga y que pueden permanecer en la secuencia principal, emitiendo su energía de forma estable, durante decenas de miles de millones de años. Esto abre un vasto lapso de tiempo para que la evolución biológica lleve a cabo infinidad de experimentos que den lugar a formas de vida robustas. Además, por cada estrella como nuestro Sol hay tres veces más enanas naranjas en la Vía Láctea, como se mencionó anteriormente.

Según afirman muchos científicos, las enanas K son las verdaderas estrellas "Ricitos de Oro", encontrándose en el "punto dulce", con propiedades intermedias entre las estrellas de tipo solar (estrellas G), más raras y luminosas pero de vida más corta, y las estrellas enanas rojas (estrellas M), más numerosas. Las estrellas K, especialmente las más cálidas, tienen lo mejor de todos los mundos. Si se buscan planetas habitables, la abundancia de estrellas K aumenta las posibilidades de encontrar vida (Figura 12).

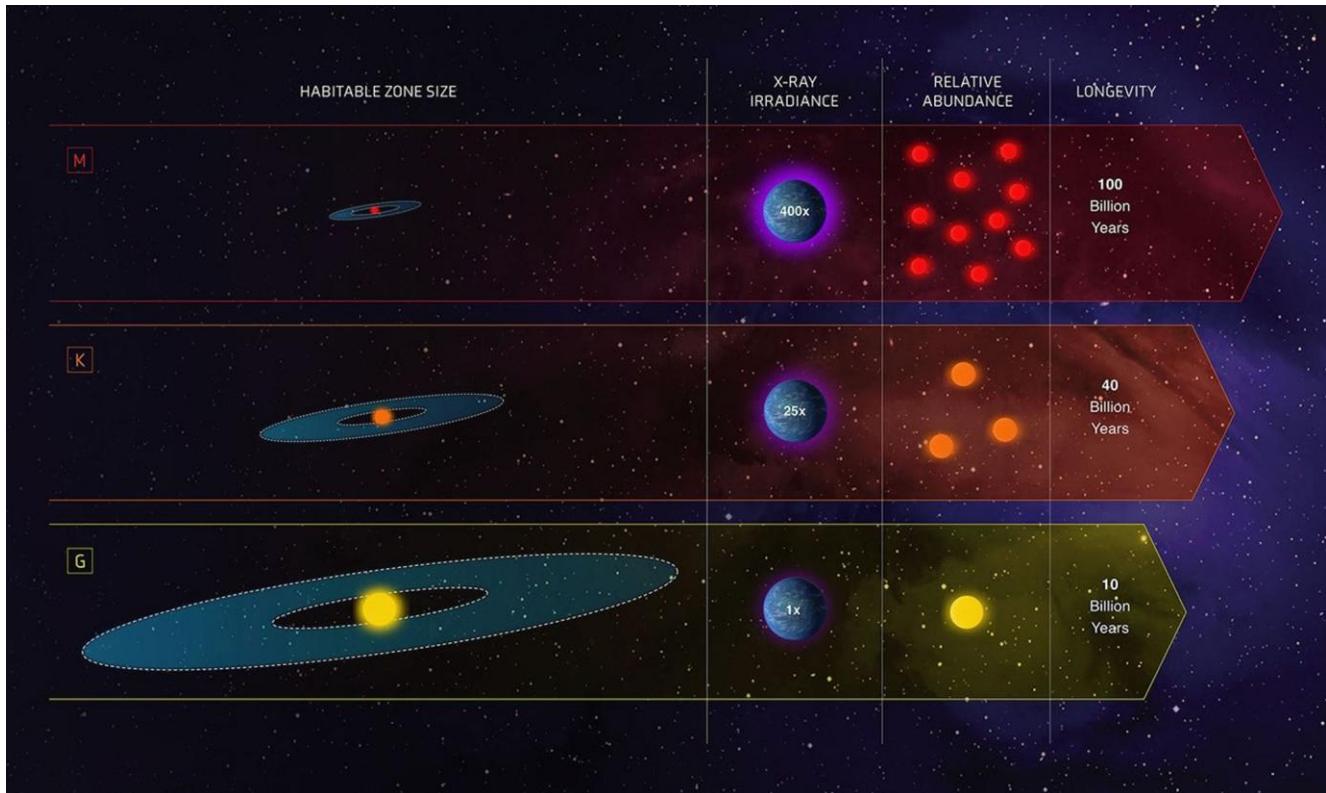


Figura 12: Esta infografía compara las características de tres clases de estrellas de nuestra galaxia: las estrellas similares al Sol se clasifican como estrellas de tipo G; las estrellas menos masivas y más frías que nuestro Sol son las enanas K; y las estrellas aún más débiles y frías son las enanas M, de color rojizo. Las zonas habitables, potencialmente capaces de albergar planetas con vida, son más amplias en las estrellas más calientes. La longevidad de las estrellas enanas rojas M puede superar los 100 000 millones de años. La edad de las enanas K puede oscilar entre 15 000 y 45 000 millones de años. Mientras tanto, nuestro Sol sólo dura 10 000 millones de años. La cantidad relativa de radiación nociva para la vida, tal y como la conocemos, que emiten las estrellas puede ser de 80 a 500 veces más intensa para las enanas M en relación con nuestro Sol, pero sólo de 5 a 25 veces más intensa para las enanas K anaranjadas. Las enanas rojas constituyen la mayor parte de la población de la Vía Láctea, alrededor del 73%. Las estrellas similares al Sol representan sólo el 6% de la población, y las enanas K, el 13%. Imagen: NASA, ESA y Z. Levy (STScI)

Hasta ahora, los astrónomos han detectado relativamente pocos sistemas planetarios con estructuras similares a la de nuestro Sistema Solar. La Tierra es el único planeta que conocemos con vida... hasta ahora. Los científicos están buscando en la Galaxia planetas similares a la Tierra con señales de vida. Como vemos en nuestro planeta, la vida puede adaptarse a condiciones que los seres humanos considerarían muy duras (temperatura, radiación, salinidad, acidez, aridez, etc.), y por lo tanto, es posible que la vida haya comenzado en otros mundos y se haya adaptado a condiciones muy diferentes a las que estamos acostumbrados.

El objetivo final del programa de exoplanetas de la NASA es encontrar indicios inequívocos de vida actual en un planeta más allá de la Tierra. La rapidez con la que esto pueda suceder depende de dos incógnitas: la prevalencia de la vida en la galaxia y la suerte que tengamos al dar esos primeros pasos exploratorios y tentativos.

Los datos de nuestras primeras misiones de búsqueda de planetas, como Kepler de la NASA y su encarnación ampliada, K2, o el telescopio espacial James Webb, están aportando pruebas básicas de la existencia de mundos potencialmente habitables. James Webb, diseñado en parte para investigar gigantes gaseosos y supertierras, podría encontrar una versión descomunal de nuestro planeta. El telescopio espacial Nancy Grace Roman de la NASA (antes conocido como Wide-Field Infrared Survey Telescope, y cuyo lanzamiento está previsto para mayo de 2027) podría centrarse en la luz reflejada de un planeta lejano para detectar indicios de oxígeno, vapor de agua y otras moléculas directamente relacionados con la vida.

Pero, a menos que tengamos suerte, la búsqueda de señales de vida podría llevar décadas. Descubrir otra "canica azul y blanca" escondida en el campo estelar, como un grano de arena en la playa, probablemente requerirá telescopios aún mayores. Ya se están planificando los primeros diseños preliminares para ese buscador de planetas de última generación, que se lanzará al espacio en la década de 2030 o 2040.

Paralelamente se están buscando posibles combinaciones químicas que puedan indicar la presencia de vida extraterrestre. Los bioquímicos se están centrando primero en los seis elementos principales asociados con la vida en la Tierra: carbono, nitrógeno, oxígeno, fósforo, azufre e hidrógeno.

El telescopio espacial James Webb, lanzado en 2021, podría obtener los primeros resultados de los estudios sobre la mezcla de gases en las atmósferas de exoplanetas del tamaño de la Tierra. El JWST, o un observatorio espacial similar en el futuro, podrá captar señales de una atmósfera como la nuestra, con oxígeno, dióxido de carbono y metano, lo que supondría un fuerte indicio de posible vida. Los telescopios del futuro podrán incluso captar señales de fotosíntesis -la transformación de la luz en energía química por las plantas- o incluso gases o moléculas que sugieran la presencia de vida animal. La vida inteligente y tecnológica podría crear contaminación atmosférica, como ocurre en nuestro planeta, también detectable desde lejos. Por supuesto, lo mejor que podríamos conseguir es una estimación de probabilidades. Aun así, un exoplaneta con, digamos, un 95 por ciento de probabilidad de vida supondría un avance de proporciones históricas.

La vida podría aparecer en nuestro propio vecindario, quizá bajo la superficie marciana o en los oscuros océanos subterráneos de Europa, la luna de Júpiter. O tal vez se haga realidad el sueño de todos los tiempos y escuchemos a escondidas las comunicaciones de civilizaciones extraterrestres. Incluso podríamos captar «tecnofirmas», o rastros de tecnología (por ejemplo, niebla tóxica). Sin embargo, salvo estos golpes de suerte, el trabajo será mucho más difícil. La luz será la clave: la luz de las atmósferas de los exoplanetas, compuesta por un espectro arco iris que podemos leer como un código de barras. Este método, denominado espectroscopía de tránsito, nos proporcionará un menú de gases y sustancias químicas presentes en los cielos de estos mundos, incluidas las relacionadas con la vida.

Los «extremófilos» son formas de vida que adoran los entornos extremos, prosperando en condiciones que matarían a cualquier otra cosa. Habitán en las piscinas químicas cáusticas del Parque Nacional de Yellowstone, en los valles secos de la Antártida, en respiraderos sobrecaleidos del fondo del océano, y pertenecen a ramas de la vida que se separaron de la nuestra hace miles de millones de años. También podrían ser análogos a la vida extraña en mundos lejanos.

Merece la pena terminar este apartado con una mención a un exoplaneta destacado, el "K2-18 b", que es un exoplaneta supertierra, con casi nueve veces la masa de la Tierra, y se encuentra a unos 124 años luz de distancia. Sólo tarda unos 33 días en orbitar su estrella, una enana roja más pequeña y fría que nuestro Sol, y se ubica en la zona habitable. El telescopio espacial Hubble detectó vapor de agua en la atmósfera de K2-18 b en el año 2019, por primera vez en un exoplaneta de zona habitable, y el telescopio espacial James Webb ha encontrado desde entonces moléculas que contienen carbono, incluyendo metano y dióxido de carbono, en su atmósfera. Las observaciones del JWST también revelaron la posible detección de una molécula llamada dimetil sulfuro. En la Tierra, la mayor parte del sulfuro de dimetilo de la atmósfera es emitido por el fitoplancton marino.

ALGO DE COSMOLOGÍA

"La inteligencia es un accidente de la evolución, y no necesariamente una ventaja"
Isaac Asimov (1920-1992), profesor de bioquímica, divulgador científico y escritor de ciencia ficción.

¿Qué es el Universo?: El universo lo es todo. Incluye todo el espacio, y toda la materia y energía que contiene el espacio. Incluso incluye el tiempo mismo y, por supuesto, te incluye a ti y a mí.

La Tierra y la Luna forman parte del universo, al igual que los demás planetas y sus muchas docenas de lunas, los asteroides y los cometas, todos orbitando alrededor del Sol, que a su vez gira alrededor del centro galáctico desde uno de sus brazos. La Vía Láctea es solo una de los miles de millones de galaxias del universo observable; se cree que todas ellas, incluida la nuestra, tienen agujeros negros supermasivos en su centro (Figura 13). Todas las estrellas de todas las galaxias y todo lo demás que los astrónomos ni siquiera pueden observar, forman parte del universo. Es, sencillamente, todo.



Figura 13: Este concepto artístico representa el agujero negro supermasivo situado en el centro de la Vía Láctea, conocido como Sagitario A (A estrella). Está rodeado por un disco de acreción de gas caliente. La gravedad del agujero negro curva la luz procedente del lado más alejado del disco, haciendo que parezca envolverse por encima y por debajo del agujero negro. En el disco se observan varios puntos calientes que se asemejan a las erupciones solares, pero a una escala más energética. El telescopio espacial James Webb de la NASA ha detectado tanto llamaradas brillantes como parpadeos más débiles procedentes de Sagitario A*. Los destellos son tan rápidos que deben originarse muy cerca del agujero negro.*

Ilustración: NASA, ESA, CSA, Ralf Crawford (STScI)

Aunque el "universo" pueda parecer un lugar extraño, no es un lugar lejano. Dondequiera que estemos ahora mismo, el espacio exterior está a solo 100 kilómetros de distancia. Ya sea de día o de noche, estemos en casa o al aire libre, durmiendo, o almorcando, el espacio exterior está a solo unas pocas docenas de kilómetros por encima de tu cabeza. También está debajo de nosotros, a unos 12 800 kilómetros por debajo de nuestros pies, en el lado opuesto de la Tierra, al acecho del implacable vacío y de la radiación del espacio exterior.

De hecho, técnicamente estamos en el espacio en este momento. Los seres humanos dicen «en el espacio» como si estuviera allí y nosotros aquí, como si la Tierra estuviera separada del resto del universo. Pero la Tierra es un planeta, y está en el espacio y forma parte del universo al igual que los demás planetas. Da la casualidad de que aquí hay vida y que el entorno cercano a la superficie de este planeta en particular es hospitalario para la vida tal y como la conocemos la Tierra es una pequeña y frágil excepción en el cosmos! Para los seres humanos y los demás seres que viven en nuestro planeta, prácticamente todo el cosmos es un entorno hostil y despiadado.

Nuestro planeta, la Tierra, es un oasis no solo en el espacio, sino también en el tiempo. Puede parecer permanente, pero todo el planeta es algo efímero en la vida del universo. Durante casi dos tercios del tiempo desde que comenzó el universo, la Tierra ni siquiera existía, y tampoco durará para siempre en su estado actual. Dentro de varios miles de millones de años, el Sol se expandirá, tragándose Mercurio y Venus, y llenando el cielo de la Tierra, incluso podría expandirse lo suficiente como para engullir a la propia Tierra. Es difícil estar seguro, al fin y al cabo los seres humanos apenas hemos empezado a descifrar el cosmos, pero cuando llegue ese momento probablemente la vida en la Tierra forme parte del pasado.

Si bien es difícil predecir con precisión el futuro lejano, el pasado lejano lo es un poco menos. Mediante el estudio de la desintegración radiactiva de los isótopos en la Tierra y en los asteroides, los científicos han podido verificar que nuestro planeta y el Sistema Solar se formaron hace unos 4600 millones de años, eso sin considerar el propio origen y evolución de nuestra estrella.

Por otro lado, el universo parece tener unos 13 800 millones de años. Los científicos han llegado a esa cifra calculando la edad de las estrellas más antiguas y la velocidad a la que se expande el universo observando el efecto Doppler en la luz de las galaxias, casi todas las cuales se alejan de nosotros y entre sí. Cuanto más lejos están las galaxias, más rápido se alejan, y cabría esperar que la gravedad ralentizara ese movimiento de expansión de las galaxias, pero sorprendentemente se están acelerando y los científicos no saben por qué. En un futuro lejano, las galaxias estarán tan lejos que su luz no será visible desde la Tierra.

En otras palabras, la materia, la energía y todo lo que hay en el universo (incluido el propio espacio) estaba más compactado ayer que hoy, y lo mismo puede decirse de cualquier momento del pasado, el año pasado, hace un millón de años, hace mil millones de años,... respecto a tiempos anteriores, aunque ya sabemos que el pasado no es infinito.

Al medir la velocidad de recesión de las galaxias y su distancia respecto a nosotros, los científicos han descubierto que, si pudiéramos retroceder lo suficiente, antes de que se formaran las galaxias y las estrellas comenzaran a fusionar hidrógeno en helio, todo estaba tan cerca y tan caliente que los átomos no podían formarse y los fotones no tenían dónde ir. Un poco más atrás en el tiempo, todo estaba en el mismo lugar, o dicho de otra manera, en realidad todo el universo (no solo la materia que contiene) era un solo punto. Estas cuestiones no son nada intuitivas, y los términos "lugar", "tiempo", "punto" hay que tomarlos con mucha precaución.

Sin embargo, no perdamos demasiado tiempo pensando en una misión para visitar el lugar donde nació el universo, ya que no se puede visitar el "lugar" donde ocurrió el Big Bang. No es que el universo fuera un espacio oscuro y vacío, y que en él se produjera una explosión de la que surgió toda la materia, como en primera instancia podríamos imaginar. El universo no existía, el espacio no existía, y el tiempo es parte del universo, por lo que tampoco existía. El tiempo también comenzó con el Big Bang. El espacio mismo se expandió desde un solo punto hasta convertirse en lo que observamos actualmente, a medida que el universo se expandía con el tiempo.

El universo contiene toda la energía y la materia que existe. Gran parte de la materia observable en el universo adopta la forma de átomos individuales de hidrógeno, que es el elemento químico

más simple, compuesto únicamente por un protón y un electrón (si el átomo también contiene un neutrón, se denomina deuterio). Dos o más átomos que comparten electrones forman una molécula. Muchos millones de partículas y moléculas juntas forman una partícula de polvo. Si se mezclan unas pocas toneladas de carbono, sílice, oxígeno, hielo y algunos metales, se obtiene un asteroide, o si se reúnen 333 000 masas terrestres de hidrógeno y helio, se obtiene una estrella similar al Sol.

Por razones prácticas, los seres humanos clasificamos las "acumulaciones de materia" en función de sus atributos. Las galaxias, los cúmulos estelares, los planetas, los planetas enanos, los planetas errantes, las lunas, los anillos, los cometas, los meteoritos,... todos ellos son agrupaciones de materia que presentan características diferentes entre sí, pero que obedecen a las mismas leyes naturales.

Los científicos han comenzado a contabilizar esos "grupos de materia" y las cifras resultantes son bastante impresionantes. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, contiene al menos 100 000 millones de estrellas, y el universo observable contiene al menos 100 000 millones de galaxias. Si todas las galaxias tuvieran el mismo tamaño, eso nos daría 10 mil millones de billones de estrellas en el universo observable.

Pero el universo también parece contener una gran cantidad de materia y energía que no podemos ver ni observar directamente. Toda la materia ordinaria (estrellas, planetas, cometas, asteroides, etc.) representa menos del 5 % de la materia del universo. Aproximadamente el 27 % del resto es materia oscura y el 68 % es energía oscura, ninguna de las cuales se comprende, ni remotamente, a día de hoy. El universo tal y como lo entendemos no funcionaría si no existieran la materia oscura y la energía oscura, y se les denomina «oscuras» porque no se pueden observar directamente, sólo sus efectos. Todavía no se ha conseguido analizar ni averiguar la composición de esa materia y energía oscuras, aunque se están haciendo enormes esfuerzos de investigación para integrarlas en un modelo de partículas unificado.

La comprensión humana de lo que es el universo, cómo funciona y cuán vasto es, ha evolucionado a lo largo de los siglos. Durante incontables generaciones, los seres humanos tuvieron pocos o ningún medio para comprender el universo. Nuestros antepasados lejanos, en cambio, se basaban en los mitos para explicar los orígenes de todo. Dado que fueron nuestros propios antepasados quienes los inventaron, los mitos reflejan las preocupaciones, esperanzas, aspiraciones o temores humanos, más que la naturaleza de la realidad.

Sin embargo, hace varios siglos, los seres humanos comenzaron a aplicar las matemáticas, la escritura y nuevos principios de investigación, en la búsqueda del conocimiento. Esos principios se perfeccionaron con el tiempo, al igual que las herramientas científicas, revelando finalmente pistas sobre la naturaleza del universo. Hace solo unos cientos de años, cuando la gente comenzó a investigar sistemáticamente la naturaleza de las cosas, la palabra «científico» ni siquiera existía (en su lugar, a los investigadores se les llamó "filósofos naturales" durante un tiempo), y desde entonces nuestro conocimiento del universo ha avanzado espectacularmente. Hace solo un siglo que los astrónomos observaron por primera vez galaxias más allá de la nuestra, y solo ha pasado medio siglo desde que los seres humanos comenzaron a enviar naves espaciales a otros mundos.

En el transcurso de una sola vida humana, las sondas espaciales han viajado al Sistema Solar exterior y han enviado las primeras imágenes cercanas de los cuatro planetas gigantes más exteriores y de sus innumerables lunas; los rovers han rodado por la superficie de Marte por primera vez, y tenemos un helicóptero sobrevolando sus valles y acantilados; los seres humanos han construido una estación espacial con tripulación permanente en órbita terrestre; y los primeros grandes telescopios espaciales han ofrecido unas vistas asombrosas de las partes más lejanas del cosmos que nunca antes se habían visto. Solo en los primeros años del siglo XXI, los astrónomos

descubrieron miles de planetas alrededor de otras estrellas, detectaron ondas gravitacionales por primera vez y obtuvieron la primera imagen de un agujero negro.

Con el avance constante de la tecnología y el conocimiento, acompañados de grandes dosis de imaginación, la comunidad científica continúa desvelando los secretos del cosmos. Nuevas perspectivas y nociones inspiradoras contribuyen a esta búsqueda y también surgen de ella. Aún no hemos enviado una sonda espacial ni siquiera a la más cercana de los miles de millones de estrellas de la galaxia, y nos quedan por explorar la mayoría de mundos de nuestro propio Sistema Solar. En resumen, la mayor parte del universo que puede conocerse sigue siendo desconocida.

Recapitulando, el Universo tiene casi 14 000 millones de años, nuestro Sistema Solar tiene 4.600 millones de años, la vida en la Tierra existe desde hace unos 3.800 millones de años y los seres humanos solo llevamos unos cientos de miles de años de existencia. En otras palabras, el universo ha existido aproximadamente 56 000 veces más tiempo que nuestra especie. Según ese cálculo, casi todo lo que ha sucedido ocurrió antes de que existieran los seres humanos, así que, por supuesto, tenemos un montón de preguntas. ¡En un sentido cósmico, acabamos de llegar aquí!.

Nuestras primeras décadas de exploración de nuestro propio Sistema Solar son sólo el comienzo. A partir de aquí, en solo una generación, nuestra comprensión del universo, y de nuestro lugar en él, habrá crecido y evolucionado, sin duda, de forma que hoy sólo podemos imaginar.

CATÁLOGOS DE EXOPLANETAS Y ESTRELLAS ADECUADAS

"El éxito consiste en ir de fracaso en fracaso sin perder el entusiasmo"
Winston Churchill (1874-1965), estadista, político, militar y escritor británico.

El "Catálogo de Estrellas Objetivo" es una guía de estrellas cercanas intrigantes, sugerentes y prometedoras, que los astrónomos desean estudiar con futuras misiones, como el "Observatorio de Mundos Habitables" (HWO), que se construirá específicamente para encontrar y observar exoplanetas similares a la Tierra, en busca de señales de vida.

Este catálogo de la NASA contiene algunas de las estrellas más prometedoras para explorar con una misión como el (HWO) y resto de instrumentos y telescopios especializados en la búsqueda de exoplanetas. Recomendado por las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina, el próximo gran telescopio espacial de la NASA, después del Telescopio Espacial Nancy Grace Roman que entrará en servicio después del año 2027, el "Observatorio de Mundos Habitables" será el primer observatorio construido específicamente para buscar y observar directamente exoplanetas similares a la Tierra, y estudiarlos en busca de signos de vida.

Según lo previsto, el HWO podrá asomarse a las zonas habitables de estrellas cercanas. Las estrellas de esta lista son "perfectas" para una misión de este tipo: tienen zonas habitables lo suficientemente alejadas de la estrella como para que el telescopio pueda ver claramente cualquier planeta, y cualquier exoplaneta del tamaño de la Tierra situado allí sería lo suficientemente brillante como para permitir el análisis espectral de su atmósfera. Se espera que esta lista de objetivos se amplie a medida que los astrónomos continúen estudiando estrellas "candidatas", contribuyendo al desarrollo de una futura lista cada vez mayor de objetivos para el "Observatorio de Mundos Habitables", a medida que avance el desarrollo de la misión.

En los siguientes catálogos, disponibles en "<https://science.nasa.gov/exoplanets/target-star-catalog/>" y "<https://science.nasa.gov/exoplanets/exoplanet-catalog/>", se puede encontrar para cada estrella un enlace con una representación interactiva en 3D de la misma. Cuando se alcanza la página de detalles, se puede obtener más información sobre la historia de la exploración de la estrella.

Respecto al Catálogo de exoplanetas, actualizado continuamente y con más de 5900 entradas, combina modelos 3D interactivos y datos detallados sobre todos los exoplanetas confirmados. Al seleccionar el nombre de un planeta, se muestra una visualización de cada mundo y sistema, junto con estadísticas muy completas. Se puede filtrar por tipo de exoplaneta, por método de descubrimiento o por la misión o instalación que lo encontró.

CONCLUSIONES

"Cuando hablas, solo repites lo que ya sabes; pero cuando escuchas, quizás aprendas algo totalmente nuevo"

Dalai Lama (6 de julio de 1935), líder espiritual del budismo tibetano (lamaísmo).

Todavía no hemos encontrado ningún planeta similar al nuestro fuera del Sistema Solar, y mucho menos con señales claras de que pueda albergar vida como la nuestra. Hasta ahora, nuestro hogar es único en el universo. Hemos encontrado muchos exoplanetas rocosos del tamaño de la Tierra, algunos de los cuales se encuentran en las zonas habitables de sus estrellas, y estamos en el siguiente paso, que es analizar sus atmósferas en busca de moléculas «biofirmas», que puedan ser un indicio fuerte de la presencia de vida.

Respecto a que podamos enviar astronautas o vehículos automáticos a un exoplaneta, nuestra tecnología todavía no lo permite. No parece viable en un futuro próximo, dada la enorme distancia entre las estrellas y el tiempo que se tardaría en viajar hasta ellas. Quizás algún día un robot visite un exoplaneta, como los rovers en Marte, pero ese día también está aún muy lejos en el futuro. Primero, tenemos que aprender a viajar mucho más rápido y más lejos en el espacio de lo que lo hemos hecho hasta ahora. Mantener con vida a los seres humanos para completar un viaje tan largo es probablemente el mayor desafío, dadas las enormes dificultades que aparecen en este tipo de proyectos. Hoy en día, la NASA se está concentrando en los pasos para llevar a los seres humanos a Marte, que es nuestro vecino más cercano, nada en comparación con los exoplanetas más próximos.

En cambio, la comunidad científica es mucho más optimista respecto a tomar imágenes reales directas de exoplanetas en los próximos años. Actualmente tenemos algunas imágenes de los que se encuentran a pocos años luz de distancia. En ellas, los planetas a veces parecen puntos tenues junto a regiones borrosas (donde se ha restado la luz brillante de la estrella del planeta). Algunos ejemplos de planetas fotografiados, orbitan alrededor de las estrellas brillantes Fomalhaut, HR 8799 y Beta Pictoris. El telescopio espacial James Webb y el próximo telescopio espacial Nancy Grace Roman captarán imágenes de más exoplanetas alrededor de estrellas cercanas. El gran reto para la NASA es captar imágenes de planetas similares a la Tierra que orbitan alrededor de estrellas cercanas, que suelen ser unos 10 000 millones de veces más tenues que sus estrellas.

La NASA tiene telescopios en el espacio que actualmente estudian los exoplanetas: un observatorio dedicado al descubrimiento de exoplanetas (el Satélite de Sondeo de Exoplanetas en Tránsito) y el Hubble, un potente observatorio de uso general que realiza una amplia gama de observaciones astronómicas, incluida la ciencia de los exoplanetas. También el telescopio espacial James Webb (NASA/ESA/CSA) está a la vanguardia de la exploración de las atmósferas de los exoplanetas. A estos telescopios se suman más de dos docenas de telescopios en tierra que se utilizan para descubrir y caracterizar exoplanetas, desde pequeños observatorios robóticos hasta grandes telescopios como los Keck en Hawái. Incluso SOFIA, el observatorio infrarrojo de la NASA integrado en un avión Boeing 747-SP, ha realizado algunas observaciones de exoplanetas.

REFERENCIAS Y CONSULTAS

- **Anuario del Real Observatorio Astronómico 2025** - Instituto Geográfico Nacional -
- **Planetas extrasolares** - Revista Digital ACTA nº 43
https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/043001.pdf
- **Climatología del inframundo** - Revista Digital de ACTA nº 42
https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/042001.pdf
- **Civilizaciones racionales en el Cosmos** - Revista Digital de ACTA nº 79
https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/079001.pdf
- **Telescopio espacial James Webb** - Revista Digital de ACTA nº 122
https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/122001.pdf
- **Planetas enanos** - Revista Digital de ACTA nº 175
https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/175001.pdf
- **Los Cielos de los Planetas y Satélites del Sistema Solar** - Revista Digital de ACTA nº 32 - https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/032001.pdf
- <https://science.nasa.gov/exoplanets/>
- <https://www.astrobitacora.com/la-busqueda-de-vida-extraterrestre-con-jwst/>
- <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/PSJ/adcc27>
- <https://science.nasa.gov/mission/webb/other-worlds/>
- <https://www.space.com/astronomy/james-webb-space-telescope/james-webb-space-telescope-discovers-an-alien-planetary-systems-icy-edge>
- <https://webbtelescope.org/recursos-en-espanol/recursos-adicionales>
- <https://www.space.com/space-exploration/james-webb-space-telescope/astronomers-discover-exotic-atmosphere-on-scorching-hot-exoplanet-cuancoa-like-finding-a-snowball-that-hasnt-melted-in-a-fire>
- <https://www.space.com/astronomy/exoplanets/james-webb-space-telescope-sees-1st-exoplanet-raining-sand-alongside-sandcastle-partner-world>

Otros Mundos -Spitzer, Kepler, HARPS, HST, JWST-

- [*https://www.space.com/astronomy/james-webb-space-telescope/james-webb-space-telescope-unveils-fiery-origins-of-a-distant-hellish-exoplanet*](https://www.space.com/astronomy/james-webb-space-telescope/james-webb-space-telescope-unveils-fiery-origins-of-a-distant-hellish-exoplanet)
- [*https://science.nasa.gov/universe/exoplanets/frigid-exoplanet-in-strange-orbit-imaged-by-nasas-webb/*](https://science.nasa.gov/universe/exoplanets/frigid-exoplanet-in-strange-orbit-imaged-by-nasas-webb/)
- [*https://www.space.com/astronomy/exoplanets/jwst-spies-frigid-alien-world-on-bizarre-orbit-one-of-the-coldest-oldest-and-faintest-planets-that-weve-imaged-to-date*](https://www.space.com/astronomy/exoplanets/jwst-spies-frigid-alien-world-on-bizarre-orbit-one-of-the-coldest-oldest-and-faintest-planets-that-weve-imaged-to-date)
- [*https://astrobiology.com/2025/05/highlights-from-exoplanet-observations-by-the-james-webb-space-telescope.html*](https://astrobiology.com/2025/05/highlights-from-exoplanet-observations-by-the-james-webb-space-telescope.html)
- [*https://www.stsci.edu/stsci-research/research-topics-and-programs/exoplanet-and-planetary-science/jwst-exoplanet-and-planetary-science*](https://www.stsci.edu/stsci-research/research-topics-and-programs/exoplanet-and-planetary-science/jwst-exoplanet-and-planetary-science)

(Para comentarios y observaciones al autor: caronte@acta.es)