

Sin lugar a duda, el estudio de los exoplanetas es uno de los campos de investigación más dinámicos, competitivos, sorprendentes y apasionantes de la Astrofísica en el siglo XXI. Quizás por las implicaciones a largo plazo que el descubrimiento de nuevos mundos implica en el imaginario colectivo, quizás porque durante siglos su investigación ha resultado incompatible con las limitaciones tecnológicas, es sin duda un tema que genera interés por igual tanto a científicos como al ciudadano de a pie. Y lo cierto es que el campo ha conseguido en las últimas décadas desarrollar proyectos específicos de instrumentación con una precisión difícil de imaginar unos pocos años antes y atraer a un enorme número de investigadores, una gran mayoría de ellos estudiantes de tesis y jóvenes postdocs, a esta gran aventura de descubrimiento.



Enric Pallé

Instituto de Astrofísica de Canarias
epalle@iac.es

EL CÓMPUTO DE NUEVOS MUNDOS

No por repetido deja de ser cierto y asombroso que en menos de 30 años hemos pasado de no tener la capacidad técnica de observar planetas en torno a otras estrellas a conocer más de 5 millares de ellos, determinando con precisión sus órbitas, masas y radios. Las búsquedas de planetas desde tierra y los telescopios espaciales Kepler y CoRoT nos han dado las primeras estadísticas y sabemos hoy en día que la formación de sistemas planetarios es común para la mayoría de las estrellas. En realidad sabemos ya que estadísticamente cada estrella posee más de un planeta (posiblemente muchos más) y que incluso estrellas evolucionadas y enanas blancas parecen tener sistemas planetarios, que podrían ser de segunda generación.

Al parecer, el tipo más común de planetas en la Vía Láctea, por lo menos a periodos orbitales cortos, son las súper-Tierras (con radios entre 1.2 y 2 radios terrestres - R_E -) seguidas de los sub-Neptunos (2-3 R_E), y curiosamente ninguna de las dos clases existen en nuestro Sistema Solar. Sin embargo, tanto las búsquedas de planetas por el método de velocidad radial como por tránsitos, los dos más comunes, son más sensibles a la detección de planetas con periodos cortos y masas (radios) grandes. Aunque GAIA y las búsquedas por imagen directa arrojarán muy pronto luz sobre la población de planetas gigantes de largo periodo, nos queda un amplio territorio que cuantificar a periodos largos y con importantes lagunas en nuestro conocimiento, como la tasa de formación de "tierras" (planeta con $R < 1.5 R_E$) en zona de habitabilidad entorno a estrellas F, G o K.

Así pues, los objetivos científicos de la comunidad están empezando a alejarse del simple aumento del número de planetas conocidos y los esfuerzos se concentran ya en dos grandes objetivos. El primero es el estudio estadístico de las poblaciones de planetas, lo que permitirá establecer las distintas clases de exoplanetas que existen, su frecuencia, sus procesos más comunes de formación, la dependencia de estos procesos según la estrella anfitriona, y la evolución de sus atmósferas. Para ello hacen falta grandes números de planetas con todas sus propiedades definidas con precisión.

El segundo objetivo es encontrar aquellos planetas (o sistemas planetarios) más interesantes y accesibles para acometer una caracterización detallada,

incluyendo la de sus atmósferas. Para conseguirlo existen dos caminos no excluyentes: encontrar planetas entorno a las estrellas más brillantes para mejorar la señal a ruido de nuestras observaciones y/o conseguir el menor contraste posible entre el radio de la estrella y el planeta. Esta segunda opción hace que los planetas rocosos más interesantes para su caracterización atmosférica se encuentren en torno a estrellas de tipo espectral M y por ello las búsquedas de planetas alrededor de este tipo de estrellas se han multiplicado. Actualmente, la misión TESS, dedicada a monitorizar todo el cielo en busca de planetas transitantes, cumple a la perfección este objetivo y en los últimos 3 años nos ha proporcionado el hallazgo de la mayoría de planetas rocosos que estudiaremos en detalles en las próximas décadas. Y espectrógrafos en tierra como CARMENES, entre otros, han medido sus masas. El censo de planetas transitantes de corto periodo orbital ($P < 30$ días) y cercanos a la Tierra está cerca de completarse.

Encontrar estos planetas accesibles a nuestra instrumentación es de especial interés porque, en última instancia, la caracterización de atmósferas de planetas rocosos en la zona de habitabilidad de sus estrellas, permitirá el ambicioso objetivo - verdadero motor intelectual del campo de la investigación en exoplanetas - de intentar detectar bio-marcadores: las posibles huellas de vida en otros planetas.

En la actualidad conocemos ya un gran número de planetas dentro de la zona de habitabilidad de sus estrellas, aunque claramente no todos son potencialmente habitables (ver Figura 1). Solo lo son aquellos planetas pequeños y rocosos donde se dan todas las condiciones para poder encontrar agua líquida en grandes extensiones de su superficie. Aún así hay razones para felicitarnos porque, tomando valores conservativos para la masa y radio que puede tener un planeta habitable, son ya 21 en total los planetas descubiertos que cumplen este requisito. El número crece hasta los 59 candidatos si se consideran valores un poco más optimistas, incluyendo planetas con radios entre 1.6 y 2.5 R_E . Sin embargo, es también justo recordar que está por determinar si un planeta en torno a una estrella M, como lo son la mayoría de estos planetas, es capaz o no de desarrollar y sostener vida en su superficie.

En los próximos años, los esfuerzos se redoblarán para caracterizar las atmósferas de estos planetas potencialmente habitables. Pero para ello deberemos romper una barrera tecnológicamente formidable: la exploración atmosférica de planetas con radio inferior a 1.5 R_E y alto peso molecular.

LA CARACTERIZACIÓN DE ATMÓSFERAS

La observación de las atmósferas planetarias es necesaria para entender los procesos de formación de sistemas planetarios, ya que la composición nos da una idea del material primigenio del que se formaron los planetas y de las posibles migraciones que han sufrido hasta sus órbitas actuales. Por otro lado la composición atmosférica nos permite romper la degeneración que impone una clasificación de la naturaleza de un planeta basada solo en los valores de masa, radio y densidad (dos planetas con densidad promedio similares pueden tener núcleos y atmósferas con composición y extensiones extremadamente distintas).

En la actualidad existen varias metodologías para el estudio de atmósferas planetarias, que son:

1- Espectroscopía o espectro-fotometría diferencial de tránsitos y/o ocultaciones: esta técnica permite desde el espacio o desde Tierra medir la composición química de una atmósfera. Desde el espacio está limitada por el ruido fotónico, y por tanto la capacidad colectora del espejo. Los datos más precisos hasta la fecha provienen del *Hubble Space Telescope* (HST) y *Spitzer*, y con el lanzamiento del *James Webb Space Telescope* (JWST) la espectro-fotometría se podrá aplicar a planetas desde Júpiteres Calientes a Neptunos templados, y quizás a algún planeta rocoso caliente, pero no podrá sondear las atmósferas de planetas como el nuestro. Desde tierra, la limitación es la atmósfera terrestre y la necesidad de una o varias estrellas de comparación para eliminar en lo posible a esta última. Los telescopios de clase 8-10 metros han alcanzado precisiones comparables a las observaciones espaciales, pero la siguiente generación de telescopios extremadamente grandes no tendrá instrumentos con campos de visión lo suficientemente grandes como para aplicar estas técnicas diferenciales, que por otro lado son solo aplicables a planetas que transitan.

hasta la fecha pronostican el éxito de una misión que está destinada a revolucionar el campo de las atmósferas planetarias. Donde hasta ahora teníamos medidas del espectro de transmisión de planetas gigantes (y unos pocos Neptunos), observados con el HST entre 0.5 y 1.7 micras, JWST proporcionará espectroscopía desde 0.6 hasta las 28 micras con una señal a ruido muchísimo más elevada. Eso permitirá la exploración simultánea de varios rasgos moleculares y disminuirá la degeneración en los modelos de composición atmosférica que ofrece un rango espectral más corto. JWST sin embargo se queda corto para el estudio de planeta rocosos en zona de habitabilidad, quizás con alguna contada excepción, como el sistema planetario Trappist1.

A JWST le seguirá PLATO, un buscador de planetas por el método de tránsitos similar a CoRoT, Kepler y la actual TESS. PLATO sin embargo, está enfocado a la búsqueda de sistemas planetarios similares a la Tierra y el Sol. Con 26 cámaras fotométricas apuntando una región del cielo de 2250 grados cuadrados durante meses o años, PLATO monitorizará millones de estrellas en busca de las señales de tránsito de planetas terrestres. La gran aportación de PLATO, sin embargo, será su capacidad para aplicar astrosismología en las estrellas brillantes con planetas. El radio de un planeta se mide en relación al radio de su estrella, y por tanto los errores en la determinación del radio estelar dominan los errores en el radio planetario. Esta disminución en la incertidumbre en los radios estelares implicará una mayor precisión en los diagramas de masa/radio de los exoplanetas conocidos, lo que implicará a su vez un conocimiento más sólido de la composición de esos planetas, como la fracción de agua y volátiles.

En 2028 ESA espera lanzar ARIEL, una misión dedicada al estudio del espectro de transmisión, emisión y curvas de fases de exoplanetas ya conocidos. Aunque la capacidad de ARIEL para la caracterización de una atmósfera será relativamente modesta comparada con JWST, ARIEL está pensada como una misión estadística, que observará un millar de exoplanetas de forma sistemática y cubriendo simultáneamente entre 0.5 y 8 micras. ARIEL está destinada a ser la misión que revele los patrones atmosféricos en los que se distribuyen los mundos en nuestra galaxia, estableciendo por ejemplo la frecuencia de

nubosidad, la presencia de capas de inversión, la redistribución de energía y circulación, y las dependencias de la composición química con el grado de irradiación estelar. ARIEL además, arrojará luz sobre los procesos de formación más comunes de estos planetas ya que una caracterización en detalle de la atmósfera de un exoplaneta proporciona información sobre la historia evolutiva del sistema.

Pero los esfuerzos en tierra no se quedan atrás. Los tres grandes telescopios extremadamente grandes (ELTs) propuestos hasta la fecha, se están diseñando para ser equipados con instrumentación dedicada a la investigación en exoplanetas. Aunque los tres telescopios planean instrumentación parecida, me concentro aquí en el mayor de ellos, el European Extremely Large Telescopes (E-ELT) de 42 metros de apertura, que contará con HARMONI y METIS como instrumentos de primera luz, ambos con una gran capacidad para la detección de luz directa de atmósferas de planetas gigantes. Pero sin duda el instrumento ANDES, un espectrógrafo de alta resolución que cubrirá desde el visible hasta la banda K, es uno de los más prometedores. ANDES aprovechará las técnicas para estudios de atmósferas de exoplanetas con alta resolución espectral desarrolladas con instrumentos como HARPS y CARMENES, y que ahora se aplican en telescopios de 8-10 metros de apertura. El estudio de atmósferas de exoplanetas ha sido elegido como el principal objetivo científico del instrumento y definirá sus requerimientos técnicos. Si ANDES responde a las expectativas, será el primer instrumento en fase de desarrollo teóricamente capaz de darnos la primera detección de una exobiosfera entorno a una estrella tipo M.

Más allá, todas las agencias espaciales planean proyectos espaciales para el estudio de planetas terrestres entorno a estrellas como el Sol. A pesar de la ilusión que generan y del empuje de la comunidad, tanto por coste como por el desarrollo que exigen, existe el consenso de que no veremos ninguna de ellas antes de la década del 2040. Serán pues las nuevas generaciones de astrofísic@s que ahora empiezan sus doctorados quienes analicen los datos que estas misiones revelaran. La aventura del descubrimiento de otros mundos más allá de la Tierra continúa, en lo que será un proceso multi-generacional y apasionante.