



# *NUEVOS MUNDOS EN EL COSMOS*

## 26 AÑOS DE DESCUBRIMIENTOS

---

Por **JOSÉ A. CABALLERO**

Astrofísico

Desde hace varios años, la Fundación Ramón Areces organiza sesiones científicas para glosar los trabajos de los galardonados con los Premios Nobel de Fisiología y Medicina, Física y Química. Los conferenciantes que han participado en estas sesiones son prestigiosos investigadores con profundos conocimientos de los temas científicos que han merecido estos premios. Un agradable día de principios de otoño de 2021<sup>1</sup>, la Fundación tuvo el privilegio de contar con dos de los tres investigadores galardonados con el Premio Nobel de Física 2019. El Prof. James Peebles fue galardonado con el 50% del premio por sus descubrimientos teóricos sobre Cosmología Física, mientras que los invitados de la Fundación aquel día, los astrónomos suizos Prof. Michel Mayor y Prof. Didier Queloz, fueron galardonados con el 25% del premio cada uno por el descubrimiento de un exoplaneta orbitando una estrella de tipo solar.

LA SESIÓN CIENTÍFICA fue fruto de la colaboración de la Fundación Ramón Areces con la Real Academia de Ciencias y el Centro de Astrobiología, centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). La conferencia abordó un tema de máxima actualidad en el campo de la Astronomía, la Astrofísica y la Cosmología, y que tiene enorme relevancia más allá de la puramente científica: los exoplanetas.

Los exoplanetas son planetas, como la Tierra o como Júpiter, que orbitan otras estrellas distintas de nuestro Sol. Veintiséis años después de que Michel Mayor y Didier Queloz descubrieran 51 Pegasi b, el primer exoplaneta, los astrónomos hemos identificado otros 4.000 más gracias, fundamentalmente, al trabajo seminal de los dos conferenciantes y a las observaciones realizadas desde el espacio y desde tierra con telescopios de distintas características y tamaños, incluidos algunos de ellos en España.

Michel Mayor es profesor emérito en la Universidad de Ginebra, mientras que Didier Queloz es profesor de Física en la Universidad de Cambridge, en Reino Unido, y en el ETH de Zúrich, en Suiza. El descubrimiento de 51 Pegasi b, por el que recibieron el Premio Nobel de Física, lo realizaron en 1995 desde el observatorio de Haute-Provence cuando Mayor dirigía la tesis doctoral de Queloz en la Universidad de Ginebra. Desde entonces, ambos astrónomos han estado implicados en numerosísimos proyectos sobre el descubrimiento y caracterización de exoplanetas, que han generado un importante debate acerca del papel que juega el ser humano en el Universo, y abierto la posibilidad de la existencia de diferentes tipos de vida en otros rincones del Cosmos.

El título original de la serie de conferencias de Mayor y Queloz era "New worlds in the Cos-

mos: 25 years of discoveries", pero en realidad fue "26 years..." por culpa de la covid-19: sus conferencias en la Fundación se habían programado para 2020, coincidiendo con las bodas de plata del descubrimiento de 51 Pegasi b.

### Michel Mayor: "¿Otros mundos en el Cosmos? La búsqueda de planetas similares a la Tierra y, quizá, i vida!"

La conferencia de Mayor giró alrededor de cinco ideas principales: (i) el cambio de paradigma, desde la segunda mitad del siglo XX, acerca de cuántos planetas hay en nuestra galaxia, la Vía Láctea; (ii) el desarrollo del escenario de formación planetaria, (iii) los avances en la espectroscopia Doppler para la detección de exoplanetas por el método de velocidad radial; (iv) el nacimiento de la planetología comparada con el descubrimiento de los primeros planetas transitantes<sup>2</sup>; y (v) los desarrollos tecnológicos actuales y futuros para responder a la pregunta "¿es la vida un imperativo cósmico?". La tercera idea, sobre búsquedas de exoplanetas con el método de velocidad radial, es la más afín a la experiencia de Mayor y, por tanto, fue la más desarrollada en profundidad.

### ¿Cuántos planetas hay en la Vía Láctea?

En la Vía Láctea hay unos 200 mil millones de estrellas. Ahora sabemos que prácticamente todas las estrellas de nuestra Galaxia tienen al menos un planeta, pero este dato estaba fuera del alcance de los astrónomos en la primera mitad del siglo XX. El cambio de paradigma se produjo en 1952, con la publicación de un breve artículo del astrónomo ruso-estadounidense Otto Struve, titulado "Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work". En él, aplicaba un principio físico muy básico: la conservación del momento angular. Si las estrellas se forman a partir del colapso de enormes nubes de gas y el enorme

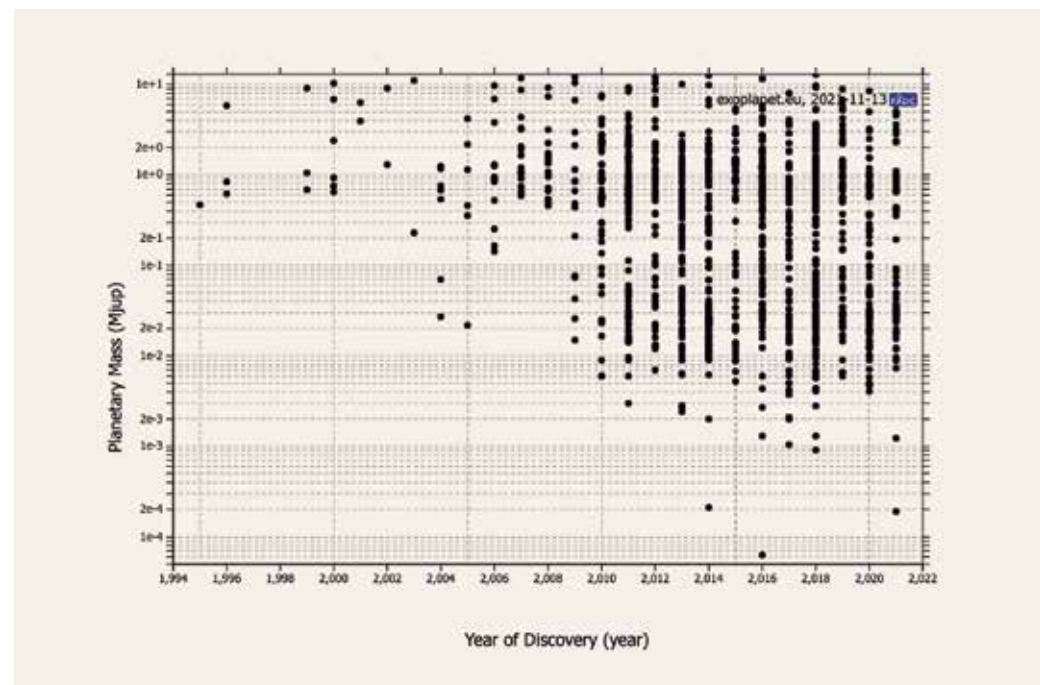
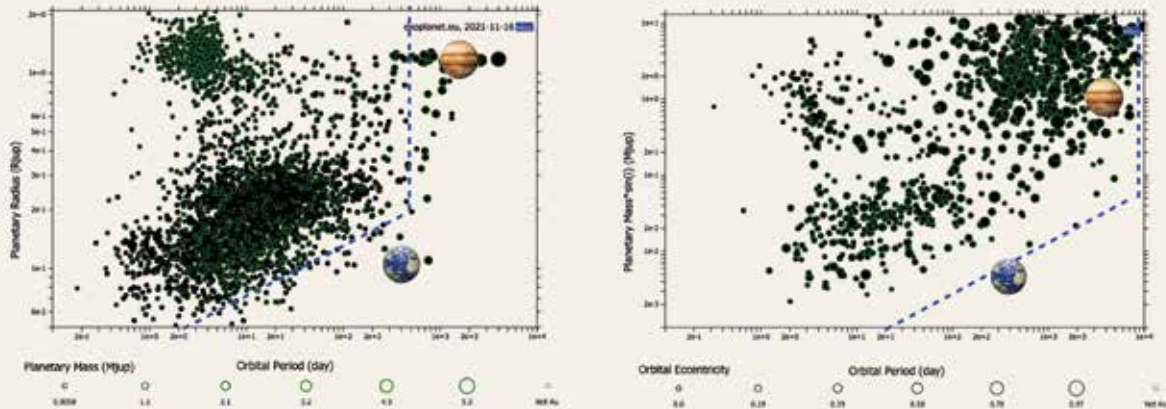


Fig. 1. Evolución del descubrimiento de exoplanetas en los últimos 26 años. En el eje horizontal, año de descubrimiento; en el eje vertical, masa de exoplaneta (1 masa de Júpiter = 318 masas de la Tierra, aproximadamente). Cada punto negro es un exoplaneta. 51 Pegasi b es el único punto de 1995. Cada vez descubrimos planetas menos masivos, hasta de la masa de Marte. Cortesía del autor.

momento angular del sistema se conserva, las estrellas deberían rotar sobre sí mismas a velocidades elevadísimas, lo que en general no ocurre. Struve propuso que ese momento angular "perdido" está en los planetas que, aunque de mucha menor masa que su estrella, orbitan a gran separación de ella. De hecho, sin ir más lejos, la mayor parte del momento angular del Sistema Solar no lo tiene el Sol, sino Júpiter en su órbita de traslación. Además, en esa misma publicación, Struve propuso detectar aquellos hipotéticos exoplanetas con los dos métodos más utilizados hoy día, el de velocidad radial y el de tránsito. Es fascinante cómo en solo unas pocas páginas un astrónomo de mediados del siglo pasado pudo prever tanto de lo que sus compañeros de trabajo realizamos muchas décadas después.

### El escenario de acreción para la formación planetaria. "Nanos gigantum humeris

insidentes", enanos de pie sobre los hombros de gigantes: Michel no mencionó la frase de Bernardo de Chartres, pero en todo momento de su conferencia flotaba la frase atribuida a Isaac Newton: "si he visto más lejos, es poniéndome sobre los hombros de gigantes". Para Michel, uno de esos gigantes era Otto Struve, pero también lo eran Otto Y. Schmidt y Viktor S. Safronov, ambos astrónomos rusos. Schmidt, héroe de la URSS, dedicó los últimos años de su vida a estudiar teóricamente cómo se formó la Tierra y, por tanto, los exoplanetas a partir de un disco protoplanetario de gas y polvo. En este disco, a modo de enorme huevo frito rotante, se coagulan núcleos de condensación que, por acreción, van aumentando de tamaño y compitiendo entre sí hasta convertirse en los planetas que vemos hoy día. A la muerte de Schmidt, en 1956, el testigo de ese estudio inacabado lo tomó Safronov, quien en 1969 publicó un libro que es



Figs. 2 y 3. Diagramas radio planetario-periodo orbital (izquierda o ABAJO) y masa mínima planetaria (derecha o ARRIBA). Véanse las nubes de puntos correspondientes a júpiteres calientes y los minineptunos/supertierras en el diagrama radio-periodo y la nube de júpiteres fríos en el diagrama masa-periodo. Las líneas discontinuas azules indican los límites de detección actuales. La Tierra y Júpiter no están a escala. Cortesía del autor.

ahora un clásico, *Evolution of the protoplanetary cloud and the formation of the Earth and planets*, y confirmó teóricamente lo que Struve había predicho casi dos décadas antes. La confirmación observacional vino después de muchas otras maneras, pero Mayor nos ilustró una de ellas con una imagen “bella”, en sus palabras, y obtenida por el telescopio espacial Hubble en 1995, el mismo año del descubrimiento de 51 Pegasi b. En la imagen, de muy alta resolución espacial, se veían estrellas muy jóvenes con sus discos protoplanetarios en primer plano de la Nebulosa de Orión. Por simple física, todas las estrellas deberían tener discos protoplanetarios durante sus primeras fases de formación y evolución. De hecho, eso es lo que vemos con ALMA, un avanzado interferómetro submilimétrico internacional a 5.000 m de altura en el desierto de Atacama, Chile. Gracias a ALMA, podemos estudiar la formación y evolución de los discos protoplanetarios alrededor de estrellas jóvenes, e incluso ver cómo

los planetas crean huecos en los discos al orbitar alrededor de sus estrellas y acrecer material del disco.

#### Desarrollo de la espectroscopia Doppler.

El método que Mayor y Queloz usaron para descubrir 51 Pegasi b fue el de velocidad radial. Cuando los astrónomos detectamos y caracterizamos exoplanetas con este método, no los vemos directamente, sino que medimos su efecto gravitatorio sobre la estrella. Aunque tiene un nombre aparentemente complicado, Doppler o de velocidad radial, el método no es difícil de entender. “Dadme una palanca y moveré el mundo”: en este caso, la frase de Arquímedes se convierte en un mundo que mueve una estrella, mil, diez mil o cien mil veces más masiva que él, y la palanca es la fuerza de la gravedad que los une. El centro de gravedad entre los dos estará mil, diez mil o cien mil veces más cerca de la estrella que del planeta. Con las grandes separaciones con las que trabajamos los astrónomos, la



Prof. Didier Queloz y Prof. Michel Mayor

estrella también gira alrededor de ese centro de gravedad con el mismo periodo orbital que el planeta, pero con una amplitud proporcionalmente más pequeña. Por ejemplo, la Tierra gira alrededor del Sol a la friolera de 30 km/s, pero también induce un movimiento de bamboleo al Sol, que se mueve a una velocidad de 8 cm/s con una periodicidad de exactamente un año. Como veremos a continuación, los astrónomos aún no somos capaces de medir esas velocidades radiales, pero sí lo somos si el planeta es más masivo que la Tierra, está más cerca de su estrella, o la estrella es menos masiva que el Sol. Esta velocidad radial la medimos directamente sobre el espectro de la estrella, al estudiar el desplazamiento de las líneas atómicas espectrales hacia el rojo (la estrella se aleja de nosotros) o el azul (se acerca) con el periodo orbital del planeta. Este efecto Doppler es el mismo que por el que escuchamos diferente la sirena de una ambulancia cuando se aleja (más grave) que cuando se acerca (más agudo).

La velocidad radial la medimos con espectrógrafos instalados en telescopios. La precisión con la que medimos las variaciones de velocidad radial de las estrellas por el efecto indirecto de los exoplanetas ha ido mejorando significativamente desde la incorporación de la técnica de correlación cruzada. Tal técnica permite concentrar la información Doppler de varios miles de líneas espectrales y conseguir precisiones de velocidad radial que eran inimaginables en la época de Struve, Schmidt y Safronov. En 1977, el equipo de Michel estrenó CORAVEL, un espectrógrafo que era capaz de medir la velocidad radial de estrellas muy brillantes con una precisión de 300 m/s. Después vinieron ELODIE (1994, 13 m/s), con el que descubrieron 51 Pegasi b, CORALIE (1998, 6 m/s), HARPS (2003, 1 m/s), HARPS-N (2013, 1 m/s) y ESPRESSO (2018, 0.1 m/s). Es decir, en tan solo unas décadas hemos pasado de precisiones de velocidad radial de 0.3 km/s a tan solo 10 cm/s.

La estrella 51 Pegasi está situada a unos 50 años luz de la Tierra y es visible con cielos oscuros en la constelación del Pegaso. La estrella fue una de las primeras estrellas que Michel y Didier estudiaron con ELODIE por su tremendo parecido a nuestro Sol, que tiene numerosas líneas atómicas bien conocidas en su espectro, lo que es ideal para aplicar la técnica de correlación cruzada. Su planeta, 51 Pegasi b, es una enorme masa gaseosa con un tamaño aproximado la mitad que el de Júpiter. Su descubrimiento fue completamente inesperado por la duración de su “año”. Mientras que la Tierra y Júpiter tardan 1 y 11,86 años, respectivamente, en dar una vuelta alrededor del Sol, 51 Pegasi b tarda solo... ¡4,23 días! Este periodo de traslación orbital tan corto se traduce en una separación estrella-exoplaneta de tan solo 0.053 unidades astronómicas. Por comparación, la Tierra se encuentra a 1 unidad astronómica del Sol y Mercurio, el planeta más cercano al Sol, a 0,39. ¿Cómo se pudo formar un planeta tan grande tan cerca de su estrella, que es capaz de hacer evaporar la atmósfera del planeta? La respuesta la dieron Douglas N. C. Lin y colaboradores tan solo unos meses después, en 1996: en realidad, 51 Pegasi b y todos los planetas gigantes, incluidos Júpiter y Saturno, se formaron a varias unidades astronómicas de sus soles, donde hay material suficiente que crecer, especialmente hielo de agua, pero que por interacción con el gas y los otros planetesimales del disco, “migraron” en una espiral de varios millones de años hacia donde los observamos hoy día.

El descubrimiento de 51 Pegasi b fue una sorpresa, pero también la fuente de muchos y variados descubrimientos. Desde 1995, el número de exoplanetas (más de 4.000 a día de hoy) ha crecido igual de rápido que la capacidad de los astrónomos para detectar planetas cada vez menos masivos. Esta capacidad tecnológica nos ha permitido observar una gran diversidad de sistemas exoplanetarios: plane-

tas con periodos orbitales desde unas pocas horas a docenas de años, con masas desde una fracción de la masa terrestre hasta más de diez veces la masa de Júpiter, con excentricidades orbitales de hasta 0.93 (en el rango cometa-rio), en frecuentes sistemas múltiples con hasta ocho planetas, con inclinaciones orbitales perfectamente alineadas con su estrella o con órbitas retrógradas, con temperaturas de equilibrio desde planetas donde el amoníaco se congela hasta donde la roca se funde... También tenemos una gran diversidad en la estructura interna de los exoplanetas, así como sus mecanismos de formación y evolución, en las que la acreción, la migración, la interacción gravitatoria o el efecto Lidov-Kozai de resonancias, por poner algunos ejemplos, juegan importantísimos papeles. Finalmente, tenemos además una gran diversidad en las masas y tamaños de los exoplanetas, con una sorpresa final: los planetas más frecuentes en la Vía Láctea, a los que llamamos supertierras o minineptunos, tienen masas de entre 1 y 10 veces la de la Tierra. Sin embargo, no hay ningún ejemplo de este tipo de planetas en nuestro Sistema Solar.

Uno de los objetivos de la Astronomía actual es detectar exoplanetas rocosos con masas similares a la de la Tierra a 1 unidad astronómica de estrellas parecidas al Sol. Para ello, necesitamos rebajar la precisión de velocidad radial de nuestros espectrógrafos desde 1 m/s a 0.1 m/s. ESPRESSO es un instrumento que puede usar las cuatro unidades de 8.4 m del Very Large Telescope en el Observatorio de Paranal, en Chile. Fue diseñado y construido por un consorcio internacional con participación suiza, española, italiana y portuguesa, en colaboración con el Observatorio Europeo Austral, para alcanzar esos 0.1 m/s. Sin embargo, este instrumento único ha llegado al límite de medida actual determinado por la variabilidad intrínseca de las atmósferas estelares. Al igual que en el Sol, la medida de

velocidad radial en estrellas, incluso las más tranquilas, se ve dificultada por las manchas, oscilaciones, corrimiento convectivo al azul, ciclos magnéticos, granulación, playas y toda la parafernalia de actividad magnética que producen cambios aparentes de velocidad radial en sus superficies.

El equipo de Mayor y muchos otros en el mundo están trabajando para reducir esta contribución a la incertidumbre en la velocidad radial de los planetas. Un ejemplo es el proyecto liderado por Xavier Dumusque: con un telescopio muy pequeño conectado al instrumento HARPS-N en el Telescopio Nazionale Galileo en el Observatorio del Roque de Los Muchachos de La Palma, observan el Sol todos los días con una gran cadencia temporal. Su objetivo es entender el proceso de variabilidad intrínseca del Sol en todas las frecuencias y quizá corregirlo en el futuro en las medidas de velocidad radial en otras estrellas. Mayor nos mostró resultados esperanzadores con regresión de procesos gaussianos por Andrew Collier-Cameron, pero con residuos de 0.5 m/s aún no hemos alcanzado el nivel de detectar exotierras en las zonas habitables de estrellas como el Sol.

**Planetas transitantes y planetología comparada.** Los exoplanetas con periodos orbitales muy cortos (del orden de días o incluso horas - muy cercanos a sus estrellas) tienen probabilidades relativamente altas de que transiten. Durante el tránsito, el planeta pasa por delante de la estrella desde nuestro punto de vista, vemos la radiación de la estrella parcialmente ocultada y, además, transmitida a través de la atmósfera del planeta. Justo antes y después del eclipse secundario, el planeta pasa por detrás de la estrella y vemos la radiación térmica del planeta desaparecer y reaparecer. Finalmente, durante el resto de la órbita del planeta, vemos las variaciones cíclicas de su brillo, como las fases de la Luna.

El primer planeta transitante, HD 209458 b, lo descubrió el equipo de Dave Charbonneau en septiembre de 1999 usando un telescopio de tan solo 10 cm. Al año siguiente, el telescopio espacial Hubble obtuvo, desde encima de la atmósfera terrestre, una curva de luz de gran calidad con la que los astrónomos pudieron estudiar a la perfección la caída de brillo de la estrella por el ocultamiento producido en el paso del planeta por delante de ella. A partir de la profundidad de esa caída de brillo, y sabiendo el tamaño (radio) de la estrella, podemos determinar el radio del planeta. Conociendo este radio y la masa determinada con el método de velocidad radial, podemos calcular su densidad promedio. La densidad de HD 209458 b es de tan solo 0,37 g/cm<sup>3</sup>, prácticamente la mitad del planeta menos denso del Sistema Solar, Saturno (0.69 g/cm<sup>3</sup>). Muy posiblemente al igual que 51 Pegasi b, HD 209458 b es un “Júpiter caliente” inflado por la gran cantidad de radiación incidente que lo calienta hasta casi la temperatura de las estrellas más frías.

La misión que más planetas transitantes ha descubierto fue el telescopio espacial Kepler, que observó 100.000 estrellas simultáneamente en un campo relativamente amplio en la constelación de Cisne. Kepler midió sin pausa el brillo de esas estrellas cada par de minutos durante un año completo, y descubrió varios miles de estrellas con tránsitos como los observados en HD 209458 b. Muchas de esas estrellas no tenían un solo planeta transitante, sino dos, tres... ¡Y hasta seis planetas! Como Kepler solo medía el radio de los planetas, hacía falta determinar sus masas para realizar planetología comparada, el campo de Cisne solo es observable desde el hemisferio norte y no había ningún espectrógrafo ultrapreciso (1 m/s) a principios de la década en nuestro hemisferio, un consorcio internacional liderado por astrónomos estadounidenses y suizos, incluidos Mayor y Queloz, construyeron una réplica del espectrógrafo HARPS (operativo

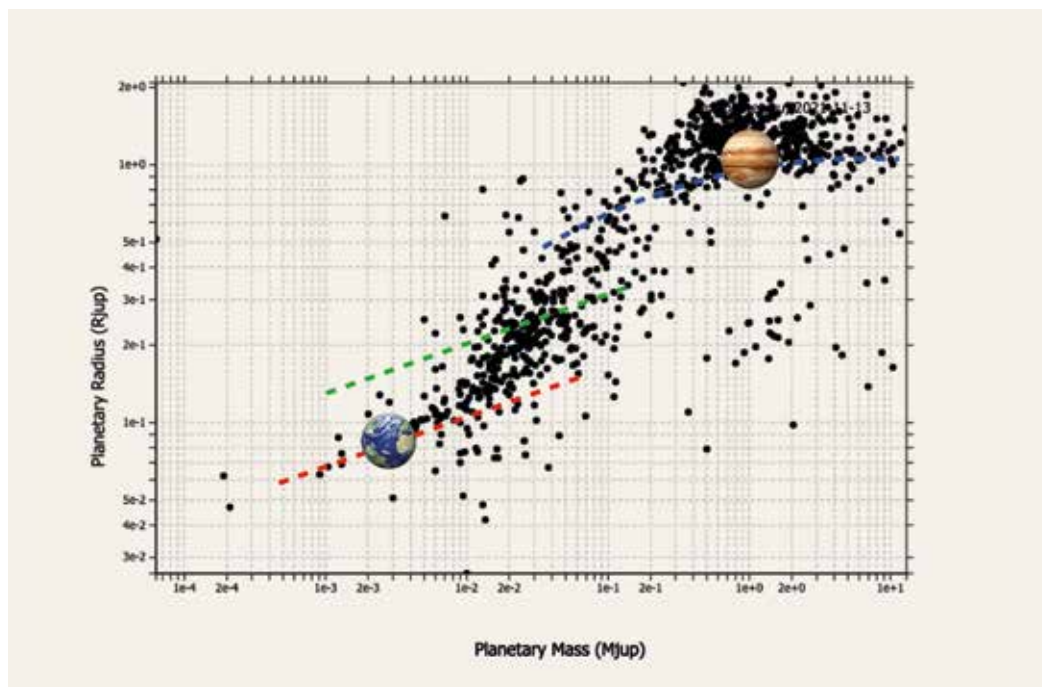


Fig. 4. Diagrama radio-masa de todos los planetas transitantes con seguimiento de velocidad radial. Las líneas discontinuas indican los modelos teóricos de interior de planetas tipo Júpiter (azul), Neptuno (verde) y Tierra (rojo). Cortesía del autor.

en el Observatorio de La Silla en Chile) para el 3,56 m Telescopio Nazionale Galileo, en el Observatorio del Roque de Los Muchachos. Con esta copia, bautizada HARPS-N, consiguieron determinar las masas de los planetas de Kepler más interesantes, que en general eran los de menor masa. Con ellos, comenzamos a estudiar la transición entre los planetas con envolturas (gaseosas o heladas) como Urano y Neptuno a planetas rocosos como la Tierra y Venus, y a comprender la física de su interior.

En algunos sistemas planetarios transitantes con la geometría, brillo de estrella y cociente de radios estrella-planeta adecuados, los astrónomos tomamos series de espectros de la estrella y el planeta a la vez y, cuando el planeta es eclipsado, solo la estrella. Al sustraer unos de otros, obtenemos el espectro del planeta y podemos estudiar la composición de su atmósfera en función de la longitud de onda. La espectroscopia de transmisión nos

ha permitido detectar la presencia de elementos, iones y moléculas como Na, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, Fe, Fe+ o Ti+ en las atmósferas de HD 209458 b y otros muchos planetas transitantes. Cuanto más grande es el espejo primario del telescopio que usamos, mejores son los resultados que obtenemos y más débiles son las estrellas que investigamos. La espectroscopia de transmisión tiene un futuro prometedor y nos ayudará a responder la importante pregunta del párrafo siguiente.

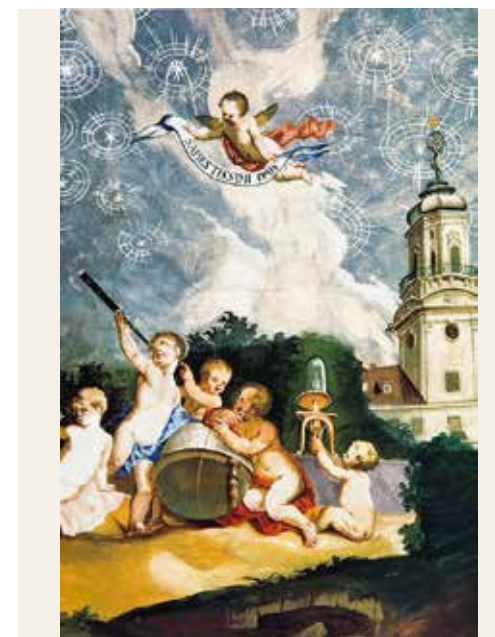
**¿Es la vida un imperativo cósmico?** De acuerdo con Mayor, vivimos en un periodo excepcional, ya que pronto podremos responder esta pregunta del también premio Nobel Christian de Duve. La pregunta puede reformularse de otra manera: si tenemos todas las condiciones apropiadas en algún lugar del Universo, ¿la vida emergerá por sí sola? Parte de la respuesta está en buscar “anomalías” en los espectros de los planetas. Mayor nos en-

señó la recopilación de Franck Selsis de los espectros ópticos e infrarrojos de la Tierra, Venus y Marte en el Sistema Solar. Un rasgo espectral que la Tierra posee y Venus y Marte no es una intensa absorción a 9.7 μm. Este rasgo se debe a ozono (O<sub>3</sub>), ya que el 21% de la atmósfera de la Tierra, al contrario de las de Venus y Marte, es oxígeno (O<sub>2</sub>) producido por los organismos fotosintéticos durante su metabolismo. El ozono es el biomarcador más emblemático, pero no es el único. Para detectar todos los posibles biomarcadores en las atmósferas de exoplanetas necesitamos la instrumentación más avanzada, como el futuro espectrógrafo HIRES en el Telescopio Europeo Extremadamente Grande de 39 m, en construcción en Cerro Armazones en Chile, y el telescopio espacial James Webb, recién lanzado<sup>3</sup>. La lista no exhaustiva de Mayor para saber si la vida es un imperativo cósmico se completa con las misiones TESS, CHEOPS y PLATO desde el espacio para determinar radios precisos de exoplanetas, los espectrógrafos ESPRESSO, HARPS, CARMENES e IRD desde tierra para determinar masas, y la misión espacial ARIEL y el resto de espectrógrafos en telescopios terrestres para estudiar la física y química de sus atmósferas.

Mayor concluyó su conferencia mostrándonos la que posiblemente es la primera ilustración de exoplanetas, en la actualidad en un claustro del complejo de edificios históricos Klementinum en Praga, República Checa. La realizó un pintor italiano anónimo en 1752 siguiendo las ideas de Giordano Bruno sobre la pluralidad de mundos habitados.

### Didier Queloz: “Revolución exoplanetaria”

Queloz comenzó explicando el porqué del título de su conferencia: “*Exoplanet revolution*”. Tras la introducción de Mayor, la definición de



Fresco con exoplanetas en Klementinum por un artista anónimo. Cortesía de Mayor.

exoplaneta y la descripción de los dos métodos principales de detección por Queloz quedaron aún más patentes. Con velocidad radial y tránsito, los astrónomos determinamos la masa y el radio del exoplaneta. Gratis, determinamos también el periodo y la “forma” de la órbita, a la que llamamos excentricidad. Por “revolución”, Queloz se refiere al creciente número de exoplanetas descubiertos desde 1995 y el cambio de percepción de nuestro propio Sistema Solar. Tenemos la imagen de otros sistemas planetarios idénticos al nuestro, con los planetas rocosos cerca de la estrella, el cinturón de asteroides en el medio, y los gigantes helados y gaseosos más allá. Sin embargo, lo que hemos descubierto en los últimos 26 años es mucho más diverso que esta imagen preconcebida.

Una imagen vale más que mil palabras, y así lo manifestó Queloz al mostrar con profusión dos diagramas: radio *versus* periodo y masa *versus* periodo de todos los exoplanetas conocidos hasta ahora, en comparación con los planetas del Sistema Solar. En el diagrama de

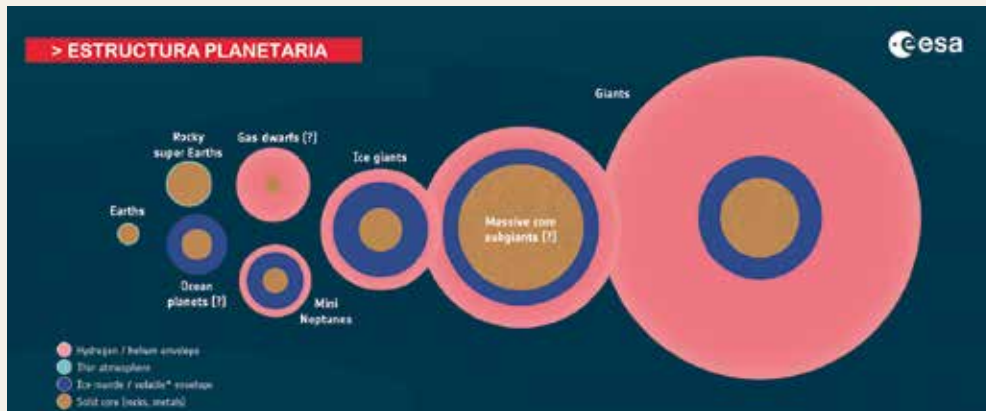


Fig. 5. Resumen de posibles estructuras de interior exoplanetario (modificado de ESA).

las masas se da más peso a los exoplanetas descubiertos con el método de velocidad radial, mientras que en el diagrama de los radios se da más peso a los exoplanetas descubiertos por tránsito. Solo en el primer diagrama se vislumbran los planetas tipo “Júpiter”, con masas y periodos orbitales parecidos a las de nuestro gigante joviano (con un límite incierto debido al límite superior en unas 13 masas de Júpiter, que es la frontera con otros cuerpos astronómicos llamados enanas marrones). Sin embargo, en los dos diagramas son aparentes dos nubes de puntos: “júpiteres calientes”, que son planetas con la masa de nuestro gigante joviano, pero con periodos orbitales de días o incluso horas, y “minineptunos” y “supertierras”, con masas entre una y diez veces la de la Tierra. Entre 50% y 80% de las estrellas tienen minineptunos y supertierras. Que la mayoría de los exoplanetas descubiertos hasta ahora sean de este último tipo, de los que no hay contrapartida en el Sistema Solar, fue una absoluta sorpresa.

Cuando se conectan estos dos diagramas, se produce uno nuevo, aparentemente complicado pero muy interesante, que es el de radio

versus masa de todos los planetas transitantes con medidas de velocidad radial. En ese nuevo diagrama se ven, de arriba a abajo y de derecha a izquierda, los “júpiteres calientes” con tamaños inflados por sus altas temperaturas de equilibrio, superiores a 1.000°C; los “neptunos” y “minineptunos”, algo menores y más densos que los anteriores, que podrían estar hechos completamente de agua o, más probablemente, una mezcla de núcleo metálico, manto silicatado y envoltura de hielo y gas; y las “supertierras” y “exotierras”, los planetas rocosos más densos de todos. Los detectados hasta ahora no son comparables aún a nuestra Tierra por sus elevadas temperaturas superficiales, pero sí lo son por sus densidades promedio. Así, podemos imaginar distintas estructuras planetarias en el diagrama masa-radio, no necesariamente parecidas a las que tenemos en el Sistema Solar. Por ejemplo, podemos tener exoplanetas subgigantes con núcleos masivos, gaseosos enanos, minineptunos helados, supertierras rocosas, planetas oceánicos (con océanos de 1.000 km o 5.000 km de profundidad...).

Aparte de la densidad promedio de los exo-

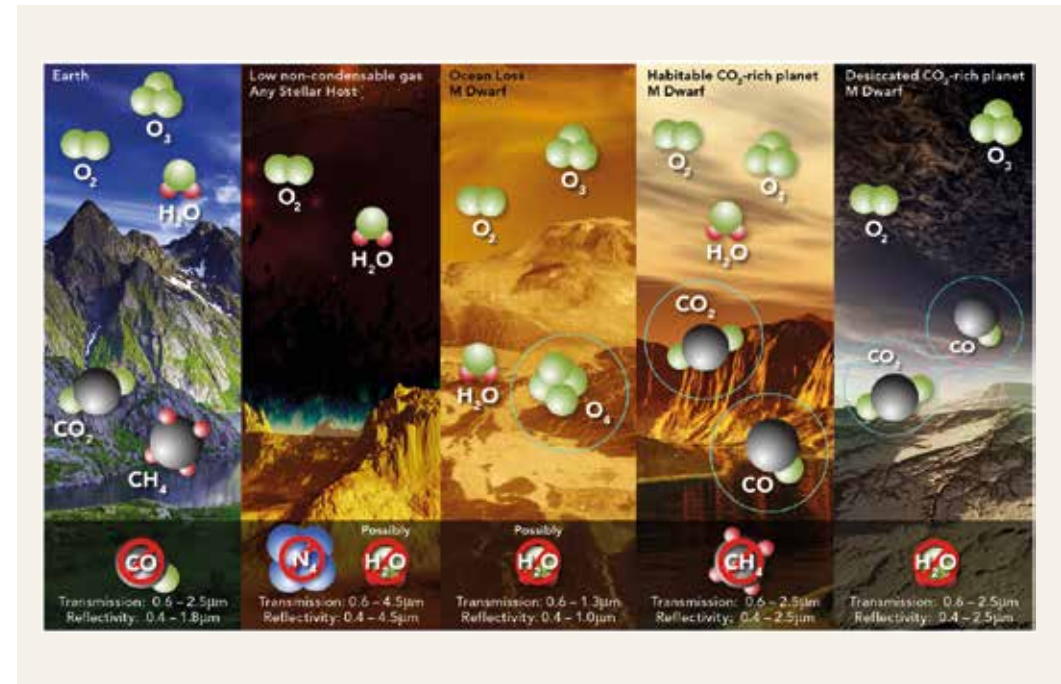


Fig. 6. Distintos tipos de atmósferas exoplanetarias y biomarcadores (Hasler/Meadows/Domagal-Goldman).

planetas transitantes, también podemos estudiar la composición de sus atmósferas para discriminar entre la diferente diversidad planetaria. Para Didier, estudiar su composición es casi un milagro porque “los planetas están tan lejos y no los vemos”. Sin embargo, con la técnica de espectroscopia de transmisión explicada anteriormente por Mayor, determinar de qué está compuesta la atmósfera de un exoplaneta es una realidad. El truco es observarla en distintos colores. Para ilustrar este truco, Didier nos mostró tres imágenes de la Luna de fondo y la Tierra en primer término, obtenidas desde la Estación Espacial Internacional en tres bandas distintas. La primera banda era el visible, en la que se ven las nubes y el horizonte azul del tope de la biosfera a unos 20 km, hasta donde pueden volar la mayoría de los aviones; la segunda banda era el infrarrojo térmico a 8.6 μm, en la que se ve la superficie del planeta y, por tanto, una Tierra “más pequeña”; y la tercera banda, a 9.6 μm,

en la que se ve la capa de ozono entre 15 km y 35 km y, por tanto, una Tierra “más grande”. A esta medida del radio exoplanetario a distintas bandas la llamamos recuperación (del inglés *retrieval*) y, gracias a ella, aparte de la composición de la atmósfera, podemos determinar su perfil de temperatura, su estructura, si tiene nubes o neblina e incluso medir su viento. Todo esto es fascinante para Didier, ya que hace 26 años no conocíamos ningún exoplaneta y ahora casi podemos dar el parte meteorológico de algunos de ellos.

Aún podemos investigar más parámetros fascinantes si nos vamos a planetas con periodos cortos alrededor de estrellas de baja masa, tan baja como la de la estrella TRAPPIST-1 (2MUCD 12171). Aunque quizá es un caso extremo: con un 10% de la masa del Sol, TRAPPIST-1 es la estrella más pequeña alrededor de la que se han descubierto exoplanetas. Pero no uno, dos o tres, sino... ¡Siete planetas! Y,

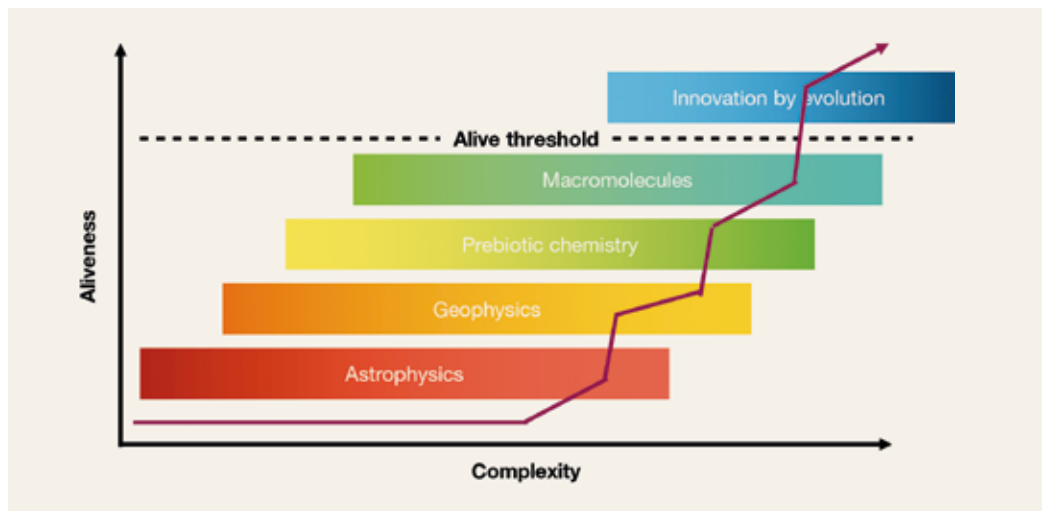


Fig. 7. Diagrama de Queloz "viveza"-complejidad. Cortesía del autor.

además, un par de ellos en la zona habitable de la estrella, que es el rango de separaciones en el que se puede encontrar agua líquida en la superficie planetaria. Si el planeta está demasiado lejos de su estrella, el agua se congelará; si está demasiado cerca, se evaporará. Lo curioso de TRAPPIST-1 y de todas las estrellas de muy baja masa es que, al ser tan pequeñas y tan frías (unos 3.000°C más frías que el Sol), su luminosidad es minúscula. Didier puso una comparativa genial: si tienes una hoguera grande y otra pequeña, para mantenerte a la temperatura correcta tienes que alejarte de la grande y acercarte a la pequeña. En el caso de TRAPPIST-1, la hoguera es muy, muy pequeña, pero los planetas (TRAPPIST-1 b, c, d... h) también están muy, muy cerca de su estrella (el más exterior está a un quinto de la separación Sol-Mercurio). Desde su descubrimiento en 2016-2017 por un grupo liderado por astrónomos de Lieja, Bélgica, TRAPPIST-1 ha sido una de las dianas principales para buscar agua en las superficies de sus planetas y teorizar sobre la existencia de vida.

Ya hay mucho trabajo teórico para detectar biomarcadores, rasgos bióticos en los espec-

tros de las atmósferas de exoplanetas. En nuestro planeta Tierra, estos biomarcadores son la combinación de  $O_3$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  y  $CH_4$ . Pero, con toda la diversidad planetaria que hemos descubierto, ¿estos biomarcadores serán útiles en otros exoplanetas? ¿Cómo serán los biomarcadores en un planeta con una atmósfera desecada rica en  $CO_2$ , como Marte y Venus, y alrededor de una estrella enana M?. ¿O en un planeta oceánico? Podríamos detectar agua y oxígeno en la atmósfera de un exoplaneta, pero quizá este no tenga ni océanos ni vida... La vida ha modificado el equilibrio global de la Tierra, alterando su atmósfera (por ejemplo, produciendo ingentes cantidades de  $O_2$ ) y hasta su litosfera (originando algunas rocas calizas). Así que para estudiar la probabilidad de que haya vida en un exoplaneta hay que conocerlo muy bien. Es un desafío que requiere la unión no solo de Astrofísica y Biología, sino también Geología y Geofísica, Química, Ciencias de la Atmósfera... Al fin y al cabo, asignar una probabilidad de que haya vida será como la predicción del tiempo: algo estadístico. Pero esto no es un problema, porque tenemos millones y millones de estrellas y millones y millones de planetas.

A partir de aquí, Didier se centró en conceptos astrobiológicos. Uno de ellos fue el de los ladrillos universales de la Química prebiótica, en particular los aminoácidos, a los que comparó con las piezas de Lego (o Tente) con las que jugábamos de niños. Estos ladrillos no están vivos, pero son capaces de producir algo vivo. ¿Por qué la vida en la Tierra "eligió" 20 aminoácidos para fabricar nuestras proteínas? ¿Y por qué estos 20 precisamente? Algunos aminoácidos son fáciles de sintetizar y hasta los hemos detectado en cometas, pero otros son muy complicados. Se puede responder que fue cuestión de suerte o, por el contrario, porque esos 20 aminoácidos eran los únicos disponibles para desarrollar la vida en nuestro planeta. A día de hoy, los bioquímicos siguen explorando esta cuestión.

Una manera de atacar el problema de los ladrillos de la Química prebiótica es desarrollar un modelo de vida universal y sintetizar los 20 aminoácidos a partir de primeros principios. Esto es algo que recientemente han logrado algunos bioquímicos: un planeta por aquí, agua por allá ( $H_2O$ ), añadimos actividad volcánica ( $SO_3$ ), hacemos impactar unos cometas (HCN), insuflamos una atmósfera neutra o ligeramente reductora ( $CO_2$ ), iluminamos con radiación ultravioleta y... ¡Voilà, nuestros 20 aminoácidos! Estos eran los ingredientes que había en la Tierra en el eón hádico, cuando nuestro planeta se estaba enfriando, durante los primeros 600 millones de años desde su formación.

Hay otras maneras de conectar la Química y Geofísica de la Tierra y la radiación de las estrellas. O, más bien, otros lugares. Uno de estos lugares es el cráter Jezero, en Marte, que es el lugar escogido por la NASA para hacer aterrizar su rover Mars 2020 Perseverance. La elección del lugar de aterrizaje, o más bien amartizaje, se basó en su interés astrobiológico. Es posible que hace 3.000 millones de años el cráter Jezero fuera un gran lago lleno

de agua. A pesar de las diferencias obvias entre Marte y la Tierra (Marte es mucho más pequeño y no tiene tectónica de placas), en aquella época nuestros dos planetas eran más parecidos de lo que lo son ahora. De hecho, en Jezero pudo darse Química prebiótica e incluso originarse vida microbiana. Esto es lo que Perseverance, entre otros, está buscando en el Sistema Solar.

Didier concluyó su conferencia con un intento de simplificar el concepto de encontrar vida, para lo que se apoyó de nuevo en un diagrama para el que ni él mismo puede asignar una escala o una cuantificación de los parámetros. En el diagrama, nos mostró cómo la complejidad de un sistema aumenta a la par de lo que Didier llamó "aliveness", que podríamos traducir por viveza o vivacidad. En algún punto, la viveza alcanza un límite por que el sistema no necesita por completo del exterior para estar "vivo". Pero para llegar a ese límite, antes la complejidad ha ido aumentando desde la Astrofísica, la Geofísica, la Química prebiótica y las macromoléculas. La verdadera revolución, el cambio mental, de los últimos 26 años es que ahora tenemos muchas razones para avanzar en este estudio multidisciplinar de la búsqueda de vida en el Universo.

## NOTAS

(1) La grabación de las conferencias fue el 30 de septiembre de 2021, y las conferencias se publicaron el 14 de octubre de 2021.

(2) Aunque el término "transitante" no aparece en el DRAE y se han sugerido otros términos en su lugar (p.e. "transitorio"), por su amplísimo uso preferimos usar "transitante" para designar a los exoplanetas que transitan sus estrellas.

(3) Según lo previsto, el James Webb se lanzará el sábado 18 diciembre de 2021.