

I NFORMACIÓN Y A CTUALIDAD A STRONÓMICA

revista.iaa.es

OCTUBRE DE 2016, NÚMERO 50

Plutón

quién te ha visto y quién te ve

La Tierra desde el cielo

El tiempo de vida de las estrellas

i!

Se halla un planeta parecido a la Tierra alrededor de la estrella más cercana al Sol

INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

<http://www.iaa.es>

Directora: Silbia López de Lacalle. **Comité de redacción:** Antxon Alberdi, Carlos Barceló, René Duffard, Emilio J. García, Pedro J. Gutiérrez, Susana Martín-Ruiz, Enrique Pérez-Montero, Pablo Santos y Montserrat Villar. **Edición, diseño y maquetación:** Silbia López de Lacalle.

Se permite la reproducción de cualquier texto o imagen contenidos en este ejemplar citando como fuente "IAA: Información y Actualidad Astronómica" y al autor o autores.

Instituto de Astrofísica de Andalucía
Glorieta de la Astronomía sn , 18008 Granada. Tlf: 958121311 Fax: 958814530. e-mail: revista@iaa.es

Depósito legal: GR-605/2000
ISSN: 1576-5598

La página web de esta revista ha sido financiada por la Sociedad Española de Astronomía (SEA). <http://revista.iaa.es>

SUMARIO

REPORTAJES

El exoplaneta más cercano...3

La Tierra desde el cielo...5

Plutón: quién te ha visto y quién te ve...9

DECONSTRUCCIÓN Y otros ENSAYOS. El tiempo de vida de las estrellas masivas...12

CIENCIA EN HISTORIAS...Vera Rubin, curvas de rotación galáctica y materia oscura... 14

EL "MOBY DICK" DE... Fernando Moreno (IAA)...16

ACTUALIDAD ...17

CIENCIA: PILARES E INCERTIDUMBRES. Contaminación lumínica...21

SALA LIMPIA ...22



Un planeta en torno a la estrella más cercana

Próxima Centauri es la estrella más débil (señalada en rojo) de un sistema estelar triple, formado también por Alfa Centauri (izda) y Beta Centauri (dcha). Fuente: Skatebiker (English Wikipedia).

De fondo, concepción artística del planeta Próxima b. Fuente: ESO/M. Kornmesser.

El exoplaneta más cercano

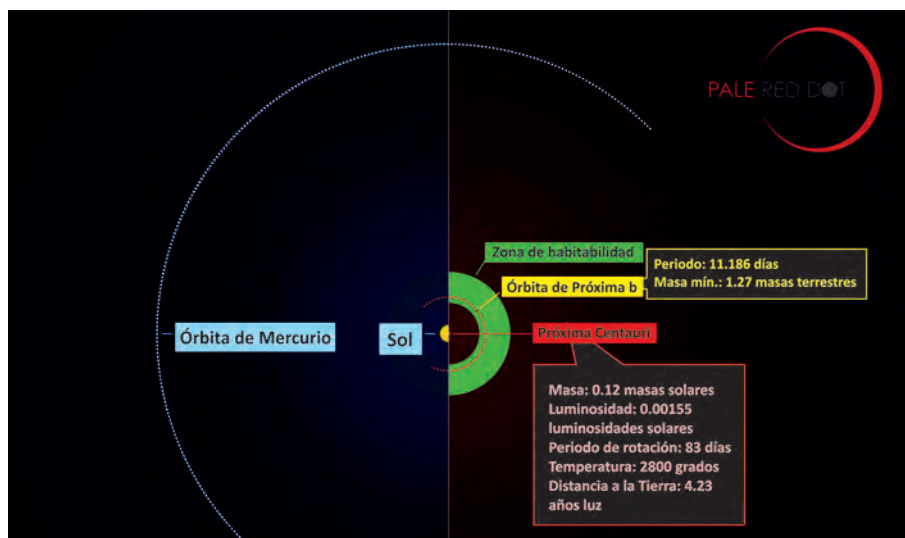
EL PLANETA, QUE SE HALLA EN LA ZONA DE HABITABILIDAD, TIENE UNA MASA MÍNIMA DE 1,3 VECES LA TERRESTRE. DENOMINADO PRÓXIMA B, GIRA ALREDEDOR DE PRÓXIMA CENTAURI, SITUADA TAN SOLO A CUATRO AÑOS LUZ DE LA TIERRA

Por Silbia López de Lacalle
(IAA-CSIC)

UN GRUPO INTERNACIONAL DE ASTRÓNOMOS, con participación del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), ha hallado un planeta en torno a Próxima Centauri, la estrella más cercana al Sol. Denominado Próxima b, el planeta se halla en la zona de habitabilidad, o región en torno a una estrella donde las condiciones permiten albergar agua líquida, y se calcula que su masa es algo mayor que la de la Tierra. El hallazgo, realizado en el marco de la campaña de observación Pálido Punto Rojo, se publicó en la revista *Nature*.

“Dedicamos dos años a diseñar la campaña Pálido Punto Rojo, que ha observado Próxima Centauri desde enero hasta marzo con telescopios de cuatro observatorios. Aunque la señal era prometedora desde el principio, revisamos su consistencia cada noche: es verdaderamente emocionante saber que hay un planeta parecido a la Tierra en torno a la estrella más cercana a nosotros”, señala Guillem Anglada-Escudé, investigador de la Universidad de Queen Mary (Londres), que encabeza el trabajo.

Los investigadores buscaban detectar el ligero tirón gravitatorio que un posible



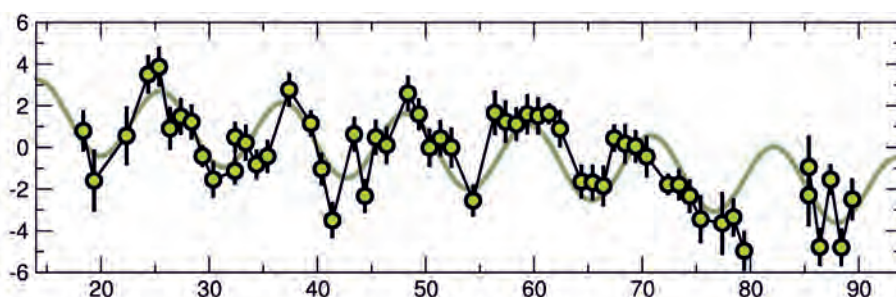
planeta ejercería sobre la estrella, que la obliga a dibujar una pequeña órbita y se traduce en oscilaciones en la luz de la misma. Se trata, sin embargo, de movimientos de muy poca amplitud: “Hemos observado que Próxima se aleja y acerca de nosotros a una velocidad de cinco kilómetros por hora, similar a la velocidad a la que caminamos, con un patrón regular cada 11,2 días”, apunta Pedro J. Amado, investigador del IAA que participa en la investigación y que coordina el proyecto CARMENES para la búsqueda de planetas de tipo terrestre desde el Observatorio de Calar Alto.

El análisis de los datos indica la existencia de un planeta con una masa mínima equivalente a 1,3 veces la terrestre, y que gira en torno a Próxima Centauri cada 11,2 días a una distancia de unos siete millones de kilómetros. Esta distancia supone tan solo un 5% de la existente entre la Tierra y el Sol, pero Próxima es mucho más fría que el Sol y, por ello, la zona de habitabilidad se halla mucho más cercana que en el caso de nuestra estrella.

Estrellas enanas rojas

Se piensa que en torno al 70% de las estrellas de nuestra galaxia son enanas rojas como Próxima, más débiles y pequeñas que nuestro Sol. “Este tipo de estrellas enanas presentan, además, periodos de actividad repentinos cuya señal puede confundirse con la de un planeta. Para excluir esta posibilidad fueron claves las observaciones realizadas por el Observatorio SPACEOBS con el telescopio ASH2, operado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía”, señala Cristina Rodríguez López, científica del IAA-CSIC que colabora en la investigación.

La posibilidad de que exista vida en los planetas en torno a las estrellas enanas rojas es, a día de hoy, objeto de debate entre la comunidad científica: la zona de habitabilidad se halla tan próxima a la estrella que, aunque el planeta goce de la temperatura adecuada, puede verse afectado por las fulguraciones de la estrella, que producen gran cantidad de radiación ultravioleta y de rayos X. Sin embargo, es necesario analizar la atmósfera de estos planetas con observaciones directas.



Gráfica que muestra el movimiento de Próxima Centauri acercándose y alejándose de la Tierra, siguiendo la pequeña órbita inducida por el planeta Próxima b. Fuente: ESO/G. Anglada.

“Próxima b constituye el candidato idóneo para estudiar las características de los planetas en torno a enanas rojas y, por extensión, para la búsqueda de trazas que puedan indicar la existencia de vida”, apunta Amado (IAA-CSIC). De hecho, el proyecto *Starshot*, apadrinado por Stephen Hawking, plantea el envío de una flota de naves minúsculas al sistema estelar triple Alfa Centauri, del que forma parte Próxima, para buscar

planetas potencialmente habitables. “En el marco de este proyecto, Próxima b constituye el único planeta que se podría visitar en el plazo de una generación”, concluye Amado (IAA-CSIC).

El hallazgo de Próxima b ha sido posible gracias al uso combinado de telescopios de cuatro observatorios, entre los que ha resultado fundamental el instrumento HARPS del telescopio de 3,6 metros del Observatorio

Europeo Austral (ESO), así como los datos del instrumento UVES (ESO) recogidos a lo largo de dieciséis años y reanalizados dentro de esta campaña. El descubrimiento se enmarca en el proyecto Pálido Punto Rojo, que permitió seguir la campaña de observación a través de la web.

Pale Red Dot:
<https://palereddot.org/>

HABITABILIDAD Y FUTUROS ESTUDIOS DE PRÓXIMA B

entrevista a Cristina Rodríguez-López (IAA-CSIC)

Próxima b resulta muy interesante por su cercanía, pero ¿reúne las condiciones para albergar vida? ¿Cuáles serán los siguientes pasos en su estudio?

El especial interés de Próxima b reside precisamente su cercanía: se halla a solo 4.2 años luz de nosotros, y eso hace que sea el exoplaneta al que, en un futuro, sería más fácil llegar. Además, es potencialmente habitable porque se sitúa en lo que se conoce como zona de habitabilidad, es decir, está a una distancia de su estrella tal que podría existir agua líquida en su superficie. Pero aún queda mucho por hacer para ver si esto se confirma.

Para que un planeta albergue vida, por lo menos vida como la conocemos en la Tierra, es fundamental que tenga atmósfera. Y para saber si el planeta tiene atmósfera un primer paso consiste en ver si el planeta transita o eclipsa su estrella, es decir, si su órbita está alineada de tal forma con nuestra línea de visión que podamos verlo pasar por delante de la estrella y ocultar su luz. Si esto es así, al analizar con un espectrógrafo la luz procedente de la estrella en el momento en el que el planeta la eclipse, veremos la huella que la atmósfera del planeta deja en la luz de la estrella. Ese sería el momento de buscar qué biomoléculas -moléculas indicadoras de vida- pudiesen estar presentes, como agua, dióxido de carbono, metano, ozono... O también otros compuestos que, aunque no sean indicativos de vida basada en el carbono y el agua como la nuestra, serían indicativos de algún proceso biológico de otro tipo. Además, cuando el planeta quede oculto totalmente por la estrella (en lo que se llama eclipse secundario), la diferencia entre la luz total justo antes o después del eclipse (la estrella+el planeta iluminado) y la luz cuando el planeta está oculto, nos da información sobre la emisión térmica del planeta y su temperatura.

Otros factores que debemos estudiar para determinar cómo de acogedor es Próxima b para la vida serían la cantidad de emisión de rayos X y ultravioleta emitidos por estrellas activas como

Próxima, o que Próxima b sufriese un acoplamiento de marea al estar muy cerca de su estrella: así, siempre ofrecería la misma cara a la estrella, de modo que en un hemisferio sería de día permanentemente y en el otro nunca llegaría la luz. Sin embargo, existen diferentes teorías que explican cómo, incluso sucediendo todo esto, podríamos llegar a tener condiciones que permitiesen la vida. Lo cierto es que necesitamos estudiar este sistema intensamente en años venideros para poder empezar a responder todas estas preguntas.

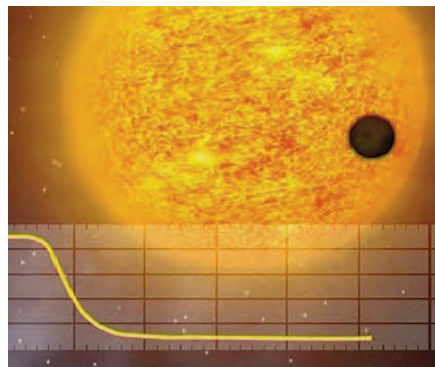
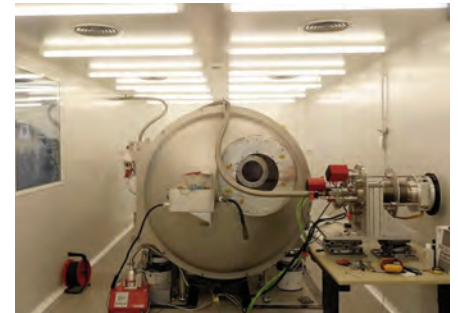


Ilustración de un tránsito, que muestra cómo el paso de un planeta por delante de su estrella afecta a su curva de luz. Fuente: ESA.

Actualmente, el equipo Pálido Punto Rojo, así como otros equipos de investigación, está realizando la búsqueda de eclipses de Próxima b desde diversos telescopios en Chile y Sudáfrica y realizando propuestas de observación desde satélites espaciales para poder descubrir si Próxima b transita su estrella. Esto es solo el principio: la puesta en funcionamiento de nuevos telescopios como el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT) y el telescopio espacial James Webb, o espectrógrafos de alta precisión como Espresso -que se instalará en Chile-, o CARMENES, que ya funciona en Calar Alto desde principios de este año y en el que participa nuestro grupo de investigación en el IAA,



El instrumento CARMENES para la búsqueda de planetas de tipo terrestre desde el Observatorio de Calar Alto.

serán fundamentales para el análisis de alta precisión de atmósferas en estos planetas cercanos.

En caso de confirmarse que tiene agua sobre su superficie, ¿podríamos enviar una sonda hasta él? ¿Cuánto tardaría en llegar y enviar datos?

Aún estamos un poco lejos de saber si tiene agua líquida en su superficie, algo fundamental para la existencia de vida. Si pudiésemos enviar una sonda a la velocidad de la sonda espacial Voyager I, unos sesenta y un mil kilómetros por hora, tardaríamos en llegar unos setenta y cinco mil años.

Sin embargo, recientemente se ha presentado el proyecto *Starshot*, que pretende enviar una flota de pequeños robots al sistema Alpha Centauri a una velocidad mucho mayor y cuyos representantes han mostrado un vivo interés en el hallazgo de un planeta en torno a Próxima. El proyecto *Starshot* ha adelantado que se requerirán dos décadas para el desarrollo de la tecnología que permita acelerar estos pequeños robots hasta un 20% de la velocidad de la luz, que tardarían en torno a veinte años en llegar al sistema Alpha Centauri.

¿Cuál es el siguiente exoplaneta potencialmente habitable descubierto más cerca de la Tierra después de Próxima b?

Esta lista cambia continuamente con el descubrimiento de más planetas, pero uno de los más cercanos potencialmente habitables es Kapteyn b, a unos trece años luz, también descubierto por nuestro equipo.

La Tierra desde el espacio: la reconstrucción de un sueño

¿CÓMO SE VE LA TIERRA DESDE EL ESPACIO? HASTA HACE SETENTA AÑOS NO TUVIMOS UNA IMAGEN PARA SABERLO, PERO LA FÉRTIL IMAGINACIÓN DEL SER HUMANO HA PRODUCIDO INTERESANTES Y VARIADAS ILUSTRACIONES

Por Montserrat Villar (CAB, INTA/CSIC) y Miguel Ángel Delgado (periodista y escritor)

EN ESTE AÑO 2016 CONMEMORAMOS DOS FECHAS IMPORTANTES, que marcaron un antes y un después en nuestra capacidad de imaginar. Celebramos el 70 aniversario de la primera imagen de la Tierra tomada desde el espacio y el 50 aniversario de la primera obtenida desde la vecindad lunar. Mucho antes de que sucedieran estos logros históricos hubo artistas,

escritores y científicos, todos grandes soñadores, que imaginaron la Tierra desde el espacio. En este artículo les rendimos homenaje: viajamos fuera de la atmósfera con la imaginación para contemplar nuestro planeta desde el espacio con los ojos de Julio Verne, Georges Méliès, Camille Flammarion, así como de los ingenieros y científicos que hicieron el sueño realidad.

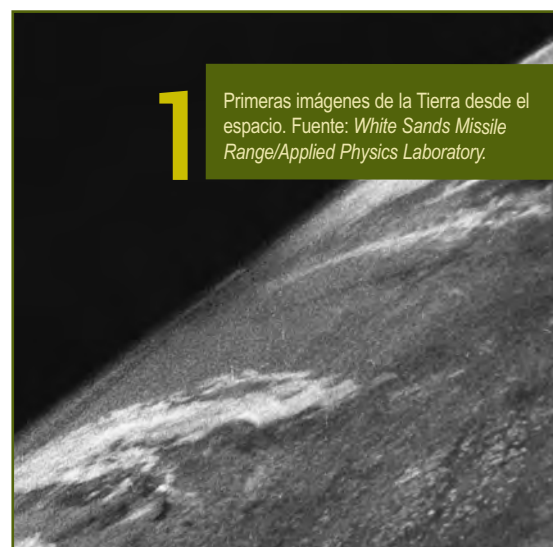
●● imagen1. Primeras imágenes de la Tierra desde el espacio ●●

24 de octubre 1946

Cámara a bordo de un cohete V-2, New Mexico, EEUU

El 24 de octubre de 1946, poco después del final de la Segunda Guerra Mundial, se tomaron las primeras imágenes de la Tierra desde el espacio. La cámara voló a bordo de un misil V-2, diseñado en un inicio como arma de guerra y que, tras el conflicto, fue reconvertido en una herramienta de investigación científica con fines pacíficos.

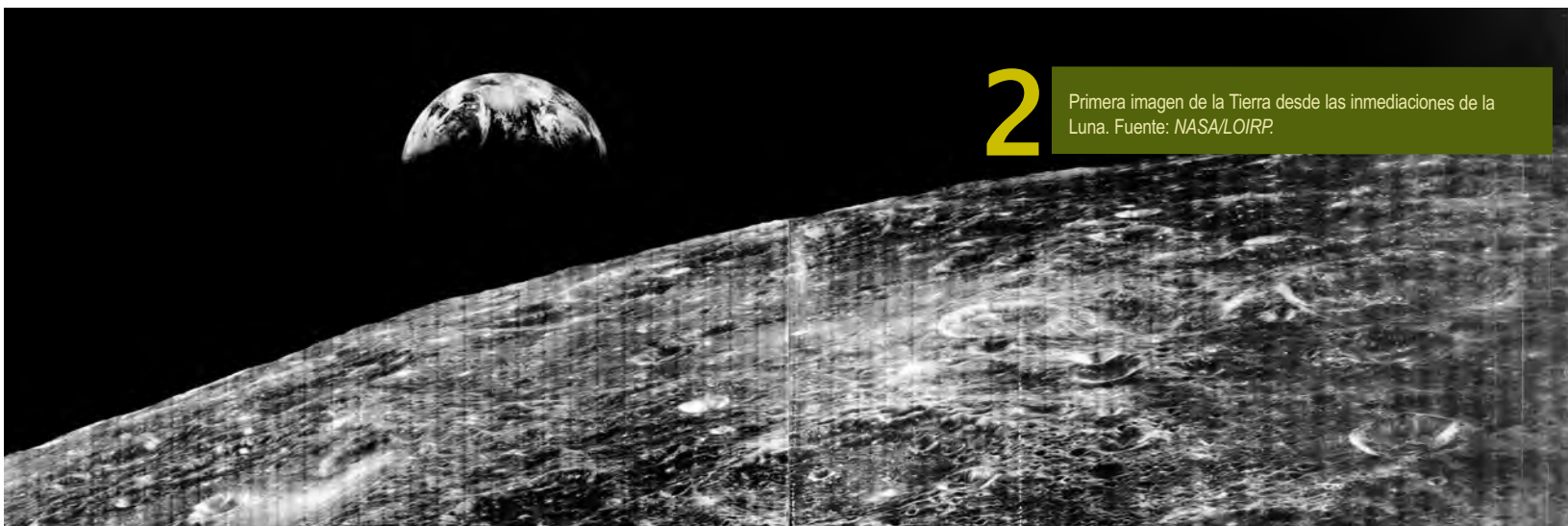
Fue el primer objeto artificial que rebasó en su vuelo los cien kilómetros de altura que, de manera algo arbitraria, se considera el límite entre la atmósfera terrestre y el espacio exterior. El cohete alcanzó una altitud de ciento cinco kilómetros, y pocos minutos después cayó a la Tierra. La cámara fue recuperada con la batería y la lente destrozadas, pero el film sobrevivió al impacto. Quedó como legado la película en blanco y negro, de unos minutos de duración, que



1

Primeras imágenes de la Tierra desde el espacio. Fuente: *White Sands Missile Range/Applied Physics Laboratory*.

muestra cómo la superficie de la Tierra se aleja a medida que el cohete asciende a la velocidad vertiginosa de unos cuatro mil cuatrocientos kilómetros por hora. Los detalles del lugar de lanzamiento en Nuevo México (EEUU) se hacen cada vez más pequeños y terminan por desdibujarse bajo un mar de nubes, dando paso a la visión inolvidable de la superficie curvada de nuestro planeta. Clyde Holliday, el ingeniero que adaptó la cámara fotográfica, declaró en 1950 a *National Geographic* que estas imágenes mostraban cómo visitantes de otro planeta verían la Tierra al acercarse en una nave espacial.



2

Primera imagen de la Tierra desde las inmediaciones de la Luna. Fuente: *NASA/LOIRP*.



3 La Tierra en el centro del universo.
Hildegard Von Bingen.



4 Mapa del mundo.
Thomas Burnet.

●● **imagen2. Primera imagen de la Tierra desde las inmediaciones de la Luna** ●●

23 de agosto 1966

Lunar Orbiter (NASA, EEUU)

En los años siguientes, se consiguieron numerosas fotografías y películas en diferentes vuelos que captaron imágenes parciales de la Tierra. El 23 de agosto de 1966, hace 50 años, se obtuvo la primera imagen de nuestro planeta desde las inmediaciones de la Luna. Fue tomada por el *Lunar Orbiter* (orbitador lunar) I de la NASA y transmitida a la estación de seguimiento en Robledo de Chavela, cerca de Madrid.

La superficie lunar, plagada de cráteres, aparece en primer plano. A lo lejos, la Tierra se eleva sobre el horizonte. En las dos décadas anteriores, las imágenes de nuestro planeta desde el espacio cubrían solo partes de su superficie. Este paisaje lunar, con la Tierra en la distancia, produce un cambio sutil y profundo en nuestra percepción: es la visión de nuestro planeta como un lugar diferente en el espacio. Intuimos que no es el único sitio; que, aunque singular y extraordinario para nosotros, es uno más en la vastedad del espacio.

●● **imagen3. La Tierra en el centro del universo** ●●

en "*Scivias*", mediados del S. XII

Hildegard Von Bingen

No hizo falta abandonar nuestro planeta y verlo en la distancia para conocer su forma esférica. Este hecho estaba ampliamente aceptado desde hacía muchos siglos en la época de la monja benedictina alemana Hildegard von Bingen (1098-1179).

Von Bingen fue escritora, teóloga, abadesa, naturalista, poetisa; una mujer polifacética y culta que ejerció una gran influencia en la historia medieval de Occidente. Es considerada una de las místicas más importantes de todos los tiempos. De fuerte espíritu renovador, fundó su propio monasterio en un siglo en el que las órdenes femeninas dependían de su alianza con una orden masculina a la que debían someterse. La curiosidad científica la llevó a observar numerosos fenómenos naturales. Estudió, por ejemplo, plantas y animales (identificó unas cuarenta clases de peces en los ríos cercanos a su convento).

Según su testimonio, los conocimientos le fueron revelados en visiones que tuvo desde muy niña. Una comisión de teólogos designados por el propio Papa dictaminó que, al igual que para los antiguos profetas, las visiones de Hildegard eran de origen divino. Las recopiló en su obra más importante, *Scivias*, publicada a mediados del siglo XII y que tardó diez años en completar. Consta de veintiséis visiones referidas a diferentes temas.

La iluminación de la figura acompaña a la tercera visión dedicada al universo incluida en la primera parte de *Scivias*. Así era el cosmos que Dios reveló a von Bingen. Tenía forma de huevo y estaba rodeado de fuego. La Tierra, con una curiosa geología delineada por viento y agua, reina portentosa en el centro de un firmamento plagado de estrellas. La autora describe la relación que cada elemento de este universo guarda con Dios y con la historia sagrada.

●● **imagen4. Mapa del mundo** ●●

en "*Teoría sagrada de la Tierra*", 1684

Thomas Burnet

Thomas Burnet (1635-1715) fue un teólogo inglés. Creó mapas de la Tierra antigua que aparecieron en la primera parte de su obra *Teoría sagrada de la Tierra*, publicada en 1681 en latín y reeditada en 1684 en inglés.

En su dedicatoria del libro al rey de Inglaterra, Burnet explica que desea presentarle una teoría que describe los orígenes del mundo. Fue en sus inicios creado por Dios como una esfera perfecta. Se convirtió en el planeta irregular que es, plagado de montañas y valles, tras el diluvio universal. Burnet calculó la cantidad de agua existente en la naturaleza y concluyó que no era suficiente para explicar la inundación catastrófica producida tras el diluvio universal. Para explicar esta contradicción propuso que en el origen, el interior de nuestro planeta era una esfera hueca, regular y perfecta, que estaba llena de agua. En un momento dado, Dios decidió castigar los pecados del mundo provocando un cataclismo: la superficie de la Tierra se partió y todas las partes fueron inundadas. Cuando los mares y océanos se retiraron y dejaron las tierras secas, quedaron las ruinas sobre las que camina la humanidad. De esta manera, Burnet trataba de reconciliar la historia sagrada con una visión que, según él, era científica.

En la ilustración aparece la Tierra en la distancia, tal y como Burnet la imaginó si desaparecieran todos los mares y océanos. Se aprecian en primer plano África, Asia y Europa.



5

El Sol eclipsado por la Tierra visto desde la Luna. Ilustración de James Nasmyth.

●● imagen5. El Sol eclipsado por la Tierra visto desde la Luna ●●

en "La Luna: considerada como un planeta, un mundo y un satélite", 1874

James Carpenter y James Nasmyth (ilus.) En 1874, el ingeniero mecánico e inventor James Nasmyth (1808-1890) y el astrónomo James Carpenter (1840-1899) publicaron el libro *La Luna: considerada como un planeta, un mundo y un satélite*. Soñaron con un viaje a la Luna y describieron con detalle las sensaciones que allí experimentaría el ser humano. Imaginaron, por ejemplo, los cambios que se apreciarían en el paisaje, debidos a los juegos de luces y sombras sobre el rugoso relieve lunar; o los contrastes de brillo y color debidos a la composición de la superficie, donde diferentes minerales darían coloraciones especiales y únicas al paisaje.

Describieron con detalle los efectos de la ausencia de atmósfera, como el silencio lunar: "Un silencio mortal reina en la Luna: mil cañones podrían ser disparados y mil tambores golpeados en aquel mundo sin aire, pero ningún sonido saldría de ellos. Labios que podrían temblar, lenguas que intentarían hablar, pero ninguna de sus acciones rompería el silencio de la escena lunar".

La obra incluye interesantes ilustraciones de la superficie de nuestro satélite realizadas por Nasmyth. Se inspiró en moldes de escayola que él mismo construyó, basándose en observaciones telescópicas de la Luna. Los iluminó desde diferentes ángulos y tomó fotografías en las que se basaron sus dibujos.

En la figura, el Sol en la distancia aparece eclipsado por la Tierra, tal y como lo veríamos desde la Luna. Su forma empieza a despuntar detrás del círculo terrestre, que tiene un tamaño aparente unas cuatro veces mayor. La corona aparece espectacular. La luz solar atraviesa la fina capa de la atmósfera de nuestro planeta rodeándolo de un halo brillante y rojizo que ilumina la super-

ficie lunar. En este paisaje montañoso y salvaje reina la desolación, pero no está exento de grandeza.

●● 6. Servadac y sus colegas contemplan la Tierra desde un globo ●●

en "Héctor Servadac", 1877

Julio Verne. Ilustrador: Paul Philippoteaux Héctor Servadac (1877) es un título peculiar en la extensa obra de Julio Verne (1828-1905), en general obsesionada por la verosimilitud en todos sus planteamientos científicos. Sin embargo, en esta novela se permite abordar un argumento fantástico, en el que es fácil rastrear el hervor imaginativo de los astrónomos Arago y Flammarion, a quienes cita muchas veces en sus libros.

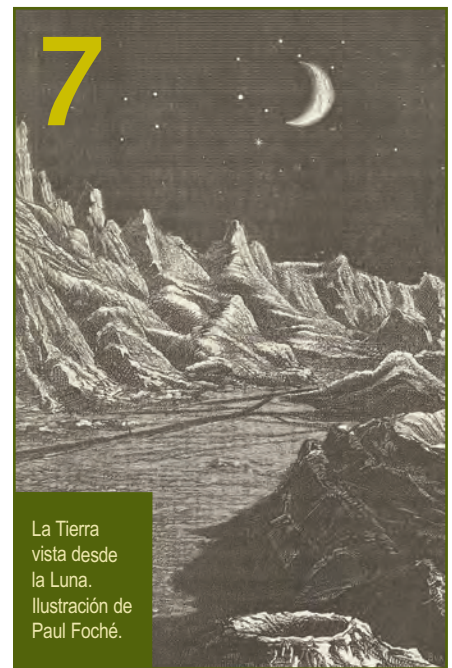
Un cometa golpea la Tierra y se lleva con-



Servadac contempla la Tierra desde un globo. Ilustración de Paul Philippoteaux.

6

sigo un trozo de la cuenca del Mediterráneo, junto con un puñado de habitantes que ejercen de estereotipos nacionales. Ante las variaciones en la fuerza de la gravedad y la posición y tamaño del Sol, acaban llegando a la conclusión de que están vagando por el Sistema Solar, siguiendo al astro en su larga órbita. Y cuando, subidos a un globo desde el que esperan retornar a su planeta cuando



La Tierra vista desde la Luna. Ilustración de Paul Foché.

el cometa complete su órbita, observan la Tierra que se va acercando, cada uno de ellos distingue sus países de origen: Rusia, Francia, España...

En un momento de apogeo nacionalista, la reacción que Verne imaginó, lejos de Sagan y su lectura de una única humanidad un siglo después, fue que la experiencia espacial reafirmaría el orgullo nacional. Cuatro décadas después, todo ese caldo de cultivo acabaría llevando al mundo a la Gran Guerra.

●● imagen7. La Tierra vista desde la Luna ●●

en "Las tierras del cielo; viaje astronómico sobre otros mundos", 1884

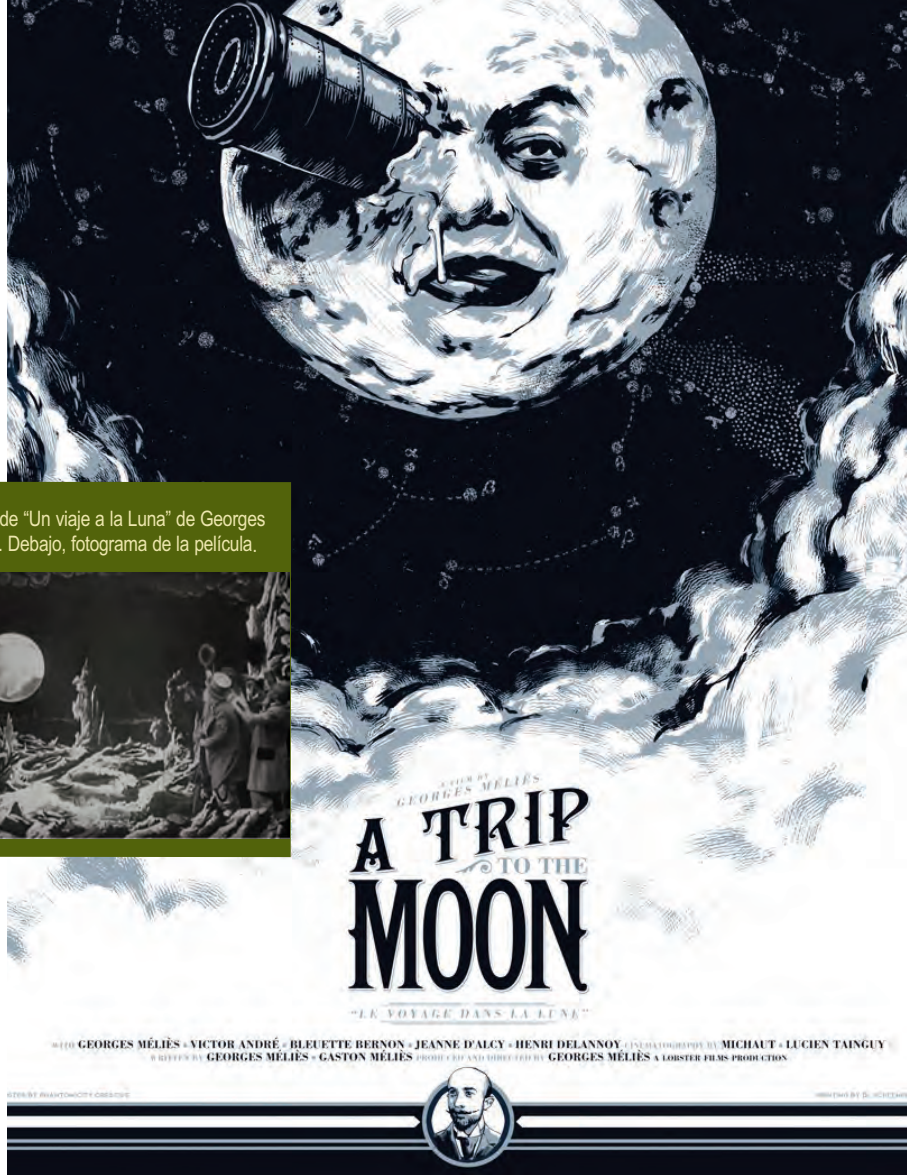
Camille Flammarion

Ilustrador: Paul Foché

Al astrónomo y escritor francés Camille Flammarion (1842-1925) le apasionó la astronomía desde niño. Con once años observó la luna a través de unas gafas de ópera y allí creyó ver montañas, mares y países como en la Tierra, quizás incluso habitantes.

Ya de adulto, se dedicó a la investigación de la astronomía y contribuyó a su popularización con numerosas obras. Entre ellas publicó *Las tierras del cielo; viaje astronómico sobre otros mundos*, que contiene muchas ilustraciones, incluyendo algunas de la Tierra vista desde la Luna. En la figura se muestra una de ellas. La Tierra, en fase de cuarto creciente, reina sobre un paisaje lunar diverso de llanuras, montañas y cráteres. Flammarion describió con gran detalle la noche estrellada vista desde la cara visible de nuestro satélite. "En la puesta de sol, el astro de día se acerca lentamente hacia el horizonte y las sombras negras de las montañas se alargan en silencio como gigantes. Ningún color en el cielo, ninguna gloria,

Cartel de "Un viaje a la Luna" de Georges Méliès. Debajo, fotograma de la película.



ninguna pompa acompañan su salida. A su vez, la luz zodiacal desciende despacio, dejando el imperio de la noche al ejército de estrellas, a la Vía Láctea y sobre todo a la Tierra, cuyo brillo ilumina desde los cielos el paisaje adormecido”.

Flammarion dedicó los últimos años de su vida al estudio de Marte. Estaba convencido de la existencia de vida en el planeta rojo y fue uno de los primeros en creer en la posibilidad de habitarlo.

●● imagen8. “Viaje a la Luna” ●●

Georges Méliès, 1902

Ilustrador: Paul Foché

Los hermanos Lumière inventaron el cine, pero fue Georges Méliès (1861-1938) el que demostró todo lo que una cámara podía crear. Mago de profesión, pronto comprendió que el cinematógrafo era la herramienta definitiva para hacer realidad lo imposible. Así, era inevitable que terminara cruzándose con Julio Verne, haciendo películas libremente inspiradas en su universo.

Y, cómo no, no podía faltar el *Viaje a la Luna* (1902), en el que combinó el imaginario verniano con el relato de H.G. Wells *Los primeros hombres en la Luna*, más una divertida y heterodoxa reunión de materiales que incluían estrellas como coristas y seleni-

tas más cercanos a la caricatura de una tribu africana.

Pero es curioso que, en el momento en el que los viajeros ven la “salida” de la Tierra desde nuestro satélite, ese efecto no tenga más añadido que el globo que va ascendiendo mientras las montañas lunares descienden, quizá para poder contemplarlo mejor. No hay ninguna criatura, ningún efecto especial adicional: la mera idea de que la Tierra pudiera surgir del horizonte como para nosotros lo hace la Luna, era suficiente para maravillar al público. Es el resultado que una y otra vez, incansablemente, buscaba Méliès en todo lo que hacía, y que conseguía siempre con creces.

●● imagen9. Pálido punto azul ●●

Imagen de la Tierra tomada por la sonda *Voyager* (1990)

El 14 de febrero de 1990, tras dejar atrás el planeta Neptuno, la sonda *Voyager I* de la NASA giró la cámara para tomar una foto de familia de los planetas del Sistema Solar. Así quedó retratada la Tierra, apenas del tamaño de un píxel, solo un pálido punto azul en la vastedad cósmica. Con este título, el pálido punto azul ha pasado a la historia esta imagen icónica de la Tierra en la distancia.

“Eso es aquí. Ese es nuestro hogar. Eso somos nosotros. Ahí han vivido sus vidas todos a quienes has amado, a quienes conoces, todos aquellos sobre los que has oído hablar alguna vez, todos y cada uno de los seres humanos que han existido”.

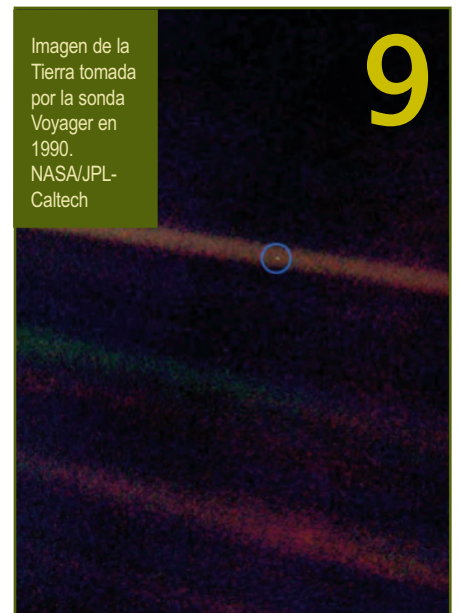
De esta manera comenzaba la inolvidable reflexión que el astrónomo, escritor y divulgador científico Carl Sagan (1934-1996) hizo sobre esta imagen. Fue miembro del equipo de la misión. Aunque no formaba parte del plan inicial, Sagan convenció a la NASA para que la sonda tomara una última fotografía a nuestro planeta. Sigue siendo la imagen más distante que se ha obtenido de la Tierra, que aparece como un punto insignificante en medio de una banda luminosa (que constituye un artefacto debido a luz dispersada por la óptica de la cámara).

La misión *Voyager I* ha abandonado nuestro Sistema Solar para siempre. Desde allí, la Tierra aparecerá como la describió Camille Flammarion hace más de un siglo, cuando imaginó el fin del mundo en su obra con el mismo título (*La Fin du Monde*, 1894).

“Este fin del mundo ocurrirá sin ruido, sin revolución, sin cataclismo. [...] [La Tierra] Será un detalle insignificante en la inmensidad del universo. Actualmente es tan solo un punto entre todas las estrellas porque a esta distancia se pierde en su pequeñez infinita en la cercanía del sol, que es tan solo una pequeña estrella. En el futuro, cuando el fin de las cosas llegue a la Tierra, el evento pasará completamente desapercibido en el universo [...]”

Las imágenes de la Tierra en la distancia quizás han desterrado para siempre nuestra necesidad de ser el centro del universo, pero a la vez han inspirado nuestras conciencias para apreciar el mundo hermoso y frágil que es nuestro hogar en la vastedad del cosmos.

Imagen de la Tierra tomada por la sonda *Voyager* en 1990. NASA/JPL-Caltech



Plutón, Plutón... Quién te ha visto y quién te ve

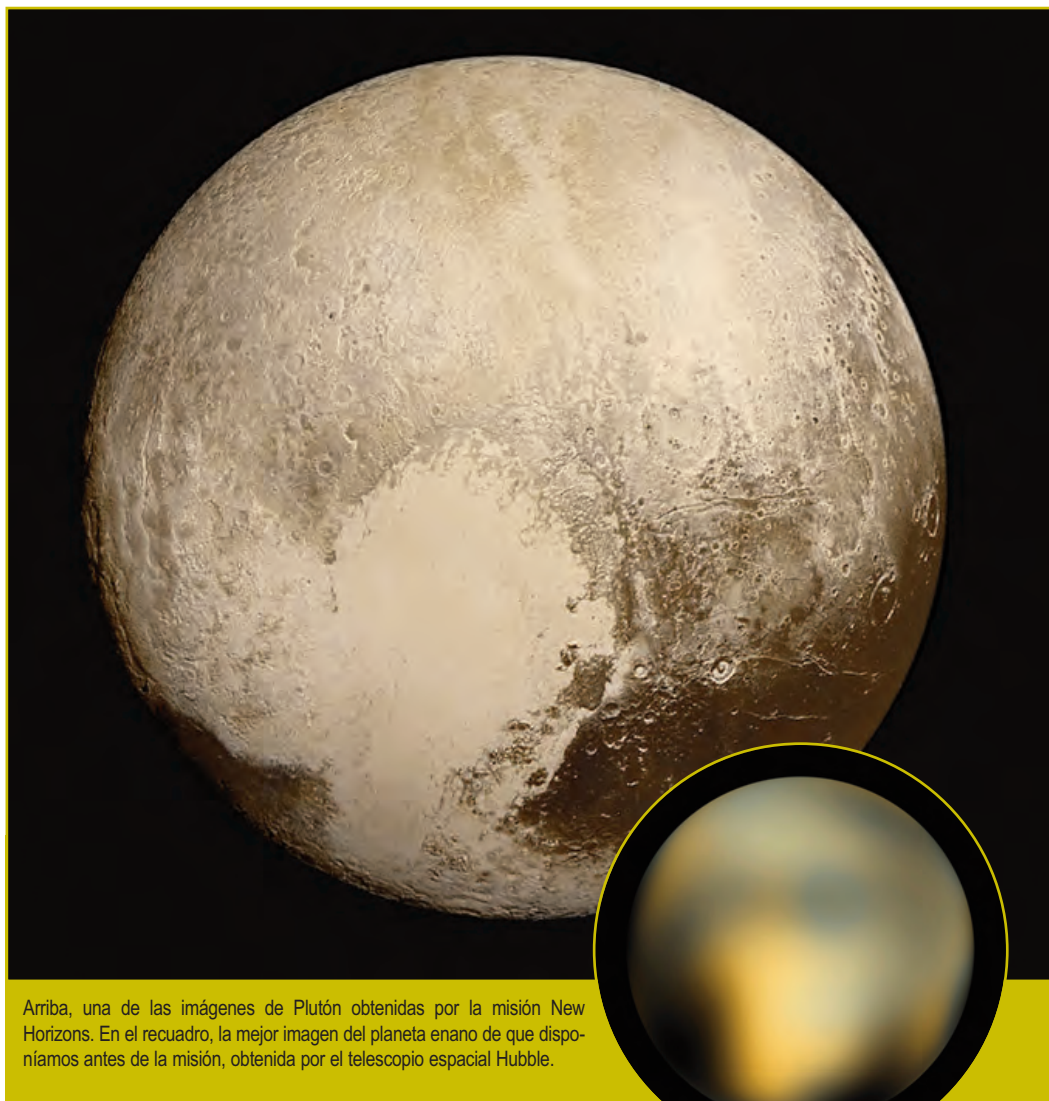
LAS IMÁGENES DE LA MISIÓN *NEW HORIZONS* (NASA) HAN CAMBIADO RADICALMENTE NUESTRA PERCEPCIÓN DEL PLANETA ENANO MÁS CONOCIDO

Por René Duffard (IAA-CSIC)

PLUTÓN ERA ESE NOVENO PLANETA QUE, SEGÚN NOS ENSEÑARON A CASI TODOS, ESTABA MÁS ALLÁ DE NEPTUNO. Pero a partir de 1992 comenzaron a descubrirse más objetos similares, u objetos transneptunianos (TNOs, de sus siglas de inglés), y también planetas girando alrededor de otras estrellas. ¿Dónde poníamos el límite? ¿Cuándo un cuerpo es planeta o asteroide? Hubo que sentarse a discutir la definición de planeta. Plutón fue descubierto en 1930 y clasificado como planeta, para ser reclasificado como planeta enano en 2006, terminando un reinado de unos setenta y seis años. "Plutón, no te quejes", dice Ceres, ex-asteroide con una historia más compleja aún: descubierto y clasificado como planeta en 1801, fue catalogado en 1850 como asteroide para ser clasificado nuevamente en 2006, pero esta vez como planeta enano.

Plutón fue visitado por la nave New Horizons (NASA) en julio de 2015: un sobrevuelo muy rápido, de unas pocas horas, después de nueve años de viaje. Las imágenes y datos que envió esta nave cambiaron el concepto que teníamos de Plutón y de los TNOs. Sabíamos que Plutón presentaba una tenue atmósfera y manchas de albedo (zonas más brillantes que otras en su superficie) y teníamos una estimación de su estructura interior. También sabíamos que le acompaña un gran satélite llamado Caronte y cuatro satélites más pequeños.

¿Cómo sabíamos todo esto? La presencia de una atmósfera se infiere a partir de ocultaciones estelares producidas por Plutón. Es decir, se observa cómo cambia la luz de una estrella cuando Plutón pasa por delante de

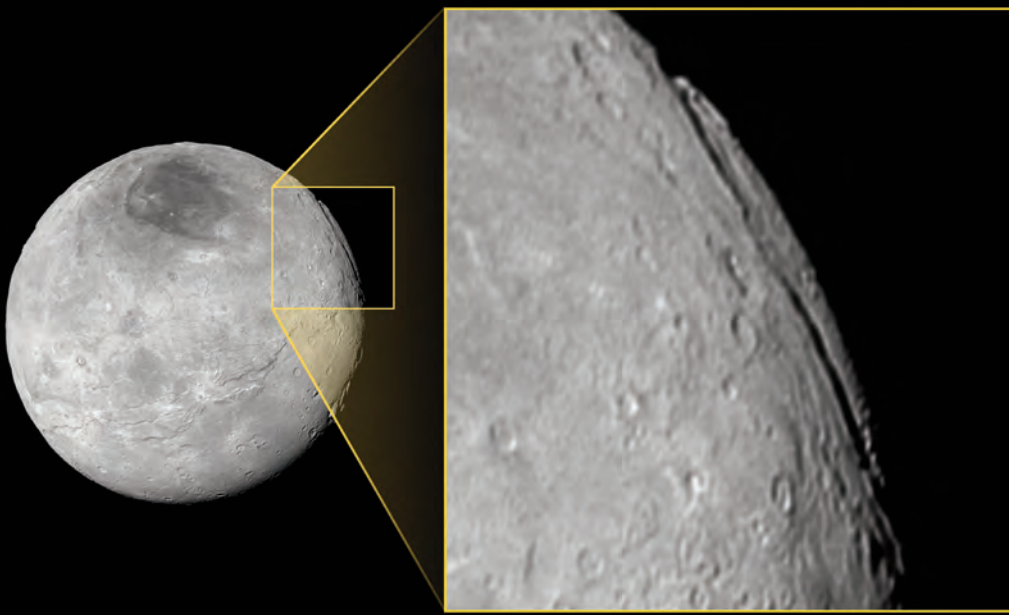


Arriba, una de las imágenes de Plutón obtenidas por la misión New Horizons. En el recuadro, la mejor imagen del planeta enano de que disponíamos antes de la misión, obtenida por el telescopio espacial Hubble.

ella. Cuando se ve que la luz disminuye de forma gradual hasta desaparecer, y que la estrella reaparece de forma también gradual, se concluye que se debe a la atmósfera, y así se ha caracterizado esa tenue atmósfera que tiene Plutón. Un cuerpo sin atmósfera, en cambio, haría que la luz de la estrella cayera bruscamente al pasar por delante de ella.

La estructura interna se puede conocer al combinar mediciones muy detalladas de su diámetro y de su masa. Si conocemos el diámetro, el volumen y la masa del objeto podemos obtener su densidad media, un dato muy importante en ciencias planetarias. El diámetro se puede determinar con precisión mediante ocultaciones estelares o

con mediciones térmicas utilizando telescopios espaciales como Herschel. La masa se calcula a partir de la interacción gravitatoria con sus satélites o con una nave espacial si se puede acercarse al cuerpo estudiado. Con esos parámetros se determina la densidad media del objeto y de ahí su estructura interna. La densidad media de la Tierra es de 5.51 gr/cm³, la del agua es de 1 gr/cm³, la de Júpiter de 1.33 gr/cm³ y la de Plutón de 1.88 gr/cm³. Concluimos de esto que el interior de la Tierra está formado por rocas; que Júpiter, dado su enorme tamaño, debe contener mucho material en estado gaseoso; y que Plutón, por su tamaño y densidad, debe tener un interior mezcla de rocas y hielos.



Arriba. Imagen de Caronte tomada por la misión New Horizons (NASA), donde se destaca el cañón que recorre una región de unos setecientos kilómetros de largo. Debajo. Células de hielo en la región Sputnik en Plutón (la imagen abarca cuatrocientos kilómetros de largo). Fuente: NASA/JHUAPL/SwRI.

Me imagino un diálogo entre dos geólogos en un congreso de un futuro próximo:
 - ¿Tú a qué te dedicas?
 - A la geología de las rocas volcánicas, Tenerife, Hawaii, Marte, la Luna, Mercurio, el asteroide Vesta. ¿Y tú?
 - Yo me dedico a la geología de los volátiles. Glaciares de N₂, montañas de agua, criovolcanes, células de convección de N₂, planicies de metano congelado...
 - ¿Tomamos un café caliente?
 - Gracias, mejor uno granizado.

New Horizons: sorpresas en Plutón

Pero lo más sorprendente que encontró la nave New Horizons fueron los detalles en la superficie de Plutón: unas manchas más brillantes debidas a la presencia de hielo en la superficie. Pero no de hielo de agua, sino de nitrógeno. ¿Cómo puede existir hielo de nitrógeno? Plutón tiene una tem-

peratura media de 40 K, o 230 grados bajo cero. Y, ¿puede haber tanto nitrógeno? Claro que sí: en la Tierra lo hay, pero se halla en estado gaseoso (el aire está compuesto en un 78% de nitrógeno). De modo que nitrógeno hay, tanto en Plutón como en la Tierra y en los otros planetas. En Plutón existe algo similar a unos casque-

tes polares o a una Antártida compuestos de hielo de nitrógeno, donde se pueden ver montañas compuestas de agua sobre un manto de nitrógeno sólido.

Ese enorme glaciar, nombrado Sputnik por el equipo de la nave, es el más grande del Sistema Solar y presenta unas formaciones como células poligonales de enormes proporciones. Esta capa de hielo de N₂ que presenta varios kilómetros de profundidad se calienta lentamente por el calor interno del planeta enano y sube lentamente a la superficie como una burbuja de agua hirviendo. Desde arriba, estas estructuras se ven como células poligonales de veinte kilómetros de extensión. Es curioso que sea el nitrógeno lo que las produce, pero resulta que 40K es la temperatura justa a la que el nitrógeno puede coexistir como sólido, líquido y gaseoso. Algo similar a lo que ocurre con el agua aquí en la Tierra.

Estas formaciones están en permanente cambio y se mueven, muy despacio, unos pocos centímetros al año, a la velocidad de crecimiento de una uña aproximadamente. Esto quiere decir que, cada quinientos mil años, el hielo de nitrógeno en la superficie de Plutón se renueva completamente. Y esta es la causa principal de que veamos hielo tan brillante o nuevo, y de que tenga un albedo alto.

En la superficie de esta planicie de nitrógeno, dentro de estas células de convección, se ven como pequeños cráteres, que son producidos por las pequeñas burbujas que llegan a la superficie y explotan para luego congelarse dejando en la superficie miles de pequeños cráteres. Es como ver desde arriba una sopa en ebullición en la que, cada vez que una burbuja explota, se congela en la superficie dejando un cráter.

Volviendo a la atmósfera de Plutón... ¿Es parecida a la de la Tierra? En absoluto. En primer lugar porque la presión atmosférica es muy, pero muy, inferior. De hecho, algunos expertos se niegan a catalogarla como atmósfera. La composición es fundamentalmente nitrógeno, con algo de metano y algo menos de monóxido de carbono. Y tiene una presión atmosférica de unos diez microbares (la presión atmosférica a nivel del mar aquí en la Tierra es de un bar). Esta atmósfera existe rodeando a Plutón como una neblina solo porque este planeta enano es suficientemente grande para retenerla, y los gases proceden de la sublimación de los hielos de la superficie.

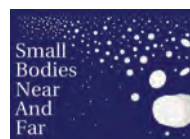
Los compañeros de Plutón

¿Y qué podemos decir sobre Caronte? Es el satélite más grande de Plutón y, de hecho, parecen un sistema binario: la relación de

CUERPOS PEQUEÑOS, LEJANOS Y CERCANOS

Para estudiar con más detalle estos cuerpos, en el IAA estamos participando en el proyecto europeo "Small Bodies: Near and Far" ("Cuerpos Pequeños: Cerca y Lejos"), que se centra en el estudio de unos cien objetos y cuenta con financiación para tres años. Su objetivo reside en reunir toda la información posible sobre estos cien objetos (algunos NEAs -asteroides con trayectoria próxima a la Tierra-, muchos asteroides del cinturón principal, algunos centauros y varios TNOs, incluyendo a Plutón) para hacernos una idea

completa y lo más detallada posible de ellos. Usaremos la información que nos proporcionan técnicas de observación muy diversas: la fotometría, la espectroscopía, el radar, la radioastronomía, el estudio de las emisiones térmicas y de las ocultaciones estelares producidas por estos objetos, así como de la información que nos han aportado los diferentes telescopios espaciales y la que obtenemos desde los observatorios de Sierra Nevada, Calar Alto, y La



Sagra, todos en Andalucía.

Determinaremos en detalle sus formas, tamaños y densidades, así como las propiedades ópticas y térmicas de la superficie. Con ello podremos definir estos asteroides como faros estándar para los radioastrónomos, así como conocer su origen y las propiedades de la superficie para, en un futuro no tan lejano, quizás hacer minería y extraer los materiales que nos interesen.

Más info: goo.gl/29Zwip

tamaños entre Caronte y Plutón es mayor que la relación de tamaños entre la Luna y la Tierra.

Se cree que Caronte se formó a partir de una colisión de otro cuerpo con Plutón, y prueba de ello son las marcas de colisión que todavía se ven en la superficie de Caronte (imagen superior página contigua). En esa imagen se puede apreciar una fractura, como el Gran Cañón del Colorado, pero mucho más profunda. La imagen se obtuvo en el mayor acercamiento de New Horizons a Caronte, y se puede apreciar, justo en el limbo, la profundidad de la fractura, que mide unos nueve kilómetros de profundidad y unos setecientos kilómetros de largo (casi toda España de Norte a Sur). Este cañón es casi tan profundo como el Valle Marineris en Marte y se cree que se formó al congelarse un océano en el interior de Caronte, que se expandió generando esa gigantesca fractura.

Plutón tiene otras cuatro pequeñas lunas: Estigia, Nix, Cerbero e Hidra. Antes de la visita de la nave New Horizons se conocía muy poco de ellas, gracias al telescopio espacial Hubble. Ahora se conoce algo más, como su diámetro (entre treinta y cuarenta kilómetros), y que son bastante brillantes, lo que permite inferir que están compuestas de hielo de agua. Estos satélites serían fragmentos de la colisión que formó a Plutón y Caronte.

Fue muy difícil obtener todos estos datos y fotografías por la nave New Horizons.

Desde mi punto de vista, constituye un logro combinado de la ingeniería, la astrofísica, la ingeniería de telecomunicaciones, el desarrollo de software y muchas otras áreas. Esas fotografías de alta definición que la sonda envió a la Tierra son un logro científico increíble, ya que la nave viajaba a cincuenta mil kilómetros por hora, la iluminación solar era mínima a aquellas distancias, el objeto a fotografiar era oscuro y se hallaba a cinco mil novecientos millones de kilómetros. Es como que te pidan construir una cámara de fotos que va a ser sacudida muy violentamente (durante el despegue), va a viajar durante nueve años y cada cierto tiempo se enciende para obtener fotos de Marte y Júpiter. Después hay que enviarle las instrucciones para programar la serie de fotografías que suponen una dificultad similar a estar subido en un coche de Fórmula 1 atravesando un túnel oscuro y fotografiar un trozo de carbón dentro de ese túnel. La señal o los datos enviados tardan cinco horas en llegar a la nave, de modo que tiene que estar todo programado con precisión para evitar errores: hay que conocer dónde están Plutón y sus satélites en ese preciso momento, cómo están de iluminados, cuál es la velocidad relativa de la nave y a qué distancia se halla de la superficie. Obtenidos los datos, hay que guardarlos en el disco duro y luego, cuando todo haya pasado, enviarlos a la Tierra. Sencillamente increíble.

La nave ha enviado diez gigas de datos desde Plutón (una película tiene del orden de un giga de tamaño) y lo hizo a lo largo de nueve meses debido a la lentitud de la velocidad de transferencia. Y luego nos quejamos de nuestra velocidad de bajada de datos en internet.

Imagen compuesta a partir de un mosaico que muestra todo un hemisferio de Plutón.
Fuente: NASA/JHUAPL/SwRI.

AVANCE EN LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA DE LAS ESTRELLAS

EN OCASIONES, LAS PERSONAS, LAS MONTAÑAS Y LA TIERRA, TODO, MENOS LAS ESTRELLAS, SON UNA SOLA COSA.

J. Steinbeck

[1] Las estrellas, como los seres vivos, nacen, viven durante un cierto tiempo e, inevitablemente, mueren. La vida de una estrella está dictada principalmente por su masa y por su composición química iniciales. Cuanto más masiva es una estrella, más rápidamente agota sus fuentes de energía y, por lo tanto, tiene una vida más breve. Cuando el combustible nuclear disponible termina hay tres caminos finales para una estrella, que depende esencialmente, como se ha dicho, de su masa inicial: si la masa es menor que ocho veces la masa del Sol, terminará sus días como una enana blanca (caso del Sol); en cambio, si la masa está comprendida entre ocho y veinte veces la masa del Sol, sufrirá una explosión de supernova cuyo resultado será una estrella de neutrones; y, finalmente, si la masa es mayor que veinte veces la masa solar, la estrella también explotará como una supernova, pero el resultado final será un agujero negro. No todo el hidrógeno (el principal combustible) está disponible para la producción de energía en las estrellas. Para que eso ocurra es necesario que las condiciones físicas sean las adecuadas para que las reacciones termonucleares tengan lugar; eso solo ocurre en el interior profundo de las estrellas, donde las temperaturas son del orden de millones de grados. El proceso por el cual una estrella extrae energía es parecido al de la bomba de hidrógeno, con la

salvedad de que la combustión está controlada por el equilibrio hidrostático (presión versus gravedad) en el interior de la estrella: durante su vida, la estrella debe estar en equilibrio y la gravedad, que hace que la estrella tienda a colapsar sobre sí misma, debe ser contrarrestada por la presión de los gases y de la radiación, que hace que la estrella tienda a expandirse. Para determinar cuánto tiempo vive una estrella es necesario conocer el tipo de caldera nuclear estelar y el tipo de reacciones termonucleares que se producen en ella. Estas dos características están fuertemente ligadas, como veremos. Hay dos conjuntos principales de reacciones nucleares responsables por la producción de energía: la llamada cadena pp, en la cual cuatro protones se fusionan después de una serie de reacciones preliminares para formar un núcleo de helio, y el ciclo CNO, en el cual también se forma un núcleo de helio, positrones, neutrinos y radiación gamma. En el ciclo CNO los núcleos del carbono, nitrógeno y oxígeno toman parte activa como catalizadores de las reacciones termonucleares. Hay una gran diferencia termodinámica entre estos dos procesos: mientras la cadena pp no es muy sensible a la temperatura, el ciclo CNO es altamente dependiente de la temperatura. Tal diferencia en la sensibilidad a la temperatura provoca un comportamiento también diferente en la distribución de las

Contexto. El rebosamiento núcleo convectivo (*core overshooting*) extiende la vida útil de la secuencia principal de una estrella [1]. Las trayectorias evolutivas calculadas con rebosamiento del núcleo son muy diferentes de las que utilizan el criterio clásico Schwarzschild, que conduce a predicciones bastante diferentes para las propiedades estelares. Los intentos de las últimas dos décadas para calibrar el grado de rebosamiento con respecto a la masa estelar utilizando estrellas eclipsantes de doble línea no han sido concluyentes, debido principalmente a la falta de datos de observación adecuados [2].

Objetivos. Vamos a retomar la cuestión de una posible dependencia entre la masa de la estrella y el rebosamiento con una muestra más completa de binarias, y examinar cualquier relación adicional que podría existir con el estadio evolutivo o con la abundancia de metales.

Métodos. Se utilizó una muestra cuidadosamente seleccionada de treinta y tres binarias eclipsantes de doble línea con una posición



Ilustración de los distintos caminos evolutivos de las estrellas dependiendo de su masa.

temperaturas en el interior estelar: en las estrellas donde predomina la cadena pp, el gradiente de temperaturas (diferencia de temperaturas en puntos situados a distintas distancias en el interior estelar) no es muy grande y, como consecuencia, la energía es transportada al exterior por radiación. Eso ocurre principalmente en estrellas de baja masa, típicamente menores que 1.3 veces la masa del Sol aproximadamente; sus núcleos son constituidos por

capas de composición química diferentes. Por otra parte, cuando el ciclo CNO predomina y dada su alta dependencia de la temperatura, los gradientes son muy grandes y la energía es transportada por convección (el material del núcleo es eficazmente mezclado). Este proceso es característico de estrellas más masivas.

EN LOS NÚCLEOS DE LAS ESTRELLAS MÁS MASIVAS PUEDE OCURRIR UN FENÓMENO, DENOMINADO *REBOSAMIENTO DEL NÚCLEO*, QUE MODIFICA SU CAMINO EVOLUTIVO,

PRINCIPALMENTE EN LO QUE CONCIERNE A SU TIEMPO DE VIDA. DECONSTRUIMOS EL RESUMEN DE UN ARTÍCULO CIENTÍFICO DEDICADO AL ESTUDIO DE ESTE FENÓMENO

estratégica en el diagrama H-R, con dimensiones absolutas precisas y masas de sus componentes que van desde 1.2 a 4.4 masas solares. Se compararon sus propiedades medidas con los cálculos de evolución estelar para inferir valores semiempíricos del parámetro de rebosamiento de cada estrella.[3]

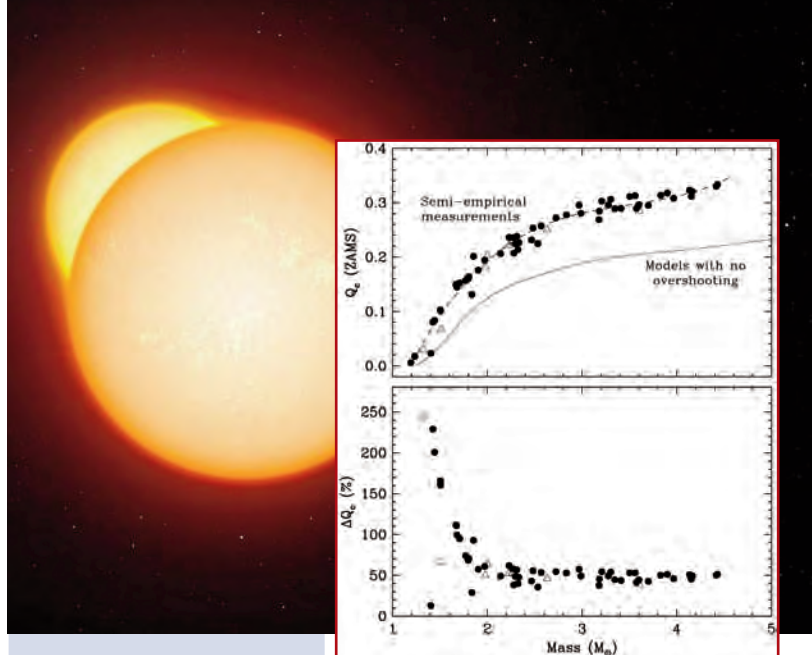
Resultados. [4] Encontramos una relación entre el parámetro de rebosamiento y la masa, que se define mucho más claramente que en trabajos anteriores, e indica un aumento significativo hasta aproximadamente dos masas solares, seguido de poco o ningún cambio más allá de esta masa. No se han hallado dependencias apreciables con el estadio evolutivo o con la metalicidad.

A. Claret and G. Torres. "The dependence of stellar core overshooting on stellar mass". Astronomy & Astrophysics, vol 592

[2] En los núcleos convectivos de las estrellas más masivas puede ocurrir un fenómeno que modificaría drásticamente el camino evolutivo de estas estrellas, principalmente de sus tiempos de vida. Dicho fenómeno es conocido como *core overshooting* (que podría ser traducido como rebosamiento del núcleo). El tamaño del núcleo convectivo clásico es dictado por el criterio de Schwarzschild y se basa en la aceleración de las células convectivas. Cuando esta es nula, se considera que dichos movimientos cesan. Sin embargo, por inercia, dichas células todavía pueden recorrer un camino mayor que el dictado por el mencionado criterio, resultando en un núcleo convectivo mayor. Como consecuencia habrá más combustible disponible, alargando la vida de las estrellas, entre otros detalles. Se puede hacer una analogía con una hoguera en el campo. En principio, la hoguera solo tendrá lugar donde están los leños pero debido a los movimientos térmicos, los vientos u otros factores el fuego puede alcanzar, por

ejemplo, el césped u otras ramas secas que estén alrededor de la hoguera. Dado que el *core overshooting* altera tanto la evolución como el tiempo de vida de las estrellas masivas, la determinación de su intensidad y cómo varía con la masa estelar es uno de los desafíos de la astrofísica moderna. Los datos a comparar con los cálculos teóricos deben ser muy precisos (masa, radios, temperaturas efectivas, metalicidad). Se han hecho varios intentos en el pasado para calibrar la cantidad de *core overshooting* con la masa utilizando estrellas binarias eclipsantes de doble línea –las fuentes más fiables de datos estelares– pero, debido a la escasez de datos, no se llegó a un resultado concluyente.

[3] Este artículo detalla una investigación en la que se estudia la dependencia del *core overshooting* con la masa, con el estadio evolutivo y con la abundancia en metales para un selecto grupo de estrellas. Se han seleccionado treinta y tres binarias eclipsantes con dimen-



siones absolutas muy precisas (del 1 al 5% de error) situadas en nuestro entorno, así como en las dos Nubes de Magallanes. Hay que señalar que no todas las binarias eclipsantes bien medidas son adecuadas, ya que el *core overshooting* solo es perceptible en estados evolutivos más avanzados: varios sistemas están en la fase de combustión del helio. Los autores compararon los datos observacionales con los cálculos teóricos de modelos evolutivos generados por el código GRANADA para inferir los valores del *core overshooting*.

[4] Se ha encontrado una relación entre la cantidad de *core overshooting* con la masa que es definida mucho más claramente que los trabajos anteriores. Tal relación indica un significativo aumento del *core overshooting* hasta dos masas solares, seguido de un cambio mucho más suave para estrellas más masivas (imagen superior). No se ha encontrado una dependencia apreciable del *core*

Valores del tamaño del núcleo en la fase en la que las estrellas empiezan a fusionar hidrógeno en función de la masa estelar. Los puntos representan los valores semiempíricos de la muestra observacional y la línea continua representa los modelos sin considerar la mezcla extra. El panel inferior representa el aumento fraccional del núcleo convectivo, también en función de la masa estelar.

overshooting con el estadio evolutivo y tampoco con la metalicidad de la muestra (que varía desde la solar hasta diez veces menos). Por otra parte se ha demostrado, a través de cálculos analíticos, que hay un límite para el *core overshooting*. Aunque se incremente la cantidad del *core overshooting*, el tamaño del núcleo convectivo resultante tiene un umbral que depende de la masa de la estrella y, en menor escala, de la composición química. Las implicaciones de esta investigación van desde síntesis de poblaciones estelares hasta la formación de enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros.

Vera Rubin, curvas de rotación galáctica y materia oscura

POR MIGUEL ÁNGEL PÉREZ TORRES
(IAA)

Tomemos la teoría de la gravitación de Newton, apliquémosla a galaxias en rotación y enseguida nos daremos cuenta de que algo no cuadra: las galaxias deberían desgajarse. ¿Por qué no lo hacen? Ya a mediados de los años 50 del siglo pasado, los astrónomos sabían de este problema. La materia de una galaxia orbita en torno a un punto central porque la mutua atracción gravitatoria genera fuerzas centrípetas. Pero no hay masa (luminosa) suficiente para que las galaxias produzcan la rotación observada. ¿Entonces, qué es lo que mantiene a las galaxias enteritas? Incluso antes, en los años 30, Fritz Zwicky había señalado que las velocidades de las galaxias en el interior del cúmulo de galaxias de Coma eran tan grande que solo podían explicarse si la razón masa/luminosidad era de 500. Por razones que ahora es difícil entender, nadie hizo caso a los resultados de Zwicky hasta pasados más de treinta años.

Vera Cooper Rubin (1928, Filadelfia, EE.UU.) se licenció en astronomía a finales de los 40 e intentó inscribirse en Princeton para hacer su tesis doctoral allí, pero no la admitieron por ser mujer (Princeton solo aceptó mujeres para el grado de astronomía a partir de 1975). Así que Vera se inscribió en el máster de la universidad de Cornell. No sé cómo le habría ido en Princeton, pero no creo que hubiera tenido mejores profesores de Física Cuántica (Richard Feynman) ni de Mecánica Cuántica (Hans Bethe). Finalizó el máster en 1951 y ese mismo año obtuvo las primeras observaciones de galaxias que no seguían el flujo de Hubble, sugiriendo que las galaxias podrían estar rotando alrededor de centros desconocidos, en lugar de estar separándose radialmente unas de otras, como la teoría del Big Bang proponía. Esta idea no tuvo una buena acogida entre sus colegas.

La grumosa distribución de las galaxias

Lejos de deprimirse, Vera Rubin continuó



Vera Rubin.

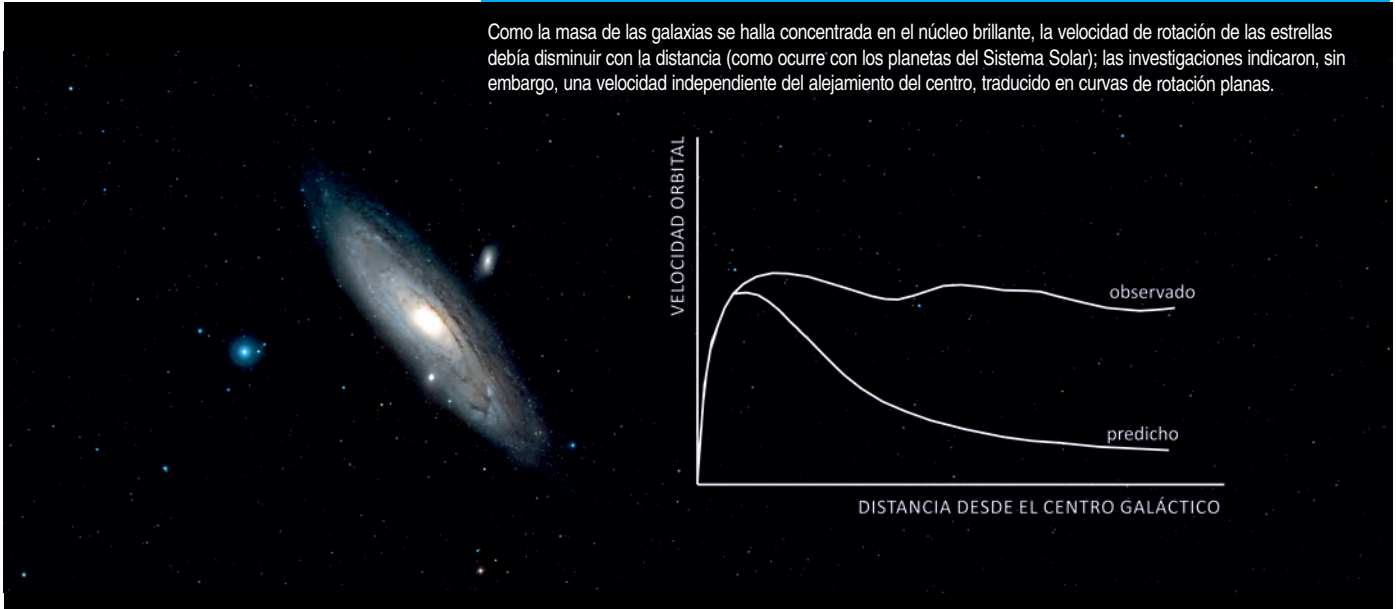
su trabajo, ahora para la tesis doctoral, en la Universidad de Georgetown, en el área de Washington D.C. Esta universidad era la única que ofrecía un doctorado en astronomía en toda el área cercana donde vivían los Rubin (Vera se casó con veinte años con Bob Rubin, físico, que había conseguido por entonces un trabajo estable en Washington). Entre 1952 y 1954, Vera Rubin fue dos veces por semana, por la noche, a los cursos de doctorado de astronomía. Rob y, especialmente, Vera, vivieron años frenéticos, en los que al tiempo que uno trabajaba y la otra cursaba el doctorado, iban naciendo y creciendo sus primeros dos hijos (tuvieron cuatro).

El director de tesis de Rubin fue George

Gamow, conocido promotor de la teoría del Big Bang. “Aprendí mucho de mis discusiones con él, aunque poco de ello relacionado con mi tesis”, diría Rubin sobre Gamow. Vera se graduó en 1954 con un trabajo en el que concluía que las galaxias estaban distribuidas de modo grumoso, como la harina en la sartén para preparar una salsa bechamel, en lugar de seguir una distribución aleatoria en el espacio. Como también le pasó a Gamow, cuyas ideas rompedoras sobre el Big Bang durmieron el sueño de los valientes durante casi veinte años, la sugerencia de Rubin no se retomó seriamente por el resto de colegas hasta principios de los 70.

Al año siguiente, en 1955, Vera aceptó una

Como la masa de las galaxias se halla concentrada en el núcleo brillante, la velocidad de rotación de las estrellas debía disminuir con la distancia (como ocurre con los planetas del Sistema Solar); las investigaciones indicaron, sin embargo, una velocidad independiente del alejamiento del centro, traducido en curvas de rotación planas.

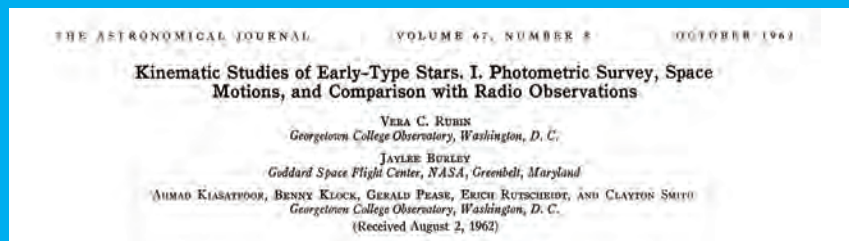


plaza de investigadora en el departamento de astronomía de la universidad de Georgetown, donde permaneció durante diez años. Fue a partir de 1960 cuando Vera se convirtió en la pionera de estudios de rotación estelar en galaxias. Rubin, junto a sus colaboradores, descubrió la existencia de una fuerte discrepancia entre las predicciones teóricas de curvas de rotación de numerosas galaxias, cuyas velocidades deberían ir decreciendo al alejarse del centro de la galaxia, y las observaciones, que indicaban un aplanamiento de las curvas de rotación, lo que en los años setenta llegó a conocerse como el “problema de la rotación galáctica”.

Rotación de galaxias y materia oscura

Todo se inició con un curso de máster que Rubin impartió a principios de los 60. Vera propuso a los seis estudiantes del curso que trabajaran en la determinación de una curva de rotación de estrellas de nuestra galaxia que estuvieran muy alejadas del centro. En el resumen del artículo (1) se puede leer: “Para radios $R > 8.5$ kpc, la curva de rotación es plana y no decrece como se esperaría si las órbitas fueran keplerianas”. Tras su publicación, muchos comentarios fueron negativos y hasta desagradables. Esta fue la primera curva de rotación plana publicada y, hoy día, el trabajo sigue citándose.

Este trabajo se hizo en colaboración con sus estudiantes de máster, así que cuando lo envié a *The Astrophysical Journal*, todos los estudiantes firmaban también el artículo. El editor dijo que aceptaba el trabajo, pero que no publicaría los nombres de los estudiantes. Vera replicó, tajante:



El editor dijo que aceptaba el trabajo, pero que no publicaría los nombres de los estudiantes. Vera replicó, tajante: “Entonces retiró el artículo”.

“Entonces retiró el artículo”. El editor dio marcha atrás y todos los estudiantes firmaron el artículo. Este no es sino uno de los muchos casos en los que Vera Rubin ha demostrado ser una persona íntegra, además de una defensora de la igualdad de derechos entre hombres y mujeres.

En los años 70, Rubin obtuvo la evidencia más clara hasta ese momento de la existencia de materia oscura, en una serie de trabajos publicados junto a sus colaboradores, en especial junto a Kent Ford (2, 3, 4). Aunque inicialmente la comunidad científica acogió con escepticismo estas observaciones, los resultados obtenidos por Rubin y sus colaboradores se han visto plenamente confirmados desde entonces. Con el tiempo, los intentos por explicar de forma satisfactoria este problema condujeron inevitablemente al desarrollo de la teoría de la materia oscura, que permite explicar, entre otras cosas, las curvas de rotación de las galaxias y el movimiento de estas en cúmulos de galaxias. Si hoy día prácticamente nadie cuestiona la existencia de la materia oscura, esto se debe esencialmente a las observaciones de Vera Cooper Rubin.

Sin su perseverancia y falta de dogmatismos a la hora de interpretar las observaciones, la materia oscura habría permanecido mucho más tiempo en el cajón del olvido.

Hay teorías alternativas de la gravitación newtoniana, como MOND (*Modified Newtonian Dynamics*), que no consideran la materia oscura, pero parecen quedar definitivamente excluidas, para gran desilusión de Rubin: “Si pudiera escoger, me gustaría que las leyes de Newton se pudieran modificar para describir correctamente las interacciones gravitatorias a grandes distancias. Me parece mucho más atractivo que un universo lleno de un nuevo tipo de partícula subatómica”.

(1) Rubin VC, Burley J, Kiasatpoor A, Klock B, Pease G, Rutschheid E, Smith C. 1962. *Astron. J.* 67:491

(2) Rubin VC, Ford WK Jr, Rubin JS. 1973. *Ap. J.* 183:L111

(3) Rubin VC, Ford WK Jr, Thonnard N, Roberts MS. 1976. *Astron. J.* 81:719

(4) Rubin VC, Ford WK Jr, Thonnard N, Roberts MS, Graham JA. 1976. *Astron. J.* 81:687



el "Moby Dick" de...

...Fernando Moreno (IAA)

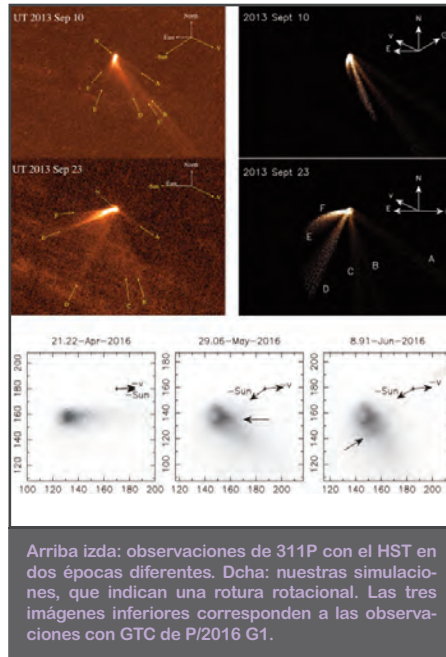
Asteroides activados



Realizó su tesis doctoral en el IAA, para la caracterización de los aerosoles presentes en las atmósferas de Júpiter y Saturno. Tras una estancia postdoctoral en el *Jet Propulsion Laboratory* (EEUU), regresó al IAA. Su participación en la misión Rosetta (instrumentos OSIRIS y GIADA) implicó un cambio de línea hacia el estudio de las propiedades del polvo cometario.

En 1979 se descubrió un objeto en el cinturón principal de asteroides que se denominó 1979 OW7, uno más de los objetos con tamaño superior a un kilómetro que existen en el cinturón (se estima que puede haber entre uno y dos millones). Sin embargo, en uno de sus acercamientos al perihelio, en 1996, este objeto mostró, además de una intensa condensación asociada al asteroide propiamente dicho, una fina cola similar a las que muestran los cometas cuando emiten polvo y gas. Este descubrimiento, realizado por Eric Elst y Guido Pizarro, junto con otros similares más recientes, ha llevado a considerar a estos asteroides como una nueva clase de objetos, una especie de híbrido entre asteroide, por sus características orbitales, y cometa, por la actividad que presentan. Se les suele denominar, generalmente, asteroides activados o "main-belt comets", aunque en este caso se suele referir a aquellos objetos de esta clase que muestran un comportamiento cometario en el sentido de repetir el ciclo de actividad cuando se acercan al perihelio, y que se mantienen activos durante un periodo relativamente largo (del orden de varios meses seguidos), como es precisamente el caso del objeto descubierto por Elst y Pizarro. A partir de los recientes programas de seguimiento de asteroides cercanos a la Tierra (NEOs), tales como LINEAR (*Lincoln Near-Earth Asteroid Research*), Catalina Sky Survey o Pan-STARRS, se han descubierto hasta la fecha unos quince objetos de este tipo.

Una de las características más notables de estos objetos es la aparente variedad de mecanismos de activación que pueden dar lugar a la emisión de polvo y, en general, la estabilidad de sus órbitas, que implica que en su mayoría son nativos del cinturón principal. Entre los mecanismos que pueden activar un asteroide se encuentran la sublimación de hielos, la eyección de polvo por impacto con otro objeto, la rotura por exceso en la velocidad de rotación o la fractura por dilatación térmica, además de una combinación de ellos. Como ya se ha mencionado, la sublimación de hielos cuando el objeto se acerca al perihelio podría dar lugar a la presencia de una coma o cola durante un tiempo prolongado. Sin embargo, en ninguno de los casos se ha detectado con fiabi-



Arriba izda: observaciones de 311P con el HST en dos épocas diferentes. Dcha: nuestras simulaciones, que indican una rotura rotacional. Las tres imágenes inferiores corresponden a las observaciones con GTC de P/2016 G1.

lidad ningún gas que pudiera confirmarlo. Hay que destacar, por otra parte, que la magnitud visual de estos objetos, que normalmente son de un tamaño de un kilómetro o menor, está casi siempre en el dominio $V > 19$, lo que hace que las mediciones espectroscópicas sean realmente difíciles con telescopios de medio o incluso gran tamaño. En los demás casos de activación mencionados no se espera que haya emisión gaseosa a niveles detectables, a no ser que la sublimación de hielos tenga lugar en combinación con esos otros mecanismos, al quedar los hielos que puedan existir en el interior del asteroide expuestos a la radiación solar.

Una sorprendente colección de objetos

En el año 2010, tras el descubrimiento de uno de estos objetos (P/2010 A2), iniciamos una colaboración con un grupo de investigadores del Instituto de Astrofísica de Canarias para la realización de observaciones con el Gran Telescopio Canarias (GTC) y la elaboración de modelos de eyección de polvo con objeto de determinar sus propiedades físicas y, sobre todo, sus mecanismos de activación. Nosotros teníamos ya una experiencia previa en la modelización de colas de polvo a partir de modelos

de tipo Monte Carlo, con los que habíamos caracterizado un buen número de colas cometarias y su evolución temporal, en particular aplicados al caso de 67P/Churyumov-Gerasimenko, objetivo de la misión Rosetta. Desde entonces, hemos observado y analizado doce de estos objetos, cada uno con sus características físicas propias y una morfología tremendamente diversa. Entre estos hay dos realmente excepcionales por su singular aspecto: 311P y P/2016 G1, el más reciente descubierto. El asteroide 311P, que fue observado con el GTC y con el telescopio espacial Hubble (HST), mostró un aspecto multi-cola, que interpretamos con nuestro modelo como el producto de una rotura rotacional por efecto YORP (disminución del periodo de rotación por emisión infrarroja), que va produciendo emisiones episódicas de polvo en diferentes momentos asociados a las diferentes colas (imagen). El más reciente, el P/2016 G1, muestra una morfología completamente distinta, con una cabeza en forma de C invertida y una pequeña extensión hacia el oeste, y las ausencias tanto de una condensación central que pudiera atribuirse a un núcleo como de otros fragmentos (imagen). Con nuestro modelo interpretamos que podría ser resultado de un impacto y posterior destrucción de los dos objetos en colisión, que no dejó fragmentos mayores de cincuenta metros, nuestro límite de detección. Posteriormente observamos este objeto con el HST, en cuyas imágenes, de resolución espacial superior, tampoco llegamos a observar ninguna condensación. Esto es realmente llamativo, ya que en todos los casos anteriores sí que se habían visto fragmentos. Estamos frente a una sorprendente colección de objetos, cada uno con sus propias peculiaridades físicas. En los próximos años seguiremos con este programa, intentando observar y analizar el máximo número posible de objetos para incrementar la estadística y establecer los mecanismos de activación, a la vez que intentando propugnar una misión espacial para el estudio in situ de uno de estos extraordinarios objetos, en particular de los que repiten actividad en cada ciclo orbital.

Mrk1018: el agujero negro que regresa a la sombra

Mrk1018 es un agujero negro supermasivo situado en el corazón de una galaxia lejana que ha cambiado de apariencia por segunda vez en treinta años

Un estudio acaba de demostrar que su último cambio se debe a la escasez de materia en el entorno del agujero negro: sin gas que absorber, el brillo del agujero negro desciende

► Los núcleos activos de galaxias son uno de los objetos más energéticos del universo, y pueden emitir de forma continuada más de cien veces la energía de todas las estrellas de la Vía Láctea. Son la manifestación de la existencia de un agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia huésped y, dependiendo del tipo de luz que emitan, se clasifican en diversos tipos. Ahora, un grupo de investigadores ha resuelto el caso de Mrk1018, un núcleo activo que ha cambiado de clasificación por segunda vez y que, tras treinta años brillando intensamente, ha regresado a la sombra.

La estructura de un núcleo activo de galaxia (o AGN, su acrónimo en inglés) consiste en un agujero negro, de hasta miles de millones de masas solares, rodeado de un disco de gas que lo alimenta y que, en su proceso de caída, libera gran cantidad de energía. “Los AGNs tienen, además, una estructura de polvo con forma de rosquilla a su alrededor que afecta a nuestra visión de ellos: si vemos el AGN de frente detectaremos la emisión del gas cayendo, y veremos por lo tanto un objeto muy brillante, en tanto que si vemos el AGN de canto las nubes de polvo ocultarán la región central y obtendremos una señal más débil”, señala Miguel Ángel Pérez-Torres,



investigador del IAA-CSIC que participa en el estudio.

Núcleos activos mutantes

Dependiendo, precisamente, de su orientación, los núcleos activos se clasifican en distintas categorías (de tipo 1 si lo vemos de frente y de tipo 2 si lo observamos de canto). Y, aunque se han documentado algunos casos aislados en los que un AGN cambia de tipo con el tiempo, el objeto Mrk1018 ha supuesto una sorpresa ya que ha cambiado de tipo por segunda vez y, además, ha podido estudiarse con un detalle sin precedentes.

“A finales de los años 70, la luz de Mrk1018 correspondía a un núcleo activo de tipo 2, pero en 1981-1982 aumentó su brillo y cambió drásticamente al tipo 1. Y, tras estar así

durante casi treinta años, ahora ha vuelto a cambiar al tipo 2 y realizado así un ciclo completo de transformación”, explica Pérez-Torres (IAA-CSIC).

Existen varias posibilidades para explicar este cambio de apariencia, como el efecto de una nube de gas que atenuaría el brillo que observamos (un efecto similar al de la niebla en la tierra), o la destrucción de una estrella que hubiera pasado muy cerca del agujero negro, lo que habría generado primero un aumento repentino del brillo y después un descenso a lo largo de los años.

Sin embargo, observaciones muy detalladas del telescopio espacial Hubble (NASA/ESA) han permitido descartar ambas opciones y apuntan a que el regreso a la sombra de

Imagen de la galaxia Mrk1018 tomada por el instrumento MUSE del Very Large Telescope (ESO). Los débiles arcos que rodean la galaxia se deben a la fusión con otra galaxia en un pasado reciente. Fuente: ESO/CARS survey.

Debajo, ilustración de un núcleo activo de galaxia, con agujero negro central rodeado de un disco de acrecimiento y una estructura de polvo externa con forma de rosquilla. Fuente: NASA/CSC/M. Weiss.

Mrk1018 se debe a que las regiones en torno al agujero negro carecen de gas para alimentarlo.

Los investigadores han calculado cuánto menos “come” este agujero negro. “Como conocemos la masa del agujero negro, que asciende a unos cien millones de soles, hemos podido calcular la cantidad de gas que absorbe Mrk1018, que durante los últimos treinta años ha sido de cinco centésimas de masas solares por año. Ahora, sin embargo, ha disminuido hasta las cinco milésimas de sol por año”, apunta Pérez-Torres (IAA-CSIC).

Además, el trabajo ha puesto de manifiesto que la escasez de material en el entorno del agujero negro podría deberse a la interacción con un segundo agujero negro supermasivo, una posibilidad factible dado que la galaxia es producto de una fusión de dos galaxias menores, ambas con un agujero negro supermasivo en su centro.

Los investigadores, que para este trabajo han contado con observaciones del Very Large Telescope (ESO) y de los telescopios espaciales Hubble (NASA/ESA) y Chandra (NASA), ya están realizando un seguimiento de Mrk1018 con radiotelescopios de muy larga base, que permitirán estudiar en detalle las regiones cercanas al agujero negro.

Este descubrimiento, realizado en el marco de la muestra CARS (acrónimo en inglés de Muestra de Referencia de AGNs Cercanos), permitirá ahondar en el conocimiento de los núcleos activos de galaxias y en la física que rige la relación entre los agujeros negros y sus discos de acrecimiento.

Silbia López de Lacalle (IAA)

Se observa el colapso de la atmósfera de Ío durante un eclipse de Júpiter

Ío, que ostenta el récord en vulcanismo de todo el Sistema Solar, posee una tenue atmósfera de dióxido de azufre altamente variable. Medidas muy precisas revelan que la sombra de Júpiter provoca que la atmósfera de Ío se condense en la superficie, para regenerarse cuando recibe de nuevo la luz solar

▶ Ío tarda en completar una vuelta en torno a Júpiter 1,7 días terrestres y, cada día, la sombra de Júpiter se cierne sobre el satélite en un eclipse que dura aproximadamente dos horas y que produce un brusco cambio de temperatura. Un grupo de investigadores, con participación del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), ha observado varios de estos eclipses y ha registrado un fenómeno único en nuestro Sistema Solar, en el que la atmósfera prácticamente desaparece al comenzar el eclipse para volver a aparecer cuando Ío sale de la sombra de Júpiter.

“La variabilidad de la tenue atmósfera de Ío ya era conocida, y no sabíamos si se debía a la actividad volcánica (recordemos que es el objeto con los volcanes más activos de todo el Sistema Solar) o a un equilibrio térmico con la superficie, es decir, a un intercambio de gas con la superficie”, apunta Miguel Ángel López Valverde, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía que participa en el estudio. Como los eclipses de Júpiter producen un cambio importante de temperatura en Ío su estudio representaba la vía más eficaz para solucionar este problema.

Gracias a los datos obtenidos con el



telescopio Gemini de ocho metros de diámetro se ha podido monitorizar un eclipse por primera vez: cada día, y durante dos horas, la sombra de Júpiter cubre la pequeña luna y su temperatura cae de los 148 grados bajo cero a los 168 bajo cero. Con el descenso de temperatura, el dióxido de azufre que forma la atmósfera se congela y deposita sobre la superficie, para sublimar y rellenarla cuando Ío sale del eclipse y la luz del Sol calienta los hielos.

“Hemos comprobado que se pierde el 80 % de la atmósfera hasta que Ío sale del eclipse. Esto ha sido toda una sorpresa, porque nunca habíamos observado un colapso atmosférico de estas características, que nos ha permitido además zanjar el viejo problema: la atmósfera no está directamente formada por gases volcánicos, sino por la sublimación de los hielos en superficie -concluye

De fondo, Júpiter e Ío, fotografiados por el telescopio espacial Hubble. Fuente: J. Spencer (Lowell Observatory) y NASA/ESA.

Arriba, concepción artística de Ío antes de comenzar un eclipse y después, con la atmósfera ya colapsada.

Fuente: Southwest Research Institute.

Dcha, La atmósfera y los focos volcánicos de Ío fotografiados por la nave Galileo (NASA) durante un eclipse de Júpiter. Fuente: NASA/Jet Propulsion Lab.

López Valverde (IAA-CSIC)-. El ciclo puede ser bastante repetitivo, alterado por aportes de los volcanes, que no son del todo despreciables”.

Ío: superficie joven y atmósfera tenue

Ío, que muestra un tamaño similar al de la Luna, es el más próximo a Júpiter de los cuatro grandes satélites de Júpiter, conocidos como satélites galileanos. Las interacciones

gravitatorias entre ellos fuerzan las órbitas hacia una geometría elíptica, de modo que las distancias con respecto a Júpiter se vuelven variables y se generan distorsiones -similares a las mareas que la Luna provoca sobre los océanos terrestres-. Estas fricciones desencadenan una fuerte actividad volcánica en Ío, cuya superficie se rejuvenece con las erupciones, que producen corrientes de lava de cientos de kilómetros y columnas de dióxido de azufre que se elevan hasta cuatrocientos kilómetros.

Silbia López de Lacalle (IAA)

El gran final de la misión Rosetta

La misión Rosetta (ESA), que ha completado todos sus objetivos científicos, es ya uno de los hitos destacados de la historia de la exploración espacial

► El pasado 29 de septiembre la misión Rosetta (ESA) recibió los comandos para ejecutar la maniobra de colisión que la llevó a chocar contra el núcleo del cometa 67P Churyumov-Gerasimenko. La nave descendió hacia una región del lóbulo menor del cometa conocida como Ma'at. La cámara OSIRIS, en la que participaba el Instituto de Astrofísica de Andalucía, tuvo un papel protagonista, ya que tomó imágenes del cometa desde una perspectiva única y envió la última fotografía de la misión.

“En mi opinión, termina una de las misiones espaciales más completas de nuestra historia, repleta de éxitos sin precedentes -señala Pedro J. Gutiérrez, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que ha participado en la misión-. Ahora debemos ser capaces de descifrar toda la información y datos que nos ha dejado para entender, por fin, el origen y formación de nuestro sistema planetario”.

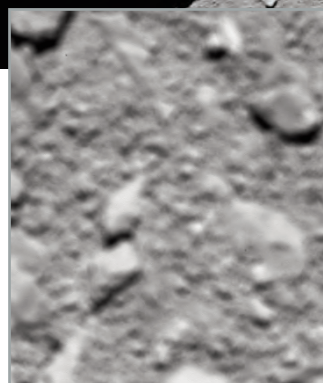
La misión, lanzada en 2014, nos ha brindado la imagen más detallada del núcleo de un cometa y ha ofrecido momentos emocionantes, como la maniobra de entrada en órbita en torno al cometa 67P o el aterrizaje del

módulo Philae sobre su superficie. La nave, que ha acompañado al cometa en su trayectoria en torno al Sol, ya apenas recibía energía para continuar operando, pero esta maniobra de descenso controlado y con la mayoría de instrumentos en activo permitió sumar un nuevo hito al estudiar el cometa desde una proximidad única.

La visión más precisa y completa de un cometa

La misión ha producido los mejores datos jamás obtenidos sobre un núcleo cometario. Unos datos que han permitido determinar por primera vez de forma directa su densidad, caracterizar en detalle las diferentes regiones de su superficie o estudiar cómo se desencadena la actividad que genera la envoltura (o coma) y las colas de los cometas.

La misión Rosetta ha logrado determinar de forma directa la densidad de 67P, un cuerpo la mitad de denso que el agua y que, dado su tamaño, debe de estar vacío en un 80%.



Las imágenes de la cámara OSIRIS han permitido analizar en detalle la forma de 67P, cuya estructura bilobulada, que recuerda a un patito de goma, se debe a que el cometa surgió por la fusión de dos objetos. Ahora los científicos involucrados en la misión trabajan en descubrir y definir las condiciones bajo las que se produjo esa fusión de dos cuerpos en las primeras etapas de la formación de nuestro Sistema Solar.

Rosetta también ha desvelado una variedad morfológica inesperada a lo largo de la superficie de 67P. Se han clasificado numerosas regiones distintas en el núcleo del cometa, que reci-

Izda. Imagen del cometa 67P tomada por la cámara OSIRIS durante el descenso de Rosetta.

Debajo, la última imagen de la misión. Fuente: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

ben nombres de la mitología egipcia y se agrupan en cinco categorías básicas: terrenos cubiertos de polvo, material frágil con fosas y estructuras circulares, grandes depresiones, superficies lisas y zonas de material consolidado.

Una complejidad extraordinaria para un cuerpo de apenas cuatro kilómetros de longitud.

Fuegos artificiales en el verano del cometa

En los tres meses alrededor del 13 de agosto de 2015, fecha del máximo acercamiento del cometa 67P al Sol, las cámaras de Rosetta capturaron treinta y cuatro emisiones.

Estos violentos estallidos iban mucho más allá de los chorros y flujos de materia que suelen salir expulsados del núcleo del cometa y que aparecen y desaparecen con precisión cronométrica en cada rotación, sincronizándose con la salida y la puesta del Sol en el cometa.

Por el contrario, las emisiones son mucho más brillantes que los chorros: se trata de breves proyecciones de polvo a alta velocidad. Normalmente solo llegan a verse en una imagen, lo que indica que su duración es inferior al intervalo de captura, que es de entre cinco y treinta minutos. Se cree que, en esos pocos minutos, cada emisión puede liberar entre sesenta y doscientas toneladas de materia.

El equipo descubrió que algo más de la mitad de estos eventos se producían en regiones correspondientes a la primera hora de la mañana, cuando el Sol comenzaba a calentar la superficie tras varias horas de oscuridad.

Así, se cree que el rápido cambio de la temperatura local provoca unas tensiones térmicas en la superficie que podrían llevar a la fracturación y exposición repentina de materia volátil. Esta materia se calentaría con rapidez y terminaría por evaporarse de forma explosiva.

Emisiones en el cometa. ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA



Confirman que las novas, un tipo de fenómenos explosivos en las estrellas, son la fuente principal de litio del universo

Se han detectado grandes cantidades de berilio-7, un elemento que se transforma en litio, en la nova Sagittarii 2015 N.2. Este hallazgo apunta a que las novas son una de las fuentes principales de litio del universo

► El litio, el elemento sólido más ligero que existe, juega un importante papel en nuestras vidas, tanto a nivel tecnológico como biológico. Y, al igual que la mayoría de los elementos químicos, su origen remite a fenómenos astrofísicos, aunque la procedencia de buena parte del litio existente no quedaba clara. Ahora, un grupo de investigadores ha detectado enormes cantidades de berilio-7, un elemento inestable que se transforma en litio en 53,2 días, en la nova Sagittarii 2015 N.2, lo que sugiere que estos eventos constituyen la principal fuente del litio de la galaxia.

Prácticamente todos los elementos químicos tienen un origen astronómico. Una primera generación de elementos tuvo lugar en lo que se conoce como nucleosíntesis primordial, que ocurrió muy poco después del big bang (entre los primeros diez segundos y veinte minutos). Ahí se formaron los elementos ligeros: hidrógeno (75%), helio (25%) y una cantidad muy pequeña de litio y berilio.

El resto de elementos químicos se formaron en las estrellas, bien a través de la fusión de elementos en el núcleo,

que comienza con la fusión de hidrógeno en helio y produce elementos cada vez más pesados hasta llegar al hierro, o bien a través de otros procesos, como explosiones de supernova o reacciones en las atmósferas de las estrellas gigantes, en los que se producen oro, plomo o cobre, entre otros. Y esos elementos han ido reciclándose y formando nuevas estrellas y planetas hasta nuestros días.

“Pero el litio planteaba un problema: sabíamos que un 25% del litio existente procede de la nucleosíntesis primordial, pero no éramos capaces de trazar la procedencia del 75% restante”, apunta Luca Izzo, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) que ha participado en la investigación.

El fin del problema del litio

La respuesta al problema del origen del litio se halla, según este último tra-

bajo, en las novas, fenómenos explosivos que se producen en sistemas binarios de estrellas en los que una de las componentes es una enana blanca. La enana blanca puede robar material de su estrella compañera y formar una capa de hidrógeno superficial que, al alcanzar cierta densidad, desencadena una explosión -una nova-, que puede aumentar cien mil veces el brillo del sistema. Tras una semana el sistema se estabiliza y el proceso vuelve a comenzar.

Los investigadores estudiaron la nova Sagittarii 1015 N.2 (también conocida como V5668 Sgr), que se detectó el 15 de marzo de 2015 y permaneció visible en el cielo durante más de ochenta días. Las observaciones con el instrumento UVES del Very Large Telescope (ESO) a lo largo de veinticuatro días permitieron seguir, por primera vez, la evolución de la señal del berilio-7 en una nova e incluso calcular su abun-

dancia. “El berilio-7 es un elemento inestable que se transforma en litio en 53,2 días, de modo que constituye una señal inequívoca de la existencia de litio”, apunta Christina Thöne, investigadora del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).

La existencia de berilio-7 se había documentado anteriormente en otra nova, pero la medición de la cantidad de litio que se produciría a partir del berilio-7 detectado en la nova Sagittarii 1015 N.2 supuso una sorpresa. “Estamos hablando de una cantidad de litio diez millones de veces superior a la que existe en el Sol”, indica Luca Izzo (IAA-CSIC). “Con estas abundancias en mente, con la explosión de dos novas similares a Sagittarii 1015 N.2 al año se respondería por todo el litio existente en nuestra galaxia, la Vía Láctea. Las novas parecen ser la fuente de litio predominante en el universo”, concluye. **S.L.L. (IAA)**

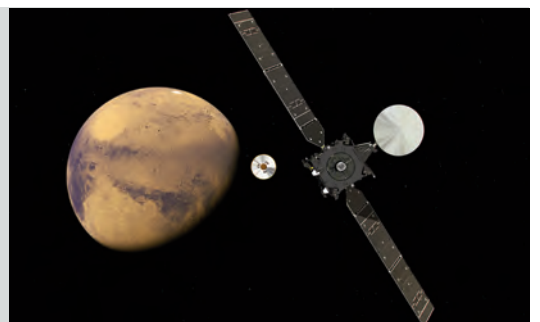


Conceptión artística de un sistema binario similar al que ha producido la nova Sagittarii 2015 N.2. Fuente: David A. Hardy y PPARC.

La misión ExoMars (ESA) entra en órbita en torno a Marte

► La misión ExoMars, en la que participa el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), ya se encuentra en órbita en torno a Marte. El encendido de inserción orbital del satélite para el estudio de Gases Traza (TGO) se produjo entre las 13:05 y las 15:24 GMT del 19 de octubre, y los equipos de la ESA continúan monitorizando el buen estado de este orbitador, el segundo tras Mars Express, que lleva trece años en funcionamiento.

Más info: <http://exploration.esa.int/mars/>



LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

Pilares científicos

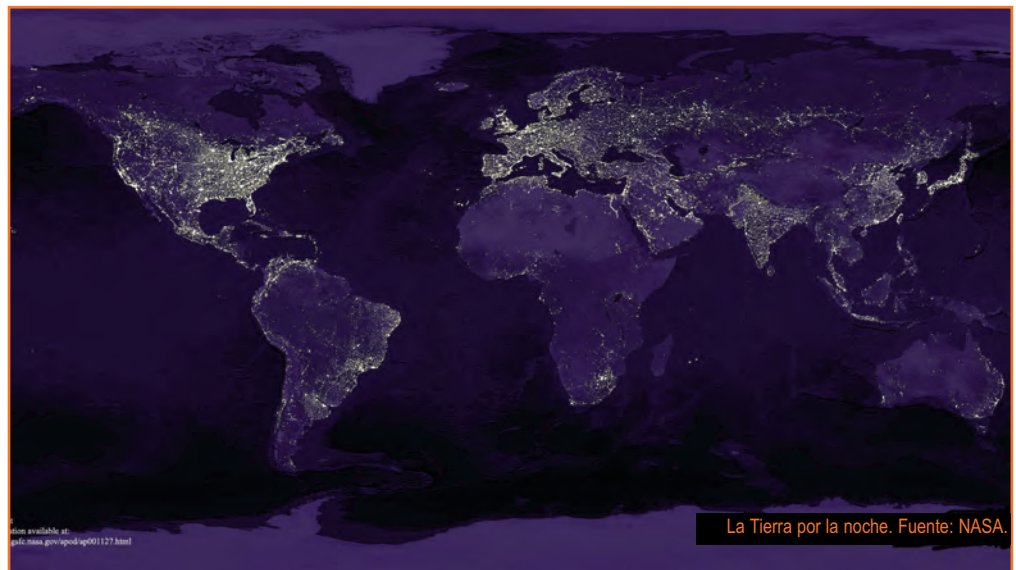
La contaminación lumínica ha sido históricamente la causante de la muerte de numerosos observatorios. Quizás el más carismático fue el observatorio de Monte Wilson, pero prácticamente todos los observatorios construidos antes de 1960 sufren de una afección muy importante de pérdida de calidad por la contaminación lumínica. Ya en los 70, la creciente preocupación de la comunidad astronómica provoca que se empiecen a crear los primeros modelos de predicción de la contaminación lumínica. El primer modelo puramente físico es desarrollado por Garstang en 1984, incluyendo todos los componentes que son considerados actualmente, principalmente la dispersión de Rayleigh y Mie. En el año 2001, basado en este modelo y en imágenes de satélite se realizó el primer mapa de la contaminación lumínica mundial; sin embargo, el atlas no contó con una validación intensiva hasta 2012. En 2005 se publica el primer modelo que tiene en cuenta el segundo orden de dispersión.

También en 2005 se descubre que el ojo tiene un tipo de células fotosensibles que no juegan ningún papel en la visión, pero

que regulan el sistema hormonal, lo que abre la puerta a que la contaminación lumínica tenga efectos sobre la salud. Actualmente está probado que el trabajo en turno de noche tiene un serio impacto en la salud, con un aumento de la probabilidad de desarrollar cáncer de mama o próstata de un 50%, y los estudios epidemiológicos relacionan las imágenes de satélite nocturnas con un incremento de casos de este tipo de cánceres.

De manera paralela, numerosos trabajos demuestran, a lo largo de la primera

década de este siglo, un importante impacto ambiental en una cantidad importante de especies, como búhos y rapaces nocturnas, aves migratorias, insectos, luciérnagas, tortugas... además del incremento de enfermedades transmitidas por mosquitos en lugares iluminados. Incluso, trabajos recientes muestran cómo la contaminación lumínica puede estar detrás de fenómenos anteriormente achacados al calentamiento climático, como la floración adelantada de algunas especies.



La Tierra por la noche. Fuente: NASA.

Incertidumbres

Los estudios realizados hasta el momento prácticamente han ignorado la importancia de los diferentes colores en la contaminación lumínica, principalmente por la falta de herramientas sencillas de calibración del instrumental. También desconocemos la distribución actual en color de la contaminación lumínica, y para solucionar esta falta de conocimiento se creó el proyecto *Cities at Night*, encabezado por el IAA (www.citiesatnight.org) para localizar, clasificar y georreferenciar las imágenes tomadas por los astronautas de la ISS, única fuente de información disponible en órbita sobre el color de la contaminación lumínica.

De hecho, el recientemente publicado nuevo atlas de la contaminación lumínica carece de esta información, por lo que en algunos lugares puede tener errores superiores a un 200%. Este atlas indica la afección

en la visión de las estrellas en el zenit, pero no es suficiente para predecir el impacto ambiental en la fauna y flora, por lo que desconocemos a nivel global el efecto que la iluminación está teniendo. Sin embargo, algunos estudios indican que la contaminación lumínica podría ser uno de los factores importantes en la desaparición del 60% de los pájaros europeos.

También desconocemos cuán importante es el efecto de la contaminación lumínica de tipo LED en futuras investigaciones astronómicas en el visible, dado que su componente principal de emisión es un espectro continuo y no de líneas como las tradicionales lámparas de sodio. Los modelos actuales se centran principalmente en la predicción del brillo de cielo en el zenit (el punto más alto del cielo) y no está clara la importancia del segundo orden de *scattering* (dispersión de la luz). Se conoce que existen grandes diferencias en los patrones de iluminación a nivel regional, nacional e internacional, pero se

desconoce a ciencia cierta la importancia relativa de los factores que producen estas diferencias. Por un lado está la riqueza de la región en primer orden, que explica por qué los países de África están mucho menos iluminados que los de otras partes del planeta, pero dentro de los países europeos la variable económica no explica estas diferencias y otras variables, como el nivel de corrupción o de deuda pública, pueden ser mejores trazadores que, por ejemplo, la latitud del lugar.

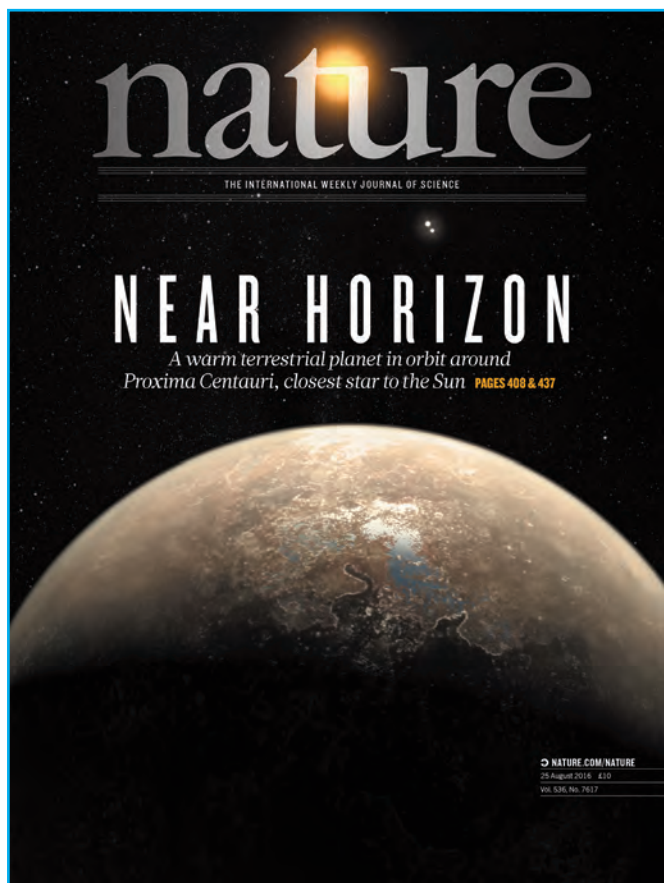
Actualmente también se desconoce el grado de impacto que tiene el alumbrado público y ornamental en la salud humana, más allá de las correlaciones estadísticas encontradas con imagen de satélite. Por otro lado, es un misterio para los investigadores la razón por la cual el grado de alarma social y cumplimiento de la regulación es tan baja en este área, en comparación con otros sin base científica como los *chemtrails* o la contaminación electromagnética.

SALA limpia

por Miguel Abril (IAA)



La actualidad manda. En este número íbamos a hablar de robots, pero resulta que hace solo unas semanas se anunció oficialmente uno de los hitos más importantes de la astronomía de los últimos años: el descubrimiento de un exoplaneta parecido al nuestro con características que podrían hacerlo habitable y orbitando, nada más y nada menos, que en torno a la estrella más cercana a nosotros, Próxima Centauri. Para los miles de seguidores de esta sección recuerdo que no es la primera vez que la actualidad impone un cambio de planes: allá por 2012 aplazamos un artículo sobre protección planetaria, ante la inminencia de un evento mucho más importante que el descubrimiento de una exotierra en zona habitable: una Eurocopa de fútbol. Por tanto, los robots quedan pospuestos, y vamos a hablar sobre Próxima b, que es el original nombre que se le ha dado al que ya es el planeta más famoso fuera de nuestro sistema solar. No obstante, como en este mismo número hay un artículo que explica el descubrimiento, aquí nos vamos a centrar en las implicaciones tecnológicas asociadas a él, y en particular en un proyecto que ha tomado súbitamente un interés especial: *Breakthrough Starshot*, una iniciativa que pretende mandar la primera sonda a las estrellas. Aunque esta misión ya se había fijado en el sistema Alfa Centauri como objetivo por eso de que es el más cercano a nosotros, el descubrimiento de Próxima b ha hecho que se focalice la atención sobre una de sus tres estrellas, Próxima Centauri, y que la imaginación de los responsables del proyecto vuele ante las perspectivas de lo que pueden encontrar allí. Pero vayamos por partes: ¿tan cerca está este nuevo exoplaneta? ¿Cuánto son cuatro años luz? La mejor forma de entender las enormes distancias a nivel estelar es reducirlas a escalas humanas, a



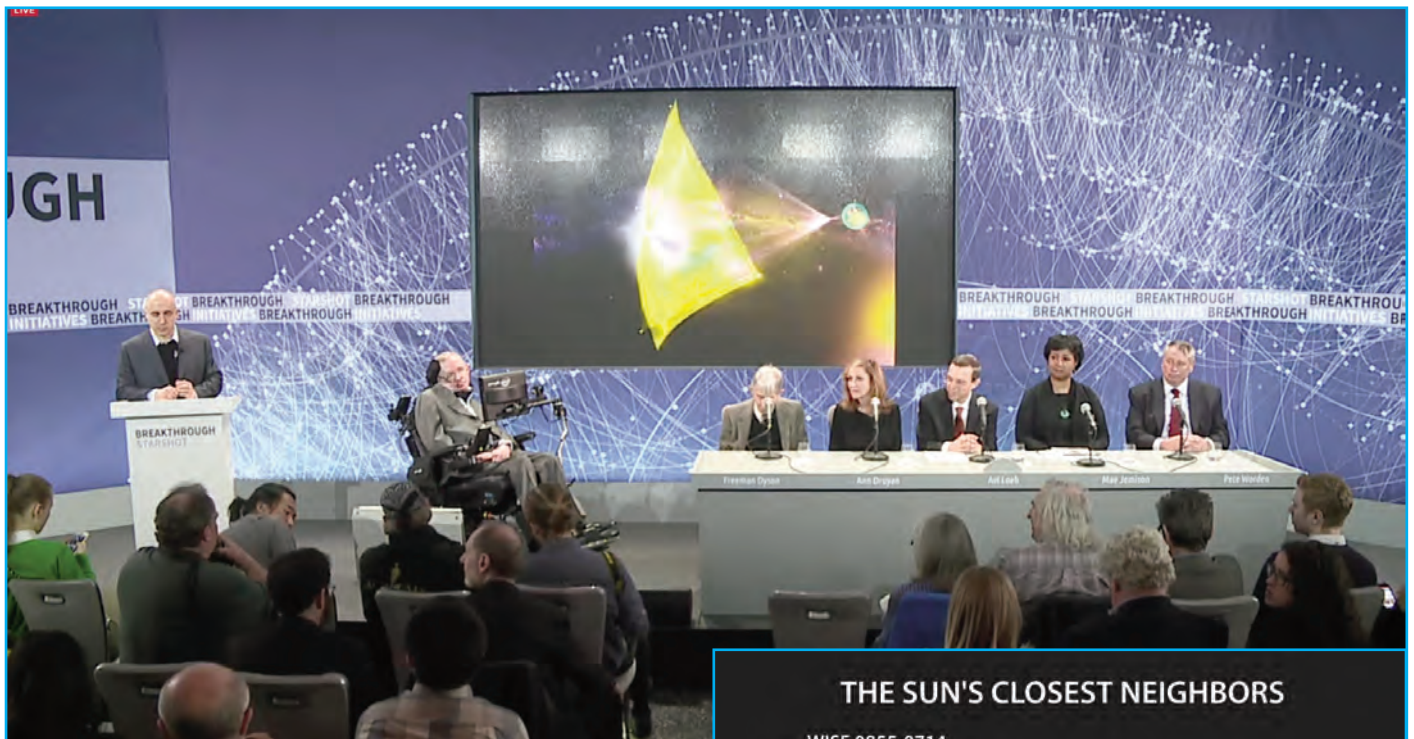
La importancia del descubrimiento de Próxima b es tal que ha merecido ser portada de la revista *Nature*, tal vez la publicación científica más prestigiosa del mundo, con el permiso de *Science* y de *Información y Actualidad Astronómica*. Sirvan estas líneas para transmitir nuestra más sincera enhorabuena a los miembros del IAA que han participado en el hallazgo.

La iniciativa Breakthrough Starshot pretende mandar la primera sonda a las estrellas y ha focalizado su atención en Próxima b

dimensiones que somos capaces de interpretar. En este caso, la comparación resulta la mar de gráfica a través de una analogía muy intuitiva: supongamos que reducimos el Sol al tamaño de un garbanzo y lo colocamos en el punto central de un campo de fútbol. Para mantener las proporciones reales la Tierra tendría que ser del tamaño de un grano de arena y orbitar a un

metro de distancia. Pues bien, si explicaras este modelo a la gente de la calle y luego les preguntaras que a qué distancia piensan que estaría la estrella más cercana, la mayoría te diría que en las áreas, en las porterías o en el banderín de córner. Solo algún listillo te respondería que está en las gradas y, tal vez, algún aficionado a leer noticias de ciencia la colocaría fuera del estadio. La realidad es que incluso en este modelo reducido Próxima Centauri quedaría muy lejos: no solo fuera del estadio, sino incluso de la ciudad, de la provincia y muy probablemente de la comunidad autónoma. Concretamente, a unos 270 kilómetros de distancia del garbanzo. Conclusión: no, Próxima no está próxima (lo siento, me lo han puesto a huevo).

¿Entonces...? ¿Qué pasa, que nadie les ha explicado a los responsables de Starshot lo del garbanzo y el campo de fútbol? ¿Cómo van a mandar una sonda hasta allí si está tan lejos? Y, aunque lo consiguieran, ¿cuánto tardaría en llegar? ¿Tendríamos gobierno para entonces? Bueno, empecemos diciendo que la misión no enviaría una única sonda, sino que –siguiendo la filosofía que explicábamos unos números atrás– lanzaría un enjambre de ingenios de pequeño tamaño, bajo consumo y coste relativamente reducido, para así aumentar la probabilidad de que al menos alguno de ellos consiga alcanzar su objetivo. Este ejército de nanodispositivos electrónicos no se mandaría de una sola vez, sino de forma escalonada en el tiempo, de modo que habría siempre minisondas a distintas distancias del objetivo que funcionarían como repetidores en una red de comunicaciones entre la Tierra y Próxima b. Las minisondas tendrían el tamaño de un chip electrónico, aunque para impulsarlas se usarían velas de unos dos por dos metros, que se propulsarían usando un láser de gran potencia situado en la superficie terrestre. Según los expertos, mediante esta técnica se conseguirían velocidades impensables con los combustibles químicos actuales: un 20% de la velocidad de la luz, nada menos. Así las cuentas son fáciles: si la estrella está a 4,2 años luz, las minisondas tardarían cinco veces más. O sea, unos veintiún años, a los que habría que sumar los cuatro y pico que tardaría la información que transmitirían desde allí en forma de ondas electromagnéticas. Total, que en unos veinticinco años desde el lanzamiento, que se estima que podría ser dentro de unos veinte, podríamos tener información sobre lo que se cuece en el planetita. ¿Se puede hacer? En mi modesta opinión de ingeniero dedicado a proyectos mucho más mundanos, hace un par de meses y yo



habría dicho que no, al menos a corto plazo. Sin embargo, viendo quién está detrás del proyecto, qué menos que darle un voto de confianza. Y no es que me impresione que dos de sus mecenas sean multimillonarios tan implicados con la ciencia y la tecnología como Mark Zuckerberg y Yuri Milner, no. Lo que me da un voto de confianza es el tercer padrino, Stephen Hawking, y ese sí que entiende de estas cosas.

¿Y qué pasa si lo conseguimos? ¿Encontraríamos vida en Próxima b? Pues esto es objeto de intenso debate. Hay quien dice que las enanas M como Próxima son demasiado activas para permitir que se desarrolle la vida, y que además los planetas en su zona de habitabilidad estarían tan cerca que presentarían anclaje por marea. Es decir, que ofrecerían siempre la misma cara a la estrella (como sucede con nuestra Luna), por lo que un hemisferio tendría temperaturas abrasadoras y el otro sería un desierto congelado. Sin embargo, los defensores de la posibilidad de vida argumentan que bajo ciertas condiciones el anclaje puede no ser total, sino producir lo que se conoce como resonancia orbital. Este es el caso del planeta más próximo al Sol, Mercurio, que presenta una resonancia de tipo 3:2 (gira sobre sí mismo tres veces por cada dos vueltas al Sol). Para que se produzca este tipo de resonancia

Según los expertos, mediante esta técnica se conseguirán velocidades impensables con los combustibles químicos actuales: un 20% de la velocidad de la luz, nada menos

la órbita tiene que tener una cierta excentricidad, pero no tanta como para hacer al planeta incompatible con la vida. Siguiendo con el ejemplo más cercano, la excentricidad de la órbita de Mercurio es de 0.2, lo cual, hablando en cristiano, quiere decir que se parece más a un kiwi que a un melón. O sea, que sería perfectamente posible que un planeta presentara resonancia tipo 3:2 manteniéndose durante todo su año dentro de la zona de habitabilidad. De hecho, es posible que una cierta excentricidad fuera beneficiosa para la vida, ya que podría producir estaciones incluso en el caso de que el eje de rotación del planeta no estuviera inclinado, como sucede en la Tierra. Bueno, ¿y qué más da eso? ¿Es que acaso no se podría vivir sin estaciones? Pues igual sí, pero sería muy aburrido. Sobre todo si te toca un planeta solo con invierno. En cualquier caso, incluso si el anclaje por mareas en Próxima b



Arriba. Presentación del proyecto Starshot. Sobre estas líneas, gráfico con los objetos más cercanos a nuestra estrella.

fuera del tipo 1:1, tal vez en la zona de transición entre el día y la noche podría haber una estrecha franja con temperaturas templadas que permitirían al menos el desarrollo de formas de vida simple. (¿En serio? ¿Vida simple en una franja estrecha? ¡Venga, Dios, que has creado cosas tan chulas como el tiranosaurio o el tigre de dientes de sable! ¡Puedes hacerlo mejor!). Un reciente estudio de la

Universidad de Cornell propone como mecanismo de defensa ante las fulguraciones de alta frecuencia de las enanas M la biofluorescencia, un fenómeno mediante el cual determinados corales y otros organismos de nuestro planeta absorben las radiaciones ultravioleta y las transforman en longitudes de onda dentro del espectro visible. Vale, no es un tigre dientes de sable, pero brilla por la noche. Mola.

la pregunta:

¿Cómo? ¿Que llevamos casi cinco años con una sección dedicada a la tecnología y todavía no hemos hablado de robots? Pues nada, vamos a ello. Para empezar, ¿de dónde viene la palabra ROBOT?

RESPUESTAS

1. AL REVÉS (TOBOR) ERA EL NOMBRE DEL PRIMER AUTÓMATA QUE APARECIÓ EN UNA NOVELA.
2. DEL CHECO, QUIERE DECIR 'TRABAJO DURO'
3. DEL INGLÉS RUB OUT: BORRAR O ELIMINAR.
4. ROBOT ES UN ACRÓNIMO QUE SIGNIFICA UNA COSA MUY RARA.

¡Cumplimos 50 ediciones!

¿Quién nos iba a decir, hace dieciséis años, que nuestro modesto proyecto editorial sería tan longevo? Aprovechamos la ocasión para agradecer su generoso esfuerzo a todos los colaboradores que han participado en las ediciones a lo largo de estos años. Y, por supuesto, a quienes nos leéis.

