

· Infoastro ·

ASTRONOMÍA DIGITAL

Número 12, 30 de diciembre de 2018

www.astro-digital.com

ESPECIAL 20 AÑOS

Los grandes avances en astronomía y
exploración espacial de las últimas dos décadas

Índice

20 años de exploración espacial <i>Daniel Marín Arcones</i>	4
Las décadas prodigiosas de la astronomía <i>Víctor R. Ruiz</i>	9
Veinte años de agua en Marte <i>David Galadí</i>	24
En busca de los límites <i>Víctor Manchado</i>	27
Nuevos sentidos para la astronomía <i>Luis Salas López</i>	33
La advertencia de Sagan <i>Pedro J. Hernández</i>	41
Marte, el planeta soñado <i>Paco Bellido</i>	47
Eventos astronómicos que cambiaron la historia <i>Jesús Gerardo Rodríguez Flores</i>	52
Necesitamos la interrupción de la noche <i>Martin Pawley</i>	58
Revelando la oscuridad <i>Marina Prol</i>	66

Guía para los autores

Instrucciones generales

Los artículos han de contener, al menos, las siguientes secciones: título, resumen, desarrollo y conclusión. Otras secciones posibles son las de referencias bibliográficas y direcciones de interés (e.j. páginas web). El texto debe estar corregido ortográficamente y seguir las recomendaciones de puntuación en español. Con la excepción de los puntos decimales, que irán indicados con un punto (1.25) y los miles con un espacio no separable (1 500 000).

Los formatos para enviar artículos son LibreOffice y texto en Unicode (UTF-8). Las imágenes deben enviarse aparte en formato PNG o JPG, con una resolución de 300 ppp. En el artículo debe indicar una nota explicativa para cada una de las imágenes (ej. «Figura 1, venus.jpg. Venus al amanecer con cámara fotográfica de 50 mm, 20 segundos de exposición. Fuente: Juan Nadie»). Las imágenes se deben poder reproducir mediante la licencia de la revista. En caso de ser de terceros, se recomiendan las obras en dominio público o con licencias Creative Commons, al menos con Atribución-No Comercial-Compartir Igual.

Se recomienda incluir la dirección electrónica al final del artículo para permitir el contacto directo con los lectores, tales como correo-e, página web y redes sociales.

Instrucciones de envío

Dirija los artículos por correo electrónico a rvr@infoastro.com.

Astronomía Digital es una iniciativa de Infoastro con la colaboración del Planetario de Pamplona. **Coordinación:** Víctor R. Ruiz (rvr@infoastro.com). **Editores:** Jesús Gerardo Rodríguez Flores (jgerardo@prodigy.net.mx), **Redacción:** Luis Salas López (LuisSalasLopez@gmail.com). **Astronomía Digital** se distribuye con licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0. Disponible en <http://www.astro-digital.com/>

SE PERMITE LA REPRODUCCIÓN DE LA REVISTA SEGÚN LA LICENCIA CREATIVE COMMONS ATRIBUCIÓN-NO COMERCIAL-COMPARTIR IGUAL 4.0. PARA CUALQUIER DUDA O SUGERENCIA PÓNGASE EN CONTACTO CON LA REDACCIÓN MEDIANTE CORREO ELECTRÓNICO EN rvr@infoastro.com. LA REDACCIÓN NO SE HACE RESPONSABLE DE LAS OPINIONES VERTIDAS POR LOS AUTORES Y COLABORADORES. *v12.3*

A comienzos de año, Jesús Gerardo Rodríguez me sorprendió con esta entrada en Facebook:

Lo deja a uno sin aliento como las cosas ocurren. Sucede que el ciclo escolar pasado a mi hijo le encargaron una tarea donde deben detectar las características de un artículo científico. Estaba supervisando su tarea y me quede sorprendido cuando veo que el ejemplo de revista que venía en el libro de español de primaria era *Astronomía Digital*.

Me tocó ser uno de los *padres* que dieron nacimiento a esa revista hace muchos años en una colaboración y bajo el liderazgo de mi amigo Víctor R. Ruiz del portal Info.Astro y Radio Skylab (Canarias). En aquellos tiempos en que el Internet estaba en auge publicamos una revista, la primera sobre astronomía en Internet, en español y totalmente gratuita. Por sus varios ejemplares desfilaron numerosos divulgadores y astrónomos escribiendo fascinantes artículos. Y para máximo orgullo personal, Víctor consintió que fuera el único articulista que publicara en todos y cada uno de los números de la revista, lo cual ayudó a que mis artículos fueran posteriormente solicitados por otras revistas de divulgación sudamericanas.

Ver una muestra de nuestro trabajo como ejemplo de lo que debe ser una revista de divulgación científica en el libro de texto de primaria de mi hijo fue una satisfacción emocionante como autor y como papá.

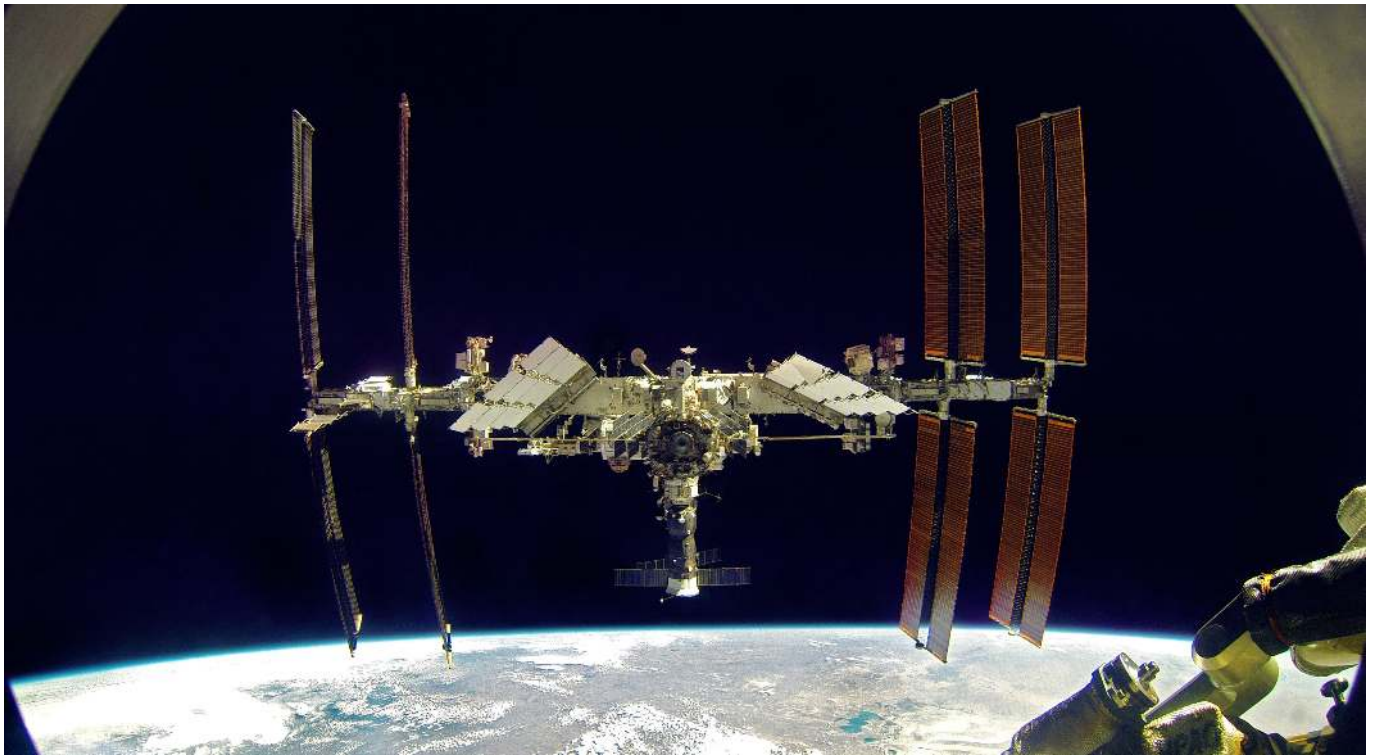
Casualidades del destino, en 2018 se cumplían 20 años del lanzamiento del primer número. En 1998 el formato PDF no estaba extendido y la revista se distribuyó en PostScript. Tampoco existían las licencias Creative Commons, pero se animaba a distribuir la revista libremente sin ánimo de lucro. Internet permitió que colaborásemos sin importar las distancias. Lo mejor fue, sin duda, compartir entre todos una pasión común, la astronomía.

No hemos querido dejar pasar la ocasión del 20º aniversario de *Astronomía Digital* para volver a reunir los colaboradores antiguos. Incluido Jesús, que continuará siendo el único autor que no ha faltado a ninguna cita. También se han sumado colaboradores nuevos. Ha sido y es un honor contar con el aprecio de todos ellos. Gracias por aceptar la oferta de escribir para este especial.

Los avances tecnológicos que hicieron posible la aparición de la revista han continuado transformando a la ciencia y la sociedad. En este número, echamos una mirada hacia atrás con la mente puesta en el futuro. La astronomía es una actividad que ayuda a desarrollar en nuestras mentes, como ninguna otra, la habilidad para pensar a lo grande. Echamos una mirada hacia atrás a la historia para re-descubrir la importancia de la observación del cielo, analizamos los avances más importantes en la exploración del espacio y reflexionamos sobre algunos de los desafíos que afronta nuestra civilización. Esta extraordinaria perspectiva universal que presentan los artículos de este especial es, sin duda, contagiosa y hará expandir la mente del lector. Que es en última instancia la razón de ser cualquier revista como ésta. Gracias. Gracias por aprender. Antes y ahora.

Buenas noches... de observación, naturalmente.

Víctor R. Ruiz



20 años de exploración espacial

Daniel Marín Arcones | Naukas, Radio Skylab

De la ISS a los cohetes reutilizables de SpaceX pasando por los planes de China, la exploración espacial ha visto aparecer nuevos actores.

ISS, la primera estación espacial de la humanidad

Hace casi veinte años despegaba desde el cosmodromo de Baikonur el módulo Zaryá, el primer elemento de la Estación Espacial Internacional, también conocida como ISS por sus siglas oficiales en inglés (o MKS en ruso). El proyecto de la ISS era la culminación del acercamiento entre dos antiguos rivales, Rusia y Estados Unidos, que había comenzado incluso antes de la caída de la Unión Soviética en 1991. La ISS nació como la fusión de dos proyectos, la estación espacial Freedom estadounidense y la Mir 2 rusa. Los dos países carecían a principios de los años 90 de los recursos económicos —en el caso de Rusia— o políticos para sacar adelante sus propias estaciones espaciales y la unión de ambos programas parecía ser la única salida. La ISS estaba destinada a ser el proyecto espacial más costoso, más complejo y, sobre todo, más longevo de la historia de la exploración del espacio.

En 1998 el panorama espacial estaba dominado por la construcción de la ISS. Dos décadas más tarde la estación, ya prácticamente completa desde que en 2011 se le añadió el último módulo presurizado, sigue en órbita funcionando rutinariamente y es el principal referente de los programas tripulados de Estados Unidos, Rusia, Ja-

pón, Canadá y la Agencia Espacial Europea (ESA). Y así seguirá al menos hasta 2024, que es cuando finaliza el acuerdo actual entre los socios del proyecto. La ISS ha estado permanentemente habitada desde que la primera tripulación fue lanzada en noviembre de 2000. Se trata de un récord histórico, aunque previamente la estación Mir rusa estuvo tripulada permanentemente a lo largo de casi diez años. En 1998 la Mir seguía operativa y, de hecho, solo las presiones de Estados Unidos para que Rusia se centrara en la ISS lograron que fuese abandonada en 2001. A pesar de varios accidentes de naves de carga Progress, Dragon y Cygnus, así como un despegue tripulado fallido, nadie ha resultado herido o muerto en la construcción de la ISS, todo un logro del proyecto.

Nuevos lanzadores

Hace veinte años el programa espacial estadounidense se basaba firmemente en el transbordador espacial, pero la pérdida del Columbia y sus siete tripulantes en 2003 lo cambió todo. Después de la tragedia del Columbia la administración Bush propuso el programa Constelación para volver a la Luna, que sería cancelado por la administración Obama en 2010. Desde entonces la NASA ha estado desarrollando el cohete SLS y la nave Orión, pero

no se espera que realice su primer vuelo tripulado alrededor de la Luna hasta 2024 aproximadamente. El SLS no es lo suficientemente potente como para llevar a cabo misiones tripuladas a la Luna directamente, así que la esperanza de la NASA pasa por ensamblar primero la estación *Lunar Orbital Platform* en órbita lunar con ayuda de otros países. El transbordador fue retirado en 2011 sin ninguna nave espacial que lo sustituyese. Desde entonces la NASA ha pagado sumas de dinero cada vez más altas a Rusia para llevar a sus astronautas a la ISS a bordo de naves Soyuz.

Antes de la cancelación del programa Constelación, el gobierno estadounidense decidió subvencionar a la industria privada para desarrollar naves de carga a la ISS que redujesen parcialmente la dependencia de Rusia. Como



Figura 1: La desintegración del Columbia durante la reentrada en 2003 cambió el programa espacial estadounidense. Fuente: NASA.



Figura 2: Futuro cohete SLS. Fuente: NASA.

resultado nacieron las naves de carga Dragon de SpaceX y Cygnus de Orbital. Sin duda SpaceX ha sido la gran sorpresa de estas últimas décadas. Esta empresa fundada por el millonario Elon Musk ha logrado revolucionar el panorama internacional de lanzadores con su apuesta por la reutilización de las primeras etapas de su cohete Falcon 9. En 2018 SpaceX lanzó con éxito el Falcon Heavy, el cohete más potente construido desde el Energía soviético de los años 80. El año que viene debe debutar la nave tripulada Dragon 2 de SpaceX, que junto a la CST-100 Starliner de Boeing devolverán a Estados Unidos la capacidad para enviar seres humanos a la órbita baja después de un parón de casi una década.

Logros del programa espacial de la NASA

El programa científico de la NASA ha sido el líder indiscutible a nivel mundial de los últimos veinte años. En 1999 se puso en órbita el telescopio de rayos X Chandra, el último de los grandes observatorios de la NASA, algunos de los cuales, como el Hubble, han continuado ofreciéndonos maravillosos descubrimientos hasta hoy. El telescopio infrarrojo James Webb se ha retrasado en numerosas ocasiones y todavía no ha alcanzado el espacio, pero a cambio otras misiones astronómicas han revolucionado nuestro conocimiento del Universo. Entre ellos tenemos al telescopio espacial Kepler, gracias al cual la humanidad ha descubierto miles de exoplanetas alrededor de otras estrellas, algunos de ellos potencialmente habitables. En el sistema solar las misiones de la NASA también han sido protagonistas. Especialmente a la hora de explorar Marte. Pese a los fracasos iniciales del programa de exploración de Marte —la pérdida de las misiones *Mars Polar Lander* y *Mars Climate Orbiter*—, en estas dos décadas la NASA ha enviado tres todoterrenos al planeta rojo —Spirit, Opportunity y Curiosity—, dos sondas de superficie y tres orbitadores. Esta flota de naves ha logrado descubrir que Marte tuvo en el pasado lejano agua líquida sobre su superficie de forma estable.

En el Sistema Solar exterior la sonda Cassini-Huygens nos mostró las maravillas de Saturno y sus lunas. Ahora



Figura 3: Las dos etapas laterales del Falcon Heavy aterrizan en Cabo Cañaveral tras el lanzamiento. Fuente: SpaceX.



Figura 4: El rover Curiosity en el cráter Gale. Fuente: NASA.



Figura 5: Saturno visto por la sonda Cassini. Fuente: NASA.

sabemos que Titán es el único mundo del sistema solar con lagos, mares, lluvia y ríos, aunque de metano en vez de agua. También sabemos que Encélado posee un océano global bajo su corteza de hielo con fuentes hidrotermales, un océano que podemos estudiar directamente sin necesidad de aterrizar gracias a los géiseres que emiten hielo y partículas desde el polo sur de esta pequeña luna. Podemos decir que la exploración inicial del sistema solar finalizó en 2015 con el sobrevuelo de Plutón y sus cinco lunas por parte de la sonda *New Horizons*. Además, en estos años la NASA ha enviado sondas a la Luna, Mercurio, asteroides —incluidos Ceres y Vesta—, cometas, Júpiter y el Sol. No sabemos cómo serán los próximos veinte años, pero no cabe duda de que estas últimas décadas han supuesto una verdadera edad de oro en la exploración del sistema solar.

Claroscuros de la astronáutica rusa

A lo largo de estas dos décadas el programa espacial tripulado ruso se ha centrado en la ISS. Después de una época dramática a principios del siglo XXI, el programa espacial ruso pudo repuntar gracias a la mejora de la situación económica del país. Esta mejora permitió la renovación de instalaciones y la puesta en marcha de nuevos proyectos. El sistema de navegación GLONASS, que se había dejado morir a lo largo de los 90, resucitó para volver a estar operativo a partir de 2010. Sin embargo, el programa de satélites científicos y, especialmente, el de



Figura 6: Una nave Soyuz acoplada a la ISS. Fuente: NASA.

sondas espaciales ha languidecido hasta casi desaparecer. El fracaso de la misión Fobos-Grunt en 2011 supuso la cancelación y retraso del resto de sondas espaciales rusas. En dos décadas Rusia no ha enviado ninguna sonda espacial propia, aunque sí ha colaborado activamente en varias misiones de otros países con instrumentos o aportando el lanzador. Solo el lanzamiento de alguna misión, como el radiotelescopio espacial Spektr-R, ha permitido que el país siga teniendo un programa espacial científico relevante.

Si hace dos décadas los lanzadores rusos dominaban el mercado gracias a la combinación de fiabilidad y bajos precios, actualmente la situación ha cambiado de forma radical tras la irrupción de SpaceX. El nuevo cohete pesado ruso, el Angará A5, no ha recibido el apoyo adecuado del Kremlin, más preocupado en construir una copia rusa del Zenit. Este lanzador, construido junto con Ucrania, dispone del cohete de combustible líquido más potente del mundo, el RD-171, fabricado en Rusia por NPO Energomash (empresa que también suministra motores a los lanzadores estadounidenses Antares y Atlas V). Tras el conflicto con Ucrania en 2014, Rusia cortó los lazos comerciales con el país vecino, lo que incluía el Zenit. Pero Rusia desea mantener viva la tecnología del RD-171, así que quiere construir el lanzador Soyuz 5 para reemplazar al Zenit, un cohete que, de paso, también servirá para poner en órbita a mediados de la próxima década la futura nave tripulada rusa Federatsia, sustituta de las Soyuz. La inauguración del nuevo cosmódromo de Vostochni en 2016 alivió temporalmente la actual crisis del sector espacial ruso, que se ha visto agravada por las sanciones internacionales a raíz del conflicto ucraniano.

La ESA aumenta su presencia en el Espacio

Durante estas dos décadas Europa ha colaborado en la ISS con el módulo Columbus, acoplado en 2008, y ha mandado cinco naves de carga ATV. Varios astronautas europeos han vivido en la ISS, como por ejemplo el español Pedro Duque en 2003. Precisamente, la tecnología del ATV se usará en el módulo de servicio de la nave Orión de



Figura 7: Un cohete Soyuz 2 despegando desde el cosmódromo de Vostochni. Fuente: Roscosmos.

la NASA, que estará a cargo de la ESA. El programa científico de la ESA se ha posicionado como el segundo más importante a nivel mundial después del estadounidense. En estos veinte años la ESA ha lanzado desde misiones astrofísicas como XMM-Newton, Herschel o Planck, hasta sondas espaciales a Mercurio, Venus y Marte, pasando por la exitosa misión de la sonda Rosetta en el cometa 67P. El programa ExoMars en colaboración con Rusia logró enviar a Marte la sonda TGO en 2016 y aspira a poner en la superficie un rover en 2020. Por otro lado, el venerable Ariane 5 será sustituido por el Ariane 6 a partir de 2020, un cohete muy similar en prestaciones, pero más barato, aunque deberá competir con la estrategia arrolladora de SpaceX en el mercado internacional. Tampoco podemos olvidar la puesta en marcha de la constelación europea de satélites de posicionamiento Galileo.

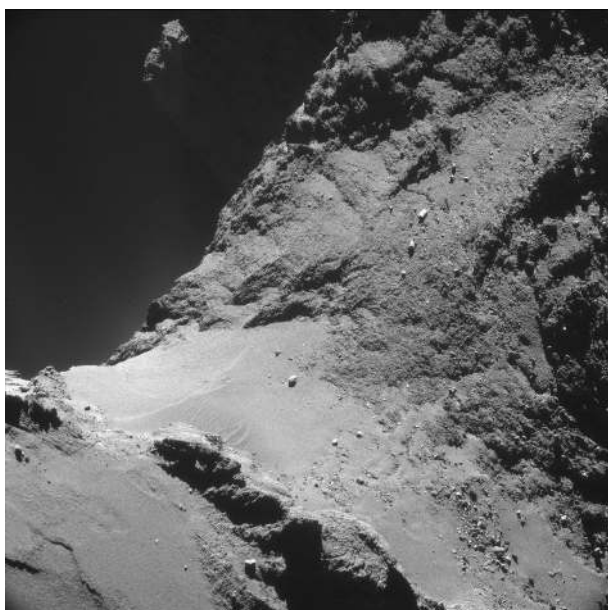


Figura 8: El cometa 67P visto por la sonda europea Rosetta. Fuente: ESA.

China también crece en el espacio

Llama la atención la ausencia de China en el proyecto de la ISS, una potencia espacial que tiene prohibido participar debido al veto directo de Estados Unidos. Precisamente el programa espacial chino es sin duda el que más ha crecido en estos veinte años, en consonancia con la economía del país. De poseer una modesta flota de lanzadores y una serie de proyectos poco ambiciosos, China se convirtió en 2003 en la tercera nación en enviar un ser humano al espacio por sus propios medios gracias a la misión Shenzhou 5. Aunque desde entonces solo ha lanzado otras cinco naves tripuladas, en estos años ha puesto en órbita dos pequeñas estaciones espaciales Tiangong y ha probado con éxito el carguero automático Tianzhou. Las naves Shenzhou y Tianzhou servirán para abastecer la gran estación china de sesenta toneladas que estará habitada permanentemente durante la próxima década.

Los módulos de esta estación serán lanzados mediante el Larga Marcha CZ-5, el cohete más potente que China tiene en servicio —debutó en 2016— y el principal miembro de la familia de lanzadores a base de queroseno y oxígeno líquido que sustituye a los Larga Marcha más antiguos que emplean propergoles hipergólicos, menos eficientes y más peligrosos. Junto con el CZ-5, China ha lanzado el CZ-6 y el CZ-7, dos cohetes basados en la tecnología del CZ-5, así como una pléyade de nuevos vectores de pequeño tamaño para poner en órbita micro y nanosatélites. El programa espacial científico chino también ha experimentado un enorme salto adelante. Hace veinte años China no tenía ninguna sonda para explorar el sistema solar. En este tiempo ha mandado más de cinco naves a la Luna, ha visitado un asteroide y planea aterrizar en la cara oculta de nuestro satélite y traer muestras del mismo dentro de poco. Por si fuera poco, también quiere lanzar varias misiones muy ambiciosas a Marte a partir de 2020. Al mismo tiempo ha lanzado varios satélites científicos, incluyendo un observatorio de rayos X y el satélite Mozi para estudiar las aplicaciones de la mecánica cuántica en las comunicaciones. A estos proyectos hay que añadir un gran número de satélites de observación de la Tierra —algunos de uso militar— y la constelación Beidou de posicionamiento global, entre otros.



Figura 9: Liu Yang se convirtió en la primera mujer astronauta china en 2012. Fuente: Xinhua.



Figura 10: La Tierra y la Luna vistas por la sonda japonesa Kaguya. Fuente: JAXA.



Figura 11: La sonda Chang'e 3 en la superficie lunar. Fuente: Xinhua.

Las otras agencias: Japón e India

Japón e India han mantenido sendos programas espaciales relativamente modestos, pero con resultados muy satisfactorios. Japón participa en la Estación Espacial Internacional con el módulo Kibo. La sonda japonesa Hayabusa se convirtió en 2010 en la primera sonda en traer muestras de un asteroide a la Tierra, mientras que India lanzó con éxito en 2013 la sonda de bajo coste Mangalyaan a Marte. Ambos países también han enviado sondas alrededor de la Luna, como Kaguya y Chandrayaan, que han ayudado a confirmar la presencia de hielo en el fondo de los cráteres polares junto con otras misiones.

¿Y el futuro?

En el frente no tripulado la Luna seguirá siendo la protagonista de numerosas misiones, seguida de Marte. La comunidad científica considera que la prioridad absoluta es traer muestras del planeta rojo, así que durante la próxima década veremos varias misiones de este tipo. También seremos testigos del regreso de naves con muestras de la Luna, asteroides y cometas. En el sistema solar exterior la misión Europa Clipper de la NASA comprobará si el océano subterráneo de Europa es real y, por tanto, si este mundo es tan interesante como promete. Y, con suerte, Venus recibirá la atención que se merece. A corto plazo la exploración tripulada del espacio pasa por la ISS

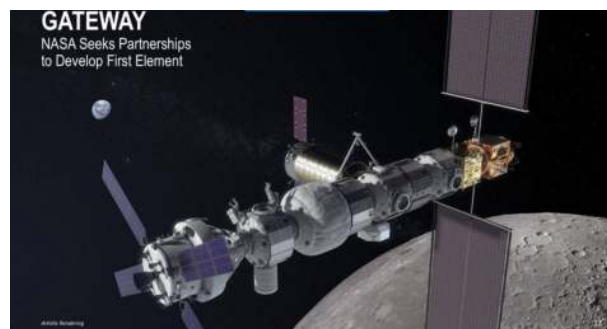
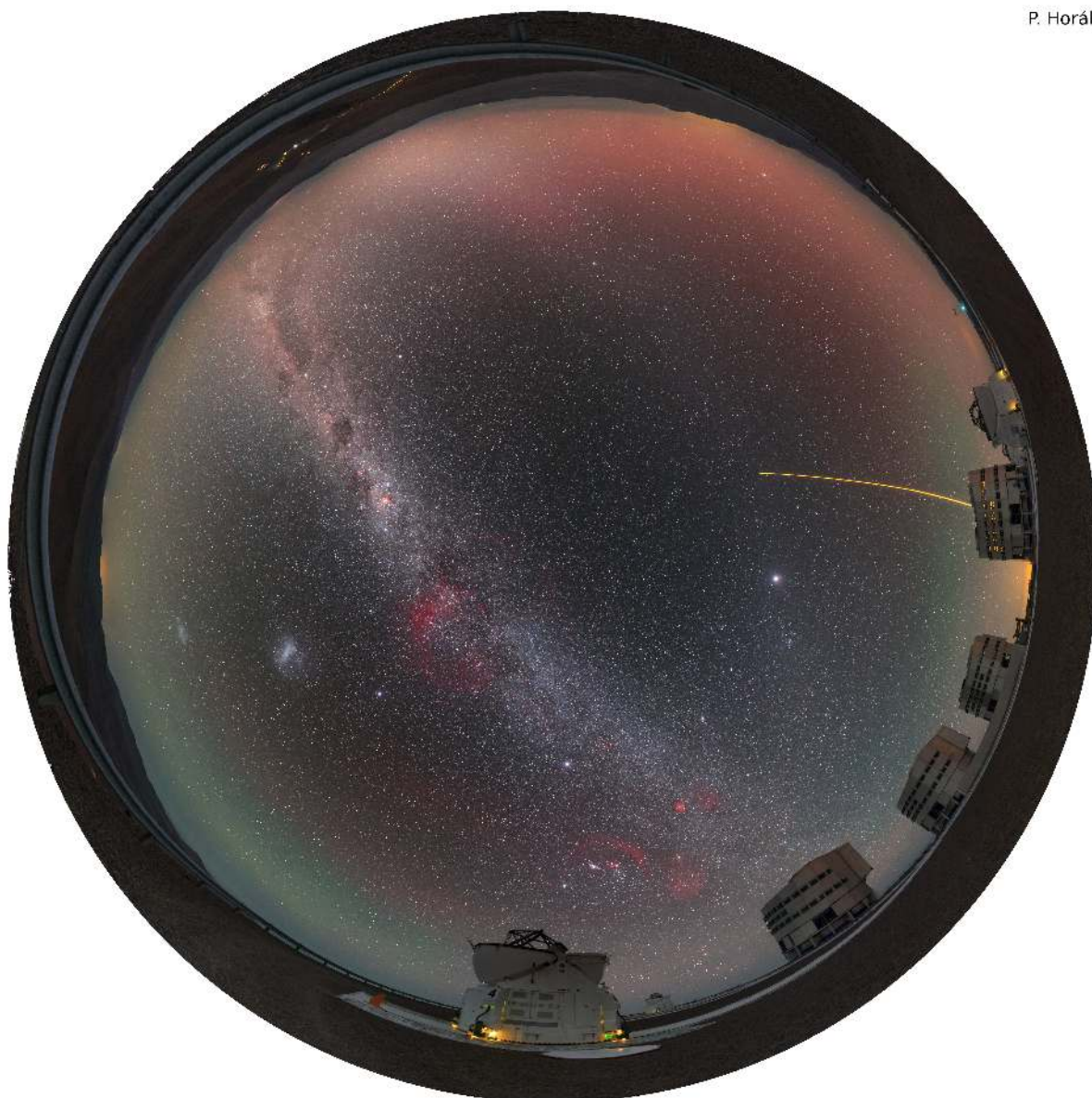


Figura 12: Diseño de la estación espacial *Lunar Orbital Platform*. Fuente: NASA.

y la futura estación espacial china. A medio plazo los intereses de las agencias espaciales apuntan hacia la Luna, aunque está por ver si estos planes logran hacerse realidad. Una misión tripulada a Marte sigue estando, como viene siendo habitual desde los años 60, a dos décadas en el futuro. Ω

Daniel Marín Arcones
skydma@gmail.com
Blog Eureka, Naukas, Radio Skylab



Las décadas prodigiosas de la astronomía

Víctor R. Ruiz | Astronomía Digital

Un repaso imposible a los descubrimientos astronómicos más destacados de los últimos 20 años

Este artículo tiene una meta imposible de cumplir: repasar los descubrimientos astronómicos más importantes desde el primer número de *Astronomía Digital* hasta hoy. Es fruto del optimismo ingenuo de quien les escribe, este humilde divulgador, que pensó que podría reunir en pocas páginas los avances en el conocimiento más relevantes de estas dos décadas. Hay un cierto fracaso en dicha meta. A pesar de la extensión del artículo, han quedado omitidos muchos otros descubrimientos relevantes, dignos de futuros Premios Nobel. Sin embargo, se ha reunido un número notable de los hallazgos más recientes, y sorprendentes, realizados por la Humanidad, producto del monumental

trabajo realizado por científicos e ingenieros de todo el planeta Tierra. Sirva este artículo como un modesto reconocimiento a dicha labor colectiva.

Exploración del Sistema Solar

El estudio del Sistema Solar solía ser una actividad exclusivamente astronómica, de esas de mirar toda la noche por el telescopio. Y así fue hasta el comienzo de la era espacial. En estos últimos 20 años hemos vivido una época dorada de la exploración del Sistema Solar. También desde tierra pero, sobre todo, con sondas.

Riesgo de impacto en la Tierra

En el año 1998 se estrenaban las películas *Deep Impact* y *Armagedón*, que introdujeron en el imaginario colectivo la posibilidad de que la humanidad se enfrente al impacto de un asteroide. Dicha posibilidad es real. En estas dos décadas la NASA y otras agencias espaciales han financiado proyectos de búsqueda y seguimiento de objetos cercanos a la Tierra (en inglés, *Near Earth Objects* o NEOs). Otrora campo fértil para los astrónomos aficionados, los programas automatizados como LINEAR (*Lincoln Near-Earth Asteroid Research*), *Catalina Sky Survey* y Pan-STARRS han acaparado el descubrimiento de las rocas espaciales potencialmente peligrosas. Si en 1998 se descubrían 200 objetos cercanos al año, ahora la cifra se acerca a los 2000 anuales. Actualmente hay catalogados 20 000 NEOs.

Tras el de Tunguska en 1908, el meteoro de Cheliábinsk es el segundo objeto más grande que ha impactado con la Tierra

El 6 de octubre de 2008, Richard Kowalski (Universidad de Arizona) descubrió un asteroide mediante el *Catalina Sky Survey*. Los cálculos de la trayectoria produjeron un resultado totalmente inesperado: por primera vez en la historia se predecía el impacto de un asteroide con la Tierra. Se produciría en las siguientes 24 horas, sin tiempo para reaccionar. Por fortuna, el asteroide 2008 TC₃ sólo tenía 4 metros de diámetro y 80 toneladas de masa. Se zambulló en la atmósfera terrestre en la noche del 7 de octubre sobre Sudán, donde explotó a unos 37 km de altura según pudo registrar el satélite Meteosat 8. Una expedición al desierto de Nubia liderada por Peter Jenniskens (Instituto SETI Institute) y Muawia Shaddad (Universidad de Khartoum) recuperaron más de 600 meteoritos del asteroide.

No es el único susto que hemos tenido. El 15 de febrero de 2013, un asteroide sobrevoló la región rusa de Che-



Figura 1: Efectos del meteorito de Cheliábinsk en el Teatro Drama. Fuente: Nikita Plekhanov (CC BY-SA).

liábinsk Oblast. Esta vez se trataba de un objeto de 20 metros de diámetro, con una velocidad de 70 000 km/h y una masa de 13 000 toneladas. Su destello en el cielo fue más brillante que el Sol y fue grabado por cientos de personas en los alrededores de la ciudad de Cheliábinsk. Explotó a 30 km de altura y liberó una energía equivalente a 30 veces la bomba de Hiroshima. La onda expansiva rompió las ventanas en miles de edificios de la ciudad, hiriendo a 1500 personas que requirieron atención médica. Para añadir más confusión al asunto, los astrónomos estaban siguiendo ese día el sobrevuelo del asteroide 2012 DA₁₄, descubierto por el Observatorio Astronómico de Mallorca. Pasaba 16 horas después a 27 000 km sobre la superficie terrestre, aunque ambos objetos no tenían relación. Tras el de Tunguska en 1908, el meteoro de Cheliábinsk es el segundo objeto más grande que ha impactado con la Tierra, superando al meteoro de las Islas del Príncipe Eduardo en 1963.

Afortunadamente, la mayor parte de asteroides de más de 1 km de diámetro, los que suponen un riesgo para la supervivencia de la humanidad en caso de impacto, fueron descubiertos entre 1998 y 2003. Ahora sólo se detectan cinco NEOs grandes por año. Y más de cien años después del evento de Tunguska, se pueden hacer algunas estadísticas sobre su probabilidad, aunque la incertidumbre da valores que van de un evento cada 400 a los 2000 años.

Misiones espaciales a cuerpos menores

Las agencias espaciales han lanzado en estos 20 años varias misiones con el objetivo de estudiar *in situ* tanto a los asteroides como a los cometas. Esto nos ha provisto de imágenes e información de primerísima mano que ha revolucionado nuestra comprensión. La primera sonda en posarse sobre un asteroide fue la *NEAR Shoemaker* (NASA) en el asteroide del cinturón principal (433) Eros. Otras sondas han estado visitado asteroides, pero la misión japonesa *Hayabusa* (JAXA) fue la primera en retornar muestras del asteroide (25143) Itokawa. Lanzada en 2003, regresó a la Tierra en 2010, pero la cápsula se rompió durante la reentrada atmosférica. Por fortuna, se pudo recuperar material del asteroide y analizarlo en laboratorios. Le ha sucedido la misión *Hayabusa 2*, que llegó recientemente al asteroide (162173) Ryugu y que nuevamente intentará recolectar muestras. Otra sonda recolectora es *OSIRIS-REx* (NASA), lanzada en 2016 y que acaba de llegar al asteroide (101955) Bennu. Tendrá tiempo hasta 2021 para recoger muestras, que se enviarán a la Tierra en 2023.

Otra misión espectacular enviada a asteroides es la sonda *Dawn* (NASA). En lugar de cuerpos pequeños, ha visitado dos de los objetos más grandes del Cinturón de Asteroides, (4) Vesta y (1) Ceres, de cientos de km de diámetro. Lanzada en 2007, *Dawn* llegó primero a Vesta, un asteroide de 525 km de diámetro con forma de papa gigante. Allí estudió un enorme cráter de 500 km, Rheasilvia, que se cree es el progenitor de la familia de Vesta, compuesta por 15 000 asteroides de similar composición y órbita. También confirmó que este mismo cráter de im-

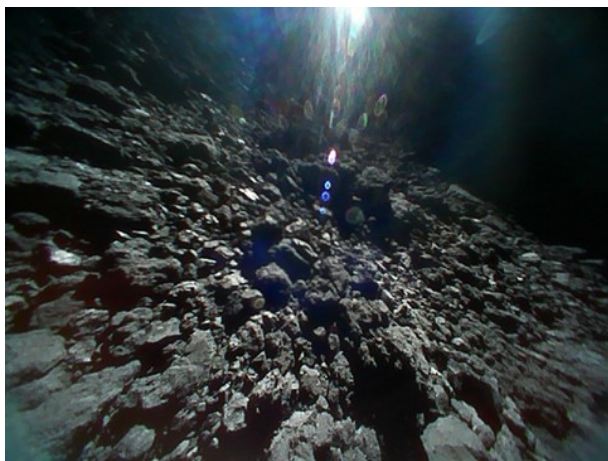


Figura 2: Destello del Sol en la superficie del asteroide Ryugu. Imagen de la sonda Minerva II-1, parte de la misión *Hayabusa 2* (JAXA). Fuente: JAXA.

pacto es el origen de los meteoritos de tipo HED (howarditas, eucritas y diogenitas) encontrados en la Tierra. Estos meteoritos, arrancados a diferentes profundidades de Vesta, demuestran que el asteroide posee un interior diferenciado con núcleo de hierro, un manto de silicatos y una corteza ígnea. *Dawn* observó además algunos cauces creados, quizás, por algún tipo de fluido.

En 2012 *Dawn* abandona Vesta y se dirige a Ceres, donde llega en 2015. Ceres es una esfera de casi 1000 km de diámetro, más parecido a un gran satélite como la Luna que a un asteroide como Itokawa. Ceres acapara un tercio de la masa de todo el Cinturón de Asteroides. Uno de los descubrimientos más sorprendentes de *Dawn* ha sido las manchas brillantes situadas en diversos cráteres de Ceres. Tras analizar su composición, se cree que las manchas son áreas ricas en carbonato sódico y otras sales, y apuntan a algún proceso de liberación de fluidos desde el interior, quizás salmuera. Otro descubrimiento sorprendente es Ahuna Mons, la montaña más alta de Ceres. Su morfología es peculiar y se sospecha que es un criovolcán, el más cercano al Sol. La corteza de Ceres, analizada por *Dawn*, está compuesta por una mezcla de hielo, sales y materiales hidratados. Éstos podrían ser evidencias de la existencia de un océano líquido primigenio, donde el agua y el amoníaco interactuaron con los silicatos. Con el tiempo, el océano quedó congelado en la corteza y las sales y otros minerales quedaron acumulados en depósitos, algunos de los cuales están ahora expuestos en la superficie de Ceres.

Ahuna Mons, la montaña más alta de Ceres, podría ser un criovolcán

En cuanto a cometas, *Deep Impact* (NASA) fue lanzada en 2005 y se dirigió a 9P/Tempel. La sonda estudió la composición de este cometa de corto periodo disparando contra el núcleo una subsonda impactadora. No contenía explosivos ni cabezas nucleares. No se trataba de destruir

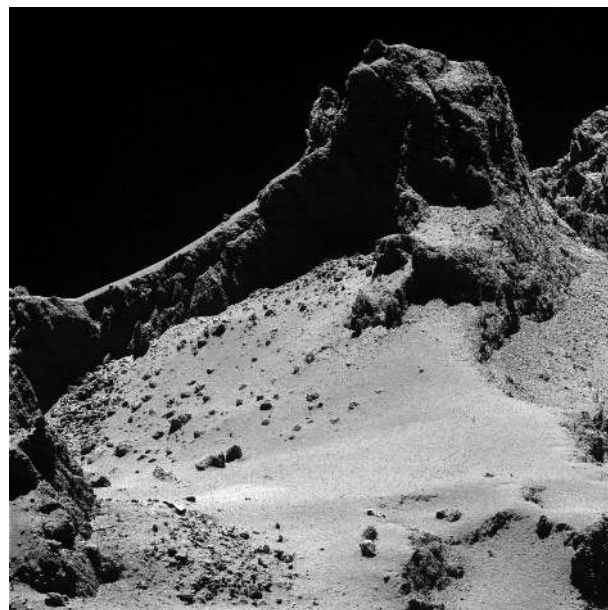


Figura 3: Imagen del lóbulo meor del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, capturada en 2014 por *Rosetta* a 8 km de altitud. Fuente: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.

el cometa al estilo Harry Stamper, pero sí de ver y evaluar los efectos producidos. Aún así, el impacto produjo una pequeña explosión detectada mediante las cámaras de *Deep Impact* y telescopios terrestres. La limitada calidad de las imágenes post-impacto animaron a la NASA a realizar un segundo encuentro con la sonda *Stardust* (que a su vez había visitado al cometa P/Wild 2 para recolectar muestras en 2004). De esta forma, el 15 de febrero de 2012, *Stardust* sobrevoló el Tempel 1 a una distancia de 200 km y pudo localizar el cráter de 150 m originado por la colisión artificial.

La misión cometaria reina de estas dos décadas ha sido *Rosetta*

La misión cometaria reina de estas dos décadas ha sido *Rosetta* (ESA), un proyecto de gran presupuesto que cumplió con casi todos sus objetivos. Fue lanzada en 2004 y llegó al 67P/Churyumov-Gerasimenko en 2014. Durante dos años cartografió con detalle el núcleo y estudió su evolución mientras el cometa se acercaba al Sol. Los datos de *Rosetta* sugieren que éste se creó en el frío interestelar, antes de la formación del Sol y los planetas, y que ha permanecido prácticamente intacto desde entonces. La sonda también encontró grandes cantidades de oxígeno molecular en la coma. Algunos científicos creen que el agua de la Tierra podría haber sido aportada por impactos de cometas durante la formación de nuestro planeta. Pero en el agua del 67P hay una proporción tres veces mayor de deuterio. El agua oceánica debe tener otro origen, quizás otro tipo de cometas. La sonda también fotografió chorros emanando del núcleo así como la posterior nevada

de compuestos. De *Rosetta* se desprendió una pequeña subsonda llamada *Philae* para aterrizar en la superficie. Debido a la baja masa del *Chury*, el cometa con forma de pato de goma, *Philae* usó unos harpones para engancharse. El mecanismo falló y la sonda rebotó varias veces hasta encallar en una ladera con mala iluminación. *Philae* envió datos durante el descenso e imágenes espectaculares desde la superficie del cometa hasta que se quedó sin batería. Detectó 16 compuestos orgánicos diferentes, cuatro de ellos nuevos, incluyendo acetona, acetamida, isocianato de metilo y propanal.

Mercurio

En cuanto a los grandes cuerpos del Sistema Solar, también ha habido misiones espaciales que nos han desvelado mundos parcial o completamente desconocidos. Es el ejemplo de Mercurio, cuyo mapa estaba incompleto pues sólo había sido sobrevolado por la *Mariner 10* (NASA) en 1975. La NASA lanzó en 2004 *Messenger* con destino al planeta más cercano al Sol, algo que necesitó varias asistencias gravitatorias. Finalmente, se puso en órbita a Mercurio en 2011. La sonda realizó un cartografiado completo con mucha mejor resolución que la *Mariner*. En las imágenes se han identificado antiguos volcanes y ríos de lava. También se han encontrado fallas en la superficie del planeta rocoso, que implican que el manto de Mercurio se enfrió y contrajo después de que se solidificara su corteza. Los datos de *Messenger* apoyan la teoría de que los cráteres polares, donde hay sombra perpetua, conserva grandes cantidades de hielo de agua. Pero además de hielo, también parece haber material orgánico congelado.

Hacia Mercurio se dirige ahora la sonda *BepiColombo* (ESA), una misión europea que completará los descubrimientos realizados por *Messenger*.

Marte

El cuerpo más explorado del Sistema Solar, no siendo la Tierra, es Marte. A pesar de que la conquista de del planeta rojo está siempre 20 años en el futuro, estas dos décadas no han visto a ningún humano pisar su superficie.



Figura 4: Autorretrato del rover *Curiosity*. Aeolis Mons, agosto de 2015. Fuente: NASA/JPL-Caltech/MSSS.

En cambio, ha sido invadido por una flotilla internacional de satélites y exploradores. Marte es ahora un planeta habitado enteramente por robots. La gran pregunta que se trata de responder es si Marte albergó (y en tal caso, aún alberga) condiciones para la aparición de formas de vida. En el pasado, se intentó contactar con los marcianos a través de la radio. Hoy en día las expectativas son menos ambiciosas.

Marte es ahora un planeta habitado enteramente por robots

Actualmente hay diez misiones en activo en Marte. En su mayor parte son orbitadores lanzados en los últimos 15 años, como *Mars Odyssey* (NASA), *Mars Express* (ESA), *Mars Reconnaissance Orbiter* (NASA), *MAVEN* (NASA), *Mangalyaan* (India) y *ExoMars Trace Gas Orbiter* (ESA). La exploración desde órbita es menos emocionante que la de los todoterrenos, pero aportan una visión global sobre la geología marciana de inestimable valor.

Por ejemplo, la *Mars Express* encontró grandes depósitos subterráneos de hielo de agua y vastas planicies compuestas de permafrost en el polo sur de Marte. Según sus mediciones, los casquetes polares poseen suficiente agua que, en estado líquido, crearían un océano de 11 metros de profundidad. Los volcanes de Marte son diferentes a los de la Tierra, puesto que permanecen activos durante cientos de millones de años. Marte está activo geológicamente y la región de Tharsis Montes parece haber tenido actividad volcánica hace tan sólo 10 o 20 millones de años. La *Mars Express* también encontró algunas trazas de metano en la atmósfera marciana, compuesto que podría tener (o no) origen biológico. El metano se destruye rápidamente en la atmósfera debido a la radiación y su detección implica necesariamente un mecanismo regenerador. El envío del *ExoMars Trace Gas Orbiter* trata de arrojar más luz a este enigma.

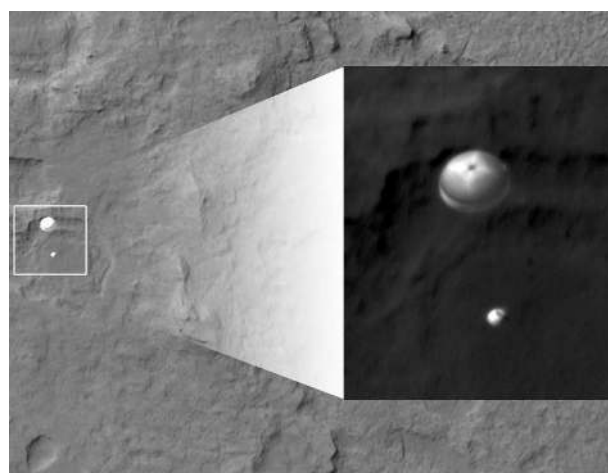


Figura 5: Aterrizaje de la sonda *Mars Curiosity* a Marte. Imagen obtenida por el orbitador *Mars Reconnaissance Orbiter* en 2012. Fuente: NASA/JPL-Caltech/Universidad de Arizona.

No es el único orbitador que ha hecho contribuciones destacables. El *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) es la misión espacial que mayor cantidad de datos ha enviado: 40 terabytes, más que el resto de misiones interplanetarias combinadas. La cámara HIRISE de la MRO ha enviado 300 000 imágenes de la superficie con una resolución de sólo 30 cm. Gracias a estas imágenes se han identificado cambios estacionales en laderas con alta inclinación. Más de mil cauces oscuros de entre 0.5 a 5 m de anchura aparecen y crecen entre el final de la primavera y verano, y luego se debilitan durante el invierno. En 2015 la NASA anunció con gran fanfarria que estos cauces eran la prueba irrefutable que el agua fluía actualmente en Marte. Pero en 2017 apareció otro estudio que reinterpretaba las imágenes de las supuestas escorrentías como cauces formados por la acción de la arena. Colin Dundas, del Instituto Geológico Estadounidense: «Esta nueva interpretación [...] refuerza otras evidencias que apuntan a que Marte hoy en día es muy seco».

Curiosity detectó material orgánico en rocas sedimentarias

Las misiones marcianas que más interés público ha despertado son la de los todoterrenos. En estas dos décadas hemos disfrutado de las aventuras geológicas de los simpáticos *Spirit*, *Opportunity* y *Curiosity* (NASA). Los primeros en llegar fueron *Spirit* y *Opportunity*, en 2004. Estos rovers de seis ruedas, alimentados por paneles solares, miden 1.5 x 2.3 x 1.6 m y tienen 180 kg de masa. Construidos para durar tres meses, superaron con creces la vida útil. *Spirit* logró sobrevivir hasta 2011 y *Opportunity* hasta este mismo año. En sus 14 años, *Opportunity* ha recorrido algo más de una maratón, unos respetables 45 km y ostenta ahora la marca del vehículo espacial con mayor kilometraje. *Curiosity* es mucho más moderno y complejo que sus predecesores. Con seis ruedas de medio metro de diámetro y 800 kg de masa, *Curiosity* transporta instrumental científico más sofisticado, incluyendo una estación meteorológica construida y operada por el Centro de Astrobiología (CAB, España). Anunciado en 2018,



Figura 6: Imagen de Aelis Mons capturada por el rover *Curiosity* en 2015. Fuente: NASA/JPL-Caltech.



Figura 7: Campo de dunas en Noctis Labyrinthus. Capturada por la cámara HIRISE del orbitador *Mars Reconnaissance Orbiter*. Fuente: NASA/JPL-Caltech.

uno de los descubrimientos más importantes de *Curiosity* ha sido la detección de material orgánico en las rocas sedimentarias en el cráter Gale, un antiguo lago de Marte.

Además de los todoterrenos, se han enviado otras sondas sin movilidad como *Mars Phoenix* y *Mars InSight* (NASA). *Mars Phoenix* aterrizó en 2008 en Vastitas Borealis a +68° de latitud. Esta es una región cercana al polo norte abundante en permafrost. De hecho, *Mars Phoenix* sólo tuvo que escarbar un poco en la superficie con su brazo robótico para exponer hielo de agua. Sin la protección del polvo marciano, la radiación sublimó el hielo.

El resumen de todas las misiones de Marte, vista desde el objetivo principal, es bastante simple y descorazonador: ni rastro de vida. Por supuesto, se han encontrado rocas que tuvieron que crearse bajo la acción del agua, apoyando la hipótesis de que hubo un océano en el pasado remoto del planeta. Sin embargo, ninguna de las sondas que ha aterrizado en el planeta vecino ha encontrado hasta ahora ninguna prueba directa de actividad biológica presente, por simple que sea. Tampoco se ha identificado ni un mísero fósil. La historia geológica de la Tierra de los últimos miles de millones de años es imposible explicarla sin la actividad biológica. Cualquier extraterrestre que analice nuestro planeta a una distancia prudencial encontrará signos evidentes de vida, ya sea en forma de la abundante vegetación superficial, o bien en la enorme cantidad de oxígeno de nuestra atmósfera. Quizás, a pesar de las similitudes con la Tierra, Marte no fue un lugar tan fértil como suponíamos. O, como esperan muchos astrobiólogos, aún no hemos buscado en los lugares adecuados con el instrumental apropiado.

Saturno

2003 fue el año del final de la misión *Galileo* (NASA). Tras estudiar Júpiter y sus grandes lunas, se zambulló en la atmósfera joviana para evitar la contaminación biológica de los satélites. El sucesor de *Galileo* fue *Cassini*-

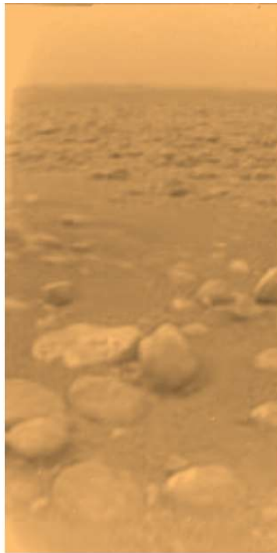


Figura 8: Imagen en color de la superficie de Titán, obtenida por la sonda *Huygens* en 2005. Fuente: ESA/NASA/JPL/University de Arizona.

Huygens (NASA/ESA), la última gran misión de exploración del Sistema Solar. *Cassini* ha sido testigo y partícipe de estas dos décadas prodigiosas. Se lanzó en 1997 y necesitó múltiples asistencias gravitatorias y siete años para llegar a su destino, Saturno. Los objetivos principales de la misión eran estudiar los satélites y los anillos de Saturno, así como los cambios estacionales en la atmósfera del planeta gaseoso.

En enero de 2005, la pequeña *Huygens* (ESA) se separó de *Cassini* para aterrizar en Titán. Con 2500 km de diámetro (más grande que la Luna), Titán es el único satélite del Sistema Solar con atmósfera. Está compuesta en su mayor parte por nitrógeno y tiene una presión 1.5 veces la terrestre. Por eso, ni la *Voyager 1* (NASA) ni los telescopios desde tierra habían podido ver la superficie Titán. Por eso, las imágenes de *Huygens* desde la superficie de Titán eran tan preciadas. Y superaron con creces las expectativas. Las fotografías del descenso desvelaron un Titán con afluentes, lagos y cantos rodados de hielo. La sonda midió -180°C y una presión de 1467.6 mbar. La gran aventura de *Huygens* fue breve. Sólo pudo transmitir datos durante dos horas y media.

Por fortuna, *Cassini* continuó enviando imágenes de Titán, gracias a los 45 sobrevuelos al satélite más grande de Saturno. En 2006, la NASA informó que los radares de *Cassini* revelaban lagos de 1 a 100 km de largo, compuestos de hidrocarburos líquidos (metano o etano), en latitudes boreales. El uso de filtros infrarrojos, en longitudes de onda transparentes a la atmósfera de Titán, permitieron obtener imágenes directas de la superficie y componer finalmente una cartografía. En ella apenas aparecen cráteres de impacto. Algún mecanismo rejuvenece la superficie de esta luna. En una de las fotografías más bellas, a la vez familiar y alienígena, se ve luz solar reflejada en los lagos de Titán. Aunque ya se había teorizado,

Cassini ha comprobado que la luna tiene un ciclo hidrológico y estaciones. A las frías temperaturas de Titán, el metano se evapora, se condensa en nubes, llueve y crea lagos y ríos. De nuevo, Titán combina lo familiar con lo alienígena.

Titán tiene un ciclo hidrológico de metano y estaciones

Si bien Marte y Titán son dos lugares de gran interés astrobiológico, uno de los descubrimientos de *Cassini* provino de un lugar no del todo inesperado. Los anillos de Saturno, debido a la fuerza de la gravedad que ejercen los satélites, se dividen en pistas como las de un disco de vinilo. Se sospechaba que la luna Encélado, de 500 km de diámetro, era la fuente de material del anillo E a través de erupciones de criovolcanes. En 2005, durante un sobrevuelo de *Cassini*, se descubrieron grandes reservas de agua líquida. Ésta provendría de un océano interior. La sonda envió imágenes espectaculares de decenas de géiseres de vapor, situadas en el polo sur. Las partículas más pesadas lanzadas por los géiseres son retenidas por la gravedad de Encélado y caen de nuevo a la superficie, pero las más ligeras escapan al espacio y pasan a formar parte del anillo E. Lo interesante es que posteriores investigaciones apoyan la tesis de que Encélado posee una corteza de hielo. Bajo ésta debe existir un océano global de agua salada de unos 25 km de profundidad (el lugar más profundo del terrestre tiene sólo 11 km).

Las sorpresas no terminaron ahí. En 2017 la NASA anunció que los instrumentos de *Cassini* detectaron mo-

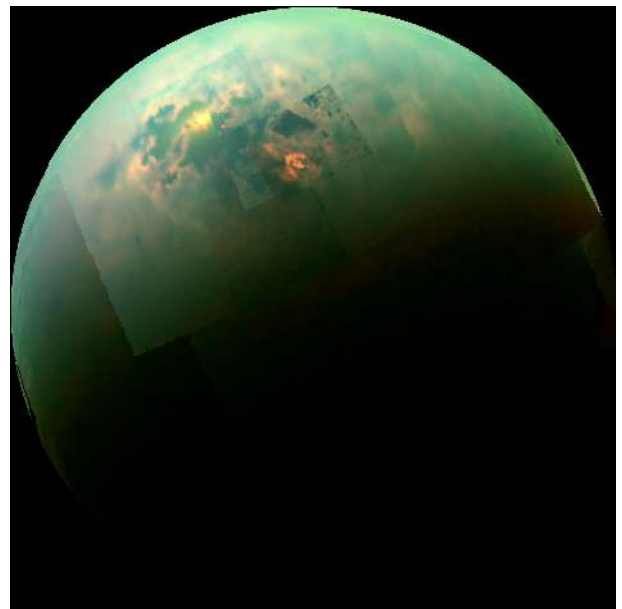


Figura 9: La luz solar reflejada en mar más grande de Titán, Kraken Mare. Imagen obtenida por el *Visual and Infrared Mapping Spectrometer* (VIMS) de la sonda *Cassini* en 2014. Fuente: NASA/JPL-Caltech/Universidad de Arizona/Universidad de Idaho.

lécúlas orgánicas en los chorros de Encélado. Éstas se podrían haber formado en fuentes hidrotermales en el fondo oceánico. En la Tierra, las fumarolas submarinas son muy ricas en actividad biológica y su ecosistema no depende directamente de la luz solar. Encélado y su probable océano interior de agua líquida con actividad hidrotermal se han convertido en objetivo prioritario para la búsqueda de vida extraterrestre. Hay otros *mundos océano* en el Sistema Solar, como Europa en Júpiter, pero los géiseres de Encélado son una oportunidad única de explorar estos océanos desde el espacio. Sólo tenemos que enviar una sonda que los sobrevuele y analice su composición. En las próximas décadas es muy probable que veamos una misión específica para esta luna.

La sonda *Cassini* detectó moléculas orgánicas en los géiseres de Encélado

Titán y Encélado son la punta del iceberg de la larga lista de descubrimientos de *Cassini*. Esta misión colosal encontró un hueco en la agenda para realizar un hermoso retrato de nuestro planeta: un lejano punto brillante atravesando los majestuosos anillos de Saturno. A finales de 2017, tal como hiciera como Galileo, *Cassini*, terminó sus días inmolándose en las nubes de Saturno.

Mundos transneptunianos

En estas décadas de frenética actividad ha quedado superada la vieja idea de que el Sistema Solar es básicamente una estrella y diez planetas a su alrededor.

Lo que nos lleva a hablar de Plutón. Y para hablar de él, primero debemos comentar los grandes avances en la catalogación de cuerpos más allá de Neptuno. Anteriormente *terra incognita*, los telescopios han ido identificando a los habitantes de esta vasta zona del Sistema Solar. Hasta 1992, sólo conocíamos a Plutón más allá de las 30

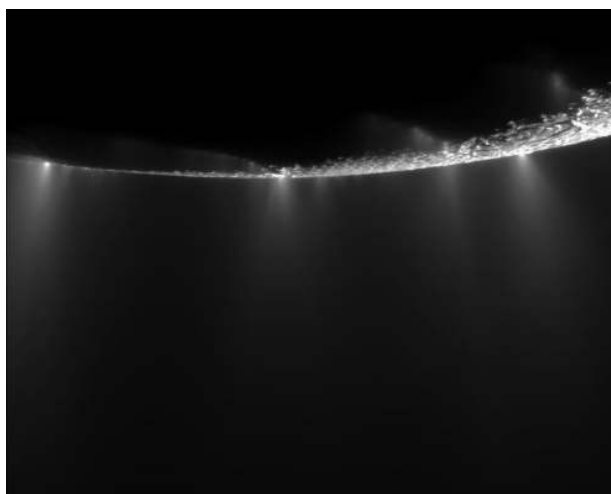


Figura 10: Chorros vapor de agua cerca del polo sur de Encélado. Imagen obtenida por la sonda *Cassini* en 2014. Fuente: NASA/JPL/Space Science Institute.

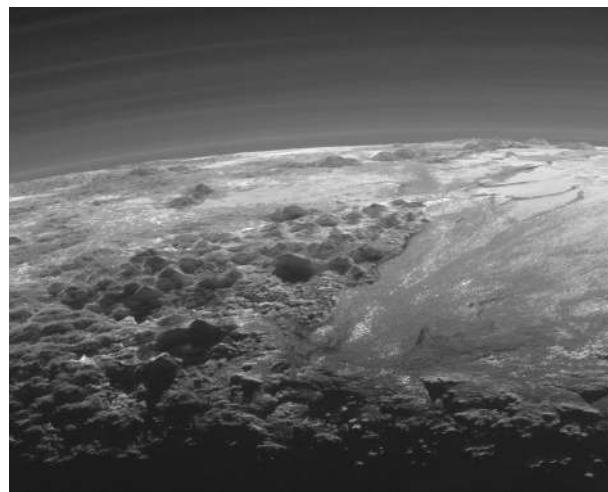


Figura 11: Cadena montañosa, de hasta 3500 metros de altura, en Plutón. Imagen obtenida a contraluz cuando la sonda *New Horizons* se encontraba a 18 000 km de distancia. Fuente: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute.

unidades astronómicas (UA) de Neptuno. Actualmente hay identificados más de 2000 objetos transneptunianos. Por su órbita, se clasifican como objetos del Cinturón de Kuiper (entre 30 y 55 UA) y objetos dispersos del disco (más allá de las 55 UA). Algunos de los cuerpos descubiertos están bien lejos del Sol. Sedna, por ejemplo, se aleja hasta las 1000 UA. Si bien no se ha hallado aún ningún planeta como Marte o la Tierra, algunos de estos cuerpos tienen unas dimensiones considerables.

En 2005 se anunció el descubrimiento de 2003 UB₃₁₃, realizado desde el Observatorio Palomar por un equipo liderado por Mike Brown. La estimación de su tamaño, a partir del brillo y la distancia, supusieron una revolución inmediata en la comunidad astronómica. Este objeto parecía ser algo mayor que Plutón. ¿Cómo debía clasificarse? ¿Era un cuerpo menor o un planeta? ¿Estábamos ante una avalancha de nuevos planetas? La Unión Astronómica Internacional se puso manos a la obra. En la asamblea de 2006, tras un intenso debate, creó una definición para los planetas del Sistema Solar que excluía los cuerpos similares a Plutón. A modo de premio de consolación se creó una nueva categoría, la de *planetas menores*, que sí incluía a Plutón, además de a Ceres y Eris (el nombre oficial de 2003 UB₃₁₃). Irónicamente, ahora sabemos que Eris es algo más pequeño que Plutón aunque un 30 % más masivo. A la lista de planetas menores se han añadido Makemake y Haumea, éste último descubierto en 2003 por José Luis Ortiz desde el Observatorio de Sierra Nevada (España). Ortiz anunció en 2017 que este cuerpo posee un sistema de anillos.

Volvamos a Plutón. Cuando en enero de 2006 se lanzó la sonda *New Horizons* su objetivo era visitar el último planeta desconocido del Sistema Solar. El tiempo apremiaba, porque se estaba alejando del Sol y su atmósfera se enfría y contrae. Pero meses después del lanzamiento,



Figura 12: Cielo azul de Plutón. Imagen obtenida por la *Ralph/Multispectral Visible Imaging Camera* (MVIC) de la sonda *New Horizons*, en 2015. Fuente: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute.

la relevancia política de la sonda quedó desmerecida por la reclasificación de la UAI a *planeta enano*. Por supuesto, el científico principal de la misión, Alan Stern, no admite la nueva clasificación y continúa refiriéndose a Plutón como planeta. Tras una asistencia gravitatoria en Júpiter y una década de viaje, *New Horizons* sólo dispuso de 24 horas para estudiar minuciosamente Plutón y su enorme luna Caronte. Las imágenes que se transmitieron casi en tiempo real cambiaron para siempre nuestra percepción de este mundo frío y distante.

Ultima Thule es el primer objeto transneptuniano en ser visitado por una sonda.

Lejos de lo que se podía esperar, Plutón no es un lugar aburrido. Posee un enorme glaciar de nitrógeno, Sputnik Planum, de color oscuro y forma de corazón, el más grande del Sistema Solar. Esta planicie no tiene apenas cráteres, por lo que es geológicamente joven (10 millones de años o menos). Plutón muestra una gran diversidad en la composición de su superficie, desde compuestos ricos en nitrógeno, a metano y hielo de agua. Las imágenes de *New Horizons* de su tenue atmósfera (1 ν bar) revelan múltiples capas de neblina y un bello color azul, captado a contraluz cuando la sonda se alejaba. La siguiente *parada* de *New Horizons* es Ultima Thule, el primer objeto transneptuniano en ser visitado por una sonda.

Una de las hipótesis que actualmente mantiene ocupados a los astrónomos que investigan el exterior del Sistema Solar es un patrón anómalo en las órbitas de varios ob-

jetos transneptunianos. Los cuerpos parecen haber sido *pastoreados* a un lado del Sistema Solar. Chad Trujillo y Scott Sheppard fueron los primeros en reconocer la anomalía. Propusieron la existencia de un planeta desconocido que perturba las órbitas de los objetos observados. De no ser un sesgo muestral, debería tener unas diez veces la masa de la Tierra. Mike Brown lo ha bautizado como Planeta Nueve (el anterior título de Plutón). Si de verdad está ahí, sería el mayor hallazgo realizado en el Sistema Solar desde la antigüedad.

Más allá

Las sondas *Voyager* (NASA), lanzadas en 1977, continúan su periplo por el exterior del Sistema Solar. En 2012, la *Voyager 1* sobrepasó la heliopausa y en 2018 la *Voyager 2* también parece estar atravesándola. En esta región las partículas del viento estelar y del interestelar están en equilibrio. Pero no es el final del reinado del Sol, ya que más allá su gravedad retiene a los objetos de la Nube de Oort. La *Voyager 1* tardará 300 años en llegar hasta allí y para entonces sus instrumentos estarán en un eterno y merecido descanso. La existencia de la Nube de Oort es, hasta ahora, teórica. De momento, no se ha aprobado ninguna misión espacial para su estudio.

'Oumuamua es el primer visitante extranjero identificado que visita el Sistema Solar

La tecnología espacial ha mejorado mucho, pero no tanto como se esperaba en los años de la carrera espacial. Ninguna sonda es capaz de viajar a la velocidad de la luz, y nuestras esperanzas de visitar pronto otras estrellas son nulas. Por eso, el descubrimiento en 2017 de 'Oumuamua ha sido tan emocionante. Robert Weryk (Universidad de Hawái), descubrió un objeto peculiar en imágenes del telescopio Pan-STARRS. Se encontraba a 0.22 UA de la Tierra y había pasado 40 días antes por el punto más cercano al Sol. Lo inusual es que se movía muy rápido, endiabladamente rápido, con suficiente energía como para escapar del Sol. Y una vez calculada su órbita no quedó duda: 'Oumuamua es el primer *extranjero* identificado en visitar el Sistema Solar. Debido a su velocidad y brillo, los telescopios terrestres sólo pudieron analizarlo durante unas semanas. No hemos podido extraer de él la cantidad de información que nos gustaría. Se podría tratar de un cometa o de un asteroide, porque no mostró actividad cometaria pero su trayectoria fue perturbada como si hubiera emitido chorros. Además, la curva de luz mostró grandes variaciones, sugiriendo que tiene forma alargada. ¿Cuál es su composición interior? ¿De dónde proviene? ¿Los asteroides o cometas de otras estrellas son diferentes a los del Sistema Solar? ¿Contiene material orgánico? ¿Cuánto tiempo ha estado viajando por la Vía Láctea? Quizás en el futuro podamos enviar una sonda al encuentro de estos enigmáticos visitantes.

Exploración del espacio profundo

Planetas extrasolares

La definición de planeta acuñada por la Unión Astronómica Internacional sólo incluye a los objetos del Sistema Solar. No existe una definición oficial de qué es un planeta extrasolar, en parte porque esta especialidad aún está en su infancia. Mientras la humanidad lleva milenios observando y estudiando el movimiento de los planetas visibles del Sistema Solar, hace 20 años sólo se conocían cinco planetas extrasolares. Actualmente están catalogados cuatro mil planetas extrasolares, cifra que se multiplicará pronto. No hay duda alguna del enorme interés científico de los exoplanetas, más allá del conocimiento puro sobre el origen de los sistemas planetarios. Buscamos lugares donde la vida haya podido surgir y evolucionar. ¿Es la Tierra un planeta corriente? ¿Podemos detectar signos de actividad biológica en los planetas extrasolares?

Actualmente están catalogados cuatro mil planetas extrasolares, cifra que se multiplicará pronto

La misión más prolífica en la búsqueda de exoplanetas se lanzó al espacio en 2009. El telescopio espacial *Kepler* (NASA) es un proyecto de bajo coste, situado en una órbita heliocéntrica similar a la de la Tierra. Observó durante tres años una región entre las constelaciones del Cisne, Lira y Dragón y luego otras regiones dispersas por la eclíptica durante otros seis años. Sus 42 cámaras digitales ofrecen una resolución de 95 megapíxeles. Las imágenes se comprimen con pérdida de datos para limitar el ancho de banda en las comunicaciones con la Tierra. *Kepler* medía varias veces por minuto el brillo de

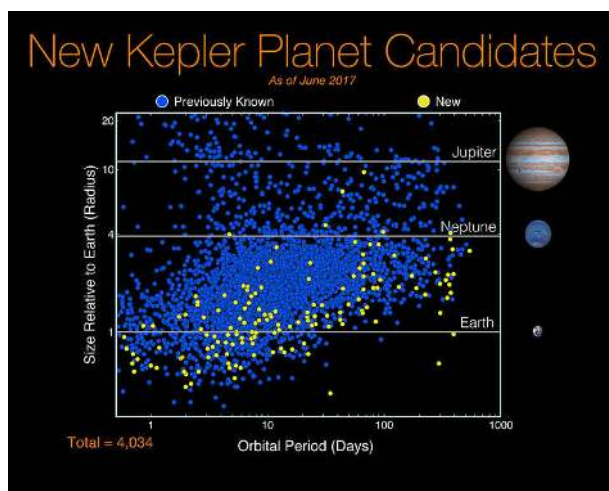


Figura 13: Caracterización de las propiedades de los 4000 candidatos a planetas extrasolares observados por *Kepler*. Fuente: NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel

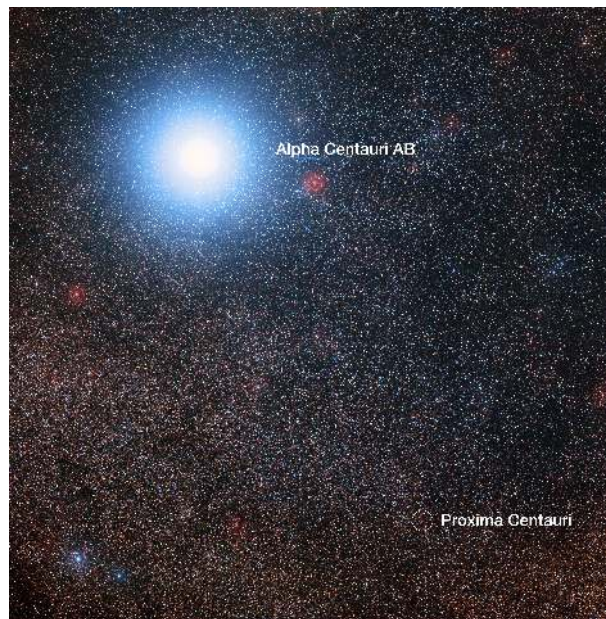


Figura 14: Imagen del cielo alrededor de la estrella doble α Centauri. Fuente: Digitized Sky Survey 2/ESO.

las 200 000 estrellas de secuencia principal, en busca de pequeños eclipses producidos por el tránsito de planetas extrasolares. La calidad de las observaciones realizadas sin interferencias atmosféricas dio sus frutos. El catálogo de candidatos de *Kepler* suma hoy 4000 planetas extrasolares. De éstos, solo 50 orbitan las zonas habitables de sus estrellas y poseen el tamaño de la Tierra.

Debido al sesgo de la técnica, la mayor parte de planetas extrasolares descubiertos por *Kepler* tienen cortos periodos de traslación, entre 1 y 100 días. Tendríamos que observar el mismo campo durante muchos más años para detectar cuerpos con órbitas más amplias. Con el catálogo de *Kepler* en la mano, ni los planetas gigantes como Júpiter ni los planetas rocosos como la Tierra son los más comunes. Los más populares de la galaxia, según *Kepler*, son las *super-tierras* rocosas y los *mini-neptunos*, mundos océano y gigantes de hielo. En 2018 se lanzó a bordo de un cohete Falcon 9 la misión sucesora de *Kepler*, el *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (NASA). TESS espera multiplicar por cinco la cifra de planetas extrasolares conocidos y centrará la búsqueda en las estrellas más brillantes y cercanas.

En 2001, un equipo dirigido por David Charbonneau, utilizó el Telescopio Espacial Hubble para distinguir el espectro de un planeta extrasolar que transita delante de su estrella anfitriona. Esta técnica, sorprendente por haber conseguido lo que parecía imposible, es la clave para determinar la composición química de las atmósferas planetarias. O lo que es lo mismo: para encontrar señales de actividad biológica. Desde entonces se ha anunciado la detección de sodio, agua, CO, CO₂ y metano en varios exoplanetas.

Más cerca de casa, un equipo de astrónomos europeos, liderados por Xavier Dumusque (Observatorio de Génova)

va), anunció en 2012 el descubrimiento de un planeta extrasolar en α Centauri B. La técnica utilizada fue el método de velocidad radial. Pero un análisis posterior por otro equipo identificó un problema en el análisis matemático utilizado para procesar los datos y el espectacular descubrimiento se desvaneció en el ruido.

En 2016 se anunció el descubrimiento de un planeta extrasolar en la zona de habitabilidad de Proxima Centauri, la estrella más cercana al Sistema Solar

α Centauri es un sistema triple: α Centauri A, α Centauri B y Proxima Centauri. Próxima es, de las tres, la más cercana al Sistema Solar. Es una enana roja, con un décimo de la masa solar, bastante pequeña y débil. En 2016, un equipo liderado por el español Guillem Anglada (Universidad Queen Mary de Londres) anunció el descubrimiento de un planeta extrasolar en la zona de habitabilidad de Proxima Centauri. Las enanas rojas son muy activas y violentas, de ahí la dificultad para detectar en ellas planetas extrasolares. Las enanas rojas son las estrellas más abundantes de la galaxia, y de larga longevidad. Si no fuera por las fulguraciones periódicas, capaces de acabar con la atmósfera de un planeta, serían un entorno ideal para la vida. Estando Próxima tan cerca, es tentador imaginar que en el futuro seremos capaces de lanzar una sonda que la visite y envíe imágenes de este exoplaneta, cuya historia ha sido completamente diferente a los del Sistema Solar. Pero para eso necesitamos tecnologías de las que carecemos en estos momentos.

La Vía Láctea en 3D

El proyecto más ambicioso de estudio de la Vía Láctea es otra misión espacial. La ESA lanzó en 2013 el telescopio espacial *Gaia*, que orbitará el punto L₂ Sol-Tierra y estará operativo al menos hasta 2022. Su sistema óptico está compuesto por un juego de diez espejos, dispuestos de forma inusual. El sistema óptico posee una matriz de 106 cámaras digitales que generan una imagen de 1 gigapíxel. La meta es realizar la más completa cartografía de estrellas jamás creada. Con *Gaia* conoceremos con increíble precisión la posición tridimensional, luminosidad y temperatura efectiva de al menos mil millones de estrellas, el 1 % de nuestra galaxia. Para ello utiliza el método de triangulación: observa las estrellas en puntos opuestos de la órbita terrestre y compara las diferencias de posición.

Para disfrutar de los datos de *Gaia* no hay que esperar a que finalice la misión. El equipo científico procesa y publica de forma periódica los datos recibidos. En 2018 se presentó a la comunidad científica la segunda edición, con la posición y brillo de 1600 millones de estrellas, y la paralaje y movimiento propio de un subconjunto de 1300 millones. Los astrónomos corrieron raudos a sus PCs para descargar y analizar este tesoro en forma de tablas de

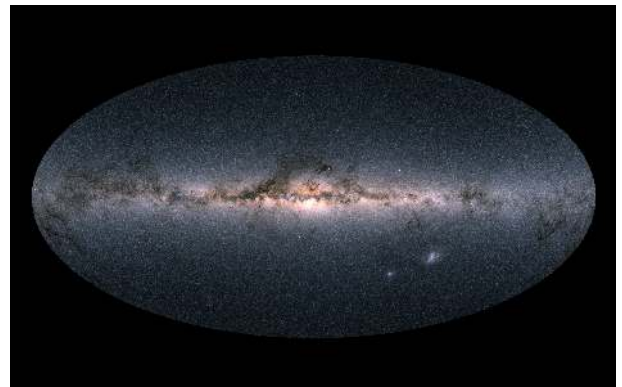


Figura 15: No es una fotografía, es una imagen sintética creada a partir de los datos de posición y color de los 1600 millones de estrellas observadas por *Gaia*. Fuente: ESA/Gaia/DPAC.

datos. Uno de los primeros resultados ha sido el descubrimiento de una enorme galaxia difusa en la vecindad de la Vía Láctea. Hasta ahora se habían identificado unas 40 galaxias enanas satélite. Pero Gabriel Torrealba (Academia Sinica) y su equipo encontraron en los datos a Antlia 2. Esta pequeña galaxia está a 424 000 años luz y tiene unos 20 000 años luz de diámetro (frente a los 100 000 de la Vía Láctea). A pesar de tener unas dimensiones comparables a la Gran Nube de Magallanes (visible a simple vista desde el Hemisferio Sur), Antlia 2 es 4000 veces más débil. La búsqueda de galaxias difusas, tanto en la Vía Láctea como en otras galaxias, es un campo de creciente interés por sus implicaciones cosmológicas.

Con *Gaia* conoceremos con increíble precisión la posición tridimensional, luminosidad y temperatura efectiva de al menos 1000 millones de estrellas

Otro de los resultados inesperados de *Gaia* ha sido la identificación de una veintena de estrellas *hiperveloces*, realizado por el equipo de Elena Maria Rossi (Universidad de Leiden). En el centro de la Vía Láctea hay un agujero negro supermasivo y las estrellas que pasan cerca pueden recibir una asistencia gravitatoria tal que las expulse de la galaxia. Sin embargo, la mayoría de estrellas hiperveloces vienen hacia a la Vía Láctea. Podrían provenir de otras galaxias, siendo una especie de ‘Oumuamuas intergalácticas, lo cual las hace muy atractivas para su estudio. Cuando se tengan datos más completos de *Gaia* de la velocidad y posición de las estrellas también se podrá analizar la distribución de masa oscura en la Vía Láctea, uno de los grandes enigmas de la astrofísica de las últimas décadas.

Hablando del agujero negro supermasivo de la Vía Láctea, llamado Sagitario A*. En estos 20 años de funcionamiento del *Very Large Telescope* (ESO) se han capturado imágenes de las estrellas que pasan a su alrededor.

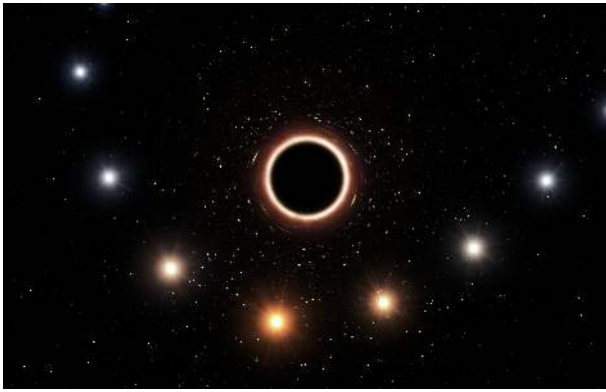


Figura 16: Impresión artística del periastro de la estrella S2 por el agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea. Cuanto más cerca está la estrella, más rápido va y el gran campo gravitatorio desplaza su color al rojo, un efecto relativístico. Fuente: ESO/M. Kornmesser.

En 2018, el VLT realizó un seguimiento del periastro de una estrella, llamada S2. En su punto de máximo acercamiento al agujero negro, a sólo 120 UA, S2 se movía a la extraordinaria velocidad de 7700 km/s (27 millones de km/h), un 2.6 % de la velocidad de la luz. El VLT pudo detectar cómo el espectro de la estrella sufría un corrimiento al rojo, uno de los efectos relativísticos esperados y que la mecánica de Newton no puede explicar. El equipo de Stefan Gillessen (Instituto Max Planck) aplicó las leyes de Kepler a la órbita de las estrellas circundantes y estimaron que Satigario A* tiene 4 millones de masas solares. No existe ningún objeto celeste conocido que en cien unidades astronómicas condense tal cantidad de masa, y menos aún que cumpla el resto de características observadas. Parece que, de verdad, estamos ante un agujero negro supermasivo.

La esponja cósmica

Durante las últimas dos décadas nuestro conocimiento sobre la estructura y composición del universo ha sufrido una completa revisión gracias al Telescopio Espacial Hubble, los grandes observatorios terrestres y otros telescopios medianos avanzados.

El agujero negro supermasivo de la Vía Láctea tiene una de 4 millones de masas solares

La materia oscura

Uno de los resultados más reveladores fue la observación, en 2006, de una evidencia clara de la materia oscura. Doug Clowe (Universidad de Arizona) y Maxim Markevitch utilizaron los telescopios espaciales Hubble y Chandra (NASA) para observar la *colisión* de dos cúmulos de

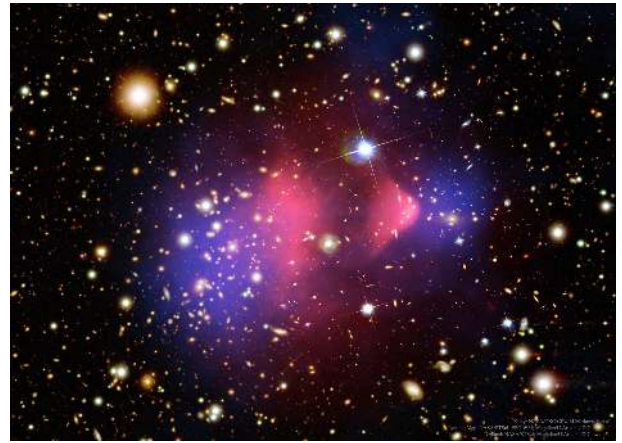


Figura 17: Superposición de tres imágenes: visible, rayos X y mapa de distribución de masa. Fuente: NASA/CXC/CfA/ M. Markevitch et al.; NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U.Arizona/ D.Clowe et al. NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D.Clowe et al.

galaxias. El Cúmulo Bala, como se conoce a ambos, está situado a 4 000 millones de años luz en la constelación de Carina. Se cruzaron hace 160 millones de años y se mueven en direcciones opuestas. Bala ofrece unas condiciones idóneas para examinar qué ocurre con la materia visible (las estrellas), el gas intergaláctico (que si está caliente emite en rayos X) y la materia invisible (pero perceptible a través de las lentes gravitatorias). Al cruzarse ambos cúmulos, las estrellas apenas interactuaron y sólo se vieron frenadas. Por otra parte, el gas de ambos cúmulos interactuó, calentándose a altas temperaturas (de ahí que sea detectable en rayos X) y frenándose. En cambio, la materia oscura de cada cúmulo se cruzó sin interacción alguna. El Cúmulo Bala es una de las mejores evidencias hasta el momento de las propiedades de la materia oscura, cuya naturaleza última permanece aún incomprendida.

El Cúmulo Bala es una de las mejores evidencias hasta el momento de las propiedades de la materia oscura

La evolución de las galaxias

En 2004, el Telescopio Espacial publicó las imágenes del Campo Ultra-Profundo del Hubble. En 3 segundos de arco de una región de la constelación de Fornax se apiñan 10 000 galaxias. Están distribuidas a diferentes distancias, hasta los 13 000 millones de años luz. Ésta es una de las imágenes más profundas realizadas del universo y contiene las galaxias más lejanas jamás observadas. Cuando las comparamos con las más cercanas, comprobamos que las del Campo-Ultra Profundo tienen una alta formación estelar, son más pequeñas y menos simétricas. Éstas y otras observaciones demuestran que las galaxias se fusionan y crean galaxias más grandes. David Martínez

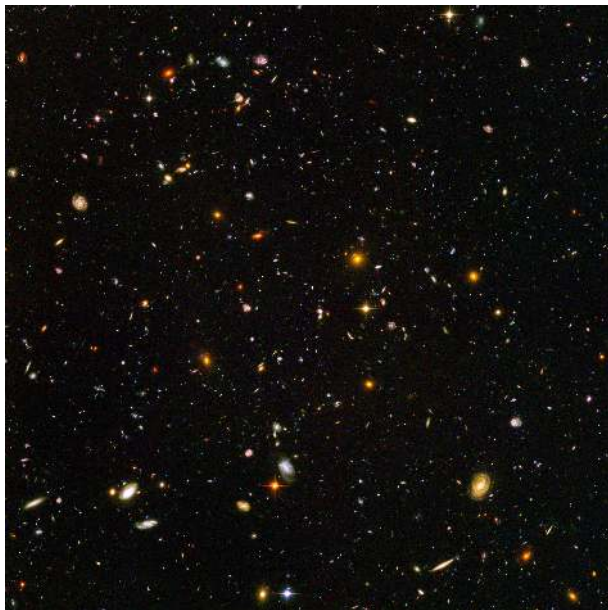


Figura 18: Campo Ultra-Profundo del Hubble. Fuente: NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) y el equipo HUDF.

Delgado (Universidad de Heidelberg) y un equipo de astrónomos aficionados han identificado en otras imágenes profundas débiles corrientes de marea estelares alrededor de galaxias cercanas. Las corrientes son regueros de estrellas que formaban parte de galaxias enanas, en proceso de ser absorbidas por una mayor. El número de corrientes y el número de galaxias enanas se usan para comprobar las predicciones realizadas por los modelos de evolución cosmológica.

Mapas del universo

En tierra son varios los proyectos dedicados al cartografiado de las galaxias. El más conocido es el *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) que utiliza un telescopio de 2.5 m de diámetro situado en Nuevo México (EEUU). La cámara está compuesta por una matriz de 30 cámaras digitales que crean imágenes de 120 megapíxeles. Cada campo se observa en cinco filtros de diferentes longitudes de onda. Los objetos de especial interés son también analizados mediante espectroscopio. El SDSS, como *Gaia*, publica periódicamente revisiones de los catálogos. En el más reciente ofrece información sobre la posición tridimensional, composición química, y otros muchos parámetros de 1 500 000 galaxias. En el Hemisferio Sur, el *Two-Degree Field Galaxy Redshift Survey* (2dF) utilizó el Telescopio Anglo-Australiano de 3.9 m y un espectrógrafo equipado con 200 fibras ópticas para caracterizar 230 000 galaxias.

Los catálogos galácticos 2dF y SDSS nos muestran cómo las galaxias se agrupan en cúmulos, supercúmulos y éstos en filamentos de materia, entre los que hay vacíos. A gran escala, el universo tiene una textura de esponja. En 2003 se anunció el descubrimiento del Gran Muro de Sloan, un filamento de 1380 millones de años luz de longitud. Posteriormente se han descubierto estructuras

más grandes: el Gran Muro de Hércules-Corona Boreal, de 10 000 millones de años luz de longitud; el Anillo Gigante de GRBs, de 5 600 millones de años luz; y el Gran Grupo de Cuásares Huge, de 4 000 millones de años luz. Los vacíos típicos poseen un diámetro de entre 30 y 300 millones de años luz, pero algunos son extremadamente grandes. El vacío KBC, anunciado en 2013 por Ryan Keenan, Amy Barger y Lennox Cowie, tiene un diámetro de 2 000 millones de años luz. Las dimensiones de estas estructuras desafían las predicciones cosmológicas, que prevén un universo homogéneo a gran escala.

La observación de las oscilaciones acústicas de bariones conecta la cosmología con la cartografía galáctica

Cosmología observacional

Uno de los descubrimientos recientes que también conecta la cosmología con la cartografía galáctica es la detección de oscilaciones acústicas de bariones, una predicción de los modelos de Gran Explosión. En las primeras etapas del universo, con gran densidad de materia, deberían existir ondas que se propagaban como las del sonido. En lugar de mover las moléculas del aire, las oscilaciones acústicas movían la materia *normal* (bariónica). E, igual que el sonido no se propaga en el vacío, cuando la densidad del universo disminuyó a una cantidad crítica debido a la expansión, las ondas acústicas dejaron de propagarse. Sin embargo, el rastro de las ondas debería haberse quedado en la disposición de la materia bariónica. Y esto, efectivamente, es lo que se observa. A intervalos regulares de unos 500 millones de años luz, se aprecia un incremento de densidad de galaxias, seguido de otro vacío.

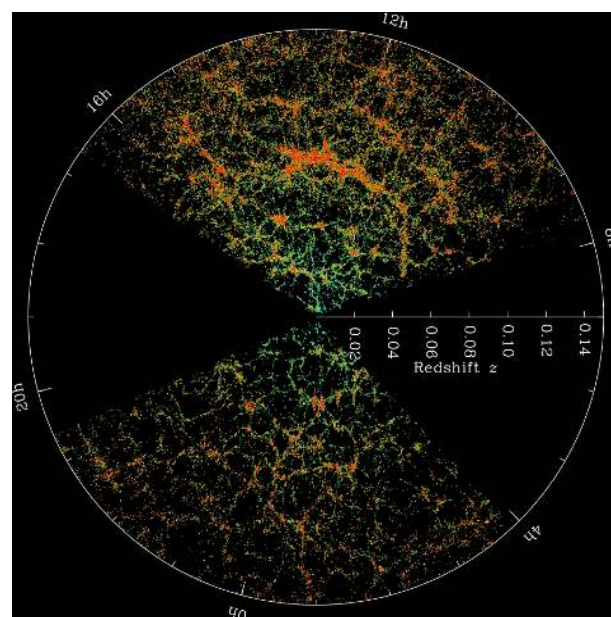


Figura 19: Mapa del universo del SDSS. Cada punto es una galaxia. Fuente: M. Blanton y SDSS.

Las oscilaciones acústicas se detectaron en el año 2005, tanto en el catálogo 2dF como, independientemente, en el SDSS.

Las predicciones cosmológicas se basan a su vez en mapas precisos del fondo cósmico de microondas, la radiación fósil del inicio del universo. Durante estas dos décadas, dos misiones espaciales han mejorado la resolución del mapa del *Cosmic Background Explorer* (NASA). Publicado en 1992, hizo merecedores del Premio Nobel de Física de 2005 a sus investigadores principales, George Smoot y John C. Mather. La *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (NASA) fue lanzada en 2001 y estuvo operativa hasta el lanzamiento del observatorio espacial europeo *Planck* (ESA), en 2009. Uno de los resultados inesperados de WMAP fue la observación de una región del cielo inusualmente grande y fría, al menos en comparación con el resto del fondo cósmico de microondas. La temperatura media del fondo cósmico es de 2.7 grados kelvin, con variaciones típicas de $18 \mu\text{K}$. La temperatura del llamado *punto frío* es $70 \mu\text{K}$, cuatro veces la variación típica. Además, el punto tiene un diámetro angular de 5° , diez veces el tamaño aparente de la Luna. Los modelos cosmológicos no prevén tales estructuras y no se ha encontrado una explicación convincente.

El punto frío del fondo cósmico de microondas desafía los modelos cosmológicos

Tampoco existen explicaciones a las discrepancias observadas en la medición de la constante de Hubble, H_0 , la velocidad de expansión del universo. Para calcularla hay que medir distancias y cada escala necesita un método diferente: es la *escalera de distancias cósmicas*. Para las estrellas más próximas, primero *Hipparcos* (ESA) y ahora *Gaia*, determinan la paralaje con gran precisión. Para las galaxias hay que recurrir a estrellas variables, como las cefeidas. El Telescopio Espacial Hubble es capaz de resolver estrellas individuales en galaxias cercanas, como Andrómeda. Pero para las lejanas hay que recurrir a las energéticas explosiones de supernovas, particularmente las de tipo Ia. Para distancias aún mayores se utiliza

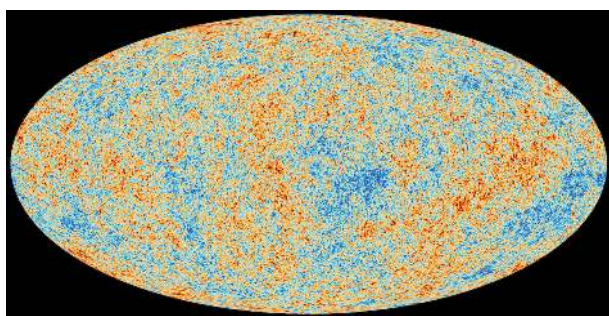


Figura 20: Mapa del fondo cósmico de microondas, realizado por el satélite *Planck*. Actualización de 2018. Fuente: ESA/Planck Collaboration.

el corrimiento al rojo de los espectros. La calibración de la escalera combina diferentes métodos, por ejemplo, observando una supernova en una galaxia cuya distancia se ha estimado antes con cefeidas. El problema es que las predicciones y las mediciones no concuerdan. A partir del mapa de fondo cósmico de *Planck*, la constante de Hubble debería ser ahora de 67 o 69 kilómetros por segundo por megapársec (Mpc). Esto es: cada 3.26 millones de años luz (1 Mpc), la velocidad de expansión aumenta en 67 km/s. Sin embargo, se observa que las galaxias se mueven a una velocidad mayor, a 73 km/s/Mpc. Aunque la diferencia es pequeña, las medidas son lo suficientemente precisas como para ignorarla.

La energía oscura

Hay que recordar que justamente hace 20 años se anunció la sorprendente detección de anomalías en las distancias de supernovas de tipo Ia, realizada por el *High-Z Supernova Search Team*. Un año más tarde, el *Supernova Cosmology Project* planteó que éstas demostraban la aceleración de ritmo de expansión del universo. La constante de Hubble, en realidad, varía. El trabajo proporcionó el Premio Nobel de Física de 2011 a Adam Riess, Saul Perlmutter y Brian P. Schmidt.

Las ondas acústicas de bariones han proporcionado un método independiente de comprobación de la aceleración del universo

Desde entonces se han dedicado grandes esfuerzos a tratar de desentrañar esta aparente contradicción: que el universo no se expande (sólo) debido a una explosión inicial, sino que hay una fuerza adicional (no predicha) que lo acelera. Una de las evidencias independientes de que el universo se expande cada vez más deprisa se ha realizado a través de las ondas acústicas de bariones. La existencia de las ondas permite comprobar la velocidad de expansión del universo sin utilizar las supernovas. Para ello, el equipo internacional liderado por Chris Blake (Universidad Swinburne) utilizó el catálogo *WiggleZ Dark Energy Survey* del Telescopio Anglo-Australiano, capaz de observar 392 galaxias por hora. Sus 200 000 galaxias dan información sobre la distribución de materia bariónica desde la Vía Láctea hasta una distancia de 8000 millones de años luz. Los vacíos de la oscilación acústica, a intervalos regulares de 500 millones de años, se usaron los marcadores de distancia en una carretera. A partir de los marcadores y el corrimiento al rojo se dedujo la velocidad de expansión del universo. El estudio, publicado en 2011, confirma que el universo se expande aceleradamente.

Las estimaciones actuales indican que el 68 % de la energía del universo es contribución de la *energía oscura*, y que empezó a ser la fuerza dominante hace 5000 millones de años. Según la hipótesis de la *constante cosmológica*, la energía oscura es una propiedad intrínseca del propio espacio, aunque existen otras propuestas.

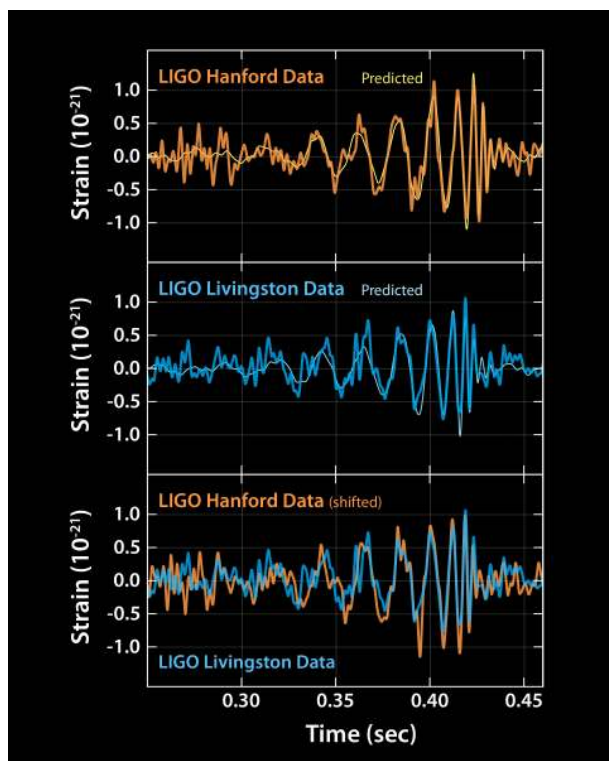


Figura 21: Señales del GW150914 detectadas por los interferómetros de LIGO. Fuente: Caltech/MIT/LIGO Lab.

Astronomía invisible

La actividad astronómica y los telescopios, en sus diferentes encarnaciones, han estado estrechamente vinculados desde los tiempos de Galileo Galilei. En los últimos años las miradas de los astrofísicos se han dirigido a otros tipos de fenómenos, que han requerido el desarrollo de nuevos instrumentos. El Observatorio de Neutrinos *Ice-Cube*, situado en la Antártida, es un detector compuesto por miles de sensores. En septiembre de 2017, el IceCube detectó un neutrino de altas energías procedente de la constelación de Orión. El telescopio *Fermi* apuntó a sus coordenadas de origen y pilló *in fraganti* una nueva explosión de rayos gamma y rayos X. Gracias a ello se identificó la fuente de ambos eventos, el blázar TXS 0506+056. Esta galaxia activa, situada a 3700 millones de años luz, posee unos chorros cuyo eje apunta hacia la Tierra. En los chorros, los campos magnéticos calientan la materia a altas temperaturas y aceleran las partículas a velocidades relativísticas. Esta es la primera vez que se observa un fenómeno astronómico tan lejano utilizando tanto la luz como las partículas.

Pero la observación astronómica más portentosa de estas dos décadas, sin embargo, ha confirmado una predicción realizada hace más de cien años. En 2016, el proyecto *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO) anunció la detección directa de las primeras ondas gravitatorias. El 14 septiembre de 2015, dos interferómetros láser de 4 km de longitud y separados 3000 km, detectaron casi simultáneamente una contrac-

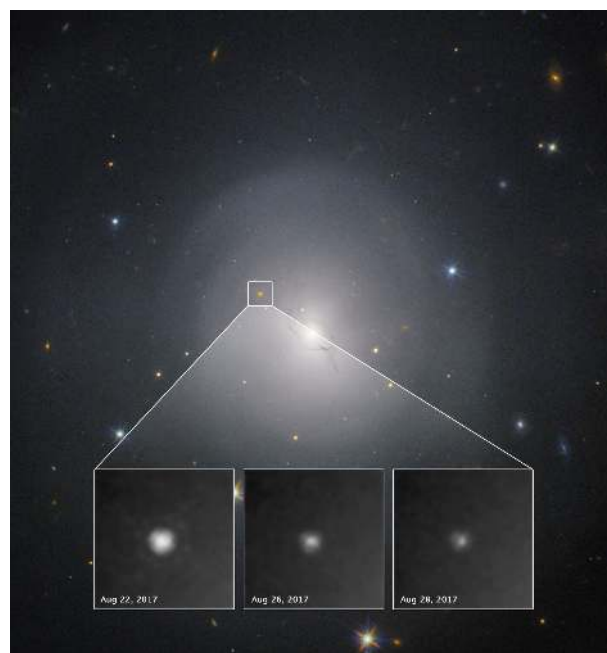


Figura 22: Fuente de las ondas gravitatorias GW170817 observada por el Telescopio Espacial Hubble en la galaxia NGC4993. Fuente: NASA y ESA.

ción momentánea del espacio-tiempo. Los 4 km se acortaron la milésima parte del ancho de un protón. La onda gravitatoria, denominada GW150914, se desplazaba a la velocidad de la luz. La señal es compatible con la emitida por la fusión en espiral de dos agujeros negros de 36 y 26 masas solares. Se estima que el par se encontraba a la nada despreciable distancia de 1500 millones de años luz, lo que da una idea de la inimaginable cantidad de energía liberada durante la fusión.

La fusión de estrellas de neutrones GW170817 fue observada simultáneamente por interferómetros, telescopios de rayos gamma, rayos X y telescopios ópticos

Aún más sorprendente fue la observación de GW170817. Esta onda gravitatoria fue observada simultáneamente por los interferómetros de LIGO, en EEUU, y el europeo Virgo el 17 de agosto de 2017. La señal era la de dos estrellas de neutrones que también se fusionaron en espiral. La distribución geográfica de los detectores acotó la localización de la fuente en el cielo. De forma independiente, los observatorios espaciales Fermi (NASA) e INTEGRAL (ESA) detectaron una explosión de rayos gamma, 1.7 segundos después de la onda de LIGO y Virgo y en la misma zona del cielo. 11 horas después, los telescopios ópticos en tierra encontraron una explosión en la galaxia NGC 4993, en la misma dirección. El espectro de la explosión observada por los telescopios descarta una supernova y apunta al material creado tras la fusión de

dos estrellas de neutrones. Hay pocas dudas de que, por vez primera en la historia, se observó el mismo evento astronómico tanto en ondas gravitatorias como en radiación electromagnética.

Estamos ante una nueva era en la astronomía. Las ondas gravitatorias han abierto una ventana de observación completamente nueva al universo. En 2017, Rainer Weiss, Kip Thorne y Barry Barish recibieron el Premio Nobel de Física por su trabajo en LIGO.

El futuro

La aventura del conocimiento humano es una actividad única, sólo comparable a la de la propia evolución humana. Generación tras generación, miles de científicos dedican sus vidas a acumular datos y comprobar teorías. Las ideas más fértiles prosperan y crean nuevas ramas de estudio, mientras que las hipótesis falsas, languidecen. A veces, de todo ese esfuerzo emergen ideas que tienen una gran repercusión social. En ocasiones permiten el desarrollo de nuevas tecnologías. En otras, modifican la percepción sobre el mundo y dan paso a cambios políticos. Las próximas dos décadas pueden ser igual de prodigiosas que las relatadas en este artículo. Pero todo ello va a depender de que no olvidemos las lecciones de la historia y continuemos colaborando para hacer de éste un mundo mejor. A pesar de todo lo descubierto, el único lugar en el universo que es nuestro hogar es, y continuará siendo, el planeta Tierra. Ω

Víctor R. Ruiz
rvr@infoastro.com
twitter.com/vrruiz
Astronomía Digital, Radio Skylab



Veinte años de agua en Marte

David Galadí | Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto

O cómo una historia de comunicación de la ciencia retrata la sociedad más que la realidad física

Sentir que es un soplo la vida,
que veinte años no es nada,
que, febril, la mirada
errante en las sombras
te busca y te nombra...

– Carlos Gardel y Alfredo Le Pera
Volver

Celebramos los veinte años de Astronomía Digital y esta efeméride nos brinda una excusa estupenda para echar la vista atrás y comprobar cuánto ha cambiado la ciencia del cielo a lo largo de estas dos décadas. Otras contribuciones a esta entrega de la revista dejan muy claros los avances en multitud de campos, tanto en lo teórico como en lo observacional, sin olvidar las transformaciones radicales que han traído los cambios tecnológicos (internet, avances en informática, mejoras en detectores y telescopios, astronáutica...) en astronomía profesional y no profesional. Los medios de investigación y comunicación de que disponemos han cambiado para mejor, y los contenidos también lo han hecho en una gran medida. Hoy ya no es lo mismo que hace veinte años ni lo que sabemos, ni cómo hemos llegado a saberlo.

Gardel y Le Pera insistían en que, en el curso de la vida humana, veinte años no es nada. Bien, la hipérbole salta a la vista y el simple experimento de mirarse al espejo demuestra la falsedad de la hipótesis si se toma al pie de la letra. Ahora bien, en la corriente de cambio tecnológico y conceptual de los últimos veinte años, ¿no es cierto que, en el fondo, hay muchísimas cosas que han cambiado poco o nada en nuestra ciencia? Por supuesto

que es así, no tanto en lo que respecta a procedimientos y conceptos, sino en lo que se refiere a las actitudes, a la sociología de la ciencia y de su comunicación.

**Cada cual puede tener su fetiche favorito,
pero a mí me gusta especialmente el caso
del agua en Marte como ejemplo de
supuesta novedad continua que nos
describe**

Es muy conocida una frase que Thomas Kuhn citaba en su obra *La estructura de las revoluciones científicas* atribuyéndola nada menos que a Max Planck, y que dice que “Una nueva verdad científica no triunfa convenciendo a sus oponentes y haciéndoles ver la luz, sino más bien porque sus oponentes terminan por morir y crece una nueva generación que está familiarizada con ella”. Bueno, es bien sabido que Kuhn no iba a la zaga de Gardel y Le Pera en cuanto a hipérbole y exageración, pero no cabe duda de que los cambios científicos más lentos son los que corresponden a la sociología de la ciencia, porque en ese ámbito sí se aplica, sin lugar a dudas, la frase (quizá apócrifa) de Max Planck. Si nos centramos no en los contenidos científicos nuevos de estos veinte años, sino en cómo encajan en el contexto general de la ciencia y, sobre todo, de su comunicación, es posible que descubramos algo que retrate la comunidad científica, más que el mundo físico real.

Cada cual puede tener su fetiche favorito, pero a mí me gusta especialmente el caso del agua en Marte como

ejemplo de supuesta novedad continua que nos describe. Cualquier búsqueda en internet revela la multitud de veces que se ha descubierto agua en Marte durante las últimas dos décadas. En estado sólido, líquido o gaseoso. En la atmósfera, en la superficie o en el subsuelo. Pura, con dióxido de carbono, en clatratos, dulce o salada, con o sin barro. Y el hallazgo siempre se plantea como novedoso, como definitivo, como histórico, y se relaciona todas y cada una de las veces con sus implicaciones astrobiológicas y para la expansión del ser humano en la última frontera del espacio. Aparte de buscar en la red, se puede acceder a un listado abrumador (a pesar de no ser para nada exhaustivo) en un divertidísimo episodio de la serie *El astrónomo indignado* (García y González, 2017).

En realidad se viene hablando de agua en Marte desde que se descubrieron los casquetes polares del planeta, nada menos que en los albores de la era telescópica. Comas Solà estaba seguro de que los casquetes polares marcianos contenían agua y el resto de anuncios posteriores sobre este tema no son más que una nota al pie confirmando lo que ya se esperaba. La detección de vapor de agua en la atmósfera marciana es una historia de lo más controvertida (véase Schorn, 1971) que se remonta, al menos, a comienzos del siglo XX, y desde entonces no se ha hecho sino confirmar su escasez y variabilidad. Aun así, toda una generación de especialistas ha centrado su programa de investigación marciana en *perseguir el agua*.

Muchas veces el ser humano percibe solo lo que anda buscando

Muchas veces el ser humano percibe solo lo que anda buscando, y el contexto en el que se desarrolla la investigación marciana ha estado empapado de agua y de vida. La existencia de agua en el Marte primitivo resulta indiscutible, y su importancia astrobiológica, en lo que se refiere a la posibilidad de que existiera una biosfera antigua en ese planeta, no se puede poner en duda. Pero el ansia hidrológica de la generación que llegó a Marte a lomos de las novelas de H.G. Wells y el mito de los canales de P. Lowell admite un paralelismo casi exacto con la obsesión por el oro que embriagó a las primeras oleadas de europeos que protagonizaron la invasión de América. Cada hallazgo de filones de metales preciosos en el nuevo mundo, más que confirmar el mito de El Dorado, en realidad ratificaba lo errado de los prejuicios de quienes se empecinaban en la búsqueda. De un modo parecido, la generación que ha vivido las primeras oleadas de la exploración marciana se afana por celebrar el recuento de cada molécula de H₂O sin darse cuenta, tal vez, de que en realidad están escribiendo la historia de un fracaso. Porque cada vez queda más claro que en el Marte actual hay agua, por supuesto, como hay oro en América, pero en cantidades y estados muy por debajo de las expectativas híper-optimistas de los tiempos heroicos.

Los indicios y las sospechas de la existencia de hielo de agua sub-superficial han sido firmes y continuos, desde la fotografía de los cráteres amurallados al descubrimiento de barro sub-superficial por la Mars Express en 2018,

pasando por los hallazgos directos de la misión Phoenix en 2008. La existencia de agua helada en los casquetes polares y su proporción respecto del hielo de dióxido de carbono se han ido afinando desde su descubrimiento... ¡en el siglo XVII! Los rasgos que señalan la abundancia de agua líquida superficial en el Marte primitivo no hacen sino acentuar el contraste con su ausencia total y absoluta en el Marte actual.

En el Marte actual hay agua, por supuesto, como hay oro en América, pero en cantidades y estados muy por debajo de las expectativas híper-optimistas

Una mención aparte, en la historia de la búsqueda de lo que queremos ver, la merecen los múltiples relatos sobre los regueros en las laderas de ciertos cráteres, que se han relacionado de manera insistente con los torrentes terrestres y que la geología planetaria de la generación actual se empecina en interpretar como cursos de agua líquida a cielo abierto. Un ejemplo muy claro de esta línea de pensamiento lo ofrece el capítulo que William K. Hartmann dedica a este tema en su obra monumental *Guía turística de Marte* (Hartmann, 2011). Otra interpretación clásica puede encontrarse en Luque *et al.* (2009). En un mundo en el que es conocida y manifiesta la imposibilidad termodinámica de que circule agua líquida, incluso las mentes más cualificadas se empecinan en interpretar como cursos de agua líquida rasgos que sin lugar a dudas se explican antes y mejor en términos de flujo de áridos. Sobre todo si se tiene en cuenta que en Marte lo que sobra es arena seca en distintos estados granulares y de compactación. Pero lo advirtieron Kuhn y Planck: tendrá que llegar una generación científica nueva para descubrir que en el secarral marciano, repleto de polvo, fluye el polvo, y no el agua que perseguimos en vano desde los tiempos de Lowell.

A los posibles sesgos implicados en qué buscamos se



Figura 1: Torrentes en Marte (2011). Mars Reconnaissance Orbiter. Fuente: NASA/JPL-Caltech/Universidad de Arizona.

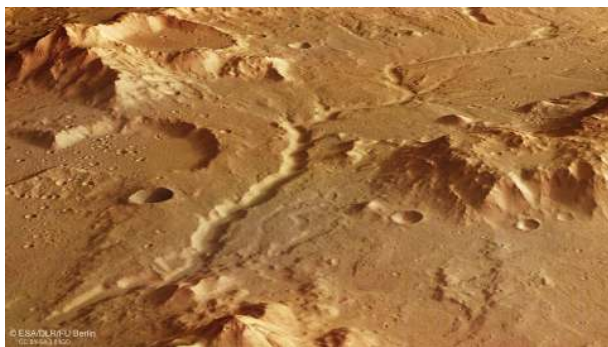


Figura 2: Río seco en la región Libya Montes, Marte. Mars Express (ESA). Fuente: ESA/DLR/FU Berlin (CC BY-SA 3.0 IGO)

superponen los usos sociales de la comunidad científica del cambio del siglo, en el sentido de perseguir el máximo impacto de sus resultados y captar la atención del público. Y es evidente que el público sigue siendo sensible a los argumentos relacionados con la posible vida en Marte, un tema muy fácil de vincular con el hallazgo de indicios de agua... cada verano terrestre. El mismo Hartmann (2001) antes mencionado se muestra muy crítico con esta tendencia, cuando afirma: “Aunque me gustó que creciera el interés del público por Marte, no pude evitar ciertos recelos serios ante la práctica cada vez más habitual de organizar jolgorios de prensa con los descubrimientos científicos”. En efecto, que se descubra agua en Marte durante cada verano boreal terrestre nos dice algo sobre lo que pasa en nuestro mundo, más que sobre lo que ocurre en el planeta rojo.

Tendrá que llegar una generación científica nueva para descubrir que en el secarral marciano fluye el polvo y no el agua

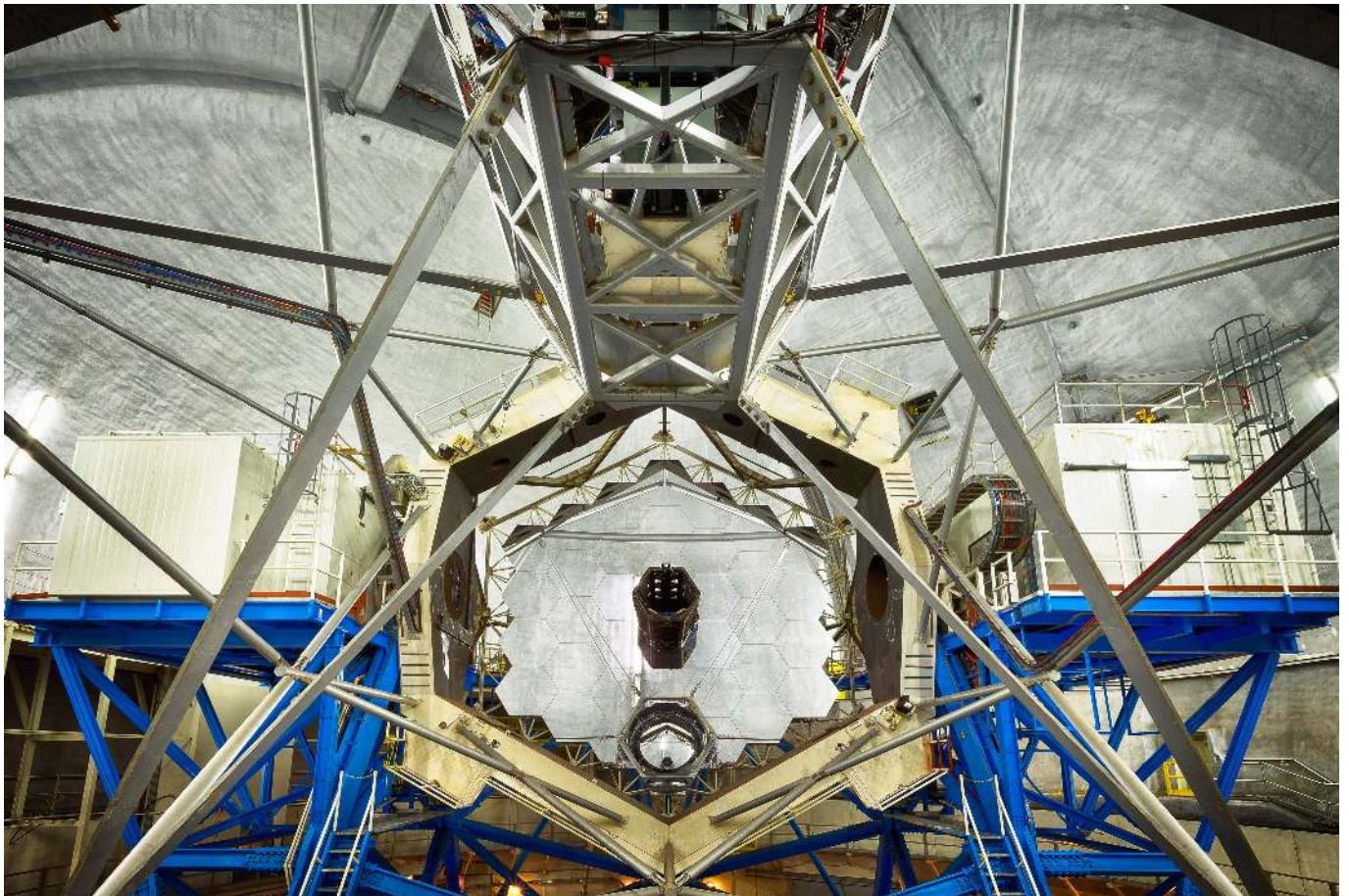
Más de veinte años, lo cual no es nada, deberán pasar para que la mirada febril de una nueva generación científica pase a contemplar Marte no como las sombras errantes de lo que fuimos a buscar allí a finales del siglo XX (agua y vida), sino como una realidad independiente de nuestros deseos e interesante en sí misma y por derecho propio. El fin del siglo XX asistió a la decadencia definitiva del paradigma marciano de los canales lowellianos. Mi previsión, tras al menos dos décadas de hallazgos veraniegos de agua en Marte, es que en breve surgirá una generación que, a la vista de las fotografías de los regueros marcianos se preguntará cómo fuimos sus predecesores capaces de no ver, como pronto se considerará más que obvio, que en los desiertos más secos del Sistema Solar solo pueden fluir torrentes de arena. Dejaremos de buscar y nombrar la quimera del agua en Marte, como caducó la quimera del oro en América. Pero vendrán como un soplo en la vida otras modas y obsesiones, en investigación científica y en comunicación social de la ciencia. Ω

Referencias

- Comas Solà J. (1975), *Astronomía*. Editorial Ramón Sopena.
- García E. y González M. (2017), *El astrónomo indignado*, “Agua líquida en Marte... otra vez”. IAA Comunicación. <https://www.youtube.com/watch?v=IvFjQ6zkzxs>
- Hartmann W.K. (2011), *Guía turística de Marte: los misteriosos paisajes del planeta rojo*. Trad. Dulcinea Otero-Piñero. Ediciones Akal.
- Kuhn Th. (2017), *La estructura de las revoluciones científicas*. Trad. Carlos Solís Santos. Fondo de Cultura Económica de España.
- Luque B. et al. (2009), *Astrobiología: un puente entre el Big Bang y la vida*. Ediciones Akal.
- Schorn R.A. (1971), *The Spectroscopic Search for Water on Mars: a History*, en *Planetary Atmospheres*, Proceedings from 40th IAU Symposium held in Marfa, Texas, Oct. 26-31, 1969. Edited by Carl Sagan, Tobias C. Owen, and Harlan J. Smith. International Astronomical Union. Symposium no. 40, Dordrecht, Reidel, p.223.

David Galadí
dgaladi@caha.es

Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto



En busca de los límites

Víctor Manchado | Pirulo Cósmico, Naukas, Radio Skylab

Los telescopios terrestres de nueva generación multiplican su tamaño y potencia.

El venerable telescopio Hale en el Monte Palomar tardó 20 años en construirse. El proyecto echó a andar hace 90 años, en 1928, cuando la Fundación Rockefeller invirtió 6 millones de dólares en el desarrollo de un telescopio refractor de 5 metros de diámetro. El Hale vio su primera luz después de la II Guerra Mundial, en enero de 1949, cuando el Observatorio Palomar estaba bajo la dirección de Edwin Hubble. Los cinco metros de diámetro lo convirtieron en el telescopio más grande del mundo y su reinado duró más de tres décadas. No fue hasta 1976 que los soviéticos desbancaron al Hale con su BTA-6, un telescopio de 6 metros de diámetro.

El objetivo de construir telescopios más grandes no sólo se debe a una especie de *carrera espacial*. Por supuesto, hay una cuestión de competitividad entre países e instituciones, pero lo que se busca es captar la mayor cantidad de luz posible. Ojos gigantes para ver objetos cada vez más débiles y lejanos. O bien, para ver objetos cada vez más pequeños.

Entonces, ¿por qué el reinado del telescopio Hale duró 30 años? La construcción de grandes telescopios tiene una

gran barrera. Los espejos monolíticos (es decir, de una única pieza) tienen un límite de tamaño de poco más de 8 metros. A partir de ese diámetro el peso del espejo es demasiado grande como para poder moverlo sin que se produzcan deformaciones no deseadas y por lo tanto, estropear la calidad de las imágenes.

Sin embargo, durante los años 90 los ingenieros probaron y encontraron soluciones ingeniosas para superar esos límites. Por un lado, se fabricaron espejos de nuevos materiales, más ligeros y resistentes. Y por otro, se las ingeniaron para hacer trabajar muchos espejos pequeños como uno solo.

Telescopios del pasado

Cuando Astronomía Digital comenzó su andadura, éstos eran los grandes telescopios del momento.

Telescopios Keck (Mauna Kea, Hawaii). 10 m.

Los primeros telescopios (gemelos) hechos con espejos segmentados. Para estos telescopios se utilizaron 36 espejos hexagonales que conjuntamente forman un espejo principal de aproximadamente 10 metros de diámetro.

Keck I entró en servicio en 1993, mientras que su gemelo Keck II lo hizo en 1996. En su día fueron los mayores telescopios en servicio del mundo. Lideraron el *ranking* de telescopios gigantes hasta 2009, fecha de entrada en servicio del GTC en La Palma. Desde su puesta en servicio y hasta hoy, se les ha ido añadiendo nueva instrumentación para mantenerlos actualizados y de ese modo, seguir estando en vanguardia de la observación del espacio desde tierra.

No pocos descubrimientos se han hecho gracias a estos magníficos telescopios, cabría destacar: descubrimiento de agua en discos protoplanetarios, detección de metano en Marte, primera detección de un tránsito de un planeta extrasolar o triplicar el tamaño estimado de la galaxia de Andrómeda.

Telescopio Hobby-Eberly (Texas, USA). 9.2 m.

Al igual que los Keck, su espejo principal está segmentado, pero en este caso está dividido en 91 espejos hexagonales. Entró en servicio en 1997.

Uno de los aspectos más curiosos de este telescopio es que la inclinación de su base está fija a 55° de inclinación, y tan sólo se mueve el eje de azimuth (aún así puede ver hasta el 81 % de la bóveda celeste). Gracias a eso, los



Figura 1: Keck I y Keck II, al atardecer. Fuente: Keck

costes de construcción han sido ridículamente bajos comparados con otros telescopios de dimensiones similares.

Su principal función es la espectroscopía, para ello monta 3 espectrógrafos de resolución alta, media y baja. No



Figura 2: Vista nocturna de los Keck, usando láseres para proyectar una estrella virtual en el cielo y de ese modo, corregir los efectos de las turbulencias atmosféricas mediante óptica adaptativa. Fuente: Keck.



Figura 3: Vista exterior del Hobby-Eberly Telescope. Fuente: HET.

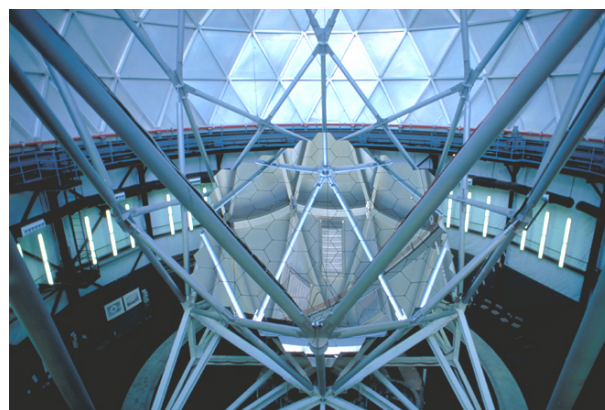


Figura 4: Aspecto del espejo principal, con sus 91 espejos segmentados. Fuente: HET.



Figura 5: Bóveda de Antu, o VLT1. Fuente: ESO

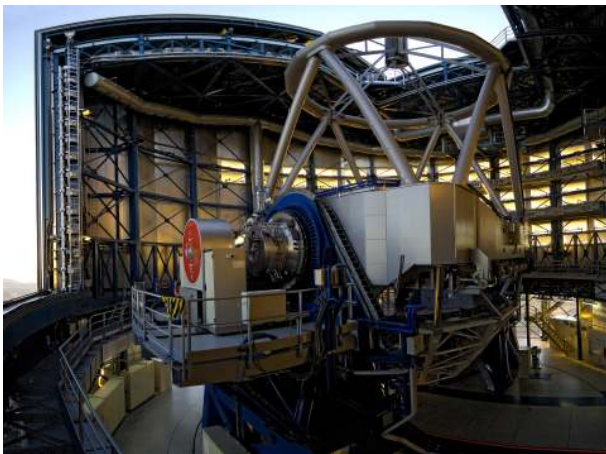


Figura 6: La estructura de Antu con la bóveda abierta. Fuente: ESO

obstante, también se usa para una amplia variedad de estudios, en el Sistema Solar y para la detección de exoplanetas. También se ha usado para medir la velocidad de rotación de galaxias e identificación de supernovas del tipo Ia para medir la aceleración del Universo.

VLT (Cerro Paranal, Chile). 8.2 m.

El primero de los cuatro telescopios que forman el *Very Large Array* (Antu, que significa Sol en lengua mapuche) vió su primera luz en 1998 y entró en servicio en abril de 1999. Están ubicados en el desierto de Atacama, una de las mejores localizaciones del mundo para observar el cielo (junto con Hawaii y Canarias).

El VLT es un observatorio formado por 4 telescopios de 8.2 metros y 4 telescopios auxiliares de 1.8 m. Ha sido diseñado para obtener una resolución equivalente a un telescopio de 130 metros de diámetro, cuando opera



Figura 7: Vista nocturna del SALT, con la Luna al fondo. Fuente: SALT.

en modo de interferometría. También operan individualmente.

Han sido diseñados para operar entre las bandas de ultravioleta lejano (300 nm) y el infrarrojo ($20\ \mu\text{m}$), pasando por la luz visible.

El impacto del VLT en la producción científica del Observatorio Europeo Austral es descomunal, ya que se trata del observatorio terrestre más productivo del mundo (más de 1 artículo publicado al día en revistas científicas de alto nivel). Entre sus muchos logros, caben destacar: la primera imagen directa de un planeta extrasolar, seguimiento de estrellas individuales alrededor del agujero negro de la Vía Láctea, la observación de la explosión de rayos gamma más lejana hasta la fecha y el descubrimiento de un planeta en la zona de habitabilidad de Proxima Centauri.

Telescopios del presente

Dos décadas hacia adelante, el salto tecnológico ha sido importante. La tecnología de espejos segmentados se ha asentado y han ido apareciendo telescopios que están rompiendo las marcas pasadas. Sin embargo, probablemente la mayor revolución actual esté al otro lado del telescopio: en la instrumentación y la gestión de grandes volúmenes de datos. Los nuevos detectores están dando vida nueva a telescopios antiguos. La mejora de la eficiencia cuántica de las cámaras digitales equivale en muchos campos a la construcción de telescopios mucho más grandes. Equipados con grandes cámaras y espectrógrafos multi-objeto, cada noche de observación genera terabytes de datos que han de ser procesados y analizados, necesariamente, en masa.

SALT (Southern African Large Telescope, Sudáfrica). 11 m de diámetro.

Con un diseño muy parecido al HET de Texas, el SALT monta 91 espejos de 1 m para formar un espejo principal de 11 m de diámetro. También su inclinación es fija (unos



Figura 8: El Gran Telescopio de Canarias (GTC). Fuente: Víctor Manchado

53°) con lo que tiene a su alcance el 70 % de la bóveda celeste.

SALT está situado a 400 km de Ciudad del Cabo, en Sudáfrica. Está gestionado por un consorcio internacional formado por Sudáfrica, EEUU, Alemania, Polonia, India, Reino Unido y Nueva Zelanda. Entró en servicio en 2011.

GTC (Grantecan, La Palma, España). 10 m.

Sin duda alguna es la joya de la corona del Instituto de Astrofísica de Canarias. Ubicado a más de 2400 metros sobre el nivel del mar en la isla de La Palma, ofrece una ventana al universo (en infrarrojo y visible) a astrónomos de todo el mundo.

Similar en diseño a los Keck, está formado por 36 espejos hexagonales de Zerodur, un material con muy bajo coeficiente de dilatación, lo que minimiza posibles alteraciones de las imágenes. La superficie útil colectora de luz es de unos 73 m². Cada uno de estos espejos pesa unos 470 kg y tiene 8 cm de grosor. El pulido de los espejos fue extraordinariamente exigente, el límite de error es de tan sólo 15 nanómetros (millonésimas de milímetro).

El espejo secundario tiene unos 2 m de diámetro y su estructura es de berilio, un material muy ligero y resistente (aunque extraordinariamente complicado de trabajar). La estructura del telescopio pesa unas 400 toneladas, sin embargo, su deformación máxima está por debajo de las 300 micras.

Estos son algunos de los instrumentos instalados en el GTC:

- OSIRIS: cámara y espectrógrafo, con capacidad de fotometría (el más veterano, operativo desde 2009).
- Canaricam: Cámara, espectrógrafo y polarímetro.
- EMIR: Espectrógrafo multiobjeto para trabajar en el infrarrojo.
- MEGARA: Multiespectrógrafo de alta resolución en la banda visible.



Figura 9: Estructura del telescopio. Fuente: H. Raab.

- Hipercam: Cámara de alta velocidad multibanda, comparte foco con la Canaricam.

Se ubican en las plataformas Nasmyth. El espejo terciario se encarga de dirigir el haz de luz a cada uno de los instrumentos según las necesidades de los investigadores. Actualmente se están desarrollando nuevos instrumentos que irán entrando en servicio para potenciar las capacidades de este enorme telescopio, como HORuS, GT-CAO+FRIDA o MIRADAS.

Los objetivos científicos son ambiciosos, como no podía ser de otra manera. Se busca dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- La naturaleza de los agujeros negros.
- La historia de la formación de estrellas y galaxias cuando el Universo era joven.
- La física de planetas lejanos alrededor de otras estrellas.
- Detección de exoplanetas.
- La naturaleza de la materia oscura y la energía oscura en el universo.
- Estudio del medio interestelar.
- Estudio de las galaxias y su evolución.

LBT (Large Binocular Telescope). Arizona. 2 x 8.4 m.

Con sus 2 espejos gemelos de 8.4 m de diámetro, nos encontramos sin duda frente a uno de los mejores telescopios del mundo, con una superficie recolectora que supera los 110 m². Su primera luz fue en 2005 y entró finalmente en servicio en 2008, con ambos espejos montados.

También este gigante está equipado con instrumentos científicos de primer nivel. Éstos son los que tiene operativos actualmente y los que tiene previsto montar en un futuro cercano:

- LBC: Cámaras de infrarrojo hasta ultravioleta.

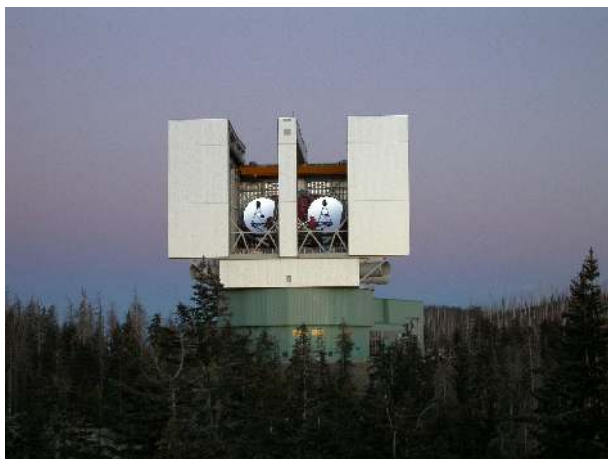


Figura 10: El imponente aspecto del LBT. Fuente: NASA

- PEPSI: Espectrógrafo para los campos magnéticos estelares.
- MODS: Dos espectrógrafos ópticos.
- LUCI: Dos espectrógrafos multiobjeto infrarrojo. LUCI1 y LUCI2. El nombre del instrumento fue cambiado oficialmente de LUCIFER a LUCI en 2012.
- AGW: Seguimiento y para ciertas correcciones de la distorsión atmosférica.
- LINC-Nirvana: Cámara de gran campo.
- LBT: Interferómetro.
- FLAO: Óptica adaptativa para corregir la distorsión atmosférica.

Telescopios del futuro

Actualmente están en fase de diseño o construcción algunos telescopios tan grandes que los que hemos visto hasta ahora palidecen en comparación.

Telescopio Gigante Magallanes (Chile). 7 x 8.4 m

El GMT contará con 7 espejos de 8.4 metros de diámetro cada uno. Este diámetro es el máximo que se puede alcanzar con un único espejo, ya que si fuera mayor se deformaría y se rompería al moverse; cada espejo tendrá un peso de entre 15 y 16.5 toneladas. La distribución que tendrán estos 7 espejos equivalen a un telescopio con un diámetro de 24.5 metros, con una superficie colectora de unos 368 m², que no es poca cosa. La estructura del telescopio pesará unas 1100 toneladas y la cúpula alcanzará los 68 m de altura.

A pesar de estar construyéndose en Chile, este telescopio no pertenece al Observatorio Austral Europeo sino a un consorcio internacional formado por diversas universidades y centros de investigación de EEUU, Australia, Corea del Sur y Brasil.



Figura 11: Representación artística del E-ELT. Fuente: ESO/L. Calçada.

TMT: Telescopio de Treinta Metros. 30 m

El conjunto de la estructura que sostendrá y moverá al telescopio junto con los espejos e instrumentación superará las 1400 toneladas de peso. Es una cifra imponente y necesaria para manejar un espejo de estas dimensiones y peso. Esta enorme estructura se elevará hasta los 50 m de altura y también albergará los instrumentos científicos en 2 plataformas. Estas plataformas, llamadas Nasmyth, se encuentran situadas a ambos lados del espejo terciario a unos 16 m de altura y tienen capacidad para soportar hasta 50 toneladas.

Nada menos que 492 espejos harán falta para constituir el espejo primario de este gigantesco ojo, con lo que su superficie alcanzará los 655 m² (¡casi nada!). El peso total del espejo principal será de más de 120 toneladas. En 2013 comenzó la fabricación de estos espejos en Japón y se espera que en 72 meses estén terminados.

E-ELT: Telescopio Europeo Extremadamente Grande (Chile). 39 m

Los números de esta magnífica obra de ingeniería son apabullantes. Para construir el espejo primario de 39 metros de diámetro harán falta 798 espejos hexagonales de 1.4 metros de diámetro. Con ellos se conseguirá una superficie colectora de ¡980 m²! Captará 13 veces más luz que el mayor telescopio actualmente en servicio, el GTC, y le dará al E-ELT una capacidad de resolución que nos permitirán descubrir muchos de los secretos que el universo nos tiene guardados hasta ahora.

Para albergar este telescopio la cúpula también es enorme ya que alcanzará una altura de 80 metros. Su construcción ya ha comenzado en el desierto de Atacama.

Más allá

La tecnología de espejos segmentados ha abierto una nueva era cuyos límites aún están por explorar. El Observatorio Austral Europeo (ESO) se vio obligado a rebajar

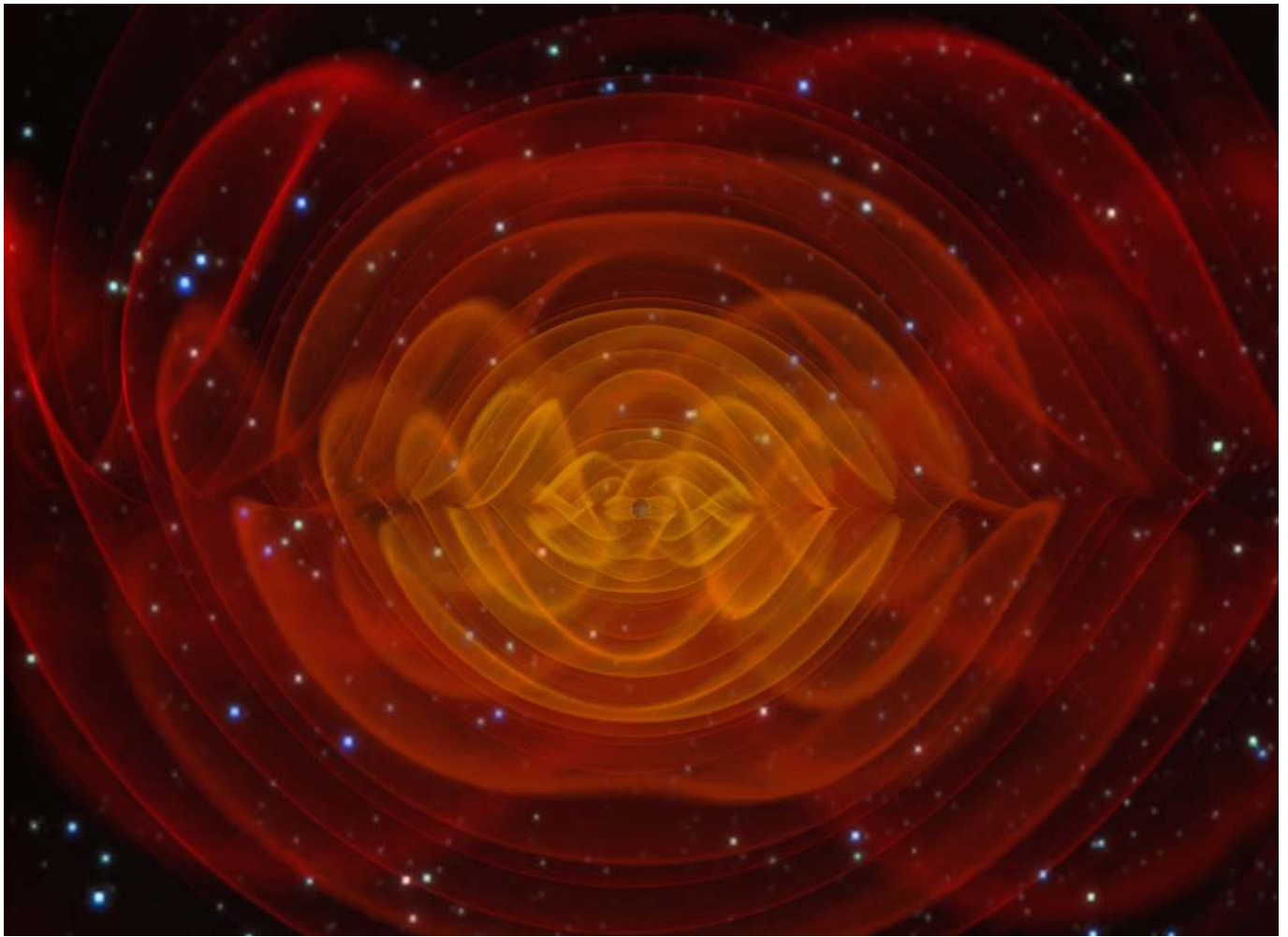
los objetivos y dejar en la mesa de diseño el *Overwhelmingly Large Telescope*, un telescopio de 100 metros que, piensan, sería viable tecnológicamente. No así la inversión necesaria.

No cabe duda que nos esperan tiempos muy interesantes en lo que a la exploración del Universo se refiere (basada en observatorios terrestres). Con estos nuevos telescopios, con prestaciones muy superiores a los actuales, podremos descubrir enigmas que aún hoy no somos capaces de imaginar. Ω

Referencias

- E-ELT. Pirulo Cósmico.
- TMT: Telescopio de Treinta Metros. Pirulo Cósmico.
- Telescopio Gigante Magallanes. Pirulo Cósmico.

Víctor Manchado
vmanchado@gmail.com
Pirulo Cósmico, Naukas, Radio Skylab



Nuevos sentidos para la astronomía

Luis Salas López | Astronomía Digital

La astronomía de neutrinos es un *sentido* diferente al de la luz, con el que podemos captar procesos inaccesibles a los telescopios convencionales

¿Qué sentirá alguien que siempre ha sido ciego al poder ver por primera vez? ¿Cómo percibirá la experiencia de poder observar una puesta de Sol, un bosque o el fluir de un río? ¿Cómo será su entendimiento del mundo al poder divisar la existencia de objetos silenciosos más allá de la yema de sus dedos?

Los cinco sentidos humanos

Gracias a nuestros sentidos podemos percibir nuestro entorno y sus características. La vista es el sentido que nos permite captar la perturbación electromagnética que emiten los objetos, ya sea porque la emiten ellos mismos por estar muy calientes o bien porque esos objetos reflejan la perturbación electromagnética creada en otras fuentes. Los ojos son el instrumento para captar la intensidad y dirección de procedencia de esa perturbación

y luego, nuestro portentoso cerebro, con sólo esa información es capaz de reconstruir y modelar la existencia, distancia, forma, dimensiones y hasta la textura de esos objetos, y por tanto, saber cuántos y como nos envuelven. Ver colores o tener visión estereoscópica sólo son añadidos marginales. La evolución, ante la escasez de luz, sacrifica los colores: de noche todos los gatos son pardos. Y solo los depredadores tienen los ojos en la parte frontal de la cara. Durante decenas de años, las fotografías, la televisión y el cine fueron sólo diferencias de grises en 2D y aun así, sin colores ni profundidad, permitían recrear de forma creíble y satisfactoria todo tipo de objetos y paisajes. En cuanto a distancia operativa, la vista es, sin duda, el sentido que aporta el *radar* de más largo alcance: podemos conocer la existencia de árboles, montañas o valles tan lejanos que es imposible que los detectemos con otros sentidos.

El oído capta las sutiles variaciones de presión del aire.

Nuestro cerebro, procesando esa información o por comparación con experiencias anteriores, puede identificar el origen, dirección y distancia aproximada de esa fuente de sonido. Sin duda es un sentido muy útil, pero su distancia de utilidad práctica es de unas decenas de metros. Sólo nos sirve para percibir objetos cercanos y es inútil frente a amenazas silenciosas.

¿No sería prodigioso que nuestros sentidos fueran más capaces?

El olfato nos informa de la existencia y naturaleza de moléculas extrañas en el aire. Por comparación, el cerebro puede deducir qué objeto desprende ese olor. Aunque bastante atrofiado en los humanos, está muy desarrollado en otros mamíferos, hasta el punto de que pueden hacer un mapa mental de olores de un territorio como para orientarse o desplazarse, sin otra ayuda, por lugares ya conocidos. La distancia operativa es de unos metros, aunque a veces, para olores muy débiles, debe reducirse sólo a centímetros.

El gusto o el tacto sólo nos sirven para adquirir alguna información extra de objetos con los que entramos en contacto. Es la última barrera de defensa, en la que ya ponemos en peligro nuestro propio cuerpo: acidez, venenos, calor o frío extremos. La distancia de percepción es cero.

Aunque tenemos algunos sentidos más (equilibrio, propiocepción, dolor interno, sed, etc.), sólo sirven para informarnos de condiciones sobre nuestro propio cuerpo. No nos dan información del exterior. Podríamos aceptar que trabajan en distancias negativas.

Otras posibilidades

¿No sería prodigioso que nuestros sentidos fueran más capaces? Sabemos y tenemos muy asumido que nuestra

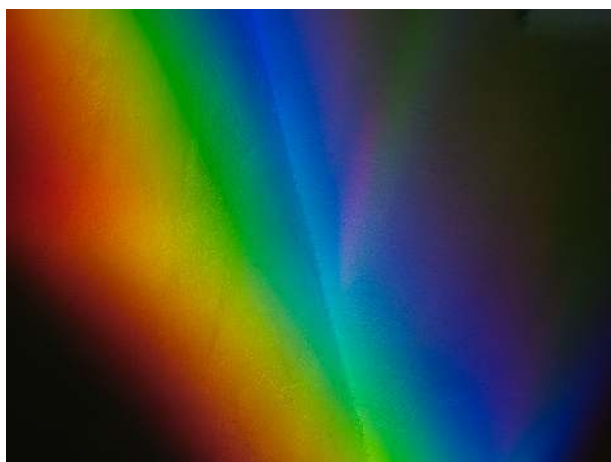


Figura 1: La luz descompuesta en colores mediante prisma. *Dwan Light Sanctuary* (Nuevo México, EEUU). Fuente: secondhalftravels.com.

visión sólo capta una parte muy pequeña de todos esos modos de perturbación electromagnética. Con nuestros ojos no podemos captar la luz ultravioleta, aunque nuestra piel sí, y reacciona segregando melanina. Nuestros ojos tampoco pueden percibir la luz infrarroja, aunque nuestra piel también la puede percibir, pero en forma de calor. Sería estupendo tener algún órgano que pudiera percibir las perturbaciones electromagnéticas en la zona de radio o televisión. Mejor todavía si fuera en la zona de microondas y podríamos recibir una conversación sin necesitar un teléfono móvil. También, y por supuesto, a todos nos gustaría poder tener visión de rayos X como Superman.

Nuestro oído también está limitado. Todas las vibraciones del aire que sean más lentas de 20 variaciones por segundo, las notamos como una sucesión de chasquidos aislados o separados. Y todas las que sean más rápidas de 20 000 variaciones por segundo, simplemente, no las captamos. Como los ultrasonidos son más direccionales, si pudiéramos oírlos podríamos percibir con mayor precisión la posición de la fuente.

Las palomas y otros animales sí perciben el campo magnético

Pero todavía mejor: ¿no sería envidiable tener otros sentidos con los que captar propiedades nuevas de nuestro entorno? Por ejemplo, sería maravilloso tener algún órgano que detectara el campo magnético. Si en una mano nos ponen un potente imán de neodimio y en la otra mano nos ponen un trozo de metal con la misma forma, peso y aspecto, es lamentable que nuestras manos no puedan acertar al identificar en cual está el imán. Si acercamos el imán y el metal a nuestra nariz, oído, codo o rodilla no notaremos ninguna diferencia entre ellos. Si pudiéramos percibir el campo magnético, podríamos estar en un sótano, cerrado y oscuro y percibir de alguna forma el campo magnético terrestre y saber dónde está el norte. Las palomas y otros animales si pueden hacerlo. Me pregunto cómo sería esa sensación de percibir las líneas de campo magnético de la Tierra. Puede ser algo así como sentir una tenue brisa en una cueva oscura. Podríamos sentir la dirección en la que *sopla* el campo magnético, e incluso si sopla más fuerte o más débil. Estuviéramos donde estuviéramos, buceando, volando en un avión, o en la mina más profunda, siempre sabríamos dónde está el norte porque percibiríamos una suave brisa magnética procedente de él.

También podemos imaginar tener el sentido de apreciar la radioactividad. Podríamos advertir como emana del suelo, o percibir la posición del Sol tras una cortina oscura. Al acercarnos al granito, el carbón o a un plátano apreciaríamos un cosquilleo que no notaríamos con el yeso, calcita, mármol o una manzana. Acercarnos al reloj de agujas fosforescentes de la mesita de noche podría producir una sensación agradable, mientras que acercarse a un kilogramo de plutonio sería desagradable, incluso doloroso si lo tocáramos.



Figura 2: Nubes sobre Stonehenge. Fuente: rhavener (Flickr).

Atmósfera opaca

Me pregunto cómo sería nuestra vida, nuestra ciencia y nuestra concepción de la Tierra y nuestro papel en el universo si la atmósfera fuera más densa y borrosa. Imagina que desde los albores de los tiempos, la humanidad siempre hubiera visto un cielo turbio o con neblina. Más o menos tan opaco como esos días algo grises cubiertos de nubes, en los que, percibiendo claramente que es de día, no pudiéramos localizar la posición del Sol. Una atmósfera así de densa también estabilizaría la temperatura de la superficie. Si siempre hubiera sido así, sólo podríamos conocer el ciclo día-noche. No tendríamos consciencia del ciclo temporal del año, pues no distinguiríamos que en verano el Sol sale por el este un poco más al norte de lo que sale en invierno. Incluso, si el cielo fuera lo bastante denso y brumoso, en la noche llegaría algo de luz del hemisferio iluminado por el Sol. No sabríamos que nuestro planeta tiene una luna, ya que no apreciaríamos la noche más iluminada porque hubiera Luna llena, por lo que tampoco existiría ningún ciclo mensual. ¿Cómo mediríamos el tiempo? ¿Tendríamos calendarios?

Nunca habríamos visto las estrellas. Ni los planetas. Ni el fulgurante brillo de Venus como lucero del alba o del ocaso. Ni los eclipses. No sabríamos nada de lo que hay fuera. Es posible que ni siquiera nos lo preguntáramos.

Daríamos por hecho que más arriba de la atmósfera, sencillamente, habría... más atmósfera. ¿Por qué razón iba a haber otra cosa?

Sin Sol ni estrellas, la orientación y el viajar sólo serían posibles utilizando referencias geográficas. El concepto de *norte* no tendría sentido. Incluso aunque se descubriera la brújula puede que sólo fuera un juguete para niños y que no se utilizase para la orientación, pues no existirían los conceptos de norte o puntos cardinales con los que relacionar la pertinaz insistencia de la aguja de señalar siempre la misma dirección. Sencillamente, sería más práctico seguir orientándose por referencias geográficas, como siempre se había hecho. Por el mar y los océanos, sólo sería posible la navegación costera. Por tanto, el descubrimiento de que la Tierra es redonda sufriría siglos de retraso.

El movimiento del Sol, los ciclos lunares, las estaciones cambiantes a lo largo del año no solo nos han estimulado para la confección de calendarios. También han sido poderosos incentivos para el desarrollo de los números. Matemáticas y astronomía han evolucionado juntas en muchas culturas: india, egipcia, maya, mesopotámica, azteca, etc.

El cielo estrellado ha sido el germen de conversaciones y especulaciones sobre su origen y naturaleza desde que nuestros antepasados cavernícolas se reunían ante las fogatas nocturnas, también de filósofos y poetas. Cuánta glucosa se habrá consumido en los cerebros pasados para tratar de entender el porqué, de entre los miles de estrellas que pueblan la noche, sólo cinco de ellas, además notablemente brillantes, se mueven entre las demás. Y, si se mueven ¿por qué no se caen? Sin duda tenían que ser dioses. ¿Tendríamos religiones con una atmósfera opaca? Si las hubiera, claramente sus dioses serían más mundanos que los actuales.

Si la atmósfera terrestre fuera opaca, ¿cómo mediríamos el tiempo? ¿Tendríamos calendarios?

¿Y qué decir de la ciencia? El logro de predecir las estaciones y los eclipses lo han conseguido muchas culturas antiguas de forma independiente. Es una ciencia muy incipiente. Pero sólo en el Renacimiento europeo se resolvió el mayor misterio de los cielos: predecir el movimiento de esas cinco estrellas errantes, y sobre todo, su ocasional y caprichoso movimiento retrógrado. Eso era ciencia con mayúsculas.

Con una atmósfera borrosa, tupida, no habría Luna, ni estrellas errantes que se muevan. Galileo nunca habría visto que cuatro lunas giraban alrededor de Júpiter. Kepler no hubiera desarrollado sus leyes que predicen el movimiento de esas estrellas errantes. Todo el movimiento que percibiríamos sería en nuestro entorno terrestre. Sólo habría una fuerza de gravedad. Todos los objetos que observáramos serían manzanas que se caían. Nunca nos podríamos preguntar por qué la Luna no se cae y no tendríamos la ley de la gravitación universal. Newton sería

menos Newton. Sin Galileo, Kepler y Newton ¿Habríamos desarrollado el método científico?

La luz, el primer *sentido* astronómico

Podemos despertarnos de la pesadilla. Por suerte, somos los afortunados habitantes de un planeta con una atmósfera transparente. A simple vista podemos ver que ahí afuera, más allá, en la negrura de la noche, hay luces. La tarea de conocer y entender ese mundo exterior, inalcanzable, comenzado hace miles de generaciones lo abordamos con una disciplina llamada astronomía. ¿Qué *sentidos* tiene la astronomía para investigar ese infinito espacio exterior?

Sin duda, con la luz visible y a simple vista empezó la astronomía en tiempos inmemoriales. Todas las culturas le ponen nombre al Sol a la Luna. Hace miles de años, nuestra cultura ya nombraba estrellas, planetas, constelaciones y la Vía Láctea. Con el tiempo conocía, registraba y estudiaba los eclipses, lluvias de estrellas, cometas y supernovas. Y más recientemente, postuló el heliocentrismo, las órbitas elípticas y la gravitación. Todo ello se logró a ojo desnudo.

En 1610, con Galileo comenzó la observación astronómica a través de telescopios. Su avance inicial fue lento debido a múltiples dificultades: pulir las lentes, aberraciones cromáticas, aberraciones esféricas, etc. La innovación rupturista llegó con el reflector de Newton en 1668 que evitaba muchos de los problemas que surgen al utilizar lentes. Desde entonces, la evolución de los telescopios y su tamaño han ido a la par con los descubrimientos astronómicos: nuevos planetas, satélites, asteroides, cometas, estrellas variables, novae y supernovas, nebulosas, galaxias, ley de Hubble, etc.

William Herschel descubrió que el termómetro se calentaba más allá del color rojo

La astronomía infrarroja comenzó muy burdamente con Herschel, cuando en 1800 puso termómetros en cada color del arco iris que se forma al descomponer la luz blanca con un prisma. Más allá del color rojo había luz no visible que tenía más calor que los otros colores. Además comprobó que esta luz no visible era reflejada, transmitida, refractada y absorbida igual que la luz visible. Aunque nuestra atmósfera absorbe la luz en casi todo el espectro infrarrojo, hay algunas ventanas con las que se puede hacer astronomía infrarroja desde Tierra, sobre todo desde lugares altos y secos, amén de los observatorios espaciales en órbita. Así podemos observar objetos más fríos que las estrellas como nuestro centro galáctico o regiones de formación estelar y ver objetos ocultos a través de nubes de polvo cósmico que no dejan pasar la luz visible. Como el universo está en expansión, los objetos distantes se alejan mucho más rápido y parecen más rojos que la luz que en realidad emitieron. Así que gran parte de la cosmología tiene que hacerse en infrarrojo.



Figura 3: Radioantenas de *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*. Fuente: ESO.

La radioastronomía comenzó en 1930 con los ingenieros de Bell Telephone y su desarrollo posterior fue rápido y espectacular. Los instrumentos, los radiotelescopios, son enormes antenas parabólicas que se instalan en Tierra, pues la atmósfera es bastante transparente en amplias bandas a las ondas de radio. Gracias a la radioastronomía hemos descubierto y podido estudiar nuevos objetos como púlsares, quasares y galaxias activas. Es la única zona del espectro electromagnético con la que se puede hacer interferometría fiable, rutinaria y a gran escala. Por tanto, es el único medio que tenemos para conseguir *imágenes* con alta resolución de los objetos astronómicos extrasolares.

La astronomía ultravioleta está muy limitada por nuestra atmósfera. Sólo el ultravioleta cercano puede atravesar la capa de ozono. Por lo que su comienzo práctico comenzó en los años 1960 con los satélites espaciales. Con ella se puede estudiar nuestro Sol y objetos o regiones muy calientes del universo.

La astronomía de rayos X y gamma está totalmente impedida por nuestra atmósfera. Así pues, sus inicios se produjeron con los primeros satélites espaciales en los años 1960. Con rayos X y gamma se pueden estudiar los objetos y fenómenos más violentos del universo: hipernovas, estrellas de neutrones, agujeros negros, etc.

De esta manera hemos desarrollado tecnología para aprovechar todos los modos o frecuencias de la luz, y así poder estudiar el universo. Cada zona del espectro electromagnético aporta información diferente del mismo objeto. Pero el *sentido* que explora ese inmenso universo ha sido siempre el mismo: la luz. Sólo hemos desarrollado otros *ojos no biológicos* para ver el cosmos en más colores pero con el mismo *sentido*: el espectro electromagnético.

¿No sería asombroso que pudiéramos *sentir* el cosmos de otras maneras, con otros *sentidos* nuevos y sorprendentes?

Astronomía de neutrinos

Como ya sabemos, la materia está formada básicamente por neutrones, protones y electrones. El electrón es el

más pequeño de los tres ya que la masa del electrón es unas 2000 veces menor que la del protón o la del neutrón. Si el electrón es pequeño, los neutrinos lo son mucho más. Hay tres tipos de neutrinos: electrónico, muónico y tauónico. La existencia del neutrino electrónico se propuso en 1930, aunque se confirmó cuando se descubrió en 1956. El neutrino muónico se teorizó a finales de los años 1940 y se descubrió en 1962. El tauónico se postuló a mediados de los años 1970 y se confirmó en el año 2000.

Los neutrinos son muy pequeños, no tienen carga eléctrica y atraviesan la materia ordinaria fácilmente

Los tres tipos de neutrinos comparten las mismas características: son muy pequeños. No tienen carga eléctrica, es decir, son neutros y por tanto no interactúan con campos eléctricos, ni magnéticos, ni otras partículas cargadas como protones o electrones, lo que les permite atravesar la materia ordinaria fácilmente. Se sabe que tienen masa pero, aunque son desconocidas, con experimentos se ha demostrado que cualquiera de los tres tipos de neutrinos tiene que tener una masa mucho menor de 1/10 000 de la masa del electrón. Debido a su poca masa se mueven siempre a una velocidad muy cercana a la de la luz. Al ser los neutrinos tan pequeños y además, ser neutros, apenas interactúan con la materia. Con un billón de kilómetros de plomo sólo podríamos parar un 5 % de los neutrinos.

La astronomía de neutrinos es otro *sentido* con el que podemos apreciar el universo. Podemos producir neutrinos artificialmente en las centrales nucleares y en los aceleradores de partículas y así experimentar con ellos. De forma natural, algunos neutrinos provienen de nuestro planeta, ya sea de fuentes geológicas (de los isótopos radiactivos que todavía existen) o atmosféricas (debido a la colisión de rayos cósmicos con núcleos de nuestra atmósfera). Pero el mayor flujo natural de neutrinos nos llega

de fuentes astronómicas: las estrellas, las explosiones de supernovas y, sobre todo, del interior de nuestro Sol.

Durante su vida, las estrellas están continuamente produciendo neutrinos electrónicos. Las reacciones nucleares que se producen en su interior comienzan uniendo dos núcleos de hidrógeno (un protón con otro protón) para formar un núcleo de Helio-2, un positrón y un neutrino electrónico. El isótopo de Helio-2 es inestable y prosigue con otras y muy diversas reacciones nucleares. Pero con esa primera reacción nuclear, llamada protón-protón, la que une dos protones para formar Helio-2 y desprende un neutrino electrónico, ya es responsable del 85 % de los neutrinos producidos. El otro 15 % de neutrinos electrónicos se produce en una reacción que transforma el Berilio-7 en Litio-7. Cualquiera de estas dos reacciones nucleares sólo crean los de tipo electrónico. Como ya vimos, los neutrinos apenas interactúan con la materia con lo que salen al exterior de la estrella en línea recta, sin desviaciones ni colisiones.

Básicamente, cada vez que se une un protón con otro protón en el interior de una estrella se crea un neutrino electrónico que abandona la estrella. Nuestro Sol quema 4 millones de toneladas de hidrógeno por segundo. Un solo gramo de hidrógeno tiene 600 mil trillones de átomos (número de Avogadro). Cada átomo de hidrógeno tiene un protón. Por tanto, nuestro Sol produce cada segundo varios sextillones de neutrinos electrónicos que se irradian instantáneamente a casi la velocidad de la luz en todas las direcciones. Viendo esa cantidad, no es de extrañar que cada vez que miramos al Sol, cada centímetro cuadrado de nuestra cara sea atravesado por 60 000 millones de neutrinos por segundo. Pero ocurre algo curioso, 20 000 millones son neutrinos electrónicos, otros 20 000 millones son neutrinos muónicos y los otros 20 000 millones son tauónicos.

Nuestro Sol produce varios sextillones de neutrinos electrónicos por segundo

¿Qué ha pasado? La física de partículas y la astronomía se retroalimentan en el campo de los neutrinos. Gracias a los neutrinos que proceden del Sol, se descubrió que cualquier tipo de neutrino se puede convertir espontáneamente en cualquiera de los otros dos tipos de neutrinos. Este proceso ha recibido el nombre de *oscilación de los neutrinos*. Así, aunque el Sol sólo produce neutrinos electrónicos, durante su viaje (tanto saliendo del Sol como en el vacío, hasta llegar a la Tierra) van oscilando de un tipo de neutrino a otro. Cuando llegan a nosotros, lo hacen con una probabilidad de un 33 % para cada tipo.

Las supernovas son la otra gran fuente de neutrinos. Si una estrella muy masiva llega al final de su vida es porque ya no le queda hidrógeno, por tanto, ya no produce neutrinos con la reacción protón-protón. Entonces, ¿cómo puede ser que emitan neutrinos? Porque hay otro mecanismo de tipo térmico para producir neutrinos, que sólo funciona con las altísimas temperaturas y densidades de las grandes estrellas moribundas. En estos casos la mayoría de la inmensa energía gravitatoria producida por el

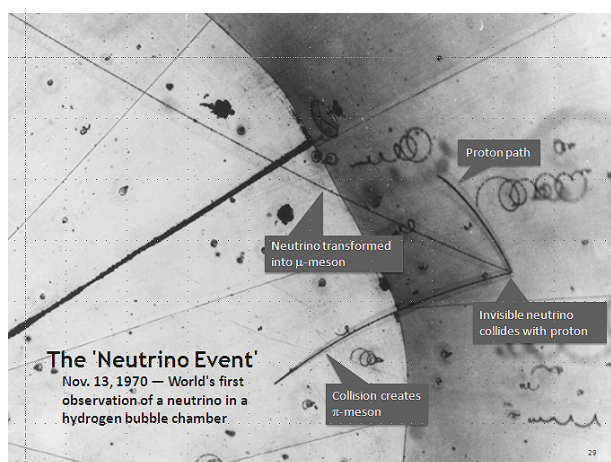


Figura 4: Primera detección del neutrino en una cámara de burbujas de hidrógeno. Fuente: *Argonne National Laboratory*.

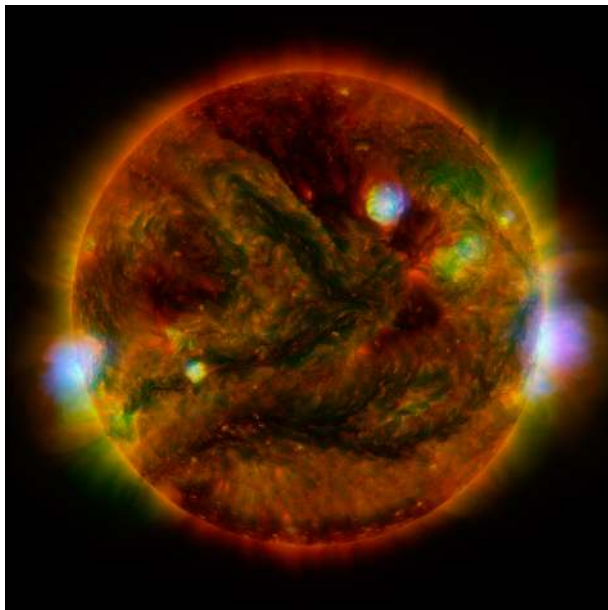


Figura 5: El Sol visto en rayos X de altas energías por el observatorio espacial *Solar Dynamics Observatory* (SDO). Fuente: NASA/JPL-Caltech/GSFC/JAXA.

colapso de la estrella se utiliza para crear neutrinos, esta vez de los tres tipos, que salen en enormes cantidades de la estrella más rápido que la explosión de la supernova. En el año 1987, se detectaron neutrinos de la supernova 1987A varias horas antes de que llegara la luz indicando la explosión de la estrella.

La astronomía de neutrinos es una forma enriquecedora de observar el universo. Es un *sentido* diferente al de la luz con el que podemos captar procesos inaccesibles a radiotelescopios o los telescopios convencionales ya estén ubicados en Tierra o en el espacio. Además de ayudarnos a entender las supernovas, con los neutrinos podemos tener acceso directo al núcleo solar. Los neutrinos que se producen en el interior más profundo del Sol salen (casi) a la velocidad de la luz y llegan a la Tierra sólo 8.5 minutos después de haber sido creados. En cambio, la radiación gamma o la energía que se produce en el interior del Sol se va absorbiendo, reemitiendo e interactuando una y otra vez con diferentes núcleos atómicos. Así se tarda miles de años en llegar a la superficie del Sol. Si estas reacciones nucleares se apagaran de golpe lo sabríamos minutos después por la falta de neutrinos solares. Sólo muchísimos años después trascendería a la superficie brillante del Sol.

En 1968 dio comienzo la astronomía de neutrinos con la detección de los primeros neutrinos solares. Desde entonces se crearon sensores que se instalaban siempre en el fondo de lagos o a mucha profundidad bajo tierra, para evitar los rayos cósmicos y las cascadas de partículas que producen. Los primeros detectores eran muy rudimentarios y se basaban en cambios químicos. Por ejemplo, el detector *Homestake* que funcionó desde 1970 a 1994 consistía en un depósito de 380 mil litros de tetracloroetileno a 1.5 km de profundidad, en una mina de Dakota

(EEUU). Si un neutrino con suficiente energía chocaba con un núcleo de cloro, se transmutaba a argón que era luego extraído y contabilizado. Otro ejemplo fue el detector SAGE, situado en Rusia a más de 2 km de profundidad, comenzó a funcionar en 1989 y tenía 50 toneladas de galio líquido. Cuando un neutrino interactuaba con un núcleo de galio, éste se convertía en un núcleo de germanio. Una vez al mes se separaba el germanio creado y se contabilizaba. Los detectores químicos no permiten conocer la dirección de procedencia de los neutrinos. Y sólo se puede saber que la energía de los neutrinos detectados supera un umbral mínimo.

Hace 20 años, en 1998, ¿cómo era el estado de la astronomía de neutrinos? Los siguientes diseños siguieron otra estrategia. Utilizan una gran masa de agua o de hielo lo más transparente posible y en su interior, o rodeándola, se instalan muchas *cámaras fotográficas*. Cuando uno de los trillones de neutrinos que atraviesan la masa de agua o hielo *choca* con un núcleo atómico produce una cascada de partículas que, como resultado de la colisión, viajan a una velocidad cercana a la de la luz. Pero cuando una partícula viaja a una velocidad cercana a la de la luz en el agua o en el hielo produce una luz azulada llamada radiación Cherenkov. Esa luz es captada por las cámaras, y una vez procesada la información, se puede averiguar la dirección y energía del neutrino.

Cuando uno de los trillones de neutrinos que atraviesan esa masa de agua o hielo *choca* con un núcleo atómico produce una luz azulada llamada radiación Cherenkov

El detector de neutrinos más conocido e importante fue el *Super-Kamiokande* en Japón. Comenzó a funcionar en 1996 y era una ampliación y mejora del *Kamiokande 1* y del *Kamiokande 2*. *Super-Kamiokande* es un enorme depósito de agua con forma de cilindro de unos 40 m de diámetro y otros 40 m de altura. Con ese tamaño alberga unas 50 000 toneladas de agua totalmente pura y transparente que hacen de masa detectora. Todas sus paredes están cubiertas de cámaras fotográficas (tubos fotomultiplicadores) para captar esos ocasionales y débiles destellos azules que se producen cuando un neutrino choca con algún núcleo atómico de las moléculas del agua. Para minimizar las posibilidades que le lleguen partículas resultantes de colisiones de rayos cósmicos, esa enorme caverna en forma de cilindro se excavó en el fondo de una mina a un kilómetro de profundidad. Gracias los 11 000 tubos fotomultiplicadores que ocupan todas sus paredes, puede determinar la dirección de los neutrinos con una precisión de unos 26°.

Otro detector de neutrinos muy novedoso fue AMANDA (*Antarctic Muon And Neutrino Detector Array*). Comenzó a funcionar en 1996 y estaba instalado en la base Amundsen-Scott situada en el mismísimo polo sur en la Antártida. Tenía dos innovaciones. En vez de usar agua como masa detectora usaba el hielo de la Antártida. Y en vez de poner las cámaras fotográficas en el perímetro

de la masa detectora, las colocaba en su interior. Con agua caliente perforaron en el hielo 19 pozos de 2 km de profundidad, repartidos en un círculo de unos 200 metros de diámetro. En cada pozo descolgaron un cable de unos 1900 m de largo, de forma que en los 400 metros más profundos el cable tenía repartidos y encadenados unas 30 esferas transparentes con una cámara fotográfica en su interior. Luego dejaron que el agua de los pozos se volviera a congelar. El funcionamiento es similar al *Super-Kamiokande*: cuando un neutrino choca con un núcleo atómico del hielo, produce el destello azul de la radiación Cherenkov. Gracias a que el hielo a esa profundidad no tiene burbujas de aire, es muy transparente y las cámaras pueden detectar esos destellos, aunque sea a través de muchos metros de hielo. AMANDA detectaba neutrinos atmosféricos, solares e incluso algunos extrasolares. Y podía determinar la dirección del neutrino con una precisión de unos 2°.

ANITA es en un globo de helio que vuela sobre la Antártida a 37 km de altura con 32 antenas de radio

¿Qué nuevos detectores se han construido en estos últimos 20 años? En 1999 comenzó a funcionar el SNO (Observatorio de Neutrinos de Sudbury) en Canadá. Ubicado a 2 km de profundidad, consiste en una esfera de acrílico de 12 metros de diámetro que alberga 1000 toneladas de agua pesada. Está rodeada por 9600 cámaras fotográficas (tubos fotomultiplicadores) para detectar esos destellos luminosos reveladores del impacto de un neutrino.

ANITA (*Antarctic Impulsive Transient Antenna*) es un detector muy original. Consiste en un globo de helio que vuela sobre la Antártida a 37 km de altura con 32 antenas de radio. Está diseñado para estudiar neutrinos muy energéticos: los neutrinos cósmicos de ultra-energía. Por tanto, no detecta los emitidos por el Sol. Cuando un neutrino de muy alta energía atraviesa el hielo antártico pro-



Figura 6: El laboratorio IceCube Lab en el polo sur con aurora. Fuente: NASA/JPL-Caltech/GSFC/JAXA.

duce unos pulsos de radio (efecto Askaryan, similar a la radiación Cherenkov) que son detectados por las antenas del globo. Cada lanzamiento dura aproximadamente un mes, tras el cual la góndola con las antenas se desprende del globo, cae en paracaídas y es recuperada para un nuevo vuelo. Ya se han producido 4 lanzamientos: ANITA-I en el verano 2006, ANITA-II en 2008, ANITA-III en 2014 y ANITA-IV en 2016.

ANITA es en un globo de helio que vuela sobre la Antártida a 37 km de altura con 32 antenas de radio

Y el detector más ambicioso es el *IceCube*. Es una continuación o ampliación de AMANDA siguiendo su misma filosofía. Se terminó de construir en 2010 y está formado por 5 000 esferas transparentes repartidas en el interior de 1 kilómetro cúbico de hielo a una profundidad entre 1450 m y 2450 m. El sistema utilizado es el mismo que con AMANDA: taladrar pozos en el hielo con agua caliente, descolgar cables con 60 esferas transparentes repartidas en último kilómetro más profundo y dejar que el agua de los pozos se congele de nuevo. Debido a su gran tamaño puede registrar neutrinos ultra energéticos. En 2013 ya había detectado 28 con una energía superior a los 30 Tera-electrón-voltios, de los cuales, dos de ellos superaban los 1000 Tera-electrón-voltios, que indicaba un origen exterior a nuestro Sistema Solar.

Rayos cósmicos

En el apartado anterior se ha desarrollado cómo es la astronomía de neutrinos. Otro *sentido* con el que hacemos astronomía desde hace muchos años es observando los rayos cósmicos. Su nombre es engañoso, pues no son ningún tipo de rayos. Sólo son partículas que viajan a una velocidad muy cercana a la de la luz. Su naturaleza es muy variada: protones, neutrones, núcleos de helio, etcétera. Su origen es toda una incógnita, pues de los rayos cósmicos formados por partículas cargadas no podemos determinar su origen, ya que los campos magnéticos de la galaxia desvía sus trayectorias. Lo más destacable de los rayos cósmicos es su increíble energía. En la Tierra no somos capaces ni de soñar con conseguir que esas partículas tengan esas energías tan elevadas. Aunque los rayos cósmicos se llevan estudiando desde hace muchos años, en estos últimos 20 años ha aparecido un nuevo instrumento para poder estudiarlos. Se trata de los telescopios de tipo Cherenkov, como los *MAGIC* instalados en La Palma.

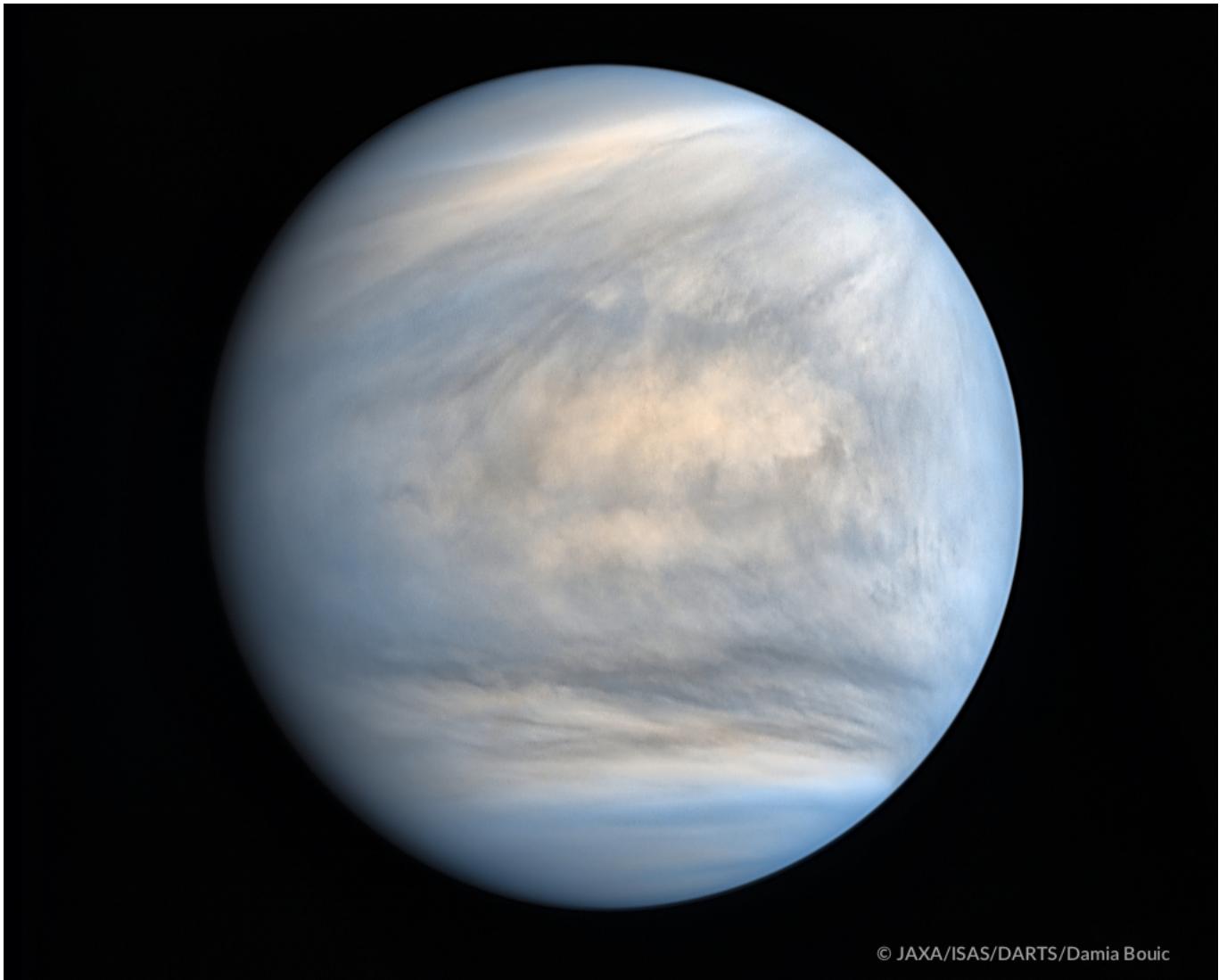
Ondas gravitatorias

En estos 20 años hemos tenido la suerte de desarrollar un nuevo sentido astronómico fascinante y muy prometedor. El experimento LIGO tras muchos años de búsqueda infructuosa ha confirmado la detección de ondas gravitacionales. Esta es una forma nueva y asombrosa de

poder percibir el universo: captando las vibraciones en el espacio-tiempo producido por objetos muy densos y lejanos como fusiones de estrellas de neutrones o agujeros negros. Estos primeros instrumentos de los que disponemos aún son muy toscos, su sensibilidad es muy baja y la precisión para determinar la dirección en la que se producen la fusión de esas colosales masas es todavía muy burda. Pero todo se andará.

Tras una existencia en la que hemos sido ciegos, acabamos de abrir los ojos y las ondas gravitacionales impactan por primera vez en nuestra retina. Un nuevo sentido para captar y percibir ese rico y extenso universo que nos rodea. Ω

Luis Salas López
Astronomía Digital
luissalaslopez@gmail.com



© JAXA/ISAS/DARTS/Damia Bouic

La advertencia de Sagan

Pedro J. Hernández | Naukas

Una historia del efecto invernadero en Venus

En 2008, la sonda Venus Express se encontraba en órbita alrededor de nuestro vecino planetario cuando apuntó su cámara infrarroja VIRTIS hacia la Tierra. Nuestro planeta se aparecería como un punto casi azul y no tan pálido en unos pocos píxeles. La propuesta de esta inusual observación había sido realizada dos años antes por el astrobiólogo David Grinspoon, un apasionado de las ciencias planetarias desde su relación profesional y de amistad, casi familiar, con Carl Sagan. Por supuesto, su inspiración le llegó precisamente de este último con su icónica imagen conocida como *Pale Blue Dot*, tomada desde la Voyager 1 en 1990 a seis mil millones de kilómetros.

Pero hay una iniciativa mucho menos conocida de Sagan de 1993. En ella propuso utilizar los datos espectrales tomadas por la sonda Galileo, durante sus dos sobrevuelos

a nuestro planeta en diciembre de 1990 y 1992, para estudiar los marcadores característicos de la vida. En otras palabras, mirar a la Tierra como si se tratase de otro mundo a explorar. Al igual que en aquella ocasión, la cámara VIRTIS buscaría desde la distancia indicadores de vida en nuestro planeta (agua y ozono fundamentalmente). La idea, primero de Sagan y luego de Grinspoon, era aprender aquello que nuestro planeta nos podía enseñar a la hora de buscar indicadores de vida en otros mundos.

La naturaleza de Venus

Venus siempre despertó la imaginación de los científicos, que se preguntaron cómo serían sus paisajes, su clima o sus habitantes.

El psiquiatra hebreo de origen ruso Immanuel Velikovsky, gran amigo de Albert Einstein, desarrolló durante los años cuarenta del siglo XX una teoría de catástrofes planetarias para justificar eventos de la historia bíblica. Una de esas ideas convertía a Venus en un fragmento cometaario expulsado de Júpiter alrededor del año 1500 a.C. que habría provocado, presuntamente, el éxodo del pueblo de Israel.

Por supuesto, nadie en la academia tomó en serio sus especulaciones. Muy al contrario, fue recibida con una aca-

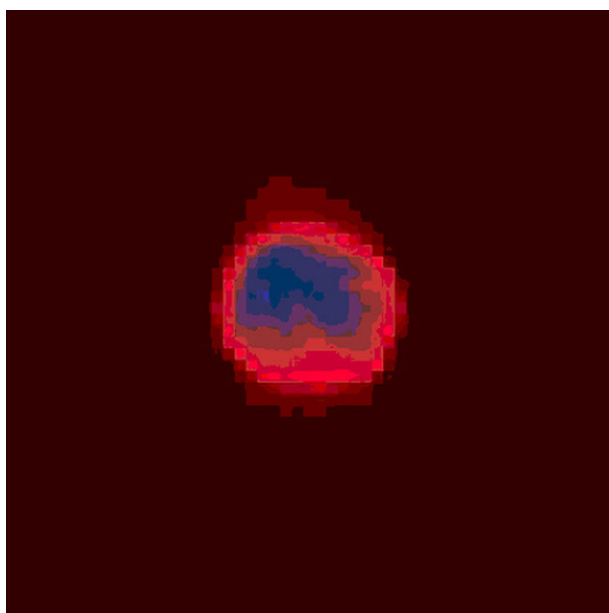


Figura 1: Vista infrarroja de la Tierra desde el instrumento VIRTIS de la VEX. El planeta aparece casi completamente iluminado en el infrarrojo sin diferencia de las regiones diurnas y nocturnas, mostrando la señal más fría de la Antártida. Fuente: Space.com

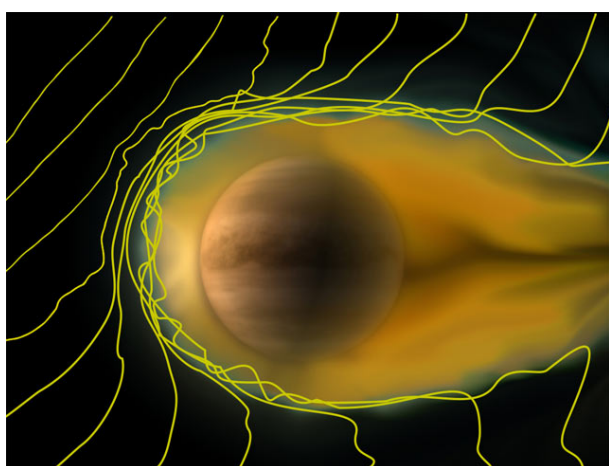


Figura 2: Comportamiento cometario de la ionosfera de Venus frente al viento solar, medida por la Venus Express. La imagen ha sido utilizada en muchos artículos sobre Velikovsky.

lorada oposición. Pero la propuesta de Velikovsky hacía una predicción contraria a las hipótesis de la época, derivada de los cálculos de Svante Arrhenius, que dibujaban un Venus parecido a una sauna bajo un manto perpetuo de nubes en una versión tropical de nuestro planeta. Un Venus, lleno de vida, que Claude Flammarion imaginaba en 1884 con enormes planicies y montañas más altas que el Himalaya poblado de unos habitantes sospechosamente parecidos a los humanos.

Según la propuesta de Velikovsky, la superficie de Venus tenía que estar muy caliente al ser un planeta joven con menos de 4000 años, como de hecho fue descubierto en observaciones de radio a finales de los cincuenta, evidenciando una superficie por encima de los 400°C capaz de fundir el plomo, un llamativo ejemplo de cómo la mala ciencia puede hacer una predicción correcta.

Sagan y el efecto invernadero

Carl Sagan fue uno de los grandes críticos de las ideas de Velikovsky. Y aunque suele atribuírsele la explicación del efecto invernadero como mecanismo de la elevada temperatura de la superficie de Venus, lo cierto es que fue el astrónomo germano-estadounidense Rupert Wildt en 1940 quien primero estimó una temperatura de la superficie bien por encima del punto de ebullición del agua. Wildt utilizó un modelo básico de equilibrio radiativo



Figura 3: Les terres du ciel, Flammarion, Camille 1884.

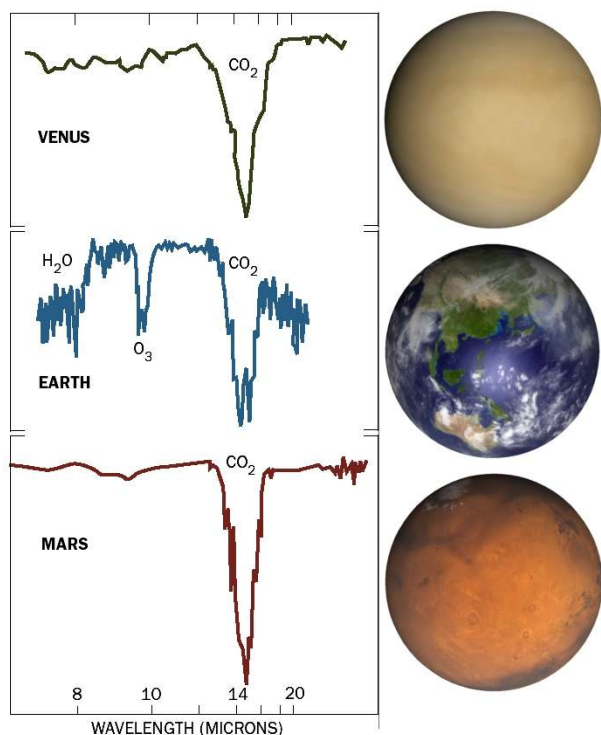


Figura 4: Absorción de la banda principal de CO₂ en Venus, la Tierra y Marte. Sólo la Tierra presenta los marcadores de habitabilidad del agua y el ozono atmosférico. Fuente: Mark Elowitz.

provocado exclusivamente por una atmósfera de CO₂, representada en una sola capa a modo de *manta* semiopaca sobre la superficie. La explicación era, desde todos los puntos de vista, una aproximación muy burda. Se necesitaba un modelo más elaborado de transferencia radiativa para explicar correctamente la elevada temperatura superficial de Venus.

Fue precisamente lo que hizo el joven estudiante de doctorado Carl Sagan en 1960. Sagan llegó al Observatorio de Yerkes (Wisconsin) para comenzar su doctorado, guiado por su pasión por la vida extraterrestre, cuando se encontró con el problema de la elevada temperatura superficial de Venus y sus consecuencias para la vida en nuestro vecino planetario. Indagando en la biblioteca del observatorio, aprendió de manera autodidacta durante meses cómo funcionaba la física de la absorción y emisión del CO₂ en el infrarrojo. Y su gran contribución a la ciencia fue entender que el mismo efecto que actuaba en nuestro planeta era perfectamente aplicable a otros mundos.

Sagan elaboró así un modelo radiativo que, aunque bastante mejor que el de Wildt, era, como él mismo lo puso, “embarazosamente burdo”. Podemos hacernos una idea sencilla del mecanismo básico sin profundizar demasiado en los detalles.

El calor en Venus

La distancia de Venus al Sol es un 70 % la de la Tierra, recibiendo muy aproximadamente el doble de radiación

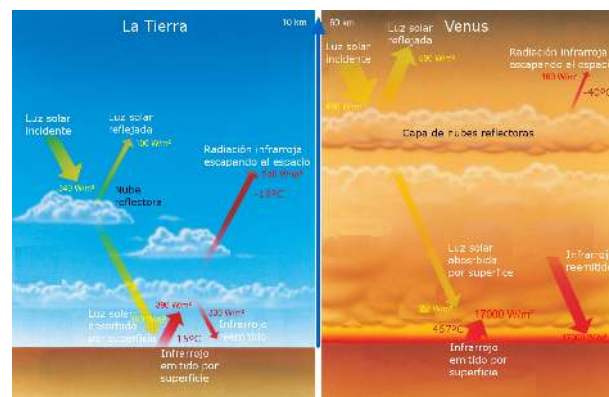


Figura 5: Comparación de los flujos de radiación visible e infrarroja en la Tierra y Venus. Fuente: Wiley.

solar. Sin embargo, debido a la presencia de su famosa capa de nubes de ácido sulfúrico altamente reflectante, Venus presenta un albedo del 76 % que, unido a la dispersión que produce su densa atmósfera de 92 bar, reduce la cantidad de luz solar que alcanza su superficie a apenas un 3 % de la incidente.

Si Venus careciese de efecto invernadero, su temperatura de equilibrio en superficie serían unos gélidos, casi marcianos, -40°C . Contrariamente, la superficie es un auténtico infierno a 470°C . Podemos entender esta diferencia de la siguiente manera: La concentración de CO₂ es tan elevada que el grueso de la radiación que pretende escapar al espacio sólo lo puede hacer desde capas muy elevadas y muy frías. De esa manera, la energía solar se acumula calentando la atmósfera hasta que la temperatura de la zona efectiva de emisión alcanza el equilibrio a -40°C . A dicha temperatura efectiva, la atmósfera emite exactamente la misma potencia superficial que la depositada en la atmósfera por la radiación, unos 160 W/m^2 .

Si Venus careciese de efecto invernadero su temperatura superficial sería de -40°C . Contrariamente, la superficie es un auténtico infierno a 470°C

Se puede así establecer una medida de la magnitud del efecto invernadero como la proporción entre la energía emitida por la superficie (unos 17000 W/m^2) y la que abandona la parte alta de la atmósfera (160 W/m^2). Para la Tierra, esta misma cantidad es del orden de 1. La atmósfera de Venus es así unas 100 veces más opaca al infrarrojo que la terrestre.

Sagan no tuvo más remedio que introducir una cantidad de vapor de agua en la atmósfera de Venus para explicar la magnitud de esta temperatura superficial. La idea era que la líneas de absorción de la molécula de agua bloquease las ventanas atmosféricas por donde el CO₂ aún permitía que la radiación infrarroja escapase al espacio.

Teoría y realidad

La visita de las sondas soviéticas del programa Venera y posteriormente la Pioneer Venus norteamericana durante los setenta, no encontraron precisamente mucho agua. Las mediciones indicaban que las concentraciones de CO_2 y vapor de agua estaban básicamente invertidas con respecto respecto de la atmósfera de la Tierra, con tan solo unas 30 ppmv (partes por millón en volumen) de vapor de agua, un ambiente extraordinariamente seco para los estándares de nuestro planeta.

Cuando mejoró la comprensión de la física del efecto invernadero de tipo desbocado que sufrió Venus se supo que esa escasa cantidad de vapor de agua jugaba un papel relevante, por lo que Sagan no iba especialmente desencaminado. En su obra *Cosmos* —que a muchos nos inspiró el placer por la ciencia— advertía:

“La Tierra tiene, al igual que Venus, unas 90 atmósferas de dióxido de carbono, pero no en la atmósfera sino incluido en la corteza en forma de rocas calizas y de otros carbonatos. Bastaría con que la Tierra se trasladara un poco más cerca del Sol, para que la temperatura aumentara ligeramente. El calor extraería algo de CO_2 de las rocas superficiales, generando un efecto más intenso de invernadero que a su vez calentaría de modo incremental la superficie. Una superficie más caliente vaporizaría aún más los carbonatos y daría más CO_2 , con la posibilidad de que el efecto de invernadero se disparara hasta temperaturas muy altas”.

Esto es exactamente lo que pensamos que sucedió en las primeras fases de la historia de Venus, debido a la proximidad de Venus con el Sol.

Malos augurios

El medio ambiente de la superficie de Venus es una advertencia: “algo desastroso puede ocurrirle a un planeta bastante parecido al nuestro”. Recientemente, en 2009, el conocido climatólogo de la Universidad de Columbia James Hansen repetía la misma advertencia en su libro *Storms of My Grandchildren*:

“Si quemamos todas las reservas de petróleo, gas y carbón, existe una gran posibilidad de que iniciemos el efecto invernadero desbocado. Si también quemamos las arenas bituminosas y la pizarra bituminosa, creo que el síndrome de Venus será una certeza absoluta”.

Hansen empezó a estudiar la física del efecto invernadero a principio de los setenta inspirado precisamente por los cálculos de Sagan. Pero, ¿qué sabemos actualmente de la advertencia original de Carl sobre la posibilidad de convertir la superficie de nuestro hermoso mundo en el infierno de Venus?

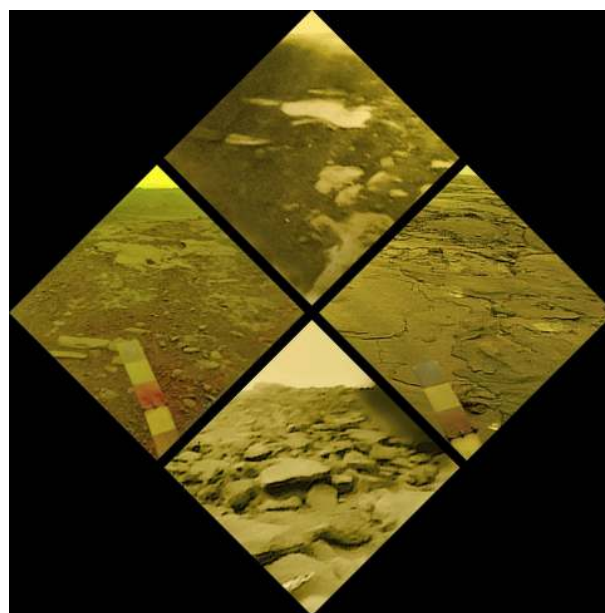


Figura 6: Superficie de Venus desde diferentes misiones Venera: 10, 14, 9 y 13. Fuente: Academia Rusa de Ciencias / Ted Stryk / Sociedad Planetaria.

La historia que se suele contar nos lleva a un pasado geológico en Venus con agua líquida donde el vulcanismo iba acumulando CO_2 a la atmósfera mientras la luminosidad solar aumentaba a lo largo de los eones. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera aumentó a la par hasta que en algún momento todo el agua líquida de la superficie terminó en la atmósfera, creando el terrible efecto invernadero que llevó al planeta a las condiciones actuales.

La evidencia que tenemos de la existencia de que ese agua pudo estar ahí procede de la proporción de deuterio respecto al hidrógeno, que resulta unas 100 veces mayor que la terrestre. Asumiendo historias de formación similares para ambos planetas, eso apuntaría a la pérdida de hidrógeno por fotólisis de las moléculas de agua provocada por la radiación ultravioleta en lo alto de la atmósfera, que tiende a producirse en mayor proporción para el isótopo más ligero que escapa más fácilmente del campo gravitatorio.

El medio ambiente de la superficie de Venus es una advertencia: “algo desastroso puede ocurrirle a un planeta bastante parecido al nuestro”

¿Por qué no ocurrió lo mismo en la Tierra? El termotato que impide la acumulación de CO_2 a largo plazo (millones de años) en la atmósfera de nuestro planeta es la erosión provocada por el agua junto a la tectónica de placas. El CO_2 disuelto en la lluvia llega a los océanos formando rocas hidrocarbonadas como la caliza que terminan en el manto por los movimiento de subducción

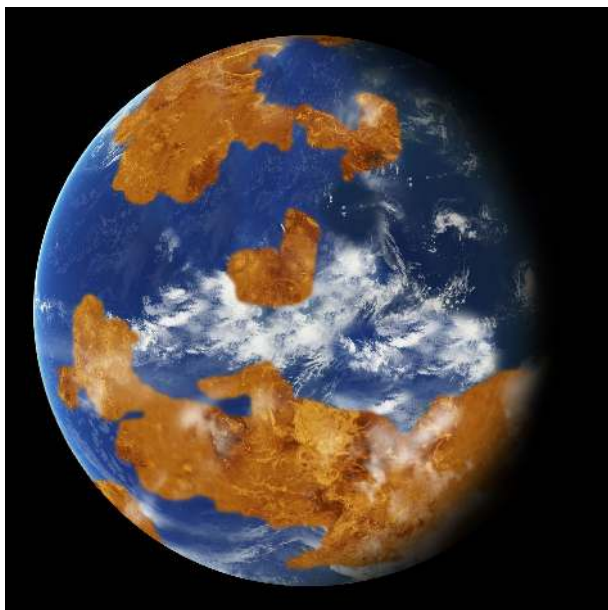


Figura 7: Representación artística del Venus en algún momento de los primeros dos eones de existencia, con océanos y una estructura de tierras emergidas análoga a la utilizada en modelos climáticos para estudiar su pasado. Fuente: NASA.

de las placas tectónicas terminando nuevamente en la atmósfera a través de las emisiones volcánicas. De hecho, se ha especulado con un efecto invernadero desbocado similar al de Venus en la formación de nuestro planeta pocos millones de años después del impacto de formación de La Luna, cuando no actuaba este mecanismo.

Venus pudo así tener tectónica de placas hace 1-2 mil millones de años y océanos en su pasado remoto. Se especula incluso con que un clima favorable a la vida con agua líquida en superficie pudo mantenerse hasta hace unos 700 millones de años. Pero también podría haber sucumbido al efecto invernadero desde poco después de su formación y jamás haber sido habitable. Lo cierto es que no lo sabemos debido a la juventud de su superficie (300 a 600 millones de años).

Pronóstico reservado

Los especialistas en física de la atmósfera son conscientes, sin embargo, que la historia no es tan simple. La retroalimentación del efecto invernadero por evaporación de agua tienen un límite debido a que, a medida que la atmósfera se calienta, emite mayor cantidad de radiación al espacio, actuando como un mecanismo de enfriamiento compensatorio. Este es el caso de la Tierra en la actualidad. Mientras la atmósfera no acumule suficiente CO_2 y se vuelva lo que se denomina ópticamente gruesa al infrarrojo, dicho límite nos mantendrá en la zona habitable. Colin Goldblatt, de la Universidad Victoria en British Columbia, sugiere que esa concentración podría ser tan alta como 30000 ppm. Las trayectorias de emisiones

manejadas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) estiman, en el escenario más pesimista conocido como RCP8.5, una concentración de unas 1000 ppm. ¡Parece que de momento estamos a salvo de convertirnos en Venus!

Por supuesto, eso no nos librará de sufrir el mismo destino que Venus en el lejano futuro, debido al aumento de luminosidad solar con el tiempo. Los modelos más recientes indican que, en la configuración actual de nuestro planeta, el efecto invernadero desbocado no aparecerá hasta que la luminosidad solar no sea entre un 10 y un 20 % más intensa que en la actualidad. Dicho límite se superará dentro de unos 1500 a 2000 millones de años. A partir de ese momento, el planeta que conocemos podría perder todo el agua de sus océanos por evaporación y finalmente por fotólisis y escape de hidrógeno al espacio en los siguientes cien millones de años, y repetir de esa manera el destino de Venus. Demasiado tiempo para que la advertencia de Sagan y Hansen nos parezca preocupante.

El infierno perfecto

¿Cuál es la temperatura máxima posible alcanzable en un efecto invernadero desbocado? Nadie se sorprenderá que en el mundo real exista un límite a la temperatura que puede alcanzar la atmósfera de un planeta por efecto invernadero. A medida que aumenta la temperatura, la longitud de onda del máximo de emisión de una superficie planetaria se hace menor y empiezan a aparecer nuevas ventanas atmosféricas por donde desalojar radiación más cercana al visible (1-2 micras en el caso de Venus) reapareciendo el mecanismo de enfriamiento compensatorio. Se estima la máxima temperatura teóricamente alcanzable en unos 1300°C.

La Tierra no se librará de sufrir el mismo destino que Venus en el lejano futuro debido al aumento de luminosidad solar con el tiempo

De hecho, Venus pudo estar a una temperatura superior a la actual (hasta unos 600 °C de media) durante centenares de millones de años de su historia debido a la disminución de la capa de nubes. Venus es hoy mucho más frío de lo que podría ser gracias a la pérdida del agua sufrida en su pasado remoto y la espesa capa de nubes de ácido sulfúrico que refleja gran parte de la luz solar, alcanzando la superficie apenas un 3 % de la radiación solar incidente.

Venus extrasolares

Toda esa caja negra de conocimientos que tenemos sobre su pasado geológico podría iluminarse con la detección de planetas extrasolares similares a Venus. La observación de un número considerable de exoplanetas en la



Le serviría para volvernos a advertir sobre el delicado balance que se establece en una atmósfera planetaria. Aunque nuestro mundo no se vaya a convertir en Venus en escalas temporales que ahora mismo nos importen, sí que hemos aprendido en estas últimas décadas que la estabilidad del clima del Holoceno, que nos vio nacer y desarrollarnos como civilización, depende de la firme voluntad de sus miembros para *“preservar y apreciar este punto azul pálido, el único hogar que hemos conocido”*. Ω

Pedro J. Hernández
phergont@gmail.com
Naukas

Figura 8: Imagen infrarroja en falso color del lado nocturno de Venus tomada por la cámara infrarroja de la sonda Akatsuki en las bandas $1.74 \mu\text{m}$ y $2.26 \mu\text{m}$ donde empiezan a abrirse ventanas espectrales que permiten observar hasta 20 km de la superficie (zonas más brillantes) y nubes situadas alrededor de unos 50 km (zonas más oscuras). Fuente: Sociedad Planetaria.

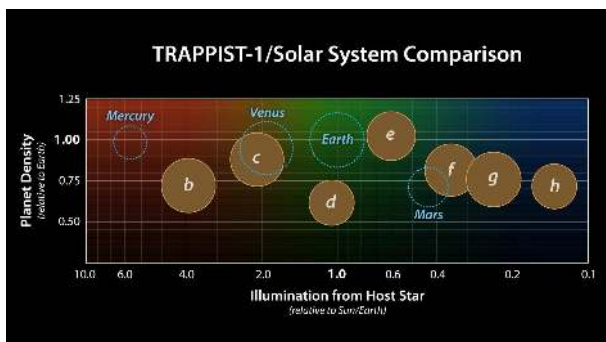


Figura 9: Comparación de las propiedades de los miembros del sistema planetario TRAPPIST-1 con el sistema solar. Fuente: NASA.

zona de Venus, interior a la zona de habitabilidad, podría proporcionarnos pistas sobre los estados por los que pasó a lo largo de su historia geológica. Incluso podríamos tener ya unos cuantos candidatos en la zona de Venus, como el planeta B y C del sistema TRAPPIST-1 detectado en 2017 alrededor de una enana roja ultrafría. Se estima que TRAPPIST-1b posee una atmósfera muy espesa de 10 a 10000 bar con una elevada concentración de vapor de agua y temperaturas superficiales de 500 a 1200°C, lo que indican claramente un planeta rocoso que ha sido víctima de un efecto invernadero desbocado pero que aún conserva gran cantidad de vapor de agua en su atmósfera.

Carl Sagan hubiese adorado todas estas observaciones.



Marte, el planeta soñado

Paco Bellido | Naukas

Cómo los humanos han imaginado Marte a lo largo de la historia

¿Pero quién habitará en esos mundos si están habitados?

¿Somos nosotros o ellos los señores del mundo?

¿Y cómo es, entonces, que las cosas han sido creadas para el hombre?

– Johannes Kepler, cita de *La Anatomía de la Melancolía*.

meses y luego volver a retomarla. Plinio el Viejo, el filósofo romano que murió en la erupción del Vesubio por querer observar el fenómeno volcánico de primera mano, llamaba a Marte *inobservabile sidus*, el astro que no se puede observar, porque sus movimientos eran poco menos que impredecibles. De hecho, determinar su posición en el cielo supuso quebraderos de cabeza –literalmente– para algunos astrónomos. Se cuenta que Georg Joachim Rheticus, uno de los discípulos de Copérnico, acabó por darse de cabezazos contra la pared al verse incapaz de calcular unas efemérides medianamente fiables.

Marte en la Antigüedad

Desde la Antigüedad, Marte ha sido un planeta misterioso, un planeta que noche a noche avanzaba de oeste a este para, de repente, cambiar su dirección durante unos

La invención del telescopio supuso el nacimiento de la *areografía*, el estudio geográfico de la superficie marciana. Galileo fue el primero en aventurar que Marte, dada su órbita más lejana al Sol que la Tierra, no debía mostrar fases tan claras como Venus o Mercurio, sino un disco

giboso. Y, de hecho, así se lo escribió el 30 de diciembre de 1610 a uno de sus discípulos, el padre Benedetto Castelli: "...a menos que me esté engañando a mí mismo, creo que he visto que no es perfectamente redondo".

En esa época, Galileo había hecho otro gran descubrimiento que, como era su costumbre, anunció en forma de anagrama: *smaismrmilmepoetaleumibunenugttauiras*. Kepler reordenó las letras para formar la frase "*Salve umbistineum geminatum Martia proles*" (Salve, compañeros gemelos, hijos de Marte). Suponiendo erróneamente que el mensaje de Galileo se refería a dos satélites marcianos, aunque adelantándose varios siglos con asombrosa intuición al descubrimiento de Fobos y Deimos. En realidad, el mensaje que Galileo había ocultado en el anagrama se refería a Saturno: "*Altissimum planetam tergeminum observavi*", o sea, "He observado el planeta más lejano y tiene forma triple".

Desvelando Marte

El primer dibujo de Marte del que tenemos noticia fue obra de Francesco Fontana, abogado napolitano y astrónomo aficionado, además de constructor de telescopios. En 1636 hace un dibujo en el que se observa una región oscura, durante algún tiempo se pensó que pudiera corresponder a alguna región destacada de Marte, pero vio lo mismo en Venus, así que con toda probabilidad Fontana se limitó a plasmar en papel las aberraciones ópticas propias de su aparato.

Aunque los jesuitas Riccioli y Grimaldi observaron algunas manchas durante una de las oposiciones perihélicas de Marte, fue el astrónomo neerlandés Christiaan Huygens quien en 1659 consiguió calcular el período de rotación del planeta rojo observando el desplazamiento noche a noche de Syrtis Major, una formación que asemeja a una V oscura fácilmente reconocible en el disco marciano.

Giacomo Filippo registró la desaparición, a lo largo varios días de algunas formaciones, la primera observación de una tormenta marciana

En 1666, siete años después, el astrónomo franco-italiano Giandomenico Cassini descubrió de forma independiente el período de rotación de Marte gracias a los excelentes instrumentos creados por el fabricante romano Giuseppe Campani. Cassini fue el fundador de una de las familias astronómicas más importantes de la historia, tanto él como su hijo (Jacques), su nieto (Cesar-François) y su bisnieto (Jacques-Dominique) fueron directores del Observatorio de París. Otro destacado miembro de la familia fue Giacomo Filippo Maraldi, sobrino del primer Cassini, que realizó un notable estudio del planeta Marte a lo largo de su vida. Desde 1672 observó cada oposición marciana y realizó dibujos detallados de sus observaciones en una época en que casi ningún astrónomo se dedicaba al

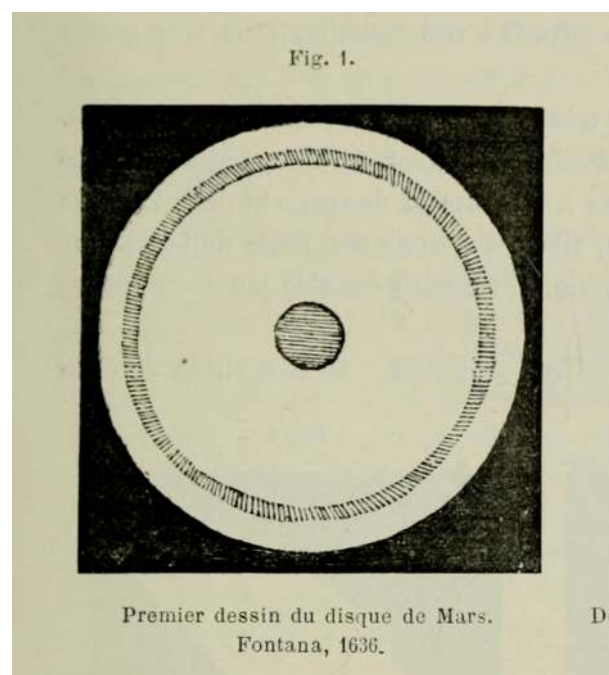


Figura 1: Dibujo del disco Marte, Francesco Fontana (1636). La planete Mars et ses conditions d'habitabilité, Volumen 1, Camille Flammarion.

planeta rojo. Fue el primero en estudiar los polos, descubrió que están desplazados respecto a los polos geográficos y también registró la desaparición, a lo largo varios días de algunas formaciones, fenómeno provocado probablemente por una tormenta de polvo, durante la oposición de 1704. Esta fue la primera observación de una tormenta marciana, adelantándose casi dos siglos al estudio de la siguiente.

La fiebre marciana

Tras estas observaciones preliminares de Marte es en el siglo XIX cuando el estudio del planeta rojo irrumpe con fuerza en casi todos los grandes observatorios, hasta el punto de crear una fiebre marciana mundial. El primer mapa detallado de Marte es obra de dos astrónomos aficionados alemanes, Wilhelm Beer y Johann Mädler, que utilizaron un magnífico refractor acromático de 9,5 cm salido del taller del prestigioso Joseph von Fraunhofer.

El jesuita italiano Angelo Secchi observó la oposición marciana de 1858 con el refractor de 9.5 pulgadas (24 cm) del Collegio Romano. Observó una gran formación triangular de color azul, sin duda Syrtis Major, aunque él la bautizó con el nombre de *Canale Atlantico*. Es la primera vez se hace referencia a un canal marciano, una idea que hará correr ríos de tinta en todo el mundo.

La historia es bien conocida, durante la gran oposición perihélica de 1877 el astrónomo del Observatorio de Brera Giovanni Schiaparelli, conocido por haber vinculado la lluvia de estrellas de las Perseidas al cometa 109P/Swift-Tuttle, volvió a recurrir al término *canali* para referirse a

unas formaciones naturales visibles en Marte, en la traducción al inglés *canale* se tradujo como *canal* (vía de agua artificial), en lugar de *channel* (formación geológica natural), lo que dio pie a especular sobre la existencia de los marcianos. Schiaparelli había observado cuidadosamente la gran oposición de 1877 con un magnífico refractor Merz de 8,6 pulgadas. Buena parte de los nombres tan evocadores de la geografía marciana, tomados de la Odisea, de los Argonautas o de la Biblia, son los nombres con que Schiaparelli bautizó las regiones más reconocibles al telescopio: Syrtis Major, Hellas Planitia, Arabia Terra, Chryse Planitia, Ausonia...

Durante la oposición de 1877 también se descubrieron los dos satélites de Marte, Fobos y Deimos, con unos días de diferencia gracias al trabajo de Asaph Hall con el refractor de 66 cm, el telescopio más grande del mundo en la época, del Observatorio Naval de los Estados Unidos en Washington D.C.

Pero, sigamos con Schiaparelli y su legado. En toda la historia de la Astronomía quizás no haya habido ningún descubrimiento que haya hecho volar tanto la imaginación

del público como la afirmación de la existencia de canales en Marte. Su máximo defensor fue el norteamericano Percival Lowell, un acaudalado astrónomo aficionado que, tras leer *La Planète Mars et ses Conditions d'Habitabilité* del gran divulgador francés Camille Flammarion, se convenció de que había una civilización en Marte que estaba haciendo un esfuerzo colosal por llevar agua desde los polos hasta las regiones más secas del planeta. Desde su observatorio de Flagstaff, en Arizona, Lowell fue capaz de ver una enorme cantidad de canales que casi ningún otro astrónomo conseguía distinguir.

Siendo justos, hay que reconocer que, si bien es cierto que Lowell se dejó llevar por la imaginación, tenía razones de peso para hacerlo

La razón de que Lowell viera los canales no deja de ser curiosa. A fin de corregir la aberración acromática de su refractor de 24 pulgadas, Lowell redujo la abertura a menos de 6 pulgadas. Esta reducción del diámetro del objetivo transformó el telescopio en una especie de oftalmoscopio rudimentario con el que Lowell acabó por registrar los capilares de su propia retina proyectados sobre el disco marciano. Los canales estaban ahí, no había duda y eso solo podía significar una cosa. En su delirio, llegó a apuntar que la ciudad capital de Marte se encontraba en la región de Solis Lacus, por ser donde más canales se cruzaban.

Siendo justos, hay que reconocer que, si bien es cierto que Lowell se dejó llevar por la imaginación, tenía razones de peso para hacerlo. No olvidemos que los canales estaban de moda en la época, el Canal de Suez, el de Corinto y, posteriormente, el de Panamá, fueron grandes logros de la ingeniería del momento y, por otra parte, la idea de la pluralidad de los mundos habitados llevaba muchos años en boga. En aquella época, uno de sus más firmes defensores fue el astrónomo francés Camille Flammarion citado anteriormente. La idea, a fin de cuentas, era que Dios no se habría dado el trabajo de crear planetas si no era para poblarlos con criaturas.

¿Aló, Marte?

A lo largo de la historia muchos pensadores han estado convencidos de que Marte no era un planeta más, sino otro mundo habitado. La existencia de vida en el planeta rojo siempre ha sido una posibilidad sugerente. En los años sesenta el mismo Carl Sagan o Gerard Kuiper, tras el sobrevuelo de la sonda Mariner 4, apuntaban a que los casquetes polares menguantes y el oscurecimiento de las zonas circundantes a los polos podrían ser evidencia de organismos similares a líquenes que se alimentaban del vapor de agua procedente del deshielo.

En 1894 hubo otra oposición perihélica y el respetado observador Edward Emerson Barnard, descubridor de la

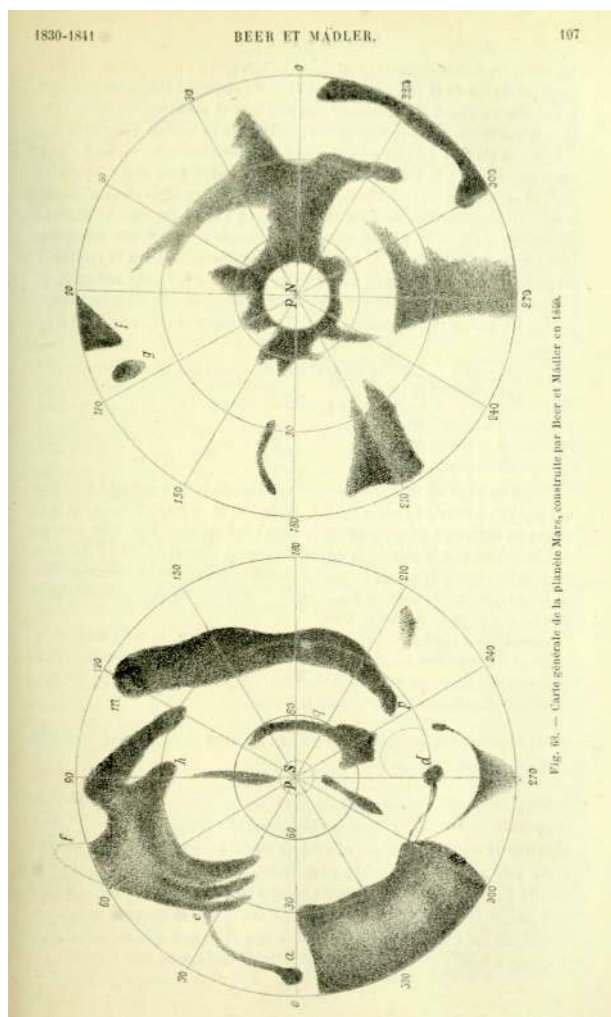


Figura 2: Primer mapa detallado de Marte (1840). Willhem Beer y Johann Mädler. La planete Mars et ses conditions d'habitabilité, Volumen 1, Camille Flammarion.

estrella que lleva su nombre y de la luna joviana Amaltea, no pudo observar ningún canal con el telescopio de 36 pulgadas del observatorio de Lick, ni siquiera con unas muy buenas condiciones atmosféricas. No fue el primero en apuntar a una ilusión óptica. El pintor y astrónomo aficionado Nathaniel Green, que hizo un precioso mapa a lápiz de Marte durante la oposición de 1877, ya sugirió que los canales solo estaban en la imaginación de quienes los veían. Finalmente los cuidadosos mapas marcianos del observador de origen griego Eugène Antoniadi a principios del siglo XX hicieron que la historia de los canales fuera cayendo en el olvido. Aún así, las ideas de Lowell tuvieron eco en la literatura, recordemos *La guerra de los mundos* de H.G. Wells o la serie de novelas marcianas de Edgar Rice Burroughs, también autor de Tarzán. Pero la fiebre marciana no se limitó a la literatura, también hubo intentos de comunicación con los marcianos. Algunos científicos, como Joseph Johann von Littrow, director del Observatorio de Viena, propusieron plantar en Siberia una serie de árboles de forma que representaran un triángulo rectángulo con un cuadrado en cada uno de sus lados, la famosa demostración gráfica del teorema de Pitágoras. El triángulo sería visible desde Marte con un telescopio y con una figura matemática tan clara, los marcianos sabrían que en el tercer planeta había vida inteligente.

Camille Flammarion había propuesto en 1891 el Premio Guzman, dotado con 100 000 francos, para la persona que en el plazo de 10 años fuese capaz de comunicarse con habitantes de otro planeta y recibir respuesta. Sin embar-

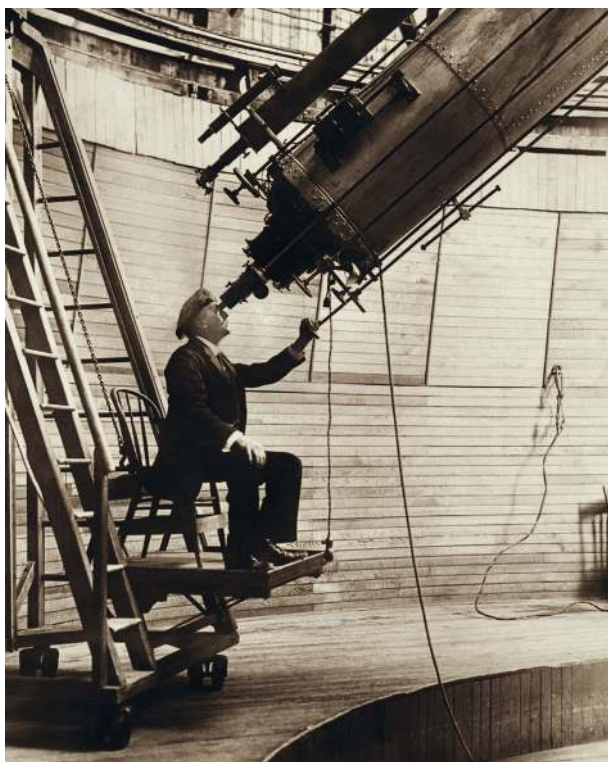


Figura 3: Percival Lowell observando Venus de día con el telescopio de 61 cm en Flagstaff, en 1914.

go, Marte quedaba específicamente excluido del premio. La razón era que estaban casi seguros de que el planeta estaba habitado y sería demasiado fácil detectar una señal. Se informó de la presencia de luces anómalas en la superficie de Marte que se entendieron como intentos marcianos de comunicarse con los terrícolas. A principios del siglo XX se conjeturó acerca de la comunicación mediante señales de radio y numerosos científicos propusieron sistemas, entre ellos Tesla (1901) y Marconi (1919). Durante la oposición marciana de 1926 se intentó establecer contacto por radio, algo de lo que se hizo eco la prensa inglesa. El astrónomo David Todd y otros organizaron sesiones de escucha de ondas de radio durante la oposición marciana. Los resultados fueron negativos, como era de esperar. Ni que decir tiene que también hubo otros intentos de establecer contacto mucho más rocambolescos.

En toda Europa y en Estados Unidos hubo médiums que afirmaban comunicarse con habitantes de Marte mediante escritura automática, viajes astrales o telepatía

En toda Europa y en Estados Unidos hubo médiums que afirmaban comunicarse con habitantes de Marte mediante escritura automática, viajes astrales o telepatía. Los médiums más famosos de finales del siglo XIX intentaron inaugurar las comunicaciones interplanetarias. En Cádiz, una médium explicaba: “El Sol, los planetas y sus satélites tienen sus propios habitantes, que tienen un destino complejo. Cada una de las humanidades que habita estos globos tiene una doble existencia, visible e invisible...”. El obispo de la ciudad, Servando Arbolí, organizó en 1857 una quema pública de los libros espiritistas. El libro *Luz y verdad del Espiritualismo* supuso todo un escándalo en España a mediados del siglo XIX.

En otros países empiezan a aparecer libros de contactos. En *The Soul of Things*, William Denton (1823-83) y su esposa describen los diversos viajes que han realizado al planeta rojo en estado de trance. Describen varias especies más o menos humanas, pero bastante similares al hombre. En Suiza, Hélène Smith, procedente de una respetable familia de Ginebra, afirma comunicarse con un ser de Marte en sus sesiones espiritistas. Llegó hasta el punto de crear un idioma marciano con escritura, sonidos y gramática que, tras un estudio a fondo, resultó ser ni más ni menos que una versión modificada de su lengua nativa, el francés. Théodore Flournoy, profesor de Psicología de la Universidad de Ginebra, estudió su caso. Hélène consideró que su escepticismo era una traición y dejó de colaborar con él. Sara Weiss fue una autora americana que publicó dos libros sobre sus viajes astrales al planeta rojo, Ento, en lengua marciana: *Journeys to the Planet Mars* (1903) y *Decimon Huydas: A Romance of Mars* (1906). Sus libros describen los viajes realizados con la compañía de algunos guías espirituales, el principal un tal Carl De L'Ester, pero también otros como Giordano Bruno o el mismísimo Alexander von Humboldt. Los viajes tuvieron lugar entre 1893 y 94. En estos libros se cuenta lo que se especula en



Figura 4: Cartel del Aelita: Princesa de Marte. Película soviética de ciencia ficción dirigida por Yakov Protazanov en 1924.

la prensa del momento, que la civilización marciana está llevando a cabo inmensos proyectos de irrigación del planeta con obras colosales de ingeniería. No cabe duda de que la opinión de Lowell y Flammarion había calado hondo en el imaginario popular. Hugh Mansfield Robinson, vidente y médium, declaró haber visitado una estación de radio durante su primer viaje astral a Marte en 1918.

Aunque las ideas de un viaje astral interplanetario o de reencarnación en otros planetas nos parezcan ridículas, hay una larga tradición detrás. En *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) Bernard de Fontenelle ya plantea que los planetas creados por Dios tienen que albergar vida. La idea moderna de la comunicación con seres de otros planetas nace de la mente del místico sueco Emanuel Swedenborg (1688–1772), en su obra describe conversaciones con habitantes de todos los planetas conocidos. A diferencia de Percival Lowell, muy escéptico con el espiritismo, el astrónomo francés Camille Flammarion plantea en sus novelas *Lumen* y *Urania* la idea de la reencarnación en otros planetas.

El período entre las dos guerras mundiales puso fin a estas disquisiciones sobre la comunicación con Marte por medios espiritistas, pero la esperanza de encontrar vida, ahora reducida a formas primitivas microscópicas sigue teniendo muchos defensores en pleno siglo XXI.

Marte ha seguido conservando protagonismo en la ciencia ficción de las últimas décadas, baste señalar la trilogía

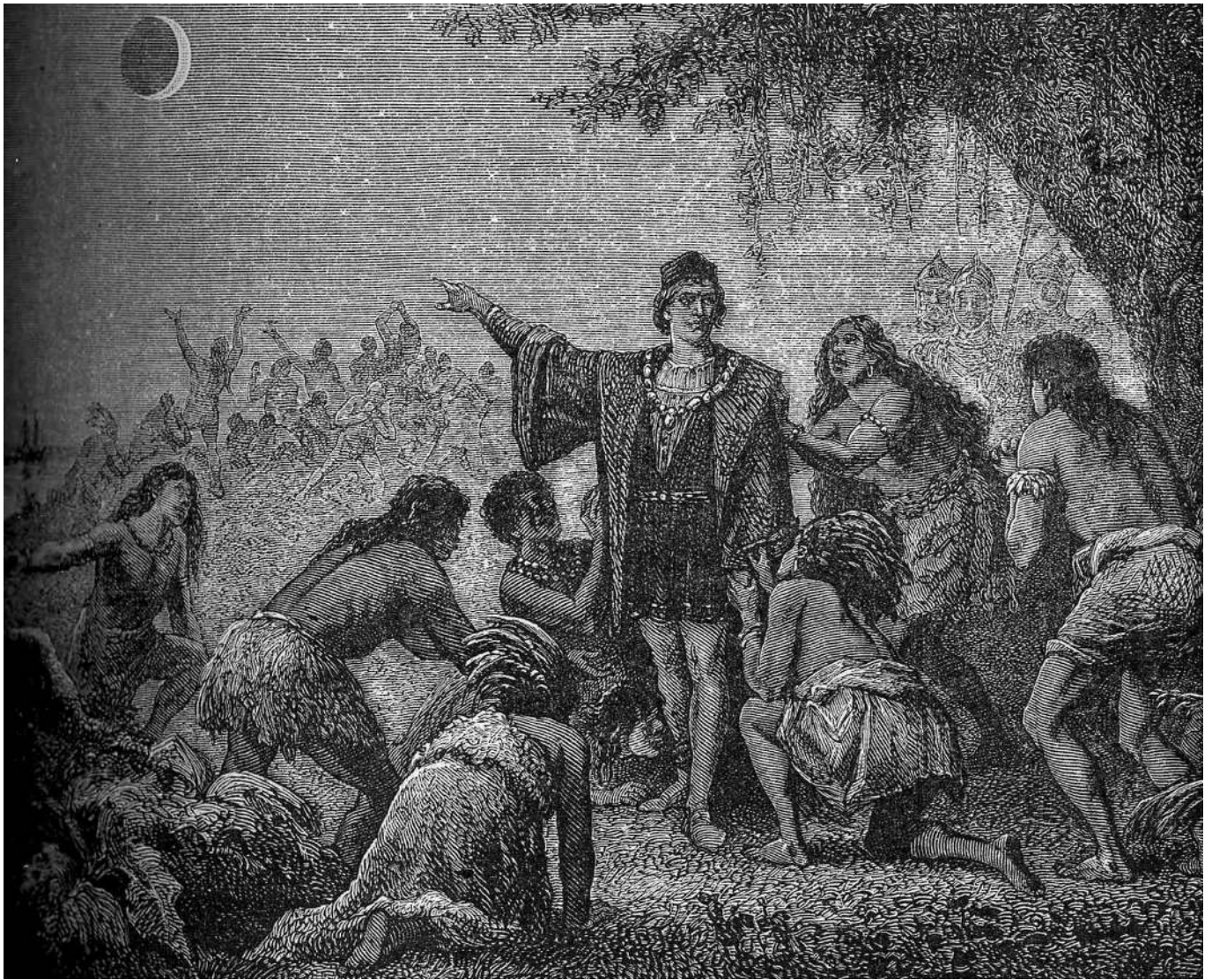


Figura 5: Instrumental utilizado por hipotéticos exploradores en busca de agua en Pavonis Mons, un volcán en escudo situado en el ecuador de Marte. Fuente: Pat Rawlings/NASA.

marciana de Kim Stanley Robinson formada por los títulos Marte rojo (1992), Marte verde (1993) y Marte azul (1996) o el *best seller* El marciano (2011) de Andy Weir. Estas obras se anticipan a la llegada del ser humano al planeta rojo, un anhelo largamente aplazado, y a la transformación de un entorno hostil.

Hemos recorrido un largo camino, desde el momento en que el hombre comenzó a observar sin comprenderla esa luz de color rojo que se movía de forma caprichosa en el cielo hasta la actualidad, una época donde las sondas espaciales analizan in situ las propiedades físicas de Marte. Si nuestra civilización sigue el curso esperado llegará el momento de que un ser humano pise Marte y entonces, por fin, dejaremos de considerarlo un mundo soñado para juzgarlo como una realidad física bajo nuestros pies. Ω

Paco Bellido
paco.bellido@gmail.com
Otros Mundos, El beso en la Luna, Naukas



Eventos astronómicos que cambiaron la historia

Jesús Gerardo Rodríguez Flores | Grupo Astronómico Gómez Palacio, México

Nuestro destino no está escrito en las estrellas... pero sí han influido en los acontecimientos

Los átomos de los cuales estamos constituidos, se formaron hace millones de años en el interior de las estrellas. Retomando las palabras de Carl Sagan en su obra *Cosmos* (1980), somos hijos de las estrellas, pero también deberíamos agregar una advertencia para los aficionados a las predestinaciones místicas: nuestro destino no está regido por ellas. Al menos no al nivel de los horóscopos y las cartas astrales que tanto gustan los astrólogos por fomentar. Lo cierto es que una serie de eventos de tipo físico sí han influido en diversos acontecimientos de nuestra existencia tanto como especie como civilización.

Desde el momento en que vivimos en un mundo ligado gravitacionalmente a nuestro astro rey, no podemos evi-

tar su influencia física. La más evidente es la radiación solar que recibimos, la cual nos proporciona temperaturas propicias para conservar agua líquida a temperatura ambiente. Los seres vivos que inician las cadenas alimenticias de nuestra naturaleza son autótrofos, esto es, pueden sintetizar su propia alimentación con tan solo ayuda de la radiación solar. Esta característica de plantas y algas, sustentan el inicio de la secuencia alimenticia de la cual dependen todos los seres vivos del planeta.

La crónica de Herodoto

Existen dos eventos históricos de clásica mención en

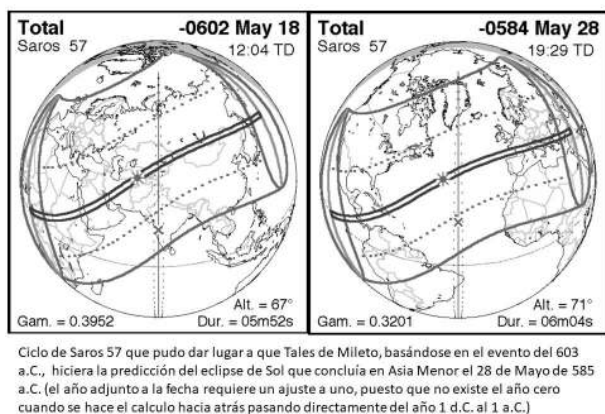


Figura 1: Eclipse que finalizó sobre Asia Menor pronosticado por Tales de Mileto.

los libros de astronomía que tuvieron una conclusión final influenciada por eventos astronómicos. El primero de ellos es mencionado por el historiador griego Herodoto de Halicarnaso en su clásica obra *Los Nueve Libros de la Historia*, donde nos menciona como una guerra en Asia Menor, entre Lydios y Medos, tuvo conclusión por causa de la fase de totalidad de un eclipse de Sol:

...se originó entre Lydios y bledos (medos) una guerra que duró cinco años, en cuyo tiempo la victoria se declaró alternativamente por unos y otros. En las diferentes batallas que se dieron, hubo una nocturna en el año sexto de la guerra que ambas naciones proseguían con igual suceso, porque en medio de la batalla misma se les convirtió el día repentinamente en noche; mutación que Thales Milesio había predicho a los Jonios, fijando el término de ella en aquel año mismo en que sucedió. Entonces Lydios y Medos, viendo el día convertido en noche, no sólo dejaron la batalla comenzada, sino que tanto los unos como los otros se apresuraron a poner fin a sus discordias con un tratado de paz (Herodoto).

Según continúa la crónica del Padre de la Historia, los reyes Aliates y Ciaxares casaron a sus hijos para formalizar la alianza de paz. Dicho acontecimiento ocurrió el 28 de mayo del año 585 a.C (Asimov, 1982). El filósofo a quien Herodoto atribuye descifrar que el oscurecimiento fue un eclipse de Sol es Tales de Mileto, considerado el primero de los siete grandes sabios griegos. Se sabe que Tales fue hijo de padres fenicios, y al ser de la ciudad jonia de Mileto, vivió en un entorno donde Egipto y Babilonia eran grandes socios comerciales de dicha ciudad. Muy probablemente llegó a visitar Egipto, donde los sacerdotes registraban con mucha devoción todo acontecimiento astronómico o meteorológico, o tuvo acceso a los registros de Caldea (Babilonia) donde ya se registraban en tablillas cuneiformes los eclipses. Es interesante espe-

cular que Tales hubiera deducido que los ciclos de eclipses (denominados posteriormente como *saros*) se repetían cada 223 lunas (o meses sinódicos) dando lugar a un ciclo de aproximadamente 18 años y 11 1/3 días. De tener acceso al registro de un eclipse del 18 de mayo de 603 a.C. en la porción norte del Mar Rojo, tal vez calculó que otro eclipse debería ocurrir el 28 de mayo de 585 a.C. Pero sería muy difícil que pudiera determinar dónde el eclipse ocurriría, puesto que la rotación terrestre desplazaría el lugar del eclipse casi un tercio de la circunferencia terrestre, siendo la conclusión de dicho eclipse en Asia Menor (Littmann & Willcox, 1991). Sin embargo, el gran mérito de Tales de Mileto sería haber aventajado a otros sabios en la deducción de cuando ha de ocurrir un eclipse, sobre todo porque el ciclo de Saros es atribuido al sabio Beroso, casi doscientos años después.

El eclipse de Colón

El segundo evento clásico, muy extendido en los libros de astronomía tuvo que ver con la difícil situación que enfrentaron Cristóbal Colón y sus expedicionarios en tierras americanas durante su cuarto viaje hacia el año 1503 (Eslava Galán, 1992).

Pero antes de entrar al anecdótico vale la pena relatar que la historia no tendría un final feliz para los españoles si no fuera por la inestimable aportación de un erudito alemán de nombre Johann Müller von Königsberg, también conocido como Regiomontano (Regiomontanus en latín). Nacido en 1436 fue un niño prodigio de las matemáticas que entró a la Universidad de Leipzig a la edad de once años. Sus trabajos astronómicos fueron extensos, pero uno de sus decisiones más trascendentes fue emplear la recién inventada imprenta de Gutenberg como un recurso para divulgar información. Así fue como publicó varios textos científicos, con diagramas muy precisos. Tal vez el más famoso de todos fue su *Kalendarium* el cual cubría los eventos a ocurrir del año 1475 al 1506 (BGC, 2012). Las tablas astronómicas incluían detallada información sobre el sol, la luna y los planetas, así como las

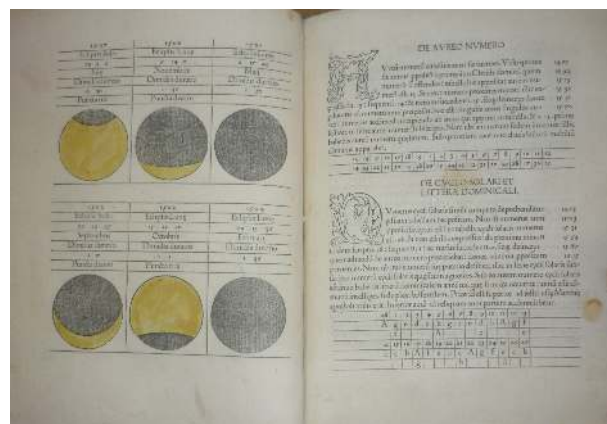


Figura 2: Eclipse de Colón en el Calendario de Regiomontanus.

más importantes estrellas y constelaciones con las cuales navegar. Por ello se convirtieron en obras de suma importancia para cualquiera que se aventurara a mares desconocidos en búsqueda de nuevas fronteras. Se dice que Cristóbal Colón y Américo Vespucio llevaban su propia copia de las efemérides de Regiomontanus en sus viajes (Rao, 2008).

Y precisamente en ese cuarto y aciago viaje al nuevo mundo, Colón buscaría el paso hacia el mar que llevara a los españoles hacia las tierras de Oriente (empresa fallida, puesto que el descubrimiento del Océano Pacífico no llegaría hasta diez años después por Vasco Núñez de Balboa). Sin embargo, lo reducido del presupuesto y el mal estado de las embarcaciones hizo que la exploración tuviera que acortarse para buscar desesperadamente llegar a la isla La Española. Colón había partido con cuatro embarcaciones, las carabelas la Capitana y la Santiago, y dos naos, el Gallego y el Vizcaíno. Las naves se vieron afectadas por una especie de gusanos que pudrían la madera hasta dejar a las embarcaciones en estado innavegable. Las tripulaciones tuvieron que trasladarse a las otras dos embarcaciones. Llegó un momento en que a las naves el agua casi les llegaba a cubierta. La tripulación se turnaba día y noche para achicar el agua con las tres bombas de abordaje e innumerable cantidad de calderos. Finalmente Colón tomó la decisión de embarrancar las naves en la bahía de Santa Gloria de la isla de Jamaica y apertrecharse para cualquier ataque de los indios del lugar. Era el 25 de junio de 1503.

Aprovechando la proximidad del eclipse de luna del 29 de febrero de 1504, Colón convocó al líder cacique de los indígenas

Colón envió a tres marinos en una barca hacia la isla La Española para pedir auxilio. Mientras, entabló amistad con los indios del lugar tratando de establecer un trueque de baratijas por alimentos. Muy necesario porque las reservas de la tripulación estaban agotadas, y las que quedaban ya estaban en muy mal estado. Colón esperaba que eso ayudara a darles tiempo mientras el Gobernador Ovando de La Española mandaba un navío de rescate por los náufragos. Sin embargo, Colón ya no era tan apreciado como en sus primeros viajes, y la expedición de rescate tardaría un año en partir. Con tanto tiempo transcurrido, a los españoles se les acabaron los cascabeles y cuentas de vidrio con los cuales comerciar por granos, conejos o pan que los indios les proveían. Además las relaciones con los indios se complicaron cuando un grupo de marinos rebeldes se escaparon, y tras un fallido intento de hacerse a la mar en canoas de los indígenas, terminaron sobreviviendo del pillaje a los indios. Ante estos hechos, y la falta de mercancía para trueque, los indios dejaron de surtir de alimentos al grupo de Colón.

En el momento más desesperado, el navegante genovés se percató que en el calendario del Regiomontano señalaba un eclipse de luna para el 29 de febrero de ese año, 1504. Aprovechando dicho conocimiento, y con la fecha



Figura 3: El mapa de Vinlandia, siglo XV. Fuente: Yale University Press.

próxima, convocó al líder cacique de los indígenas y le recriminó a nombre de Dios el poco cuidado que tenían de surtirlos de alimentos. Le sentenció que Dios los castigaría con una grandísima hambre y peste, y que para muestra de su enojo divino les mandaría al tercer día una señal del cielo. Indicó a los indios que observaran dicha noche la salida de la luna, llena de la ira de Dios.

Es de esperar que los indígenas regresaron con una mezcla de miedo e incredulidad con esa advertencia, pero sin duda la semilla de la incertidumbre les quedó depositada en su subconsciente. Cuál sería su sorpresa cuando al tercer día la luna salió por el horizonte, grande y con un tono rojizo de intensa furia.

Relata Don Fernando Colón, hijo del Almirante, que los indígenas regresaron dando alaridos y suplicándole a Colón que intercediera por ellos ante su Dios para que aplacara su furia y los perdonara. A cambio, gustosos proveerían de alimentos a los náufragos españoles. Colón aceptó interceder ante su Dios, e indicó que se retiraría a sus aposentos por cincuenta minutos para hablar con Dios. No obstante, lo que realmente hizo, fue medir con un reloj de arena el tiempo que durarían las fases del eclipse, según el almanaque del Regiomontano. Cuando calculó que la fase de totalidad del eclipse empezaría a ceder, Colón apareció nuevamente ante los indígenas para decirles que Dios los había perdonado y que poco a poco la Luna recuperaría su luminosidad habitual. De esa manera, Colón y los náufragos españoles lograron sobrevivir con alimentos provistos por los indígenas hasta el arribo de una carabela de rescate desde La Española, el 29 de junio de 1504.

Vinlandia

Aunque de inicio parecía que sólo era producto de tradiciones y leyendas, las investigaciones de diversos historiadores y arqueólogos nos han acercado a una historia cada vez más veraz de que, quinientos años antes de Cristóbal Colón, ya hubo europeos explorando las costas del continente americano. Y ese mérito correspondió a los

vikings. El estereotipo que tenemos de los vikingos es producto de quienes escribieron sobre ellos en su época. Esos escritores eran principalmente los monjes escribas víctimas de los despojos habituales de los hombres del norte. Los vikingos eran una civilización hábil para navegar y para guerrear. Eran vistos por los cristianos como bestias diabólicas que no respetaban la vida ni la propiedad ajena durante sus incursiones en las diversas costas de Europa. Por lo regular, cuando atacaban para hacerse con un botín, los normandos eran muy prácticos, y acostumbraban tomar por asalto aquellos asentamientos que sabían estaban bien surtidos de provisiones, objetos preciosos y prácticamente sin ninguna medida defensiva que les impidiera el despojo. Esos sitios eran habitualmente los monasterios y las abadías, donde los monjes eran presa fácil de los normandos. Siendo sus víctimas, de los pocos cronistas de la época, es de entender que los retrataran como salvajes endemoniados que no respetaban ni su vida consagrada ni sus símbolos sagrados (tal vez de allí el cliché de representar a los vikingos con cascos de cuernos, cosa que nunca usaron).

Erik el Rojo abandona Islandia para huir de la justicia y en el año 981 descubre la costa de Groenlandia

Lo cierto es que los vikingos eran bastante civilizados, más que muchas comunidades que les temían. Estaban regidos por leyes muy modernas donde la mujer tenía igualdad de derechos, eran amantes de la poesía y mucho de su vocabulario fue adoptado por las lenguas del norte de Europa. Pero sobre todo, eran fantásticos navegantes. Sus embarcaciones eran ligeras y navegaron desde los mares del norte hasta toda la costa del Mediterráneo. En aquel entonces, los navegantes europeos eran temerosos de navegar sin tener a vista la costa, pues era obvio su temor a perderse en mares desconocidos y naufragar. En cambio, los vikingos vencieron ese temor y navegaron los mares del norte a pesar de que el clima del norte no dejaba muchas veces observar el sol y las estrellas. Con el tiempo, los vikingos encontraron nuevos territorios como las Islas Feroe y posteriormente Islandia, que fuera descubierta probablemente hacia el 860 de nuestra era por Naddoddr. Posteriormente el legendario Erik el Rojo abandona Islandia para huir de la justicia y en su navegación hacia el poniente descubre en el año 981 la costa de Groenlandia, la puerta de entrada al continente americano. Posteriores viajes hacia el sur permitieron el descubrimiento de nuevas tierras, en lo que ahora identificamos como la costa canadiense. Los relatos narran la primicia del descubrimiento a Bjarni Herjolfsson en el 985 (Wilbur, 1997) y posteriormente al hijo de Erik, Leif Eriksson hacia el año 1000 (Hubert H., 2003). Todo parece indicar que los vikingos lograron tener asentamientos tanto en Groenlandia como en tierras americanas más al sur durante algún tiempo.

Algunas de las suspicacias que estos relatos levantaron en los historiadores parecían justificadas. Los nom-

bres dados a los nuevos territorios por los vikingos parecían más una estrategia para convencer que los territorios eran propicios para la llegada de nuevos colonos. Por un lado Groenlandia (*Greenland*) significa *Tierra Verde*, un color poco evidente en un territorio cubierto de blancas nieves. Y ni qué decir de Vinland (*la tierra de la vid o del vino*). ¿Había referencias históricas ajenas a los vikingos que avalaran sus crónicas? ¿Cómo pudieron viajar tan lejos sin el uso de tablas astronómicas que aparecerían en Europa hasta siglos después? ¿Y dónde estaban las ruinas arqueológicas en América que demostraran la presencia normanda?

Parte de las dudas sobre este tipo de asentamientos quedó soportado por las investigaciones que posteriormente se efectuaron. Algunas de ellas, incluso en los archivos vaticanos donde había registros de la asignación de un obispo para esas tierras en 1124 (los normandos ya eran cristianos), así como la construcción de una catedral en Gardar (Gardar, Groenlandia). También existían registros sobre la construcción de doce iglesias, un monasterio agustino y un convento benedictino. La diócesis de Gardar permaneció vigente hasta finales del siglo XVI cuando los contactos con Europa disminuyeron hasta desaparecer. También en Norteamérica aparecieron algunos documentos muy polémicos, como el presunto mapa que mostraba a Vinlandia cuya autenticidad aún se debate. Por otro lado en la Biblioteca Nacional de París está el denominado *Mapa de Caverio* fechado en 1503-1505 que



Figura 4: Mapa que muestra la probable ruta de viaje desde Groenlandia a Vinlandia. Fuente: Finn Bjørklid.



Figura 5: Reconstrucción de casa nórdica en L'Anse aux Meadows, Canadá. Fuente: D. Gordon E. Robertson.

ya muestra los territorios descubiertos por los vikingos.

Finalmente, la piedra angular del misterio quedó resuelto gracias al descubrimiento en 1960 de un asentamiento vikingo en L'Anse aux Meadows, en Newfoundland (Terranova, Canadá). El descubrimiento se lo debemos a la arqueóloga Anne Stine Ingstad y su esposo, el famoso explorador noruego Helge Marcus Ingstad (Woo, 2001). El asentamiento estaba formado por al menos ocho edificios (tres viviendas, una forja, un aserradero y tres almacenes). En las viviendas se encontraron centenares de objetos, entre ellos utensilios de costura idénticos a los similares a los vikingos de dicha época, lo que además de confirmar el origen de la colonia, indujo a pensar que también había presencia de mujeres en el asentamiento (Ingstad H., 1972). Algunos investigadores sugieren que L'Anse aux Meadows es *Leifsbúðir*, un asentamiento vinlandés descrito en las sagas nórdicas. Esto último se ve soportado por el descubrimiento de leyendas de las tribus amerindias conocidas como algonquinos, quienes al parecer llegaron a tener incluso enfrentamientos armados con los normandos. En sus leyendas, hablan del Reino de Saguenay, un poblado de una raza de hombres rubios, ricos en pieles y metales (Ingstad & Stine Ingstad, 2000).

Las piedras solares usadas por los vikingos para navegar por climas adversos probablemente eran cordierita

La ciencia también despejó la duda de cómo los vikingos pudieron navegar hasta territorios tan distantes de la costa europea sin tablas astronómicas y con climas adversos que impedían observar la posición del Sol. Las crónicas mencionaban que los navegantes nórdicos utilizaban para guiarse una llamada *piedra de sol*, sin embargo, ningún objeto de ese tipo había sido descubierto. Era de esperarse que eso pasara, puesto que los navegantes vikingos acostumbraban que a su muerte su ritual funerario consistiera en que su cuerpo y pertenencias ardieran junto a su embarcación. Pero investigaciones recientes llevadas a cabo por el departamento de óptica de la Universidad Eötvös Loránd de Budapest, Hungría, han concluido que las piedras solares usadas por los vikingos probablemente era cordierita, un silicato rico en hierro, magnesio y

aluminio que llega a ser confundido con el cuarzo. Dicha cordierita en condiciones de neblina, al recibir los rayos del Sol, crea un efecto de polarización que intensifica la luz en dirección a donde se ubica el Astro Rey (Szaz, Farkas, & Horvath, 2016).

A la astronomía le tocaría desvelar el último misterio de la saga vikinga. ¿Qué hizo que los vikingos abandonaran sus colonias en América y Groenlandia? Por los registros sabemos que la diócesis de Gardar en Groenlandia fue abandonada a inicios del siglo XIV. La causa de ello se refiere a que los mares empezaron a resultar intransitables por los témpanos de hielo, lo que ocasionó que disminuyera la cantidad de barcos que hacían la travesía de Islandia a los territorios más al poniente. Las tierras americanas fueron las primeras en ser abandonadas, y las groenlandesas fueron las que más resistieron, hasta que las condiciones meteorológicas se impusieron.

La solución del enigma pasa por el estudio del Sol y sus manchas solares. Las manchas solares son regiones más frías de la superficie de nuestra estrella, las cuales por contraste aparecen como manchas oscuras a nuestra vista. Las manchas son ocasionadas por puntuales campos magnéticos. Sus temperaturas son de unos 4500°K, en comparación de los 5800°K de la fotosfera. Con el registro de las variaciones de manchas sobre el disco solar, se ha establecido la existencia de un ciclo de once años que transita de un mínimo solar con casi la ausencia de manchas solares, hasta un máximo donde éstas son muy abundantes. A su vez, otros instrumentos de observación han determinado que el Sol posee otro ciclo, éste de 22 años, donde invierte la polaridad de su campo magnético influido por estas variaciones en el ciclo de manchas. Los precursores en la observación de las manchas solares fueron Galileo Galilei, Christopher Scheiner y Johann Fabricius en el siglo XV. Su observación y registro continuó, pero se perdió interés ante la misteriosa desaparición de las mismas entre 1645 y 1715.

Aunado a los registros de las manchas solares, se descubrió una curiosa relación entre el comportamiento del



Figura 6: Cristal de espato de Islandia. Fuente: ArniEin.

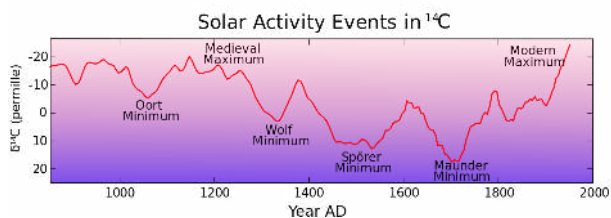


Figura 7: Variaciones del registro de ^{14}C , relacionadas con en la actividad solar. Fuente: Leland McInnes.

Sol y algunas condiciones meteorológicas de larga duración en nuestro planeta. Después se descubriría que la ausencia de manchas solares en el periodo de 1645 y 1715 coincidió con un periodo de muy bajas temperaturas en Europa. En esa época ocurrió el denominado Mínimo de Maunder (de su codescubridor, Walter Maunder, 1894), donde las manchas solares se ausentaron de la superficie del Sol y las temperaturas en Europa descendieron entre 1°C y 2°C y afectaron sobre todo Norteamérica y el norte de Europa. Las crónicas relatan como el río Támesis permaneció congelado y la gente pudo patinar en él. Las cosechas se perdieron, y el astrónomo Jean Picard en el Observatorio de París comentaba en su diario de 1671 de su júbilo al descubrir una mancha sobre la superficie del Sol “pues tenía una década sin ver alguna” (Uriarte, 2010). Igual se descubrieron otros mínimos de manchas como son el de Wolf (hacia 1300), Spörer (hacia 1500) y Dalton (1800-1830) que coincidieron con disminución en la temperatura en la Tierra.

¿Fue un mínimo así lo que influyó a las navegaciones vikingas? El tiempo permitiría explicar la navegación y colonizaje vikingo en un sentido radicalmente contrario, y por ende el abandono posterior de las tierras americanas. Para ello primero había que conseguir registros de la actividad solar entre los siglos IX y XIV.

El Periodo Cálido Medieval facilitó la navegación de los vikingos en mares más al norte y poniente

El problema para determinar la actividad solar previa a los registros de manchas solares del siglo XV fue solucionado de manera ingeniosa. No sólo se acudió a registros astronómicos chinos, sino que además se descubrió que la evolución de las manchas solares y la actividad solar se podían deducir con la concentración de ^{14}C en la madera de los anillos de los árboles y del ^{10}Be en los sondeos de los hielos. Así fue como se descubrió que en el periodo entre 1100 y 1250 hubo un aumento en la actividad que sería conocido como Máximo Solar Medieval que provocó un aumento en la temperatura. Al final se encontró que un periodo de altas temperaturas se había extendido en un rango que abarcó desde los años 700 hasta el 1300, y el apogeo de esta etapa debió ocurrir hacia 1100. Fue denominado Periodo Cálido Medieval, el cual fue propicio para las cosechas en Europa pero también facilitó la nave-

gación de los vikingos en mares más al norte y poniente, las cuales quedaron libres de témpanos de hielo.

Si esas condiciones hubieran prevalecido, la historia del planeta hubiera sido muy diferente. La hegemonía nórdica sobre mares y territorios tal vez hubiera dado lugar a un vasto imperio cristiano muy diferente del surgido por las colonias españolas y portuguesas posteriores al descubrimiento colombino. Sólo hay que imaginar una Norteamérica colonizada por normandos, que tal vez hasta nuestras épocas actuales hablara danés en lugar de lengua anglosajona y franca. Pero las condiciones de actividad solar impidieron que los asentamientos americanos vikingos pudieran prosperar. En el siglo XIV el clima cambió abruptamente para iniciar un nuevo periodo de temperaturas bajas. El paso entre Islandia y Groenlandia se volvió muy complicado y las embarcaciones terminaron por abandonarlo. Los colonos groelandeses regresaron a Islandia y otros territorios, agobiados por el fracaso de las cosechas. Sin duda otro factor fue el acoso de los indígenas Inuit (esquimales) que también escapaban hacia el sur por el intenso frío, al igual que lo hacían las focas, una de sus principales fuentes de alimento. Cualquier colono nórdico que haya sobrevivido, seguramente terminó integrándose a la sociedad esquimal.

Aviso a navegantes

También nuestra actual civilización puede sufrir un *giro de tuerca* imprevisto producto de un evento astronómico. Y no nos referimos a cuestiones de percepción de eventos celestes, como sucedió en Asia Menor o con los isleños de Jamaica ante Colón. Hemos continuado investigando la actividad solar y sabemos que en ocasiones el Sol genera destellos de alta energía, corrientes de protones y flujos de masa coronal que al alcanzar nuestra magnetósfera pueden causar perturbaciones electromagnéticas intensas, capaces de inutilizar satélites artificiales e incluso causar masivos apagones que pueden crear un caos en las actividades humanas. Somos una civilización que depende para su progreso de la energía eléctrica y del funcionamiento de millones de dispositivos electrónicos. Y el Sol, en cualquier momento nos puede dar una desconocida.

Suficiente razón para continuar poniendo nuestros ojos en el cielo. ☿

Jesús Gerardo Rodríguez Flores
Grupo Astronómico Gómez Palacio, México
facebook.com/portalmegacosmos
megacosmos.blogspot.com
jgerardo72@gmail.com



Necesitamos la interrupción de la noche

Martin Pawley | Agrupación Astronómica Coruñesa Ío

No puede haber astrónomos sin estrellas.

El romanticismo de la noche

Permitidme que empiece contando una historia sobre un muchacho y un telescopio.

El escenario de esta historia es Lawrence, Massachusetts, Estados Unidos. El año es 1889. El muchacho se llama Robert y es huérfano de padre; tiene quince años y lee con avidez una revista a esa altura ya veterana, *Youth's Companion*. Una publicación que había nacido en 1827 dirigida al público más joven con el ánimo de promover “la virtud y la piedad y servir de aviso contra toda forma de transgresión”. Con el paso de los años la orientación cambió sensiblemente y hacia el final del siglo la revista se abrió a un público más diverso: sus páginas acogieron textos de autores legendarios como Mark Twain, Jack London o Emily Dickinson.

Youth Companion destacó también por sus estrategias de promoción. Invitaba a sus lectores a buscar suscriptores nuevos y a cambio les ofrecía regalos, entre los que no eran infrecuentes los *kits* científicos. En aquel 1889 la recompensa para los jóvenes más diligentes era un telescopio. Con la ayuda de su madre en la búsqueda de nuevos compradores de la revista, Robert se hizo merecedor del prometido telescopio refractor e hizo de uno de los cuartos de su casa su primer observatorio. Para familiarizarse con el cielo devoró los libros disponibles en la Biblioteca Pública de Lawrence. Leyó y releyó los atlas astronómicos y se enamoró en especial de un libro, *Our Place among the Infinities*, escrito por el astrónomo Richard Anthony Proctor, autor de algunos mapas de Marte y fundador de una revista de divulgación, *Knowledge*. En el desarrollo de esta publicación contó, por cierto, con la ayuda de su

hija Mary Proctor que luego tendría una celebrada carrera como comunicadora científica: escribió infinidad de artículos y dio cientos y cientos de charlas en diversos países.

La maravilla del cielo chocaba con la pesada inercia de la vida escolar. En diciembre de 1891 nuestro Robert escribía, con inconfundible frustración adolescente, estas frases en el periódico del instituto de Lawrence:

“La rutina de la vida escolar que se nutre enteramente de libros es increíblemente monótona, tan monótona, de hecho, que nos deprime no tener la certeza de si un día sabremos o no lo que aprendimos ayer; un poco de observación real sobresaldría entre toda esta negrura igual que la Luna sobresale en la oscuridad cuando la miramos a través de un telescopio; hace que la oscuridad parezca agradable”.

Acabó el instituto, desempeñó diversos oficios, se casó, fue a la universidad de Harvard, lo dejó y, finalmente, gracias a su abuelo, se hizo con una granja en Derry, New Hampshire. Allí vivió con su mujer Elinor durante varios años. Por la mañana temprano, antes de ocuparse de las labores del campo, se levantaba para escribir poesía. Es ahora cuando brota de verdad la leyenda literaria de nuestro Robert. Porque nuestro Robert es Robert Frost, uno de los grandes nombres de la poesía estadounidense, cuatro veces ganador del Pulitzer, cifra récord para ese premio.

La exposición a la luz artificial agrede a la naturaleza, a nuestra salud y acaba con el patrimonio cultural del cielo nocturno

Robert Frost amaba el cielo nocturno. Observó el cielo en su juventud, lo observó mientras vivió en el campo, lo observó con seguridad durante los años, casi veinte, que dio clases de inglés en el Amherst College de Massachusetts, donde había un observatorio que tenía, cuando él llegó en 1917, un telescopio de 18 pulgadas. Amaba el firmamento y el firmamento asoma en poemas suyos como *The Star-Splitter*, *Canis Major* o *Fireflies in the Garden*. En su poesía también está presente la desaparición de la noche. A lo largo de su vida Robert Frost asistió a la electrificación de su país, a la domesticación incandescente de tierras que antes eran salvajes. La luz artificial amenaza la noche, como apunta con ironía el poema *The Literate Farmer and the Planet Venus*:

*The idea is no doubt to make one job
Of lighting the whole night with one big blob
Of electricity in bulk the way
The sun sets the example in the day*¹.

¹En atrevida traducción española: *La idea es sin duda acometer el trabajo / de alumbrar la noche con un gran trastojo / de tanta electricidad que nos haría / creer que luce el Sol, como de día.*

En el mismo poema un verso posterior reclama: “*we need the interruption of the night*”. Necesitamos la interrupción de la noche².

Uno de los mejores poetas gallegos, Xosé María Díaz Castro, escribió en el único libro que publicó en vida, *Nimbo* (1961):

A noite é necesaria
pra que ti poidas ver
sobre o medo e o mal
as estrelas arder.

Necesitamos la interrupción de la noche. La noche es necesaria.

Hoy sabemos que además de una verdad poética, estos dos versos son también una verdad científica. Hoy conocemos el impacto de la contaminación luminosa en ámbitos muy diferentes. Comprendemos cómo la exposición a la luz artificial por la noche agrede la naturaleza y nuestra salud, dilapida dinero y acaba con el patrimonio cultural del cielo nocturno.

La noche y los ciclos biológicos

Desde que surgieron las primeras formas de vida en la Tierra hace unos cuatro mil millones de años nuestro planeta giró sobre sí mismo un billón de veces. Es una gruesa aproximación, pero nos vale. Un billón de días con su correspondiente billón de noches. La vida, en todas sus formas, evolucionó acostumbrándose a esa alternancia de luz y oscuridad, de horas bajo el dominio del Sol y horas al relente de la noche. Una alternancia que además es variable, a consecuencia del efecto combinado de los movimientos de rotación y traslación de nuestro planeta.

A todas las especies les resulta útil prepararse para la llegada del día o de la noche, en las que desarrollarán los hábitos que correspondan a cada período, desde la alimentación y el apareamiento hasta el necesario descanso. Les es igualmente útil anticiparse a los cambios estacionales, adivinando la proximidad del verano o del invierno por el incremento o disminución de horas diarias de luz. Pero para eso es imprescindible reconocer bien el día y la noche y eso, en la actualidad, no resulta fácil.

Muchas especies de aves quedan atrapadas por las manchas de luz de las ciudades

La luz artificial, que se extiende a cientos de kilómetros de las ciudades, distorsiona de forma decisiva las condiciones ambientales nocturnas: hace desaparecer la oscuridad y eso deja indefensas a todas las especies que tienen en ella su hábitat de vida. Niveles de luz con los cuales los humanos no nos atrevemos a dar un paso pueden tener

²*We need the interruption of the night / To ease attention off when overtight, / To break our logic in too long a flight, / And ask us if our premises are right.*



Figura 1: La Península Ibérica de noche desde la Estación Espacial Internacional.

un impacto gravísimo en muchos seres vivos. No hay semana que no aparezca un nuevo estudio sobre los efectos negativos de la luz artificial por la noche sobre el medio ambiente.

Hay ejemplos clásicos, como el de las tortugas marinas que desovan en las playas. Cuando los huevos eclosionan las crías deben salir corriendo hacia el mar, que de manera natural deberían reconocer porque refleja la luz del firmamento, pero lo más probable ahora es que se desvíen hacia territorio urbano, que es lo que más brilla.

Fascinante es el caso de las aves que se orientan por las estrellas, para las cuales un cielo borrado supone quedarse sin mapa. Muchas especies de aves quedan atrapadas por las manchas de luz de las ciudades y a menudo chocan fatalmente contra los edificios (sólo en América del Norte se calcula que pueden morir por esa causa hasta mil millones de ejemplares cada año³) o agotan los limitados recursos con los que afrontan las migraciones.

El impacto de la luz sobre las poblaciones de insectos es también muy conocido y eso pone en peligro su decisivo papel como polinizadores⁴.

La contaminación luminosa afecta incluso mar adentro, como prueban estudios hechos con corales de la Gran Barrera de Arrecife en Australia⁵: sus ciclos reproductivos se ven alterados cuando la luz artificial compite con la luz de la luna como marcador de su ritmo biológico. Y no sólo a la fauna, también afecta a los árboles y plantas. La luz artificial puede favorecer el adelanto o retraso de algunos procesos vitales, con el efecto consiguiente para todo el ecosistema. En las ciudades es muy fácil comprobar-

³“Across North America, the estimated number of migrating birds killed annually in collisions with buildings ranges from 100 million to 1 billion birds”. FLAP, Fatal Light Awareness Program

⁴Insect declines and agroecosystems: does light pollution matter?, M. Grubisic, R.H.A. van Grunsven, C.C.M. Kyba, A. Manfrin, F. Höller.

⁵Signaling cascades and the importance of moonlight in coral broadcast mass spawning Paulina Kaniewska, Shahar Alon, Sarit Karako-Lampert, Ove Hoegh-Guldberg, Oren Lev.

lo. Fíjense en los árboles de hoja caduca que están cerca de una farola: es frecuente que aquellas ramas que tienen luz más cerca sigan verdes incluso después del solsticio de invierno.

La disrupción del ciclo circadiano

Los seres humanos no nos quedamos al margen. Sabemos que a lo largo del día varían muchas de nuestras variables fisiológicas, como la tensión arterial o la temperatura. Si nos ponemos el termómetro por la mañana al levantarnos y después al atardecer, podremos comprobar como en condiciones normales el valor más alto lo marcaremos en el segundo caso. Nuestro grado de lucidez también es variable: no somos igual de capaces de resolver problemas complejos a las tres de la mañana que al mediodía. Tampoco somos igual de hábiles al volante o en el manejo de maquinaria sofisticada (el excepcional libro *Why We Sleep* de Matthew Walker da datos espeluznantes sobre el papel del sueño como causa de accidentes o errores fatales).

Hay una larga colección de patologías, algunas muy graves, asociadas a las disrupciones del ritmo circadiano

Hoy conocemos mucho mejor que hace veinte años – pero aún estamos lejos de conocerlos bien– los procesos que rigen esas variaciones diarias. O más bien casi diarias, *circadianas*. Nuestro ritmo propio no se ajusta exactamente al patrón de 24 horas dictado por la rotación terrestre: el reloj biológico central tiende a desfasarse y por eso cada día hay que *ponerlo en hora*, como un reloj al que haya que darle cuerda. Entre los estímulos que facilitan ese ajuste diario el más importante es el ciclo natural de luz.

Un equipo comandado por David Berson, neurocientífico de la Universidad de Brown, publicó en 2002⁶ una

⁶Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, Berson DM, Dunn FA, Takao M.

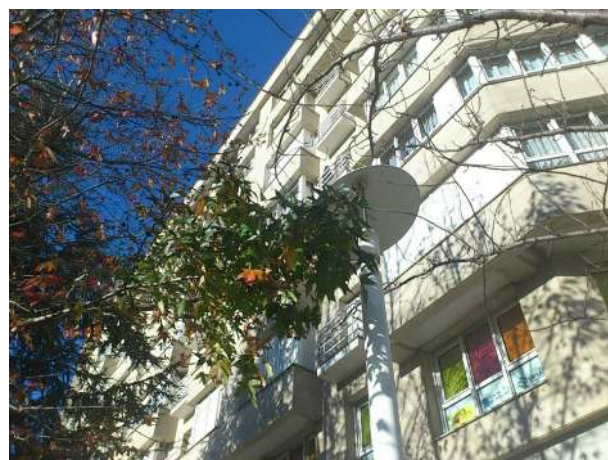


Figura 2: Efecto Farola. Crédito: Martin Pawley

investigación fabulosa en la que revelaba el papel fotorreceptor de unas células específicas en la retina. Además de los conos y bastones, en nuestros ojos tenemos un tercer tipo de células, las llamadas *células ganglionares retinianas intrínsecamente fotosensitivas* (ipRGC), cuya función no tiene que ver con la visión sino con la detección del nivel de luz: le indican de forma directa a una región del cerebro cuánta luz hay para de esa forma saber si nos acercamos al día o a la noche. Eso es fundamental para nuestra puesta en hora y, en consecuencia, para lanzar los procesos fisiológicos que correspondan a cada momento. Por ejemplo, subir o bajar la presión arterial y la temperatura. Tener sueño o estar lúcido. Activar o inhibir la producción de ciertas hormonas, como la melatonina.

El proyecto *Cities at Night* calculó en casi mil millones de euros anuales el gasto en energía para iluminar la noche en España

La exposición casi permanente a la luz manda un mensaje confuso al cerebro. Cae la noche, pero estamos rodeados de farolas y anuncios luminosos que parecen decirle a nuestro cerebro que es de día. Antes de dormir pasamos varias horas pegados a pantallas –televisores, ordenadores o móviles– que producen luz con una componente azul que activa las células ganglionares. No experimentamos el suficiente contraste entre el día y la noche, mejor dicho, entre la luz intensa el día y la oscuridad total de la noche. Y eso no le sale gratis a nuestro cuerpo. Hay una larga colección de patologías, algunas muy graves, asociadas a estas disrupciones del ritmo circadiano.

Una cuestión, también, económica

La contaminación luminosa cuesta cara. No es sólo una licencia poética relativa a su efecto sobre la naturaleza y la salud, es literal: cuesta cientos de millones de euros. El proyecto *Cities at Night* calculó en casi mil millones de euros anuales el gasto en energía para iluminar la noche en España. Entre un 30 y un 50 % podría ahorrarse sin demasiada dificultad simplemente aplicando criterios más sensatos⁷. Bastaría asumir que la luz artificial es un agente contaminante y por lo tanto debe utilizarse **sólo dónde se necesita**, o sea, hacia el suelo, y no proyectada hacia arriba o hacia la ventana de un vecino; **sólo cuando se necesita**, no por igual a todas horas en todas partes, sino teniendo en cuenta el tráfico de personas y vehículos; **con el nivel preciso**, la intensidad requerida para realizar tareas pero nunca más de la necesaria; y **con el espectro adecuado**, optando siempre por fuentes de color cálidas para horario nocturno y descartando las lámparas que producen mucha luz azul, como sucede

⁷El coste total de los quince años de la misión NASA New Horizons, que envió una sonda a Plutón, fue de 600 millones de euros. Fuente: Forbes. Iluminar bien España podría generar cada dos años (o incluso menos) el ahorro preciso para pagar una misión espacial de ese nivel.

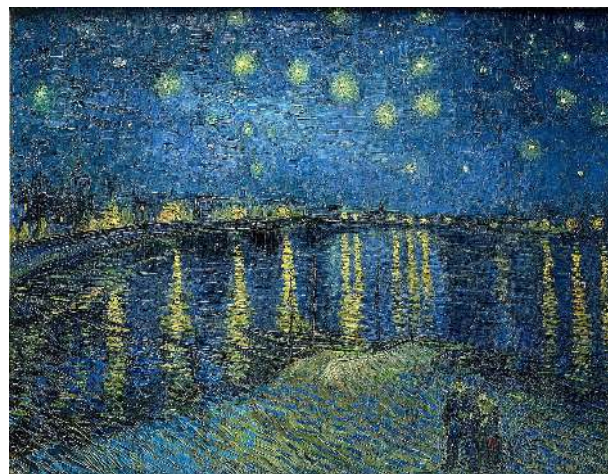


Figura 3: La Noche Estrellada sobre el Ródano. Vincent van Gogh, 1888.

con los LED blanco-azulados que se han instalado masivamente en los últimos años y que en vez de corregir el problema lo han multiplicado.

Un patrimonio cultural en peligro

Vincent van Gogh pintó el cuadro que abre este artículo en junio de 1889 durante su internamiento, voluntario, en el asilo de lunáticos de Saint-Paul, en Saint-Rémy-de-Provence, Francia. Se titula *La noche estrellada*. A su hermano Theo le escribió unos meses antes desde Arles: “Necesito una noche estrellada con cipreses, o quizás sobre un campo de trigo maduro. Hay noches realmente hermosas aquí”⁸. Ya desde el psiquiátrico, en junio, le contaba: “Esta mañana vi el campo desde mi ventana mucho tiempo antes del amanecer, sin nada más que el lucero del alba, que parecía muy grande”⁹. Venus es, en efecto, el punto gordo al lado del ciprés. Obviamente distinguimos la Luna, pero el cielo de Van Gogh es un cielo elaborado desde la memoria, una reconstrucción alucinada de la noche, como nos recuerda Paul Bogard en su imprescindible *The End of Night*.

En *La Noche Estrellada sobre el Ródano* reconocemos el Carro de la Osa Mayor y nos fascina la idea de un cielo estrellado al tiempo que se reflejan las luces de las farolas de gas sobre el río. Nos fascina la idea de que cohabite la luz artificial con la luz natural de las estrellas, que las luces de las farolas no supriman las luces de la noche. Una noche que maravillaba a Van Gogh y que ya no pueden ver los millones de admiradores que peregrinan cada año a diferentes museos para ver sus cuadros. Se ve bien esto en otra célebre pintura, *Terraza de café por la noche*, que pintó en efecto de noche y en ese café. Sobre el café iluminado y sobre la ciudad toda se extiende la noche estrellada. El local ahora se llama *Café La Nuit* y preserva su imagen exterior para gozo de los turistas.

⁸Carta a Theo van Gogh, Arles, 9-04-1889

⁹Carta a Theo van Gogh, Saint-Rémy-de-Provence, 6-06-1889

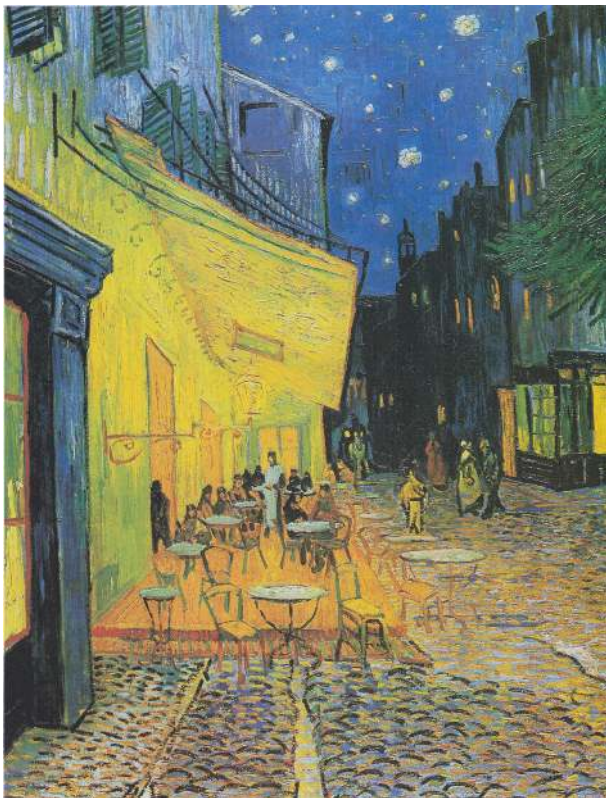


Figura 4: Terraza de café por la noche. Vincent van Gogh, 1888.

Lo que ya no conserva es el cielo nocturno. Faltan las estrellas del pintor del sombrero de malvas.

Los humanos actuales somos descendientes de los primeros Homo Sapiens que pisaron la Tierra hace doscientos mil años y a lo largo de ese tiempo nunca faltó una noche al final de cada día y un día al final de cada noche, y lo mismo sucedió con todos los homínidos que los precedieron. La noche nos hizo sentir miedo porque en ella somos más vulnerables, más aún mientras dormimos, pero también fue nuestra brújula, nuestra guía para movernos por el tiempo y por el espacio. Comprender las reglas de la noche sirvió para que pudiéramos orientarnos, para localizar el punto en el norte (o en el sur) alrededor del cual da vueltas el cielo, para saber dónde nace y donde se pone el Sol (y con él la Luna, los planetas, las estrellas todas). Así aprendimos a desplazarnos por el mundo y descubrir como eran otras tierras. Comprender el cielo sirvió también para conocer el paso del tiempo, para identificar los hechos que se repiten y ser capaces de predecir fenómenos. Los rigores del invierno, la resurrección de la naturaleza en primavera, el calor del verano, el recogimiento del otoño.

Si existe la agricultura es porque aprendimos a identificar los ritmos naturales y a hacerlos nuestros y para eso tuvimos que reconocer el firmamento como espejo de esos ritmos. Fue preciso contar el tiempo por lunas, o por la salida o la puesta del Sol en ciertas posiciones, y luego, con más detalle, por la aparición o no de ciertas estrellas. Elaboramos calendarios gracias a nuestro conocimiento

del cielo. Aprendimos a calcular las horas del día por la posición del Sol y las de la noche por el movimiento de las estrellas.

En las ciudades llamamos noche a ese momento en que no pasan coches y no hay tanto barullo en las calles, pero la noche de verdad es otra cosa. La noche es oscuridad y perder la oscuridad es perder la noche. Llenar de luz artificial la noche, hacer de la noche día, es perder la noche. Y perder la noche es perder a Van Gogh, a Robert Frost y a Díaz Castro, a Walt Whitman o García Lorca. La música, la literatura, las artes plásticas y el cine que encontraron en el cielo nocturno su inspiración. Un conocimiento milenario, un patrimonio cultural transmitido generación tras generación. Es perder, también, la ciencia que emana de la noche, de la observación astronómica, la que nos hizo entender nuestro lugar en el universo. La observación que nos descubrió, de Galileo en adelante, que allá donde pongamos un telescopio las estrellas se multiplican y donde parecía haber una realmente hay miles, luego millones.

Los millones de admiradores que peregrinan cada año a diferentes museos para ver sus cuadros ya no pueden ver la noche que maravillaba a Van Gogh

Midiendo el infinito

Esta mítica fotografía (figura 5) nos recuerda a un grupo de mujeres fascinante, las calculadoras de Harvard, cuyo trabajo laborioso ayudó a sentar las bases de la astrofísica y la cosmología del siglo XX. De pie, la admirable Williamina Fleming, cuyo marido la abandonó, embarazada, al poco de llegar a Estados Unidos desde su Escocia natal. Para sobrevivir buscó trabajo de cualquier cosa y lo encontró como criada en una casa singular, la de Edward Pickering, director del observatorio de Harvard. Pickering



Figura 5: Calculadoras de Harvard. Crédito: Universidad de Harvard.



Figura 6: Planicie de Los Angeles vista desde el Monte Wilson al atardecer (2002). Fuente: Geographer/Wikimedia Commons.

tuvo la habilidad de reconocer el talento de Mina y no tardó en proponerle cambiar su casa por el observatorio. Acabó siendo la jefa de las calculadoras y la primera mujer que ostentó un cargo en el centro, como responsable de la colección de placas fotográficas. Descubrió varias novas, docenas de nebulosas –incluida la nebulosa de la Cabeza de Caballo, una de las joyas del cielo profundo– y cientos de estrellas variables. Pero antes de todo eso fue una inmigrante en tierra extraña, entregada a su suerte, y eso siempre me hace pensar en cuántas williaminas debe haber hoy en el mundo a punto de echarse al mar o de cruzar continentes enteros en busca de un porvenir menos injusto.

El cielo de Monte Wilson ya no vale para hacer ciencia puntera

Al grupo de las calculadoras se incorporó Henrietta Swan Leavitt, que nos dio las claves para calcular la distancia a las estrellas. Mientras estudiaba estrellas variables cefeidas en las nubes de Magallanes se percató de una curiosa relación que hizo notar, en forma de frase inocente, en un boletín de los anales del observatorio: “*It is worthy of notice that in table VI the brighter variables have the longer periods*”. Llama la atención que las variables más brillantes tienen los períodos más largos. El brillo aparente de una estrella depende tanto de las características de esa estrella como de la distancia a que se encuentra, y así una estrella en nuestro cielo puede brillar mucho porque en efecto es muy luminosa o bien porque aún no siéndolo tanto está relativamente cerca. Henrietta Leavitt entendió que el período de pulsación tenía que ser una característica propia de la estrella, de modo que encontrar una relación entre el brillo y el período de variación de brillo nos proporcionaba una información valiosa real y no aparente sobre ese astro. En cuanto se tuviese un valor fiable de distancia a alguna de esas variables cefeidas se podrían comparar unas con otras y extrapolar

valores de distancia para todas las demás. En eso trabajó Ejnar Hertzsprung.

Con ello se abrió un mundo nuevo para el cálculo de distancias. O, literalmente, un universo nuevo. Hace cien años todo el universo conocido cabía dentro de la Vía Láctea. Fue en 1923 cuando Edwin Hubble constató en el observatorio del Monte Wilson, en California, que la nebulosa de Andrómeda era de por sí una galaxia, diferente de la nuestra, cargada a su vez de millones de objetos. Lo consiguió estudiando variables cefeidas en Andrómeda hasta llegar a la conclusión de que estaban demasiado lejos como para pertenecer a la Vía Láctea.

El 80 % de la población mundial vive bajos cielos afectados por la contaminación luminosa

Las últimas estimaciones aseguran que en el universo debe haber entre doscientos mil millones y dos billones de galaxias y entre tantas la nuestra es sólo una más. El universo empezó a crecer en aquel 1923, sobre los hombros de gigantes, en el observatorio de Monte Wilson. Hoy ese observatorio ya no sirve para escrutar el espacio profundo. El cielo de Monte Wilson ya no vale para hacer ciencia puntera porque no es suficientemente oscuro. Como casi todos sus contemporáneos. No es casual que fuesen los profesionales de los observatorios los primeros en lanzar la voz de alarma. Ya en 1973 Merle Walker, del Observatorio Lick, analizó con rigor el empeoramiento notable de la calidad del cielo en los centros de investigación de California y Arizona y lanzaba una premonitoria advertencia final: “El futuro de la astronomía óptica terrestre depende de cuán exitosamente seamos capaces de resolver los problemas paralelos de controlar la contaminación lumínica en nuestros observatorios existentes y de adquirir y proteger adecuadamente los mejores sitios de cielo oscuro que queden¹⁰”. 45 años después podemos decir que, tristemente, no hemos conseguido ninguna de las dos cosas.

Ir al encuentro de la verdadera oscuridad es ahora todo un desafío.

Fabio Falchi, profesor del *Istituto Statale di Istruzione Superiore Galileo Galilei* en Mántova, Italia, investiga en su tiempo libre en el *Istituto di Scienza e Tecnologia dell’Inquinamento Luminoso*. En su tiempo libre, repito. Fabio Falchi es un titán en la lucha por los cielos oscuros. Su investigación y su impulso nos proporcionan una fabulosa herramienta para calibrar el estado real del desastre que es la contaminación luminosa. El Atlas Mundial del Brillo del Cielo, cuya segunda edición se publicó en junio de 2016, nos dice que el 80 % de la población mundial vive bajos cielos afectados por la contaminación luminosa. En España, tres cuartas partes de la población no vemos ya la Vía Láctea. La Vía Láctea que sí veía Díaz Castro en

¹⁰“*The future of ground-based optical astronomy hinges upon how successfully we are able to solve the twin problems of controlling light pollution at our existing observatories and of acquiring and adequately protecting the best remaining dark-sky sites*”, en LIGHT POLLUTION IN CALIFORNIA AND ARIZONA, Merle Walker, Pub. Astron. Soc. Pacific, Volumen 85, Octubre 1973.



Figura 7: Crédito: Riccardo Furgoni.

su juventud en la Terra Chá, en Galicia. Hoy tendría que esforzarse bastante.

En un artículo para el semanario *Sermos Galiza* Marcos Pérez¹¹, director de los Museos Científicos Coruñeses, escribió:

“Al igual que no hay marineros sin mar o naturalistas sin naturaleza, no puede haber astrónomos sin estrellas”.

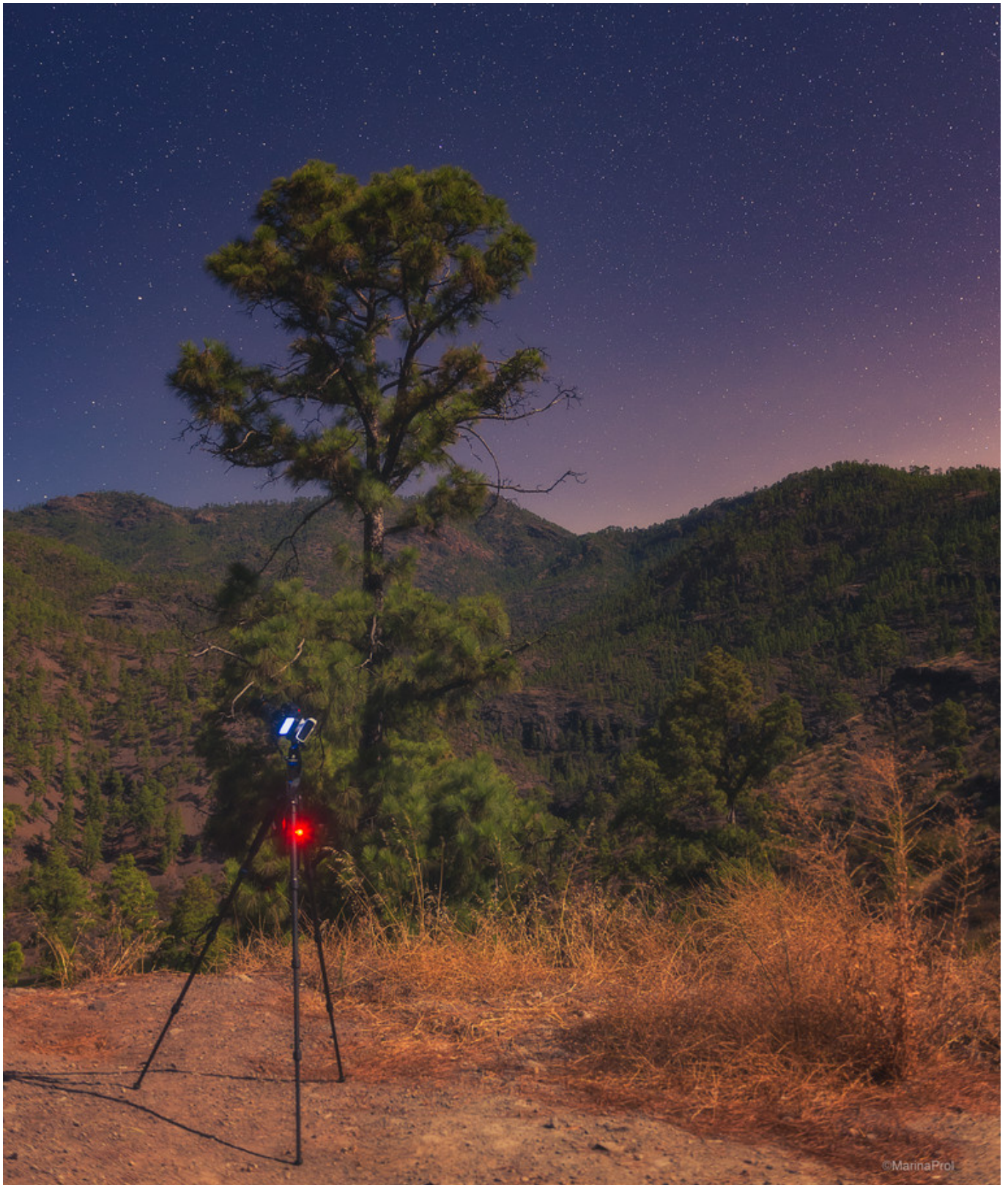
Quizás tampoco haya poetas, cineastas, músicos, artistas plásticos, científicos y científicas de otras áreas cuya curiosidad nació una noche mirando el cielo. Ω

Martin Pawley
martinpawley@gmail.com
Agrupación Astronómica Coruñesa Ío

- Debo insistir en la importancia del ensayo *The End of Night* de Paul Bogard, sumamente inspirador por su reflexión sobre la desaparición de la noche.
- En gallego el excelente libro de divulgación *E fixemos a luz!* de Salvador Bará, editado por el servicio de publicaciones de la Universidad de Santiago de Compostela, incluye un conciso y a la vez completo capítulo sobre contaminación luminosa.
- La IDA, International Dark-Sky Association, es la principal entidad mundial en la lucha contra la contaminación luminosa. Su sitio web está lleno de muy buena información divulgativa. Para quien desee saber (mucho) más, incluyen una base de datos actualizada de artículos científicos.
- En España la asociación de referencia es Cel Fosc.

Lecturas recomendadas

- Las referencias a la pasión astronómica de Robert Frost provienen de un artículo de Charles Laird Callia en la revista *Sky & Telescope*, “*The Astronomy of Robert Frost*”, abril de 2005.
- Sobre contaminación luminosa y salud es más que recomendable el libro “Hicimos la luz... y perdimos la noche” del catedrático de Fisiología de la Universidad de Cantabria Emilio Sánchez Barceló, editado por el servicio de publicaciones de la propia universidad.
- Sobre contaminación luminosa e impacto ambiental hay abundantísima información disponible en Internet. Una buena introducción es “Artificial night lighting and protected lands: ecological effects and management approaches”, escrito por Travis Longcore y Catherine Rich.
- Sobre las calculadoras de Harvard Dava Sobel escribió un libro impagable, editado en España por Capitán Swing, *El Universo de cristal*.



Revelando la oscuridad

Marina Prol | Astrofotógrafa

La astrofotografía cuenta con un número cada vez mayor de apasionados

En los últimos años parece que se ha puesto de moda todo aquello relacionado con la astronomía, astronáutica y ciencia en general. No sé en qué medida han influido en ello tanto las redes sociales como la ficción televisiva y cinematográfica. Probablemente la mezcla de ambos ha hecho que el contenido antes reservado a las mentes más inquietas, ahora esté al alcance de todos gracias al trabajo de los divulgadores científicos.

Algo parecido ha pasado con la astrofotografía. En cuestión de unos pocos años ha aumentado muchísimo el número de fotografías que toman este tipo de imágenes. No hay más que navegar un poco por la redes sociales, especialmente las dedicadas a fotografía, para encontrarse con miles de imágenes de esta temática, mal denominada **#astrofotografía** (¡hasta le pongo la etiqueta!).

La fotografía del cielo nocturno tiene diferentes especializadas. Las clasifico en: fotografía nocturna, astropaisaje y astrofotografía tradicional, cada una de ellas con requisitos y niveles de dificultad diferentes.

La llamada de la noche

Siempre he tenido a las estrellas muy presentes. Ya desde muy pequeña las disfrutaba en casa de mi abuela, cuando pasaba los veranos enteros con ella. Recuerdo observar los cometas Hale-Bopp y el Hyakutake, pero nunca con afán de fotografiarlos. ¡Ojalá pudiera volver atrás en el tiempo!

Años después, en una noche de aburrimiento, quise probar a hacer alguna foto como esas que veía cada vez más frecuentemente por Internet. Subí a la azotea de la casa donde residía en aquel entonces. Se trataba de un cielo suburbano y, tras la primera foto, para mi sorpresa apareció la Vía Láctea. Esa noche comenzó todo.

A día de hoy mi equipo se compone de dos cuerpos de cámara (Nikon D610 y Sony A7s modificada), objetivos que cubren desde los 14 mm a los 600 mm de focal, tres trípodes (aluminio y carbono) y dos monturas de seguimiento (*Polarie Vixen* y *Star Adventurer* de SkyWatcher). Si al principio realizaba principalmente fotografía nocturna sin saber a qué *tirar*, me fui formando y hoy en día tengo claro donde ubicar mi trabajo, ya que cada vez hay menos paisaje y más cielo. Podría decirse que estoy a medio camino entre el astropaisaje y la astrofotografía tradicional.

Fotografía nocturna

La fotografía nocturna no precisa de cielos oscuros, ni despejados siquiera. Son imágenes realizadas durante la noche de paisajes donde el cielo no es el protagonista.

En la fotografía nocturna es común jugar con las luces iluminando objetos o haciendo dibujos de luz con linternas, lana de acero, etc... Los paisajes nocturnos están generalmente iluminados por las luces de las ciudades, en ocasiones por linternas o incluso la luz lunar (del Sol en realidad ;-).



Figura 1: Fotografía nocturna: Roque Nublo y Tenerife. Fuente: Marina Prol.



Figura 2: Fotografía nocturna: Roque Bentaiga. Fuente: Marina Prol.

La fotografía nocturna no es fotografía astronómica. Pero sí que ha conseguido que muchos practicantes se fueran acercando poco a poco al astropaisaje.

Astropaisaje

La categoría de astropaisaje (*astroscope*) considero que es la más extendida por tener menos dificultad técnica y por ser más accesible en cuanto a equipamiento. Únicamente es necesario desplazarse a un lugar relativamente *oscuro*, una cámara y un trípode. En los astropaisajes, se trata de hacer imágenes donde el paisaje y el cielo son, ambos, protagonistas.

Se pueden hacer fotografías de paisajes con un cielo estrellado sin más. Pero también se pueden resaltar constelaciones, hacer rastros de estrellas, incluir a La Luna, capturar conjunciones planetarias, mostrar la Vía Láctea (tanto de verano, con el núcleo de nuestra galaxia, como la de invierno), registrar lluvias de meteoros, u otros fenómenos como auroras boreales y arcos iris lunares y pasos de satélites.

Para mi gusto personal, todo ello debe ser fiel a la realidad. Por otro lado está el *astro-arte*, que se trata de montajes de varios tipos como por ejemplo:



Figura 3: Astropaisaje: Trazas estelares. Fuente: Marina Prol.

- Cielos de hemisferio opuesto al del paisaje en el que se hace el montaje.
- Paisajes con nebulosas gigantes que ocupan toda la imagen.
- Imágenes donde cielo y tierra fueron tomadas en diferentes momentos y/o lugares y con distintas distancias focales, como por ejemplo: una cascada al atardecer en invierno hecha con un gran angular, junto a un cielo del núcleo de la Vía Láctea (de verano) hecho con un teleobjetivo.

Por mi parte, aunque no sean mis imágenes preferidas, no tengo ningún problema con ellas siempre y cuando se explique que se trata de un fotomontaje. El motivo por el que considero importante dejarlo claro, es evitar desengaños y desilusiones en la gente que se acerca a la fotografía y a la astronomía.

Lamentablemente, encontrar cielos oscuros es cada vez más difícil. La contaminación lumínica o luminosa se encuentra en unos niveles alarmantes. Existen estudios que demuestran el efecto nocivo del exceso de luz en flora y fauna. Se empieza a documentar el efecto negativo en los seres humanos, con algunas enfermedades generalmente derivadas de trastornos del sueño por niveles irregulares de melatonina.

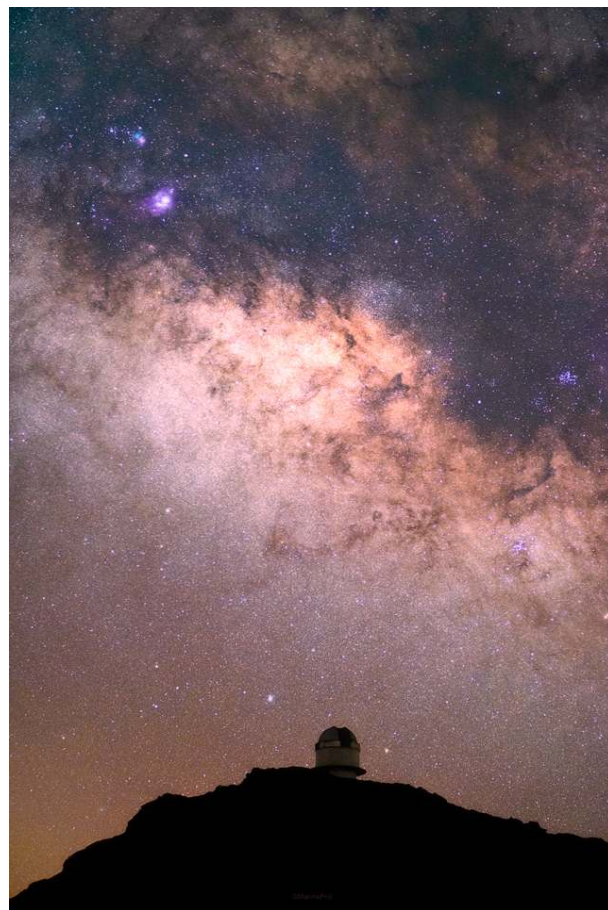


Figura 4: Astropaisaje: La Vía Láctea en el Observatorio del Roque de los Muchachos. Fuente: Marina Prol.

Soy bastante pesimista en cuanto a que realmente podamos conseguir algo en la lucha contra esta lacra de la que muy poca gente es consciente. Incluso es objeto de burla cuando se intenta informar y concienciar a familiares y amigos. Parece que cuesta mucho entender que no se trata de apagar todas las luces, si no de iluminar de manera responsable y eficiente. Lamentablemente los factores económicos envueltos en segundo plano, hacen que se me antoje harto complicado que podamos hacer nada respecto a este asunto. Además, para empeorar las cosas, han llegado los LED, contra los que ni los filtros anti-contaminación luminosa pueden hacer nada.

Por todo ello, para hacer astropaisajes cada vez hay que desplazarse más kilómetros para tener un cielo aceptable. Hasta no hace mucho, en un cielo suburbano se podía disfrutar de un cielo nocturno de calidad suficiente, tanto para fotografía como para visual. Hoy por hoy, hay que desplazarse a lugares casi aislados. Cabe destacar que a mayor altitud, mejor calidad de cielo.

Páginas como <https://www.lightpollutionmap.info> nos ayudan a encontrar lugares más adecuados, aunque hay que tener en cuenta que las mediciones son a nivel del mar.

Astrofotografía tradicional



Figura 5: Astropaisaje: La Vía Láctea sobre La Palma. Fuente: Marina Prol.



Figura 6: Astropaisaje: Arco iris nocturno. Fuente: Marina Prol.

La astrofotografía sólo busca realizar imágenes de objetos celestes. Esto incluye fotografía solar, lunar, planetaria y cielo profundo. Esta última es la más complicada, tanto por el equipamiento como por los conocimientos de lo objetos a fotografiar y el posterior procesado de las imágenes.

En cuanto al instrumental, hablamos ya de telescopios, cámaras (CCD, CMOS e incluso réflex), monturas con se-



Figura 7: Astropaisaje: Meteoro sobre Mogán. Fuente: Marina Prol.



Figura 8: Astropaisaje: Conjunción de planetas y la Estación Espacial. Fuente: Marina Prol.

guimiento, ordenadores conectados a las monturas y generalmente un segundo tubo para el autoguiado, ya que se realizan tomas de varios minutos de exposición con equipos pesados. Sin duda, es la categoría más exigente y requiere una gran inversión en instrumental y en experiencia.



Figura 9: Astropaisaje: Paso de Estación Espacial Internacional. Fuente: Marina Prol.

Material para astrofotografía

Para comenzar a realizar fotografía nocturna, sólo necesitamos una cámara y un trípode. Otras especializadas necesitan más instrumental e inversión.

A pesar de que ya existen cámaras compactas e incluso móviles que pueden tomar largas exposiciones, recomiendo el uso de cámaras réflex, con o sin espejo. Evidentemente cuanto mayor sea la calidad de la cámara, o mejor dicho, de su sensor, mejores resultados obtendremos. Con la cámara, los objetivos de mayor diámetro posible, también facilitarán el trabajo. Aunque no es indispensable, como se tratan de exposiciones relativamente largas, el uso de un disparador remoto (o intervalómetro) nos ayudará a evitar posibles trepidaciones ya que, una vez encuadrada y enfocada la imagen, no se debe tocar la cámara.

El trípode debe ser lo más estable posible, incluso se le puede agregar algo de peso en la columna central, si dispusiera de ella. Hay que tener en cuenta que al agregar peso, deberemos vigilar el viento porque si hubiera mucho, el peso sería contraproducente.

Y aunque no son estrictamente necesarias, cada vez es más frecuente el uso de monturas portátiles de seguimiento. Estas monturas, sobre el trípode, bien alineadas con la estrella Polar (polo norte celeste), nos permiten dar más tiempo de exposición a nuestras fotografías sin que las estrellas salgan movidas. Es un buen accesorio cuando no se disponen de objetivos muy luminosos ya que se pueden hacer exposiciones más largas y conseguir los mismos resultados que con un objetivo más luminoso.

Técnicas

Fotografía sin seguimiento

En el *star-trail*, la huella de la rotación terrestre se muestra en las trazas de las estrellas y en una imagen con seguimiento, el movimiento se aprecia en la tierra. Éste es precisamente el inconveniente principal de este tipo de



Figura 10: Trazas estelares: Cúpula del Gran Telescopio Canarias. Fuente: Marina Prol.

fotografías. Si bien en las trazas de estrellas lo que se persigue es retratar el movimiento, en una imagen con seguimiento se busca lo contrario; una imagen con más tiempo de exposición, pero estética. Para conseguirlo, se toman dos imágenes (como mínimo), una con seguimiento y otra sin. Durante el procesado de las imágenes, se apilan las tomas con y sin seguimiento.

Fotografía con seguimiento

Las monturas de seguimiento hacen girar nuestro equipo a la misma velocidad que la rotación terrestre, por lo tanto el movimiento no se muestra en las estrellas, sino en la tierra. Podría decirse que es lo opuesto a las trazas de las estrellas.

Viendo más allá de lo visible

Recientemente envié mi cámara para realizar la modificación para astrofotografía (o como un buen amigo dice, para realizar una *amplificación*). La modificación consiste en retirar el filtro infrarrojo que viene en las cámaras *normales* y sustituirlo por un filtro de H- α (hidrógeno, elemento más abundante en el Universo). Tras la modificación, el sensor es capaz de registrar muchísima más

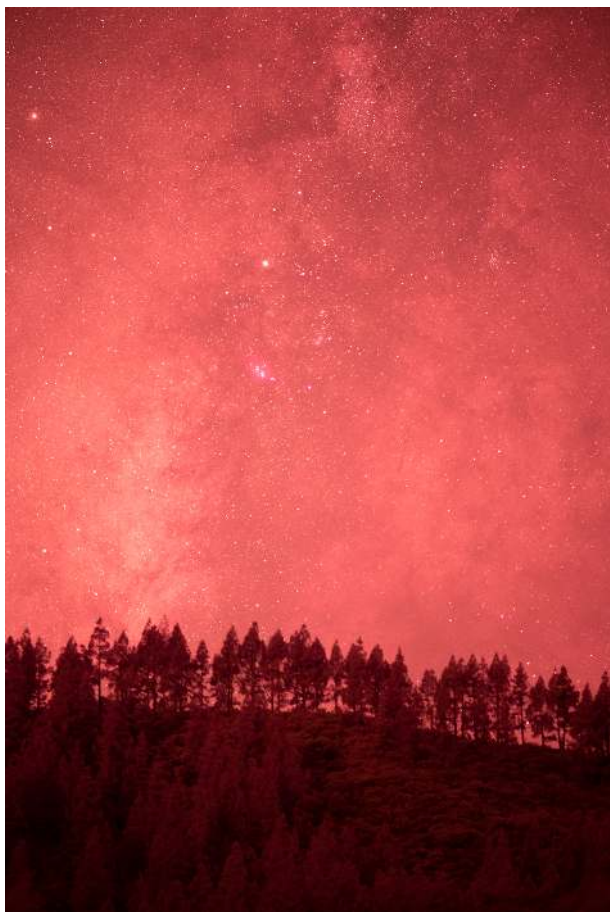


Figura 11: Con cámara astro-modificada. Sin procesar. Fuente: Marina Prol.

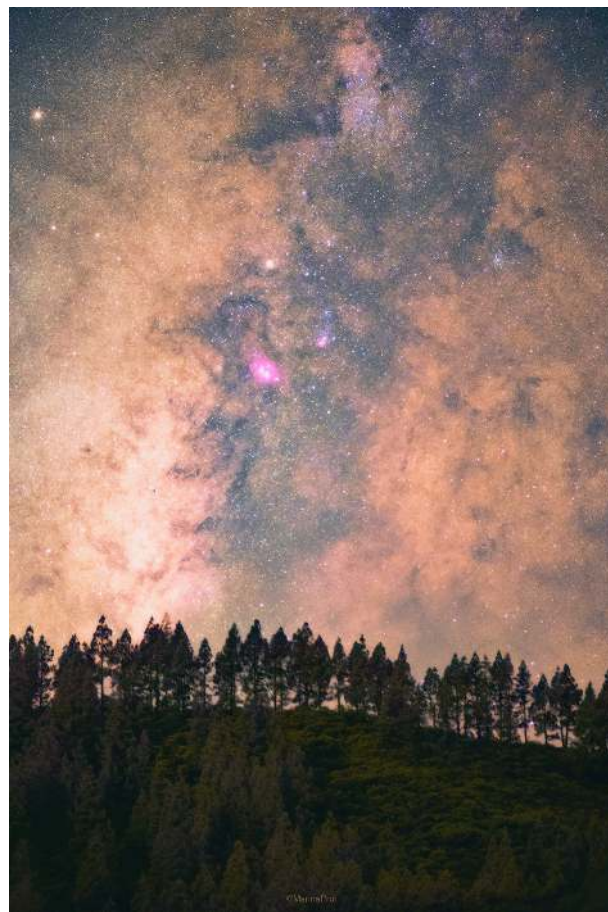


Figura 12: Con cámara astro-modificada. Procesada. Fuente: Marina Prol.

nebulosidad y se abren muchas posibilidades en el astro-paisaje como para cielo profundo.

Mujeres astrofotógrafas

La escasez de tiempo para los aficionados se agrava en los casos de familias, sobre todo con niños y a ello atribuyo el hecho de que no hayan tantas mujeres astrofotógrafas, porque aunque a muchos aún les cueste reconocerlo, vivimos en una sociedad machista y no solo a la hora de repartir las obligaciones familiares, sino también a la hora de reconocimiento.

Aunque ellas ya son muy conocidas, me gustaría igualmente mencionar a algunas astrofotógrafas a las que admiro:

- Maritxu Poyal Viúdez.
- Sara Wager.
- Kerry-Ann Lecky Hepburn.
- Tanja Schmitz.
- Ana @toro_an.



Figura 13: Maritxu Poyal Viúdez

Por mi parte espero poder llegar al nivel de estas grandes mujeres.

Aprendizaje continuo

Para convertirse en un buen astrofotógrafo es necesario estar bien equipado, pero sobre todo tener tiempo y muchas ganas. Los que somos aficionados a menudo tenemos



Figura 14: Sara Wager



Figura 17: Ana @toro_an



Figura 15: Kerry-Ann Lecky Hepburn



Figura 16: Tanja Schmitz

que renunciar a otras actividades para que nos alcancen las horas, por desplazamiento y por trabajo de procesado. Se pasa sueño y frío también, pero los ratos de observación y los resultados bien merecen la pena.

Mis próximos pasos me llevarán a la astrofotografía tradicional, iniciándome en la fotografía de cielo profundo y el aprendizaje de procesado con PixInsight. Espero poder adquirir mi primer telescopio, más pronto que tarde, con la intención de usarlo para visual, pero principalmente para astrofotografía.

Siempre que la calima, las nubes y la Luna lo permitan, estaré con mi cámara, retratando el cielo nocturno. Ω

Marina Prol
www.marinaprol.com

·infoastro·

ASTRONOMÍA DIGITAL