PANORAMA DEL UNIVERSO

VIAJE POR EL MUNDO DE LA ASTRONOMÍA

OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA
INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

PANORAMA DEL UNIVERSO

VIAJE POR EL MUNDO DE LA ASTRONOMÍA

OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA
INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

1ª Edición digital
PANORAMA DEL UNIVERSO: *Viaje por el mundo de la astronomía*

Editado en mayo de 2020

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado
https://cpage.mpr.gob.es

Autoría:
Ver Presentación (página 5)

Edita
© de esta edición, Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2020

Coordinación de la edición:
© Instituto Geográfico Nacional, 2020
Observatorio Astronómico Nacional
Rafael Bachiller

Fotografías de portada:
Telescopio Espacial Hubble

Diseño y maquetación:
Servicio de Edición y Trazado (IGN)
(Subdirección General de Geodesia y Cartografía).

NIPO papel: 798-20-046-3
NIPO digital: 798-20-047-9
DOI: 10.7419/162.14.2020
ISBN: No aplica
Deposito Legal: No aplica

Los derechos de la edición digital son del editor. La difusión electrónica masiva debe hacerse a través de un enlace al apartado correspondiente de la página web oficial.

CNIG: Calle General Ibañez de Ibero, 3
28003 - Madrid (España)
cnig.es
consulta@cnig.es

ÍNDICE

Presentación 5

Prólogo 7

I. De la Tierra al sistema solar 9

II. El nacimiento de la ciencia: la astronomía de la Edad Moderna (s. XVI, XVII y XVIII) 13

III. La astronomía de los siglos XIX y XX: horizontes que retroceden 17

IV. El Sol 23

V. El sistema solar 29

VI. Exoplanetas. 35

VII. Nacimiento, vida y muerte de las estrellas 41

VIII. La Vía Láctea: nuestra galaxia 47

IX. Galaxias en el universo 53

X. Agujeros negros 59

XI. Origen y evolución del universo 65

XII. Astronomía multimensajero 71

XIII. Astronomía espacial. 79

XIV. El universo en radiofrecuencia. 85

XV. Imágenes cada vez más precisas. 91
XVI. Ondas gravitacionales 97
XVII. La radioastronomía en las ciencias de la Tierra 103
XVIII. La astronomía en el IGN: el Observatorio Astronómico Nacional 111
XIX. Actividades y proyectos del Observatorio Astronómico Nacional 117
XX. La astronomía del futuro 125
Bibliografía recomendada 143

Presentación

El Instituto Geográfico Nacional ha coronado 150 años de historia, a través de los que ha ido asumiendo misiones muy diversas. Algunas, como la estadística, la meteorología, el catastro o la metrología ya no forman parte de las actuales, siendo hoy día ejercidas por otros organismos o instituciones especializados bien conocidos. Pero una en particular, que ejercía entonces una institución aún más longeva, se incorporó al IGN para, con todo orgullo, quedarse: la astronomía.

En el año 1904, el entonces denominado Observatorio Astronómico y Meteorológico quedó incorporado al Instituto Geográfico Nacional. Hoy nuestro singular y preciado Observatorio Astronómico Nacional, del que el Real Observatorio de Madrid forma parte, se ocupa de la elaboración y entrega de información oficial en materia de astronomía, la realización de trabajos científicos basados en observaciones de ondas de radio (tanto para la astronomía como para las ciencias de la Tierra) y la conservación del sobresaliente patrimonio científico, histórico y artístico del citado Real Observatorio de Madrid.

Desde ya hace algunas décadas España se ha configurado como una potencia internacional en astronomía. Sin duda se debe al excelente trabajo de todos los actores españoles en dicho ámbito, pero, en particular, a los astrónomos e infraestructuras radioastronómicas del IGN, como el Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), o el Observatorio de Yebes cuyos desarrollos tecnológicos forman parte cotidiana del panorama radioastronómico mundial funcionando en más de 50 países.

Dentro de las disciplinas que forman parte del acervo científico-técnico del IGN, como la geodesia, geofísica, cartografía, observación del territorio, información geográfica y astronomía, es en esta última donde los avances han sido, sin duda, más impactantes. Los descubrimientos conseguidos y sus consecuencias eran, hace pocas décadas, impensables: el big bang, la materia y energía oscuras, el proyecto LIGO, las ondas gravitacionales, los magnetares,… o la primera fotografía de la sombra de un agujero negro.

Este libro conjuga historia e investigación de vanguardia, tal cual lo hace el propio Observatorio Astronómico Nacional. La astronomía ha sido siempre una ciencia atractiva para toda la sociedad —y debo confesar que, en mi caso, una pasión permanente—. Seguramente no solo por las maravillas que nos muestra, sino porque tras ella se esconden las preguntas más trascendentes que puede formularse la Humanidad.

El lector se verá sorprendido tanto por los fenómenos cósmicos que aquí se detallan como por la rica historia del Observatorio Astronómico Nacional, que hoy constituye uno de los centros de investigación más sobresalientes de nuestro país, y al que no cabe otra cosa que un futuro prometedor.

Lorenzo García Asensio

Director General del Instituto Geográfico Nacional

Prólogo

La fascinación que, desde las primeras civilizaciones, ha sentido el ser humano por la observación de los cielos sufrió una primera conmoción con la invención del telescopio por Galileo en 1609, y ha seguido desarrollándose por el posterior perfeccionamiento de los medios de observación, hasta desembocar en nuestros días en la construcción de telescopios gigantes en tierra y de observatorios espaciales. Cada día se producen nuevos descubrimientos sobre el cosmos, confirmando así que, además de ser una de las ciencias más antiguas, la astronomía también es una de las ciencias de mayor actualidad.

En la encrucijada entre la ciencia básica, la alta tecnología y la filosofía, la astronomía estudia el comportamiento de la materia y de las leyes de la física en condiciones extremas, estimula los desarrollos tecnológicos que nos permiten observar astros más débiles y más lejanos, y alimenta nuestra curiosidad por las grandes cuestiones de la humanidad: ¿Cuál es el origen del universo? ¿Estamos solos en el cosmos? ¿Cuál es nuestro destino?

El Observatorio Astronómico Nacional (OAN), desde su creación en 1790, viene participando en la gran aventura científica de la investigación astronómica tanto realizando observaciones, cálculos y estudios encaminados a una mejor comprensión del universo, como contribuyendo a la divulgación de esta ciencia que tanto nos apasiona. El OAN, a su vez, forma parte del Instituto Geográfico Nacional (IGN), institución creada en 1870 que realiza labores técnicas de interés fundamental (elaboración de la cartografía oficial de España, trabajos de geofísica y geodesia, mantenimiento de la Red Sísmica Nacional, etc.), muchas de ellas en conexión con la ciencia o las técnicas astronómicas.

Este pequeño libro supone un nuevo esfuerzo del Observatorio por difundir conocimientos de interés básico en astronomía. Aquí se abordan desde algunos momentos *estelares* en la historia de nuestra ciencia, hasta los descubrimientos más recientes sobre planetas, estrellas, galaxias y agujeros negros. Temas de gran actualidad como el origen de universo, las ondas gravitacionales, los exoplanetas, etc., también encuentran un lugar importante en estas páginas. Finalmente, también prestamos atención a las actividades desarrolladas por el IGN en relación con la astronomía.

Esta edición fue elaborada entre marzo y mayo de 2020, durante los terribles días de la pandemia de Covid-19, cuando todo el personal del Observatorio estuvo desempeñando su labor en modo de teletrabajo. En tanto que director del OAN, me correspondió redactar el último capítulo y revisar todas las contribuciones realizadas, muy profesionalmente, por los astrónomos y astrónomas del Observatorio: Drs. Javier Alcolea, Tomás Alonso Albi, Valentín Bujarrabal, Asunción Fuente, Santiago García Burillo, Miguel Gómez Garrido, Pere Planesas, Miguel Querejeta, Pablo Rivière, María Sánchez Ramos, Miguel Santander, Rebeca Soria, Mario Tafalla, Belén Tercero, Antonio Usero y Pablo de Vicente (director del Observatorio de Yebes). Deseo resaltar especialmente la participación de María Sánchez Ramos en la organización del trabajo y la excelente maquetación de Eduardo Barroeta Pineda y Adolfo Pérez Heras.

Aunque modesta, esta obra es una muestra más de la capacidad del OAN para trabajar en equipo y lograr un objetivo común. Me siento privilegiado por haber contribuido a esta tarea y, sobre todo, por estar al frente de esta magnífica institución.

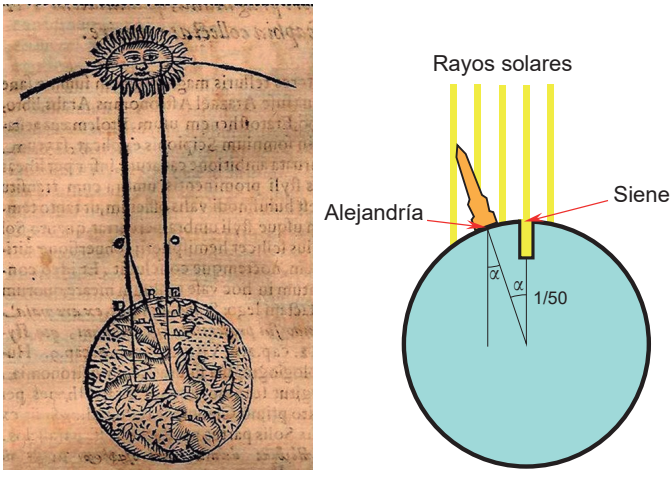
Rafael Bachiller

Director del Observatorio Astronómico Nacional
31 de mayo de 2020

I. De la Tierra al sistema solar

La primitiva idea de un mundo plano limitado por una bóveda estrellada dejó paso, hace unos 25 siglos, a la de una Tierra esférica situada en el centro de un universo que podía analizarse con las matemáticas y la física.

El establecimiento de un modelo explicativo del universo que permitiera además predecir los fenómenos astronómicos estimuló el esfuerzo de astrónomos babilónicos y griegos durante siglos. Esta descripción del universo culminó con Claudio Ptolomeo, quien sintetizó y sistematizó los resultados de sus predecesores.

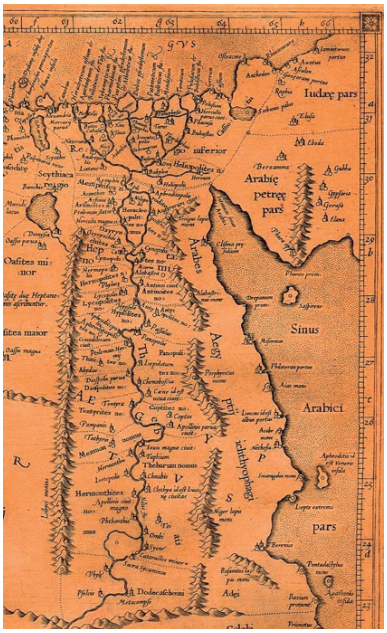


Medida por Eratóstenes del tamaño de la Tierra, tal como parece ilustrada en un libro del siglo XVI.

Biblioteca del OAN, Madrid

El tamaño de la Tierra

En el mediodía local del solsticio de verano, el Sol pasa prácticamente por la vertical de Siene (la actual Asuán), iluminando el fondo de los pozos. En tal momento, un palo vertical (gnomon) no da sombra en Siene pero sí en Alejandría, ciudad situada más al norte y casi en el mismo meridiano. Eratóstenes de Cirene midió el ángulo de esta sombra (1/50 de círculo) y, adoptando una distancia de 5.000 estadios entre ambas ciudades, obtuvo una circunferencia de la Tierra de 250.000 estadios. Tomando la longitud de un estadio como 157,5 m se obtiene un diámetro terrestre muy próximo al valor real de 12.742 km.



Mapa de Egipto según aparece en la edición de 1605 de la Geografía de Claudio Ptolomeo editada por Gerardo Mercator.

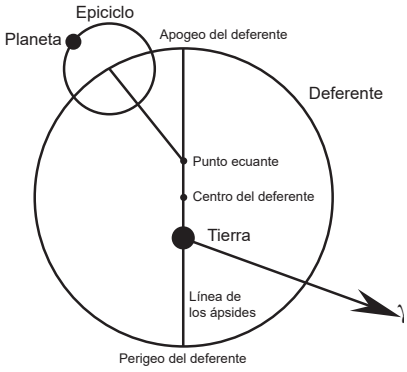
Biblioteca del OAN.

El movimiento de los planetas

Claudio Ptolomeo, siguiendo los pasos de Apolonio de Perga e Hiparco de Nicea, describió tal movimiento como una órbita circular (epiciclo) alrededor de un punto que a su vez sigue una órbita circular (deferente) descentrada (ecuante) alrededor de una Tierra fija. Este modelo, muy complejo, fue sustituido catorce siglos después por uno mucho más simple: el sistema heliocéntrico de Nicolás Copérnico.

Las *Tablas alfonsíes* (siglo XIII), calculadas en la corte de Alfonso X el Sabio, presentan el sistema ptolemaico en forma de tablas que permiten

Claudio Ptolomeo fue un astrónomo, geógrafo y matemático que vivió en Alejandría en el siglo II.



calcular las posiciones del Sol, la Luna y los planetas. Inicialmente distribuidas en forma de copias manuscritas y posteriormente en ejemplares impresos, constituyeron las tablas astronómicas de referencia en Europa hasta el siglo XVII.

La distancia al Sol

El astrónomo griego Aristarco de Samos es conocido por haber sido el primero en proponer que la Tierra se mueve alrededor del Sol, según relata Arquímedes. Aristarco también defendía, como Heráclides de Ponto, que la Tierra gira sobre sí misma en lugar de hacerlo la esfera de las estrellas. También concibió el primer procedimiento para conocer la distancia y el tamaño del Sol y de la Luna. Su método geométrico para determinar la distancia al Sol en términos de la distancia a la Luna consistía en determinar el ángulo entre la Luna y el Sol vistos desde la Tierra en el instante del cuarto creciente, momento en que las posiciones de los tres astros delimitan un triángulo rectángulo. Además, comparó el tamaño de la Tierra con el de la Luna aprovechando un eclipse lunar. Su conclusión fue que el Sol está mucho más alejado que la Luna y que es mayor que la Tierra.

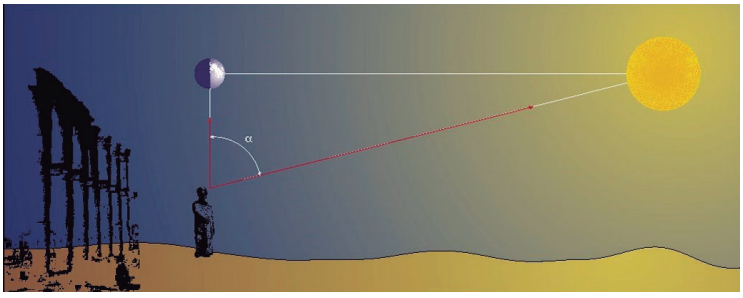


Gráfico ilustrativo del método de Aristarco de Samos para determinar la distancia al Sol, basado en medir el ángulo α.

Los primeros observatorios modernos

La astronomía floreció en el mundo islámico a partir del siglo VIII. El tratado *Almagesto* de Ptolomeo fue la base de sus estudios. Los astrónomos adaptaron la astronomía griega a sus necesidades, introduciendo innovaciones matemáticas y mejorando algunos parámetros mediante observaciones. Estas se realizaron en los primeros observatorios astronómicos modernos, fundados a partir del s. IX. Se trataba de instituciones, financiadas por un gobernante, que disponían de instrumentos (cuadrantes, astrolabios), una biblioteca y un personal (astrónomos y matemáticos) dedicado a la observación astronómica sistemática, la investigación y la enseñanza. Con sus estudios trataron de mejorar las teorías en que se sustentaban los cálculos y con sus observaciones, los parámetros observacionales de éstas a fin de calcular efemérides más precisas, que publicaban en forma de tablas (*Zij*).

Los observatorios más destacados fueron el de Maragha y el de Samarcanda. El gran observatorio de Maragha (Irán), el más famoso y elaborado del Islam medieval, fue dirigido por el persa Nasir al-Din al-Tusi y sus instrumentos fueron construidos por el sirio Mu'ayyad al-Din al-Urdi, dos de los astrónomos más relevantes del Islam. Estuvo operativo durante varias décadas en la segunda mitad del s. XIII, siendo posiblemente la institución científica más avanzada de la época, en la cual se originó una tradición de modelos astronómicos distintos del ptolemaico, que pudieron llegar a influir en los trabajos de Nicolás Copérnico siglos después.

El observatorio de Samarcanda (Uzbequistán), inspirado en el de Maragha y activo un par de décadas en el s. XV, fue fundado por el sultán Ulugh Beg, considerado el astrónomo observador más importante de su siglo. En su observatorio se compilaron tablas y se confeccionó el primer catálogo estelar desde el de Ptolomeo. En su madrasa (escuela) se formaron decenas de astrónomos y matemáticos, algunos de los cuales posteriormente llevaron sus conocimientos a otros lugares, como Constantinopla y la India mogol.

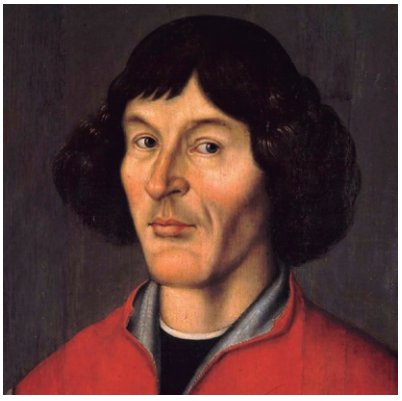
Instrumentos, biblioteca y astrónomos trabajando en el Observatorio de Constantinopla, fundado por el astrónomo y erudito Taqi al-Din (s. XVI).

II. El nacimiento de la ciencia: la astronomía de la Edad Moderna (s. XVI, XVII y XVIII)

El Renacimiento marca el fin de la Edad Media y el comienzo de la Edad Moderna. Se produce entonces una profunda transformación de las ideas. En la ciencia, y en la astronomía en particular, la llegada del Renacimiento supone el final de una época de profundo letargo en Europa y el comienzo de un período de gran actividad, que sentará las bases para la transformación de la astronomía en una ciencia moderna.

El siglo XVI: Copérnico y Brahe

Coincidiendo con la muerte de Nicolás Copérnico, en 1543, se publica su gran trabajo, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, donde expone las pruebas matemáticas de su nuevo sistema del mundo. El sistema copernicano sitúa el Sol en el centro del universo y a la Tierra y al resto de los planetas girando alrededor de él. Este modelo contradice el viejo sistema ptolemaico, que seguía siendo la doctrina oficial de la Iglesia de Roma, un sistema que colocaba a la Tierra en el centro del universo y al Sol, la Luna y el resto de los planetas girando alrededor de ella.



Retrato de Nicolás Copérnico (1473-1543). Museo del Distrito, Torun, Polonia.

El sistema copernicano representa un avance frente al modelo anterior, pero no es totalmente satisfactorio. Los movimientos de los planetas siguen siendo com-

plejos y surge el problema de la paralaje: si la Tierra se mueve alrededor del Sol y las estrellas permanecen fijas, es porque estas tienen que ser mucho más lejanas que el resto de los cuerpos celestes, lo que resultaba simplemente inaceptable en la época. Tycho Brahe, el mejor observador de la época y fundador de los observatorios de Uraniborg (1576) y Stjerneborg (1584), adopta un modelo mixto, en el cual los planetas giran alrededor del Sol, pero este y la Luna giran alrededor de la Tierra, que permanece fija. No obstante, la mayor aportación de Brahe a la astronomía será la gran cantidad de observaciones astronómicas, muy precisas, que realizó a lo largo de su vida.

Tycho Brahe (1546-1601) observando con su gran cuadrante mural.

Museo Whipple de la Historia de la Ciencia, Universidad de Cambridge; Biblioteca Británica, Londres.

El siglo XVII: Kepler y Galileo

En 1601, Johanes Kepler hereda la enorme base de datos observacionales compilada por Brahe. Esto le permitirá formular entre 1609 y 1619 sus famosas tres leyes del movimiento de los planetas. El Sol se sitúa finalmente en el centro del universo y los planetas dan vueltas en torno a él siguiendo unas trayectorias elípticas. Todos estos descubrimientos estaban basados en observaciones hechas a simple vista.

En 1609 se produce la mayor revolución de la historia de la astronomía, cuando Galileo Galilei usa un catalejo de su construcción a modo de telescopio. Con él descubre los cuatro grandes satélites de Júpiter, la existencia de los cráteres de la Luna y las fases de Venus. Galileo es además un firme defensor del sistema copernicano, lo que provoca su enfrentamiento con el Papa Urbano VIII, siendo obligado a retractarse de sus ideas ante el Tribunal de la Santa Inquisición.

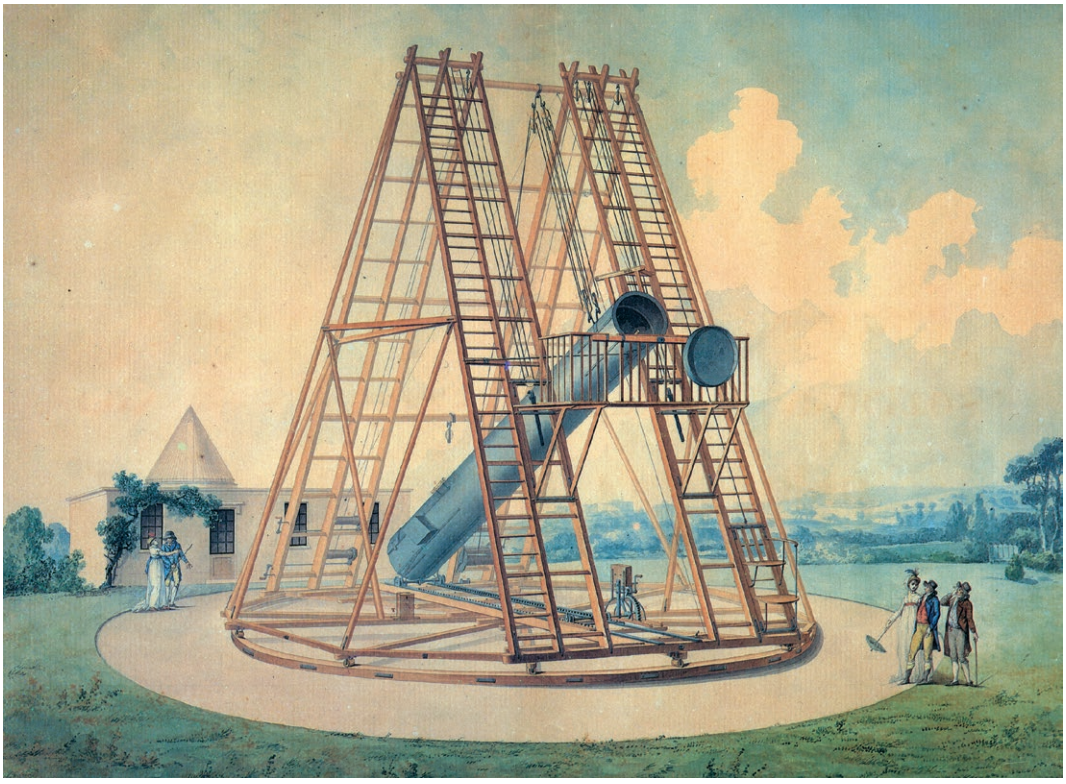
El siglo XVIII: Newton y Herschel

Las leyes de Kepler describen correctamente el movimiento de los planetas, pero no indican el porqué de este movimiento. Ya Galileo había hecho notar que cualquier cuerpo en ausencia de perturbaciones debe permanecer en reposo o conservar un movimiento rectilíneo con velocidad uniforme. Las leyes de Kepler implicaban que debía haber una fuerza que obligase a los planetas a seguir sus trayectorias elípticas alrededor del Sol. La explicación la dará Isaac Newton al formular la ley de Gravitación Universal en su *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687).

En 1766 el músico alemán William Herschel emigra a Inglaterra. Su afición por la astronomía le lleva a construir un telescopio de 7 pies de largo (2,1 m), con el que en 1781 descubre Urano, el primer planeta descubierto desde la Antigüedad, un planeta que no es visible a simple vista. Este hallazgo le permite dedicarse por completo a la astronomía: durante su carrera como insigne astrónomo destacan sus estudios sobre las nebulosas, la Vía Láctea y las estrellas dobles. Y son sus novedosas ideas sobre la construcción de telescopios (que siguen un diseño realizado por Newton) las que le permiten erigir los primeros grandes telescopios reflectores, usando espejos metálicos que él mismo pule.

Telescopio similar a aquél con el que W. Herschel descubrió Urano.

OAN, Madrid.

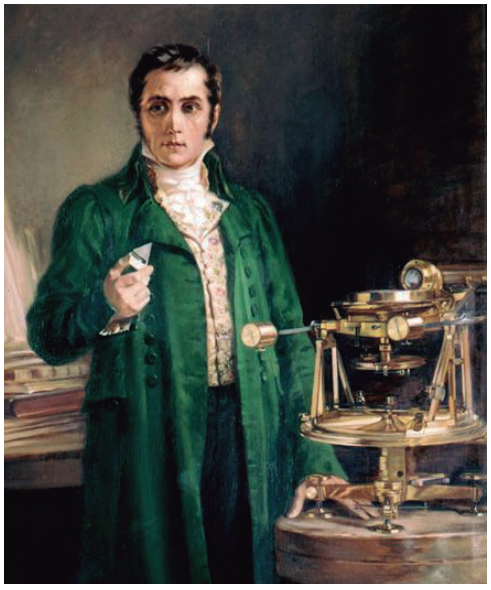


Telescopio de 25 pies de longitud construido por W. Herschel por encargo de Carlos IV para el Real Observatorio Astronómico de Madrid, según una acuarela de la época.

OAN, Madrid.

III. La astronomía en los siglos XIX y XX: horizontes que retroceden

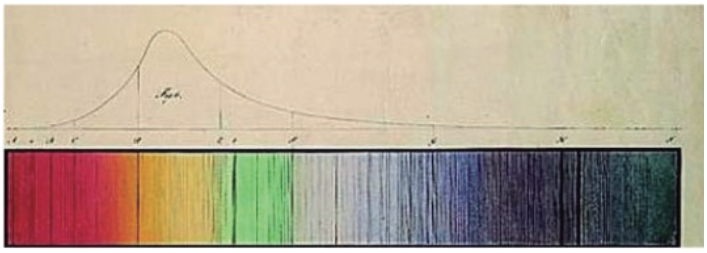
Las nuevas tecnologías desarrolladas en los siglos XIX y XX (fotografía, fotometría, espectrografía), así como la construcción de grandes telescopios ópticos, permitieron durante el siglo pasado la observación de la primera galaxia externa. Esto cambió radicalmente nuestra imagen del universo, que resultaba estar constituido por galaxias como la nuestra, la Vía Láctea. El nacimiento de la radioastronomía constituyó un nuevo golpe para la vanidad humana. Por primera vez se conocieron las dimensiones reales de la Galaxia. El Sol, hasta entonces considerado el centro de la Galaxia, era una estrella situada a 26.700 años luz ($2{,}5 \times 10^{17}$ km) del centro galáctico: una pequeña estrella anodina situada en las regiones periféricas de una galaxia de tantas.



Joseph Fraunhofer (1787-1826).

Nacimiento de nuevas tecnologías en el siglo XIX

En 1814, en experimentos encaminados a corregir las aberraciones cromáticas de sus telescopios, Joseph Fraunhofer detectó centenares de líneas verticales y oscuras en el



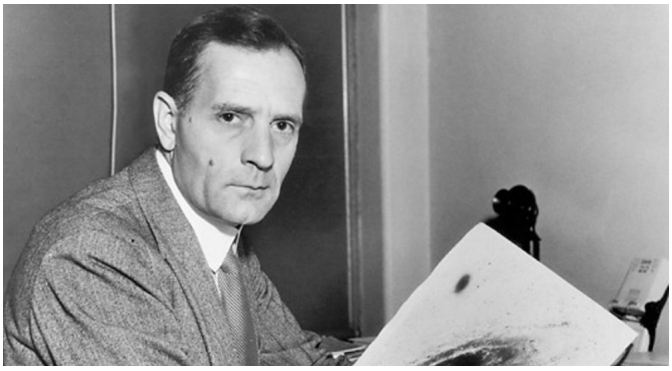
Espectro solar obtenido por Fraunhofer.

espectro del Sol. Denominadas *líneas de Fraunhofer*, su detección supone el comienzo de la espectroscopía en astronomía. Aunque Fraunhofer nunca lo supo, sus líneas son producidas por la emisión o absorción de luz a determinadas longitudes de onda por los diferentes elementos químicos que constituyen las estrellas.

Estas líneas, denominadas *espectrales*, se ven afectadas por las propiedades físicas y químicas de la materia, y gracias a ello se puede realizar (¡a distancia!) el estudio de la composición y características individuales de los diferentes astros. Gracias al invento de la fotografía, al desarrollo de la fotometría y al análisis espectral de la luz que nos llega de los astros, la segunda mitad del siglo XIX da a luz una nueva rama de la astronomía: la astrofísica.

El nacimiento de la astronomía extragaláctica

A principios del siglo XX el universo conocido se reducía a nuestra galaxia, la Vía Láctea. Aunque varios astrónomos defendían la teoría de la existencia de otros *universos isla* expuesta por Kant y seguida por Herschel, no se tenían pruebas que confirmasen tales ideas. Sin embargo, el desarrollo de grandes telescopios ópticos a principios del siglo XX permitió el descubrimiento de la primera galaxia externa y, por tanto, el nacimiento de la astronomía extragaláctica.



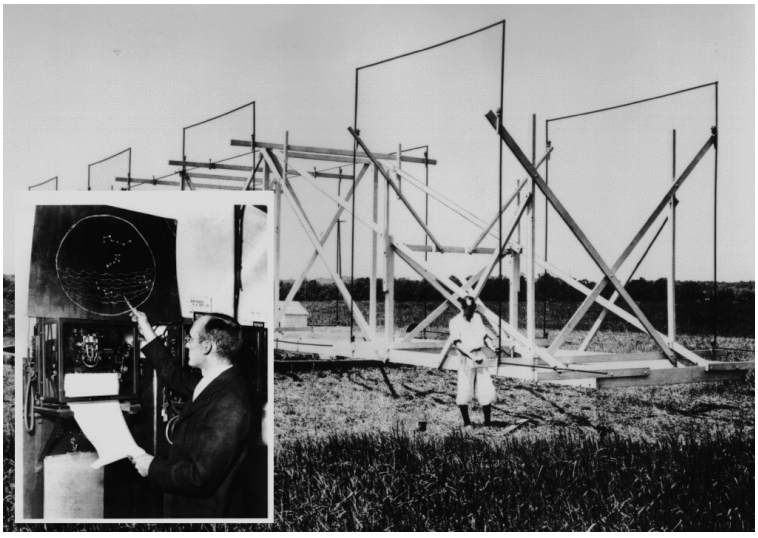
Edwin Hubble (1889-1953).

La primera identificación de una galaxia diferente de la Vía Láctea fue realizada por el astrónomo Edwin Hubble en 1924. Hubble trabajaba en el observatorio de Monte Wilson (EE.UU.) tomando y analizando fotografías de amplias regiones de cielo (fotografía de gran campo). El día 19 de febrero de 1924, escribió a Harlow Shapley: «Seguramente le interesará saber que he hallado una [estrella] variable cefeida en la nebulosa de Andrómeda». Esta detección revelaba la presencia de otras galaxias en el espacio, rebatiendo la idea de Shapley de una única galaxia, la nuestra, como constituyente del universo entero.

Los inicios de la radioastronomía

La primera detección astronómica a longitudes de onda radio (concretamente a una longitud de onda de 14,6 metros) fue realizada por Karl G. Jansky en 1931. Jansky era un físico de los Laboratorios Bell Telephone que construyó una antena para estudiar la dirección de la que provenían las interferencias en las comunicaciones realizadas por ondas de radio. Con esta antena detectó una emisión de origen desconocido procedente de un punto que se movía en el cielo periódicamente con un período de casi 24 horas. Fue en 1935 cuando Jansky identificó esta emisión como procedente del centro de la Vía Láctea, convirtiéndose en la primera observación radioastronómica. En 1937 el ingeniero Grote Reber construyó la primera antena parabólica y realizó el primer mapa de emisión radio de la Galaxia.

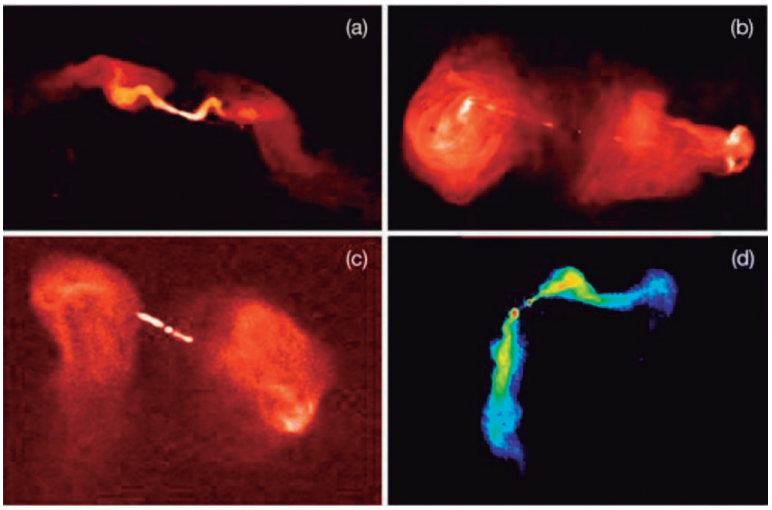
En 1951 H. I. Ewen y E. M. Purcell, de la Universidad de Harvard, detectaron, a 21 centímetros de longitud de onda, la línea de emisión del hidrógeno atómico (HI), el elemento químico



Antena de Karl Jansky, 1905-1950.
NRAO.

más abundante del universo. Gracias a este descubrimiento se pudo determinar por primera vez la estructura espiral de nuestra galaxia, así como el movimiento de rotación de la misma. Las observaciones del HI también han permitido, y siguen permitiendo actualmente, la determinación de la morfología y movimiento de rotación de otras galaxias.

En 1953 se identificó la primera radiogalaxia, un astro muy intenso en ondas de radio que se correspondía con una galaxia elíptica gigante. Se denomina radiogalaxia a una galaxia que posee una potente emisión en ondas de radio, comparable a la potencia que emite en forma de luz visible. Tal radiación proviene del núcleo de la galaxia, de un par de chorros de plasma que emergen de dicho núcleo y de un par de regiones difusas, en general mucho más extensas que la propia galaxia visible, a las que apuntan dichos chorros.



Cuatro radiogalaxias observadas en longitudes de onda centimétricas: (a) 3C31, (b) 3C353, (c) 3C288 y (d) 3C465.

NRAO/VLA.

El universo en expansión

A principios del siglo XX, Albert Einstein propuso su Teoría General de la Relatividad en la que se deduce que el universo se encuentra en expansión, unas ideas que fueron desarrolladas por el sacerdote belga Georges Lemaître. Sin embargo, esta teoría no era compatible con la idea, que estaba generalizada entonces, de un universo estático.

En 1929, fue Edwin Hubble quien, al medir la distancia a 25 galaxias, encontró una correlación directa entre su distancia y el grado de corrimiento hacia el rojo de sus líneas espectrales o, en otras palabras, la velocidad con la que se alejan de nosotros. Esta correlación se conoce como *ley de Hubble-Lemaître* y constituye una prueba irrefutable de la expansión del universo.

Imagen profunda del universo, conocida como Hubble ultra-deep field (HUDF), obtenida con la cámara ACS del telescopio espacial Hubble a principios del siglo XXI. En esta porción del cielo, que ocupa el 1% de la superficie angular de la Luna, se aprecian unas 10.000 galaxias de diversos tamaños, formas y colores. Algunas de ellas ya existían solo 1.000 millones de años tras la Gran Explosión, el Big Bang.

NASA/ESA/HDF.

A finales del siglo XX, el telescopio espacial Hubble observó una pequeña región del cielo (el ángulo sólido que cubre una moneda de 10 céntimos de euro a una distancia de 23 metros) durante suficiente tiempo como para detectar objetos 4.000 millones de veces más débiles (de magnitud 30) que los que puede detectar el ojo humano. Esta imagen se llama *Hubble Deep Field* (HDF). El resultado fue sorprendente. En esta pequeña región del cielo se detectan millares de galaxias en diferentes estados evolutivos. Basándose en la ley de Hubble-Lemaître, los astrónomos han podido hallar la distancia, edad y composición de estas galaxias, algunas situadas a 10.000 millones de años luz de distancia.

La influencia de la nueva física

El inicio del siglo XX no solo vio el nacimiento de la teoría de la relatividad, sino también el de la mecánica cuántica y el desarrollo de la física atómica y de la física nuclear, las cuales transformarían el modo en que algunas observaciones astronómicas eran planeadas e interpretadas y cómo los fenómenos astronómicos eran estudiados y modelados. En definitiva, impulsaron la astrofísica, es decir la aplicación de todos los aspectos de la física (leyes y métodos) al estudio de las propiedades y los fenómenos que se dan en los astros y en sus entornos.

Nebulosa Trífida (M20) compuesta por una nebulosa de emisión (en rojo), una de reflexión (en azul) y nebulosas oscuras.

Adam Block/Mount Lemmon/University of Arizona.

En las primeras décadas del s. XX se empezaron a estudiar los procesos que tienen lugar en el interior de las estrellas, tanto las reacciones nucleares de fusión que las proveen de su fuente de energía como los procesos de transferencia de dicha energía desde su núcleo hasta la atmósfera. Los espectros de las atmósferas permitieron, gracias a la física atómica, conocer su composición química. También se empezó a abordar el tema de la evolución de las estrellas e incluso del fin de algunas de ellas en forma de explosión de supernova. Y se desarrollaron las primeras teorías sobre estrellas de constitución extrema, como son las densas enanas blancas y las aún más densas estrellas de neutrones, cuya importancia se conocería décadas después.

La espectroscopía permitió también conocer la naturaleza de distintos tipos de nebulosas (de emisión, de reflexión, planetarias), mediante el análisis de la composición y condiciones físicas del gas ionizado que las constituye. Además, se descubrió la existencia de materia difusa neutra entre las estrellas, que no está compuesta solo por átomos, sino también por moléculas sencillas (CH, CN) y por diminutas partículas sólidas que llamamos polvo interestelar.

Fue esa también la época en que se construyeron los primeros grandes telescopios reflectores, que permitirían medir emisiones más débiles y estudiar astros más lejanos. Lo que se estaba revelando no era más que la punta del iceberg de la gran variedad de astros y fenómenos que se han ido descubriendo a lo largo de los últimos cien años. De todo ello tratan los capítulos que siguen.

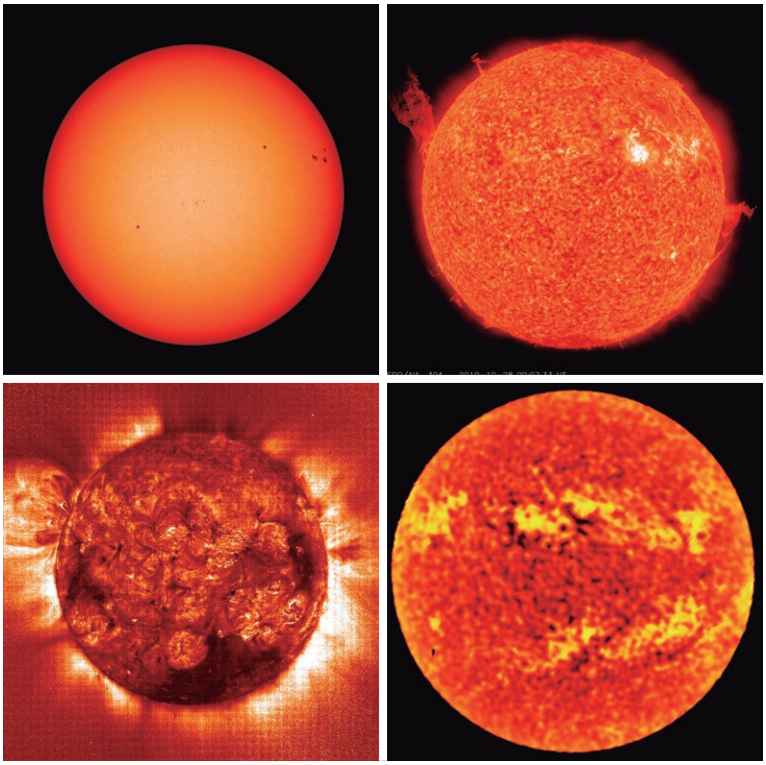
IV. El Sol

El Sol, al igual que muchas otras estrellas, es una esfera de gas muy caliente. Esta gran masa gaseosa está compuesta fundamentalmente de hidrógeno (70%), helio (28%) y de otros elementos más pesados que representan un 2% de su masa. La energía solar se genera por varios procesos de fusión nuclear. Mediante el más importante de estos procesos, los núcleos de átomos de hidrógeno se combinan entre sí para dar lugar a átomos de helio. Gracias a estos mecanismos, el astro rey produce su energía luminosa, la cual sustenta casi todas las formas de vida de nuestro planeta a través de la fotosíntesis. El valor de la distancia media del Sol a la Tierra adoptado por la Unión Astronómica Internacional asciende a 149.597.870 kilómetros; esta unidad de longitud, que sirve de referencia en astronomía, es conocida como unidad astronómica (UA).

En términos astronómicos y en el contexto de las otras estrellas, el Sol está clasificado como una estrella enana amarilla de tipo espectral G2 y de la secuencia principal, esto es, con clase de luminosidad V. El Sol se formó hace unos 4.600 millones de años y, con una magnitud aparente de -26,74, es el objeto más brillante del cielo visto desde la Tierra.

Estructura del Sol

Para que una estrella sea estable ha de estar en equilibrio, es decir, la energía que produce debe ser igual a la energía que emite. Como hemos visto, la principal fuente de energía en el Sol es la fusión nuclear, energía que es transportada a las capas más externas mediante los mecanismos de radiación y convección. Los procesos de radiación son los fotones emi-



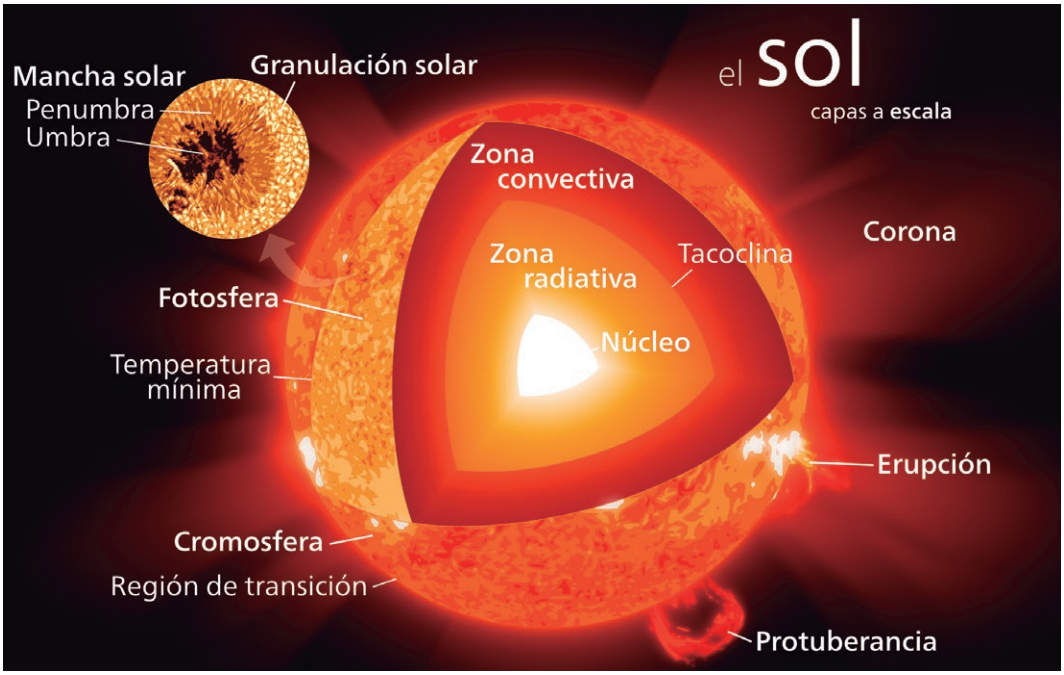
Imágenes del Sol en diferentes longitudes de onda. De arriba abajo y de izquierda a derecha: En el visible, ultravioleta , rayos X y radio

ESA/NASA/ESO.

tidos por el Sol, y los convectivos son debidos a movimientos de material en su interior. De la misma forma, dos fuerzas principales actúan en esta estrella: la contracción debida a la gravedad y la presión de la radiación.

El Sol se caracteriza por una estructura en capas esféricas concéntricas o *de cebolla*. Cada una de ellas, al igual que ocurre en la Tierra, se encuentra a una temperatura diferente y tiene unas características especiales. Un modelo de estructura solar ampliamente aceptado, que explica de forma satisfactoria muchos de los fenómenos que se han observado, incluye las regiones siguientes: el núcleo, las zonas radiativa y convectiva, la fotosfera, la cromosfera y la corona. Veamos una breve descripción de cada una de ellas.

El núcleo: el núcleo del Sol es la región en la que se produce toda la energía solar mediante las reacciones nucleares, favorecidas por la temperatura y densidad extremadamente elevadas. Existen dos posibles mecanismos para producir un núcleo de helio a partir de cuatro núcleos de hidrógeno: las cadenas protón-protón (que proporciona la mayor parte de la energía solar), y el ciclo CNO (que genera algo menos del 10% de la energía solar).



Modelo de estructura solar donde se aprecian las diferentes capas: el núcleo, zonas radiativa y convectiva, fotosfera, cromosfera y corona.

NASA.

La zona radiativa: es la región exterior al núcleo, donde el transporte de la energía se produce en forma de radiación. Los fotones viajan así desde el núcleo hacia las regiones externas. Se calcula que un fotón puede tardar alrededor de un millón de años en llegar a la superficie; esto es debido a que esta zona radiativa es ionizada y densa, por lo que un fotón es absorbido y reemitido numerosas veces en su camino hacia el exterior.

La zona convectiva: en esta zona el transporte de la energía se produce por convección. Este mecanismo produce simultáneamente corrientes ascendentes y descendentes de material, gas caliente, desde las regiones internas, más calientes, a las regiones externas, más frías y viceversa.

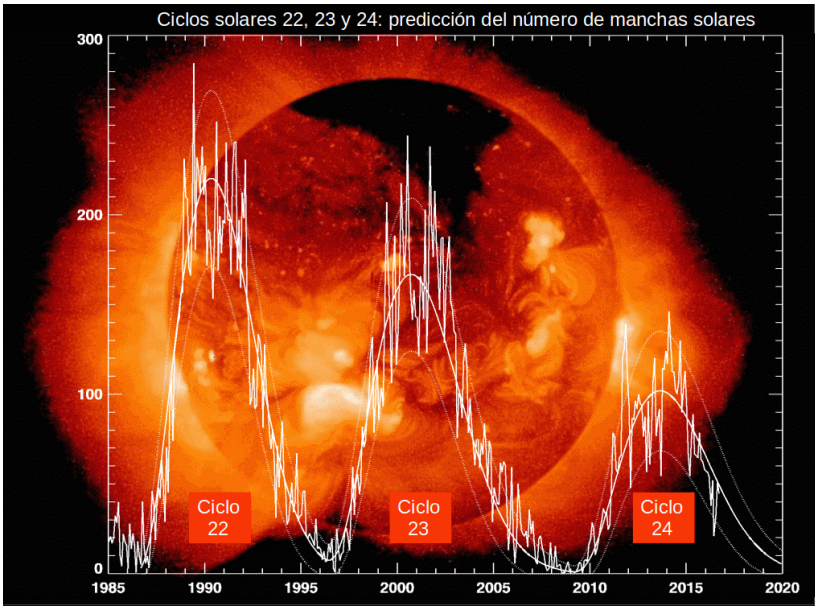
La fotosfera: es la región del Sol observable a simple vista, formada por millones de gránulos brillantes producidos por el transporte convectivo. Estos gránulos son células convectivas con una vida aproximada de unos diez minutos, diámetros de 700 a 1000 km, y que, en algunas ocasiones, se agrupan formando células mayores alcanzando diámetros de hasta 35.000 km, la denominada *supergranulación*.

La cromosfera: es la capa exterior a la fotosfera caracterizada por una menor densidad, que hace que sea visualmente más transparente. La cromosfera puede observarse en un tono rojizo al comienzo y al final de los eclipses solares.

La corona: es la parte más exterior de la atmósfera solar y de menor densidad. La corona solar puede observarse durante los eclipses totales, como un halo muy débil y cuya temperatura supera el millón de grados Kelvin, siendo muy superior a la de sus capas adyacentes. Esta inversión térmica es uno de los enigmas más actuales en la física solar.

Actividad solar

El ciclo solar es una variación en la actividad del Sol que se produce con un periodo de, aproximadamente, unos 11 años. Está directamente relacionado con el número de manchas solares observadas en la superficie solar. Estos cambios también se observan en el campo magnético del Sol, en los niveles de radiación solar y eyecciones de materia o en las denominadas fulguraciones. Este patrón es bien conocido y ha sido observado durante cientos de años. En el momento de escribir estas líneas (año 2020) nos encontramos al final del ciclo 24 (contando desde el primero que se documentó en 1755), el cual comenzó en el año 2008. El conocimiento detallado y la predicción de los ciclos solares es uno de los grandes desafíos actuales de la astrofísica.



Los tres últimos ciclos de actividad solar, ilustrados por el número de manchas observadas sobre la superficie del Sol.

NASA.

Las manchas solares

Las manchas solares se encuentran en la fotosfera y son un signo evidente de una intensa actividad magnética. Están compuestas por una zona central más oscura (umbra) a unos 4.000 K de temperatura, y una zona más clara (penumbra), que se encuentra a una temperatura de unos 5.600 K. Esto es debido al intenso campo magnético presente en las manchas solares, el cual bloquea el flujo de energía hacia el exterior, provocando que sean más frías (oscuras) que las regiones circundantes (más calientes).

Las fulguraciones

Debido a la alta actividad magnética en el Sol, en ocasiones, las líneas del campo magnético se deforman produciendo una explosión de energía, lo que se conoce como fulguración solar. Desde la Tierra, las fulguraciones se observan como un flash de luz en una zona determinada del Sol. Si una fulguración es muy intensa, parte del material eyectado (básicamente átomos de hidrógeno y electrones) puede escapar del campo gravitacional del Sol y viajar por el sistema solar.

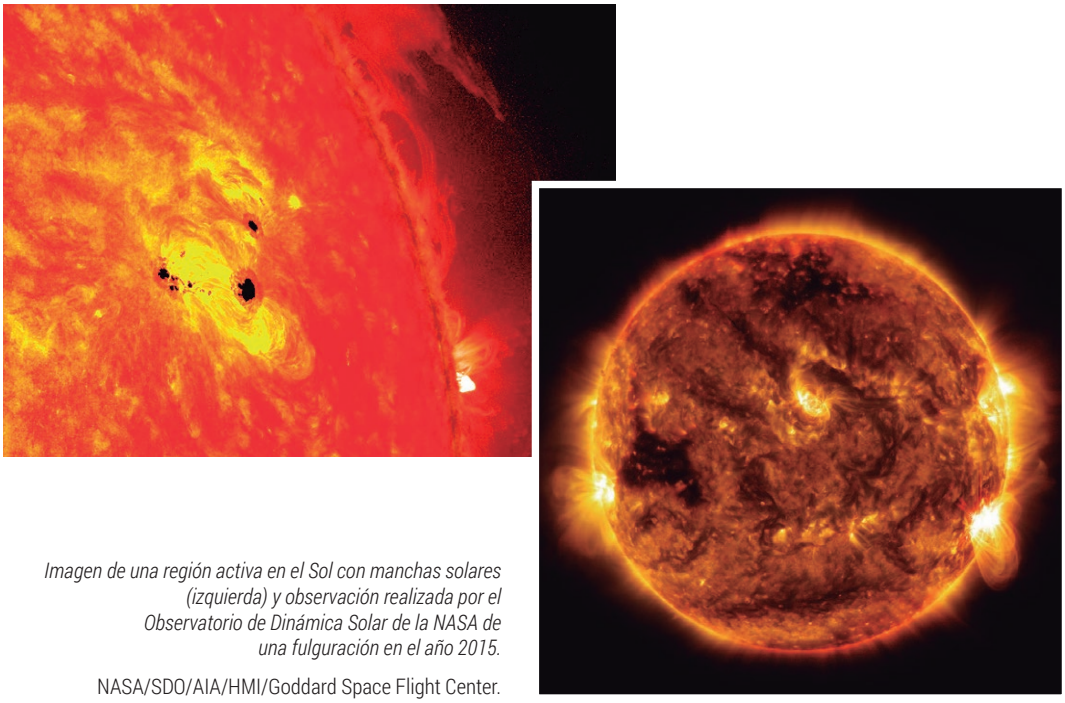


Imagen de una región activa en el Sol con manchas solares (izquierda) y observación realizada por el Observatorio de Dinámica Solar de la NASA de una fulguración en el año 2015.

NASA/SDO/AIA/HMI/Goddard Space Flight Center.

Imagen de una aurora boreal tomada por la astronauta de la Agencia Espacial Europea (ESA) Samantha Cristoforetti desde la Estación Espacial Internacional, en diciembre de 2014.

ESA/NASA.

Las eyecciones de masa coronal

Las eyecciones de masa coronal se originan, al igual que las fulguraciones, en las manchas solares. Se corresponden con violentas erupciones que arrojan inmensas cantidades de materia coronal al medio interplanetario, modificando la densidad del viento solar y su velocidad. Cuando una eyección de masa coronal es lo suficientemente intensa y se produce en la dirección hacia la Tierra, el aumento de la densidad y la velocidad del viento solar deforman la magnetosfera terrestre dando lugar a las tormentas geomagnéticas.

Uno de los fenómenos producidos por las tormentas geomagnéticas más espectaculares y que podemos observar en la Tierra son las auroras polares, boreales en el hemisferio norte, y australes en el hemisferio sur. Estos fenómenos se producen debido a la interacción de las partículas cargadas provenientes del Sol con la atmósfera terrestre. Al llegar una gran cantidad de materia por efecto de una eyección de masa coronal, el campo magnético terrestre intenta desviar las partículas, pero finalmente algunas de ellas penetran por las regiones próximas a los polos magnéticos, interaccionando en las capas de la atmósfera. Ya en estas capas, las partículas entran en contacto con los gases de la atmósfera, principalmente oxígeno y nitrógeno, lo que condicionará el color con que se verán las mismas.

V. El sistema solar

El sistema solar es la región del espacio en que el Sol ejerce una atracción gravitatoria predominante. Está poblada de miles de astros, meteoroides y partículas de polvo que orbitan en torno a la estrella central. En la parte más interna del sistema solar se encuentran los planetas además de decenas de miles de asteroides y centenares de cometas de corto período. En la región más externa se encuentran los restos de la formación del sistema solar constituido por el cinturón de Kuiper y la nube de Oort.

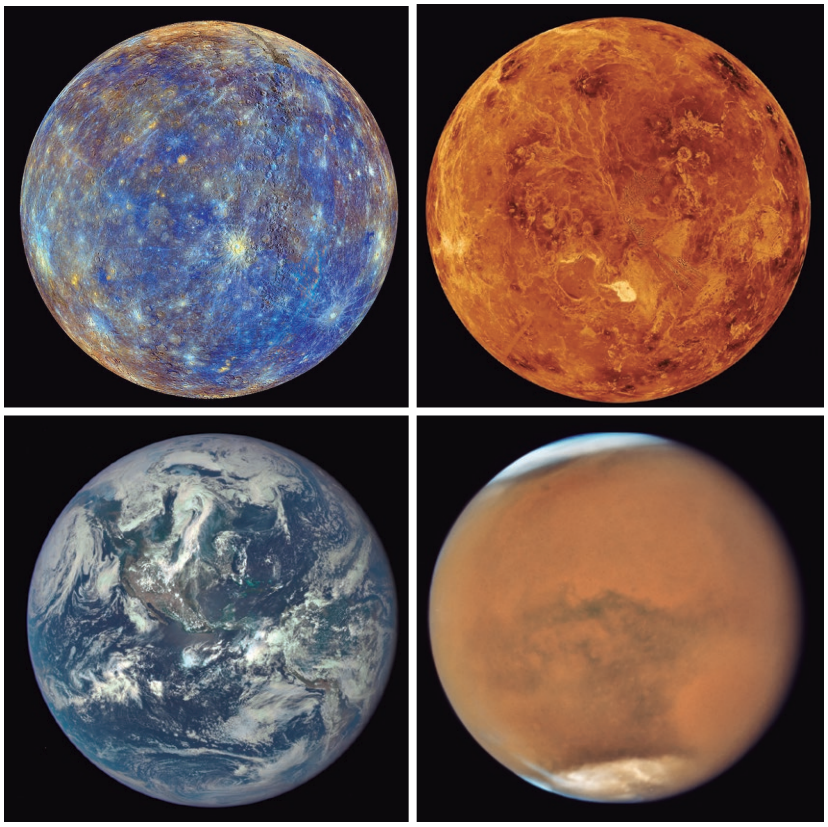
En el capítulo anterior, hemos visto las características del Sol, la estrella central del sistema solar que fue formada junto con los otros cuerpos del sistema hace unos 4.600 millones

Los planetas del sistema solar a escala.

de años. El Sol se encuentra pues en la mitad de su vida, aproximadamente. La estrella concentra el 99,75 % de la masa del sistema solar, y la mayor parte de la masa restante se distribuye en ocho planetas cuyas órbitas son elípticas. Estos planetas orbitan en un disco prácticamente plano, el llamado plano eclíptico.

Planetas de tipo terrestre

Son los cuatro planetas más internos del sistema solar: Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Tienen tamaños relativamente pequeños (entre 4.900 y 12.800 km de diámetro) y densidades altas. Estos cuerpos están compuestos principalmente de rocas y metales, con un exterior rocoso y un interior más denso de hierro y níquel. Mercurio se caracteriza por su aspecto lunar, con numerosos cráteres. Venus, por su elevada temperatura superficial, su espesa atmósfera opaca y su superficie seca dominada por extensas llanuras volcánicas. La Tierra,



Imágenes de los planetas tipo terrestre.

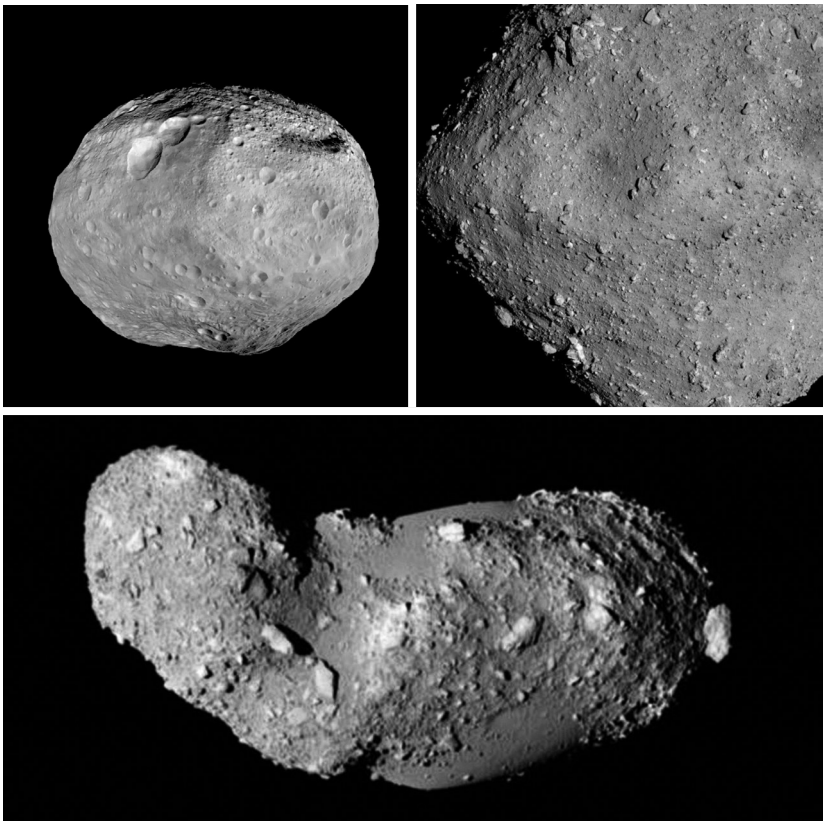
NASA.

por la presencia de océanos, una tectónica de placas que modifica su superficie, un satélite (la Luna) de gran tamaño y por la presencia de vida. Marte, por su superficie que muestra los efectos de vulcanismo que tuvo lugar en el pasado, actividad tectónica y erosión.

Los asteroides

Son cuerpos de aspecto rocoso y de tamaño inferior a 1.000 km que giran alrededor del Sol y son los restos de la formación del sistema solar. El primero y mayor, Ceres, fue descubierto el 1 de enero de 1801, buscando el «planeta perdido» predicho por la ley de Titius-Bode. Desde 2006, Ceres pasó a ser considerado un planeta enano.

Se conocen decenas de miles de estos cuerpos, la mayor parte situados en el denominado cinturón de los asteroides, entre las órbitas de Marte y Júpiter. Algunos tienen órbitas me-



Fotografías de los asteroides (de izquierda a derecha y de arriba abajo) Vesta, Ryugu e Itokawa.

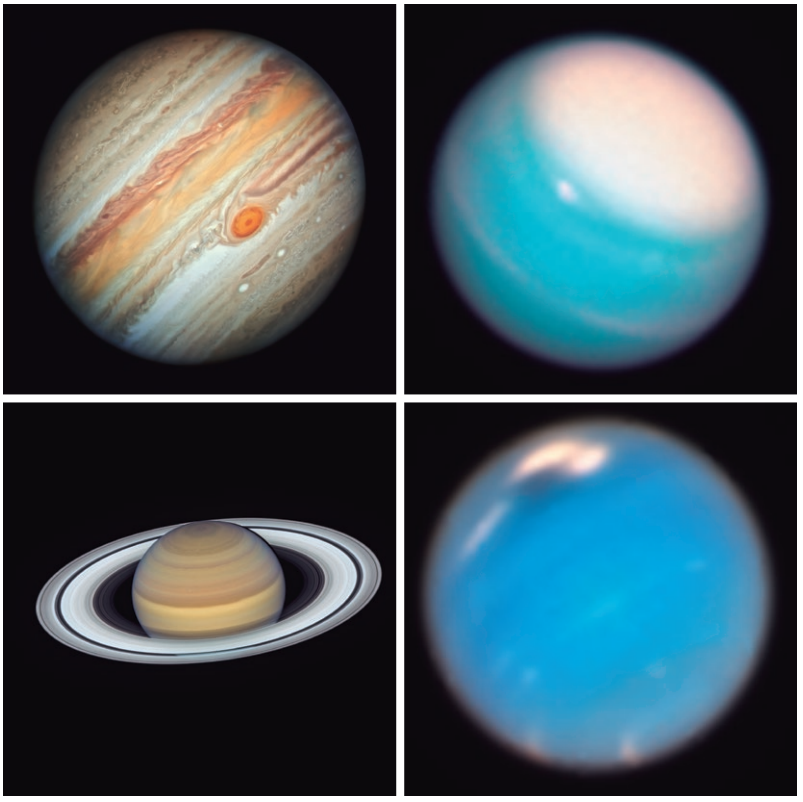
NASA, JAXA, ESO.

nores, pudiendo incluso cruzar la de la Tierra, mientras otros llegan más allá de Saturno. Tienen diferente composición química (como ocurre con los meteoritos), forma irregular (salvo los de mayor tamaño), giran sobre sí mismos y algunos tienen un asteroide satélite.

Los planetas jovianos

Más allá del cinturón de asteroides se encuentran los cuatros planetas gaseosos: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Estos gigantes gaseosos tienen un gran tamaño (diámetro entre 50.000 y 143.000 km), son poco densos y poseen una extensa atmósfera constituida predominantemente de hidrógeno y helio. Están rodeados de muchos satélites y tienen anillos, siendo los más visibles los de Saturno.

Júpiter es el mayor planeta y es fácilmente observable, así como lo son sus cuatro satélites principales (llamados galileanos por haber sido descubiertos en 1610 por Galileo Gali-



Imágenes de los planetas jovianos tomadas con el telescopio espacial Hubble.

NASA.

lei). Saturno destaca por sus extensos anillos y su satélite Titán, de mayor tamaño que Mercurio y el único con una atmósfera densa. Urano fue el primer planeta descubierto con un telescopio (en 1781, por W. Herschel). Neptuno es el planeta con los vientos más rápidos y tiene una atmósfera muy activa, donde aparecen y desaparecen grandes manchas oscuras y brillantes.

Planetas enanos

A diferencia de los planetas terrestres y los planetas jovianos, se clasifican como *planetas enanos* aquellos objetos que, estando en órbita alrededor del Sol, tiene suficiente masa para que su propia gravedad haya superado la fuerza de cuerpo rígido, de manera que han adquirido el equilibrio hidrostático (forma aproximadamente esférica) pero que no son satélites de un planeta u otro cuerpo no estelar. Son planetas enanos Plutón, considerado planeta hasta 2006, Eris, Haumea, Makemake y Ceres, que, como ya hemos dicho, anteriormente fue clasificado como asteroide. Con casi 1.000 km de diámetro, Ceres se encuentra en el llamado cinturón de asteroides, entre las órbitas de Marte y Júpiter.

Más allá de los planetas gaseosos se encuentra Plutón, planeta parecido a las grandes lunas de aquéllos por su pequeño tamaño y su baja densidad, acompañado de un satélite, Caronte, de tamaño comparable al propio planeta.

Imagen de Ceres.

NASA.

Composición de las imágenes del planeta enano Plutón (en primer plano) y de su luna Caronte obtenidas por la sonda New Horizons en el año 2015

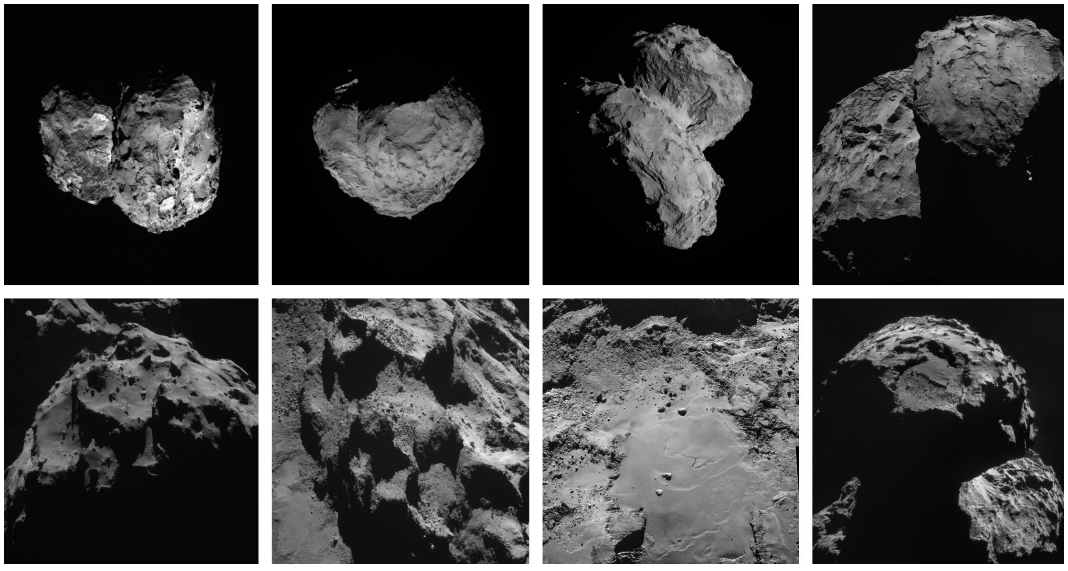
NASA.

Los cometas

Fotografía del cometa Hale-Bopp

NASA/ESA.

Son pequeños cuerpos del sistema solar que giran alrededor del Sol y eyectan, de manera transitoria, una masa de gas y polvo. Los de periodo más corto tienen órbitas poco excéntricas y se mueven en la región del sistema planetario, pero la mayoría tienen órbitas casi parabólicas inclinadas en cualquier dirección del cielo. Se los considera constituidos por el material restante de la formación del Sol y los planetas. En buena parte de su órbita los cometas se reducen a un pequeño núcleo sólido (menor de 10 km) de forma irregular compuesto de hielos, polvo y rocas. Cuando se acercan a unos centenares de millones de km del Sol, gases y polvo se separan del núcleo y desarrollan una extensa cabellera (nube difusa alrededor del núcleo) y, en ocasiones, una larga cola que se extiende en dirección opuesta al Sol.

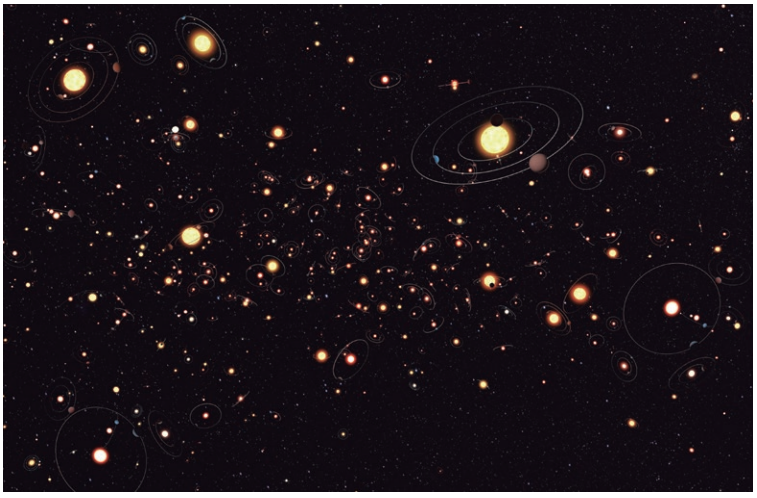


Fotografías del cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko.

NASA/ESA.

VI. Exoplanetas

Hace relativamente poco que sabemos a ciencia cierta que los planetas del sistema solar están lejos de ser los únicos que existen en el universo. Otras estrellas también están acompañadas por sus propios planetas, a los que llamamos planetas extrasolares o exoplanetas. El primero de ellos se detectó en 1992 orbitando alrededor de una estrella de neutrones (el cadáver de una estrella masiva), aunque la detección de exoplanetas alrededor de estrellas similares a nuestro Sol no llegaría hasta 1995, con el descubrimiento de Dimidio, alrededor de la estrella 51 Pegasi, a 50 años luz del sistema solar.



Los planetas alrededor de otras estrellas son muy comunes en nuestra galaxia. Ilustración artística.

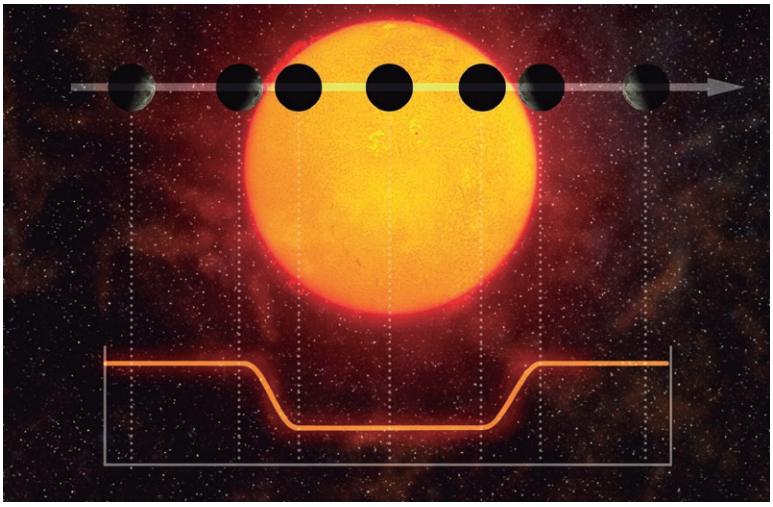
ESO/M. Kornmesser.

Desde entonces, el número de exoplanetas detectados no ha dejado de crecer. Gracias al esfuerzo de la comunidad científica y a misiones dedicadas a su búsqueda, como los satélites Kepler y Transit Exoplanet Survey Satellite (TESS), conocemos más de cuatro mil planetas orbitando estrellas distintas a la nuestra.

Métodos de detección

Nuestra capacidad para detectar exoplanetas ha sido resultado del gran desarrollo tecnológico de las últimas décadas. Hay dos métodos principales por los cuales se detectan la inmensa mayoría de exoplanetas.

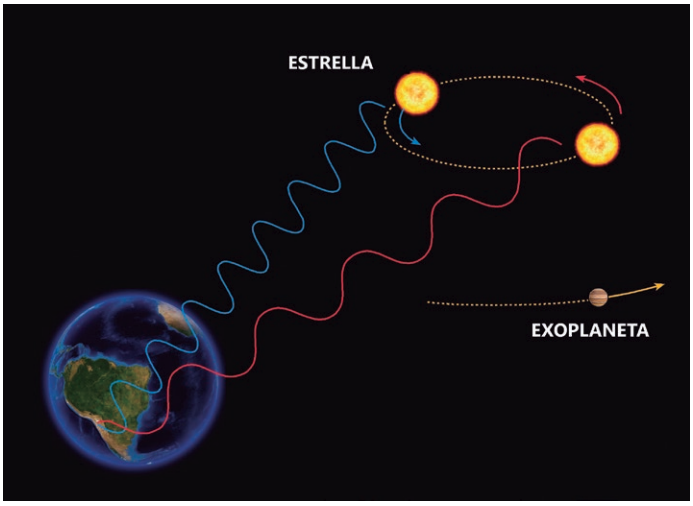
Método del tránsito: Dependiendo de la orientación del plano orbital del planeta respecto a nosotros, quizá podamos detectarlo monitorizando cuidadosamente la estrella. Al pasar por delante de su estrella provocará una sutil disminución temporal del brillo de la misma, un pequeñísimo mini-eclipse, que se repetirá una vez cada órbita.



Método del tránsito: el brillo de la estrella disminuye sutilmente durante el paso del planeta por delante de ella.

AC/G. Pérez.

Método de la velocidad radial: Los exoplanetas, especialmente si son muy masivos, como Júpiter, pueden detectarse mediante el suave bamboleo que ejercen sobre su estrella. El motivo es que tanto el planeta como su estrella orbitan en torno al centro de masas común del sistema, que está en el interior de la estrella, pero no exactamente en su centro. La espectroscopia es, en este caso, la técnica que permite distinguir ese leve movimiento oscilante y periódico de la estrella, e inferir de ahí la presencia del exoplaneta.



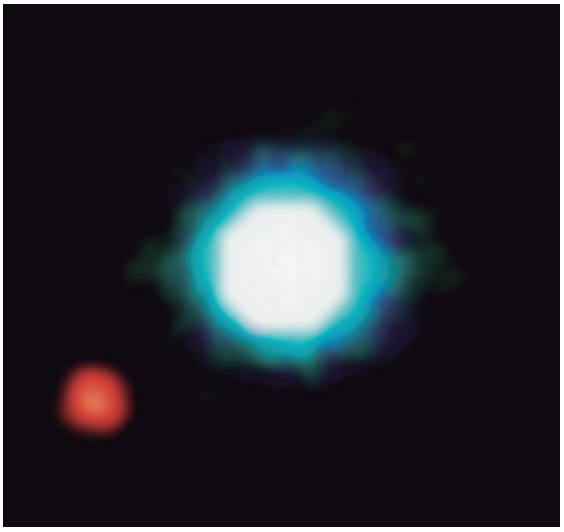
Método de la velocidad radial: el sutil bamboleo de la estrella a lo largo de su órbita es detectable mediante el desplazamiento Doppler de su espectro, de manera similar al sonido de una ambulancia al acercarse o alejarse de nosotros. El bamboleo de la estrella en esta figura se ha exagerado para ilustrar el fenómeno.

ESO.

Otros métodos: Otros métodos de detección incluyen la fotografía directa, muy complicada técnicamente por la enorme diferencia de brillo entre la estrella y el planeta (sobre todo en el espectro visible), y la detección por microlentes gravitatorias, cuando la alineación es tal que el planeta focaliza la luz de la estrella, amplificándola.

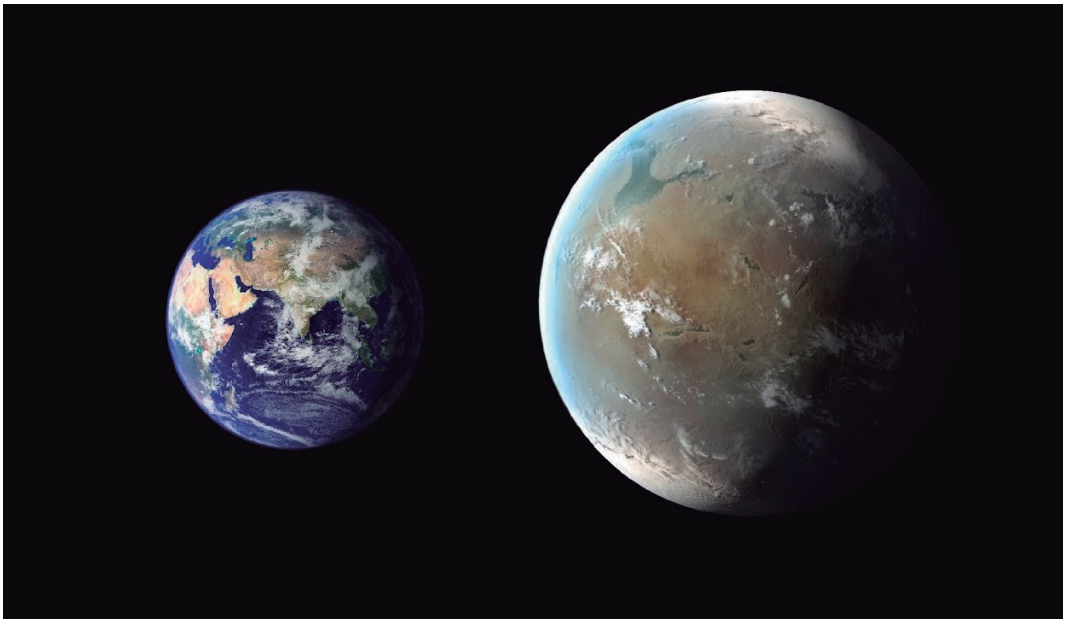
Tipos de exoplanetas

Gigantes gaseosos: Se trata de planetas con una atmósfera muy extensa y rica en hidrógeno y helio. Sus masas son muy grandes, parecidas a las de los gigantes gaseosos del sistema solar, Neptuno, Urano, Saturno y Júpiter, o incluso mayores que las de estos. Algunos de los exoplanetas descubiertos son tan masivos (unas 13 veces la masa de Júpiter, o más) que probablemente no sean tales, sino estrellas de tipo enana marrón.



2M1207b, un planeta detectado mediante imagen directa, aparece como una mancha rojiza mientras que su estrella es la mancha blanca.

ESO. NASA.



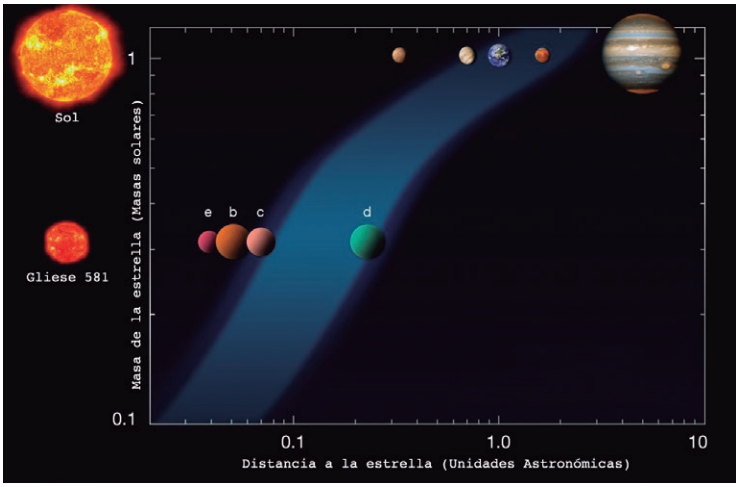
Recreación artística de la supertierra Gliese 581c (a la derecha) en comparación con nuestro planeta. Gliese 581c fue la primera supertierra que se detectó orbitando en la llamada zona de habitabilidad de su estrella, de modo que podría albergar agua líquida en su superficie.

NASA.

Planetas terrestres: El término planeta terrestre se refiere a planetas rocosos, compuestos principalmente por silicatos o metales. Son mucho más pequeños que los gigantes gaseosos. Los representantes de esta clase en el sistema solar son Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Esta clase también comprende las llamadas «supertierras», planetas rocosos de masa y tamaño intermedio entre la Tierra y Neptuno, de los cuales carece nuestro sistema solar.

Zona de habitabilidad circunestelar

Cada estrella tiene un cinturón a su alrededor llamado «zona de habitabilidad circunestelar», en el interior del cual un planeta podría albergar agua líquida en su superficie, por no estar ni demasiado cerca como para que los océanos se evaporen, ni tan lejos como para que se congelen. La localización y extensión de la zona de habitabilidad circunestelar dependen de la temperatura superficial de la estrella y de su luminosidad. En el caso del sistema solar, tanto la Tierra como Marte se encontrarían actualmente en el interior de la zona de habitabilidad circunestelar del Sol.



Zonas de habitabilidad circunestelar del Sol y de la estrella enana roja Gliese 581

ESO.

Encontrar exoplanetas que orbiten en el interior de este cinturón tiene especial relevancia por las potenciales implicaciones astrobiológicas, y es donde se enfocan los mayores esfuerzos de la búsqueda de vida fuera del sistema solar.

¿Cuántos planetas hay en la Vía Láctea?

La mayoría de exoplanetas que conocemos actualmente son gigantes gaseosos muy cercanos a su estrella. La razón es sencilla: nuestros métodos de detección favorecen encontrar planetas masivos orbitando junto a su estrella, mientras que detectar planetas más pequeños y/o alejados es mucho más complicado. Sin embargo, se estima que la inmensa mayoría de los exoplanetas en nuestra galaxia son de tipo terrestre.

En cuanto a las estrellas, creemos que una de cada cinco estrellas parecidas al Sol tendría al menos un planeta gigante gaseoso, y al menos dos de cada cinco de estas estrellas tendrían planetas terrestres orbitando a su alrededor, uno de ellos situado en la zona de habitabilidad circunestelar.

Habida cuenta del enorme número de estrellas que contiene la Vía Láctea, según los últimos cálculos estadísticos habría doscientos mil millones de planetas tan solo en nuestra galaxia. De ellos, cuarenta mil millones podrían ser planetas terrestres o supertierras orbitando en el interior de la zona de habitabilidad circunestelar de sus estrellas. Y, si nos restringimos a estrellas similares al Sol (posiblemente menos hostiles desde el punto de vista astrobiológico), nuestra galaxia contendría un total de once mil millones de planetas terrestres que podrían albergar agua líquida en su superficie.

Recreación artística de un hipotético paisaje visible desde TRAPPIST-1f, planeta que orbita en la zona de habitabilidad circunestelar de la estrella TRAPPIST-1, situada a cuarenta años luz de nosotros. Los tres planetas visibles en la imagen son, de izquierda a derecha, TRAPPIST-1e, d y c.

NASA/JPL-Caltech.

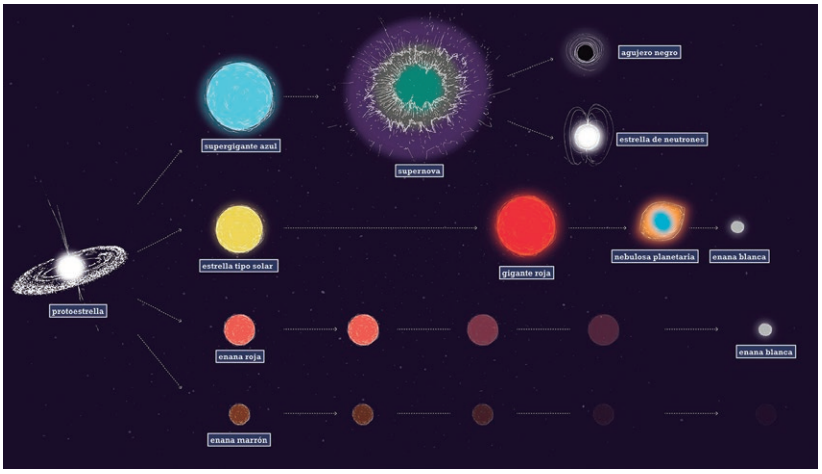
Las atmósferas de los exoplanetas

Las técnicas espectroscópicas tienen el potencial de desvelar la composición atmosférica de aquellos exoplanetas cuya órbita está orientada de modo que pasan por delante de su estrella. La luz de sus estrellas que, tras atravesar sus atmósferas, llegue hasta nosotros, llevará la impronta o «huella dactilar» de los elementos químicos que abundan en ella. Aunque este tipo de análisis no será masivo hasta la próxima generación de telescopios en órbita, ya se ha podido detectar en las atmósferas de algunos exoplanetas la presencia de moléculas como vapor de agua y de sodio, metano y dióxido de carbono.

Caracterizar las atmósferas de los diferentes exoplanetas es una de las metas actuales de la astrobiología, ya que podría abrir la puerta a un hipotético descubrimiento de vida extraterrestre. Así, creemos que la presencia combinada de ciertas moléculas, como por ejemplo vapor de agua, dióxido de carbono y ozono, es muy difícil de explicar si no proviene de procesos biológicos.

VII. Nacimiento, vida y muerte de las estrellas

Como si de un ser biológico se tratara, las estrellas nacen, envejecen y mueren siguiendo una trayectoria vital que depende de su masa. Una estrella como el Sol consume su combustible lentamente, vive miles de millones de años y muere discretamente. Una estrella diez veces más masiva consume su combustible tan rápidamente que solo dura unas decenas de millones de años y muere en una gigantesca explosión. Sin embargo, aunque hablemos de su muerte, las estrellas nos dejan un recuerdo de ellas mismas pues, según mueren, nos dejan los objetos más densos y compactos del universo: las enanas blancas, las estrellas de neutrones y los agujeros negros.



Esquema de las posibles vías evolutivas para estrellas de diferentes masas iniciales.

ESA.

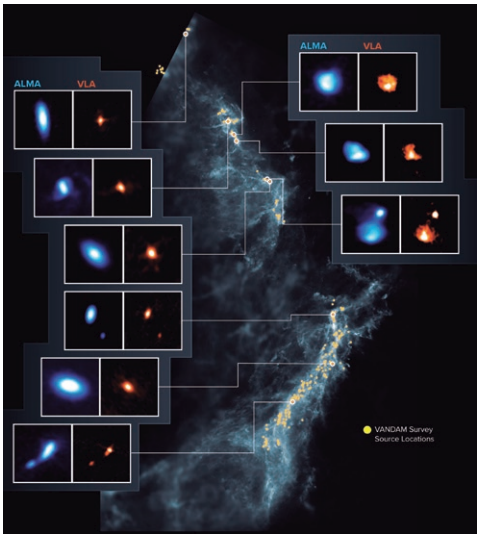
Nacimiento

Las estrellas nacen en nubes de gas y polvo que, por el efecto de su propia gravedad, se vuelven inestables y colapsan. Como resultado puede formarse una sola estrella, un sistema estelar múltiple, o un cúmulo de centenares o miles de ellas. Estas estrellas recién nacidas están todavía embebidas dentro de su nube materna y son invisibles en imágenes obtenidas con telescopios ópticos. Sin embargo, podemos acceder a estas estrellas jóvenes, y a los procesos mediante los cuales se han formado, a través de telescopios que operan en infrarrojo y en ondas de radio.

Región de formación estelar en la constelación Orión. Las zonas verdosas son las cavidades que la luz y los chorros de materia de las estrellas recién nacidas están comenzando a crear en las nubes oscuras de polvo donde se han formado.

NASA / JPL-Caltech.

Por la conservación del momento angular del sistema, el colapso de una nube va acompañado de la formación de un disco que gira alrededor de la estrella. Este disco, inicialmente gaseoso, puede condensar en unos pocos millones de años y dar lugar a un sistema planetario como el que tiene el Sol.



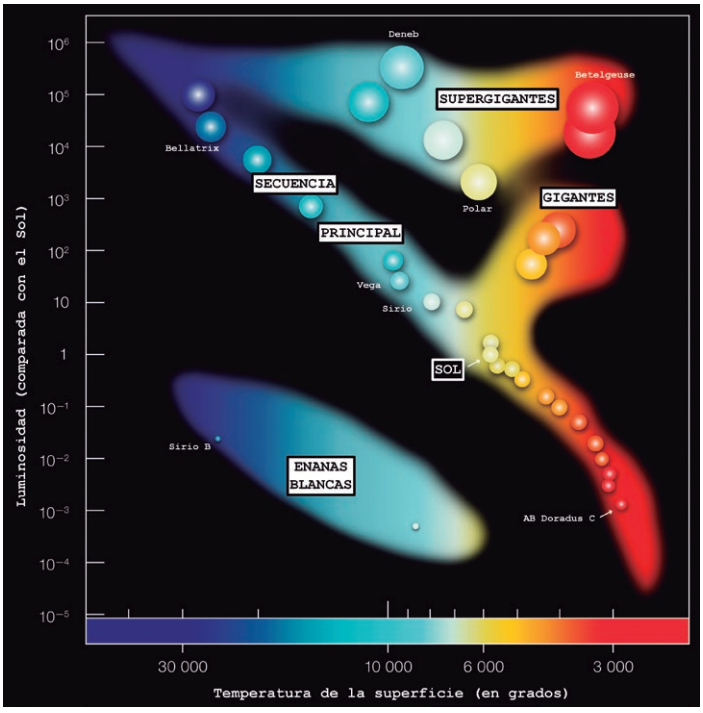
Protoestrellas en las nubes moleculares de Orión observadas con los telescopios ALMA (en azul) y VLA (naranja).

ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), J. Tobin; NRAO / AUI / NSF, S. Dagnello; Herschel / ESA.

Pero antes de que la estrella alcance la edad adulta y se forme un eventual sistema planetario, tras varios cientos de miles de años después de su creación, la estrella comienza a destruir la nube donde se ha formado por la emisión de chorros de materia a gran velocidad a lo largo de sus polos. De esta manera la estrella llega a hacerse visible. Durante estos primeros estadios de su vida, las estrellas no emiten luz mediante reacciones nucleares, sino por el calor que genera su propia contracción.

Madurez y envejecimiento

Tras un período de contracción, la temperatura y la densidad en el centro de la estrella se hacen lo suficientemente altas como para que se produzca la fusión nuclear del hidrógeno. Esta reacción, que convierte cuatro núcleos de hidrógeno en uno de helio, libera energía y hace que la estrella deje de contraerse. Se produce entonces una situación de gran estabilidad, en la que la estrella alcanza la llamada *secuencia principal.* Podríamos decir que las estrellas alcanzan la madurez cuando entran en esta fase y allí permanecen la mayor parte de sus vidas. Por tanto, la mayoría de las estrellas que observamos en el cosmos, incluyendo el Sol, se encuentran en la secuencia principal.



El diagrama HR (Hertzprung-Russell) representa la luminosidad de las estrellas en función de su temperatura. La posición de una estrella en el diagrama nos da información acerca de su momento evolutivo y su masa.

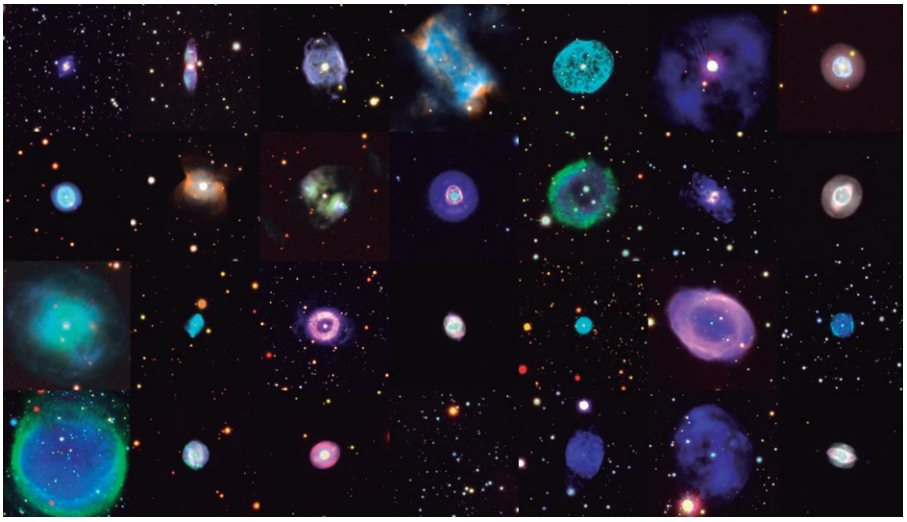
ESO.

La duración de la secuencia principal en una estrella depende de su reserva de hidrógeno y de la velocidad con que lo fusiona. Las estrellas más masivas contienen más hidrógeno pero lo fusionan tan rápidamente que lo agotan antes que las estrellas poco masivas como el Sol. Así, el Sol tarda unos 10.000 millones de años en consumir el hidrógeno de su interior, mientras que una estrella 15 veces más masiva tarda solo 10 millones de años. Al consumir el hidrógeno del interior, las estrellas salen de la secuencia principal y se encaminan hacia el final de sus vidas.

En estrellas como el Sol, tras quemar todo el hidrógeno del interior, se produce una enorme expansión de las capas exteriores de la estrella, convirtiéndose en una *gigante roja.* Esta fase, donde la estrella ya se encuentra en su vejez, dura hasta que el interior de la estrella es lo suficientemente caliente como para fusionar helio. Las estrellas más masivas, tras salir de la secuencia principal, son capaces de fusionar helio y elementos más pesados como el carbono, pero estas fases de fusión en los últimos tiempos de su vida duran poco tiempo.

Muerte

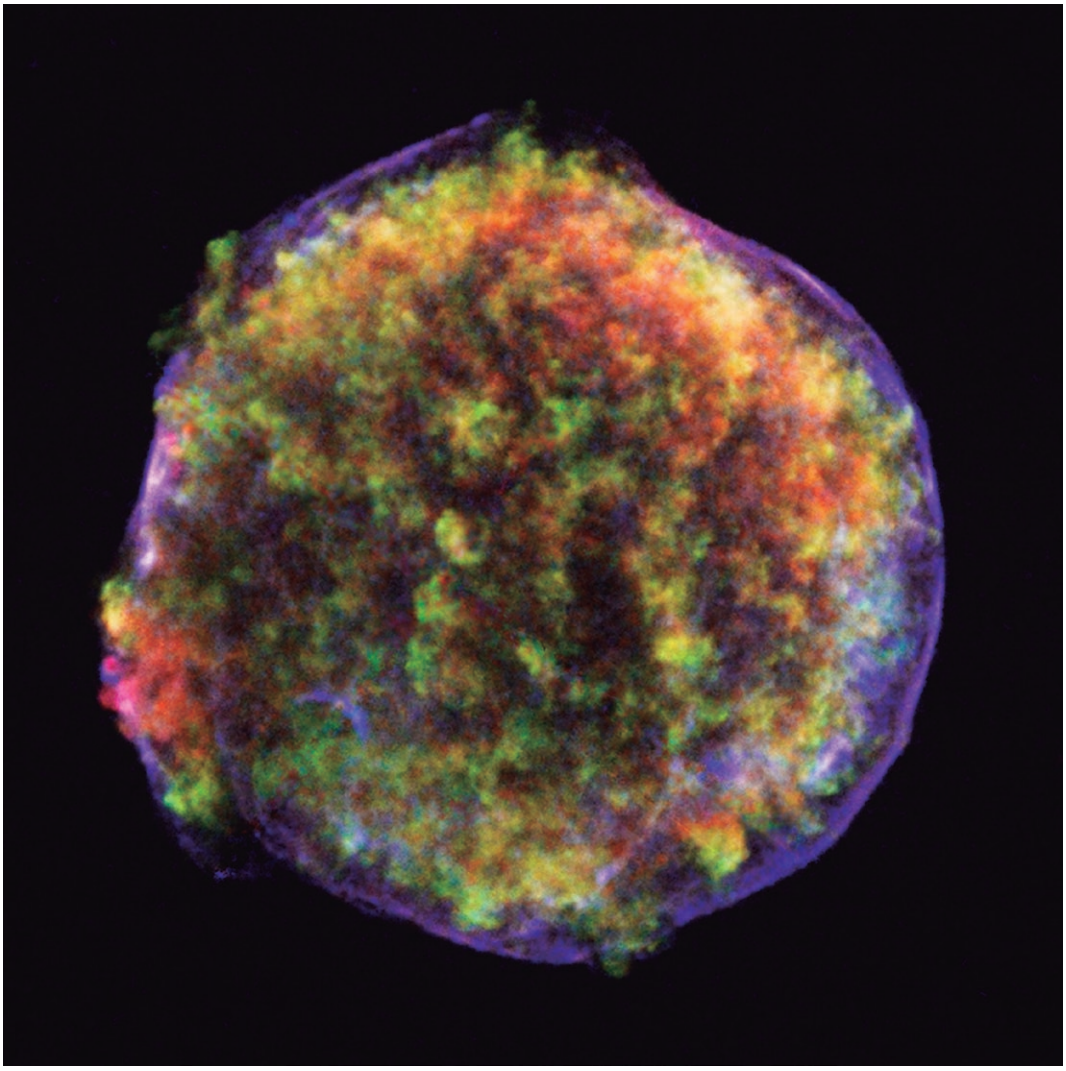
En las estrellas que inicialmente son como el Sol y que se han convertido en gigantes rojas, la combustión del helio en el interior produce un objeto remanente estable: una *enana blanca*. Las capas externas de estas estrellas son expulsadas en forma de viento formándose unos bellos objetos de intrincada morfología, las *nebulosas planetarias.* Con el tiempo, las zonas interiores se hacen visibles quedando la *enana blanca* al descubierto.



Colección de nebulosas planetarias.

GJDonatiello.

Por otro lado, las estrellas que inicialmente son ocho o más veces más masivas que el Sol no llegan a alcanzar la estabilidad final. Tras fusionar todos los combustibles nucleares disponibles, su interior se hunde bajo su propio peso expulsando las capas más externas



Remanente de la supernova Tycho conocida así en honor al astrónomo danés Tycho Brahe que la observó en el año 1572.

NASA/CXC/Rutgers/J. Warren et al.

en una gigantesca explosión, las llamadas supernovas. Si bien esta explosión dura unos pocos días, las consecuencias de la misma pueden observarse durante un largo período de tiempo. Es por ello que hoy en día aún podemos observar el remanente de la supernova documentada por astrónomos chinos y árabes en el año 1054 como una estrella visible a la luz del día, o aquella de cuya luminosidad dejó constancia Tycho Brahe en 1572. En el interior, mientras, se produce la formación de un objeto extremadamente denso que puede ser, bien una estrella de neutrones bien un agujero negro, dependiendo principalmente de la masa inicial de la estrella.

VIII. La Vía Láctea: nuestra galaxia

Las galaxias son inmensas acumulaciones de estrellas, gas (hidrógeno en su mayor parte), polvo y una misteriosa materia oscura que se mantienen cohesionadas por la fuerza de la gravedad. Nuestro sistema solar forma parte de una galaxia que denominamos Vía Láctea. El estudio de nuestra galaxia es un campo fundamental de la astrofísica contemporánea, pues su proximidad proporciona un detalle que no se alcanza en otras más lejanas. La luz que recibimos de la Vía Láctea en todas las longitudes de onda, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, guarda una información fundamental sobre sus distintas componentes.

Vista completa del cielo nocturno desde el observatorio de la ESO en Cerro Paranal (Chile). A la derecha de la imagen se extiende el arco de la Vía Láctea. Su brillo blanquecino se oscurece allí donde el polvo interestelar extingue la luz de las estrellas. En el ángulo inferior derecho se aprecian las dos Nubes de Magallanes.

ESO/H.H. Heyer.

La Vía Láctea a lo largo de la historia

Nuestra galaxia toma su nombre de su manifestación más llamativa: una extensa franja de luz brumosa e irregular que, durante buena parte del año, es visible a simple vista en noches suficientemente oscuras. En la mitología griega, esta franja blanquecina se asociaba a la leche que derramó la diosa Hera al apartar bruscamente de su pecho al bebé Heracles, hijo bastardo de Zeus. Muchas otras culturas antiguas elaboraron mitos que daban cuenta del origen y aspecto de la Vía Láctea. Actualmente sabemos que su brillo se debe a la superposición de millones de estrellas que resultan indistinguibles a simple vista. Esta explicación ya fue propuesta por algunos pensadores antiguos. Sin embargo, fueron las observaciones con telescopio practicadas por Galileo Galilei en el siglo XVII las que proporcionaron las primeras evidencias empíricas.

Entre el siglo XVIII y las primeras décadas del siglo XIX, astrónomos como Thomas Wright o William Herschel obtuvieron pruebas de que nuestro sistema solar se hallaba inmerso en un disco enorme de estrellas. Entre otras cosas, esta hipótesis explicaba el aspecto de la Vía Láctea: observado de canto desde su interior, el disco se asemejaría a una franja elongada. Algunos científicos, como el propio Wright o el filósofo Immanuel Kant, especularon que algunas de las nebulosas que se observaban en el cielo tal vez fueran galaxias distintas a la nuestra.

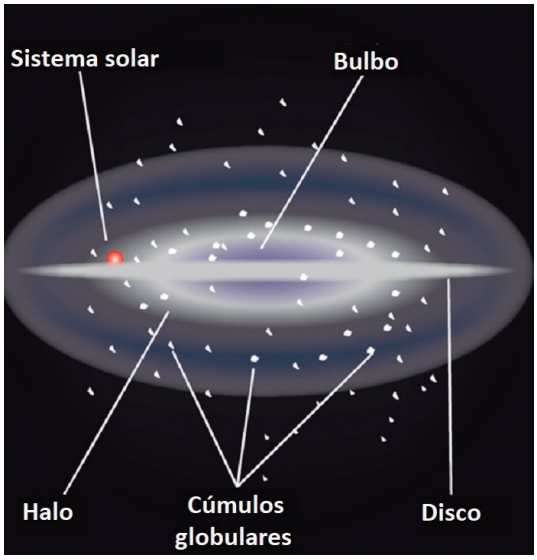
En torno a 1920, tuvo lugar una pequeña revolución que contribuyó a nuestra visión actual del universo. Por una parte, el astrónomo Harlow Shapley realizó medidas de distancias a cúmulos globulares con las que demostró que el sistema solar estaba lejos del centro de la Vía Láctea. Poco después, tras un gran debate entre Shapley y el astrónomo Heber Curtis y las observaciones realizadas por Edwin Hubble, se impuso la idea de que existen otras galaxias más allá de la Vía Láctea. En cierto modo, estos resultados prolongaron la revolución copernicana que, siglos atrás, había apartado nuestro planeta del centro del universo conocido.

Panorama de 360 grados de la Vía Láctea en luz visible. Las zonas oscuras cerca del plano galáctico son nubes polvorientas que apantallan la luz de las estrellas situadas tras ellas.

Digital Sky LLC.

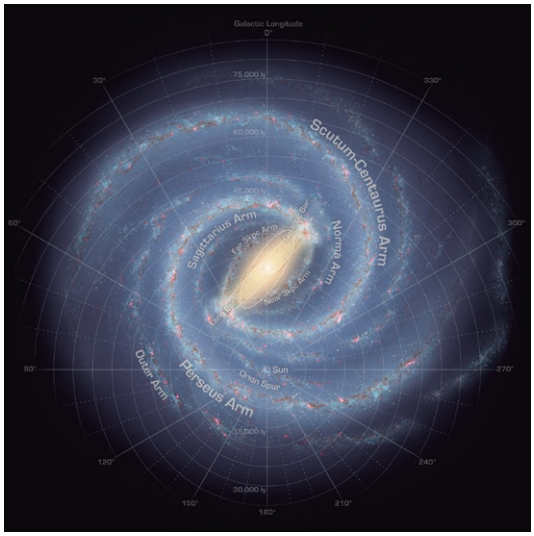
Componentes principales de nuestra galaxia

En muchos aspectos, la Vía Láctea es un miembro típico de la familia de las galaxias espirales. El grueso de su materia *ordinaria* (materia interestelar y estrellas) se encuentra cerca de un mismo plano mientras rota en torno al centro de la galaxia. En concreto, la mayoría de las estrellas conforma un disco estelar *fino* de unos 100.000 años luz de diámetro y unos 1.000 años luz de espesor, al cual acompaña un disco secundario más grueso de origen incierto. En sus 10.000 años luz centrales, el disco estelar presenta un engrosamiento en forma de caja llamado bulbo galáctico, el cual está poblado principalmente por estrellas viejas.



Esquema de la Vía Láctea, vista de lado, en el que se muestran algunas de sus componentes principales, así como la ubicación del sistema solar.

Lejos del plano, del disco y del bulbo galácticos, la Galaxia presenta halos extensos de gas tenue y muy caliente y de estrellas antiguas. En última instancia, toda la materia ordinaria de la Vía Láctea está circundada por un enorme halo de materia oscura de más de un millón de años luz de



Esquema de una vista cenital de la Vía Láctea en el que se indican las componentes principales de su disco (bulbo, barra, brazos espirales, centro galáctico) y la posición del Sol.

NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech).

diámetro. La materia oscura no se puede observar directamente. Sin embargo, su fuerza gravitatoria modifica la rotación del gas y las estrellas a lo ancho del disco galáctico.

Teniendo en cuenta todas sus componentes, se calcula que la masa total de la Vía Láctea es de un billón de masas solares, un 95% de la cual está en forma de materia oscura. La fracción de materia ordinaria está a su vez dominada por las estrellas en una proporción algo menor. A pesar de su pequeña contribución a la masa total, el gas interestelar es un elemento fundamental en la evolución de nuestra galaxia, pues es el material con el cual se forman nuevas estrellas.

Estructura del disco galáctico

Los discos galácticos sufren inestabilidades gravitatorias que generan perturbaciones de gran tamaño con forma espiral o de barra. Estas perturbaciones alteran los movimientos y la distribución del gas y las estrellas y llegan a condicionar la evolución de la propia galaxia. No resulta fácil reconstruir una imagen del disco de la Vía Láctea desde nuestra posición dentro del mismo; podemos decir que los árboles no nos dejan ver el bosque. De hecho, hubo que esperar a 2005 para confirmar la existencia de una barra galáctica que se extiende más allá de la región del bulbo. Por otra parte, se suele aceptar que el disco de la Vía Láctea muestra cuatro brazos espirales principales, además de varios brazos y ramificaciones secundarias de menor tamaño. Sin embargo, la incertidumbre en la medida de distancias y la adopción de métodos de observación distintos han llevado a algunos autores a proponer descripciones alternativas.

El centro galáctico

Nuestro sistema solar está situado sobre un brazo espiral menor del disco llamado brazo de Orión. Desde nuestra posición, el centro de la Galaxia dista unos 27.000 años luz en la dirección de la constelación de Sagitario. A causa del polvo interestelar que se interpone en su camino, la luz visible del centro galáctico se extingue antes de alcanzarnos. Por ello, los estudios de esta región se basan en observaciones en longitudes de onda alternativas (radio, infrarrojo, rayos X). Gracias a ellas sabemos que la fuente más luminosa del centro galáctico, llamada Sagitario A*, alberga un agujero negro de unos cuatro millones de masas solares. Se espera que, en pocos años, la aplicación de las técnicas de interferometría a las observaciones de luz infrarroja y de ondas de radio milimétricas nos proporcionen las características detalladas de dicho agujero negro.

La zona central de la Vía Láctea observada en el infrarrojo con el telescopio espacial Spitzer. En el visible no se pueden ver tantas estrellas como se aprecian aquí, pues las nubes interestelares ocultan muchas de ellas. Esta región cubre un área de 890 años luz en horizontal por 640 años luz en vertical. El centro galáctico (la zona más blanquecina en el centro de la imagen), conocido como SgrA, alberga un agujero negro supermasivo.*

NASA/Spitzer.

El entorno de la Vía Láctea

La galaxia de Andrómeda es una galaxia espiral similar a la Vía Láctea que dista unos dos millones y medio de años luz de esta. Ambos objetos son los miembros principales de una asociación de galaxias denominada Grupo Local. El Grupo Local contiene otra galaxia espiral menor, la galaxia del Triángulo, además de decenas de galaxias menores que pertenecen en su mayoría a la familia de las enanas. Dentro del Grupo Local, tanto las galaxias de Andrómeda y del Triángulo como dos galaxias enanas denominadas Nubes de Magallanes son visibles a simple vista (las últimas solo desde el hemisferio sur).

La Vía Láctea no muestra señales de ninguna interacción importante con otras galaxias en los últimos 10.000 millones de años. Aun así, se cree que nuestra galaxia ha debido de engullir cerca de un centenar de galaxias enanas a lo largo de su vida hasta alcanzar su tamaño actual. En el presente, la Vía Láctea sigue creciendo a costa de las cercanas Nubes de Magallanes a través de una extensa corriente de gas intergaláctico.

Representación artística de la fusión entre la galaxia de Andrómeda y la Vía Láctea predicha por los modelos numéricos. De izquierda a derecha y de arriba a abajo, las imágenes muestran la evolución desde la actualidad hasta dentro de 7.000 millones de años. En la última fase, el brillo de la nueva galaxia elíptica domina el hipotético cielo nocturno de nuestro planeta

NASA/ESA/Z. Levay y R. van der Marel/STScI/
T. Hallas y A. Mellinger.

El futuro de la Vía Láctea

Se estima que la tasa de formación de nuevas estrellas en la Vía Láctea es algo inferior a 2 masas solares por año. En el contexto de la evolución galáctica, la Vía Láctea atraviesa una fase de transición entre las galaxias con formación estelar activa y aquellas que han quedado inertes por falta de combustible. Sin embargo, el futuro de nuestra galaxia podría ser menos reposado de lo que esto da a entender. Las simulaciones numéricas del Grupo Local auguran que, dentro de unos 4.000 millones de años, la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda se habrán aproximado tanto como para sufrir una fuerte interacción en la que quizá intervenga también la galaxia del Triángulo. En el caso más extremo, el encuentro podría dar lugar a una fusión completa de la que surgiría una nueva galaxia elíptica unos 2.000 años después. Algunos modelos predicen también una interacción previa entre la Vía Láctea y las Nubes de Magallanes.

IX. Galaxias en el universo

Un universo de galaxias

Se estima que existen entre 1 y 3 billones de galaxias en el universo. Las galaxias y sus agrupaciones concentran la mayor parte de la materia visible e invisible (*materia oscura*) del cosmos y constituyen de este modo las unidades básicas a partir de las cuales se construye el universo tal y como lo conocemos.

A una distancia de 2,5 millones de años luz, Andrómeda es la galaxia espiral más cercana a nosotros. En la imagen captada por el satélite Galaxy Evolution Explorer destaca la emisión ultravioleta de las regiones de formación estelar reciente distribuidas en un anillo (en color azul). La región central está dominada por la emisión de estrellas más viejas.

NASA/JPL-Caltech.

Edwin Hubble demostró en 1923 que las nebulosas observadas en el siglo XIX por Lord Rosse eran sistemas independientes situados fuera de la Vía Láctea. Estrellas variables Cefeidas en la nebulosa de Andrómeda permitieron deducir la distancia que la separa de nosotros: unos 2,5 millones de años luz. Muchas nebulosas espirales, incluyendo Andrómeda, tienen un tamaño comparable a la Vía Láctea, no giran junto con el disco de nuestra galaxia y tienen, sin embargo, movimientos de rotación interna totalmente independientes.

Las galaxias están constituidas por estrellas de diferentes edades, gas interestelar, polvo y materia invisible (*oscura*) en proporciones diversas. Estos componentes se encuentran gravitacionalmente ligados en sistemas cuyas masas y tamaños oscilan, respectivamente, entre 10^8 y 10^{14} masas solares, y entre 3.000 a 300.000 años luz. Las galaxias adoptan una amplia variedad de morfologías.

Clasificación morfológica de galaxias: la secuencia de Hubble

Edwin Hubble ideó un sistema de clasificación que distingue cuatro tipos de galaxias en el universo local de acuerdo con su apariencia *visual*:

1. *Galaxias espirales*. A su vez distribuidas en dos clases: galaxias espirales puras (S) y galaxias espirales barradas (SB). Son galaxias formadas por un disco de estrellas en rotación, caracterizado por una estructura espiral, acompañada en el caso de las galaxias barradas por una estructura elongada en forma de barra, y por un bulbo central. La mayoría de la masa en las galaxias espirales se concentra en un halo de materia *oscura* más o menos esférico que se extiende más allá de la componente visible del disco. Son sistemas capaces de seguir formando nuevas estrellas pues albergan una gran cantidad de gas.

M51, la galaxia del Remolino, es uno de los mejores ejemplos de estructural espiral de dos brazos resultado de un proceso de interacción gravitatoria entre la galaxia NGC5194 y su compañera de menor masa NGC5195. La imagen, tomada por el telescopio Hubble muestra la emisión de regiones de formación estelar reciente (en color rojo), surcadas por bandas de polvo, así como la emisión de estrellas más viejas en la región central (en color amarillo).

NASA/ESA/STScI/AURA.

M82 es una galaxia con un brote de formación estelar masivo en su región central (en color azul en la imagen). La galaxia está expulsando ingentes cantidades de gas, en forma de grandes chorros, en la dirección perpendicular a su disco. La emisión del gas ionizado expulsado (en color rojo) aparece en una estructura bicónica.

NASA/ESA/STScI/AURA.

2. *Galaxias lenticulares*. Son similares a las espirales tempranas, salvo en que carecen de brazos espirales. Se supone que son espirales en las que se ha eliminado el gas, en el curso de su evolución, por efecto de interacciones gravitatorias violentas con otras galaxias.

3. *Galaxias elípticas*. Tienen forma elipsoidal, aumentando desde los tipos morfológicos E0 a E7 el grado de aplanamiento aparente del esferoide. No tienen discos ni brazos espirales y prácticamente carecen de gas. Su equilibrio se explica por los movimientos desordenados de las estrellas. Algunas elípticas gigantes situadas en el centro de cúmulos masivos acaban por canibalizar galaxias cercanas.

4. *Galaxias irregulares*. Como su propio nombre indica no tienen forma definida. Son sistemas poco evolucionados, con gran cantidad de gas que puede seguir formando estrellas activamente.

Galaxias en evolución

A lo largo de su vida, las galaxias pueden experimentar cambios, en ocasiones muy violentos. La clasificación de Hubble puede interpretarse, a muy grandes rasgos, como una secuencia evolutiva: las galaxias parecen estar en estados evolucionados progresivamente más avanzados según nos movemos en la clasificación desde los últimos tipos a los tipos más tempranos. Por tanto, la distribución de las galaxias en la secuencia de Hubble cambia significativamente a lo largo de la historia cósmica, desde el nacimiento de las primeras galaxias hasta la actualidad.

Los factores que directamente pueden inducir la evolución de una galaxia pueden ser tanto internos como externos. La construcción de las galaxias en el universo resulta de un complejo entramado de procesos que determinan un estado de cuasi-equilibrio. Estos procesos incluyen: la acreción de gas sobre el sistema, el consumo de gas por la formación de nuevas estrellas, la expulsión de gas debido a la retroalimentación de la actividad asociada tanto a la formación estelar como al fenómeno de actividad nuclear, así como la expulsión de gas debido a la interacción disruptiva de las galaxias con su entorno.

Existen dos caminos distintos por los que se entiende que discurre la evolución de las galaxias a lo largo de la historia del universo. Un canal de evolución es rápido y violento, y está asociado a interacciones con otras galaxias. Hay que tener en cuenta que las interacciones entre galaxias se producen con elevada frecuencia debido a que las galaxias no están aisladas en el universo. Los tiempos de evolución para esta población de galaxias vienen determinados por el consumo rápido del gas por la formación de estrellas: unos 100 millones de años.

El segundo canal de evolución, denominado de evolución secular o lenta, está determinado por la acreción de gas mantenida durante largos periodos de tiempo, así como por tiempos de consumo del gas más dilatados, del orden de miles de millones de años. Las simulaciones numéricas permiten reproducir la evolución de los discos de las galaxias espirales. Se demuestra así que las ondas de densidad (en los brazos espirales y en las barras) pueden provocar la caída de grandes cantidades de gas sobre el núcleo.

La imagen muestra el par de galaxias en interacción en el sistema Arp273 tomada en varios filtros por el telescopio espacial Hubble. El disco de la galaxia de mayor tamaño es distorsionado por la interacción con la galaxia compañera (en la parte inferior de la imagen).

NASA/ESA/HST.

Agujeros negros y galaxias

Tal y como han puesto de manifiesto numerosas observaciones recientes, la inmensa mayoría de las galaxias alberga un agujero negro supermasivo en su centro. Las observaciones han demostrado que existe un estrecho vínculo entre las galaxias y estos agujeros negros, un vínculo que queda reflejado en el crecimiento sincrónico de las poblaciones estelares y la acreción sobre los agujeros negros a lo largo de la historia cósmica.

La distribución de las galaxias a gran escala: cúmulos y supercúmulos

La distribución de galaxias en el universo no es homogénea. Las galaxias aparecen agrupadas en cúmulos, que alcanzan tamaños de 50 a 300 millones de años luz. Se distingue entre cúmulos ricos y cúmulos pobres. Los cúmulos ricos están formados por miles o decenas de miles de galaxias, en su mayor parte elípticas y lenticulares. Los cúmulos pobres contienen decenas o cientos de galaxias y tienen, en general, una mezcla más variopinta de ellas. Las diferencias en el tipo de población se deben a que la intensidad y la frecuencia de las interacciones entre las galaxias es menor en estos cúmulos. Los cúmulos de galaxias se agrupan a su vez en grandes asociaciones llamadas supercúmulos.

La composición de imágenes profundas obtenidas por el telescopio espacial Hubble en la región denominada Hubble Legacy Field tras 16 años de campañas de observación ha permitido obtener un censo de 200.000 galaxias en dicho campo. Algunas de las galaxias detectadas se formaron solo 500 millones de años después del Big Bang.

NASA/ESA/HST.

Galaxias en un universo en expansión

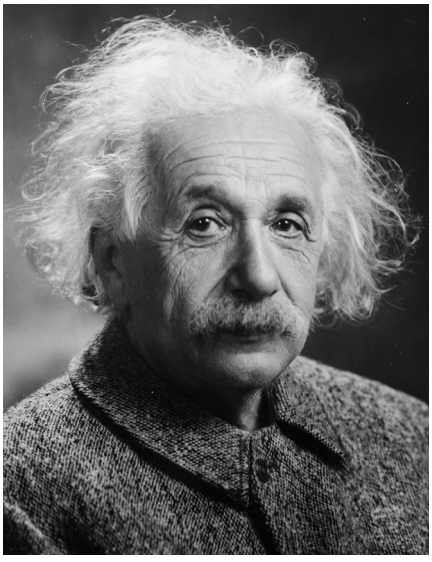
Edwin Hubble estableció que las galaxias en el universo se están alejando unas de otras con una velocidad que es proporcional a la distancia que las separa. A este movimiento de expansión del universo a gran escala se lo denomina flujo de Hubble. La recesión cosmológica nos indica que el espacio entre las agrupaciones de galaxias se está expandiendo y este movimiento de expansión se explica correctamente con la teoría sobre el origen y la evolución del universo conocida como el *Big Bang* o la Gran Explosión.

El universo profundo: las primeras galaxias

¿Cómo se formaron las galaxias? ¿Cómo evolucionan en el tiempo? No podemos contemplar el cambio en función del tiempo de una galaxia en particular en nuestro entorno más cercano: las escalas de tiempo involucradas en la evolución de las galaxias son mucho mayores que las humanas. No obstante, telescopios tan sensibles como el telescopio espacial Hubble o el interferómetro ALMA han sido capaces de detectar la señal procedente de galaxias muy lejanas. Debido a que la velocidad de la luz es constante, estas imágenes *profundas* proporcionan una instantánea de cómo era el universo en una época anterior a la actual, tanto como el tiempo que tarda su luz en llegar hasta nosotros. De este modo estamos captando la imagen del universo primitivo, es decir, el universo en sus primeras etapas. En particular las imágenes captadas por el telescopio Hubble en el denominado *Hubble Ultra Deep Field* (HUDF) han permitido detectar la existencia de galaxias nacidas entre tan solo 500 y 650 millones de años después del Big Bang que dio lugar al nacimiento del universo, cuya edad se estima en unos 13.800 millones de años.

X. Agujeros negros

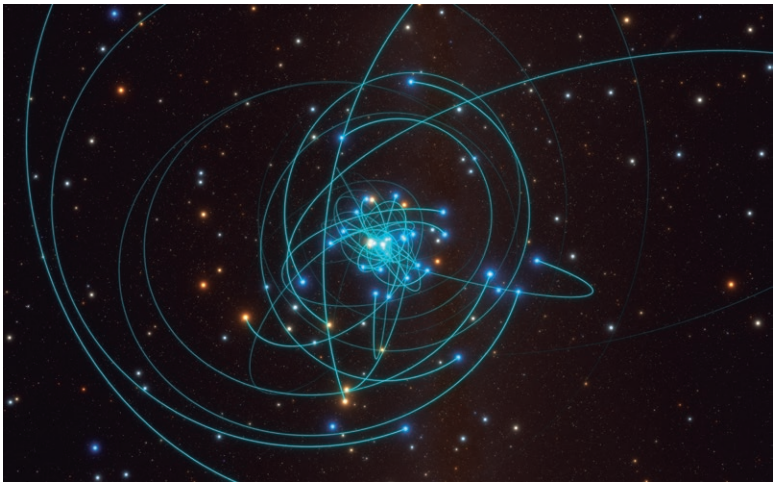
Los agujeros negros se encuentran entre los objetos más misteriosos del universo. Predichos hace más de un siglo por la teoría de la relatividad de Einstein, se han convertido en elementos esenciales de la astrofísica moderna con importantes implicaciones a distintas escalas. Empezamos a comprender lo que sucede alrededor de ellos, pero el interior de los agujeros negros sigue siendo una gran incógnita llena de posibilidades fascinantes.



Albert Einstein (1879-1955).

Nada puede escapar

La relatividad general de Einstein predice que todos los objetos masivos deforman el espacio-tiempo a su alrededor, dando lugar a fenómenos que escapan a nuestra intuición. Entre estos están los agujeros negros, unos objetos tan densos que ni siquiera la luz puede salir de ellos. Pero, si los agujeros negros atrapan incluso la luz, ¿cómo podemos saber que realmente existen?



Siguiendo las órbitas de las estrellas alrededor del núcleo de nuestra galaxia, los astrónomos han podido determinar la masa del agujero negro supermasivo.

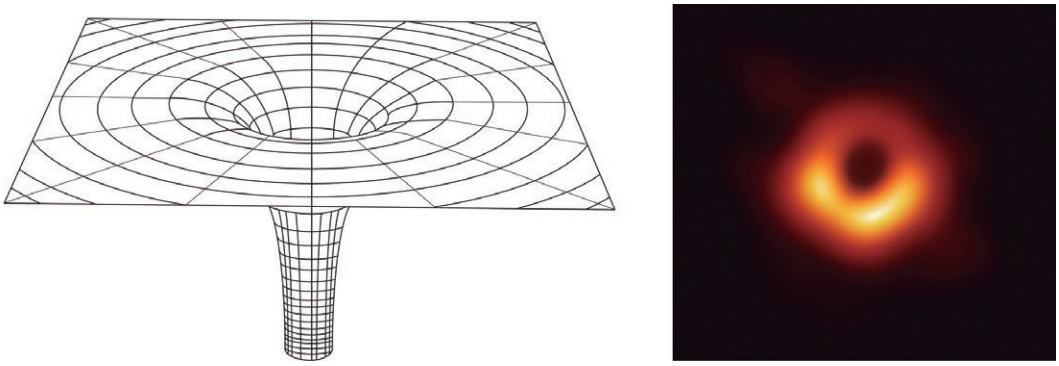
ESO/L. Calçada.

Aunque no podemos observar el interior de los agujeros negros, sí que percibimos sus efectos gravitatorios, de manera que los podemos detectar de forma indirecta. Así ha sido posible demostrar la existencia de agujeros negros de masa y tamaño diferentes, incluso colisiones entre agujeros negros que emiten una gran cantidad de ondas gravitacionales. En concreto, midiendo con gran precisión el movimiento de estrellas en el centro de nuestra galaxia, se ha podido determinar que el núcleo de la Vía Láctea contiene un agujero negro con una masa que es varios millones de veces superior a la masa de nuestro Sol. Y nuestra galaxia no es una excepción en este sentido: al parecer, todas las galaxias masivas contienen un agujero negro supermasivo en su núcleo.

La primera imagen de un agujero negro

Es natural preguntarse cuál es la frontera de un agujero negro; aquella que, una vez penetrada, ya no será posible escapar. Ese punto de no retorno se conoce como radio de Schwarzschild y es directamente proporcional a la masa del agujero negro. Por lo tanto, si un agujero negro tiene el doble de masa que otro, su tamaño también será el doble que el del primero.

En el año 2019, la colaboración *Event Horizon Telescope* anunció que habían obtenido la primera imagen directa de un agujero negro; para ello, utilizaron simultáneamente algunos de los mejores radiotelescopios del mundo, distribuidos por varios continentes. Es importante recalcar que el horizonte de sucesos es una definición matemática y no se trata de una frontera física: es posible identificarlo, tal y como se muestra en la imagen, gracias a la emisión de una nube de gas al atravesar esa frontera. Así, puede decirse que lo que vemos es en realidad la sombra del agujero negro, en este caso en el núcleo de la galaxia M87.

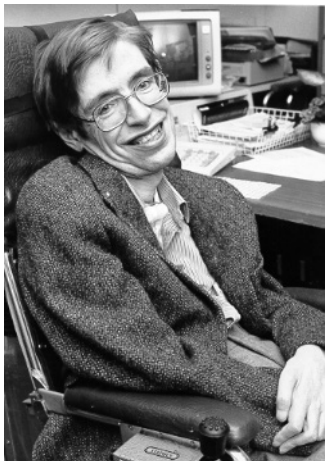


A la izquierda, malla que representa la deformación del espacio-tiempo alrededor de un agujero negro según la teoría de la relatividad general. A la derecha, primera imagen del horizonte de sucesos de un agujero negro.

EHT.

La radiación de Hawking

Si bien es cierto que las ecuaciones de Einstein predicen que nada puede escapar de un agujero negro, al tener en cuenta los efectos de la termodinámica y la física cuántica, Stephen Hawking demostró que los agujeros negros pueden perder masa. La energía emitida en la frontera del agujero negro se conoce como radiación de Hawking y puede dar lugar a su evaporación; sin embargo, este proceso sucede a un ritmo extremadamente lento, en escalas de tiempo comparables a la edad del universo.



Stephen Hawking (1942-2018)

El origen de los agujeros negros

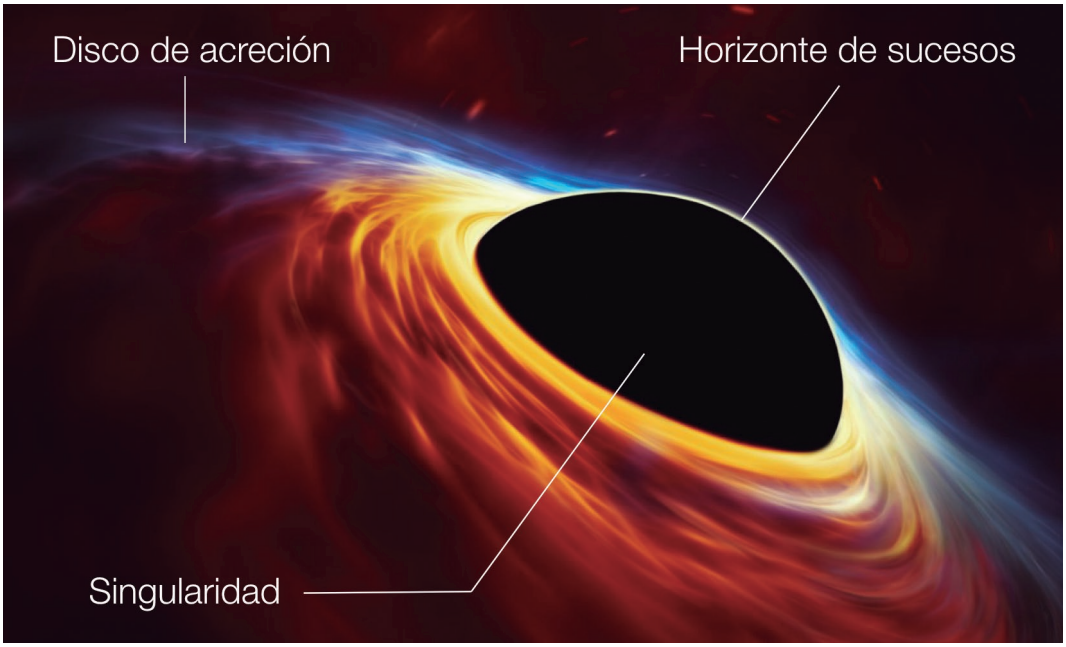
La vida de las estrellas se desarrolla como una lucha constante entre la presión térmica, que tiende a expandir la estrella, y la gravedad, que tiende al colapso. Cuando una estrella muy masiva consume su combustible nuclear, acaba por morir mediante una violenta explosión de supernova y durante algunos días puede emitir más luz que varios millones de estrellas juntas. Después de la explosión, la masa que no ha sido diseminada se contrae por efecto de la gravedad y, si dicha masa es suficientemente grande, ni siquiera la presión entre los núcleos atómicos podrá detener el colapso. Así, esa enorme masa seguirá concentrándose rápidamente hasta dar lugar a un agujero negro. Desde ese momento, el agujero negro podrá crecer al ir engullendo materia que se aproxime

lo suficientemente cerca; también es posible formar un agujero negro masivo mediante la fusión de varios agujeros negros más pequeños.

Viaje al centro de un agujero negro

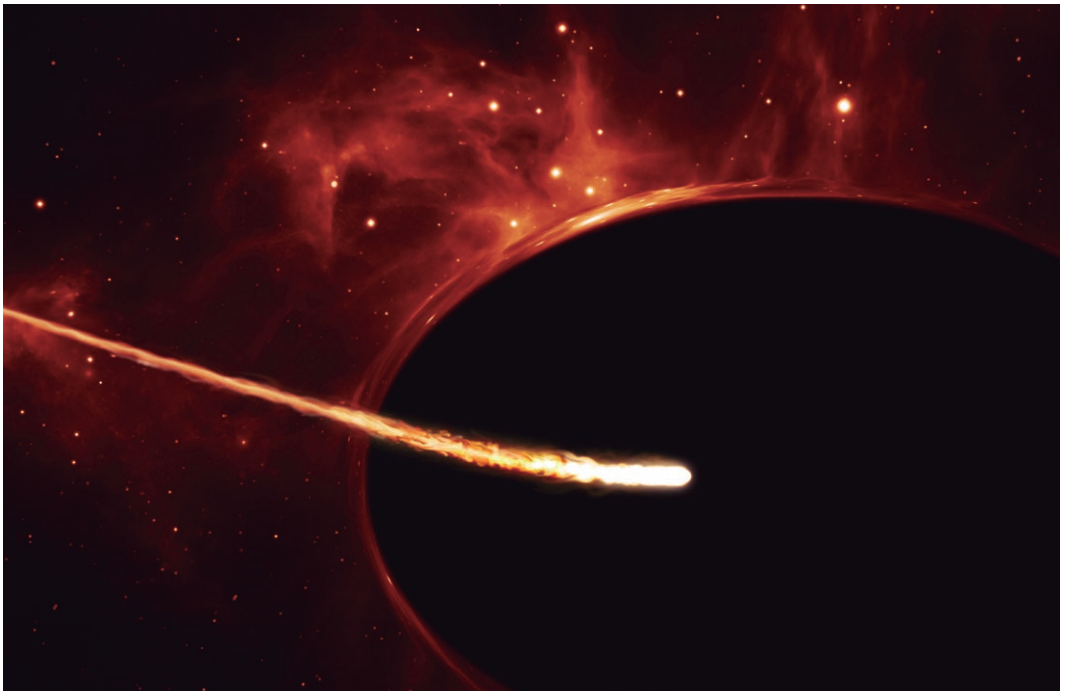
Los agujeros negros contienen una masa tan grande en un espacio tan pequeño que su campo gravitatorio es formidablemente intenso. Al tratarse de un objeto tan compacto, la fuerza de la gravedad varía mucho entre dos puntos que se encuentren a distancias ligeramente diferentes del centro; así, cualquier objeto que se aproxime al agujero negro se verá sometido a intensas fuerzas de marea que lo alargarán. A este proceso se lo conoce como *espaguetificación*, ya que el resultado es un alargamiento cada vez mayor a medida que nos aproximamos.

Si, a pesar de todo, conseguimos sobrevivir a las intensas fuerzas que rodean a estos monstruos y superamos el horizonte de sucesos, no podemos saber qué nos esperará al otro lado. Las ecuaciones de Einstein predicen una singularidad, pero no nos informan sobre qué



Esquema que representa un agujero negro rotante rodeado por un disco de acreción.

ESO/ESA/Hubble, M. Kornmesser.



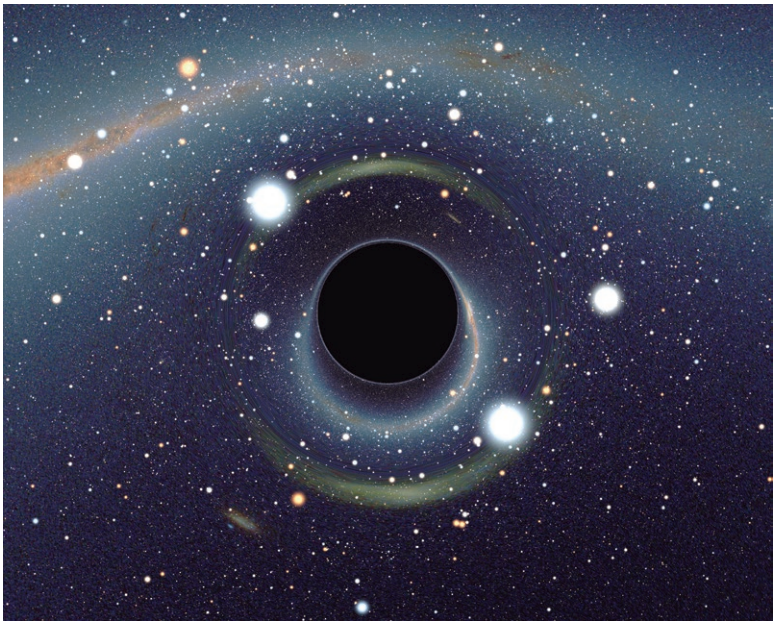
Recreación artística de una estrella de masa similar al Sol al aproximarse a un agujero negro supermasivo. El intenso campo gravitatorio del agujero negro deforma la estrella en un proceso de espaguetificación.

ESO/ESA/Hubble, M. Kornmesser.

ocurre dentro de estos objetos extremos. Una posibilidad teórica es que un agujero negro conecte dos puntos diferentes del espacio-tiempo, una conjetura para la que aún no tenemos ninguna prueba observacional. Con todo, esta posibilidad ha supuesto un terreno abonado para la ciencia-ficción: si fuera verdad, los agujeros negros podrían ser una especie de túneles intergalácticos, una suerte de atajos cósmicos conocidos como *agujeros de gusano*.

El teorema sin pelos

Además de trabajar sobre la pérdida de masa de los agujeros negros a la que ya nos hemos referido, Stephen Hawking también descubrió que estos misteriosos objetos obedecen a una serie de leyes que son un reflejo de las leyes clásicas de la termodinámica. En 1971, el genial físico enunció la segunda ley de la dinámica de los agujeros negros, mediante la cual la superficie de un agujero negro (el horizonte de sucesos) nunca puede hacerse menor. Esta misma ley proporciona una expresión para la entropía de esos objetos colapsados.



Esta simulación muestra la apariencia que tendría un agujero negro frente a la Gran Nube de Magallanes. El efecto de lente gravitatoria produciría una imagen completamente distorsionada de la Gran Nube compuesta por dos arcos que son parte de un anillo incompleto de Einstein. En la parte superior de la imagen aparece el disco de la Vía Láctea, también distorsionado por el efecto del agujero negro.

A. Riazuelo.

En esta misma época, Hawking también trabajó sobre el célebre «teorema sin pelos» (*no-hair theorem*), que establece que todos los agujeros negros pueden describirse por tres parámetros: masa, carga y momento angular. Toda otra información sobre la materia que cayó, o que esté cayendo, en el agujero negro se pierde bajo el horizonte de sucesos, una situación que el físico estadounidense John Wheeler expresó en forma humorística: «los agujeros negros no tienen pelos», es decir, no poseen más detalles ni información que la proporcionada por esos tres parámetros, lo que condujo al peculiar nombre para el teorema.

XI. Origen y evolución del universo

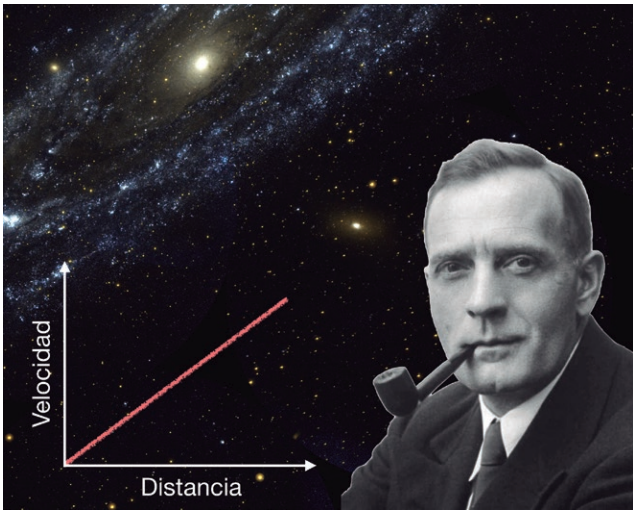
La cosmología estudia el universo como un todo. Por una parte, se ocupa de la composición y distribución espacial de sus elementos (galaxias, cúmulos de galaxias, materia oscura...). Por otra parte, estudia la evolución del conjunto del universo, especialmente su origen y sus primeros estadios.

La gran explosión

La cosmología moderna solo fue posible tras el desarrollo de la teoría de la relatividad general por Albert Einstein. Esta teoría muestra que el espacio es deformable, que puede expandirse o contraerse, y que sus propiedades dependen de la materia que contiene. Aunque a lo largo del siglo xx surgieron diversas teorías cosmológicas, solo una ha superado todas las pruebas observacionales: la Gran Explosión (o *Big Bang*). Esta teoría afirma que el universo empezó en un estado extraordinariamente denso y caliente, y que se está expandiendo y enfriando desde entonces. Un gran número de observaciones apoyan esta teoría, y entre ellas destacan tres: la recesión de las galaxias, la existencia del fondo cósmico de microondas y las abundancias de los elementos químicos más ligeros.

Alejamiento de las galaxias

La primera evidencia de que vivimos en un universo en expansión la obtuvo Edwin Hubble hacia 1930, cuando descubrió que las galaxias más lejanas se alejan de nosotros a una

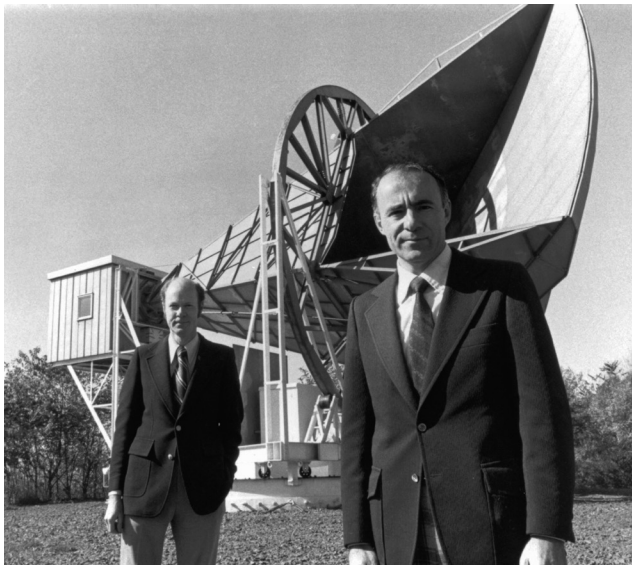


La proporcionalidad entre la velocidad de alejamiento mutuo de las galaxias y la distancia entre ellas es indicativo de la expansión del universo a gran escala, tal y como demostró Edwin Hubble (1889-1953). La galaxia de Andrómeda (en el fondo) fue la primera galaxia para la cual Hubble pudo determinar la distancia. (Imagen de M31: Cortesía de NASA/JPL/CalTech).

velocidad que crece con la distancia. Este efecto no es debido a que estemos en el centro de la expansión, sino a que todo punto del universo se aleja del resto de la misma manera.

Radiación de fondo cósmico

Otra indicación de que el universo fue mucho más denso y caliente en su juventud procede del descubrimiento accidental, en 1965, por Arno Penzias y Robert Wilson de la existencia de una radiación que llena el espacio y equivale a la de un cuerpo negro a 2,725 K. Esta radiación, conocida como fondo cósmico de microondas, procede de cuando el universo tenía solo unos 370.000 años.



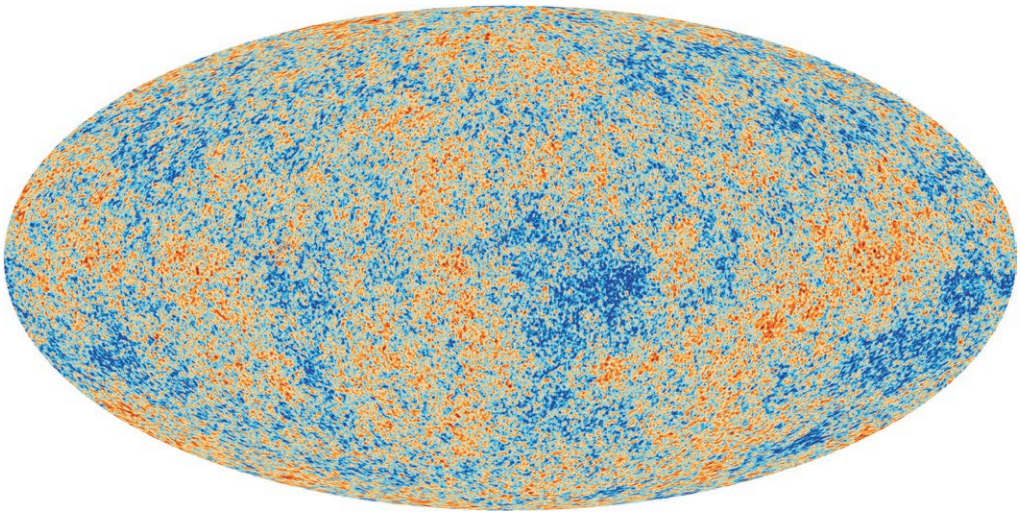
Arno Penzias y Robert Wilson (Cortesía de National Park Service).

Abundancia de los elementos

La proporción en el universo de los elementos químicos más ligeros (hidrógeno, deuterio, helio y litio) nos habla de las condiciones físicas durante los tres primeros minutos después del Big Bang. En ese momento el universo estaba tan caliente que las reacciones nucleares sucedían espontáneamente, formándose los primeros elementos químicos. Tras esos primeros minutos el universo se enfrió y las reacciones nucleares cesaron, quedando fijas las proporciones *primordiales* de hidrógeno, deuterio, helio y litio. La teoría del Big Bang es capaz de explicar la proporción de elementos observada hoy en día teniendo en cuenta ciertas correcciones debidas a su formación en el interior de las estrellas, donde actualmente tienen lugar reacciones nucleares.

Estructura a gran escala del universo

Una de las características fundamentales de la radiación del fondo cósmico de microondas es que presenta un elevado grado de isotropía: su intensidad es igual, en primera aproximación, en todas las direcciones de observación. Lo anterior subraya el carácter isótropo del universo a gran escala. Un análisis cuidadoso de la radiación de fondo cósmica ha permitido detectar desviaciones respecto a esta aparente uniformidad: se trata de fluctuaciones



Mapa de las fluctuaciones de temperatura del universo aproximadamente 370.000 años después del Big Bang. Las zonas rojas indican regiones ligeramente más calientes.

ESA/Planck.

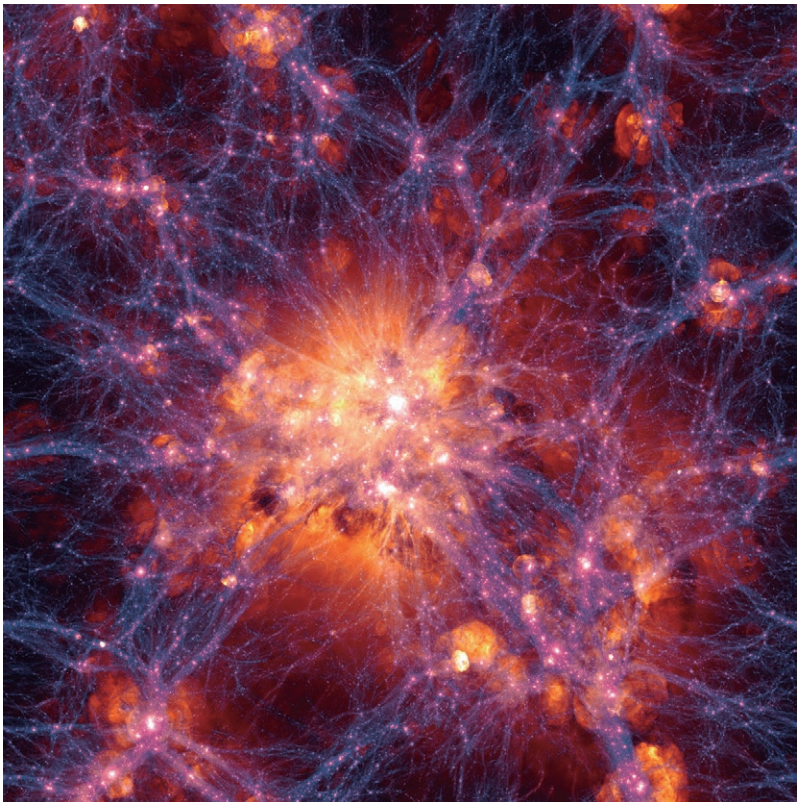


Imagen extraída de la simulación cosmológica Illustris. La distribución de materia oscura se muestra en azul, mientras que el gas está representado en naranja. La imagen muestra una región con un tamaño de unos 300 millones de años luz alrededor de un cúmulo de galaxias en el universo actual, al final de la simulación.

Colaboración Illustris.

que han podido ser observadas con mucho detalle a partir de los datos tomados por el satélite Planck de la Agencia Espacial Europea.

Las fluctuaciones indican que la materia y la radiación en el universo no eran totalmente uniformes en aquel momento, conocido como era de la recombinación. A partir de estas primeras fluctuaciones de densidad de materia en el universo debieron de nacer las actuales concentraciones de masa: los cúmulos y supercúmulos de galaxias.

El desarrollo de las simulaciones numéricas permite seguir la evolución temporal de las primeras fluctuaciones de densidad. Las fluctuaciones espaciales en la emisión del fondo cósmico informan de cuáles son las fluctuaciones de densidad unos 370.000 años después del Big Bang.

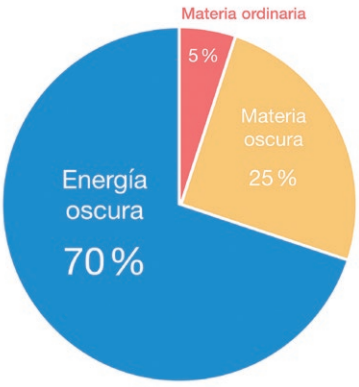
La evolución posterior de esas primeras fluctuaciones dependerá de los ingredientes del modelo, en definitiva, de cuál es la estructura y la composición del universo a gran escala.

En la imagen de la izquierda vemos la luz visible de un cúmulo de galaxias, mientras que la imagen de la derecha muestra la distribución de materia oscura alrededor de ese cúmulo en rosa (cortesía de Kilo-Degree Survey Collaboration/A. Tudorica & C. Heymans/ESO).

Las simulaciones realizadas con superordenadores se adaptan a la escala espacial que se quiere reproducir y, de esta manera, revelan que el universo a gran escala está compuesto por inmensos filamentos de gas y materia oscura, en cuyas intersecciones surgen cúmulos de galaxias.

Materia y energía oscura

Las curvas de rotación de las galaxias espirales indican que debe haber un alto porcentaje (hasta el 90%) de masa no visible en estos objetos; a esta materia, cuya naturaleza desconocemos, se la denomina *materia oscura*. Existen evidencias adicionales de que existe materia oscura a gran escala en el universo. Las galaxias que forman parte de los cúmulos se mueven a velocidades tan grandes que, de no existir mucha más masa en el cúmulo de la que se deduce de la distribución de materia luminosa de las galaxias, los cúmulos acabarían disgregándose.



Distribución de materia y energía en el universo según nuestro conocimiento actual.

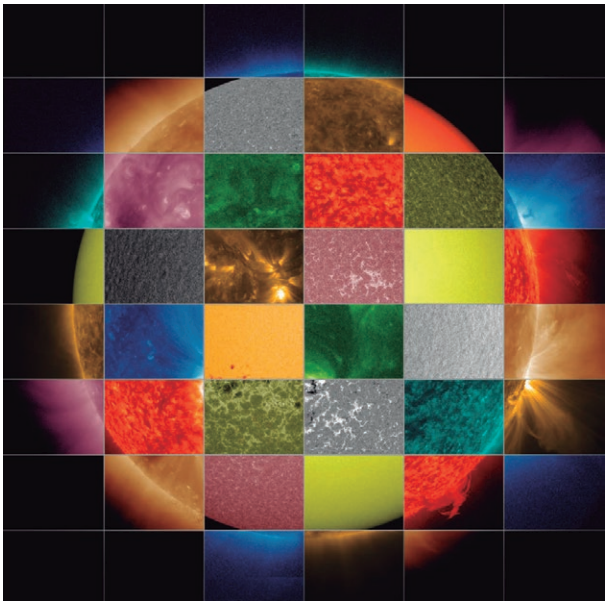
Además de la materia oscura, los astrofísicos han podido determinar que el universo no se expande a una

velocidad constante, sino de forma acelerada. Según el modelo cosmológico actual, esto implica que el universo está dominado por una *energía oscura* de naturaleza desconocida. Las contribuciones fundamentales a la densidad total de materia y energía en el universo se distribuyen, según nuestro conocimiento actual, en un 5% de materia bariónica (protones, neutrones, electrones, átomos, moléculas), un 25% de materia oscura y un 70% de energía oscura. En definitiva, el 95% del universo está formado por una forma exótica de materia y energía sobre la que nuestro conocimiento es muy limitado. ¡Aún queda mucho por saber!

XII. Astronomía multimensajero

La astronomía es una ciencia netamente observacional: para obtener conclusiones científicas sobre el universo y sus componentes, primero debemos observarlo. Desde la invención del telescopio en el año 1609, nuestro conocimiento del cosmos ha incrementado de forma exponencial gracias al desarrollo de instrumentación cada vez más sofisticada.

Durante gran parte de la historia de la astronomía dichas observaciones se restringieron a lo que se conoce como espectro visible, es decir, aquella región del espectro electromagnético que es perceptible por el ojo humano. Sin embargo, los objetos que pueblan el universo emiten típicamente a lo largo de todo el espectro electromagnético, si bien en qué región emiten con mayor intensidad depende de las



El Sol observado a distintas longitudes de onda.

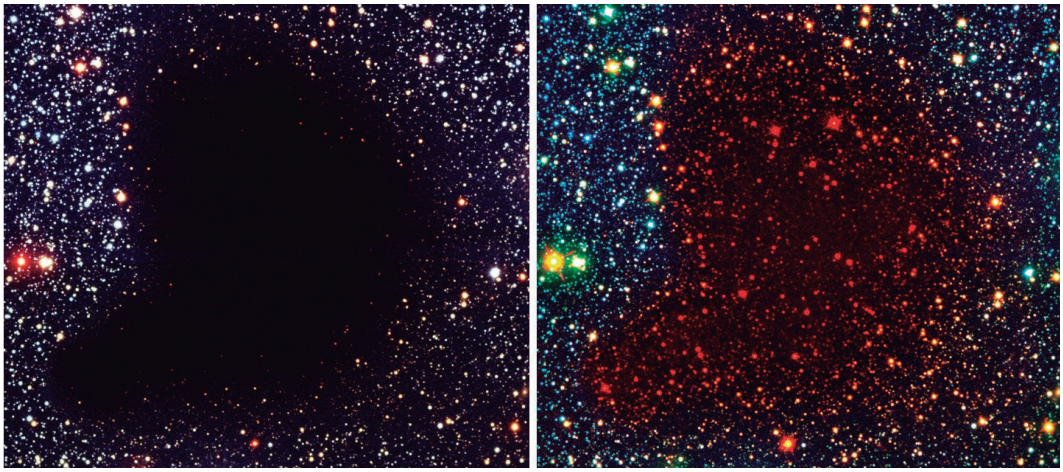
NASA/SDO/Goddard Space Flight Center.

características de cada objeto. Así pues, para conocer en detalle el universo necesitamos observar a distintas longitudes de onda. No fue hasta el siglo xx que fuimos capaces de realizar dichas observaciones, extendiendo nuestra capacidad desde los rayos X y el ultravioleta (UV) hasta las ondas de radio, pasando por el infrarrojo cercano, medio y lejano.

La observación en longitudes de onda distintas del visible avanzó de manera decisiva con la instalación de telescopios en plataformas espaciales, ya que desde la Tierra solo podemos observar en el rango visible, infrarrojo cercano y partes del espectro de radio. El uso de observatorios espaciales significó una revolución para la astronomía, abriendo la ventana a eventos y objetos antes vedados a nuestra visión. La historia de estos observatorios se inicia en los años 60 con el lanzamiento de los satélites OSO (por su nombre en inglés *Orbiting Solar Observatory*), dedicados a la observación del Sol. Pero sin duda el observatorio que revolucionó el campo fue el telescopio espacial Hubble, lanzado por la NASA en el año 1990, y que sigue operando 30 años después.

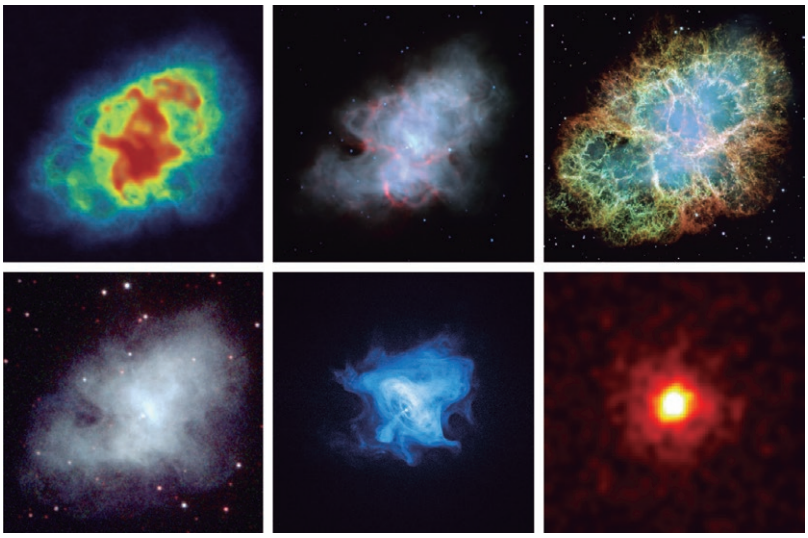
Los diversos aspectos del cielo

En la actualidad el estudio de los objetos astronómicos se lleva a cabo combinando observaciones en distintas longitudes de onda, tantas como sea posible. De esta forma se obtie-



La nube oscura Barnard 68 observada en el óptico (izquierda) y en el infrarrojo (derecha). En el óptico, el material polvoriento de la nube actúa como una pantalla que impide ver las estrellas situadas tras ella, por lo que vemos una especie de mancha de oscuridad. Sin embargo, a longitudes de onda mayores, la luz infrarroja de las estrellas puede atravesar la nube y, gracias a ello, podemos ver la población estelar situada detrás.

ESO.



La Nebulosa del Cangrejo observada a distintas longitudes de onda. De izquierda a derecha y de arriba abajo las imágenes se corresponden con radio, infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos Gamma.

NASA.

nen visiones complementarias acerca de la naturaleza del objeto observado y de los fenómenos físicos que tienen lugar en dicho objeto. Distintos tipos de eventos y objetos emiten con preponderancia en distintas regiones del espectro electromagnético: mientras que el UV y rayos X nos informan acerca de eventos particularmente violentos y energéticos, las ondas de radio, en el otro extremo del espectro electromagnético, nos informan acerca del universo frío, compuesto de nubes moleculares, y en general del medio interestelar.

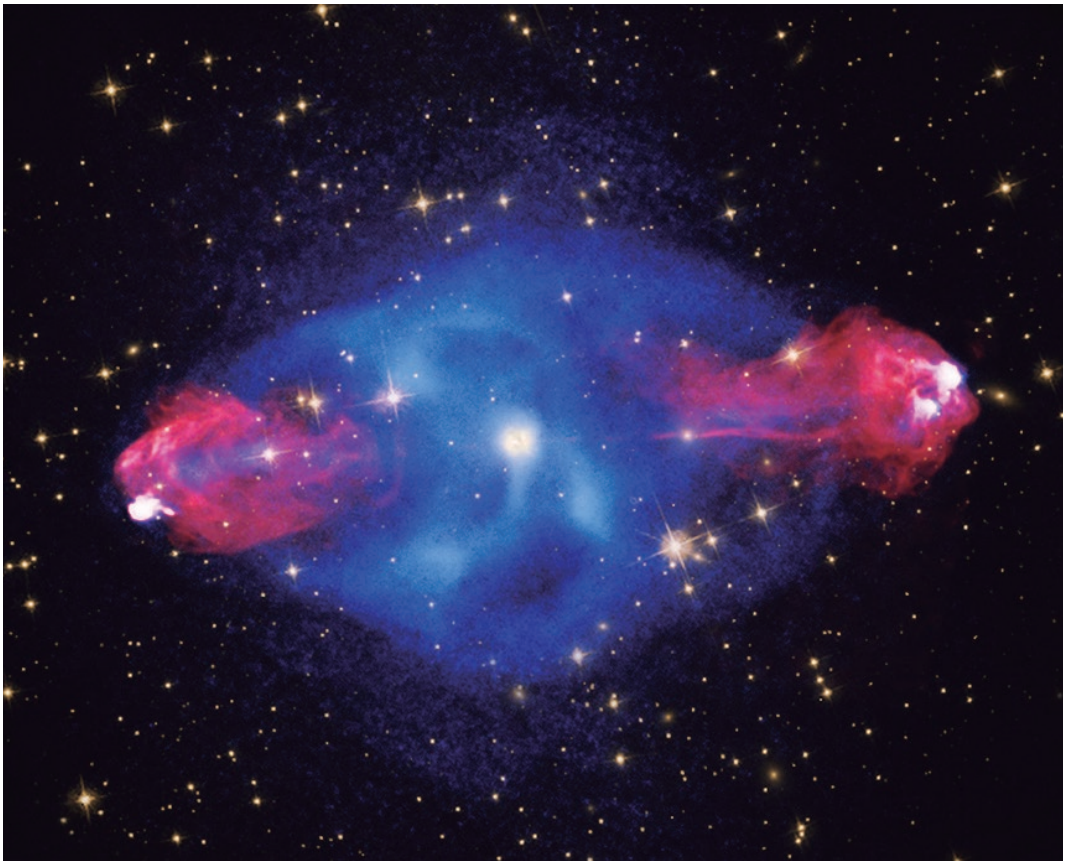
Una herramienta habitual en la astronomía actual es el estudio de la denominada *distribución espectral de energía* (SED, por sus siglas en inglés), que representa la intensidad con la que emite un cuerpo astronómico en función de la longitud de onda. Dicha SED tendrá una forma radicalmente distinta en función de si observamos una nube molecular, una estrella joven, una estrella madura, o galaxias en distinto estado evolutivo.

Rayos X. Cuando observamos en rayos X, accedemos al estudio de algunos de los eventos más energéticos del universo (que suceden a temperaturas de centenares de millones de grados Kelvin), fundamentalmente colisiones que dan lugar a plasmas (es decir, gas ionizado, en el que los electrones se han separado de los núcleos atómicos). Por ejemplo, cuando una estrella muere en forma de nova, expulsa el material que la compone a gran velocidad; cuando este material se encuentra con el expulsado a menor velocidad en etapas más tempranas se produce una colisión muy energética que provoca la emisión de rayos X por parte del material sometido a la onda de choque.

Los agujeros negros, probablemente los objetos más misteriosos del cosmos, emiten potentes chorros de rayos X cuando parte del material procedente de su entorno cae sobre el

agujero negro, alcanzando temperaturas de millones de grados Kelvin. Debido a la opacidad de nuestra atmósfera, como observatorios de rayos X se emplean telescopios espaciales y globos sonda, siendo los observatorios más destacados Chandra (NASA) y XMM/Newton (ESA); este último es uno de los observatorios espaciales más longevos de la historia.

Radiación ultravioleta. Las observaciones en el ultravioleta (UV) nos permiten estudiar astros en los que las temperaturas superan los 10.000 grados Kelvin. Se pueden así sondear las estrellas más calientes de la Galaxia, así como observar el gas ionizado en distintos ambientes y las potentes emisiones procedentes del entorno de objetos ultracompactos

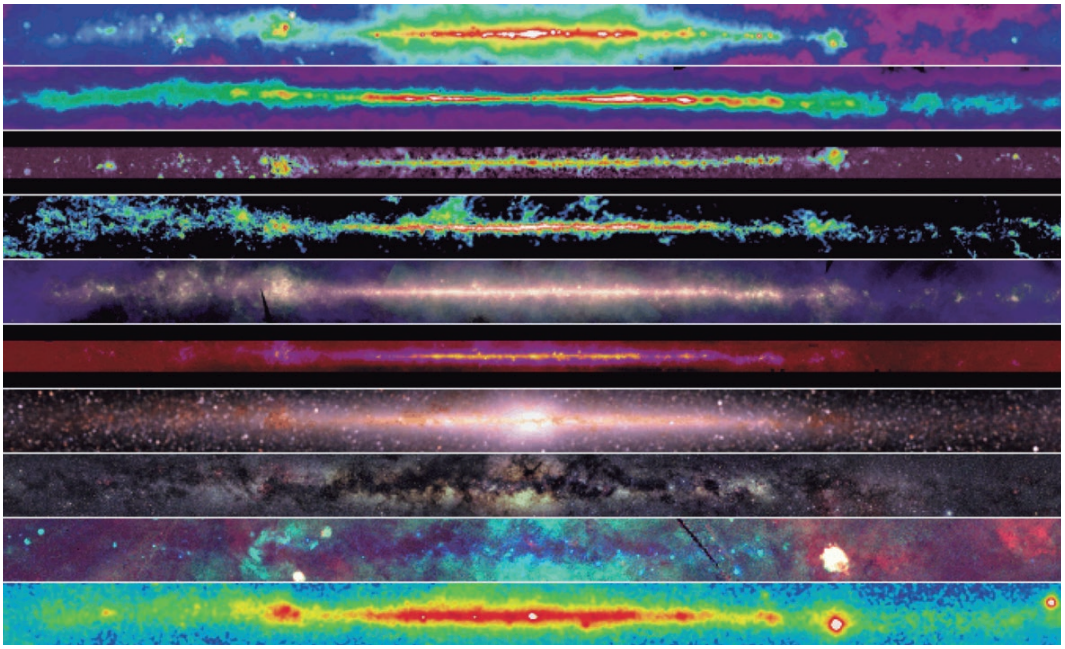


La galaxia Cygnus A observada a distintas longitudes de onda. En azul se representa la emisión de rayos X, en rojo la emisión en ondas de radio y en amarillo la emisión en el óptico o visible.

NASA/CXC/NRAO/HST.

(como estrellas de neutrones y agujeros negros). Al igual que sucede con los observatorios de rayos X, los del ultravioleta son telescopios espaciales. Uno de los más destacados fue el *International Ultraviolet Explorer* (IUE), telescopio que fue puesto en órbita gracias a la primera gran colaboración en astronomía entre las agencias americana (NASA) y europea (ESA), con participación del *UK Science Research Council*. Cabe destacar que el IUE fue el primer telescopio espacial operado por astrónomos que visitaban *in situ* las instalaciones en tierra en Europa y EE.UU.

Rango óptico. El universo visible (es decir, el que emite en el rango de longitudes de onda visible u óptico) es al que estamos acostumbrados, pues es el que podemos observar a simple vista. El universo visible se encuentra dominado por la emisión procedente de las estrellas. Las observaciones en el espectro visible se realizan fundamentalmente desde tierra, gracias a una extensa red de telescopios que están distribuidos por los hemisferios norte y sur. En la actualidad, disponemos de una potente colección de telescopios con espejos de unos 10 metros, entre los que destacan el Gran Telescopio de Canarias (Observatorio



La Vía Láctea observada a distintas longitudes de onda. Del panel superior al inferior: radiocontinuo a 408 MHz, hidrógeno atómico, radiocontinuo a 2,5 GHz, hidrógeno molecular, infrarrojo lejano, infrarrojo medio, infrarrojo cercano, óptico, rayos X y rayos gamma (abajo).

NASA.

Roque de los Muchachos, La Palma, Islas Canarias), los telescopios Keck 1 y 2 (situados en Mauna Kea, Hawai, EEUU) y los VLT (ESO/Chile). Además, la siguiente red de telescopios gigantes, con espejos de hasta 39 m, está ya en fase de desarrollo.

Infrarrojo. Las observaciones en el infrarrojo cercano nos permiten estudiar los granos de polvo (pequeñas partículas de material sólido) que abundan en las nebulosas calientes que rodean a las estrellas jóvenes, tanto por la luz que emite el propio polvo, como por la luz procedente de la estrella dispersada por el material polvoriento. Estas observaciones son de gran interés, pues en esas regiones cercanas a las estrellas jóvenes se produce la formación planetaria. Gracias al proyecto 2MASS (por su nombre en inglés *2 Micron All Sky Survey*), que utilizó telescopios tanto en el hemisferio norte como en el sur, disponemos de un mapa preciso de todo el cielo en el infrarrojo cercano.

Las observaciones en el infrarrojo próximo se complementan con las que se realizan en el infrarrojo medio y lejano, que trazan la emisión de material polvoriento más frío, como el de las nubes moleculares que pueblan el espacio interestelar, el de las regiones más exteriores de los sistemas planetarios en formación, el polvo alrededor de estrellas moribundas, o el que se sitúa en las regiones en torno al centro de galaxias masivas. Los principales observatorios en el infrarrojo lejano fueron telescopios espaciales como *Spitzer* y *Herschel*, si bien uno de los instrumentos más originales de los últimos tiempos es el observatorio infrarrojo SOFIA, alojado a bordo de un avión que vuela a gran altura para evitar la extinción atmosférica.

Radiofrecuencias. Cuando observamos en longitud de onda de submilimétricas y de radio, accedemos a las regiones más frías del universo, algunas de las cuales son, además, las más ocultas a nuestra mirada en otras longitudes de onda, pues la mayoría de materiales es transparente a las longitudes de onda de radio, incluso a densidades muy elevadas. Este dominio de longitudes de onda es el óptimo para el estudio del medio interestelar, y de las nubes moleculares en las que se forman las estrellas. Además, un elevado número de galaxias que aparecen como normales en otras longitudes de onda, emiten con intensidad en ondas de radio. Dicha emisión intensa se debe a la conocida como radiación sincrotrón, producida por partículas cargadas al acelerar y frenar en el seno de campos magnéticos. Esta emisión se asocia a la presencia de núcleos galácticos activos (AGN, por sus siglas en inglés) que denotan la existencia de agujeros negros supermasivos en el seno de estas galaxias.

Debido a las limitaciones de resolución espacial, la radioastronomía recurre a la técnica conocida como interferometría. Algunos de los instrumentos más destacados de la actualidad se encuadran dentro de esta categoría, como el observatorio *Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array* (ALMA) que emplea 66 antenas capaces de ocupar un espacio de hasta 16 km, ofreciendo una resolución espacial sin precedentes.

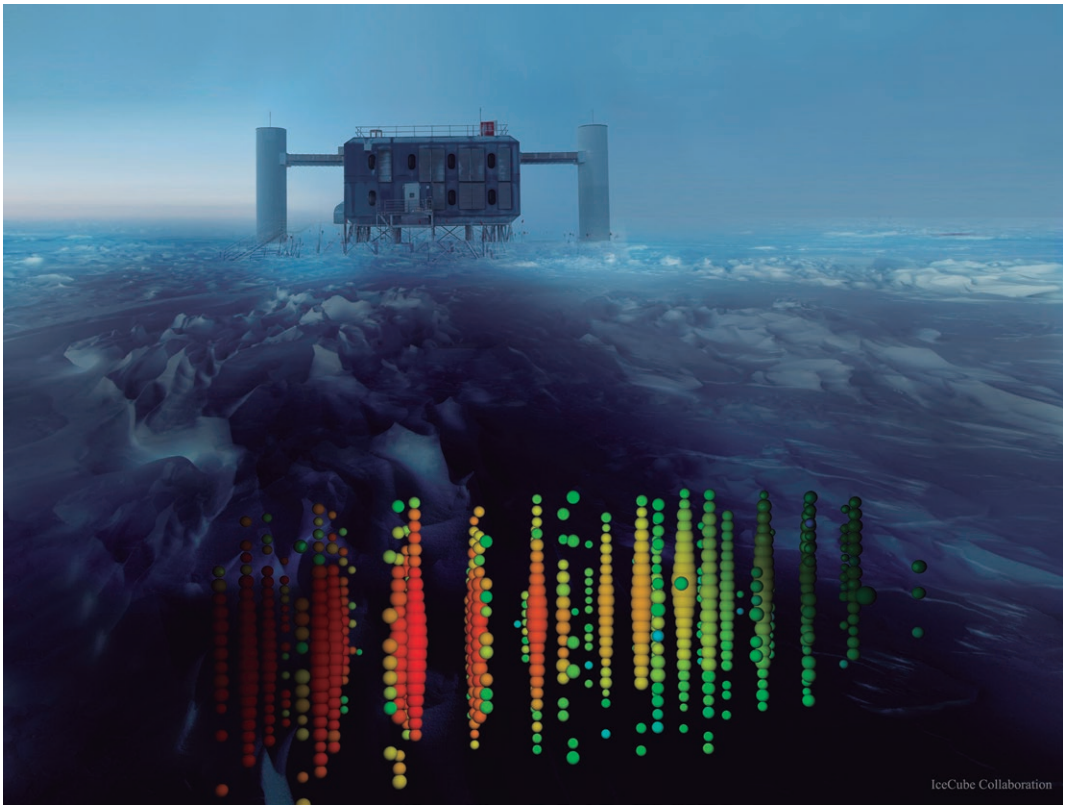
Para evitar buena parte de la pantalla que supone la atmósfera terrestre, el telescopio de infrarrojos SOFIA va montado en un jumbo 747SP modificado.

NASA/Jim Ross.

Observaciones más allá del espectro electromagnético

Finalmente, en los últimos años hemos visto como nuestra capacidad de observación se extiende más allá de la propia luz con la detección de las primeras ondas gravitacionales a cargo del detector LIGO en 2015, lo que supuso una revolución científica no solo para la astrofísica y la astronomía, sino para la física en general.

Además, en los últimos tiempos hemos visto también la implantación de detectores de partículas subatómicas, como *IceCube*, capaz de detectar los neutrinos emitidos durante eventos particularmente energéticos, así como de diversos detectores de rayos gamma (como el telescopio espacial Integral, de la ESA). A esta nueva astronomía capaz de combinar las observaciones de radiación electromagnética, ondas gravitacionales y partículas subatómicas se la conoce como astronomía multimensajero.



El observatorio de neutrinos IceCube está emplazado en la Antártida. Sus largas cadenas de detectores están enterradas bajo el hielo. IceCube Collaboration.

XIII. Astronomía espacial

Desde la Antigüedad el ser humano ha imaginado cómo se podría viajar al espacio exterior. Pensemos, por ejemplo, en las antiguas historias mitológicas de Ícaro o en los viajes a la Luna imaginados por Luciano de Samósata en el siglo II, o incluso en la Divina Comedia de Dante del siglo XIV. Con el declive del mundo medieval y la llegada del Renacimiento Johannes Kepler, el primer astrónomo moderno que explicó correctamente el movimiento de los planetas alrededor del Sol, escribió en el siglo XVII *El Sueño* (*Somnium*), un relato en el que los protagonistas viajan a la Luna y que es considerado la primera narración de ciencia ficción de la historia. Desde entonces otros autores como Cyrano de Bergerac, Edgar Allan Poe, Alejandro Dumas, Julio Verne o H. G. Wells también imaginaron viajes espaciales, pero fue en 1969 cuando todos estos sueños se hicieron realidad y el ser humano puso el pie por primera vez en la Luna. Desde el punto de vista científico la exploración del espacio

Yuri Gagarin (1934-1968) fue elegido entre miles de pilotos de caza para realizar el primer viaje tripulado al espacio tanto por sus excelente expediente académico como por su escasa estatura (1,57 m), que lo hacía idóneo para la pequeña cabina del Vostok 1.

nos ha permitido el estudio del sistema solar más cercano con naves espaciales y astronautas, el más lejano con sondas espaciales, y el universo en su conjunto con telescopios espaciales que superan las limitaciones de observar desde la superficie. En el aspecto técnico estos desafíos han requerido de tecnologías que parecían más propias de los autores de ciencia ficción hasta pocas décadas antes. Estos avances tecnológicos han encontrado innumerables aplicaciones en nuestra vida cotidiana: comunicaciones inalámbricas, baterías, reciclado del agua, alimentos deshidratados, trajes ignífugos, fibra de vidrio, velcro, gafas con filtros protectores, TAC (tomografía axial computerizada para diagnosticar enfermedades), o incluso sartenes antiadherentes, por citar algunos.

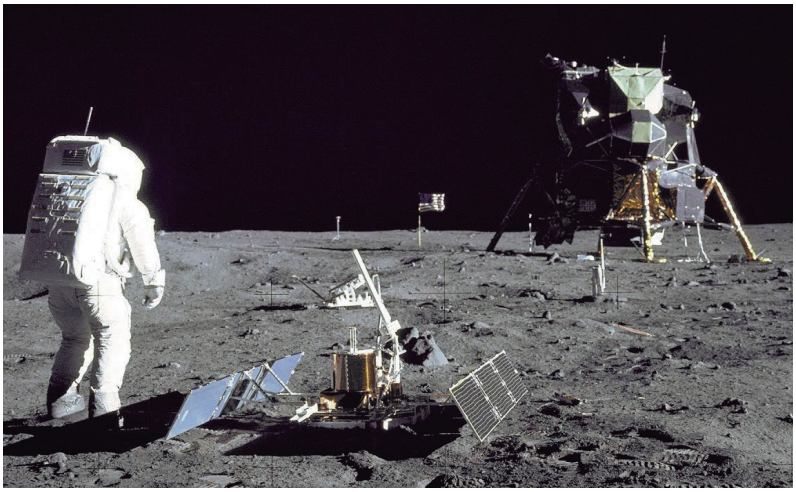
La carrera espacial

Si bien el primer ingenio humano que logró salir de la atmósfera fue el cohete V4 desarrollado por el alemán Wernher von Braun en 1942, la derrota de Alemania en la Segunda Guerra Mundial abrió la puerta a una rivalidad tecnológica y armamentística entre Estados Unidos y la Unión Soviética, una de cuyas vertientes fue la aplicación de los cohetes a la carrera espacial.

Entre 1957 y 1961 se lanzaron artefactos con animales diseñados para probar métodos de reentrada, hasta que, el 12 de abril de 1961, el astronauta soviético Yuri Gagarin se convirtió en el primer hombre que viajó al espacio cuando efectuó un vuelo con la nave Vostok 1, que duró 108 minutos y completó una órbita alrededor de la Tierra. Menos de un mes después, Estados Unidos respondió con el vuelo suborbital de Alan Shepard y el vuelo orbital de John Glenn al año siguiente.

La Unión Soviética siguió adelantando en hitos a Estados Unidos con los primeros vuelos con varios tripulantes, la primera salida espacial con traje, o la primera mujer astronauta, hitos arriesgados que desembocaron en algunos accidentes y en la cancelación del programa lunar. Estados Unidos reclutó a von Braun y muchas otras mentes brillantes con el propósito de conquistar la Luna con el programa Apollo. El momento cumbre fue el alunizaje de los astronautas Neil Armstrong y Edwin Aldrin el 21 de julio de 1969 a bordo del módulo lunar del Apollo XI, apenas 11 años después de constituirse la NASA. Su compañero Michael Collins permaneció en órbita en la nave principal. En los tres años siguientes otras cinco misiones lograron alunizar.

En los años 70 la Unión Soviética se concentró en desarrollar las primeras estaciones espaciales, siendo la Salyut 6 y 7 las más exitosas. Estados Unidos tuvo operativa la Skylab en 1973, pero solo durante seis meses. El final de la Guerra Fría posibilitó las primeras colaboraciones internacionales en el seno de la estación Mir, que estuvo operativa entre 1987 y 2001 desarrollando experimentos sobre biotecnología y pruebas de cámaras o sensores atmosféricos.



Los astronautas del programa Apollo utilizaron el primer taladro inalámbrico para recoger muestras de rocas. También instalaron sensores y espejos que permitieron estudiar temblores y monitorizar con precisión la distancia a la Luna.

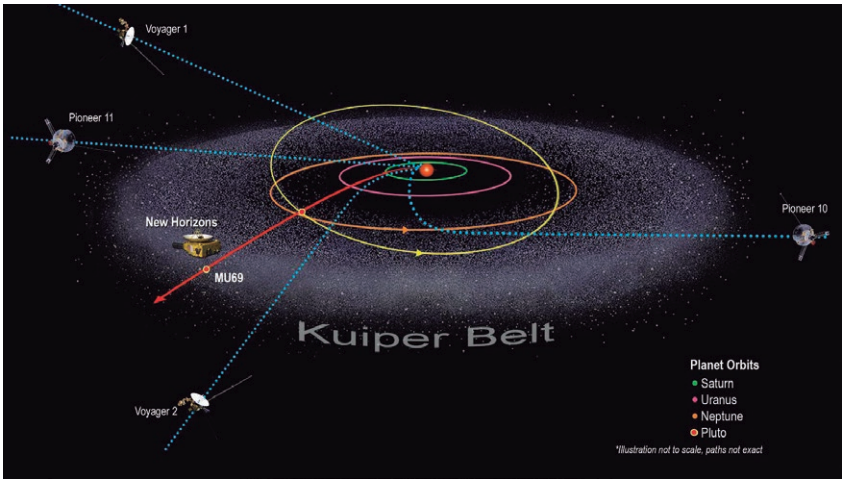
NASA.

Resultó entonces evidente la conveniencia de compartir los conocimientos y futuros gastos entre más países y focalizar los objetivos en el desarrollo científico y tecnológico. Con este propósito, surgió la Estación Espacial Internacional, que en el año 2000 comenzó a ser habitada con dos módulos, a los que se añadieron otros que actúan como nodos para distribuir varios laboratorios en los que se han desarrollado un sinfín de experimentos en microbiología, medicina, y propiedades de los materiales. Se espera que siga en activo al menos hasta 2024.

Las sondas espaciales

Las sondas espaciales permiten explorar el sistema solar con artilugios teledirigidos provistos de cámaras y otros instrumentos, pero sin los peligros y costes de la astronaútica. La Unión Soviética no solo se adjudicó el hito del lanzamiento del Sputnik en 1957, sino que en 1970 logró hitos tan dispares como posar la sonda Venera 7 en Venus y explorar la Luna con el Lunojod 1, el primer vehículo teledirigido. Por su parte, Estados Unidos inició un ambicioso programa de exploración con las sondas Mariner hacia los planetas interiores, y las Pioneer y Voyager hacia el sistema solar exterior.

Los resultados de la sonda Viking, que aterrizó en Marte en 1976, despertaron el interés por la posible presencia de vida en el *planeta rojo*, por lo que se enviaron más sondas para cartografiar la superficie, estudiar su atmósfera e historia geológica, y aterrizar con vehículos exploradores para analizar sus rocas en detalle. La sonda Magallanes hizo un mapa de Venus y la Galileo estudió la atmósfera de Júpiter. En 1997 la Agencia Espacial Europea lanzó la sonda Cassini hacia Saturno. Su módulo Huygens descendió en 2005 sobre la superficie



Tras estudiar los planetas gigantes gaseosos las sondas Pioneer 10 y 11 y las Voyager 1 y 2 se adentran en el espacio interestelar. La sonda New Horizons estudió el planeta enano Plutón y se encuentra en el cinturón de Kuiper.

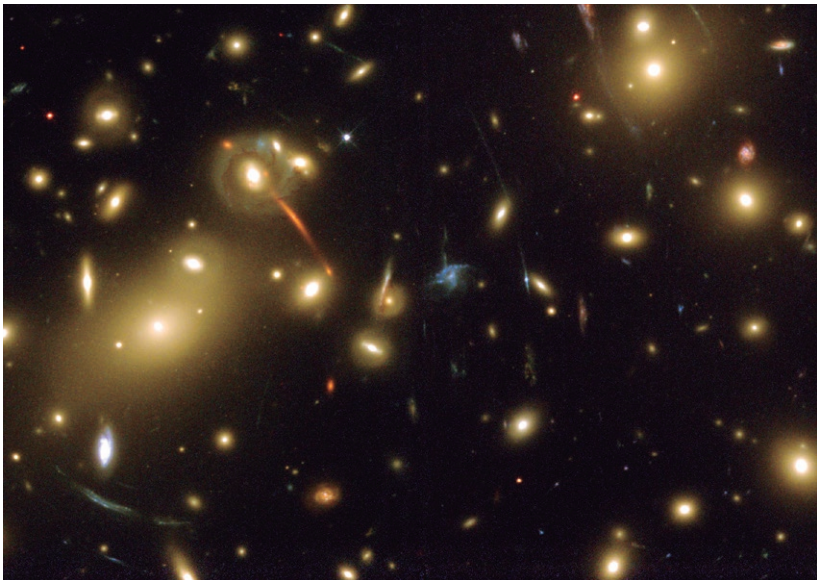
NASA.

de la luna Titán y encontró mares y lluvia de metano. Misiones posteriores lograron recoger muestras de cometas y asteroides y retornarlas a la Tierra.

Otro tipo de sondas son los satélites artificiales de comunicaciones o militares, y también los de propósito científico. Por ejemplo, los satélites de observación terrestre, con los que se monitoriza constantemente un gran número de parámetros relacionados con el clima durante muchos años y de manera uniforme. Esto, unido al desarrollo de la informática, ha permitido implementar modelos meteorológicos de predicción precisos a corto plazo, así como modelos a más largo plazo para el cambio climático.

Telescopios espaciales

La atmósfera terrestre limita la nitidez de las imágenes que se pueden conseguir desde la superficie, y absorbe en todas las longitudes de onda excepto la luz visible y las ondas de radio. El primer problema se puede sortear en parte con los sistemas de óptica adaptativa, pero el segundo nos impide detectar la emisión en alta energía (gamma, X, ultravioleta) y la mayor parte de la región infrarroja del espectro. Esto impide realizar cualquier estudio astronómico desde tierra de objetos relacionados con fenómenos violentos o emisión de polvo y gas caliente, como restos de supernovas recientes o el entorno de los agujeros negros. También dificulta observar objetos fríos como protoestrellas y discos circunestelares que emiten en el infrarrojo. Además, para obtener una visión no sesgada de un objeto es necesario observarlo en todas las longitudes de onda posibles, pues cada una muestra la emisión del gas y polvo a diferentes temperaturas. Otro problema que pronto podría ser muy importante, tanto para astrofísicos como para astrónomos aficionados, lo constituyen



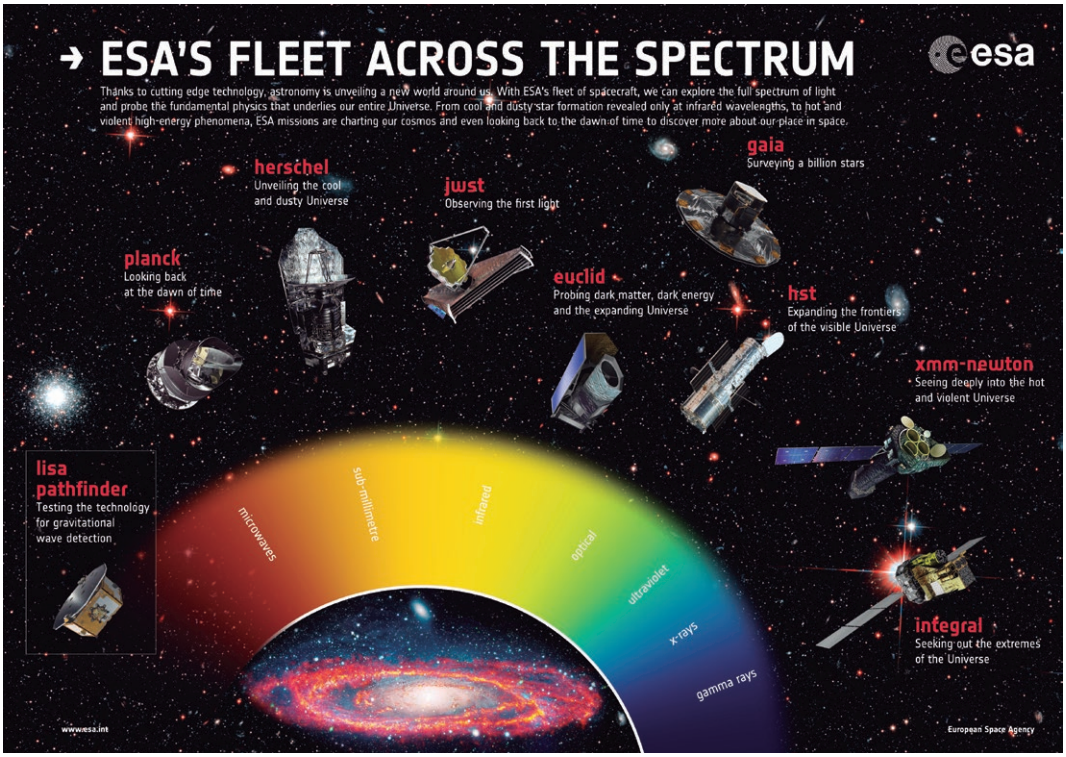
La gran masa de las galaxias amarillas del cúmulo Abell 2218 curva la trayectoria de la luz de las galaxias azules mucho más lejanas, distorsionando sus imágenes y amplificando su brillo hasta hacerlas detectables.

NASA/HST/A. Fruchter

las flotas de miles de satélites reflectantes que diferentes empresas pretenden poner en órbita durante los próximos años.

Los telescopios espaciales permiten por lo tanto estudiar fenómenos astronómicos que no son detectables desde la Tierra. También permiten realizar observaciones en el rango óptico con la ventaja de que no se ven sometidos a las limitaciones que impone la atmósfera terrestre.

Sin duda el telescopio espacial más conocido es el Hubble, lanzado en 1990 y reparado de un defecto en su espejo primario en 1994. Con él se han logrado grandes hitos de la historia de la astronomía, como la imagen profunda de un campo de galaxias muy lejano en un lugar del cielo desde donde no se veía nada desde la Tierra, la observación directa de protoestrellas en Sagitario y discos protoplanetarios en la región de Orión, o una impresionante imagen muy definida de lentes gravitacionales en el cúmulo Abell 2218. Según cómo se distribuye la masa en el objeto que actúa de lente se pueden observar arcos, anillos completos (si la alineación es perfecta), o imágenes múltiples del mismo objeto de fondo. El efecto lente fue anticipado por Albert Einstein, y se ha convertido accidentalmente en una herramienta muy útil para estudiar tanto la materia oscura (que no emite luz, pero contribuye con su gravedad al movimiento del cúmulo y el efecto lente) como las galaxias de fondo amplificadas, que se encuentran entre las más antiguas del universo. El satélite Euclid de la ESA utilizará el efecto lente para profundizar en el conocimiento de la materia oscura y la expansión del universo.



Telescopios espaciales con participación de la Agencia Espacial Europea en 2020. Planck, Herschel, y XMM-Newton fueron misiones exitosas. Gaia está en activo y Cheops se lanzó recientemente para buscar exoplanetas. El telescopio James Webb sucederá pronto al Hubble e Integral al XMM. LISA medirá ondas gravitacionales desde el espacio.

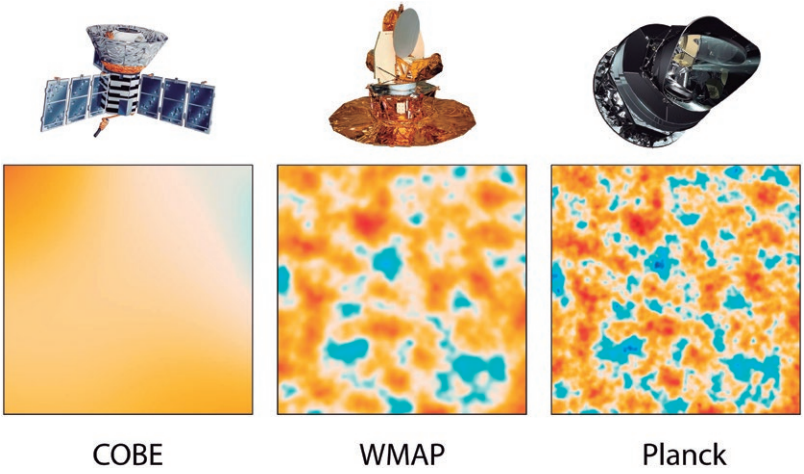
ESA.

El telescopio XMM-Newton, lanzado en 1999, tuvo entre sus logros observar con detalle restos de supernovas recientes y los estallidos de rayos gamma, que aún son objeto de debate. En el infrarrojo los telescopios Spitzer y Herschel han contribuido en la década pasada al conocimiento de los procesos químicos que tienen lugar en las regiones de formación estelar, en particular para la formación de moléculas orgánicas claves para la vida.

El futuro que nos depara el espacio es por definición ilimitado: alcanzar Marte, establecer colonias estables y telescopios en la Luna, el estudio cercano del Sol, minería con asteroides, turismo espacial... Algunos de estos objetivos tal vez se logren en este siglo. En astronomía encontrar planetas similares a la Tierra, descifrar algunos problemas de la cosmología, y entender los sistemas binarios de agujeros negros y estrellas de neutrones (mediante la detección de sus ondas gravitacionales) son proyectos sumamente prometedores.

XIV. El universo en radiofrecuencia

La radioastronomía estudia los astros a través de la observación de las ondas de radio, ondas electromagnéticas similares a las ondas de luz, pero con unas frecuencias muy bajas (o longitudes de onda muy largas), que nuestros ojos no pueden captar ni siquiera usando telescopios tradicionales. Por ello nos revela aspectos del universo totalmente nuevos, inesperados.



El fondo cósmico de microondas observado con telescopios espaciales progresivamente más precisos: desde el COBE lanzado por NASA en 1989 hasta WMAP, lanzado en 2001, y Planck, lanzado por ESA en el año 2009. Los mapas muestran zonas de mayor o menor densidad en el universo primitivo, unos 370.000 años después del Big Bang.

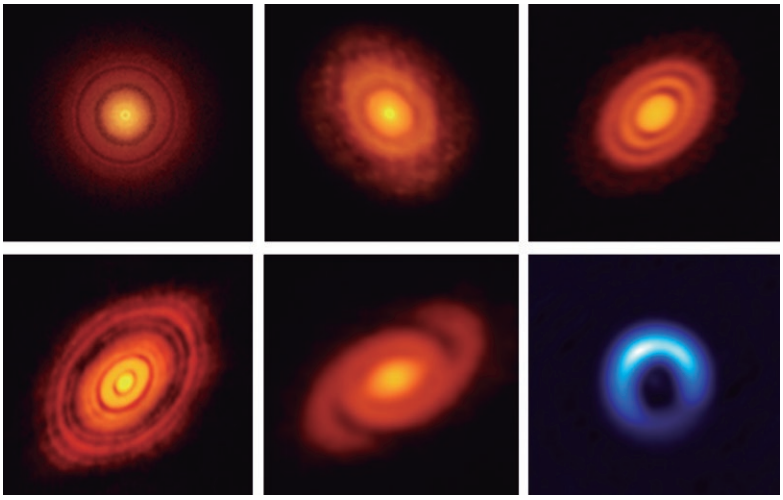
NASA/ESA.

El origen del universo

La radioastronomía permite observar objetos a grandísimas distancias. Pero, debido a que el tiempo que la luz tarda en viajar desde un astro hasta nosotros puede ser muy grande, los objetos más alejados se nos muestran tal como eran hace mucho tiempo. De esta forma, podemos llegar a observar incluso el estado más primitivo del universo. Se piensa que el fondo cósmico de microondas, solo observable con radiotelescopios, es un remanente de la radiación del Big Bang (la gran explosión), el origen del universo. Arno Penzias y Robert Wilson recibieron el premio Nobel en 1978 por este descubrimiento. Recientemente los satélites COBE, WMAP y Planck lo han estudiado con gran precisión. La imagen de las fluctuaciones del fondo cósmico que vemos en el capítulo XI muestra una cartografía de esta emisión en todo el cielo. Gracias a las recientes observaciones con satélite, podemos extraer imágenes muy detalladas como las que se vemos más arriba, que muestran las fluctuaciones relativas del fondo cósmico de microondas, extremadamente tenues, de tan solo una parte en 100.000, comparadas con la emisión promedio. El fondo de radiación cósmico constituye el límite observacional de nuestro viaje hacia atrás en el tiempo.

Nacimiento de las estrellas y nubes interestelares

La radioastronomía ha permitido estudiar las grandes cantidades de gas que se agrupan en el espacio que queda libre entre las estrellas. Estas nubes interestelares son auténticas fábricas de estrellas que se forman de su condensación. Cuando la temperatura en el centro es suficientemente alta, empiezan a tener lugar reacciones nucleares, la estrella se calienta



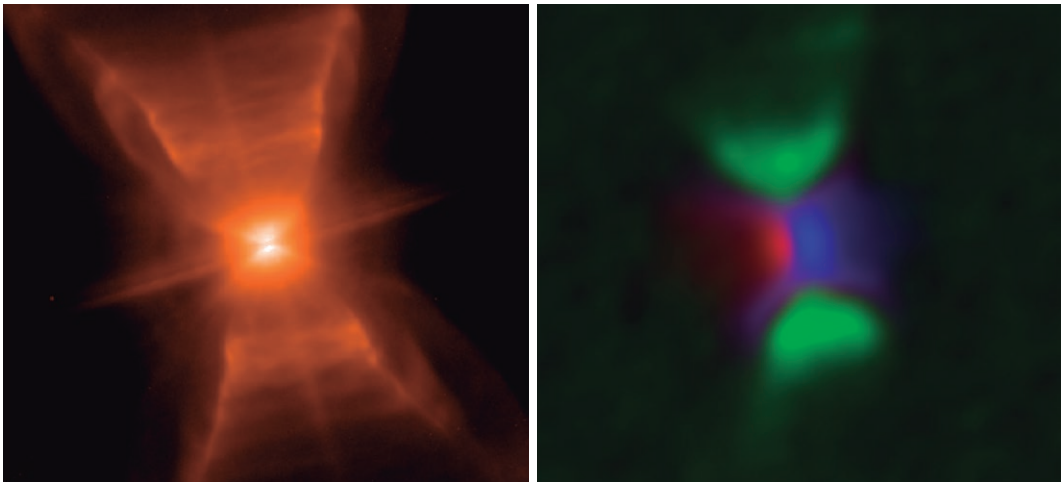
Imágenes de discos de polvo en los que se están formando planetas (las franjas oscuras señalan órbitas de posibles planetas). De izquierda a derecha y de arriba a abajo, los discos están asociados con las estrellas: TW Hya, V883 Ori, HD 163296, HL Tau, Elias 2-27, y HD 142527.

ALMA/ESO/NAOJ/NRAO/S. Andrews, L. Cieza, A. Isella, A. Kataoka, B. Saxton.

mucho y se hace visible. Pero mientras tanto, la baja temperatura de las nubes interestelares hace que solo sean observables en ondas de radio, pues su emisión en ondas más cortas es muy débil.

Muerte de las estrellas: nebulosas planetarias

Las estrellas de masa moderada (casi todas las observables lo son, entre ellas nuestro sol) mueren expulsando al exterior el material del que se formaron, que así vuelve, reciclado por las reacciones nucleares que tienen lugar en el interior de la estrella, al medio interestelar. Llegado un momento, la mayor parte del gas estelar ha sido eyectado, quedando expuesto su núcleo, muy compacto y caliente. Este remanente estelar es capaz entonces de calentar e iluminar la envoltura, dando lugar a las llamadas nebulosas planetarias, entre las que se encuentran algunos de los objetos más bellos de la Galaxia. En una figura adjunta podemos ver una de estas nebulosas, llamada el Rectángulo Rojo, que probablemente se convertirá pronto en nebulosa planetaria. A la izquierda vemos la imagen obtenida con el Telescopio Espacial Hubble. El Rectángulo Rojo es la primera nebulosa de este tipo en la que se descubrió la presencia de un disco en rotación (parte derecha de la figura). La rotación se detectó con el radiointerferómetro NOEMA (IRAM). ALMA mejoró la calidad de la cartografía y, además, mostró la presencia de una componente importante de material que se está escapando desde el disco.

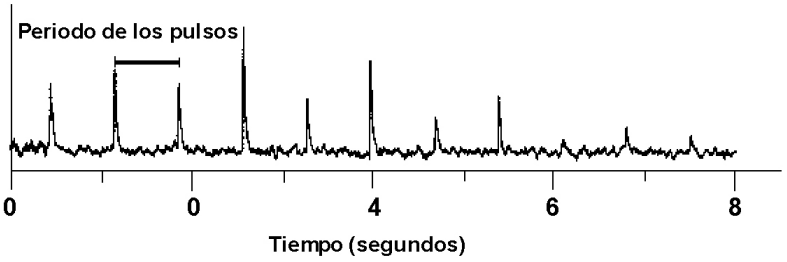


Imágenes de una nebulosa eyectada por una estrella vieja, conocida por el nombre de Rectángulo Rojo. Izquierda: imagen óptica obtenida con el Telescopio Espacial Hubble. Derecha: mapa de la emisión molecular obtenida con ALMA, mostrando el gas nebular que rota en el plano del ecuador (rojo y azul) y el gas en expansión que se escapa del disco rotante (en verde).

NASA/ESA/ALMA/OAN

Muerte de las estrellas: púlsares y supernovas

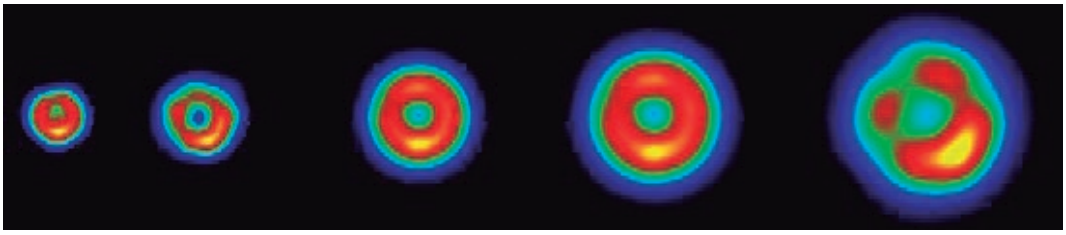
Las estrellas muy masivas terminan su vida con explosiones gigantes en forma de supernova; eyectan al exterior una nebulosa y dejan en su centro una estrella de neutrones, que emite en forma de pulsos debido a su rápida rotación: un púlsar.



Los pulsos del púlsar PSR B0329+54 suceden con un período menor que un segundo, pero hay púlsares con periodos del orden de un milisegundo.

Manchester & Taylor.

En 1967 se descubrió el primer púlsar mediante su emisión de ondas de radio en pulsos espaciados un tiempo fijo. En 1974, Anthony Hewish, recibió el premio Nobel por este descubrimiento de los púlsares, premio que fue compartido con Martin Ryle, por sus trabajos en el desarrollo de la radiointerferometría. Aunque no premiada con el Nobel, al descubrimiento de los púlsares también contribuyó de manera decisiva la insigne astrónoma británica Jocelyn Bell. En 1993 Joseph H. Taylor y Russell A. Hulse recibieron el premio Nobel por el descubrimiento del púlsar binario PSR1913+16, que manifiesta fenómenos relativistas por la radiación de ondas gravitacionales. Se trata de una estrella de neutrones que gira 17 veces por segundo y que, junto con otra estrella, recorre en menos de ocho horas una órbita alrededor del centro de masas común cuyo tamaño disminuye debido a la pérdida de energía que supone esta radiación.



Secuencia de imágenes tomadas en el continuo radio de la nebulosa eyectada por la explosión de la supernova SN1993J, descubierta por el astrónomo aficionado español Francisco García Díaz, en las que se aprecia su movimiento de expansión. La tremenda explosión produjo la eyección a alta velocidad de una capa hueca y básicamente esférica. Esta secuencia cubre el período entre septiembre de 1993 y septiembre de 1994. Las primeras cuatro imágenes están tomadas a una longitud de onda de 3,6 cm, y la última a 6 cm.

NRAO/Marcaide et al.

Estructura de nuestra galaxia y de galaxias cercanas

En 1951 Ewen y Purcell detectaron la emisión a 21 cm de longitud de onda del hidrógeno, el elemento más abundante del universo. Su observación ha permitido determinar la estructura espiral y el movimiento de rotación de numerosas galaxias, incluida la nuestra (la Vía Láctea). Desde 1963, cuando Weinreb, Barrett, Meeks y Henry detectaron la emisión de la molécula OH, se han venido detectando numerosas moléculas en ondas de radio, incluyendo la muy abundante del monóxido de carbono (CO), cuya observación ha producido también importantes resultados en el estudio de la estructura de las galaxias.

Radiogalaxias y cuásares: el poder de los agujeros negros

Ya en los primeros años de la radioastronomía (1946), se detectaron las primeras radiogalaxias, que emiten en ondas de radio mucha más energía que las galaxias consideradas normales (como son Andrómeda o nuestra Vía Láctea). Se cree que la intensa emisión de

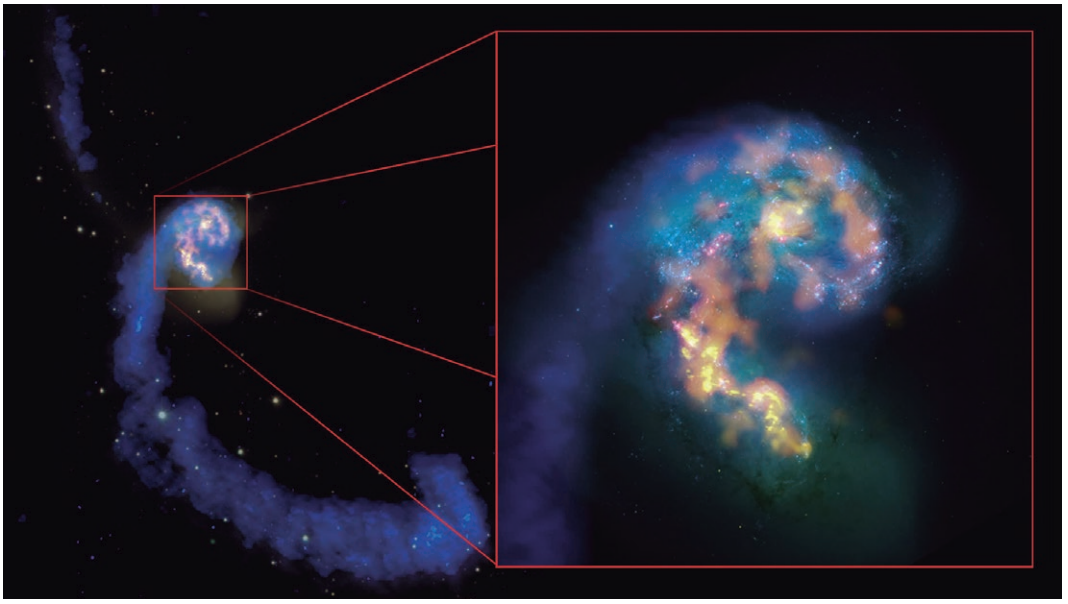


Imagen del sistema de dos galaxias en colisión conocido como «Las Antenas». Las estrellas se observan en la imagen como puntos blancos. En color azul se muestra el gas difuso reminiscente del disco de cada una de las galaxias. En naranja aparecen las nubes moleculares gigantes (observadas en ondas de radio) que formarán las futuras estrellas.

NRAO/ALMA/ESO/NAOJ/NRAO/NASA/ESA/HST.

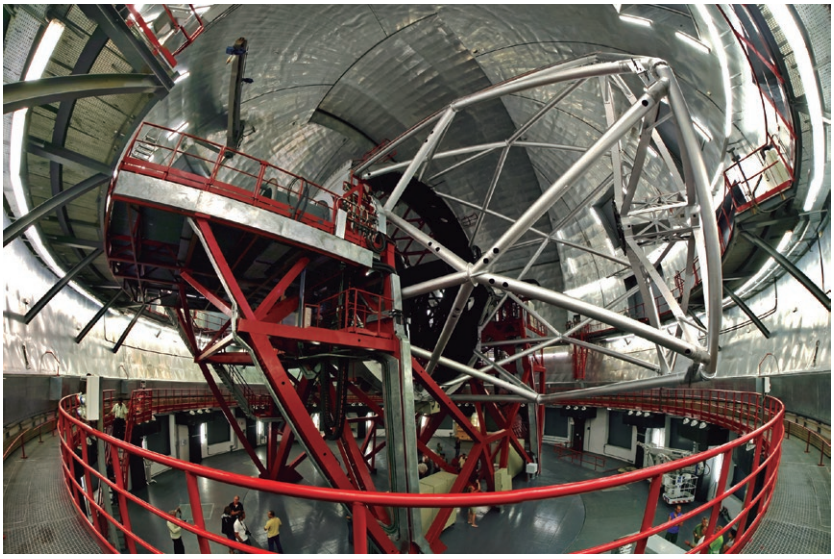
Emisión en el continuo radio de la intensa radiofuente Hércules A, con sus dos potentes chorros observados con el Jansky Very Large Array. Estos chorros se eyectan desde el centro de la galaxia donde está situado un agujero negro supermasivo. La imagen de radio está superpuesta a otra imagen tomada en el visible por el telescopio espacial Hubble.

NRAO/NASA/HST.

las radiogalaxias se debe a la existencia de un agujero negro en su centro, hacia el que cae el material que lo rodea. Simultáneamente a la caída de materia al agujero negro se produce la eyección de partículas cargadas a una velocidad cercana a la de la luz en dos chorros en sentidos opuestos. Un caso especial de radiogalaxias son los cuásares, que constituyen los objetos observados más lejanos del universo (hasta trece mil millones de años luz).

XV. Imágenes cada vez más precisas

Una de las características más importantes de un telescopio es su capacidad para obtener imágenes nítidas. Esto se expresa mediante un parámetro que se denomina *resolución angular:* la separación mínima que tiene que haber entre dos puntos para que puedan diferenciarse, el uno del otro, en una imagen. La resolución angular del ojo humano está entre uno y dos minutos de arco (1'–2'), aproximadamente, lo que nos permite distinguir los dos focos



Actualmente, el Gran Telescopio de Canarias es el mayor telescopio óptico/infrarrojo del mundo. Su sistema de óptica adaptativa le permite alcanzar una resolución angular muy alta, solamente limitada por el límite de difracción (entre 20 a 40 milésimas de segundo de arco).

AC/Grantecan.

de un automóvil a una distancia de unos 5 km. Cuanto mejor sea la resolución espacial de un telescopio (menor sea el valor de su resolución angular), más nítidas serán las imágenes que proporcione, lo que resulta fundamental pues permite el estudio de objetos muy pequeños o muy lejanos.

Telescopios individuales

La calidad de las imágenes astronómicas depende de la calidad del propio telescopio y de su emplazamiento, pero además existe una limitación insoslayable debida a la naturaleza ondulatoria de la luz: las imágenes serán más detalladas cuanto mayor sea el diámetro del telescopio (D) y más pequeña sea la longitud de onda (λ) a la que trabaje: es lo que se denomina *límite de difracción*. Si expresamos la resolución angular en segundos de arco (″), el límite de difracción viene dado por la expresión $0{,}2 \cdot \lambda / D$, donde λ está dada en micras (μm) y D en metros (m).

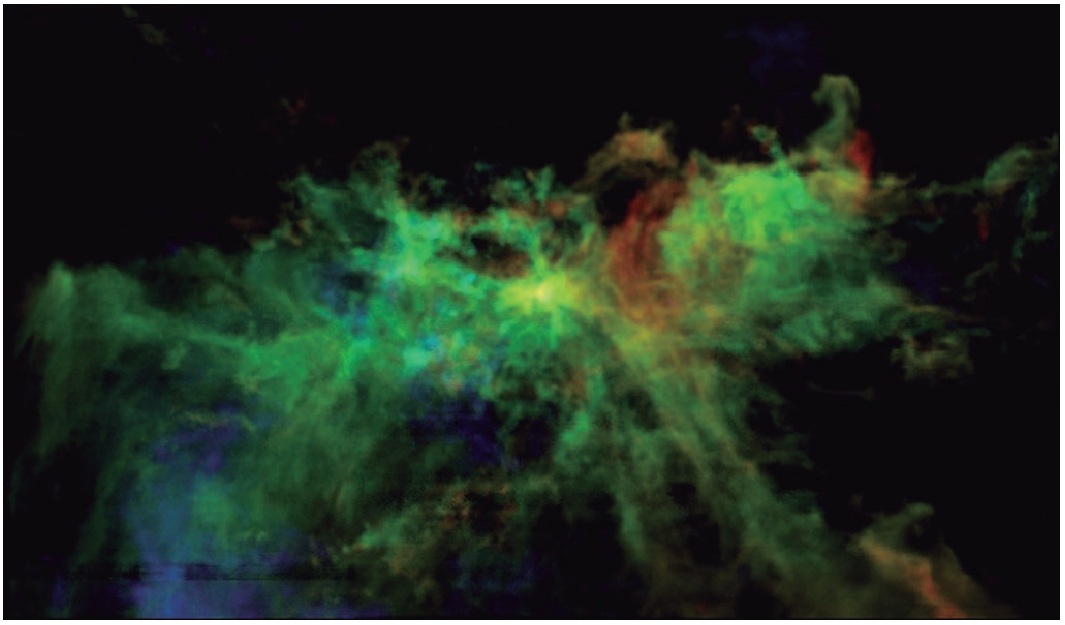


Imagen a 1,3 mm de longitud de onda, obtenida con el radiotelescopio de 30 metros de Pico Veleta, de la emisión de ^{13}CO en el complejo molecular denominado Orión B (arriba a la derecha se puede apreciar la nebulosa de la Cabeza de Caballo). Esta imagen, tomada con una resolución angular de 11″, permite apreciar claramente la estructura filamentosa que caracteriza las nubes moleculares de la Galaxia.

IRAM.

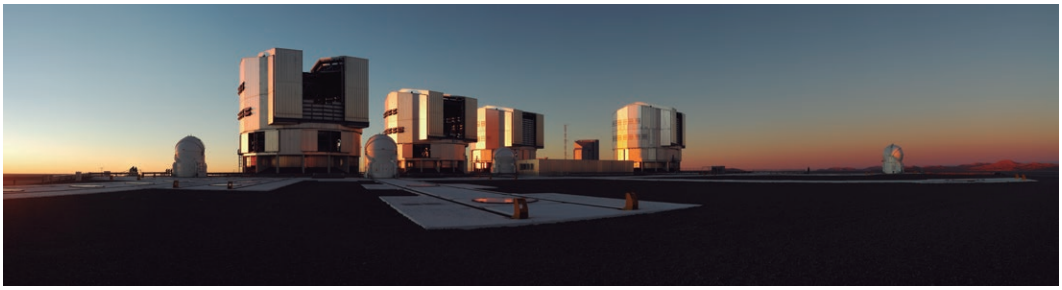
El interferómetro NOEMA del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), instalado en la meseta Plateau de Bure, en los Alpes franceses, es el mayor interferómetro del hemisferio norte capaz de funcionar a longitudes de onda milimétricas. Cuando este instrumento, financiado por el MPG alemán, el CNRS francés, y el IGN, funciona a 1 milímetro de longitud de onda es capaz de proporcionar imágenes con una resolución angular que supera el segundo de arco.

IRAM/C. Lefevre.

En astronomía óptica y del infrarrojo cercano (longitudes de onda entre 0,5 y 10 μm), la nitidez de las imágenes suele estar determinada por las turbulencias atmosféricas (lo que se expresa con un parámetro conocido por el término inglés *seeing*), lo que, en la práctica, limita la resolución angular a valores entre 0,5″ y 1″ . Para eliminar este efecto se puede situar el telescopio por encima de la atmósfera, en una plataforma espacial. Para telescopios en tierra, se puede mitigar el efecto de la turbulencia atmosférica mediante una técnica conocida por el nombre de óptica adaptativa. En radioastronomía (longitudes de onda mayores que 500 μm), los telescopios suelen alcanzar el límite de difracción, pero esto no garantiza que podamos obtener imágenes de mejor resolución que en el óptico/infrarrojo: en la práctica es imposible construir telescopios muy grandes que trabajen a longitudes de onda muy pequeñas. En la actualidad, los mejores radiotelescopios logran obtener imágenes con una resolución de unos 8″–10″.

Interferómetros

Para superar las restricciones de resolución angular impuestas por el *límite de difracción* y obtener imágenes más detalladas, se emplea una técnica denominada *interferometría,* consistente en combinar las señales detectadas en dos o más telescopios. En este caso, la



Fotografía del Very Large Telescope Interferometer (VLTI), interferómetro óptico/infrarrojo que el ESO tiene instalado en el Cerro Paranal, Chile. Este conjunto de cuatro telescopios, de 8 metros de apertura cada uno, puede funcionar como cuatro telescopios individuales, o en modo interferómetro (usando además otros cuatro telescopios auxiliares más pequeños). En este último caso, sus líneas de base de hasta 200 m le permiten realizar imágenes con detalles de hasta 4 milisegundos de arco.

ESO.

resolución espacial ya no depende del tamaño de los telescopios sino de su separación o línea de base (L). Este tipo de instrumentos se denominan interferómetros. Si las señales de los distintos elementos del interferómetro se combinan de modo inmediato se habla de interferómetros conectados, con elementos separados entre decenas de metros y centenares de kilómetros. Mediante el uso de estas técnicas, en ondas radio se alcanzan resoluciones de 20 milésimas de segundo de arco, y de unos pocos milisegundos de arco en astronomía óptica/infrarroja.

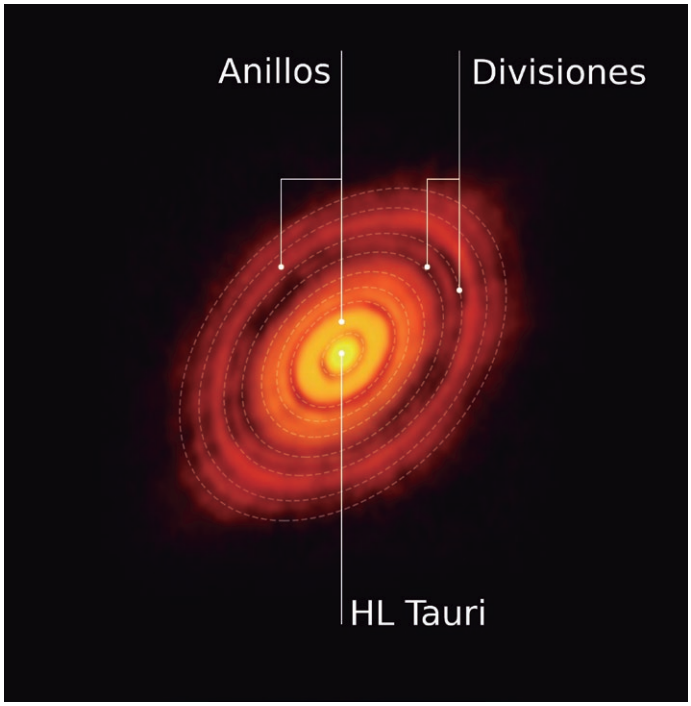


Imagen de la emisión del polvo del disco proto-planetario alrededor de la estrella HL Tauri. Esta imagen tomada con el interferómetro ALMA, a una longitud de onda de 0,9 mm, tiene una resolución angular de 25 milisegundos de arco.

ESO.

VLBI

Si la separación entre los distintos elementos de un interferómetro es muy grande, resulta muy difícil conectarlos entre sí físicamente. En este caso se realizan observaciones coordinadas con varios telescopios, y sus señales se combinan posteriormente en los denominados *correladores*. Esta técnica, que solo se puede aplicar en radioastronomía, se denomina interferometría de líneas de base muy largas (VLBI por su acrónimo en inglés). En VLBI se combinan las señales de telescopios distribuidos por todo un continente, o por todo el mundo, llegándose a obtener imágenes con detalles de tan solo unas decenas de microsegundos de arco (μas), es decir, un millón de veces mejor que el ojo desnudo, lo que nos permitiría leer este libro a una distancia de varios miles de kilómetros.

También se han utilizado radiotelescopios en órbita alrededor de la Tierra, en combinación con las distintas redes de VLBI terrestres, proyectos VSPO2 y RadioAstron (Спектр-Р), alcanzándose líneas de base de 30.000 km de longitud. Hoy en día, el VLBI a longitudes de onda milimétricas (1,3 mm) ostenta el récord de resolución espacial en 20 μas, lo que ha permitido obtener las primeras imágenes de un agujero negro supermasivo.

Localización de los telescopios que participan en el proyecto del Telescopio del Horizonte de sucesos (EHT por sus siglas en ingles). Esta red de VLBI, capaz de trabajar a una longitud de onda de 1,3 mm, ostenta el récord de resolución espacial en Astronomía.

EHT.

Imagen de las inmediaciones del agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia M87. Esta imagen, obtenida por el EHT entre 2018 y 2019, representa la primera imagen jamás obtenida de un agujero negro y tiene una resolución de tan solo 20 microsegundos de arco. Se cree que este tipo de agujeros negros supermasivos deben de estar presentes en todas las galaxias masivas, incluida la nuestra.

EHT.

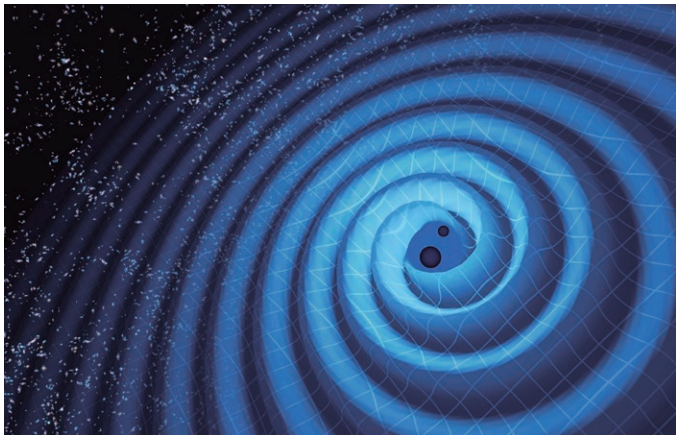
Esta técnica observacional también es usada por los distintos observatorios de ondas gravitacionales, pues la resolución espacial de este tipo de emisión también está sujeta a la ley del *límite de difracción*, pero con valores de longitud de onda de entre 100 y 1000 km, lo que resulta en una resolución angular de apenas 0,5 – 5 grados, incluso combinando telescopios repartidos por toda la Tierra.

XVI. Ondas gravitacionales

Las ondas gravitacionales representan una ventana nueva y alternativa para el estudio del universo. Al contrario que las ondas electromagnéticas, como la radiación visible, las ondas de radio, o los rayos gamma, las ondas gravitacionales no requieren de partículas cargadas para producirse, y no son absorbidas por la materia que atraviesan al propagarse. Gracias a ello, las ondas gravitacionales son mensajeras únicas de eventos que de otra manera serían invisibles, como es el caso de la fusión de dos agujeros negros.

Ondas de espacio-tiempo

La existencia de ondas gravitacionales es una de las muchas consecuencias sorprendentes de la Teoría de la Relatividad General formulada por Albert



Simulación de las ondas gravitacionales producidas por la fusión de dos agujeros negros tras orbitar en un sistema binario.

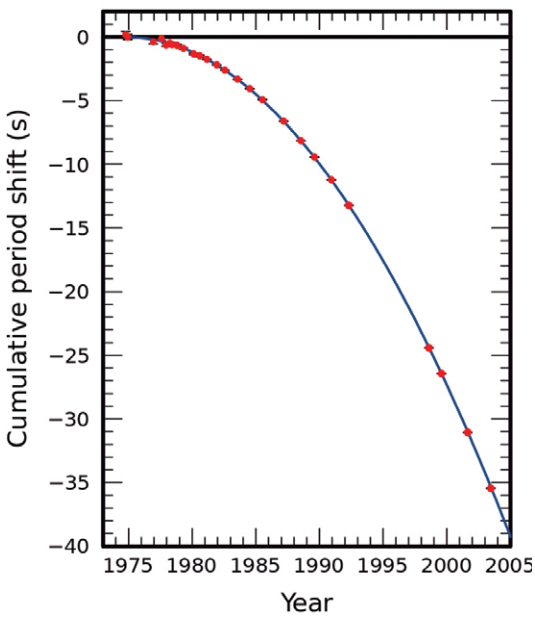
LIGO/T. Pyle.

Einstein en 1915. En esta teoría, el espacio tridimensional y el tiempo se funden para formar un único objeto cuadridimensional, el espacio-tiempo, cuya geometría depende del contenido material del universo y es descrita por las llamadas ecuaciones de campo de Einstein. Estas ecuaciones predicen que el movimiento rápido de la materia, como sucede en el caso de dos agujeros negros orbitando mutuamente, producirá una perturbación del espacio tiempo que se propagará de manera parecida a una onda en la superficie de un fluido. Esa onda de espacio-tiempo, que viaja a la velocidad de la luz, es lo que llamamos una onda gravitacional.

El largo camino hasta la detección

Aunque postuladas en el siglo XX, las ondas gravitacionales no han podido ser detectadas hasta el siglo XXI, cuando los avances tecnológicos han hecho posible medir las minúsculas distorsiones en los aparatos de medida que estas ondas causan. Llegar al nivel de precisión necesario no ha sido fácil, y la historia de la detección de las ondas gravitacionales ha sido larga y compleja, llena de pasos en falso y esperanzas frustradas.

La primera búsqueda sistemática de ondas gravitacionales se debe a Joseph Weber, que en los años 60 del siglo XX comenzó a experimentar con detectores formados por bloques cilíndricos de aluminio. El paso de una onda gravitacional debería producir una muy débil vibración en el cilindro, que sería detectada con un sistema piezoeléctrico. En 1969, Weber anunció que había detectado ondas gravitacionales por primera vez, lo que generó una gran expectación en el mundo científico. Muchos grupos se lanzaron a fabricar instrumentos como el de Weber a fin de confirmar la detección, pero todos los intentos de reproducir la medida fallaron uno tras otro. Como resultado, la comunidad científica concluyó que las detecciones de Weber eran espurias, y que los detectores cilíndricos carecen de la sensi-



Variación con el tiempo del periodo de rotación del pulsar 1913+16. Los puntos rojos indican las observaciones y la línea azul la predicción por emisión de ondas gravitacionales.

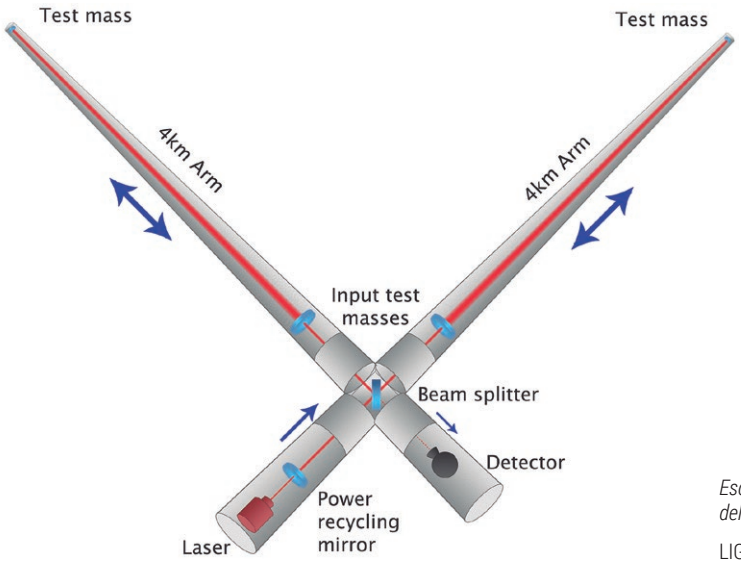
Hulse y Taylor.

bilidad necesaria para detectar ondas gravitacionales. A pesar de ello, Weber siguió creyendo en sus detecciones hasta su muerte en el año 2000.

A la vez que se cerraba la puerta a la detección directa de las ondas gravitacionales usando la técnica de Weber, se abría una ventana a la observación indirecta de sus efectos. En 1974, Russell Hulse y Joseph Taylor descubrieron un púlsar binario, denominado 1913+16 por sus coordenadas en el cielo. Gracias a la enorme estabilidad de la emisión de los púlsares, Hulse y Taylor fueron capaces de medir las características orbitales del sistema, y al cabo de pocos años pudieron demostrar que, al orbitar, los púlsares están perdiendo energía exactamente como predice la teoría de Einstein para el caso de emisión de ondas gravitacionales. La importancia de este descubrimiento fue reconocida con la concesión del premio Nobel de física a Hulse y Taylor en 1993.

LIGO y la detección de las ondas gravitacionales

Tras el fracaso de los detectores cilíndricos, el interés en la búsqueda de ondas gravitacionales tornó a diseños basados en interferómetros. En estos detectores, un rayo de luz láser se separa en dos ramas ortogonales que recorren caminos distintos para volver a combinarse y producir un patrón de interferencia. Si una onda gravitacional atraviesa el detector, una de las ramas del interferómetro se alargará y la otra se acortará, afectando al patrón de interferencias y produciendo una señal medible.



Esquema de uno de los interferómetros del observatorio LIGO.

LIGO/Cardiff Uni./C. North.

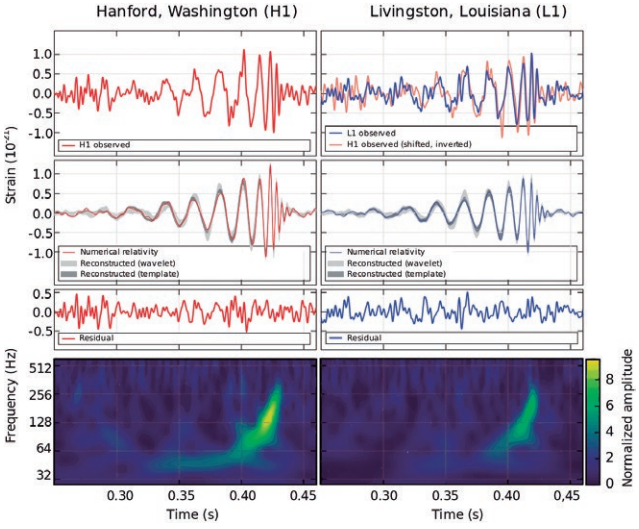
El interferómetro de LIGO en Handford
LIGO/Cardiff Uni./C. North.

El ejemplo más ambicioso de este tipo de detectores es es LIGO, denominado así por las iniciales en inglés de Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser. LIGO consiste en dos interferómetros distintos, cada uno con dos brazos de 4 km de longitud, situados en los estados de Luisiana y Washington (EE.UU.), a una distancia de 3.000 km entre ellos. Su construcción comenzó a principios de los años 1990, y el conjunto de detectores estuvo operativo de forma limitada en 2002. En el corazón de cada detector de LIGO hay un sofisticado interferómetro láser capaz de medir variaciones en la longitud de sus brazos inferiores a una diezmilésima parte del diámetro de un protón.

Tras más de una década de pruebas y mejoras técnicas, LIGO consiguió detectar ondas gravitacionales por primera vez el 14 de septiembre de 2015. Ese día, los dos detectores de LIGO midieron casi simultáneamente una breve señal de 0,2 segundos de duración que tenía el patrón esperado para una onda gravitacional. Del análisis de esa señal, y de la diferencia de tiempo de recepción entre los dos detectores, ha sido posible concluir que fue producida por la fusión de dos agujeros negros de 35 y 30 masas solares situados a una distancia de algo más de 1.400 millones de años luz. A esta primera detección han seguido otras muchas, todas causadas por la fusión de agujeros negros o estrellas de neutrones. En el año 2017, el trabajo pionero del equipo de LIGO fue reconocido con el premio Nobel de física.

Un universo por descubrir

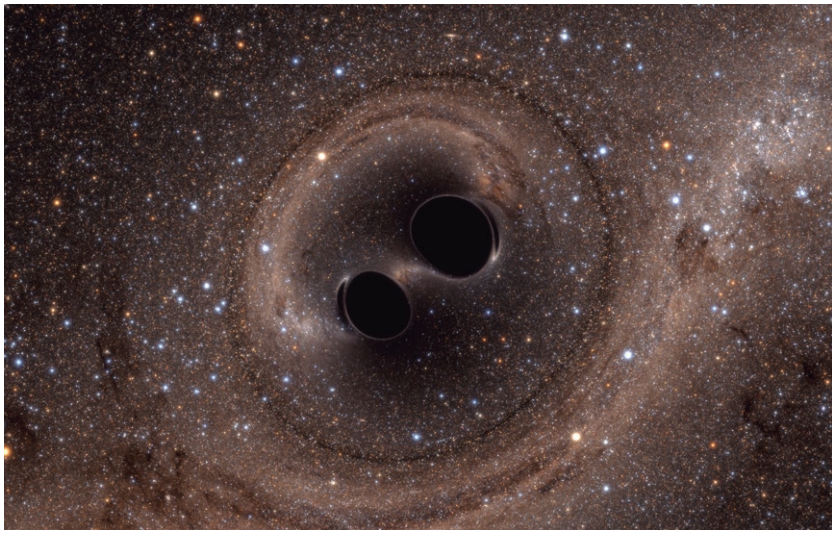
El éxito en la detección de las ondas gravitacionales ha supuesto una revolución en nuestra manera de estudiar el universo. Al observatorio LIGO se han sumado rápidamente nuevos instrumentos que estaban ya en fase de construcción, como Virgo en Italia y KAGRA en



La detección con los dos observatorios LIGO del evento GW150914, un pico de ondas gravitacionales que se ocasionó en la colisión de dos agujeros negros.

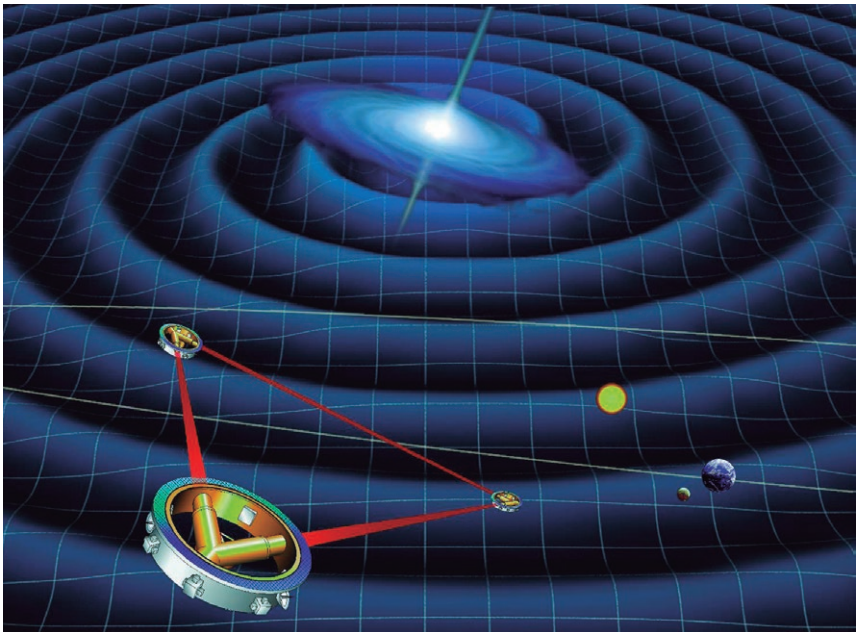
LIGO.

Japón, que tienen diseños parecidos a LIGO y brazos de 3 km de longitud. Otros instrumentos del mismo tipo, como IndIGO en la India, comenzarán a operar en un futuro próximo, y detectores de nueva generación, como el interferómetro espacial LISA, están ya en fase de diseño. Combinando la potencia de todos estos instrumentos, los científicos esperan aumentar la sensibilidad para detectar nuevos tipos de eventos gravitacionales, además de mejorar la precisión para su localización en el cielo.



Simulación de la colisión de dos agujeros negros.

LIGO.



Recreación artística del detector de ondas gravitacionales LISA compuesto por tres naves espaciales en formación triangular y separadas por 2,5 millones de km. Su lanzamiento está previsto para 2034.

ESA

Aunque la detección de las ondas gravitacionales ha sido sobre todo una proeza técnica, también ha resultado ser una observación astronómica de gran interés. La realidad de los agujeros negros era bien conocida, pero la existencia de sistemas binarios de agujeros negros con masas como las observadas ha sido un descubrimiento inesperado que puede obligarnos a revisar las teorías de evolución estelar. Es todavía pronto para juzgar cuál será el impacto completo de la detección de las ondas gravitacionales, pero no es exagerado decir que nos ha hecho sensibles a un universo hasta ahora invisible y del que nos queda casi todo por descubrir.

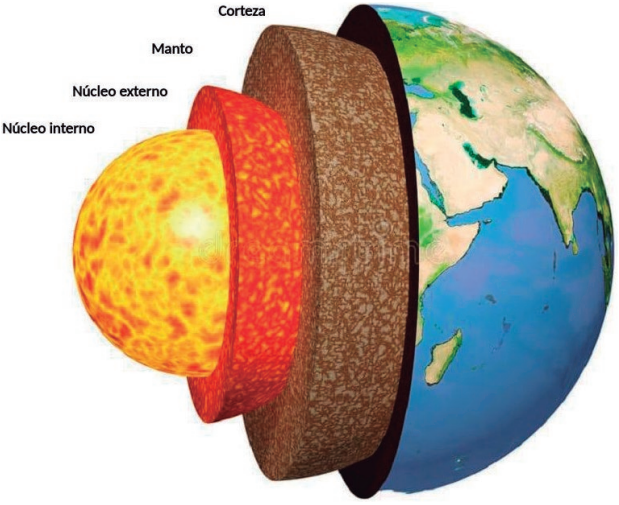
XVII. La radioastronomía en las ciencias de la Tierra

Las técnicas de observación radioastronómica son un importante complemento para el estudio de la estructura, actividad y orientación de la Tierra. La observación de la Tierra a partir de la interferometría de líneas de base muy largas (VLBI por su acrónimo en inglés) existe desde 1970. En la actualidad esta técnica de radioastronomía contribuye de modo significativo en la elaboración del Marco de Referencia Terrestre (ITRF) y es la única que permite determinar todos los parámetros de orientación de la Tierra: movimiento del polo, tiempo universal y posición del polo celeste. Estas observaciones se coordinan a través del Servicio Internacional de VLBI para Geodesia y Astrometría (IVS), en las que el Instituto Geográfico Nacional participa con sus dos radiotelescopios en el Observatorio de Yebes.

La estructura de la Tierra

Nuestro planeta tiene la forma de un geoide, es decir, una esfera ligeramente achatada en los polos y abultada en el ecuador, pero presenta deformaciones que cambian con el tiempo y por tanto no se ajusta perfectamente al modelo teórico. La Tierra tiene una estructura formada por capas concéntricas compuestas por diferentes materiales y separadas por superficies de discontinuidad.

La corteza es la capa más superficial, representa tan solo el 1,6% del volumen total de la Tierra y es la parte más fría y rígida de nuestro planeta, con abundancia de cuarzo y feldespatos (corteza continental) y basalto (corteza oceánica). Su comportamiento rígido explica la existencia de grandes fracturas que la dividen en diferentes trozos, las placas litosféricas o placas tectónicas, que se desplazan lentamente.

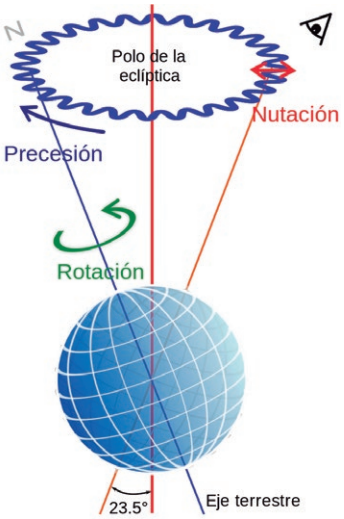


Modelo simple de la estructura de la Tierra, en la que se distinguen: núcleo interno (6.378 km a 5.100 km), núcleo externo (5.100 km a 2.900 km), manto (2.900 km a 100 km), y corteza (100 km).

El estrato inmediatamente inferior es el manto, representa el 82% del volumen total de la Tierra y está formado principalmente por diferentes silicatos. La capa más interna y más densa de la Tierra es el núcleo, que ocupa el 16% del volumen total y está formado por una mezcla de diferentes metales, fundamentalmente hierro y níquel.

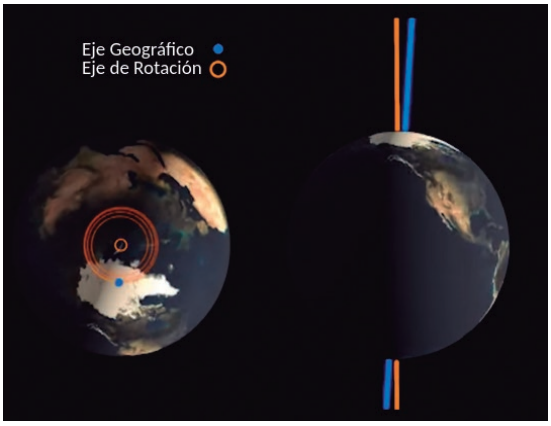
Fenómenos que determinan el movimiento global de la Tierra

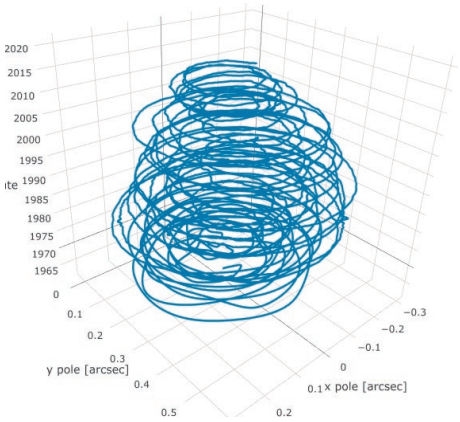
El movimiento de nuestro planeta es muy complejo. Las fuerzas externas de atracción gravitatoria del Sol, la Luna y los otros planetas del sistema solar hacen que la Tierra se bambolee como una peonza que gira. Además, hay muchos otros fenómenos que alteran la duración del día y la orientación del eje de rotación con respecto a la corteza terrestre. Entre tales fenómenos se encuentran la no rigidez de la Tierra, la interacción entre la atmósfera, océanos, tierra sólida y núcleo fluido, y la respuesta elástica de la Tierra a la distribución cambiante de cargas oceánicas, cargas atmosféricas y cargas glaciales en su superficie. Por todo ello, la orientación de la Tierra en el espacio cambia lentamente con el tiempo.



Representación simplificada de los movimientos de precesión y nutación.

Wikimedia Commons.



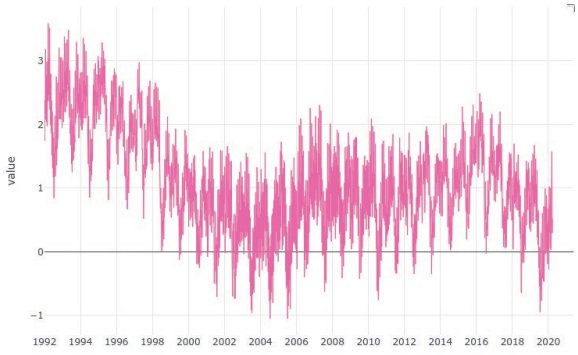


Movimiento del polo terrestre. La espiral que se muestra se ha exagerado para poder visualizarla mejor.

Izquierda: NASA/GSFC Scientific Visualization Studio, derecha: imagen obtenida a partir de datos del IERS.

Los cambios en la orientación de la Tierra se describen como una composición de tres componentes principales. La primera componente corresponde a un movimiento periódico del eje de rotación en el espacio, denominado precesión y nutación. La precesión tiene un periodo de 26.000 años aproximadamente y la nutación de unos 19 años. En la figura de la página anterior se muestran gráficamente ambos movimientos, aunque los dos fenómenos no se representan a escala, ya que debería haber 1400 ciclos de nutación por cada uno de precesión.

La segunda componente corresponde al movimiento de los polos norte y sur geográficos con respecto al eje de rotación terrestre. La trayectoria de los polos traza una espiral que se acerca y aleja con el tiempo del eje de rotación instantáneo. El panel izquierdo de la figura adjunta muestra ambos ejes. El panel derecho de esa misma figura muestra la diferencia entre ambos, en segundos de arco, en función del tiempo que se representa en un eje vertical.



Diferencia entre el valor esperado de la longitud del día y el medido en milisegundos.

Imagen obtenida a partir de datos del IERS.

La tercera componente es la falta de uniformidad de la rotación diaria de la Tierra (UT1). En otra figura aquí adjunta se muestra la diferencia entre el valor teórico y el medido, en milisegundos, desde 1992 hasta la actualidad.

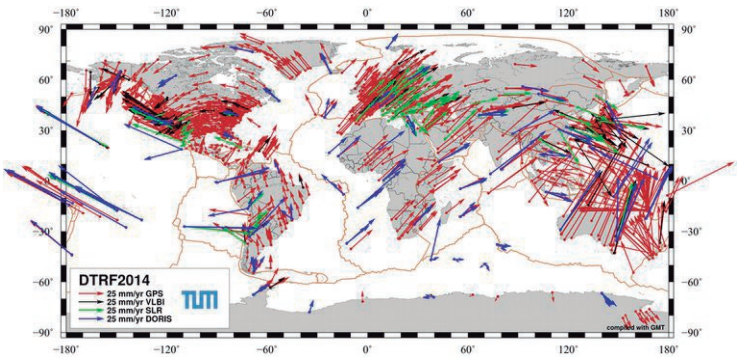
Técnicas para medir la Tierra desde el espacio exterior

Como ya se mencionó más arriba, la Tierra se deforma y su corteza sufre transformaciones a lo largo del tiempo. El método más eficiente para monitorizar dichos cambios es establecer un *marco internacional de referencia terrestre* (ITRF) que permite la determinación de las coordenadas de ciertos lugares a lo largo de la superficie terrestre. La comparación de las coordenadas relativas de estos lugares selectos, se utiliza para medir el movimiento de las placas, el rebote o hundimiento de regiones y la orientación de la Tierra en el espacio.

Todas estas medidas se consiguen con la ayuda de otro referencial: el *marco internacional de referencia celeste* (ICRF), que se define mediante las coordenadas de un conjunto de varios miles de fuentes radioastronómicas, cuásares, consideradas puntuales e inamovibles en el espacio. La institución encargada del suministro del ITRF y del ICRF y de los parámetros de orientación de la Tierra es el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencias (IERS). El IERS, que se constituyó en 1988 y tiene su sede en Paris, ofrece los productos actualizados que son de su competencia en su página web.

Las coordenadas ITRF se obtienen combinando soluciones individuales de marcos de referencia terrestres calculados por los centros de análisis del IERS y utilizando fundamentalmente cuatro técnicas: VLBI, SLR, GNSS y DORIS. Cada una de las técnicas usa una red de estaciones distribuidas por toda la superficie terrestre.

Desde 1988 se han publicado 12 realizaciones del ITRF, siendo la última la de 2014. La realización del ITRF consiste en un conjunto de coordenadas y velocidades de todas las



Movimiento de las estaciones que contribuyen al ITRF. Datos obtenidos con las 4 técnicas de geodesia espacial. Esta imagen se corresponde con el ITRF (marco internacional de referencia terrestre) de 2014 y en ella se puede apreciar el movimiento de las placas tectónicas.

IERS.

estaciones que componen las diferentes redes. Para combinar las soluciones de las diferentes técnicas es muy recomendable que las estaciones dispongan de varias de ellas simultáneamente. Las estaciones que cumplen dicho requisito se denominan estaciones fundamentales. En la actualidad, el Observatorio de Yebes (IGN) cuenta con GNSS y VLBI, y en un plazo de pocos años dispondrá de una estación SLR y se convertirá en la única estación fundamental de España. El objetivo del IERS es ofrecer las posiciones de las estaciones con una precisión cercana al milímetro.

La técnica GNSS consiste en la recepción de señales emitidas por constelaciones de satélites que orbitan la Tierra con relojes atómicos a bordo. Los sistemas actuales son GPS (estadounidense), GALILEO (europeo), GLONASS (ruso) y BEIDOU (chino).

También participa en la determinación del ITRF, el ILRS, una red compuesta de telescopios ópticos dotados de láseres que iluminan los satélites que orbitan la Tierra y determinan sus posiciones midiendo el tiempo de tránsito de la luz desde que es emitida por el sistema hasta que se recibe tras ser reflejada en el satélite. En este momento hay 42 estaciones operativas en la red.

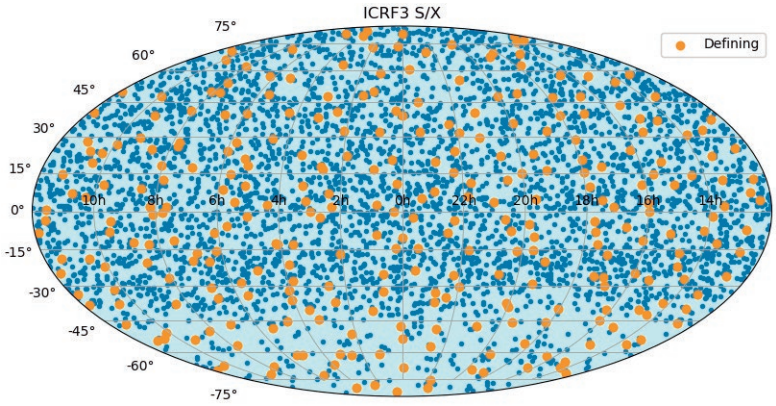
La técnica DORIS utiliza radio balizas en tierra que son captadas por los satélites en órbita y que, empleando el efecto Doppler y la posición de las estaciones terrenas, determinan sus propias posiciones y las de las estaciones. Debido a las emisiones de radio que son imprescindibles para el funcionamiento de DORIS, este sistema puede ser incompatible con el de VLBI en una misma estación, pues las emisiones DORIS pueden ocasionar interferencias en las observaciones de interferometría de ondas de radio.

Receptor (imagen izquierda) y antenas GNSS del Observatorio de Yebes.

IGN/Observatorio de Yebes.

VLBI, la técnica radioastronómica para medir la Tierra

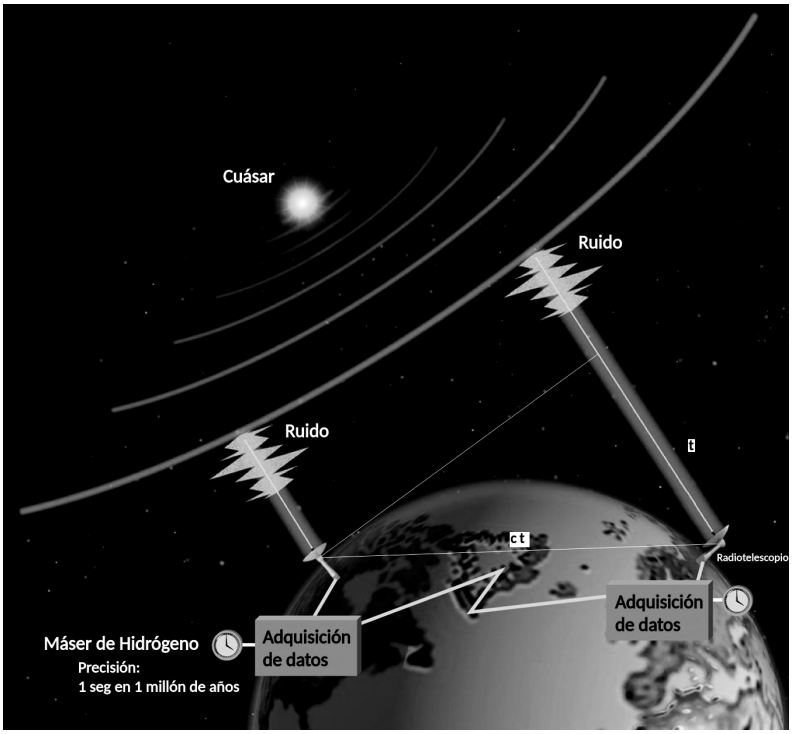
El acrónimo VLBI significa interferometría de muy larga línea de base. Se trata de una técnica en radioastronomía en la que varios radiotelescopios situados en diferentes partes del planeta observan simultáneamente una fuente en el cielo. Las observaciones radioastronómicas de utilidad en geodesia precisan de la medida de cientos de cuásares cada 24 horas. Los cuásares son núcleos de galaxias activas asociados a agujeros negros que expulsan materia a velocidades próximas a la velocidad de la luz y su radiación es tan intensa que es



Mapa del cielo con las fuentes que constituyen el marco de referencia celeste obtenido en bandas S y X. Se muestra la versión 3 del ICRF publicada en 2018. La menor densidad de fuentes en la parte inferior es debida a los pocos radiotelescopios existentes en el hemisferio sur de la Tierra.

IERS.

visible a millones de años luz de distancia. Al estar a distancias enormes de la Tierra parecen objetos puntuales que se pueden utilizar como elementos de un sistema de referencia, el marco de referencia celeste (ICRF).

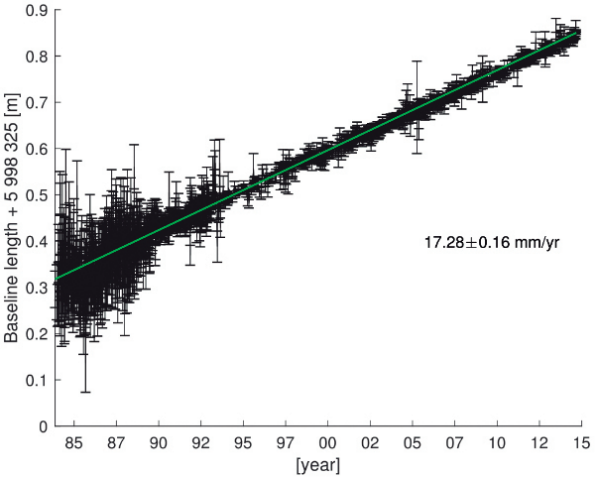


Explicación simplificada y gráfica del funcionamiento del VLBI. La señal procedente del cuásar se recibe primero en el radiotelescopio de la izquierda y un tiempo t después en el de la derecha. La distancia entre ambos telescopios es el producto escalar de la velocidad de la luz c, por el tiempo t.

La determinación de las distancias relativas entre las estaciones se consigue con una precisión de varios milímetros y se hace obteniendo el retraso en la señal entre cada pareja de estaciones. Esta técnica requiere una calibración muy cuidadosa de efectos instrumentales, atmosféricos y de la rotación terrestre. La señal procedente de un cuásar se propaga hacia la Tierra y, por cada línea de base, se detecta siempre en un radiotelescopio antes que en el otro. En el proceso de correlación de las señales de ambos radiotelescopios es posible determinar con una precisión altísima el retardo de la señal entre ambos radiotelescopios.

Estas medidas se hacen con múltiples parejas de radiotelescopios observando simultáneamente durante sesiones de 24 horas varios centenares de cuásares, medidas que permiten determinar las posiciones de los radiotelescopios con muy alta precisión. Comparando los valores obtenidos en sesiones separadas en el tiempo y a lo largo de los años es posible medir cómo varía la distancia entre las estaciones.

Las observaciones de VLBI geodésicas están coordinadas por el IVS (Servicio Internacional de VLBI). A lo largo de todo el año existen observaciones periódicas de diversos tipos, la mayor parte de 24 horas de duración y otras de 2 horas de duración para la determinación rápida de UT1. Las señales recibidas se muestrean, digitalizan y graban en las estaciones y se transfieren por líneas de alta velocidad de internet hasta los diferentes centros internacionales de correlación. Los datos correlados se pasan a los centros de análisis que se ocupan de generar los productos finales. Los datos de la IVS se utilizan en la determinación del ITRF, del ICRF y de los parámetros de orientación de la Tierra. También se obtiene información de la troposfera y series históricas que contienen las variaciones temporales de las distancias entre los radiotelescopios.



Evolución de la distancia entre las estaciones de Haystack (EE.UU.) y Wettzell (Alemania). Obsérvese la mejora progresiva en la precisión de las medidas, precisión que alcanza los 0,16 mm/año.

S. Lunz.

En la actualidad existe un proyecto en desarrollo denominado VGOS (VLBI Global Observing System) cuya finalidad es una mejora en la determinación de las posiciones de los radiotelescopios. El objetivo es alcanzar una precisión de 1 mm y de la de sus velocidades con décimas de milímetro por año. Este proyecto involucra un fuerte desarrollo tecnológico en el que el IGN, a través del Observatorio de Yebes, participa de modo intenso y regular desde 2016. Su radiotelescopio VGOS de 13m es uno de los pocos operativos en todo el mundo desde el año 2017.

XVIII. La astronomía en el IGN: el Observatorio Astronómico Nacional

Los orígenes del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) se remontan al reinado de Carlos III quien, a propuesta del célebre marino y cosmógrafo Jorge Juan, ordenó su creación a finales del siglo XVIII (hacia 1785). La construcción de su primer edificio, diseñado por el arquitecto Juan de Villanueva, comenzó en 1790 en una colina conocida como el cerrillo de San Blas, en lo que entonces eran las afueras de Madrid y actualmente es el parque del Retiro.

Como principales misiones del Observatorio, su Real Orden de constitución (dictada en 1790, reinando ya Carlos IV) establecía la teoría y práctica de la astronomía, la geodesia, la geofísica y la cartografía, es decir, las propias de un observatorio de astronomía de aquella época. Y para llevar a cabo esas misiones, en 1796 se creó el Cuerpo de Ingenieros Cosmógrafos.

Dada la carencia de una tradición astronómica en España, los primeros astrónomos

Retrato de Carlos III realizado por Anton Raphael Mengs hacia 1765, óleo sobre lienzo.

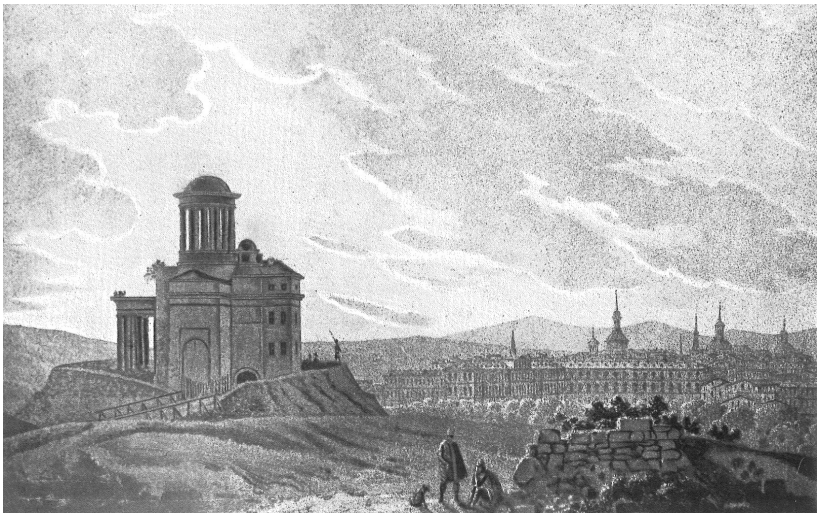
Museo del Prado.

del OAN inician su aprendizaje en diversos países europeos, desarrollando sus conocimientos en la construcción de instrumentos y en la realización de observaciones. Además, el Observatorio encargó al célebre astrónomo William Herschel la construcción de varios telescopios, dos telescopios newtonianos (similares al utilizado por Herschel para descubrir el planeta Urano) y un telescopio reflector de 25 pies (7,6 metros) de distancia focal y espejo de 2 pies (61 centímetros) de diámetro, que sería considerado por Herschel como el mejor telescopio de cuantos construyó.

Comienza así un fructífero período de actividades científicas, de desarrollo de instrumentación y de enseñanza de la astronomía (el OAN fue la primera escuela de astronomía de la España moderna). Desgraciadamente, la invasión napoleónica de comienzos del siglo XIX supuso la dispersión del personal del Observatorio y la destrucción de sus equipos (entre ellos, el telescopio de Herschel de 25 pies), su biblioteca y sus edificaciones provisionales.

Retrato de Juan de Villanueva realizado por Francisco de Goya hacia 1805, óleo sobre tabla.

Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.



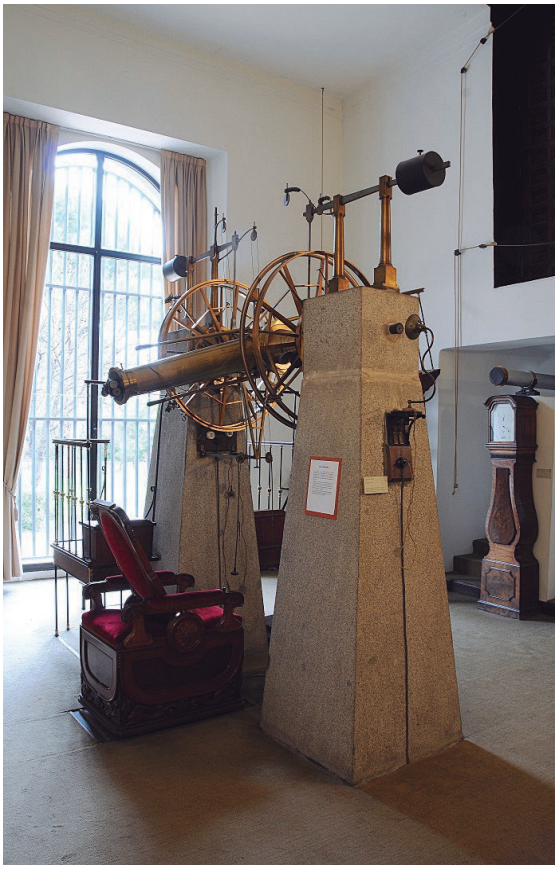
EL Observatorio de Madrid durante la Guerra de la Independencia.

Grabado publicado por Bacler D'Albe en Souvenirs Pittoresques, Campagne d'Espagne.

Las actividades se reanudaron en 1845, finalizándose la construcción del edificio «Villanueva» al año siguiente. En 1854 se instala el meridiano Repsold y en 1858 el anteojo ecuatorial Mertz, dando inicio a una etapa de interesantes trabajos astronómicos, geodésicos y meteorológicos, así como a la participación en campañas de cooperación internacional. Tras una primera etapa en la que el Observatorio dependió directamente del rey a través de un comisario regio y, posteriormente, del rector de la Universidad Central, en marzo de 1904 el Observatorio fue agregado al Instituto Geográfico Nacional (IGN), organismo del que sigue dependiendo en el momento de escribir estas líneas.

En sus comienzos, las actividades desarrolladas en el Observatorio cubrían todos los campos de la astronomía y ciencias afines: desde la física solar y estelar a la mecánica celeste, el desarrollo de instrumentación, conservación oficial de la hora y las aplicaciones en geodesia. El OAN fue incluso encargado de realizar trabajos de meteorología (considerados entonces como un complemento de los estudios astronómicos), prolongándose la actividad en este campo hasta los primeros años del siglo XX, momento en el que se creó el Instituto Meteorológico Nacional para el desarrollo de estas funciones. A partir de ese momento, el Observatorio concentra sus esfuerzos en la investigación astronómica y en el desarrollo de instrumentación asociada.

Tras el parón que supuso la Guerra Civil, el Observatorio conoce una nueva etapa de modernización y expansión. En la década 1970 se crean el Centro Astronómico de Yebes (Guadalajara) y la Estación de Observación de Calar Alto (Almería), en la que se instala un telescopio óptico de 1,52 metros de apertura. Con ello se potencian las líneas más tradicionales de la astronomía óptica que venían llevándose a cabo en el Observatorio de Madrid (astrometría, heliofísica y física estelar). También se inicia entonces una



Círculo meridiano, 1853.

OAN.

Radiotelescopio de Pico Veleta (Granada).

IRAM.

nueva línea de investigación y desarrollo instrumental, la radioastronomía, que será el principal campo de investigación del OAN desde entonces hasta nuestros días.

Durante las dos últimas décadas del siglo xx y principios del xxi, el Observatorio, a través del IGN, ha participado en la creación y funcionamiento de instituciones astronómicas de carácter internacional como el Instituto hispano-franco-alemán de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) o el Consorcio Europeo para la Interferometría de Muy Larga Base (EVN/JIVE), en los que se llevan a cabo las investigaciones científicas y los desarrollos tecnológicos más punteros en el campo de la astronomía y en sus aplicaciones a la geodesia.

Réplica del telescopio de 25 pies que William Herschel construyó para el OAN, esta reproducción puede visitarse en las instalaciones del Observatorio.

OAN.

Edificio central del OAN, obra del arquitecto Juan de Villanueva.

OAN/Álvaro Serrano Sierra.

Actualmente, los trabajos de investigación del OAN están estructurados en cuatro áreas bien definidas: la formación estelar, las estrellas evolucionadas, las galaxias externas y la interferometría de muy larga base. Para desarrollar estos trabajos se utilizan radiotelescopios emplazados en distintos lugares del planeta: el radiotelescopio de 40 metros del Observatorio de Yebes (Guadalajara) y las redes de interferometría de que forma parte (entre ellas la Red Europea de VLBI, EVN); el radiotelescopio de 30 metros situado en Pico Veleta (Granada) y el interferómetro NOEMA del Plateau de Bure, en los Alpes franceses, pertenecientes ambos a IRAM; y el interferómetro ALMA, emplazado en el desierto de Atacama (Chile). Estas actividades de investigación están financiadas parcialmente por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del Plan Estatal de I+D+I.

Por otra parte, el OAN ha dedicado un gran esfuerzo de personal y medios para la conservación y promoción de su valioso patrimonio arquitectónico y de su instrumentación histórica. El más antiguo de estos edificios, el «Villanueva», es uno de los más interesantes exponentes de la arquitectura neoclásica española, y fue declarado Bien de Interés Cultural, con categoría de Monumento, mediante el Real Decreto 764/1995, de 5 de mayo. También se ha realizado la reconstrucción del telescopio de Herschel de 25 pies; y la construcción e instalación de la Sala de Ciencias de la Tierra y del Universo donde se muestra la valiosa colección de instrumentos antiguos del Observatorio, y del conjunto del IGN, acumulados en sus ya más de 220 años de historia.

Asimismo, el personal científico del Observatorio imparte regularmente conferencias de divulgación en materia de astronomía, tanto dentro como fuera de sus dependencias, y publica artículos de ese carácter en libros y revistas de edición propia y ajena. También se rea-

liza un esfuerzo por difundir información y noticias sobre astronomía en todos los medios de comunicación y redes sociales.

De especial relevancia entre las actividades del Observatorio es la publicación del Anuario Astronómico que se viene realizando desde el año 1860. Inicialmente, con la publicación de este Anuario, se daba cumplimiento a uno de los objetivos establecidos para el OAN: el informar del calendario, así como, difundir conocimientos relacionados con la astronomía. Actualmente sigue contribuyendo a los cometidos del Observatorio de difundir la información oficial en materia de astronomía y de intensificar la divulgación de esta ciencia. Por ello, contiene las efemérides de los astros del sistema solar, las explicaciones de cómo hacer uso de tales efemérides y catálogos sucintos de astros de interés para el observador aficionado. Completan esta información varios artículos de divulgación. Es un magnífico volumen que, en los últimos años, supera las 450 páginas de contenido.

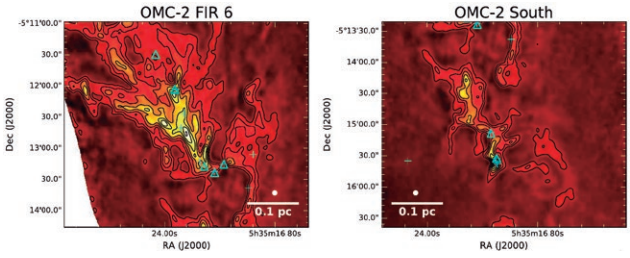
Portada de la edición del Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para 2020.

OAN.

Desde la publicación del primer Anuario, en 1860, tan solo dejó de publicarse de manera excepcional durante unos pocos años: en 1867, 1874, 1875 y desde 1881 hasta 1906. A partir de 1906 se ha publicado ininterrumpidamente, siendo la edición del año 2020 (año en que se cumplió el 160 aniversario de la publicación del primer ejemplar) la edición número 132.

XIX. Actividades y proyectos del Observatorio Astronómico Nacional

Utilizando distintas técnicas de observación, los astrónomos y astrónomas del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) llevan a cabo en la actualidad trabajos de investigación en los temas más candentes de la astronomía moderna, como el nacimiento y la muerte de las estrellas, la formación de planetas similares a la Tierra, la detección de moléculas prebióticas, y el estudio de la estructura de las galaxias particularmente activas. Por otra parte, en estrecha colaboración con los ingenieros del Observatorio de Yebes, se colabora en importantes desarrollos técnicos de interés en astronomía y ciencias afines.



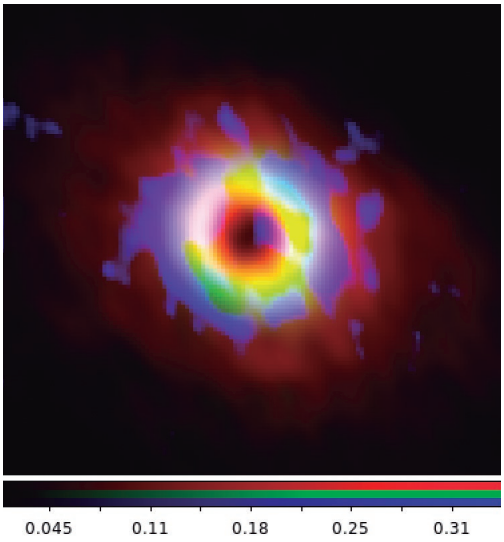
Imágenes de la gran nube de Orión obtenidas a partir de observaciones de emisión molecular por astrónomos del Observatorio Astronómico Nacional. Fue necesario combinar observaciones del telescopio de 30m de IRAM, situado en Sierra Nevada, y del gran interferómetro ALMA, en Atacama (Chile). Arriba vemos un mapa a gran escala de la nube; las imágenes de abajo muestran en detalle algunas regiones y señalan la presencia de protoestrellas.

ALMA/IRAM/OAN.

Investigación astronómica

Desde hace más de veinte años buena parte de la investigación científica en el campo de la astronomía llevada a cabo en el OAN se ha centrado en el estudio del medio circunestelar y del medio interestelar, tanto galáctico como extragaláctico.

La radioastronomía ha sido la técnica observacional más habitual para la obtención de los datos. Los investigadores del OAN estudian las regiones donde nacen estrellas, y su interacción con el medio circunestelar. La comprensión de las causas que llevan a que se forme una estrella en una región dada y no en otra, sigue siendo un reto para la astronomía actual. En el inicio de la formación de una estrella, se producen eyecciones de gas a gran velocidad que golpean el medio interestelar. Ya en la fase madura, las estrellas como nuestro Sol emiten una intensa radiación ultravioleta capaz de calentar el medio y destruir las moléculas. Es necesario comprender todos estos procesos para poder determinar el origen de las estrellas.

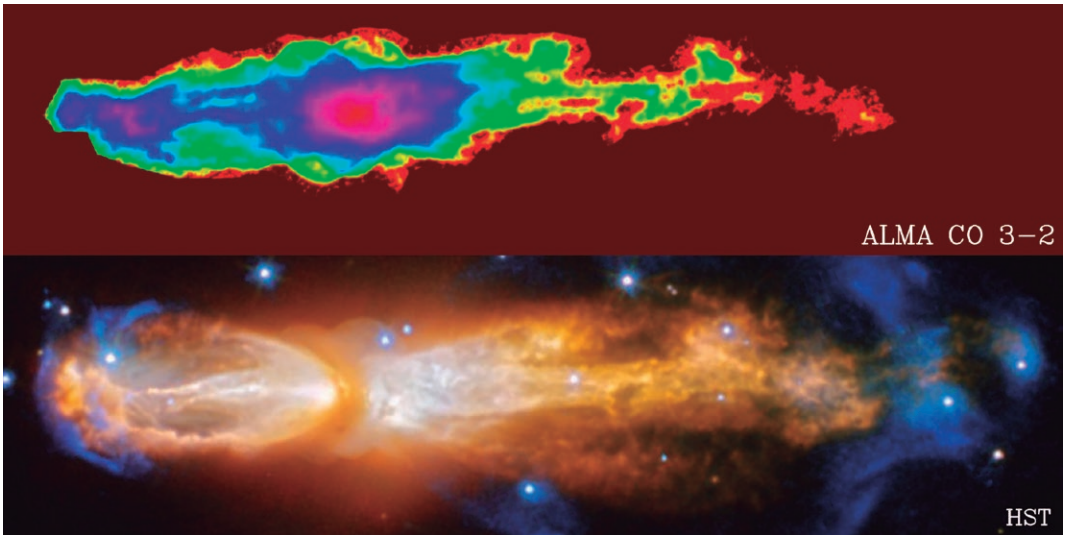


Disco proto-planetario de la estrella AB Auriga observado en distintas longitudes de onda de radio con el interferómetro NOEMA de IRAM. Cada color traza la emisión de una molécula distinta: en rojo se representa la emisión de ^{13}CO, en amarillo la de $C^{18}O$ y en azul la de SO. El agujero que se observa cerca de la estrella ha sido creado por un planeta recién formado. El disco de gas y polvo que lo rodea ha sido estudiado por los astrónomos del OAN.

NOEMA/IRAM/OAN

La utilización de grandes interferómetros permite estudiar los pequeños discos de gas y polvo que rodean las estrellas jóvenes y en los que se forman los planetas. El gas de estos discos es la materia prima a partir de la cual se formarán las atmósferas planetarias y, en su caso, la vida. El conocimiento detallado de su composición química es una condición indispensable para entender la formación de nuestro sistema solar y la emergencia de la vida.

Los investigadores del OAN también estudian las últimas fases de la vida de las estrellas, en particular de las estrellas de masa baja o intermedia, como nuestro Sol. En las postrimerías de su vida, este tipo de estrellas sufre una importante pérdida de masa que resulta en la formación de una envoltura, rica en gas molecular y polvo, que con el tiempo dará origen a una nebulosa planetaria. El estudio de estas envolturas y nebulosas aporta muchos detalles sobre la muerte de las estrellas, así como sobre el origen de elementos químicos tan importantes para la vida como el carbono y el nitrógeno.



Imágenes de la nebulosa planetaria OH 231.8+4.2, estudiada por astrónomos del OAN, obtenidas con el telescopio espacial Hubble abajo, con 0,1 segundo de arco de resolución) y ALMA (arriba, con 0,2 segundos de arco de resolución). El tamaño de la imagen es 60 x 16 segundos de arco. La imagen del HST muestra en tonos azulados el gas atómico ionizado por los choques debidos al movimiento muy rápido del gas molecular (trazado por ALMA) y de los granos en polvo (tonos amarillentos). La estrella central no se ve debido a la existencia de un disco central muy opaco. Las velocidades de expansión medidas en los mapas de ALMA nos indican que esta nebulosa surgió como resultado de un proceso cuasi-explosivo que tuvo lugar hacia el año 3700 a.C.

NASA/ESA/ALMA/OAN.

Fuera de nuestra galaxia, se estudia la distribución, las condiciones físicas, la cinemática, la composición y la cantidad del gas molecular en los diversos tipos de galaxias, desde las más cercanas como Andrómeda hasta grandes galaxias lejanas que se formaron en la infancia del universo. Los grandes interferómetros actuales nos permiten distinguir, en otras galaxias, nebulosas de un tamaño parecido al de la nebulosa de Orión.

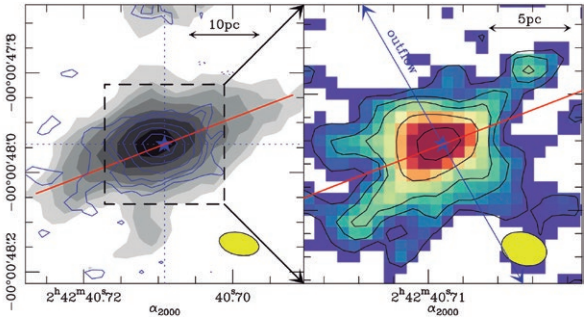
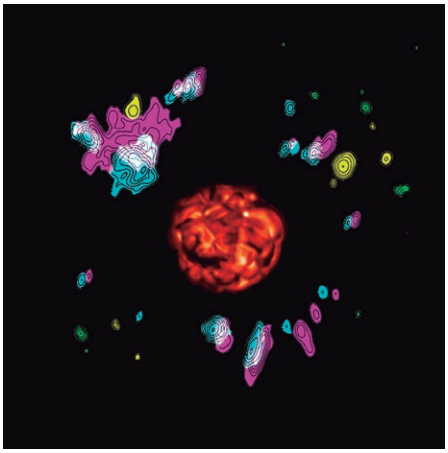


Imagen del anillo de gas que rodea al agujero negro que se encuentra en el centro de la galaxia activa NGC 1068 situada a 47 millones de años luz de la Tierra. En la imagen vemos la emisión de las moléculas CO (izquierda) y HCO^+ (derecha). Esta estructura tiene un diámetro de unos 60 años luz y ha sido estudiada con el interferómetro ALMA por astrónomos del OAN.

ALMA/ESO/OAN.



La emisión máser de SiO (en cian, magenta, amarillo y verde) alrededor de la estrella evolucionada WX Piscis. Esta imagen, tomada con la red de VLBI de los EEUU (VLBA), alcanza a ver detalles de tan solo 0,2 – 0,35 milisegundos de arco. El diámetro de la propia estrella central (simulación de la fotosfera de una gigante roja) es de 11 milisegundos de arco.

VLBA/OAN .

El OAN también participa muy activamente en el desarrollo, tanto técnico como científico, de la Interferometría de Líneas de Base muy Grandes (VLBI por sus siglas en inglés). En el primer aspecto destaca su participación en las redes mundiales de VLBI astronómico y geodésico mediante la antena de 40m de Yebes (ver más adelante), así como en institutos y consorcios, como el JIVE (Instituto Europeo de VLBI ERIC) y la EVN (Red Europea de VLBI), que coordinan la actividad VLBI a nivel internacional. En el aspecto científico, los astrónomos del Observatorio son expertos en la utilización de las técnicas del VLBI para el estudio de emisiones muy energéticas, como la que producen los agujeros negros o la emisión máser de distintas especies moleculares, y en la implementación de técnicas pioneras (*cluster-cluster*, transferencia de fase, etc.) para la obtención de imágenes precisas de mayor calidad.

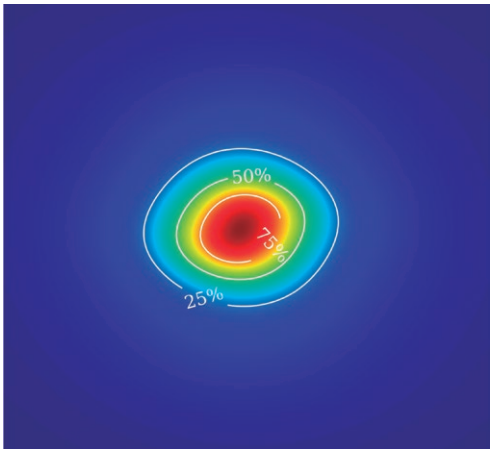


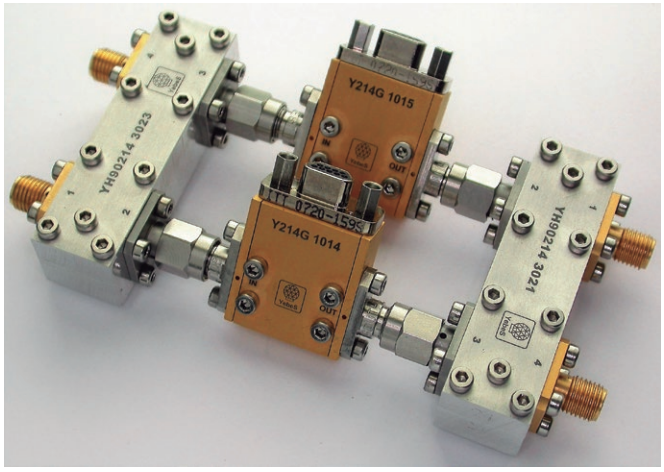
Imagen de la vecindad del agujero negro central de nuestra galaxia, Sagitario A, obtenida con la red mundial de VLBI a 3mm de longitud de onda (GMVA, red de la que forma parte el radiotelescopio de 40m de Yebes). El tamaño de la imagen es de 400 microsegundos de arco, y la resolución espacial alcanza los 50 microsegundos de arco.*

GMVA.

En una figura más arriba mostramos una imagen de la emisión máser de la molécula SiO obtenida con técnicas VLBI por investigadores del OAN. La resolución angular de la cartografía es altísima, permitiendo una descripción muy detallada de las capas de gas difuso que rodean la estrella evolucionada WX Piscis.

Desarrollos tecnológicos

En los laboratorios y talleres del Observatorio de Yebes se realizan desarrollos tecnológicos e instrumentales, que se utilizan tanto en sus propios radiotelescopios, como en los del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) y de la Red Europea de Interferometría (EVN/JIVE), instituciones en las que el IGN es copartícipe. También se desarrollan y construyen componentes y equipos para otras instalaciones (Agencia Espacial Europea, Observatorio de París-Meudon, etc.), así como para la colaboración en proyectos espaciales (proyecto Herschel: telescopio para observaciones en el infrarrojo lejano y ondas submilimétricas) y basados en tierra (proyecto ALMA, el mayor radiointerferómetro milimétrico y submilimétrico).



Amplificador criogénico balanceado de banda ultra-ancha (1.5-15.5 GHz) desarrollado en el Observatorio de Yebes para aplicaciones de VLBI.

Observatorio de Yebes.

El personal técnico del Observatorio de Yebes ha alcanzado prestigio internacional en campos como la fabricación de amplificadores criogénicos de banda ancha y la caracterización y calibración de grandes antenas.

El gran radiotelescopio de 40 m de Yebes

Con la participación de ingenieros del Observatorio de Yebes y los astrónomos del OAN, se construyó, durante la primera década de este siglo, un gran radiotelescopio de 40 metros de diámetro que es uno de los instrumentos más potentes del mundo de los de su clase.

Radiotelescopio de 40m del IGN en Yebes (Guadalajara).

IGN

Este radiotelescopio está dotado de un amplio equipo de receptores que trabajan tanto a longitudes de onda centimétricas como milimétricas y que han sido desarrollados por el grupo técnico del Observatorio de Yebes.

Con esta instrumentación, se llevan a cabo observaciones interferométricas (VLBI) y de antena única de toda una variedad de objetos astronómicos. Las especiales características de los receptores (observación simultánea en un amplio rango de frecuencias y gran sensibilidad) hacen del radiotelescopio de 40 m un instrumento único para la detección de moléculas orgánicas de interés para comprender el origen de la vida y para muchos otros estudios de astrofísica. Además, el radiotelescopio también participa en campañas internacionales realizando observaciones de interés en geofísica y geodesia (movimientos del polo terrestre, deriva de los continentes, definición de referenciales espaciales, etc.)

Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM)

El IRAM es un instituto hispano-franco-alemán dedicado a la investigación y al desarrollo tecnológico en el campo de la radioastronomía milimétrica. Ha construido y hace funcionar dos instrumentos que se encuentran entre los mejores del mundo en su género: el radiotelescopio de 30 m de Pico de Veleta (Granada) y el interferómetro NOEMA compuesto de 12 antenas de 15 m situadas en Plateau de Bure (Grenoble, Francia). La sede y los laboratorios centrales se encuentran en Grenoble y una sede en Granada sirve de base al radiotelescopio de 30 m. El IGN dispone de una fracción del tiempo de observación, en competición abierta internacional. Además, el IGN participa, de forma paritaria, en todos los consejos directivos y técnicos del IRAM.

El gran interferómetro milimétrico de Atacama (ALMA, por sus siglas en inglés), es el telescopio terrestre más complejo jamás construido. Este radio-interferómetro, financiado por tres grandes consorcios internacionales, ESO (16 países europeos, incluyendo España), EEUU/Canadá, y Japón/Corea/Taiwán, está formado por 54 antenas de 12 m de apertura y 12 antenas de 7 m de apertura. ALMA es capaz de trabajar a longitudes onda de tan solo 0,3 mm (en la frontera con el infrarrojo lejano), y dispone de líneas de base de hasta 16 km, lo que le permite alcanzar una resolución espacial de unos milisegundos de arco. Las Nubes de Magallanes, dos galaxias cercanas a la Vía Láctea, pueden verse como dos nebulosas brillantes en el centro superior de la imagen.

ALMA/ESO/NRAO/NAOJ.

El gran interferómetro de ondas milimétricas de Atacama (ALMA)

ALMA se ha constituido en el gran observatorio mundial de la radioastronomía milimétrica para el siglo XXI. Es el fruto de una colaboración global que unió a Europa, Norteamérica y Asia del Este para la construcción de un radio interferómetro en el desierto de Atacama (Chile) a más de 5.000 metros de altitud. El interferómetro consta de 54 antenas de 12 metros de diámetro cada una, y de otras 12 antenas de 7 metros, funcionando de manera coordinada para simular un radiotelescopio de 16 km de diámetro. La participación del OAN y del Observatorio de Yebes ha permitido a los astrónomos del Observatorio colaborar en todo tipo de actividades de ALMA, tanto en el ámbito científico como en el tecnológico y en el de gestión.

Otros proyectos

Las redes de radiotelescopios Event Horizont Telescope (EHT) y Global Millimeter VLBI Array (GMVA) utilizan radiotelescopios situados por todo el mundo operando en modo VLBI para simular telescopios virtuales de un tamaño similar al de nuestro planeta. El radiotelescopio de 40m del Observatorio de Yebes y el telescopio de 30m de IRAM situado en Pico Veleta (Granada) forman parte de estos proyectos. Con el EHT se pudo obtener por primera vez la imagen de la sombra de un agujero negro en el año 2019.

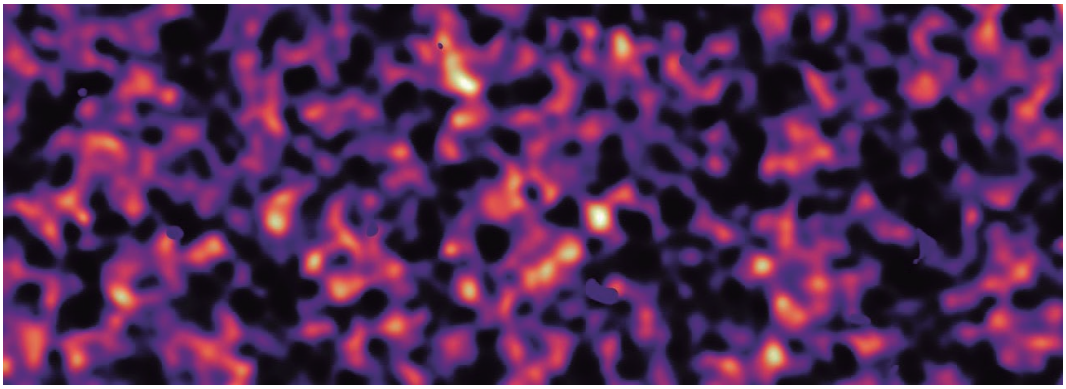
El equipo científico del OAN también está colaborando en los trabajos de preparación del *Square Kilometer Array* (SKA), un proyecto internacional en el que participan más de 20 países, cuyo objetivo es la construcción de un gran telescopio a longitudes de onda centimétricas. El SKA estará formado por miles de antenas parabólicas y por otras de tipo *aperture array* que simularán antenas gigantes. El objetivo final es conseguir con un área colectora de un kilómetro cuadrado (un millón de metros cuadrados).

XX. La astronomía del futuro

Los astrónomos siguen enfrentándose a las grandes preguntas que nos plantea la astrofísica, la cosmología, e incluso la filosofía. ¿De qué está hecho el universo? ¿Qué son la materia y la energía oscuras? ¿Cómo se formaron las estrellas y las galaxias y cómo van evolucionando a lo largo del tiempo cósmico? ¿Estamos solos en el cosmos? ¿Son realmente universales las leyes de la física? Estos grandes temas seguirán dominando la investigación en astronomía durante los próximos años. Y, aunque no es seguro que se encuentren respuestas para todos ellos, de lo que no hay duda es que, en el curso de estos estudios, surgirán nuevas y no menos apasionantes cuestiones.

Los grandes temas de estudio

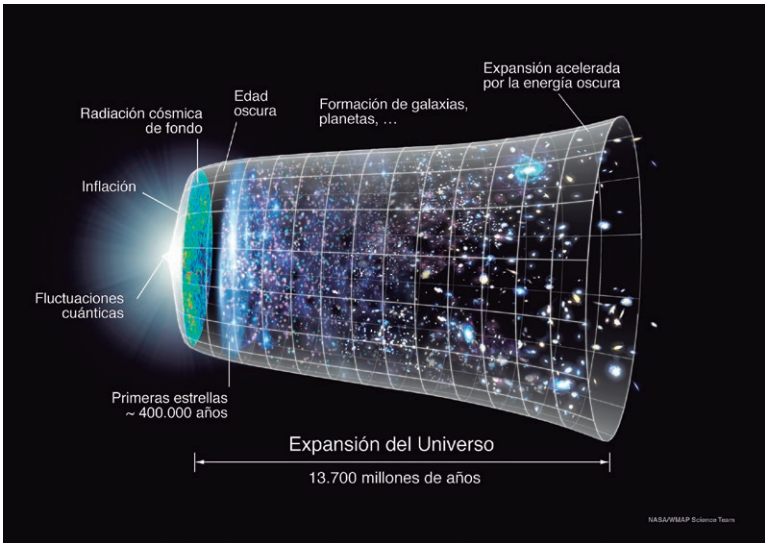
Materia y energía oscuras. Pensemos en primer lugar en la composición del universo. Sabemos que el universo está compuesto por un 4 % de materia ordinaria (la constituida por quarks, electrones y neutrinos). El resto es materia oscura, en un porcentaje del 23 %, y energía oscura, cuyo porcentaje en la composición cósmica se eleva a un 73 %. La materia oscura se pone de manifiesto por sus efectos gravitatorios en las galaxias y en los cúmulos de galaxias. El rápido movimiento de las estrellas en la periferia de las galaxias espirales solo puede explicarse si tales galaxias esconden una cantidad de materia oscura que quintuplica a la de la materia ordinaria. Y lo mismo sucede con los movimientos de las galaxias en el seno de los cúmulos de galaxias. La materia oscura, muy posiblemente, jugó un papel dominante en la formación de las estructuras a gran escala en las primeras fases de evolución del universo, estructuras que dieron lugar a galaxias y cúmulos de galaxias.



Este mapa de la materia oscura en una porción del universo fue obtenido mediante observaciones con el telescopio VLT (survey KIDS). Las imágenes de las galaxias lejanas se ven alabeadas por el efecto de lentes gravitacionales.

Kilo-Degree Survey Collaboration/H. Hildebrandt & B. Giblin/ESO.

No menos importante en cosmología es la energía oscura, denominación que recibe el agente responsable de la aceleración en la expansión acelerada del universo. Este ingrediente del cosmos, el más abundante, es una especie de energía anti-gravitatoria que actúa como si, a gran escala, las galaxias se repeliesen entre sí. Esta energía podría ser también la responsable de la inflación que tuvo lugar en los primeros instantes del universo. Físicos y astrónomos estudian actualmente la posible relación entre la energía oscura y la energía del vacío que preconiza la física cuántica. Ciertamente hay similitudes muy llamativas entre



Esquema que muestra la evolución espacio-temporal del universo. La aceleración en la expansión se interpreta como un efecto de la energía oscura.

NASA/Ryan Kaldari.

ambos conceptos, pero, cuando se compara cuantitativamente la energía oscura de la cosmología con la energía del vacío de la física cuántica, la diferencia entre ambas cantidades es un enorme factor, del orden de 10^{120}, lo que ha llevado a decir que esta es la peor predicción de la historia de la física.

Evidentemente se necesita estudiar mucho más la naturaleza de estos ingredientes tan enigmáticos del universo, la materia y la energía oscuras. En la actualidad se sigue pensando en nuevas observaciones que puedan dar alguna pista sobre ello, incluso se diseñan algunos telescopios que estarán especializados en buscar rastros de la energía oscura y, en el caso de la materia oscura, también se realizan experimentos con grandes aceleradores de partículas (como el gran colisionador del CERN en Ginebra) que pudieran sacar a la luz los constituyentes de esta materia tan misteriosa.

Agujeros negros. Otro tema que seguirá siendo prioritario en la astrofísica del futuro es el de los agujeros negros. Después de muchos años describiendo sus propiedades y observando sus efectos indirectos, el estudio de estos astros recibió un impulso enorme cuando en abril de 2019, la colaboración EHT (Event Horizon Telescope) dio a conocer la primera fotografía de un agujero negro supermasivo: el que se encuentra en el centro de la galaxia Messier 87.

Sin embargo, existe otro agujero negro supermasivo mucho más cercano a la Tierra, concretamente en el centro de la Vía Láctea. Este objeto, conocido como SgrA*, tiene una masa de 4 millones de soles aproximadamente. Aun siendo el más cercano, su tamaño aparente

Recreación de un agujero negro supermasivo en el centro de una gran galaxia. Desde este tipo de agujeros negros surgen gigantescos chorros de plasma que se propagan por el espacio a gran velocidad.

NASA/JPL-Caltech.

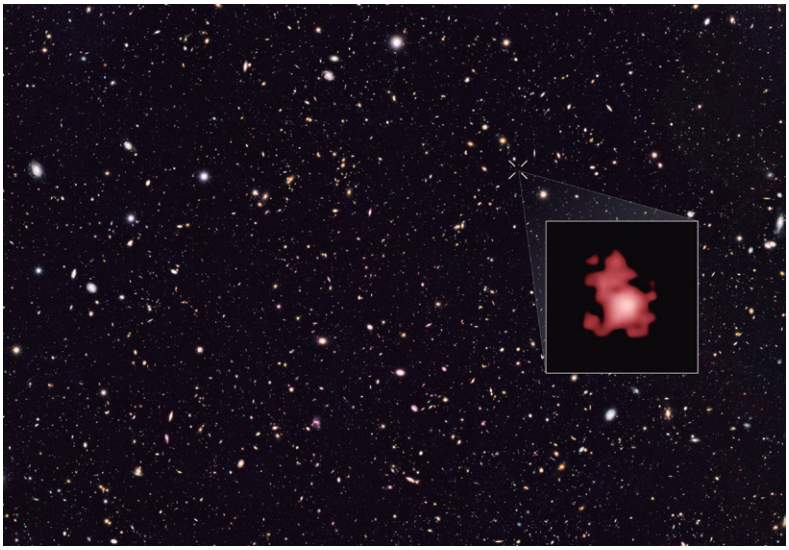
Esta imagen, que cubre una zona de la región central de la Vía Láctea, muestra la región blanca brillante a la derecha donde se encuentra escondido un agujero negro supermasivo: SgrA, el centro de nuestra galaxia.*

NASA/JPL-Caltech/ESA/CXC/STScI.

en el cielo es menor que una cienmillonésima de grado, similar al tamaño de una pelota de tenis en la superficie de la Luna, vista desde la Tierra. Este tamaño está determinado por el llamado *radio de Schwarzschild*. Justo en el radio de Schwarzschild, la luz no puede escapar de la atracción gravitatoria del agujero negro, y es por ello que este toma el aspecto de un agujero oscuro en el firmamento.

Las propiedades de SgrA* han podido ser determinadas mediante las medidas de algunas de las estrellas que orbitan a su alrededor. Situadas a distancias del orden de mil veces el radio de Schwarzchild, tales estrellas se mueven a unas velocidades vertiginosas que pueden llegar a alcanzar una décima del valor de la velocidad de la luz. Más concretamente, la estrella conocida como S2 tiene un período orbital de 16 años en torno a SgrA*, lo que ha permitido completar un estudio completo de más de una órbita durante las dos últimas décadas. El movimiento de esta estrella, así como los cambios que se observan en la luz emitida por ella, no solo nos permiten calcular los parámetros del agujero negro, sino que también nos permite realizar tests de alta sensibilidad de las leyes de la física en condiciones extremas y, muy concretamente, tests de la teoría de la relatividad general de Einstein.

En un futuro próximo, con telescopios y redes de radiotelescopios progresivamente mayores (similares al citado EHT) podremos acercarnos todavía más al agujero negro SgrA* y podremos observar muchos más de estos objetos en otras galaxias. Tales estudios permitirán conocer cómo crecen los agujeros negros y cómo contribuyen en la evolución de las galaxias en las que están alojados.



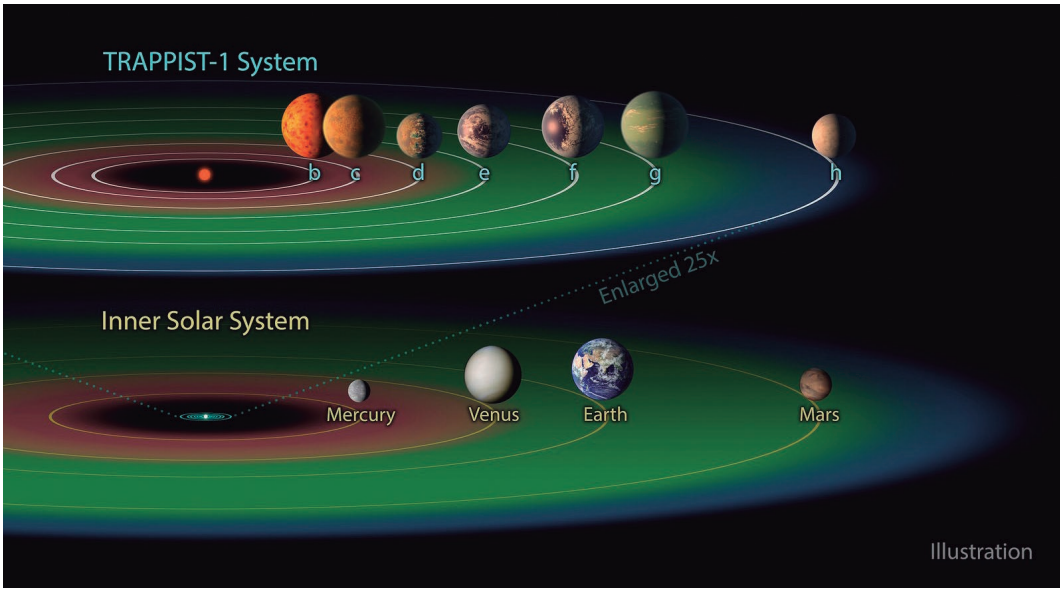
En la constelación de la Osa Mayor se encuentra este campo de galaxias denominado GOODS-norte, donde el telescopio espacial Hubble detectó la remota galaxia GN-z11 a la que vemos recién formada, tal solo 400.000 años después del Big Bang, es decir, cuando el universo tenía un 3 por ciento de su edad actual.

NASA/ESA/HST.

Galaxias lejanas. La formación y la evolución de las galaxias ha pasado a ser uno de los temas de investigación más activos durante las últimas décadas y lo continuará siendo en el futuro. El problema es que las galaxias más distantes, y por tanto las más jóvenes, aparecen en los telescopios actuales como nebulosas difusas en las que no es posible distinguir estrellas individuales. Se necesitan telescopios mayores que los actuales para llegar a estudiar las estrellas en esas galaxias distantes (situadas a decenas de millones de años luz de distancia). Y si fuésemos capaces de observar de este modo galaxias aún más distantes (situadas a miles de millones de años luz), podríamos estudiar con detalle la evolución de las galaxias a lo largo del tiempo cósmico.

El sistema solar ¿un sistema planetario peculiar?. La cuestión de si estamos solos en el universo ha intrigado a la humanidad durante toda su historia. La plétora de descubrimientos realizados sobre exoplanetas durante los últimos 25 años viene a dar pistas muy importantes sobre este tema fascinante. El tema es de tal calado que el descubrimiento del primer exoplaneta, realizado por Michel Mayor y Didier Queloz en 1995, fue merecedor del Premio Nobel de Física en 2019.

Según The Extrasolar Planet Enciclopediae, a finales del año 2019, se habían identificado y confirmado 4.160 exoplanetas, la mayoría de ellos con el telescopio espacial Kepler de NASA. Estos exoplanetas forman parte de 3.090 sistemas planetarios diferentes, pues se conocen 676 sistemas múltiples (que contienen más de un planeta). De éstos, hay unos 150 planetas conocidos que orbitan completamente en su zona de habitabilidad. Se piensa hoy que prácticamente todos los tipos de estrellas pueden poseer sistemas planetarios. Se esti-



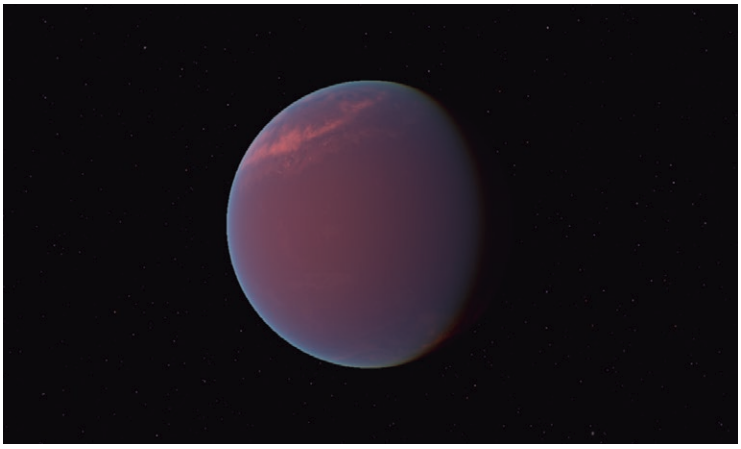
El sistema planetario TRAPPIST-1 comparado con el sistema solar. La estrella central de este sistema planetario no es mucho más grande que Júpiter y emite una fracción de la radiación del Sol. Los siete planetas de TRAPPIST-1 orbitan mucho más cerca de su estrella de lo que Mercurio orbita alrededor del Sol; excepto el TRAPPIST-1b, el resto orbita más lejos que los satélites galileanos alrededor de Júpiter. La distancia entre las órbitas de TRAPPIST-1b y TRAPPIST-1c es solo 1,6 veces la distancia entre la Tierra y la Luna. Un año en el planeta más cercano dura solo 1,5 días terrestres, mientras que el año del séptimo planeta equivale a 18,8 de nuestros días.

NASA.

ma por tanto que el número de planetas puede ser similar o superior al número de estrellas: unos 200.000 millones en el caso de la Vía Láctea. De estos, unos 40.000 millones podrían tener una masa similar a la de la Tierra, y unos 11.000 millones podrían estar orbitando en la zona de habitabilidad de estrellas similares al Sol.

Del estudio de los exoplanetas está surgiendo una imagen del cosmos que tiene un gran impacto sobre nuestra imaginación. En muchos casos, los exoplanetas descubiertos superan a los que la ciencia-ficción había ideado como escenarios de sus relatos. Nuestro sistema solar, con sus pequeños planetas rocosos en la región interior y los grandes planetas gaseosos y helados en su región más externa, no es el patrón ni el modelo de los sistemas planetarios, que pueden ser muy diferentes.

Júpiter, el gigante del sistema solar, es unas 318 veces más masivo que la Tierra, pero en otros sistemas planetarios se encuentran planetas que lo dejan empequeñecido. Se conocen unas dos docenas de planetas que tienen masas superiores a 50 veces la de Júpiter. Muchos de estos planetas gigantes orbitan cerca de su estrella, y son mucho más cálidos



Recreación de Gliese 1214b, un planeta océano de tipo supertierra.

DLR.

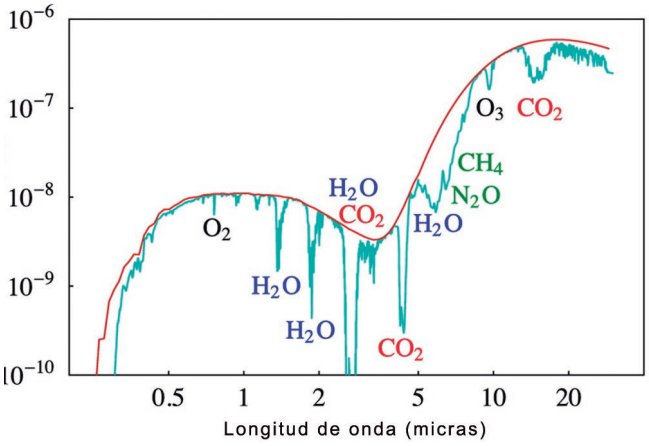
que nuestro Júpiter, de ahí que se los conozca como *júpiteres calientes*. Hay otros, sin embargo, que orbitan mucho más lejos de su estrella que nuestros planetas del Sol.

Por analogía a nuestro sistema solar, muchos exoplanetas deben de estar acompañados por lunas. La detección de tales exolunas no es una mera curiosidad, pues puede darse el caso de que, aunque un exoplaneta no sea apto para la vida, alguna de sus lunas sí pueda serlo. También tiene interés detectar cinturones de asteroides e incluso cometas alrededor de otros mundos.

Como vemos, hay que investigar más sobre este tema, localizar más sistemas planetarios y hacer estadísticas sobre sus características, para llegar a comprender si nuestro sistema solar es un sistema planetario peculiar.

Biomarcadores. El estudio de las atmósferas planetarias es absolutamente clave para comprender de qué están hechos los planetas, lo que a su vez es esencial para descubrir los mecanismos de su formación y evolución. Pero estudiar la composición de una atmósfera planetaria no es tarea sencilla. En principio, se pueden utilizar dos métodos, ambos espectroscópicos. Un primer método consiste en el análisis de la luz estelar que atraviesa la atmósfera del planeta. Así se pueden intentar detectar las moléculas que son responsables de la absorción de la luz. El segundo método consiste en la obtención del espectro estelar cuando (1) el planeta está situado delante de la estrella y (2) cuando está escondido tras la estrella. La resta de ambos espectros representará el espectro del planeta, a partir del que se podría inferir la composición de su atmósfera.

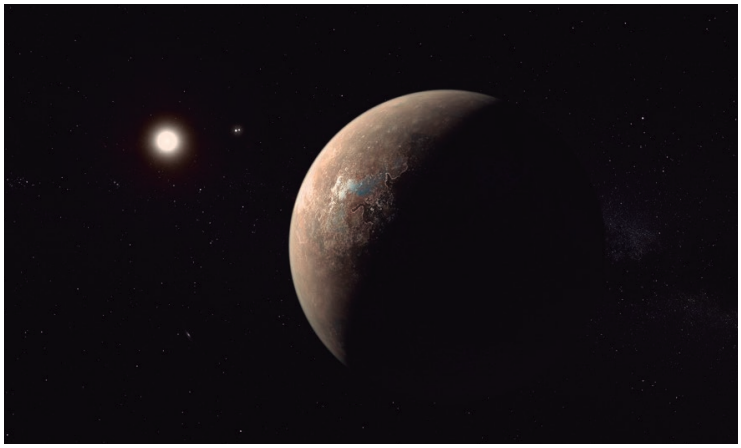
Hasta la fecha no se han podido obtener muchos espectros de exoplanetas, pues estas observaciones están en el límite de las prestaciones ofrecidas por los mayores telescopios del



El espectro de un planeta con vida, como la Tierra, mostrará biomarcadores. El agua, el dióxido de carbono y el óxido nitroso pueden señalar la presencia de una biosfera; mientras que el metano, el oxígeno molecular y el ozono, dependiendo del contexto (por ejemplo, si el planeta se encuentra en la zona de habitabilidad circunestelar) podrían revelar la presencia de vida.

ESO.

mundo. Sin embargo, en algunos exoplanetas se ha detectado claramente agua, monóxido de carbono y sodio. En otros casos se puede inferir la presencia de ciertas características atmosféricas, como nubes y nieblas. Por supuesto resulta más sencillo el estudio de las grandes atmósferas de los exoplanetas gigantes gaseosos. Pero, recientemente, se han detectado las atmósferas de algunos exoplanetas de tipo terrestre. Estas detecciones se multiplicarán con la puesta en funcionamiento de una nueva generación de telescopios extremadamente grandes (como el europeo ELT) y son estas medidas las que pueden conducirnos a la posible detección de signos de vida. En efecto, existen moléculas como el metano que pueden considerarse como *biomarcadores*, es decir, moléculas que detectadas en el espectro podrían indicarnos la presencia de vida en un exoplaneta.



Recreación del planeta Próxima Centauri b. Este exoplaneta, el más cercano a la Tierra de los conocidos, fue descubierto en el año 2016 por un equipo liderado por el astrónomo español Guillem Anglada-Escudé mientras trabajaba en la Universidad Queen Mary de Londres. El planeta orbita dentro de la zona de habitabilidad de su estrella. Su distancia es de 4,24 años luz.

ESO.

En resumidas cuentas, necesitamos obtener espectros de atmósferas planetarias para, entre otras cosas, detectar posibles indicios de vida. Gases como CO_2, H_2O, o N_2O pueden implicar la presencia de una biosfera. Si en un planeta, que esté situado en su zona de habitabilidad circunestelar, detectásemos CH_4, O_2 y O_3, en abundancia, podríamos concluir que, muy probablemente, habríamos encontrado vida.

Los exoplanetas más cercanos a la Tierra poseen un interés muy especial pues en ellos se puede lograr un detalle en las observaciones que es mucho mayor que el que se alcanza en objetos más lejanos. Por eso, el planeta detectado en torno a la estrella Próxima Centauri (descubierto en 2016 por el español Guillermo Anglada-Escudé en la Universidad Queen Mary de Londres), a tan solo 4,24 años luz de distancia, es un objeto de estudio prioritario.

Planetas al final de la vida estelar. Otro tema de interés que se plantea es qué fracción de planetas puede sobrevivir a la evolución estelar tardía. Es decir, cuando una estrella agota su combustible nuclear y explota como nebulosa planetaria o supernova, cabe esperar que los planetas más cercanos resulten vaporizados o que queden embebidos por la explosión. Pero quizás los planetas más externos puedan sobrevivir a esta catástrofe y puedan prolongar su vida durante un tiempo mucho más dilatado.

También es interesante saber si todos los planetas se forman en las fases iniciales de la evolución estelar o si puede haber planetas que se formen en etapas de la evolución estelar más avanzadas a las que acabamos de hacer alusión, por ejemplo, después de que una estrella haya explotado para formar una nebulosa planetaria o una supernova. El material eyectado al espacio mediante tales explosiones podría quizás dar lugar a la formación de una nueva generación de planetas que podría tener características diferentes a los planetas de primera generación.

Recreación de un posible paisaje en Próxima Centauri b, el exoplaneta potencialmente habitable más cercano de los conocidos.

ESO.

Sin ninguna duda el zoo de los exoplanetas seguirá poblándose con nuevos y sorprendentes mundos, cada vez más peculiares y extraños. Planetas en torno a estrellas muy jóvenes o muy viejas, en torno a estrellas binarias o incluso múltiples, planetas de características físicas y composiciones químicas muy diversas.

Los medios observacionales

Los telescopios disponibles actualmente, tanto en tierra como en el espacio, ya han llegado al límite de sus prestaciones tecnológicas y, aunque seguirán produciendo resultados interesantes, para lograr un avance transformador en el estudio de los temas que hemos descrito más arriba se necesitan telescopios más y más potentes. La nueva generación de telescopios, que ya está en fase de diseño o de construcción, nos permitirá realizar observaciones de objetos más lejanos y con mayor sensibilidad y detalle.

Telescopios Extremadamente Grandes. El telescopio más sobresaliente de los que se encuentran en construcción es el denominado ELT (*Extremely Large Telescope*). Se trata de un proyecto de ESO, la Organización Europea para la Investigación Astronómica en el Hemisferio Austral en la que España participa de manera muy activa. Desde el año 2005, ESO viene trabajando mediante la colaboración de 16 países europeos, además de Chile, para el desarrollo de este telescopio óptico-infrarrojo que, equipado con un espejo de 39 metros de diámetro, está siendo construido en Cerro Armazones (desierto de Atacama, Chile). Está previsto que el ELT realice sus primeras observaciones astronómicas hacia 2025 ó 2026. Será el telescopio más grande del mundo durante mucho tiempo e incorporará un gran

Recreación del gran telescopio ELT. Con un espejo segmentado de 39 metros de diámetro, está siendo construido por un consorcio de 16 países europeos en el que participa España, y Chile como anfitrión, en el desierto de Atacama.

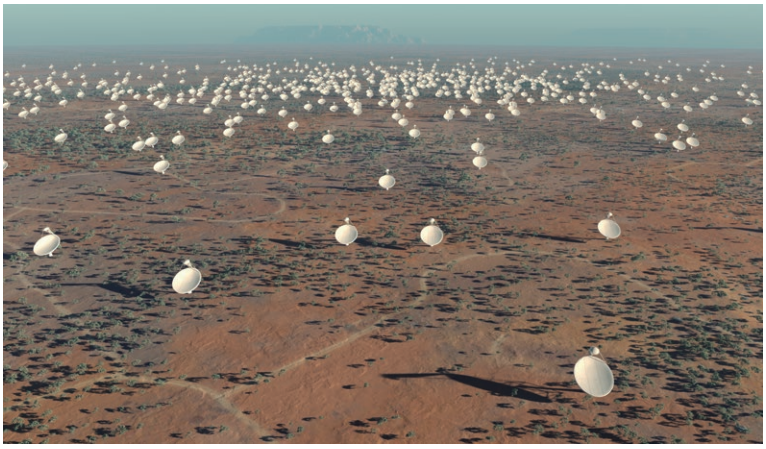
ESO.

número de innovaciones tecnológicas que lo dotarán de un rendimiento muchísimo mayor que el que tienen las instalaciones de su clase existentes actualmente.

Además del ELT, se están proyectando otros dos telescopios ópticos con espejos en el rango de los 30 metros: el Telescopio Gigante Magallanes (GMT), que ya está en construcción en el Observatorio de Las Campanas (Chile), y el Telescopio de Treinta Metros (TMT) cuya ubicación, en el momento de escribir estas líneas, aún es dudosa. Aunque inicialmente concebido para el Observatorio de Mauna Kea, existen posibilidades de que el telescopio acabe construyéndose en el Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla de La Palma (Canarias). Si así fuese, los astrónomos españoles se encontrarían en una posición óptima para observar tanto el hemisferio sur (con el ELT) como el norte (con el TMT) utilizando los telescopios mayores del mundo.

Un radiotelescopio colosal. En el dominio de la radioastronomía, el instrumento transformador será el SKA (Square Kilometer Array), un radiotelescopio que tiene el ambicioso objetivo de llegar a conseguir un área colectora de un kilómetro cuadrado. Para este fin, el SKA estará constituido por centenares de antenas parabólicas y cientos de miles de antenas de tipo *aperture array* operando en bajas frecuencias.

Las antenas estarán distribuidas en grandes configuraciones espirales que se extenderán por enormes extensiones de terreno en Australia (las antenas de baja frecuencia) y en África del Sur (las antenas parabólicas). Se trata de un interferómetro que combinará sus datos gracias a un correlador de señales y que estará operativo en diferentes rangos de frecuencias (inicialmente desde 50 MHz hasta 14 GHz, con una extensión ulterior de hasta 30 GHz). Se trata pues del complemento perfecto de ALMA, el gran interferómetro que opera entre 40 GHz y 1 THz en el desierto de Atacama (Chile).



Recreación del núcleo central, abarcando unos 5 kilómetros de diámetro, del radiotelescopio SKA que contendrá centenares de antenas parabólicas y muchas otras de tipo aperture array en Australia y en África del Sur.

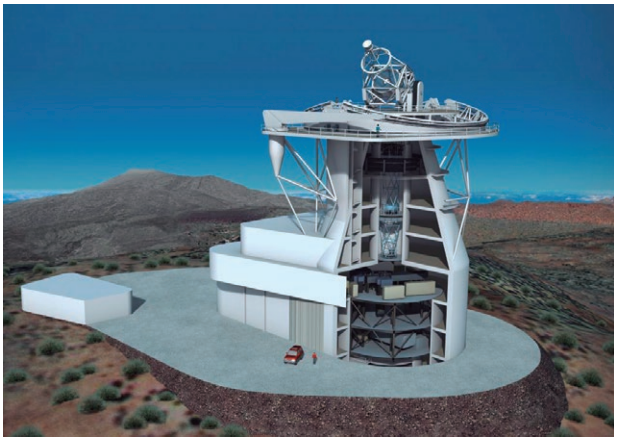
SKA.

Diseño de concepto del Cherenkov Telescope Array (CTA). IAC/G. Pérez.

Rayos gamma. Otro gran observatorio en construcción es el CTA (Cherenkov Telescope Array), un instrumento cuyo objetivo es la detección de rayos gamma de muy alta energía (desde decenas de GeV a más de 100 TeV).

El observatorio estará repartido entre dos ubicaciones diferentes: las inmediaciones del Cerro Paranal (Chile) y el Observatorio del Roque de los Muchachos (Canarias). Estará constituido por una serie de telescopios de tres tamaños, con los más grandes (de 23 metros) en el centro de la configuración, los medianos (de 12 m) inmediatamente alrededor de los grandes y los pequeños (de 6 m) en la periferia. CTA ayudará a explicar el funcionamiento físico de astros muy energéticos como las galaxias activas y los púlsares, la transferencia de materia en sistemas binarios, la naturaleza de la materia oscura y un largo etcétera.

El estudio del Sol. En física solar destaca el proyecto EST (European Solar Telescope), una iniciativa europea para instalar un telescopio solar de 4 metros de diámetro (un tamaño muy respetable cuando tenemos en cuenta que su objetivo



Recreación del gran telescopio solar europeo EST, diseñado para su instalación en las islas Canarias.

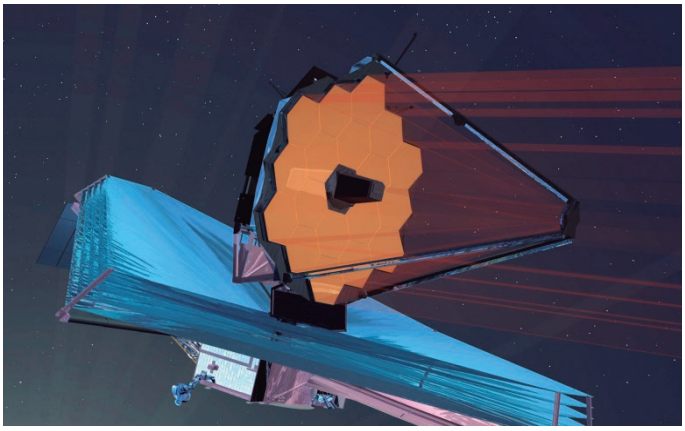
IAC/EST.

es observar el Sol) en las islas Canarias. Este instrumento utilizará detectores de vanguardia, con alta resolución espacial y temporal, para estudiar todos los detalles del astro rey, en particular el acoplamiento magnético entre su fotosfera profunda y la cromosfera. Una contrapartida norteamericana a este proyecto es el Telescopio Solar Daniel K. Inouye que, con un tamaño similar, está siendo diseñado para su instalación en la isla Maui (Hawái).

De especial relevancia científica para el estudio del Sol es la misión europea Solar Orbiter, que fue lanzada con éxito en febrero de 2020. Esta nave, que sin duda revolucionará el estudio del Sol, atravesará la órbita de Mercurio para acercarse a tan solo 30 diámetros solares de distancia del astro rey. La misión es particularmente importante para España pues dos de los principales detectores del satélite han sido construidos bajo liderazgo español. La sonda solar Parker de NASA también continuará, durante los próximos años, sus incursiones en la vecindad solar.

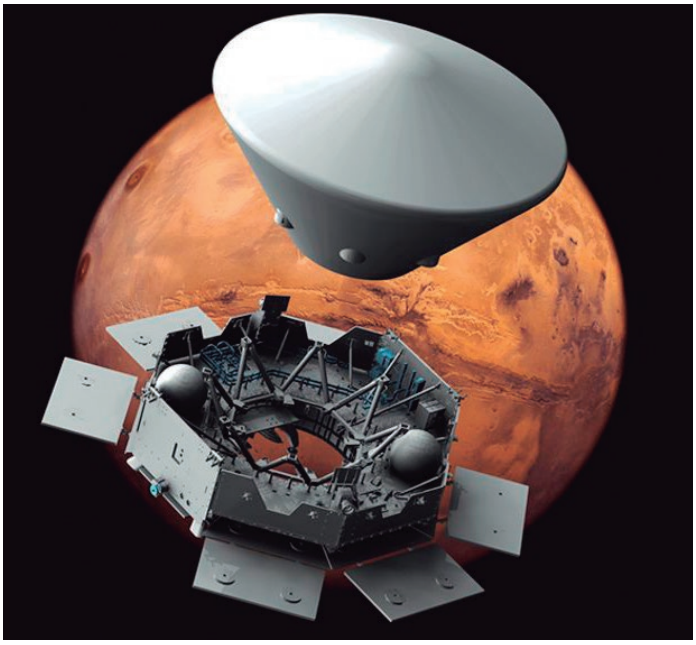
Telescopios espaciales. En lo que se refiere a los telescopios espaciales, debemos destacar en primer lugar al JWST (James Webb Space Telescope). Con un espejo de 6,5 metros de diámetro, este telescopio, fruto de la colaboración entre las agencias espaciales estadounidense (NASA) y europea (ESA) es visto como el sucesor del Hubble. En el momento de escribir estas líneas, su lanzamiento está previsto para mediados de 2021.

Tras el éxito de las misiones espaciales CoRoT y Kepler, otros telescopios también montados en plataformas espaciales, como TESS (lanzado en 2018 y con operaciones previstas hasta al menos 2022), CHEOPS (lanzado en diciembre de 2019), PLATO (previsto hacia 2026) y ARIEL (después de 2028), se dedicarán exclusivamente al estudio de los exoplanetas. Todas estas misiones, unidas a las observaciones que se realizarán con el JWST y el ELT, revolucionarán el estudio de los sistemas planetarios alrededor de todo tipo de estrellas.



Recreación artística del telescopio espacial James Webb (JWST), el sucesor del Hubble.

NASA/ESA.



Recreación de la cápsula de ESA que transportará a Marte el todoterreno Rosalind Frankin.

ESA.

La exploración de Marte. En la exploración espacial, Marte ocupará un lugar preponderante durante los próximos años. En particular, asistiremos a una especie de carrera entre los EE.UU. (colaborando con Europa) y China para recoger muestras en el planeta rojo y transportarlas a la Tierra. Como describimos a continuación, una misión próxima de NASA y otra de China tienen como primer objetivo el probar la tecnología que será desarrollada en años posteriores con la ambición de transportar rocas desde Marte a nuestro planeta en el horizonte de 2031.

La NASA tiene planeado lanzar la nave Mars 2020. Esta misión incluye un orbitador, un dron helicóptero y un vehículo todoterreno (llamado Perseverance, parecido al Curiosity) que seleccionará muestras sobre la superficie del planeta rojo y las dejará repartidas por la superficie de un cráter llamado Jezero. A esta misión debería seguir otra en 2026 que, con la ayuda de un vehículo robótico de construcción europea, recogería esas rocas y las transportaría a un cohete que despegaría de Marte con destino a la Tierra. La misión completa, que cuenta con participación de la Agencia Espacial Europea (ESA) y que ha sido bautizada MSR (Mars Sample Return), terminaría en 2031.

La agencia espacial China lanzará la misión Huoxing 1 (Hx 1) que incluye un orbitador y un todoterreno. Se trata nuevamente del primer paso de un proyecto mucho más ambicioso que va encaminado a la recogida y retorno de rocas marcianas. El proyecto completo inclu-

Recreación de la nave japonesa Hayabusa 2 vista desde el espacio.

JAXA.

ye dos sondas más que despegarán en 2028. La primera de ellas transportará un vehículo que, ya en 2029, recogería muestras para depositarlas en un cohete y colocarlas en la órbita de Marte en 2030. La segunda misión que habría despegado en 2028 recogería esas muestras de la órbita marciana y las trasladaría hacia la Tierra. Este viaje de regreso se desarrollaría entre 2030 y 2031.

Como vemos se trata de misiones sumamente complejas. Ambas partes, EEUU (con Europa) y China, van afinando sus planes y, mirándose de reojo, ajustando las fechas de la llegada de las rocas marcianas a la Tierra. Cada una de ellas tratará de ser la primera. No cabe duda de que la competición es un acicate muy importante que siempre ha alentado la actividad espacial.

ESA, en colaboración con la agencia rusa Roscosmos, lanzará el todoterreno Rosalind Franklin (antes llamado ExoMars) en 2022. Este vehículo explorará el suelo marciano durante al menos siete meses, analizando muestras que serán extraídas del subsuelo con el objetivo de buscar biomoléculas o biomarcadores, indicios en definitiva de algún tipo de vida presente o pasada.

Regresando a la Luna. También de gran relevancia científica será la misión china Chang'e 5, que tiene por objeto traer rocas lunares a la Tierra. Es la primera misión de retorno de muestras lunares desde 1974, cuando la misión soviética Luna 24 transportó 170 gramos de suelo lunar. A la Chang'e 5 seguirá otra misión de retorno de muestras (Chang'e 6) completando así este programa. Mirando a más largo plazo, este programa es un paso previo para realizar un alunizaje tripulado en la década de 2030 y comenzar a continuación la construcción de una base en el polo sur de la Luna.

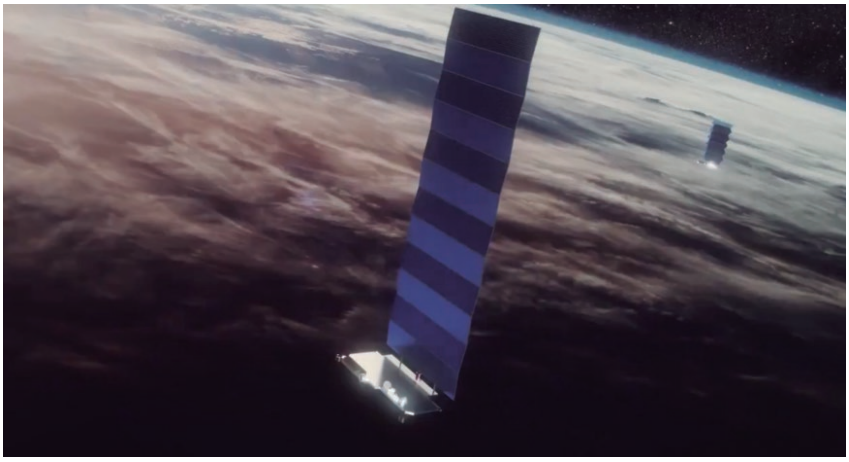
Más misiones espaciales. La nave BepiColombo de ESA, en colaboración con la agencia japonesa JAXA, continua el viaje emprendido en 2018 hacia Mercurio, donde se espera su llegada para diciembre de 2025. Esta nave transporta dos satélites que harán un estudio del pequeño planeta, incluyendo su campo magnético, su magnetosfera, su estructura interna y su superficie.

Otras misiones espaciales que darán mucho que hablar en un futuro próximo son las que transportan muestras desde asteroides. La misión de la NASA OsirisReX tomará muestras del pequeño asteroide Bennu durante el mes de julio y la sonda de JAXA Hayabusa 2 llegará a la Tierra en diciembre con muestras del asteroide Ryugu.

La pesadilla de los astrónomos

Durante los próximos años también veremos la progresión vertiginosa en el lanzamiento de megaconstelaciones de satélites. La constelación Starlink (de Space X), construida para facilitar las conexiones de Internet de banda ancha, tendrá inicialmente 1.600 satélites de los que 122 se encuentran ya en órbita a principios del año 2020. Los lanzamientos por grupos de 60 satélites continuarán en 2020 y en los años siguientes. Hacia la mitad de la década, esta constelación podría incluir unos 12.000 satélites. En paralelo, Amazon está planeando lanzar una constelación, llamada Kuiper, de más de 3.000 satélites, Samsung planea otra de casi 5.000 y hay varios otros proyectos que, cada uno, incluyen el millar de satélites.

Cabe esperar que en el plazo de unos pocos años tendremos decenas de miles de satélites orbitando en torno a nuestro planeta. Dado que el objetivo de tales constelaciones es garantizar una cobertura completa del globo terráqueo, desde cada punto y en todo momento



Satélites de la constelación Starlink.

Space X.

habrá siempre varios de ellos que resultarán visibles. Después del anochecer y antes del amanecer, dependiendo de su altura, muchos de estos satélites permanecerán iluminados por el Sol y aparecerán como puntos brillantes que se desplazan por la bóveda celeste.

Esta situación ya es una pesadilla para los astrónomos que comenzamos a temer que el cielo se pueble de esos puntos luminosos que cruzarán por el campo de visión de una observación, dejando numerosas trazas en las largas exposiciones fotográficas. La astronomía de cielo profundo podría convertirse en una disciplina impracticable.

Por supuesto, las observaciones espectroscópicas también se verán afectadas. Y las emisiones en ondas de radio de tales satélites también podrían arruinar completamente la radioastronomía. Es pues imprescindible que las constelaciones de satélites se planifiquen de manera cuidadosa, que solo se lancen los imprescindible y que, los que se lancen, no reflejen la luz solar. Con estos proyectos la humanidad se juega la posibilidad de contemplar y estudiar el cosmos.

Bibliografía recomendada

- Agulló, I. «*Más allá del Big Bang: un breve recorrido por la historia del universo*». Ed. Debate, 2020.
- Aupí, V. «*Atlas del firmamento*». Ed. Planeta, 2007.
- Bachiller, R. «*Astronomía. De Galileo a los telescopios espaciales*». Ed. Lunwerg, 2009.
- Bachiller, R. «*El universo improbable*». Ed. La esfera de los libros, 2019.
- Christian, D. «*Mapas del tiempo. Introducción a la gran historia*». Ed. Crítica, 2014.
- Fernández Barbón, J. L. «*Los agujeros negros*». Ed. Catarata, 2014.
- Fernández Castro, T. «*100 historias curiosas del universo*». Ed. Kinnamon, 2019.
- Galadí-Enríquez, D. «*Cuestiones curiosas de astronomía resueltas por el Perito en Lunas*». Ed. Anaya, 2014.
- Galfard, C. «*El universo en tu mano*». Blackie Books, 2016.

— García Llama, E. *«Apolo 11: la apasionante historia de cómo el hombre pisó la Luna por primera vez»*.
Ed. Planeta, 2019.

— de Grasse Tyson, N. *«Astrofísica para gente con prisas»*.
Ed. Paidós, 2017.

— Greene, B. *«El universo elegante: supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría definitiva»*.
Ed. Crítica, 2011.

— Hamuy, M. *«El universo en expansión»*.
Ed. Debate, 2018.

— Hawking, S. W. *«La teoría del todo: el origen y el destino del universo»*.
Ed. Debolsillo, 2018.

— Hoskin, M. *«The Cambridge Illustrated History of Astronomy»*.
Cambridge University Press, 1996.

— Isaacson, W. *«Einstein: su vida y su universo»*.
Ed. Debate, 2008.

— Martínez, V.J., Miralles, J. A., Marco, E., Galadí-Enríquez, D. *«Astronomía fundamental»*.
Ed. PUV, 2005.

— Martos Rubio, A. *«Breve historia de la carrera espacial»*.
Ed. Nowtilus, 2009.

— Planesas, P. *«Tránsitos. La medida del sistema solar y de otros sistemas planetarios»*.
CNIG, 2019.

— Sagan, C. *«Cosmos»*.
Ed. Planeta, 2007.

— Sánchez Ron, J. M. *«Albert Einstein: su vida, su obra y su mundo»*.
Ed. Crítica, 2015.

— Seara Valero, M. *«Hasta el infinito y más allá»*.
Ed. Destino, 2015.

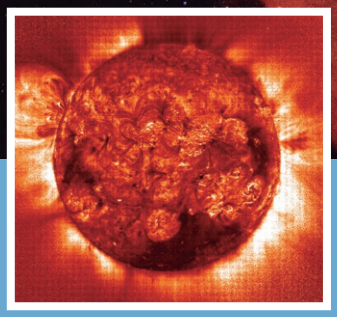
— Schilling, G., Christensen, L.L. *«Eyes on the Skies: 400 years of telescopic discovery»*.
ESO/IAU/WILEY-VCH, 2009.

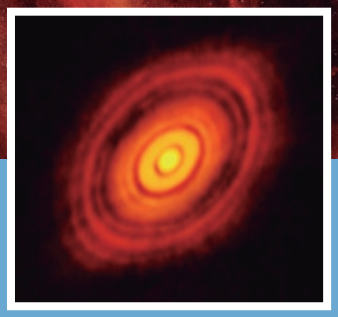
— Sobel, D. *«Un cielo pluscuamperfecto: Copérnico y la revolución del cosmos»*.
Ed. Turner, 2012.

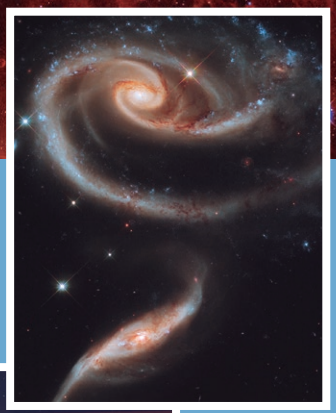
— Garzón, J. A., Galadí-Enríquez, D. Morales Durán, C. (coordinadores).
«100 Conceptos básicos de Astronomía».
Sociedad Española de Astronomía, 2009.
Disponible gratuitamente en https://cvc.cervantes.es/ciencia/astronomia/100_conceptos_basicos/

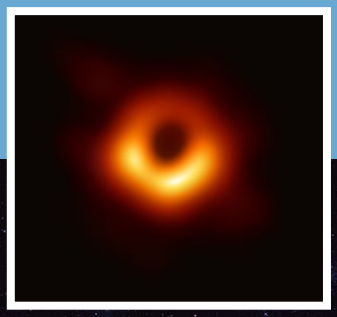
— Thorne, K. S. *«Agujeros negros y tiempo curvo: el escandaloso legado de Einstein».*
Ed. Crítica, 2010.

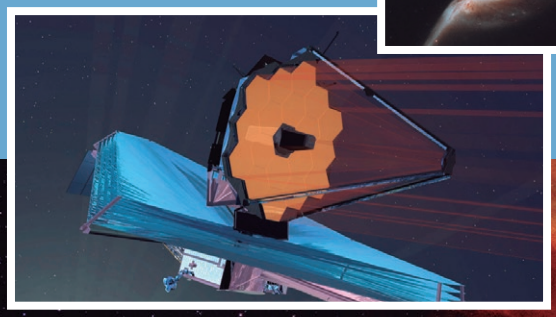
— Wulf, A. *«En busca de Venus: el arte de medir el cielo».*
Ed. Taurus, 2019.

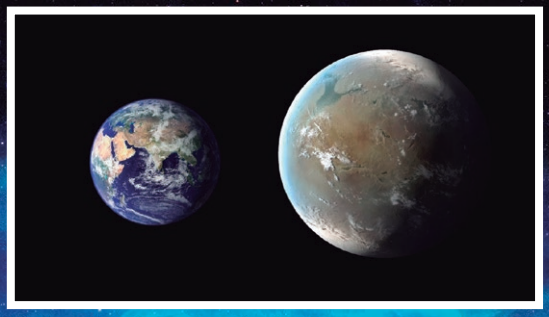












Planetas y exoplanetas, estrellas, galaxias, agujeros negros, el big bang y la evolución del universo. Estos son algunos de los temas abordados aquí con amenidad, pero con rigor, por los astrónomos profesionales del Observatorio Astronómico Nacional.