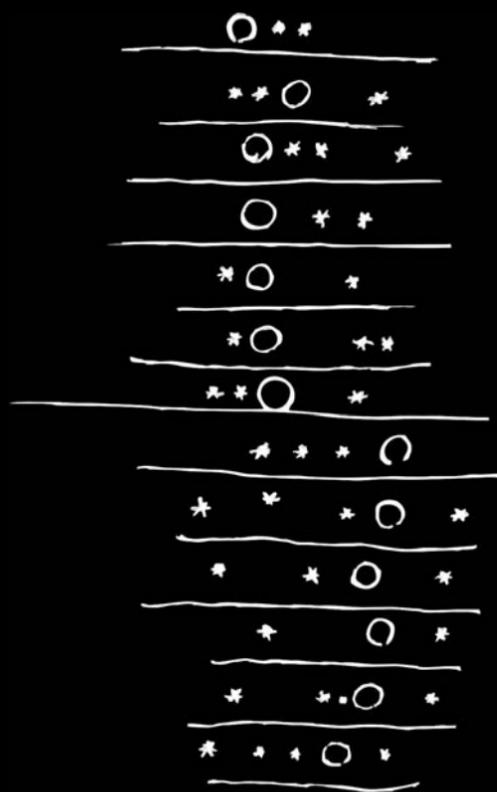


INFORMACIÓN Y ACTUALIDAD ASTRONÓMICA

revista de divulgación del Instituto de Astrofísica de Andalucía

edición especial Feria del Libro 2016



Esto lo dibujó Galileo Galilei en torno a 1610.

Y el universo cambió.

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)

www.iaa.es



Las lunas Europa (dcha) e Ío (izda), con el disco de Júpiter de fondo. Fuente: NASA/JPL/Bjorn Johsson.

Los dibujos de Galileo

La portada de esta edición constituye un pequeño homenaje a uno de los libros más relevantes de la historia de la astronomía, *El mensajero de las estrellas (Sidereus Nuncius)* de Galileo. Publicado en 1610, incluye los dibujos que Galileo realizó a partir de las observaciones de Júpiter, que revelaron la existencia de cuatro lunas a su alrededor. Así lo contaba Galileo:

"El séptimo día de enero del presente año, 1610, [...] el planeta Júpiter se presentó ante mi vista y como quiera que yo me había preparado un instrumento excelente, observé una circunstancia que nunca antes había sido capaz de ver, a saber, tres pequeñas

estrellas, pequeñas pero muy brillantes, estaban cerca del planeta; y aunque yo creí que pertenecían al conjunto de estrellas fijas, hicieron sin embargo que reflexionase, porque parecían estar situadas formando una línea recta perfecta, paralela a la

eclíptica, y ser más brillantes que el resto de las estrellas [...]. Cuando el 8 de enero, guiado por una cierta fatalidad, volví a mirar a la misma zona de los cielos, encontré un estado de las cosas muy diferente, ya que las tres pequeñas estrellas estaban todas al

oeste de Júpiter, y más cercanas entre sí que la noche anterior".

"Y por tanto yo concluí, y decidí sin dudarlo, que existen tres estrellas en los cielos que se mueven alrededor de Júpiter, como Venus y Mercurio lo hacen alrededor del Sol; lo que fue es-

tablecido de largo tan claro como la luz del día por otras numerosas observaciones posteriores. Estas observaciones también establecieron que no solo existen tres, sino cuatro, cuerpos sidereos erráticos que hacen sus revoluciones alrededor de Júpiter".

Cuatro lunas, Ío, Europa, Ganímedes y Calisto, que hoy conocemos como las lunas galileanas. La importancia de estos cuatro satélites reside en que demostraba que no hay un único centro de movimiento en el universo, como defendía la tradición geocéntrica heredada de Aristóteles y según la que los cuerpos celestes, incluido el Sol, giraban en torno a la Tierra. Estas lunas eran, junto con el hallazgo de las fases de Venus, una prueba sólida de que el sistema heliocéntrico de Copérnico, que defendía que los planetas giraban en torno al Sol, era el que se ajustaba a la realidad.

Y así la Tierra comenzó a alejarse del centro del universo. Un centro que hoy sabemos que ni siquiera existe.

Índice

EL ORIGEN DE TODO ...	3
EL UNIVERSO ACELERADO ...	4
DEL ÁTOMO AL BOSÓN DE HIGGS ...	6
ONDAS GRAVITATORIAS: LA OTRA LUZ DEL COSMOS ...	8
DEL DIBUJO A LA CÁMARA DIGITAL ...	12
LIBROS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA ...	15

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

Edición, diseño y maquetación: Silbia López de Lacalle.

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

El origen de todo

La fascinante historia del universo, y el modo en que hemos ido conociéndola

Silbia López de Lacalle (IAA-CSIC)

Hubo un instante muy remoto en el que el universo estuvo comprimido en el tamaño de un guisante: los cientos de miles de millones de galaxias que existen en la actualidad estaban contenidas en un espacio diminuto, en forma de una sopa cósmica homogénea que... Un momento. Así, a palo seco, no hay quien se lo crea, ¿verdad? Comencemos de nuevo:

Rebobinando el universo

Vamos a irnos muy atrás para contar la historia de todo lo que existe. Pero, antes, nos paramos en 1929, año en que el astrónomo Edwin Hubble demostró, tras muchas observaciones, que las galaxias se alejan unas de otras y que además este desplazamiento aumenta con la distancia: cuanto más distantes, a mayor velocidad se alejan. ¿Cómo explicarlo? Coje un globo y pinta unas galaxias (con unos puntitos vale). Al hincharlo, las galaxias de ese pequeño universo en dos dimensiones se alejarán con el mismo patrón que observó Hubble hace más de ochenta años, y que se conoce como la expansión del universo. Y, si el fenómeno de la ex-

pansión ya resulta sorprendente, procedamos ahora a “deshinchar” el universo: las galaxias se irán acercando las unas a las otras hasta converger en un punto diminuto de gran densidad, menor incluso que el guisante con el que comienza el artículo. Pues se cree que así empezó todo: hace 13.800 millones de años, toda la materia y energía estaba contenida en un punto infinitamente denso y pequeño que experimentó una violenta expansión, origen del tiempo, el espacio y todas las agrupaciones de materia. Es lo que se conoce como big bang y constituye, hasta la fecha, el esqueleto teórico que mejor explica el origen del universo en el que vivimos.

La foto del bebé

Pero hablamos de un universo radicalmente distinto al que observamos hoy: una centésima de segundo después del big bang, la materia y la radiación (lo que los profanos conocemos como luz) se encontraban mezcladas en una sopa cósmica con una densidad cuatro mil millones de veces mayor que la del agua y a una temperatura de unos cien mil millones

de grados. No había galaxias ni estrellas, tan solo núcleos de hidrógeno, helio, electrones libres (todos ellos objetos con carga eléctrica), y muchísima radiación. La densidad de partículas cargadas era tan alta que un fotón, la partícula elemental de la radiación, tenía muchas probabilidades de interactuar rápidamente con ellas o, lo que es lo mismo, solo podía recorrer un camino muy corto hasta encontrarse con un electrón o un núcleo de materia.

Pero, a medida que el universo se expandía, la temperatura iba disminuyendo. Llegó un momento en que los electrones comenzaron a ser “atrapados” por los núcleos, formando los primeros átomos de hidrógeno y helio, objetos sin carga eléctrica. Así, los fotones dejaron de tener obstáculos con los que interactuar y comenzaron a viajar por su cuenta: la materia y la luz se desacoplaron. Esto ocurrió cuando el universo contaba con unos 300.000 años (era muy joven aún, dadas las últimas estimaciones que calculan su edad en unos 13.800 millones de años).

Desde entonces, aquellos fotones han

proseguido su camino sin interrupción e impregnan todo el universo en forma de radiación fósil uniforme. Eso sí, su temperatura ha disminuido hasta los 270° bajo cero y se sitúa en la zona de microondas del espectro electromagnético, imposible de observar a simple vista. Pero, para nuestro asombro, podemos detectar esta radiación encendiendo el televisor sin sintonizar: aproximadamente un 1% de la multitud de puntos que brillan desordenados en la pantalla son el remanente de la gran explosión, emitidos directamente desde el big bang a nuestro salón.

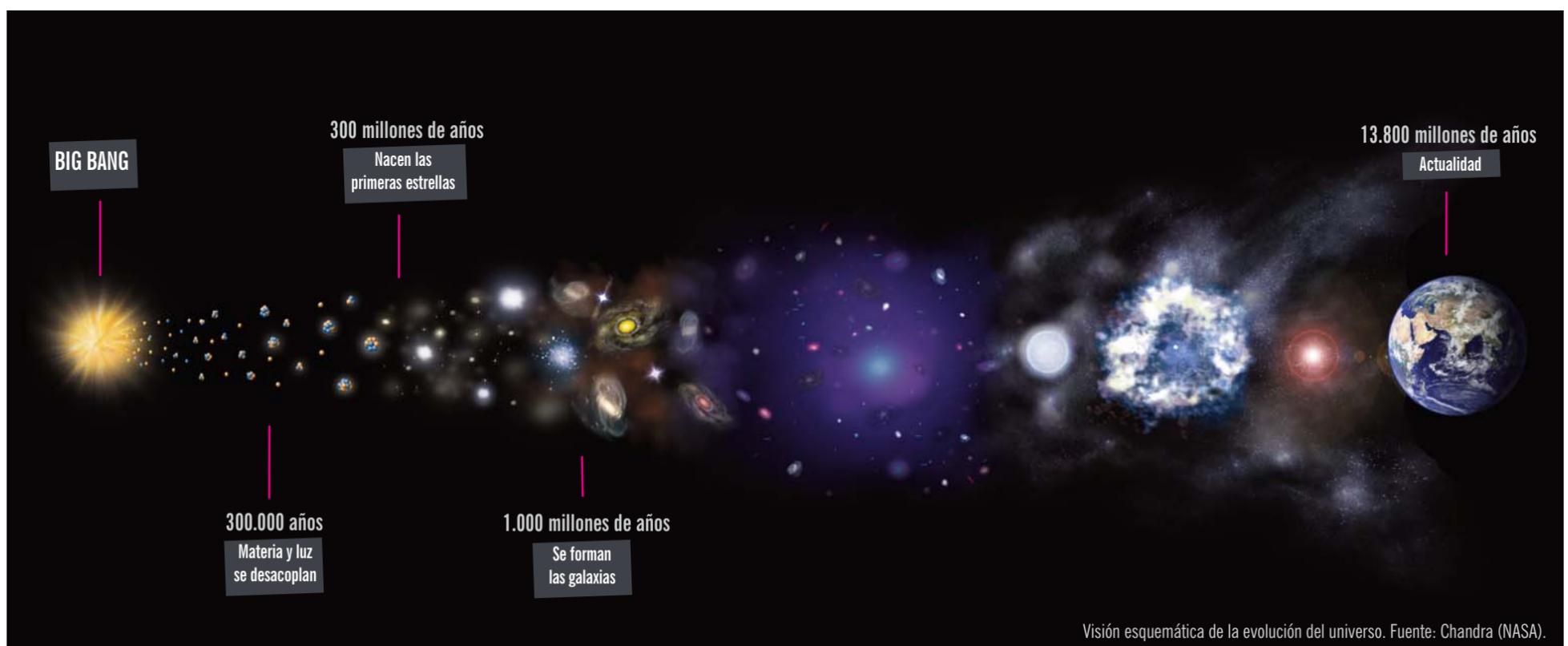
Esta radiación primordial se denominó fondo cósmico de microondas, y su uniformidad constituye una de las pruebas de la teoría del big bang: sería, y de hecho se ha intentado, muy difícil imaginar una fuente de radiación local que presentara tal uniformidad.

¿Y las galaxias?

Cualquiera un poco suspicaz tendrá sus sospechas: ¿cómo se convierte esa sopa homogénea en lo que vemos hoy: grandes vacíos salpicados por

agrupaciones de galaxias en forma de filamentos? La teoría más aceptada defiende que pequeñísimas fluctuaciones en la densidad de la materia original fueron el germen de estas estructuras. Es decir, dentro de esa sopa cósmica había grumos de densidad algo mayor, un 0,01% mayor para precisar (esto equivale a una ola de tres milímetros de altura en un lago de treinta metros de profundidad). A medida que el universo evolucionaba, la gravedad hizo que alrededor de estas zonas se acumulara materia, originando concentraciones y vacíos y estableciendo así el origen de la estructura que observamos en la actualidad.

Pero, si existieron esas fluctuaciones, la radiación cósmica de fondo debería conservar sus huellas y mostrarse menos uniforme de lo que parecía al principio: tendrían que existir pequeñísimas variaciones de temperatura, reflejo de las semillas primigenias de nuestra estructura a gran escala. En 1989, la NASA puso en órbita el *Cosmic Background Explorer* (COBE), un satélite especialmente diseñado para medir el fondo cósmico de mi-



Visión esquemática de la evolución del universo. Fuente: Chandra (NASA).

croondas que detectó esas pequeñas variaciones en la distribución de temperaturas, lo que demostró que en el universo inicial la distribución de materia y energía no era perfectamente homogénea.

Un elemento extraño e imprescindible

Sin embargo, los astrónomos compararon esas irregularidades primigenias con la imagen actual y resultó que los 13.700 millones de años que se le atribuyen al universo son insuficientes para el desarrollo de estructuras tan grandes. Hacía falta un aglutinante, y se retomó el concepto de materia oscura, que dos astrónomos desarrollaron de forma indepen-

diente en los años treinta del siglo pasado: por un lado, Fritz Zwicky, al medir las velocidades de las galaxias en el cúmulo de Coma, descubrió que se movían tan rápidamente que la gravedad atribuible a la materia luminosa resultaba insuficiente para mantenerlas unidas. Debía, por lo tanto, existir algún tipo de materia no visible cuya gravedad impidiera la separación. Por su parte, Jan Oort llegó a una conclusión similar pero aplicada al movimiento de las estrellas dentro de las galaxias.

La materia oscura resulta bastante difícil de imaginar: todo lo que vemos, desde nuestro vecino hasta una galaxia, está formado por protones, neu-

trones y electrones, y constituye lo que se conoce como materia ordinaria (o bariónica). La materia oscura, por el contrario, se compone de partículas exóticas, no brilla –ni emite ni refleja luz– y tiene una interacción muy débil con la materia ordinaria. Vamos, que no la podemos ver. Por suerte, sí que responde a la gravedad, y así es como puede estudiarse.

He aquí cómo la materia oscura soluciona el problema de la falta de tiempo del universo: supongamos que, al principio, hay materia oscura y bariónica en equilibrio. Los científicos creen que la primera tiene unas propiedades de interacción diferentes a la segunda, y empieza a agruparse

mucho antes; así, la materia bariónica tiene el camino preparado y cae sobre los grumos ya formados. Por lo tanto, la materia oscura constituye, además de un misterio (aún no se han identificado las partículas que la componen), una de las piezas para que el modelo de universo hoy día aceptado funcione.

Más cosas oscuras

Si con un elemento extraño no era suficiente, agárrate porque vienen curvas: a finales del siglo pasado, los astrónomos descubrieron que el universo vive en la actualidad una etapa de expansión acelerada, y no constante o decelerada como se creía. Esto

sería el efecto de “algo” contrario a la gravedad que provoca una repulsión a gran escala y acelera la expansión. Esta antigraavedad, conocida como energía oscura y de la que tratamos en el artículo siguiente, constituiría el 68,3% de la densidad total del universo aunque aún se desconoce su naturaleza (una teoría muy extendida habla de un tipo de energía que surge del vacío). El resto del contenido del universo se distribuiría en un 26,8% de materia oscura y un 4,9% de materia ordinaria. Así, no solo estamos compuestos de un tipo de materia poco común en el universo, sino que además apenas conocemos qué es lo que lo forma.



La nebulosa de Orión (NASA/ESA).

La prueba de que hubo un origen

¿Sabes por qué la noche es oscura? Porque el Sol se oculta, ¿no? Vale, pero añadamos un dato que mortificó a los astrónomos durante siglos y que se conoce como la paradoja de Olbers, en honor al astrónomo alemán que la formuló en 1823 (no fue el único, pero sí quien la difundió): si el universo es ilimitado, y se halla poblado uniformemente por un número infinito de estrellas, ¿no debería el cielo nocturno brillar como si fuera un manto de estrellas? O, dicho de otro modo, si un observador mira al cielo, ¿no tendría su línea de visión que toparse necesariamente con una estrella?

Hubo respuestas para todos los gustos: unos argumentaban que la luz se debilitaba con la distancia, otros hablaban de un material interestelar que absorbía su luz y algunos incluso imaginaban una especie de “pared” oscura que rodeaba el espacio que habitamos. Y, sorprendentemente, quien atisbó la respuesta no fue un astrónomo,

sino un escritor: Edgar Allan Poe. Un año antes de morir escribió Eureka: un poema en prosa (1848), un ensayo donde afirmaba que “la única forma {...} de entender los huecos que nuestros telescopios encuentran en innumerables direcciones, sería suponiendo una distancia al fondo invisible tan inmensa, que ningún rayo proveniente de ahí fue todavía capaz de alcanzarnos”. Poe introduce un concepto importante: el universo anda falto de tiempo. En 1901, el matemático y físico escocés Lord Kelvin puso en números esta teoría: para que la noche fuera brillante, necesitaríamos tener esa distribución uniforme de estrellas hasta una distancia de cientos de billones de años luz, y según los últimos datos, el universo tiene sólo 13.800 millones de años. El universo es oscuro porque es muy joven y, de hecho, esa oscuridad prueba que hubo un origen.

El universo acelerado

Analizamos cómo se descubrió y qué supone la expansión acelerada del Universo, descubrimiento que mereció el premio Nobel de Física de 2011

Miguel Ángel Pérez-Torres (IAA-CSIC)

Si lanzamos una moneda al aire, su velocidad inicial se verá mermada por la atracción gravitatoria de la Tierra, que frena su ascenso y finalmente la hace caer. Si viéramos que la moneda sigue y sigue acelerándose, nos llevaríamos una buena sorpresa y, si no hay truco, tendríamos que buscar una explicación a este nuevo fenómeno. Algo así es lo que les ocurrió a los laureados con el premio Nobel de Física

de 2011, los estadounidenses Saul Perlmutter, Brian Schmidt y Adam Riess. El objetivo que perseguían estos científicos, aunque ambicioso, no era otro que el de medir la desaceleración del universo en el que vivimos, utilizando observaciones de supernovas del universo lejano. Hasta finales de los 90, la mayor parte de los astrónomos dábamos por hecho que vivíamos en un universo

que, como la moneda, eventualmente frenaría su expansión. La conclusión a la que llegaron los equipos de Perlmutter y de Schmidt y Riess no pudo ser más sorprendente: el universo, que empezó su expansión hace casi catorce mil millones de años, ¡se estaba acelerando! Este espectacular resultado, que golpeó los cimientos de la cosmología moderna, fue el premio a un trabajo

iniciado en 1988 por Saul Perlmutter, quien lideraba el Proyecto de cosmología con supernovas y, de modo independiente, el del equipo de Brian Schmidt y Adam Riess, quienes iniciaron un proyecto similar en 1994, el de la Búsqueda de Supernovas a Alto Corrimiento al Rojo. Ambos equipos esperaban encontrar, y medir, la desaceleración del universo. Para ello fueron a la caza y

captura de las supernovas de tipo Ia más lejanas de nosotros, con distancias de hasta seis mil millones de años luz, con el objetivo de medir la distancia hasta ellas de modo muy preciso.

¿Por qué supernovas de tipo Ia?

Las supernovas de tipo Ia resultan de la muerte de una clase de estrellas conocidas como enanas blancas y cuyo



Concepción artística de un sistema estelar formado por una estrella normal y una enana blanca, que dará lugar a una supernova de tipo Ia.

final es explosivo. Pero lo que las hizo cruciales para el objetivo de Perlmutter, Schmidt y Riess era que el brillo intrínseco de las explosiones de supernova de tipo Ia es prácticamente el mismo, ya que todas estas supernovas explotan con una masa característica, conocida como el límite de Chandrasekhar, y que equivale a 1,44 veces la masa del Sol. Esto las convierte en “candelas estándar”, y constituyen un excelente patrón para medir distancias. Si conocemos la distancia a una de estas supernovas, aplicando la ley que establece que el brillo disminuye con el cuadrado de la distancia podemos obtener las distancias a todas las supernovas.

Pero, ¿cómo medir esa aceleración o desaceleración del universo, midiendo solo distancias a las supernovas? Como el brillo intrínseco de las supernovas Ia es el mismo, la distancia a las supernovas viene determinada por el brillo aparente que medimos con los telescopios. De este modo, Perlmutter, Schmidt y Riess midieron el brillo aparente de supernovas muy lejanas, lo que directamente indicaba las distancias a las mismas. Perlmutter, Schmidt y Riess esperaban encontrar evidencias de que vivíamos en un universo donde la proporción de materia era tan grande que frenaba su expansión. Para ello, las supernovas observadas tendrían que haber sido muy brillantes, ya que al desacelerarse la expansión del universo la distancia a las supernovas sería menor que si el universo no se hubiera frenado. Sin embargo, lo que encontraron fue justo lo contrario: el brillo de las supernovas más lejanas era más débil del esperado. Tan débil que las distancias eran incluso mayo-

res que las que esperaríamos si el universo no se hubiera frenado. Por tanto, la expansión del universo tenía que estar acelerándose.

¿Qué supone la aceleración?

El descubrimiento de que vivimos en un universo que se acelera tiene enormes implicaciones. Incluso antes del descubrimiento de la ley de Hubble, que nos dice que las galaxias se separan unas de otras a velocidades proporcionales a la distancia que las separa, ya se había sugerido que quizá viviéramos en un universo abierto (un universo que se expande aceleradamente), o bien cerrado (un universo en el que la atracción gravitatoria vence al Big Bang inicial y finalmente colapsa), o quizá plano (donde la expansión del universo disminuiría con el paso del tiempo). Einstein, en sus famosas ecuaciones, incluyó una constante cosmológica, conocida también como energía oscura, para evitar la solución de un universo en expansión, ya que era una posibilidad que no le gustaba. Mucho más tarde, Einstein consideró la inclusión de dicha constante uno de sus mayores errores, y la suprimió de sus ecuaciones.

Los resultados obtenidos por Perlmutter, Schmidt y Riess constituyen la confirmación de que la constante cosmológica en las ecuaciones de Einstein no fue un error, sino que resultó una solución brillante. Gracias a los premiados con el Nobel de Física, sabemos que vivimos en un universo dominado por energía oscura. Si hay una constante cosmológica, el universo está destinado a acelerarse, incluso si el universo en que vivimos es plano. Esta aceleración del universo sería debida a la energía oscura,

que en los inicios del universo constituiría una pequeña parte de toda la energía. A medida que la materia se fue diluyendo con la expansión del universo, la energía oscura fue dominando y actualmente constituye aproximadamente el 68% de toda la energía presente en el universo.

El descubrimiento de que vivimos en un universo que se acelera tiene enormes implicaciones

Un merecido galardón

El descubrimiento de la expansión acelerada del universo por Perlmutter, Schmidt y Riess es un hito en la cosmología moderna, tan significativo como el descubrimiento de las variaciones de temperatura de la radiación del fondo cósmico de microondas, y por el que los científicos John Mather y George Smoot recibieron el premio Nobel de Física en 2006. En efecto, el descubrimiento de la expansión del universo, así como de su aceleración, ha significado un enorme avance en la comprensión de la evolución y el destino final del universo en el que vivimos, al confirmar que está dominado por energía, no por materia, y que además esta energía es oscura.

Sin duda, los investigadores que resuelvan el nuevo misterio abierto por la aceleración del universo, es decir, qué compone la materia y energía oscuras, conseguirán un no menos merecido premio Nobel que el obtenido en 2011 por Perlmutter, Schmidt y Riess.

Supernovas de tipo Ia como candelas estándar

En astronomía, la medición de distancias constituye una tarea primordial, aunque ardua. La esencia de muchas de las técnicas empleadas resulta, a pesar del nombre -ley inversa del cuadrado de la distancia-, bastante sencilla: si tenemos una bombilla a un metro y nos alejamos otro metro, el brillo aparente de la bombilla disminuirá cuatro veces; si triplicamos la distancia, el brillo disminuirá nueve veces, y así de forma sucesiva. Entonces, si conocemos el brillo intrínseco de un objeto celeste podemos determinar su distancia y emplearlo como patrón de medida, o candela estándar. No obstante, hay que tener en cuenta que la distancia en el universo no es solo espacial,

sino también temporal, de modo que las imágenes que recibimos corresponden al pasado de los objetos: igual que la luz que emite el Sol tarda ocho minutos en llegar a la Tierra, las imágenes de las galaxias lejanas corresponden a una etapa de su evolución muy anterior, tanto que emplearlas como patrón de medida podría ser engañoso. Era preciso encontrar un tipo de objeto cuya luminosidad fuera comparable a la de las galaxias, pero que apenas variara de un objeto a otro, tanto en el universo cercano como en el lejano. El descubrimiento se produjo en 1988, cuando un grupo de investigadores danés observó la primera supernova distante de tipo Ia.

Del átomo al bosón de Higgs

En julio de 2012, los responsables de los experimentos ATLAS y CMS del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) anunciaban el hallazgo de una nueva partícula, el bosón de Higgs, elemental para apuntalar el modelo estándar de la física de partículas

Silbia López de Lacalle (IAA-CSIC)

A los que carecemos de suficiente bagaje matemático, la física de partículas nos queda grande. Sin embargo, sí podemos adquirir unas nociones básicas y dejarnos sorprender por las cosas que ocurren en el microcosmos, un zoo donde las partículas pueden surgir espontáneamente, dar lugar a otras al chocar o aniquilarse. O donde un montón de espacio vacío puede generar solidez: casi todo el volumen de un átomo está vacío, algo con lo que nos cuesta estar de acuerdo cuando nos golpeamos contra una pared. Además, la física de partículas busca responder a preguntas muy pertinentes como ¿de qué estamos hechos? O ¿qué fuerza mantiene juntas las partículas que constituyen, digamos, nuestros dedos?

El hallazgo, en 2012, del bosón de Higgs, supuso toda una revolución que inundó páginas de periódicos y que nos ofrece una excelente excusa para revisar los entresijos de lo más pequeño.

Desde antiguo...

Lo que hoy constituye una disciplina complejísima donde las explicaciones intuitivas brillan por su ausencia, comenzó como una cuestión filosófica que buscaba los fundamentos de la materia o, más concretamente, aquel elemento simple que no estaba compuesto por piezas menores. Aunque los filósofos indios ya hablaban, en el siglo VI a.C., de unidades que formaban elementos más complejos formando pares, y después tríos de pares, fue el griego Demócrito quien, dos siglos después, acuñó el término átomo para describir la partícula de materia más pequeña e indivisible. Pero su teoría no cuajó y, en cambio, sí la de Aristóteles, que proponía como elementos fundamentales el fuego, el agua, la tierra y el aire. Así, por ejemplo, los metales estaban for-

mados por el elemento tierra y una pizca de los otros, mientras que los objetos menos densos tenían, sencillamente, menos proporción de tierra. Otra cuestión eran los cuerpos celestes, que no estaban compuestos por los cuatro elementos ordinarios sino por el quinto elemento, el éter, incorruptible y sin peso.

Por extraño que nos parezca, esta visión aristotélica del mundo material sobrevivió durante siglos, hasta que los nuevos descubrimientos en el campo de la química impusieron una revisión; más concretamente, fue Robert Boyle quien, con su obra publicada en 1661 y titulada El químico escéptico, fijó el punto de inflexión: Boyle defendía una teoría en la que describía la realidad y sus cambios mediante corpúsculos (átomos) y sus movimientos, y ofrecía evidencias experimentales y descripciones detalladas de sus experimentos.

De nuevo, transcurrieron siglos (cuyos hitos tenemos que saltarnos) hasta que se reveló la estructura del átomo y resultó que tampoco es la partícula fundamental e indivisible: a principios del siglo XX se esbozaba su estructura, formada por un diminuto y denso núcleo con carga positiva rodeado de una nube de electrones con carga negativa. Ante esto, la pregunta era inevitable: ¿es el núcleo del átomo, de apariencia tan sólida, la partícula fundamental? Y resultó que tampoco, porque se descubrió que se componía de protones, con carga positiva, y neutrones, que carecen de carga. Volviendo a lo mismo: ¿son los protones y neutrones las partículas fundamentales? Nones: los físicos descubrieron que se componen de “piezas” aún más pequeñas, denominadas quarks, que por fin parecen dar por finalizada la búsqueda al no estar compuestos por nada más pequeño. Y con esto llega-



El Gran Colisionador de Hadrones en números

mos al modelo moderno de átomo, que vemos en una de las imágenes: electrones moviéndose en órbitas en torno al núcleo, compuesto de protones y neutrones que, a su vez, están formados por quarks. Eso sí, la imagen está distorsionada: si dibujáramos un átomo a escala, donde los protones y neutrones midieran un centímetro de diámetro, entonces los electrones y los quarks medirían menos que un cabello humano y el diámetro de todo el átomo sería mayor que treinta campos de fútbol. Como decíamos al principio, el 99,99999999999999% del volumen del átomo está vacío.

■ La mayor máquina del mundo: una circunferencia de 26.659 metros que alberga un total de 9.300 imanes.

■ La pista de carreras más rápida: a máxima potencia, billones de protones recorren el anillo del LHC unas once mil veces por segundo a una velocidad próxima a la de la luz. Tendrán lugar unos 600 millones de colisiones por segundo.

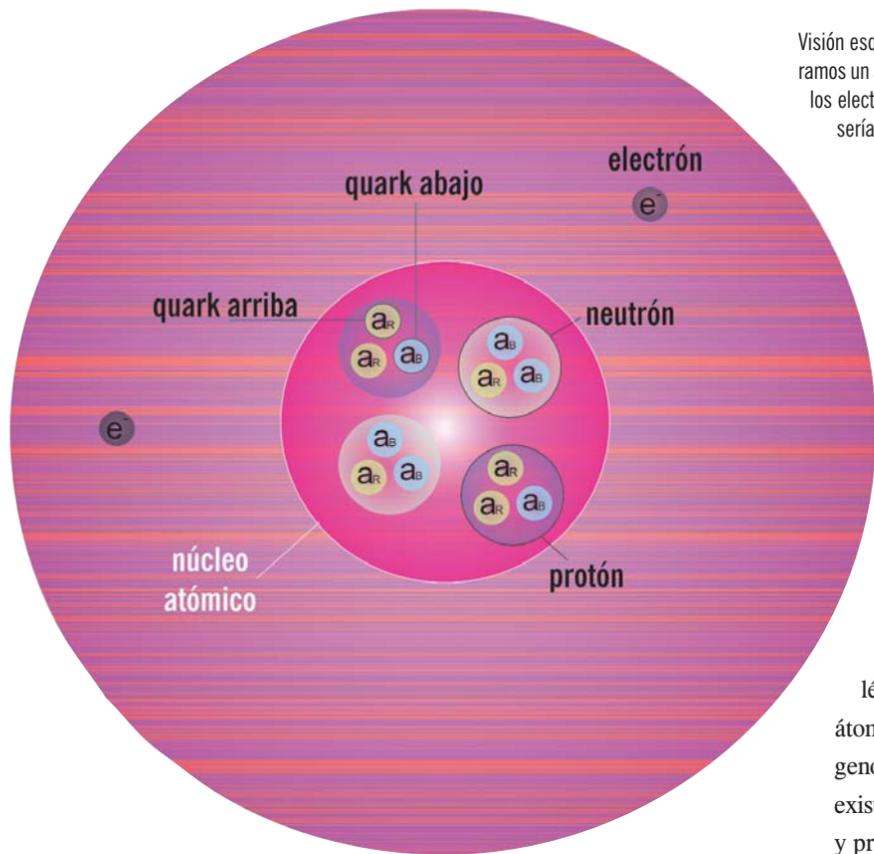
■ El espacio más vacío: para evitar que las partículas choquen con las moléculas de gas, dentro del acelerador se ha practicado un vacío casi perfecto (de hecho, tan vacío como el espacio interplanetario).

■ Calor y frío extremos: la colisión de partículas provocará temperaturas 100.000 veces más altas que la del núcleo del Sol concentradas en un espacio

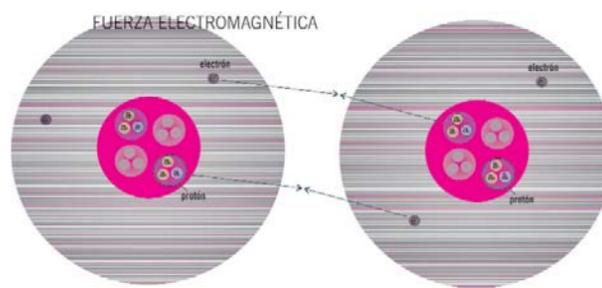
minúsculo. Por otro lado, el sistema criogénico mantendrá los imanes a 271,3 grados bajo cero.

■ Los detectores más sofisticados: para exprimir la información que esos 600 millones de colisiones por segundo aportarán, se han construido detectores capaces de medir la trayectoria de una partícula con una precisión de mil millonésimas de segundo, o su posición en millonésimas de metro.

■ El superordenador más potente: los datos recogidos por cada uno de los principales experimentos del LHC llenarían unos 100.000 DVDs cada año. Decenas de miles de ordenadores repartidos por todo el mundo se están disponiendo para dar lugar a una red computacional denominada Grid.



Visión esquemática de los distintos componentes del átomo. La escala está distorsionada: si dibujáramos un átomo a escala, donde los protones y neutrones midieran un centímetro de diámetro, entonces los electrones y los quarks medirían menos que un cabello humano y el diámetro de todo el átomo sería mayor que treinta campos de fútbol.



Cosas fundamentales

Aunque se han descubierto más de doscientas partículas subatómicas, los científicos han conseguido separar el grano de la paja y han elaborado un modelo, el Modelo Estándar, que describe de qué está hecho el mundo y qué es lo que lo mantiene unido. Así que cojamos aire, porque aquí viene la receta (muy simplificada, o necesitaríamos un libro): tenemos seis quarks con nombres muy peculiares y a los que se alude como pares (arriba/abajo, encanto/extraño y cima/fondo) y seis leptones, uno de los cuales ya conocemos (el electrón), que también tienen nombres curiosos (electrón, muón, tau –todos con carga eléctrica– y un tipo de neutrino –sin carga– para cada uno de ellos). Para nuestra suerte, toda la materia que vemos se compone de los quarks y leptones más ligeros, el par arriba/abajo y el electrón, lo que nos devuelve a un escenario algo más familiar: los átomos de la materia ordinaria presentan un núcleo formado por protones y neutrones, compuestos por tres quarks cada uno (un protón se compone de dos quarks arriba y uno abajo, y un neutrón de un quark arriba y dos abajo) y una nube de electrones. El resto de partículas fundamentales son más pesadas, y por lo tanto inestables (se desintegran en partículas ligeras), y su existencia está más relacionada con los laboratorios de física de partículas o con escenarios extremos, como el big bang.

El pegamento y el “despegamento”

Ahora que sabemos que, hilando

fino, nos componemos de la pareja de quarks arriba/ abajo y de electrones, falta la segunda parte: ¿qué es lo que los mantiene juntos o, de modo más general, cómo interactúan las partículas? Lo mejor (y lo peor) de este punto es que ni siquiera tienen que tocarse, sino que lo que hacen es intercambiar otro tipo de partículas conocidas como mediadoras, o bosones.

Aunque esto parezca poco intuitivo, disponemos de alguna analogía útil: pensemos en dos personas, cada una de pie sobre una barca, que se pasan un balón de baloncesto; si le echamos imaginación y hacemos el balón invisible, veremos los efectos del intercambio del balón (las barcas irían alejándose progresivamente). Ese balón sería la partícula mediadora que, en la naturaleza, se presenta en cuatro modalidades, o interacciones, distintas: la interacción electromagnética, la nuclear fuerte, la nuclear débil y la gravitatoria.

La primera, el electromagnetismo, es bastante familiar y provoca que las partículas con distinta carga se atraigan y las que tienen igual carga se repelan, y su partícula mediadora es el fotón. La interacción electromagnética es responsable de la unión estable de los átomos pero, ¿cómo?, si hemos visto que los átomos son neutros al equilibrar la carga negativa de los electrones y la positiva de los protones... Aquí ocurre otra cosa extraña, y muy afortunada: un electrón de un átomo puede interactuar con el protón de un átomo vecino y generar una unión que permite la formación de

moléculas y, por extensión, de “cosas”; por ejemplo, nuestro cuerpo se compone en su mayor parte de agua, una molécula resultante de la unión de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Así que podría decirse que existimos gracias a que los electrones y protones tienen cargas diferentes.

Pero habíamos mencionado que el núcleo del átomo se compone de protones y neutrones... Si los neutrones carecen de carga y los protones tienen carga positiva (por lo tanto, se repelen), ¿por qué los núcleos atómicos no se deshacen en pedazos? Aquí entra en juego la fuerza nuclear fuerte y su partícula mediadora, el gluón (del inglés “glue”, o pegamento). Esta fuerza es responsable de que los tres quarks que forman los protones y los neutrones se queden bien pegados y es capaz de contrarrestar la repulsión provocada por el electromagnetismo (por algo es la fuerza fuerte): los quarks de un protón sufren atracción por los quarks de otro, lo que vence la repulsión existente entre ambos protones.

La otra fuerza nuclear, la débil, es a la que debemos agradecer no tener

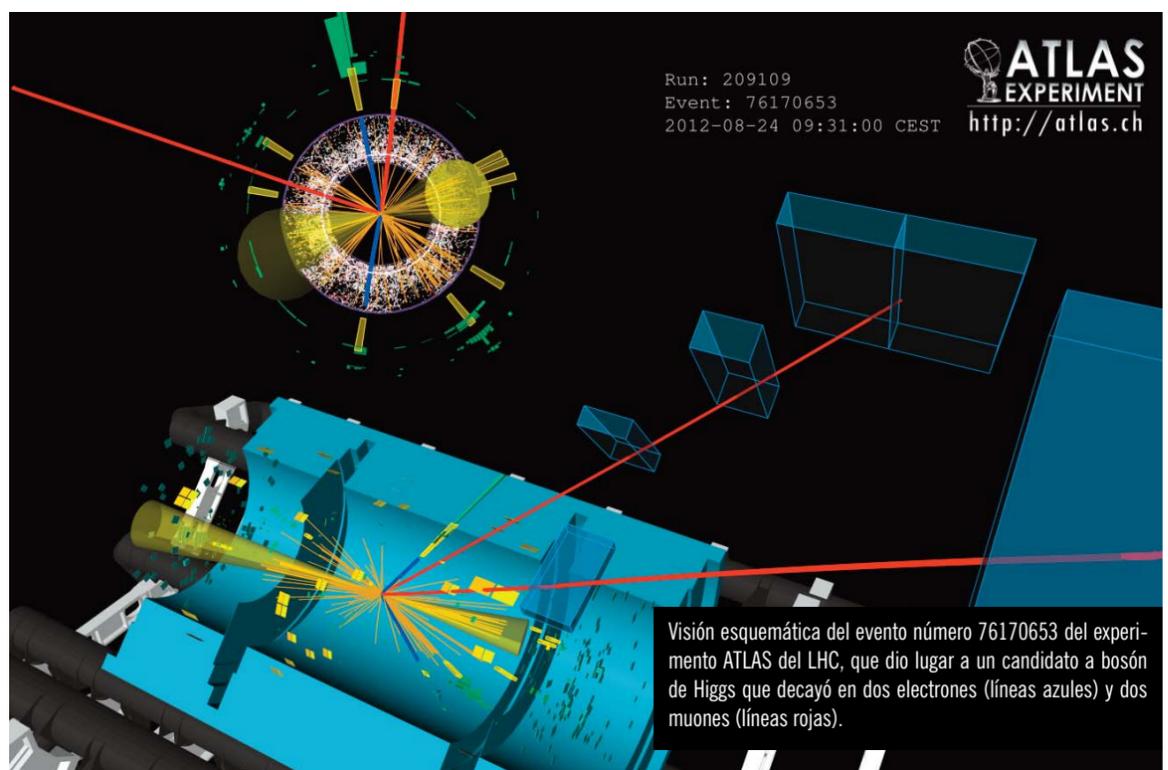
que aprendernos todas las combinaciones posibles de quarks y leptones, y quedarnos con la combinación de los más ligeros (el par arriba/debajo de quarks y el electrón). Las interacciones nucleares débiles provocan que los quarks y leptones masivos decaigan en otros más ligeros, en un proceso extraño: se observa desaparecer una partícula que es reemplazada por dos o más partículas distintas, y siempre más ligeras –de ahí que toda la materia ordinaria se componga del par arriba/abajo y de electrones, que no pueden decaer.

La última interacción, la gravedad, es la más familiar para nosotros porque hace que se caigan las cosas o la Tierra gire alrededor del Sol, pero presenta problemas al modelo estándar: los físicos no han hallado su partícula mediadora, el gravitón, y tampoco han conseguido integrarla en el modelo estándar, que sí agrupa con efectividad las otras tres interacciones (por suerte, los efectos de la gravedad en el zoo de partículas descrito son apenas perceptibles, de modo que el modelo estándar funciona sin explicarla).

El “pero” más grande

La formulación matemática de la interacción predice y explica el comportamiento de las partículas con gran fidelidad –incluso omitiendo la gravedad–, pero en principio exigía que ninguna de las partículas mediadoras tuviera masa. Y los experimentos indican que esto no es así porque, si bien los fotones y gluones carecen de masa, las mediadoras de la interacción nuclear débil, llamadas W^+ , W^- y Z , sí son masivas. Ahí es cuando se añadió un ingrediente más al Modelo Estándar, el bosón de Higgs: según el nuevo escenario, todas las partículas carecían de masa justo después del big bang pero, a medida que el universo se enfriaba, la interacción de este con el resto de partículas les aportó masa. Esta idea se ajustaba bien al modelo, pero para confirmarla había que encontrar el bosón de Higgs, cuya existencia fue puramente teórica hasta que, en 2012, los experimentos ATLAS y CMS del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) anunciaban el hallazgo de una nueva partícula con características compatibles con el esperado bosón.

Sin embargo, para determinar que se trata del bosón de Higgs que plantea el modelo estándar y no un tipo de partícula no predicha hace falta estudiarla más a fondo y esto exige tiempo y muchísimas colisiones entre partículas (se requiere en torno a un billón de colisiones protón-protón para obtener una detección del Higgs). Los últimos datos, publicados a finales del pasado año, apoyaban la tesis de que, en efecto, se trata del bosón de Higgs propuesto por el modelo estándar.



Visión esquemática del evento número 76170653 del experimento ATLAS del LHC, que dio lugar a un candidato a bosón de Higgs que decayó en dos electrones (líneas azules) y dos muones (líneas rojas).

La otra luz del cosmos

¿Qué son las ondas gravitatorias, qué objetos las emiten y qué información nos aportan?

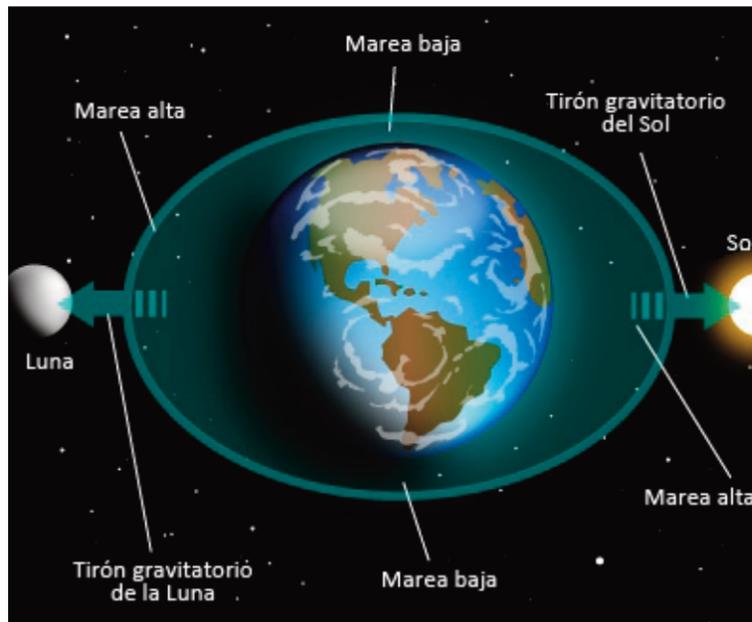
José Luis Jaramillo (*Institut de Mathématiques de Bourgogne, IMB*)

El 14 de septiembre de 2015, a las 9:50:45 tiempo universal, llegaba a la Tierra una señal emitida desde un distante lugar del universo hace unos mil millones de años. No hay un término en el lenguaje cotidiano para esta señal. No era luz, no era sonido. Sin embargo su existencia había sido predicha por Albert Einstein en torno a 1916, hace cien años, como consecuencia de su teoría de la Relatividad General. Esta teoría, que explica la gravedad en términos de la curvatura en la geometría del denominado espacio-tiempo, implica un nuevo tipo de radiación: las “ondas gravitatorias”. Tales ondas estarían llegando continuamente a la Tierra. Pero la onda del pasado 14 de septiembre fue muy especial: por primera vez había en la Tierra un instrumento listo para captarla. Con esta antena gravitatoria, denominada LIGO, abrimos unos nuevos ojos con los que mirar el cosmos.

La detección, bautizada como GW150914, no solo ofrece la primera confirmación directa de las ondas gravitatorias, sino que también se traduce en un espectacular descubrimiento astrofísico. Esta señal extremadamente débil y muy breve, con una duración de apenas 0.2 segundos, nos cuenta la historia de las últimas órbitas de un sistema formado por dos agujeros negros unas treinta veces más masivos que el Sol y su posterior fusión en un

único agujero negro. Su detección nos confirma que tales sistemas binarios se forman y pueden fusionar en un tiempo menor a la edad del universo. Esta mera observación tiene de por sí importantes repercusiones astrofísicas. Por otro lado, el magnífico acuerdo entre la señal recibida y el cálculo teórico en Relatividad General confirma aspectos críticos de nuestra comprensión fundamental de la gravedad en sus regímenes más violentos. Con profunda emoción podemos afirmar que GW150914 ha inaugurado la astronomía y astrofísica de ondas gravitatorias. Ahora sí, cien años después de la predicción de Einstein, contamos con una nueva ventana al universo.

Antes de comenzar nuestra exploración de las ondas gravitatorias, detengámonos un momento a considerar críticamente nuestro conocimiento actual sobre el universo. Casi todo lo que sabemos del cosmos lo hemos aprendido mediante el análisis de la luz que nos llega de él. Con mayor generalidad deberíamos referirnos a la observación de la radiación electromagnética, de la cual la luz visible es solo una parte. Y decimos “casi todo”, porque rayos cósmicos y neutrinos nos aportan también importantes claves. En cualquier caso nuestro modelo del universo más allá de la Tierra es, en buena medida, una imagen tallada con herramientas electro-



Visión esquemática de las mareas terrestres. Fuente: howstuffworks.com

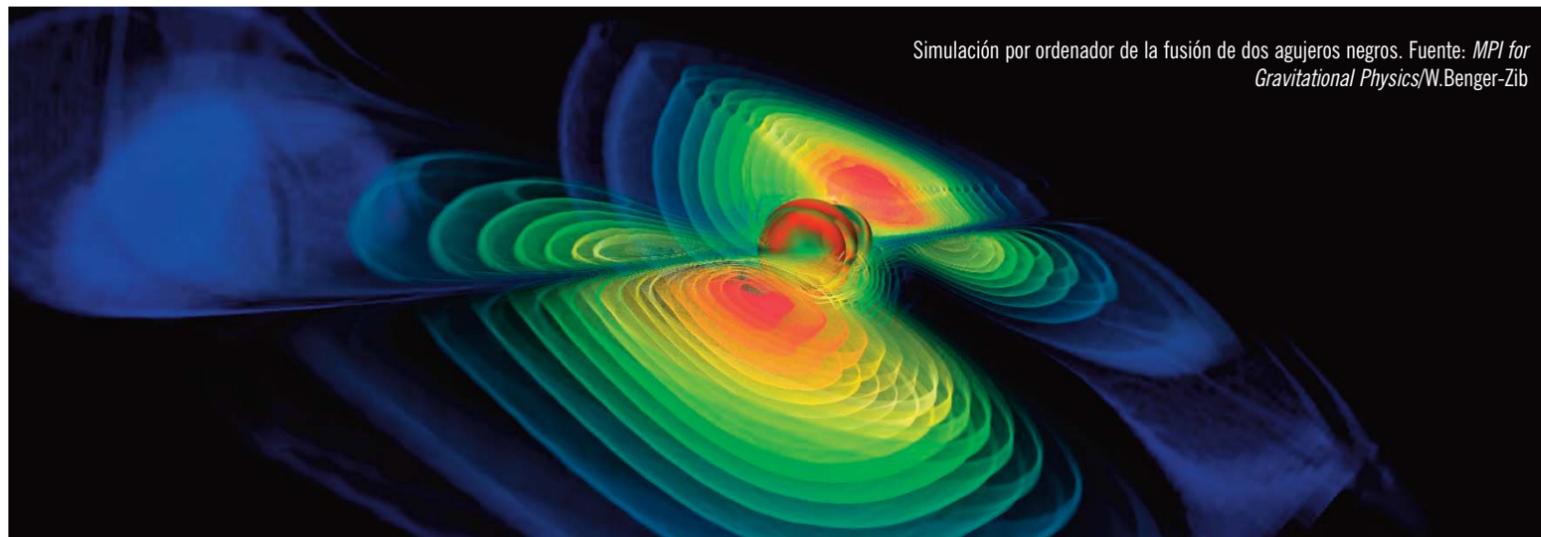
magnéticas. Un modelo muy rico, sin duda alguna. Pero quizá, por estar esencialmente construido a partir de estas proyecciones sobre nuestros muros de luces y sombras solo electromagnéticas, podría ser también un modelo sesgado. ¿Cómo saberlo? ¿Disponemos de alguna manera independiente para evaluar, y en su caso enriquecer, este modelo de génesis electromagnética? Como nos muestra la reciente detección GW150914 por la antena LIGO, la respuesta hoy es afirmativa: las ondas gravitatorias nos proporcionan lo que podemos considerar como otra luz con la que observar el cosmos, complementaria e independiente a la luz electromagnética.

En las líneas que siguen vamos a explorar la naturaleza y propiedades de esta otra luz gravitatoria, en un recorrido en bucle que comienza y acaba con esa luz que nos es más familiar, la electromagnética. En efecto, en su papel de ventana al cosmos, la luz electromagnética nos brinda una muy especial invitación al viaje. Un viaje que de hecho empezó con la observación del universo con el ojo desnudo y que, en etapas sucesivas marcadas por la apertura de nuevas ventanas en el espectro electromagnético (ondas de radio, infrarrojos, ultravioleta, rayos X, rayos gamma...) nos ha conducido hasta nuestra imagen actual de un universo dinámico, complejo, con mecanismos distintos a distintas esca-

las. Así, hemos aprendido que el universo presenta aspectos muy diferentes en las distintas longitudes de onda de la luz, de tal manera que la apertura de cada nueva ventana electromagnética nos ha deparado sistemáticamente sorpresas y nuevos retos. Motivados por esta visión cosmológica compleja que nos ofrece la radiación electromagnética, nuestro recorrido nos va a llevar hasta fenómenos astrofísicos muy violentos que, por su naturaleza, no pueden observarse con la luz electromagnética. Para su observación y estudio precisamos de esa otra luz: las ondas gravitatorias. Nuestro camino se articula en torno a tres preguntas: ¿Qué es esta otra luz? ¿Qué emite tales ondas? ¿Cómo podemos detectarlas? Por tanto en nuestro recorrido abordaremos cuestiones de física fundamental en torno a la naturaleza de las ondas gravitatorias (primera pregunta), exploraremos las líneas maestras de la naciente astrofísica y cosmología de ondas gravitatorias (segunda pregunta) y, por último, con la luz de un láser como ojos para esta luz gravitatoria (tercera pregunta) cerraremos el bucle de nuestro camino. Un recorrido desde la “luz para la observación” hasta la “luz para la medición-manipulación”, pasando por la otra luz de un cosmos por descubrir.

¿Qué son las ondas gravitatorias? Naturaleza fundamental de la radiación gravitatoria

En nuestra primera etapa indagamos en la naturaleza y propiedades físicas de esta otra luz. Casi todos tenemos una experiencia más o menos directa de las mareas en el mar, esa subida y bajada dos veces por día del nivel del agua en la costa. Para entender este fenómeno fundamental en el día a día de los que conviven con el mar, debemos salirnos de la Tierra y considerar nuestro primer sistema astrofísico del recorrido: el formado



Simulación por ordenador de la fusión de dos agujeros negros. Fuente: MPI for Gravitational Physics/W.Benger-Zib

por la Tierra, la Luna y el Sol. Los campos gravitatorios creados por la Luna y el Sol inducen deformaciones en la forma de la Tierra. Centrándonos en la Luna, cuyo efecto en las mareas es más importante que el del Sol, esta deformación de la Tierra se debe a que su parte más cercana a la Luna se ve atraída por esta con mayor fuerza que la parte más lejana. Esta diferencia en la intensidad de la atracción gravitatoria sobre extremos opuestos de la Tierra trata de deformar el globo terráqueo en un elipsoide. Por la naturaleza deformable de los fluidos, este efecto es mayor en los océanos que en los continentes, “abultando” la masa oceánica en dos direcciones opuestas pero fijas (para un día dado de un mes, esto es, dada una posición relativa de Tierra, Luna y Sol). Así, como consecuencia de la

rotación diaria de la Tierra en torno a su eje, nuestra costa favorita pasa dos veces al día por un máximo de la deformación oceánica y dos veces por un mínimo dando lugar, respectivamente, a las dos “mareas altas” y las dos “mareas bajas” diarias. De esta descripción de las mareas en la Tierra podemos extraer dos rasgos cualitativos, que son genéricos para cualquier sistema gravitatorio: primero, todo cuerpo masivo (la Luna y el Sol, en nuestro caso) crea un campo gravitatorio en su entorno cuya intensidad decrece con la distancia; segundo, dicho campo gravitatorio deforma los cuerpos extensos colocados en él (efecto de marea). Desde una perspectiva más cuantitativa subrayamos que, en primer lugar, la intensidad de las mareas (esto es, de las deformaciones gravitatorias) es proporcional

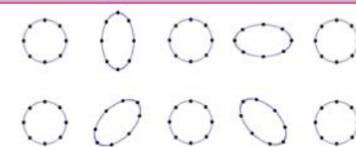
tanto a la masa del cuerpo que crea el campo gravitatorio (Luna/Sol) como al tamaño del cuerpo deformado (Tierra). Y en segundo lugar, la frecuencia con la que ocurren las mareas dobla la frecuencia del fenómeno periódico relevante (la rotación de la Tierra, en nuestro caso): esto es, tenemos dos mareas por día.

Las mareas que hemos considerado corresponden a una situación en la que los campos gravitatorios no cambian apreciablemente en el tiempo (cambian en un mes, pero no a lo largo de un día). En este punto nos preguntamos, ¿qué ocurriría con las mareas si el Sol y la Luna desaparecieran de pronto? O de una forma más precisa, ¿qué ocurre si la forma del cuerpo que crea el campo gravitatorio cambia muy rápidamente? Pues ocurren dos cosas. Por un lado,

la Tierra tarda un tiempo en enterarse: el cambio de forma del objeto se comunica primero al campo gravitatorio creado por el mismo y luego es la deformación del campo la que se propaga a una velocidad finita (de hecho, la velocidad de la luz) hasta llegar a la Tierra. Y lo segundo que ocurre es que, una vez que la Tierra es alcanzada por la deformación transmitida por el campo, su forma oscila en compresiones y estiramientos a un ritmo marcado por los cambios de forma originales de la Luna y el Sol. Tenemos, por tanto, una versión dinámica de las mareas tradicionales. Dotados de esta imagen mental, estamos en condiciones de introducir la noción de radiación gravitatoria: las ondas gravitatorias son campos gravitatorios que se propagan a velocidad finita a través del espacio, y que inducen oscilaciones en la forma de los objetos que se encuentran a su paso. En este punto es interesante considerar la analogía con la luz estándar. En efecto, un hito fundamental en la comprensión de la naturaleza de la luz lo constituyó su caracterización en términos de campos electromagnéticos en propagación, campos cuya dinámica está sometida a las ecuaciones de Maxwell. La analogía campo electromagnético-gravitatorio junto con sus correspondientes ondas es sugerente pero, a su vez, abre nuevas preguntas: ¿de qué está hecho este “campo gravitatorio” en propagación? ¿Y por qué viaja a la velocidad de la luz? ¿Transmite energía?... A un nivel fundamental la respuesta hay que buscarla en el contexto de la Relatividad General, que constituye nuestra actual teoría de la gravitación y que explica la gravedad como curvatura de la geometría del espacio-tiempo [ver recuadro de la izquierda]. Desde una perspectiva más pragmática, una manera sencilla pero adecuada de parafrasear la naturaleza de estas ondas gravitatorias haciendo uso de nuestra intuición sobre las mareas consiste en describirlas como mareas en propagación por el espacio y por el tiempo. La caracterización de la radiación gravitatoria en términos de mareas viajeras es especialmente apropiada para la descripción de los efectos de estas ondas sobre la materia. De manera específica, el efecto de la radiación gravitatoria sobre cuerpos extensos consiste en la generación de compresiones y estiramientos de los mismos en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la radiación.

CLAVES 1

Ondas gravitatorias: mareas en propagación



■ **Causas:** objetos de masa M cuya forma (momento cuadrupolar) cambia en el tiempo, a una “velocidad de variación de forma” v .

■ **Propagación:** velocidad finita c (velocidad de la luz).

■ **Efectos:** deformaciones oscilatorias en los cuerpos extensos que se encuentran a su paso.

■ **Intensidad de la deformación proporcional a:** a) Masa M y velocidad de variación de forma v del cuerpo emisor.

b) Tamaño L del objeto deformado (característico de las fuerzas de marea).

Frecuencia de las oscilaciones: doble de la frecuencia gravitatoria de la fuente.

$$\Delta L \approx L \left(\frac{v}{c} \right)^2 \left(\frac{GM}{rc^2} \right)$$

Estimación cuantitativa de la magnitud ΔL de estos estiramientos/compresiones, donde r es la distancia de dicha fuente, c es la velocidad de la luz y G es la constante de Newton de la gravedad.

ción. Tales compresiones/estiramientos se pueden describir siempre como la combinación de dos modos de oscilación independientes. Este es un nuevo punto de contacto con la luz (electromagnética), que también se puede descomponer en dos polarizaciones independientes.

¿Qué emite ondas gravitatorias? Astrofísica y cosmología de ondas gravitatorias

Hemos dicho que todo objeto con masa M cuya forma cambia en el tiempo a una velocidad típica v emite ondas gravitatorias. Nos surge entonces de forma natural la pregunta: ¿dónde están dichas ondas? ¿Por qué no oscilamos continuamente entre compresiones y estiramientos? Porque, ciertamente, tales oscilaciones no forman parte de nuestra experiencia cotidiana. Existe una buena razón para ello: la gravedad es una interacción extremadamente débil. Es cierto que la gravedad domina la dinámica de los cuerpos a gran escala, pero esto no se debe a su fuerza intrínseca sino al hecho de que, a diferencia de otras interacciones, la gravedad siempre es aditiva y no sufre apantallamientos. Para dar una idea aproximada de lo débil que es la gra-

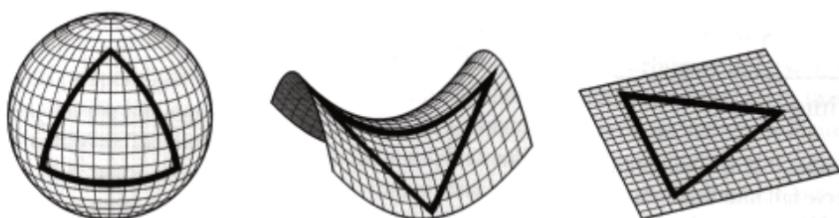
Cursillo acelerado de relatividad general

La Relatividad General explica la gravedad como curvatura de la geometría del espacio-tiempo. ¿Qué queremos decir con esto? Empecemos con la noción de curvatura. Si trazamos sobre la superficie plana de una mesa (con su largo y su ancho) dos líneas paralelas, comprobamos que tales líneas no se cortan y que de hecho su distancia relativa permanece constante. De hecho, eso es lo que queremos decir cuando nos referimos a una pizarra como plana. Si repetimos el ejercicio sobre un globo terráqueo y trazamos a partir de dos puntos en el ecuador sendas paralelas en dirección norte, comprobamos que los meridianos así definidos (y que son líneas paralelas sobre el globo) acaban por cortarse en el polo. Decimos que la superficie del globo terráqueo tiene curvatura (positiva). También concluimos que una superficie es curva si al trazar paralelas a través de dos puntos dados, dichas paralelas no se cortan y de hecho su distancia no se mantiene constante (curvatura negativa). Por tanto, la noción de curvatura nos es familiar a través del trazado de paralelas. Pasemos ahora de estas superficies espaciales, al espacio-tiempo. Para ello consideremos las posiciones a lo largo de una dimensión espacial “ x ” entre dos personas que flotan en el espacio. Y consideremos también el cambio de sus posiciones conforme pasa el tiempo “ t ”. El conjunto de posibles “posiciones y tiempos” (x,t) de cada persona flotante define una superficie, como lo hacían el “ancho y el largo” en la mesa o la “latitud y la longitud” en el globo terráqueo. Esta superficie abstracta de “posiciones y tiempos” es lo que denominamos espacio-tiempo. En ausencia de otras fuerzas, la Relatividad General describe el movimiento de las personas en caída libre como líneas paralelas en el espacio-tiempo. Pero sabemos que, como consecuencia de la gravedad, estas personas (estas líneas paralelas) se acabarán encon-

trando: en consonancia con nuestra discusión sobre la curvatura, la gravedad es por tanto equivalente a la existencia de curvatura en la geometría de la superficie espacio-temporal. A diferencia de la teoría de Newton, donde los cuerpos se atraen gravitatoriamente mediante fuerzas que se ejercen mutuamente, en Relatividad General tales fuerzas no existen y los cuerpos se acercan o se separan entre sí al recorrer sus caminos a través en una geometría curva.

De forma más general, la dinámica gravitacional se hilvana en un doble juego entre dos actores: materia y geometría del espacio-tiempo. Por un lado la materia, en concreto su distribución de masa y energía, determina la curvatura (esto es, la geometría) del espacio-tiempo. La manera precisa en que esto ocurre viene determinada por las ecuaciones de Einstein, análogo gravitatorio de las ecuaciones de Maxwell para la luz. En contrapartida, la geometría del espacio-tiempo determina el movimiento de la materia, independientemente de la naturaleza interna de los cuerpos materiales (principio de equivalencia). Es en este sentido preciso en el que hablamos de la Relatividad General como una teoría geométrica de la gravitación. En particular, sus efectos alcanzan a todo objeto dotado de energía, incluida la luz.

Por consiguiente, hablar de campo gravitatorio es tanto como hablar de curvatura del espacio-tiempo. Enunciado en el contexto de tal caracterización, las ondas gravitatorias consisten en oscilaciones de la curvatura del espacio-tiempo que se propagan a través del propio espacio-tiempo. Como imagen ilustradora (aunque no exenta de peligros), podríamos evocar las ondas en la superficie del agua que se propagan a lo largo de la propia superficie del agua.



vedad cuando se la compara con la fuerza electromagnética, podemos mencionar que la atracción gravitatoria entre un electrón y un protón es unas 10^{39} (un uno seguido de treinta y nueve ceros) veces más débil que su correspondiente atracción eléctrica debida a sus cargas de distinto signo. Este es un número fabuloso. Pero quizá resulte incluso más ilustrativo considerar que cuando un niño de cuatro años levanta un libro de la mesa, con la fuerza (electroquímica) de sus poderosos brazos de cuatro años le está ganando a TODA la Tierra tirando gravitatoriamente en dirección opuesta.

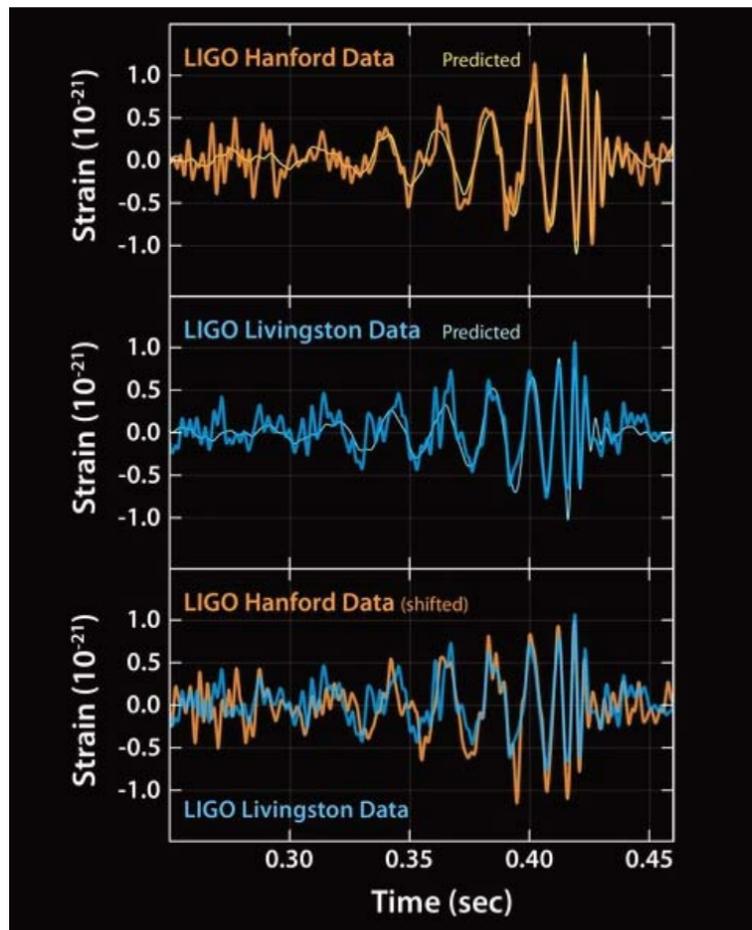
El débil carácter de la gravedad se traduce en un valor muy pequeño del factor numérico $GM/(rc^2)$: para una fuente típica de ondas gravitatorias (y en particular para la binaria de agujeros negros correspondiente a la detección GW150914) dicho factor es aproximadamente 10^{-21} . Este ya es un número muy pequeño. Para no hacerlo aún más pequeño y perder toda esperanza de ver estos estiramientos y compresiones debemos considerar fuentes de ondas gravitatorias con masas muy grandes (al menos del orden de la masa de una estrella) moviéndose a velocidades próximas a la de la luz. ¿Dónde podemos encontrar tales objetos fabulosos? No hay más

remedio que mirar fuera de la Tierra, al cosmos, lo cual nos lleva al nuevo campo de la astrofísica y cosmología de ondas gravitatorias.

Hemos dicho que hasta el 14 de septiembre de 2015 no habíamos observado estos estiramientos y compresiones debidos a fuerzas de marea viajeras y, asimismo, estamos señalando que el estudio de tales ondas gravitatorias requiere explorar lejanos y no siempre bien comprendidos sistemas astrofísicos. Resulta por tanto lícito cuestionarse por qué había tanta confianza en su existencia, más allá de constituir una sólida posibilidad teórica. La respuesta es: indirectamente sabíamos que estaban ahí. La confirmación proviene del estudio de la dinámica orbital de los denominados púlsares binarios. Estos sistemas están constituidos por dos estrellas de neutrones girando una alrededor de la otra, con la particularidad de que al menos una de ellas emite, como un faro, una señal de radio en la dirección de la Tierra. Este rasgo permite estudiar los movimientos del sistema con una enorme precisión, convirtiendo a los púlsares binarios en excelentes laboratorios de dinámica relativista. En particular, observamos que estas estrellas de neutrones caen muy lentamente en espiral una sobre la otra, lo cual nos indica que el sistema binario está perdiendo energía. La determinación precisa del ritmo de caída en espiral lleva una firma inequívoca: el sistema pierde energía por emisión de ondas gravitatorias. El descubrimiento, observación y análisis de ondas gravitatorias del púlsar binario PSR1913+16 valieron el premio Nobel en 1993 para Hulse y Taylor. Por tanto, sabíamos que las ondas gravitatorias están ahí...

Antes de hacer un breve repaso de las fuentes astrofísicas de ondas gravitatorias, debemos discutir brevemente una característica física fundamental de las mismas: su frecuencia. Esto es, el número de veces que la onda oscila por segundo (un hercio, o Hz, equivale a una oscilación por segundo). La frecuencia de una onda gravitatoria está directamente asociada al ritmo de oscilación del sistema gravitatorio que la genera. Como en el caso de las mareas de la Tierra, la frecuencia de la onda es el

Concepción artística de un sistema formado por un púlsar y una estrella enana blanca. La malla de fondo representa la distorsión del espacio-tiempo generada por ambos objetos. Fuente: Antoniadis et al.



Estas gráficas muestran la primera señal de ondas gravitatorias obtenida por los observatorios gemelos LIGO en Livingston (Louisiana) y Hanford (Washington). Los recuadros superiores muestran los datos recibidos y la predicción del tipo de ondas que, según las ecuaciones de Einstein, deberían producir dos agujeros negros en proceso de fusión. Como muestran las gráficas, los datos de LIGO se ajustan muy bien a las predicciones. El recuadro inferior compara la información de ambos detectores, lo que confirma que observaron el mismo fenómeno. Fuente: LIGO.

doble de la frecuencia del movimiento en la fuente que la produce. De forma muy general, podemos clasificar las fuentes gravitatorias en dos categorías: fuentes de alta frecuencia (de 1 a 10^4 Hz) o de baja frecuencia (de 10^{-4} a 1 Hz). Esta clasificación responde esencialmente a características de las “antenas gravitatorias” empleadas en cada caso, y no a rasgos fundamentales de los mecanismos físicos involucrados en las fuentes astrofísicas (por motivos de espacio, no discutimos aquí las fuentes de muy baja frecuencia, con una frecuencia en torno a los 10^{-9} Hz y cuya detección involucra la medición de oscilaciones en una red de púlsares usados a modo de precisos cronómetros astrofísicos). Es importante señalar que la frecuencia de cualquiera de estas fuentes gravitatorias es muy baja si se compara con la frecuencia típica de la radiación electromagnética (en torno a 10^{14} Hz para la luz visible). El origen de esta dramática diferencia radica en el hecho de que la radiación electromagnética está asociada típicamente al movimiento individual de partículas cargadas (electrones, iones...), que vibran y oscilan muy rápidamente. Por el contrario, las ondas gravitatorias son emitidas por grandes masas en movimiento coherente. Así, si consideramos como “baja” la frecuencia de

unos mil hercios correspondiente a las ondas emitidas por un sistema binario de estrellas de neutrones, debemos considerar que dicha frecuencia está asociada al movimiento de traslación orbital de un par de estrellas (cada una con unas tres veces la masa del Sol) que giran una en torno a la otra unas quinientas veces por segundo: ¡ciertamente, una velocidad fabulosa! En definitiva, lo interesante es destacar que ondas gravitatorias y electromagnéticas proporcionan información complementaria sobre los aspectos físicos y dinámicos de un sistema astrofísico. En particular, y respectivamente, sobre los movimientos a gran y a pequeña escala. Por último, repasamos algunas de las fuentes más importantes de ondas gravitatorias, lo cual nos va a permitir hacernos una idea más clara de los “paisajes” accesibles a través de esta nueva ventana al cosmos. Como primera fuente de ondas gravitatorias de alta frecuencia podemos señalar la caída en espiral, seguida de la fusión, de sistemas binarios formados por estrellas de neutrones y/o agujeros negros estelares (estos últimos con masas de unas decenas de veces la masa del Sol). Este es precisamente el tipo de fuente correspondiente a la primera detección de ondas gravitatorias. El sistema astrofísico que emitió

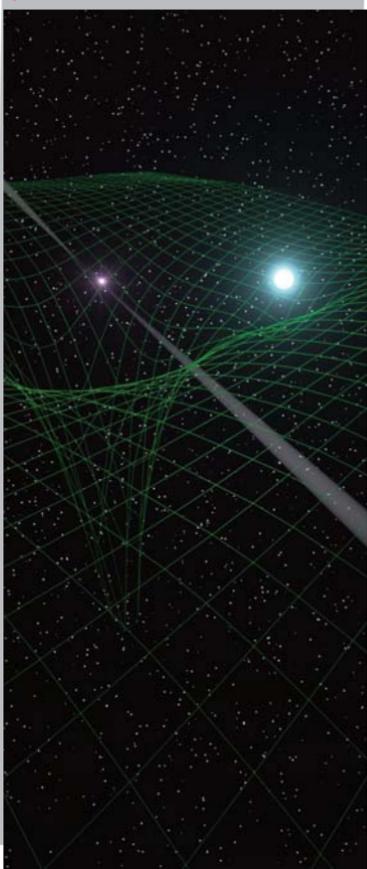
CLAVES 2

Astrofísica y cosmología de ondas gravitatorias

- Las ondas gravitatorias abren una nueva ventana en astrofísica, cualitativamente distinta a la ofrecida por las ondas electromagnéticas.
- Esta radiación codifica una información complementaria a la luz: nos habla del movimiento coherente de grandes masas.
- El universo es esencialmente transparente para ellas: nos traen información de zonas ocultas para la luz. En particular, ofrecen una herramienta única para estudiar agujeros negros.
- Tanto o más importante que la confirmación de las fuentes que esperamos encontrar, es el descubrimiento de nuevos mecanismos en sistemas astrofísicos que desconocemos: como nos ha enseñado el caso electromagnético... ¡deberíamos esperar sorpresas!

la señal GW150914 consistió en dos agujeros negros con treinta y seis y veintinueve masas solares respectivamente (ambos más masivos que cualquier agujero negro estelar conocido), girando extremadamente rápido el uno torno al otro hasta fusionar: ¡unas setenta y cinco órbitas por segundo en la fase orbital final, alcanzando una velocidad del 60% de la velocidad de la luz! Dadas las masas involucradas, las velocidades resultan fabulosas. El agujero negro resultante tiene sesenta y dos masas solares y las tres masas solares “perdidas” fueron transformadas en energía y emitidas en forma de ondas gravitatorias. Para dar una idea de la cantidad de energía liberada, si esta hubiera sido radiada en forma de luz su brillo observado en la Tierra habría sido comparable al de la Luna... ¡a pesar de la enorme distancia de unos mil millones de años luz! Sin duda, un evento astrofísico extremo y violento. Una segunda fuente de gran interés viene dada por el colapso gravitatorio de estrellas masivas que da lugar a supernovas e hipernovas. Estas fuentes son muy relevantes en el contexto de los estudios combinados con los denominados estallidos de rayos gamma. Asimismo, la rotación de estrellas de neutrones con “protuberancias” en su estructura constituye un eficaz emisor de radiación en esta banda de altas frecuencias. Estos sistemas nos permiten acceder al estudio de las propiedades de la materia en

Cuando un niño de cuatro años levanta un libro de la mesa, con la fuerza (electroquímica) de sus poderosos brazos le está ganando a TODA la Tierra tirando gravitatoriamente en dirección opuesta



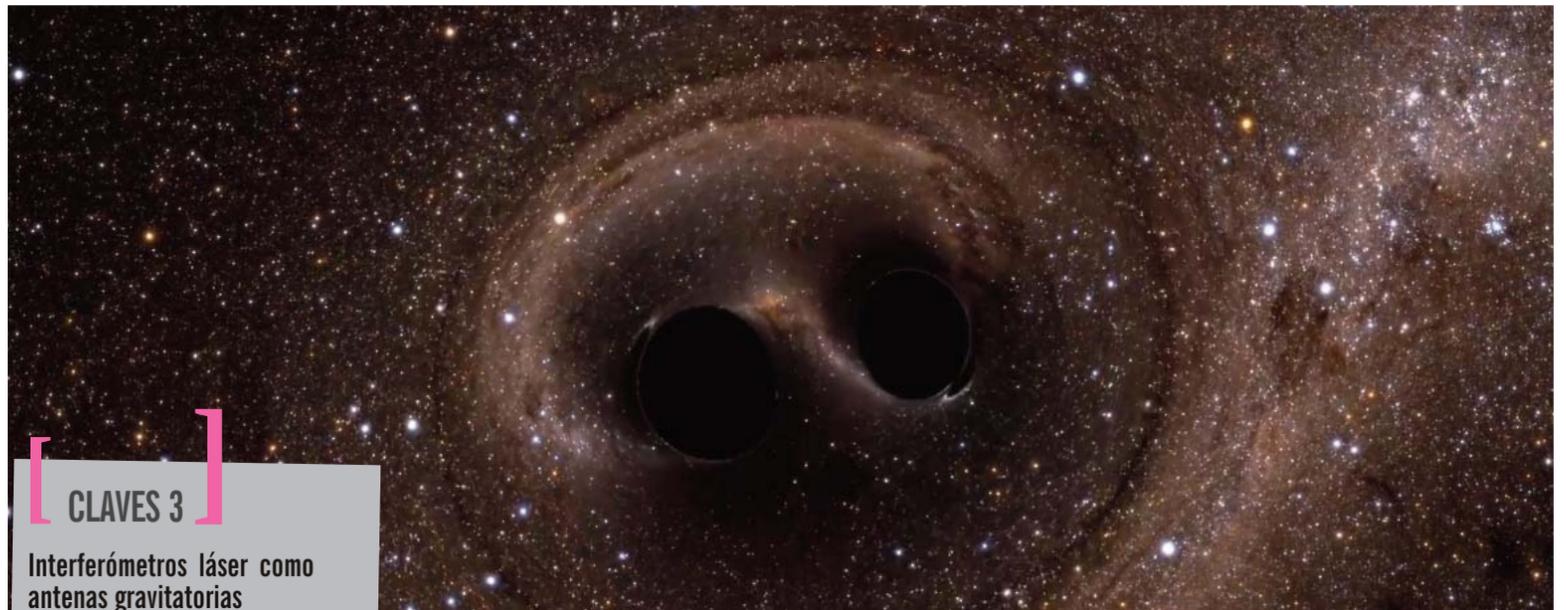
unas condiciones de presión y densidad que nunca podríamos alcanzar en la Tierra. Por último, al igual que existe un fondo de radiación de microondas asociado a la expansión del universo en el modelo de big bang, también existe un fondo de radiación gravitatoria fósil que codifica información cosmológica clave para comprender la formación de estructuras a gran escala en el universo. Como fuentes de baja frecuencia podemos señalar los sistemas binarios de enanas blancas en caída espiral. Algunos de estos sistemas, denominados binarias de verificación, proporcionan fuentes de ondas gravitatorias con contrapartidas electromagnéticas conocidas a priori, lo cual es muy importante para la calibración y comprobación de los detectores. Particularmente importantes por sus implicaciones cosmológicas y en física fundamental son las fuentes asociadas a agujeros supermasivos situados en núcleos galácticos. Tales fuentes incluyen tanto la fusión de agujeros negros en el seno de galaxias en colisión, como la caída de objetos de tipo estelar en estos agujeros negros supermasivos. Por último, también podemos extraer información cosmológica a partir de la radiación de fondo gravitatoria en esta banda de bajas frecuencias.

¿Cómo podemos detectarlas?

Interferómetros láser como antenas gravitatorias

Para detectar estas ondas gravitatorias debemos ser capaces de medir variaciones extremadamente pequeñas en distancias muy grandes. Como hemos comentado al discutir los efectos de estas fuerzas de marea viajeras sobre la materia, las variaciones de tamaño ΔL inducidas sobre un objeto de longitud L son del orden: $\Delta L / L \sim 10^{-21}$. Para hacernos una idea, esto significa que sobre una distancia de un kilómetro, debemos ser capaces de medir variaciones del tamaño ¡del núcleo de un átomo! Sin duda, todo un reto tecnológico....

Y en este punto cerramos el bucle de vuelta a la luz electromagnética, con la que empezamos nuestro recorrido. En concreto reencontramos la luz en una forma muy especial: la luz de un láser. Y jugando un papel diferente: si en la invitación al viaje la luz nos proporcionaba una ventana a la observación, ahora nos ofrece una herramienta de medición y manipulación. Durante las últimas décadas el reto de la detección de las ondas gravitatorias ha cons-



Simulación del proceso de fusión de dos agujeros negros. Fuente: Colaboración SXS.

CLAVES 3

Interferómetros láser como antenas gravitatorias

- Red de interferómetros en tierra actualmente en funcionamiento. Primera detección por *Advanced LIGO* el 14 de septiembre de 2015, representado ya una nueva ventana al universo.
- Formidable reto tecnológico en marcha: detectores interferométricos avanzados en funcionamiento y/o en desarrollo, tanto en tierra como en el espacio -*LISA Pathfinder* (e)*LISA*-.
- El desarrollo de las antenas interferométricas representa y exige un esfuerzo científico y tecnológico multidisciplinar que va desde la criogenia, la óptica y física de láseres, suspensiones y detectores en el espacio o técnicas especiales de análisis de datos y procesamiento de señales, pasando por supuesto por la modelización de las fuentes astrofísicas.

tituido un estímulo para el desarrollo de distintas técnicas muy sensibles de medición, que han culminado en la puesta en funcionamiento de un sistema de interferómetros láser como antenas gravitatorias. Estos interferómetros están constituidos por dos brazos perpendiculares de igual longitud, a lo largo de los que circula la luz de un láser. Cuando el plano formado por los dos brazos es atravesado por una onda gravitatoria, uno de los brazos se alarga y el otro se contrae como consecuencia de las fuerzas de marea (como la forma de la Tierra bajo las mareas). La luz del láser viajando en el interior de los brazos permite medir con gran precisión la variación relativa en la longitud de los mismos. Para esto resulta fundamental la faceta ondulatoria de la naturaleza de la luz, en concreto sus propiedades de interferencia. Esto es, la propiedad de que luz más luz puede dar lugar a luz, pero también a sombra.

La luz de un láser entra en el interferómetro, es dividida en dos haces cada uno de los cuales viaja por un brazo

(el viaje en el brazo se repite muchas veces, en lo que se denomina una cavidad resonante Fabry-Pérot). Finalmente los dos haces del láser se superponen dando lugar a un patrón de interferencia (luces y sombras) que nos permite determinar la diferencia en la longitud de los brazos. La gran precisión de la medida radica en la gran sensibilidad con que podemos evaluar el criterio cualitativo luz-no luz. Resulta apasionante el considerar que esta posibilidad de observar la radiación gravitatoria depende críticamente de las características fundamentales de la luz electromagnética, así como el contar con dos escalas en el problema de medición (en efecto, es un hecho afortunado para el esquema de medición el que la longitud de onda de un láser, unos mil micrómetros, resulte muy pequeña comparada con la de las ondas gravitatorias). En definitiva, para ver la otra luz necesitamos iluminarla con la luz de siempre, vestida en la forma especial de un láser.

El prototipo de los interferómetros láser en Tierra es *LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational Observatory*), construido en Estados Unidos y que cuenta con unos brazos de cuatro kilómetros. Para la detección de GW150914 ha sido crítica la reciente entrada en funcionamiento de una versión tecnológicamente mejorada, *Advanced LIGO*. En la actualidad existe una red de interferómetros distribuidos en distintos puntos de la Tierra: *LIGO* en Estados Unidos (dos instrumentos; uno en Hanford, Washington, y otro en Livingston, Louisiana), *Virgo* en Italia, *GEO600* en Alemania. Otros interferómetros, como *KAGRA* en Japón o *IndIGO* en India están en construcción o planificados. Debido a la limitada resolución angular de estas antenas interferométricas,

la existencia de una red global es fundamental para triangular la posición en el espacio de una fuente detectada. Estos interferómetros son sensibles a ondas gravitatorias con una frecuencia comprendida entre diez y diez mil hercios. Como hemos visto antes, esta banda de frecuencias nos ofrece la posibilidad de explorar la emisión gravitatoria procedente de supernovas, binarias estelares o estrellas de neutrones. Sin embargo, por debajo de los cuarenta hercios el ruido de origen sísmico representa una barrera para la medición de las pequeñas variaciones en la longitud de los brazos. Para acceder a frecuencias más bajas, lo cual es necesario para explorar la colisión de agujeros negros supermasivos, es necesario salir de la Tierra e ir al espacio. Este es el contexto del proyecto originalmente denominado *LISA* (*Laser Interferometer Space Antenna*), una antena interferométrica en

el espacio con unos brazos definidos por tres satélites orbitando con una separación de unos cinco millones de kilómetros y una sensibilidad en la banda de frecuencias entre 0.0001 y 0.1 hercios. Nuevamente, la precisión requerida para el control de los distintos elementos que componen la antena espacial representa un formidable reto tecnológico. En este sentido resulta crítico el reciente lanzamiento (diciembre de 2015) de la misión espacial *LISA Pathfinder*, con el objetivo de poner a prueba distintos elementos fundamentales para las futuras antenas gravitatorias espaciales. En definitiva, este es un momento intenso y emocionante en lo que se refiere a la aplicación de la interferometría láser a las antenas gravitatorias, con la detección de ondas gravitatorias por (*Advanced*) *LIGO* en tierra y los primeros pasos hacia la antenas en el espacio con *LISA Pathfinder*.

CLAVES 4

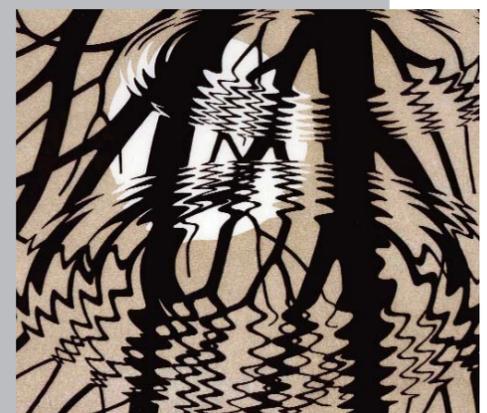
¿Con qué quedarnos tras este recorrido?

Aquí acaba un recorrido que nos ha llevado de la luz a la luz, pasando por la otra luz. Ha sido un trayecto amplio, denso y lleno de ventanas a nuevas ventanas. Por ello conviene, antes de finalizar el viaje, subrayar sus hitos fundamentales:

- Junto a las ondas electromagnéticas, existe otra luz, una radiación de naturaleza gravitatoria que podemos entender como mareas en propagación por el espacio.
- Este otro tipo de radiación, las ondas gravitatorias, representa una nueva herramienta para la investigación en astrofísica y cosmología.

- Los interferómetros láser proporcionan antenas gravitatorias en las que usamos luz para ver la otra luz.

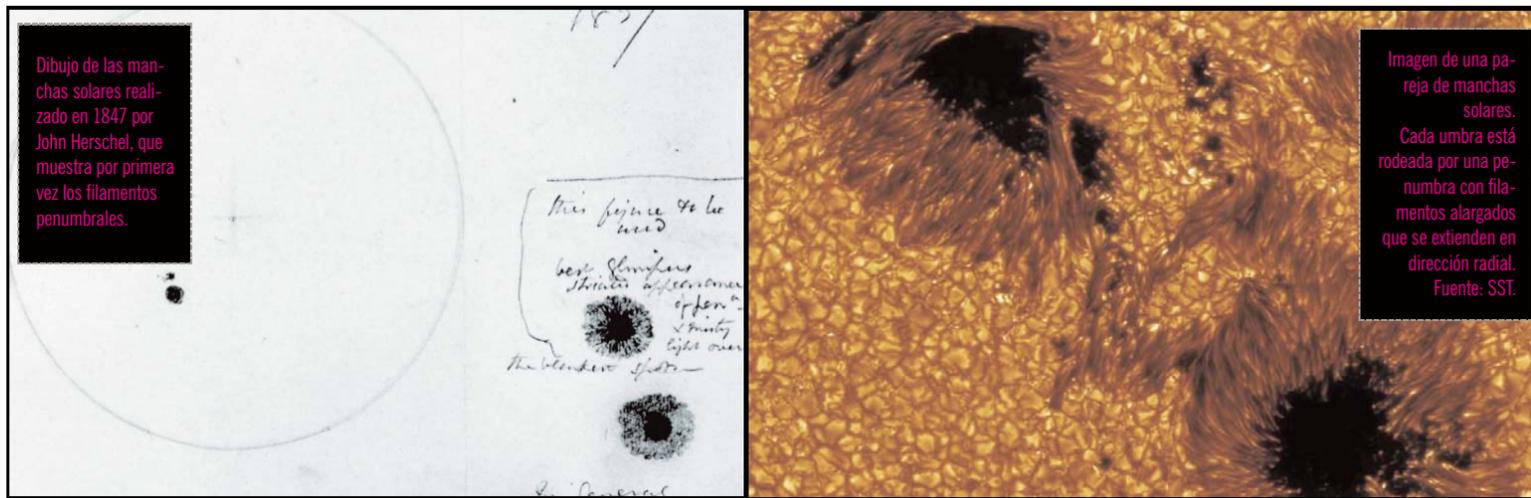
Como metáfora final del láser que nos permite ver las ondas gravitatorias producidas por las fuentes astrofísicas, sírvanos el reflejo de la Luna (láser) que ilumina las ondulaciones en el estanque (ondas gravitatorias en el espacio-tiempo) producidas por las gotas al caer de los árboles (sistema astrofísico).



Superficie ondulada, ilustración de M.C Escher.

Del dibujo a la cámara digital

Hubo un tiempo en el que los hallazgos astronómicos se comunicaban a través de libros o cartas, y en el que los astrónomos apuntaban a un objeto con su telescopio y dibujaban lo que veían. Comparamos estas icónicas imágenes con nuestra visión actual del universo



Dibujo de las manchas solares realizado en 1847 por John Herschel, que muestra por primera vez los filamentos penumbrales.

Imagen de una pareja de manchas solares. Cada umbra está rodeada por una penumbra con filamentos alargados que se extienden en dirección radial. Fuente: SST.

Las manchas solares

Las manchas solares son pequeñas motas oscuras que aparecen y desaparecen en la superficie del Sol. Algunas de ellas pueden verse a simple vista cuando el Sol se encuentra próximo al horizonte o detrás de nubes. Los chinos ya conocían su existencia en el siglo XXVIII a.C., y se cree que Averroes también las observó en el siglo XII d.C. Sin embargo, hubo que esperar a la invención del

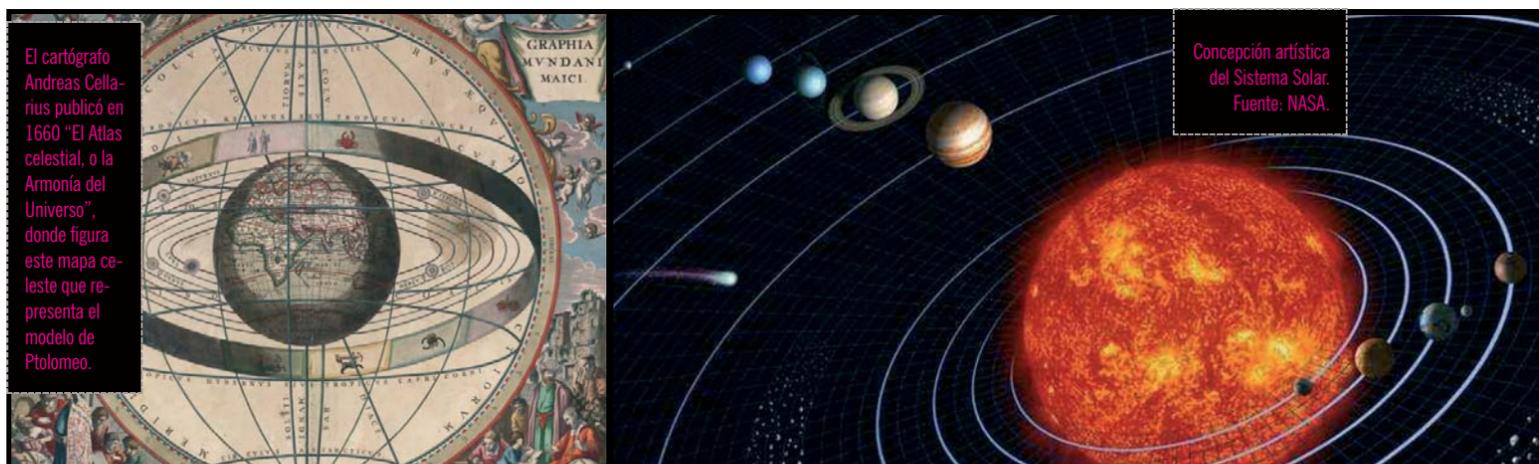
telescopio en 1609 para poder estudiarlas en detalle. Las primeras observaciones telescópicas de estos objetos fueron realizadas en 1610-1611 por Thomas Harriot, Johannes Fabricius, Galileo Galilei y Christoph Scheiner. Las manchas representaban “imperfecciones” en el astro rey, lo que contradecía la idea aristotélica de un universo perfecto. Ello generó un intenso debate filosófico y científico

sobre su origen, que algunos preferían situar en la atmósfera terrestre y no en el Sol. A través del telescopio, las manchas muestran una zona central muy oscura, llamada umbra, y una región externa algo más brillante, la penumbra. Sólo durante los cortos instantes de tiempo en los que la imagen permanecía inmóvil era posible distinguir la estructura filamentosa de la penumbra. Los

filamentos penumbrales tienen anchuras de entre 200 y 300 kilómetros, por lo que su observación resulta extremadamente difícil. William Herschel hijo realizó el primer dibujo de los filamentos en 1801. A pesar de todo, la naturaleza de las manchas y sus penumbras seguía siendo un misterio. En 1908, George E. Hale descubrió que las manchas están formadas por campos magnéticos muy intensos. A lo largo del siglo XX se idearon técnicas espectroscópicas y po-

larimétricas para medir dichos campos y los movimientos de gas asociados a ellos. Pero aún quedaba una batalla por ganar: mejorar la calidad de las observaciones eliminando la degradación que produce la atmósfera terrestre. Ello se consiguió a principios del siglo XXI de dos maneras distintas. Por un lado, yendo al espacio. Por otro, mediante ingeniosos sistemas de espejos deformables que compensan las distorsiones creadas por la turbulencia atmosférica. Gracias a estos sistemas, los telescopios solares pueden estudiar la penumbra con mayor detalle que nunca, sin tener que esperar horas y horas a que las condiciones sean favorables. Hoy sabemos que los filamentos penumbrales contienen los campos magnéticos más inclinados de las manchas. Sin embargo, al comparar las imágenes modernas con los primeros dibujos uno no deja de sorprenderse por la fidelidad con la que aquellos astrónomos representaron lo que veían, abriendo el camino para el estudio científico del magnetismo solar y su influencia sobre la Tierra.

Luis Bellot (IAA-CSIC)



El cartógrafo Andreas Cellarius publicó en 1660 “El Atlas celestial, o la Armonía del Universo”, donde figura este mapa celeste que representa el modelo de Ptolomeo.

Concepción artística del Sistema Solar. Fuente: NASA.

El movimiento de los astros

Un dibujo o imagen puede captar los rasgos de un objeto o composición de objetos, pero no sus movimientos. Para ello se necesita una nueva dimensión, el tiempo, o al menos un conjunto ordenado de imágenes tomadas a intervalos regulares de tiempo, una película. La anotación minuciosa de los cambios en las posiciones en el cielo del Sol, la Luna, los cinco planetas conocidos en aquellos tiempos y una

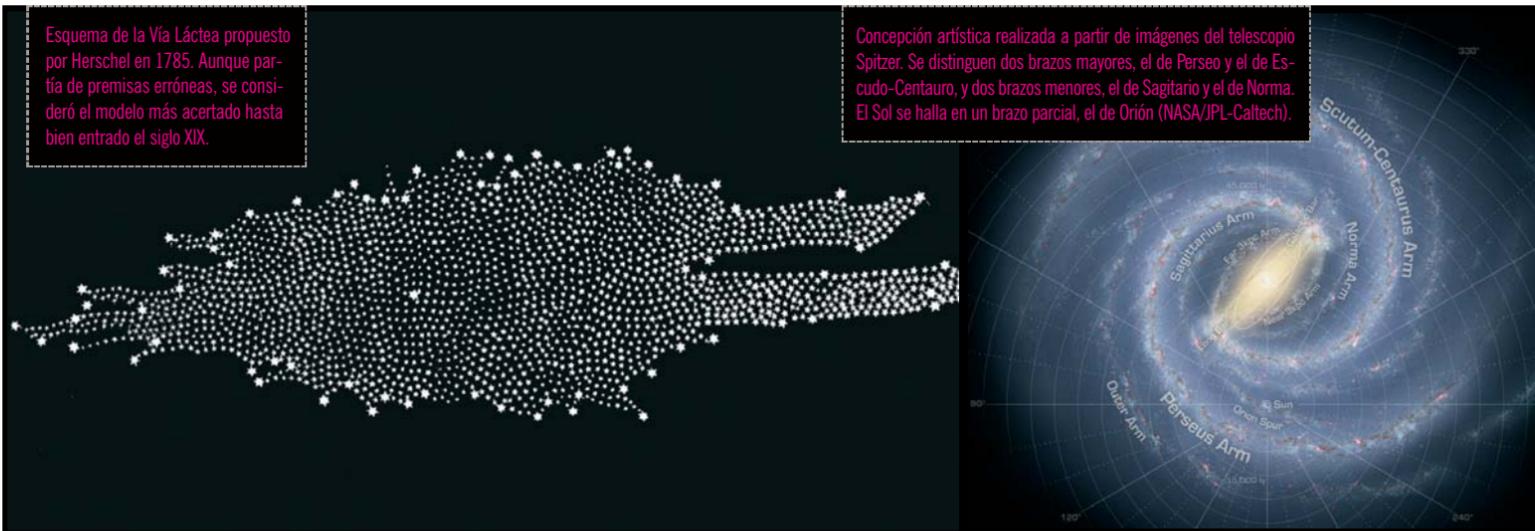
plétora de estrellas, llevó a los griegos a concebir el Universo como un conjunto de esferas concéntricas y epiciclos (circunferencias cuyos centros se sitúan encima de otras circunferencias) girando de forma regular alrededor de una Tierra estática en el centro de todo. Esta concepción del Universo, que se conoce actualmente como el modelo de Ptolomeo, es la que se representa en la imagen de

arriba a la izquierda. La regularidad en los movimientos del modelo de Ptolomeo permite que nos podamos hacer una idea del funcionamiento de este Universo con tan solo mirar una imagen: solamente hay que imaginarse la relojería en marcha. La revolución Copernicana en el medioevo cambió la forma en la que se concebía el Universo. El Sol pasaba a ocupar el centro (esta

idea ya había sido propuesta por Aristarco de Samos, contemporáneo de Ptolomeo, sin imponerse), se conservaba la circularidad de los elementos orbitales pero se eliminaban los epiciclos mayores. La Tierra pasaba a girar alrededor del Sol y de sí misma. Sin embargo, la regularidad en los movimientos se seguía manteniendo, por lo que una imagen seguía siendo suficiente para hacerse una idea de la relojería de la nueva concepción del Universo. Tras Kepler y Newton se concluyó que las trayectorias en el universo no eran tan simples

ni tan regulares. Las órbitas de los planetas alrededor del Sol no eran circulares sino elípticas, eso sin considerar los efectos de encuentros cercanos, y sus movimientos no eran regulares, sino que eran más rápidos en el perihelio que en el afelio (la zona de la órbita más cercana y más lejana al Sol respectivamente). La imagen de arriba a la derecha intenta representar la conceptualización newtoniana del universo. Una sola imagen aquí empieza a ser insuficiente para visualizar completamente la nueva maquinaria, y necesitaríamos recurrir a una o varias películas de las que circulan por Internet para acercarnos a una representación fidedigna. Más recientemente, la ya casi centenaria revolución relativista nos ha enseñado que los movimientos planetarios son aún más sofisticados. Las órbitas elípticas precesan (sus ejes giran en el espacio), los movimientos adquieren una pequeña ralentización en las cercanías solares, las órbitas espirales se hacen posibles. Ya no basta una imagen sin imaginación, estamos en el territorio de la cuarta dimensión.

Carlos Barceló (IAA-CSIC)



Esquema de la Vía Láctea propuesto por Herschel en 1785. Aunque partía de premisas erróneas, se consideró el modelo más acertado hasta bien entrado el siglo XIX.

Concepción artística realizada a partir de imágenes del telescopio Spitzer. Se distinguen dos brazos mayores, el de Perseo y el de Escudo-Centauro, y dos brazos menores, el de Sagitario y el de Norma. El Sol se halla en un brazo parcial, el de Orión (NASA/JPL-Caltech).

La Vía Láctea

¿Una estrella vista por un niño, un logo comercial, una ameba? La imagen superior podría admitir múltiples interpretaciones, pero su autor quiso representar el primer esquema de nuestra Galaxia obtenido por él mismo a través del conteo de estrellas en diferentes direcciones. Un dibujo que puede parecer ingenuo pero que engloba y resume el nivel científico y tecnológico del mundo occidental a finales del siglo XVIII. En 1781, Williams Frederick Herschel, un músico de Hannover devenido en astrónomo había alcanzado la gloria con el descubrimiento del planeta Urano. Su fama

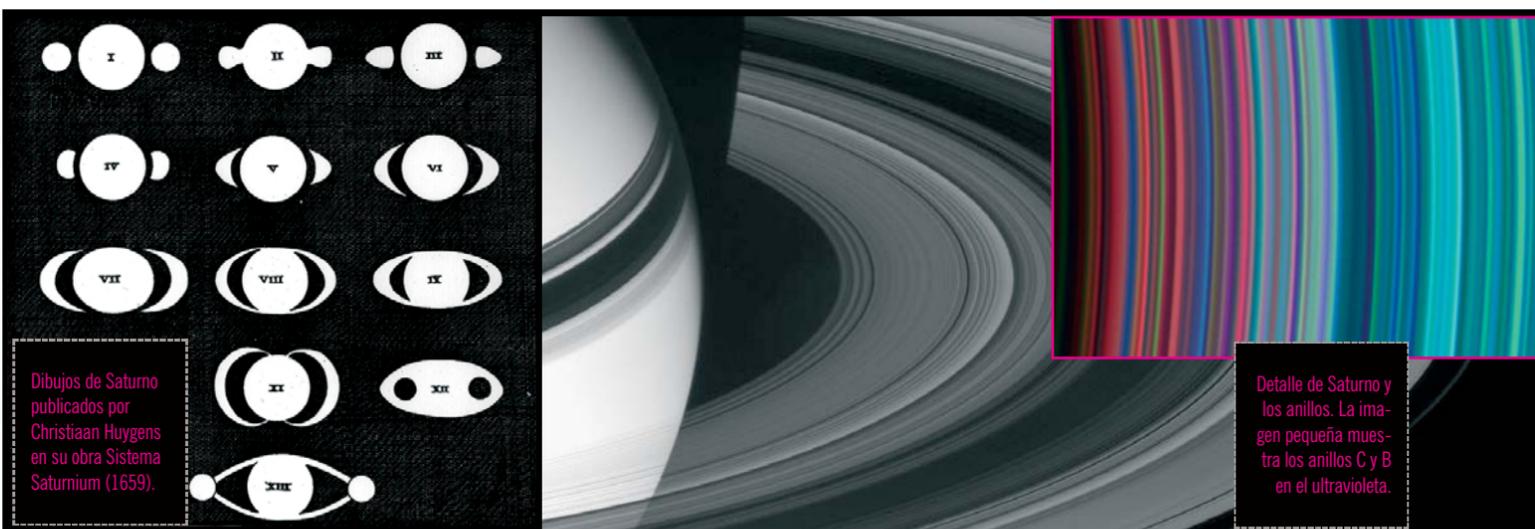
desbordó los márgenes del mundo académico para convertirlo en un héroe popular y su descubrimiento se debió principalmente a su habilidad y paciencia para pulir espejos con la adecuada precisión y a su disciplina y pasión por la observación astronómica. El telescopio con el que hizo este descubrimiento se convirtió en el instrumento más deseado por los observatorios europeos y dos ejemplares pueden todavía verse en la sede central del Observatorio Astronómico de Madrid, en el Parque del Retiro. Pero Herschel quería llegar más lejos y no cejó en su afán de pulir espejos más

grandes y de diseñar monturas capaces de apuntar sus telescopios con mayor facilidad, estabilidad y precisión. En 1783 terminó un telescopio reflector de 6,5 metros de focal y casi cincuenta centímetros de diámetro que representaba un hito en el diseño y construcción de la montura. Con él estableció un programa científico destinado a determinar la forma y tamaño del sistema estelar donde estamos inmersos. Su principal resultado es la figura que estamos comentando, publicada en 1785. La tarea de esbozar la forma y tamaño de cualquier estructura desde su interior y sin poder moverte por la misma es un problema casi detectivesco, de la misma naturaleza que el de la habitación cerrada.

¿Cómo se puede dibujar un plano de Londres si uno está plantado en Trafalgar Square?, ¿cuál es la dirección que debo tomar en un bosque para alcanzar su límite más cercano? La solución de estos problemas requiere hipótesis que constriñan el número de variables y permitan una solución al menos parcial. Herschel adoptó las siguientes: 1) las estrellas están distribuidas uniformemente, 2) todas tienen el mismo brillo intrínseco y 3) mi telescopio alcanza el borde del sistema. Con estas premisas, el número de estrellas observadas en una determinada dirección es proporcional al cubo de la distancia a la frontera de nuestra Galaxia. Hoy sabemos que estas hipótesis están

equivocadas, pero lo más inquietante es que Herschel lo supo desde 1789, cuando construyó un nuevo telescopio que penetró más profundamente. Así supo que anteriormente no había alcanzado las fronteras de la Galaxia y que las estrellas se arraciman en cúmulos con mayor frecuencia que la permitida por su primera hipótesis. Sin embargo este esquema fue reproducido en algunos libros como el mejor modelo de nuestra Galaxia hasta bien entrado el siglo XIX. La imagen que vemos sobre estas líneas constituye nuestra mejor visión actual de la estructura espacial de la Vía Láctea. Dos hechos, a mi entender, han conformado el éxito en la determinación de este esquema: a) desde 1923 sabemos que existen otros sistemas estelares de tamaño similar al nuestro que están situados a enormes distancias y de los que tenemos cada vez mejores imágenes; es decir, podemos vernos representados en la foto de los primos y b) desde 1982 hemos abandonado el enfoque de obtener la función de distribución estelar desde dentro, a partir del conteo de estrellas, por la más exitosa aproximación de fijar un modelo matemático de la distribución estelar, basado en la observación de galaxias lejanas, donde el conteo estelar sólo nos fija el valor de los parámetros que mejor lo ajustan.

Emilio J. Alfaro (IAA-CSIC)



Dibujos de Saturno publicados por Christiaan Huygens en su obra *Sistema Saturnium* (1659).

Detalle de Saturno y los anillos. La imagen pequeña muestra los anillos C y B en el ultravioleta.

Los anillos de Saturno

Los anillos planetarios constituyen una característica común a todos los planetas exteriores del Sistema Solar, si bien los de Saturno son los más espectaculares, por sus dimensiones y por su complejidad. Fue Galileo, en 1610, el primero en apuntar su telescopio a Saturno y, aunque no llegó a reconocer los anillos como tales por la baja calidad óptica del telescopio, afirmó que "el planeta Saturno no está solo, sino que está compuesto por tres cuerpos que casi se tocan". Dado que Saturno tiene el eje de rotación inclinado respecto a su plano orbital (unos 27°) y que su periodo orbital es de unos treinta años, la Tie-

rra cruza el plano de los anillos cada quince años, circunstancia en la que los anillos prácticamente desaparecen para el observador geocéntrico. Curiosamente, en 1612 se produjo uno de esos eventos y Galileo, sorprendido, se preguntó: "¿Ha devorado Saturno a sus hijos?", en clara referencia al dios Saturno de la mitología romana. En 1655, Cristian Huygens observó Saturno con su propio telescopio y fue el primero en indicar que lo que vio Galileo era en realidad un "anillo delgado, que en ningún punto toca al planeta e inclinado respecto a la eclíptica", interpretando correctamente las diferentes fases, e indi-

cando que cada catorce o quince años la Tierra pasa por el plano del anillo. Huygens consideraba el anillo como una estructura sólida, lo que intrigaba a los astrónomos de la época porque con las leyes de la Mecánica resultaba muy complicado mantener estable esa estructura. Pocos años después, Jean Chapelain propuso que el anillo era en realidad una colección de minúsculos cuerpos rotando alrededor de Saturno. Nadie prestó atención a estos argumentos (excepto Cassini, que descubrió que el anillo era en realidad una colección de anillos) hasta que, doscientos años después, Maxwell demostró matemática-

mente que la estabilidad del sistema de anillos sólo podía explicarse por la presencia de una gran cantidad de partículas que no interaccionan. Hoy sabemos que, en efecto, los anillos están formados por una distribución de "partículas" con tamaños comprendidos entre un centímetro y diez metros. Las observaciones desde el espacio (misiones Voyager y Cassini) han mostrado la presencia de innumerables divisiones o vacíos entre los anillos que se deben a las perturbaciones gravitatorias de los numerosos satélites. Estas perturbaciones pueden deberse, entre otras razones, a resonancias orbitales (los periodos orbitales de un satélite y las partículas en una división pueden expresarse

como una fracción de números enteros), como es el caso de Mimas y la división de Cassini. La presencia de las llamadas "lunas pastoras" permite la existencia de pequeños anillos, como es el caso de los satélites Prometeo y Pandora y el anillo "F". La composición de las partículas de los anillos es esencialmente de hielo de agua, por lo que las antiguas teorías que atribuían el origen de los anillos a restos de la sub-nebulosa de Saturno han sido descartadas, ya que implicarían una composición muy diferente, esencialmente de silicatos. Aunque aún no está claro, parece ser que la edad del sistema de anillos podría ser compatible con la etapa del "Bombardeo Masivo Tardío" (Late Heavy Bombardment, LHB), que ocurrió en el Sistema Solar aproximadamente hace unos cuatro mil millones de años y posiblemente se originó por la migración hacia fuera de los Planetas Exteriores -la conocemos por la abundancia de cráteres en la Luna correspondientes a ese periodo. Este LHB podría haber ocasionado el paso de gran cantidad de cometas por las cercanías de Saturno que podrían haber sido destruidos por las fuerzas de marea del planeta o por colisión con algún satélite con corteza helada, y cuyos restos han quedado atrapados por la acción gravitatoria del planeta y forman los anillos.

Fernando Moreno (IAA-CSIC)

Esos maravillosos libros

Reunimos una serie de recomendaciones y valoraciones de libros de divulgación científica

Agujeros negros y tiempo curvo:

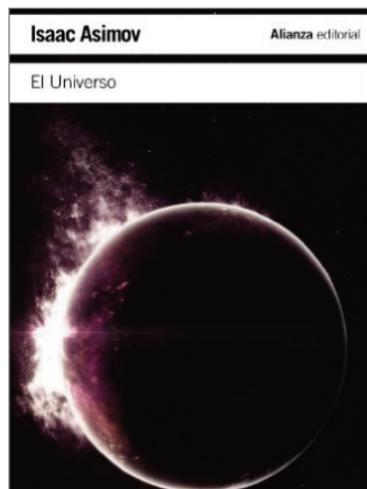
El escandaloso legado de Albert Einstein [Kip S. Thorne] Crítica

Una excelente descripción de la teoría de la relatividad, escrita desde una perspectiva histórica por uno de los protagonistas que más y mejor han contribuido a la comprensión de los agujeros negros y la búsqueda de las ondas gravitacionales, veinte años antes de que estas hayan sido finalmente detectadas. [E. Pérez Montero, IAA]

El universo. De la Tierra plana a los cuásares

[Isaac Asimov] Alianza Editorial

Aunque carezca de una descripción de los últimos descubrimientos en astronomía, este libro, escrito por uno de los mejores divulgadores y escritores del siglo XX, ofrece una descripción racional del proceso histórico de adquisición del lugar del ser humano en el universo. [Enrique Pérez Montero, IAA]



Una breve historia de casi todo

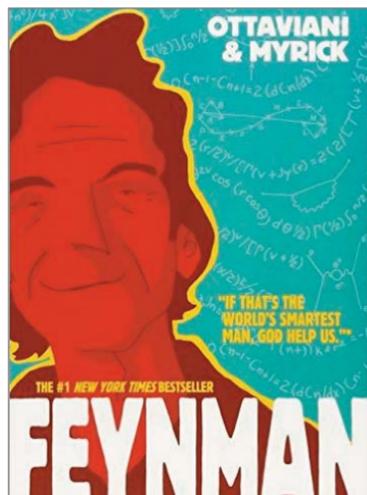
[Bill Brison] RBA

Un libro imprescindible, ameno y fácilmente comprensible, para aquellos amantes de la ciencia en todas sus ramas que están interesados en el origen y el proceso de comprensión de las ideas que han cambiado nuestra comprensión de la naturaleza. [E. Pérez Montero, IAA]

Feynman

[Jim Ottaviani y Leland Myrick] Norma Editorial

Hay libros cuyo protagonista es más importante que la historia que pretenden contar, y esto, aunque suene paradójico, ocurre incluso con los libros de divulgación científica. Es casi seguro que tras la lectura de "Feynman" sigas sin entender en qué consiste la cromodinámica cuántica, pero esto tampoco importa mucho. El verdadero objeto de divulgación de este libro es su protagonista. Y te fascinará.



Richard Feynman (1918-1988) es uno de los más grandes físicos teóricos de todos los tiempos, premio Nobel en 1965 por sus contribuciones a la electrodinámica cuántica. Pero Feynman es también un personaje único y este cómic puede ser una excelente manera de conocerlo. Su extraordinaria inteligencia, su experiencia con la bomba nuclear, su obsesión por abrir cajas fuertes, su amor por la educación y los bongos o sus relaciones personales y familiares son algunos de los capítulos de su vida que recoge este cómic. Con la justa medida entre idolatría y mitificación descubrirás un personaje enamorado de la vida, de la ciencia y de las mujeres, sin que quede muy claro su orden de predilección.

[Emilio J. García, IAA]

Orígenes: El universo, la vida, los humanos

[Carlos Briones, Alberto Fernández Soto, José María Bermúdez de Castro] Crítica

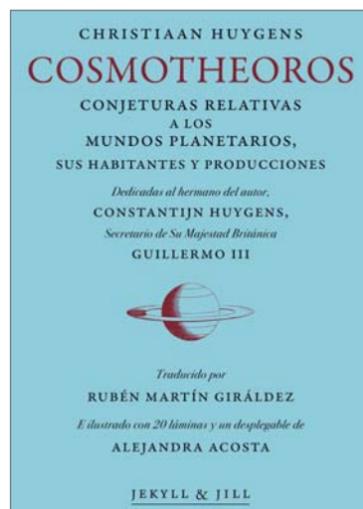
Esta obra aborda en profundidad tres de las preguntas más fascinantes que la ciencia actual tiene planteadas: el origen del universo, la emergencia de la vida y la aparición de nuestra especie. La investigación sobre estos tres orígenes no sólo alcanza las fronteras del conocimiento científico sino que lo trasciende e involucra a otros campos de la cultura y el pensamiento. En este libro, marcadamente interdisciplinar, cada parte ha sido escrita por un experto en el origen correspondiente: un cosmólogo, un bioquímico y un paleoantropólogo.

Cosmotheoros

[Christiaan Huygens] Jekyll & Jill

Cosmotheoros (*el observador de las estrellas*) es el primer tratado que conjetura la vida extraterrestre desde un punto de vista científico, basándose en las teorías de otros pensadores como Giordano Bruno, Kepler, Tycho Brahe o Descartes.

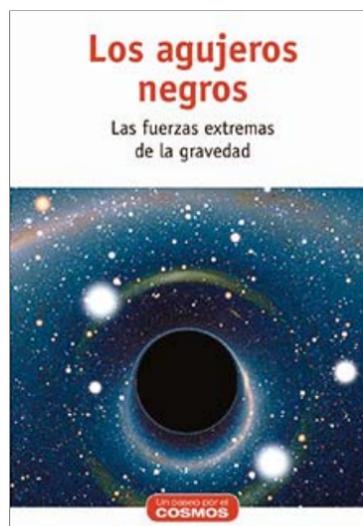
Esta edición de Cosmotheoros cuenta con ilustraciones de los posibles seres extraterrestres realizadas por Alejandra Acosta.



Un paseo por el cosmos

[colección, diversos autores] RBA

Esta colección hace un recorrido exhaustivo por las teorías más audaces de la astrofísica, la física de partículas y la astronomía. Un paseo por el Cosmos es un proyecto tan ambicioso como riguroso y ameno. Una obra editorial de gran capacidad divulgativa, que pone al alcance de un público no especializado la ciencia más avanzada sirviéndose para ello de textos claros, un amplio abanico de imágenes, infografías espectaculares y dibujos detallados.



Sexo en la Tierra

[Jules Howard] Alianza editorial

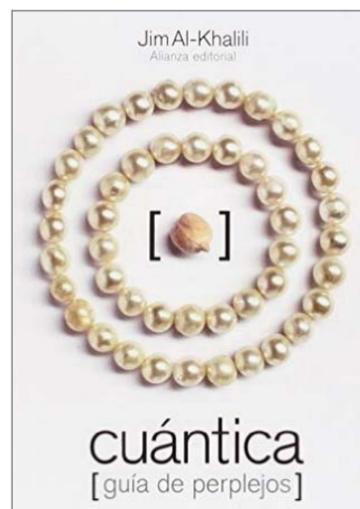
Algunas luciérnagas macho prefieren aparearse con farolas. Los bracitos del Tyrannosaurus rex servían para sujetarse durante la cópula. Todo esto es cierto. Y también bonito. «Sexo en la Tierra» nos explica, más allá de interesantísimas curiosidades, todo lo que quisimos saber sobre el sexo (animal). Y lo hace con la mirada empática, reflexiva, graciosa y tierna del buen zoólogo, del escritor lúcido y de la persona curiosa.



Cuántica: guía de perplejos

[Jim Al-Khalili] Alianza editorial

La divulgación de la física cuántica ha padecido décadas de tradición nefasta, y conseguir un texto coherente e interesante que supere por completo esa tradición constituye un logro digno de aplauso. Buena parte de las explicaciones de Al-Khalili se dedican a demoler, con gran paciencia y notable éxito, los prejuicios y concepciones erróneas sembrados por décadas de malas prácticas. La mayoría de los textos divulgativos sobre cuántica, y parte de los libros académicos, exponen la materia siguiendo un enfoque historicista. Esto lleva al público por todo el camino de suposiciones semi-clásicas y errores de concepto recorridos por quienes iniciaron



esta ciencia. De esta manera se siembran y refuerzan trampas conceptuales que luego son muy difíciles de extirpar. Esto no quiere decir que Al-Khalili evite la historia, pero los contenidos históricos no forman la columna vertebral de su discurso. Durante décadas se ha dedicado mucha tinta a destacar los aspectos más estrambóticos, increíbles y extraños de la física cuántica, hasta el punto de que se ha llegado a publicar algún libro sobre cuántica con el subtítulo

«¿Existe el mundo?». La mistificación y la falta de claridad han alcanzado extremos inverosímiles que llegan a la cumbre con la combinación de física cuántica y filosofía oriental (véase El tao de la física o, en tiempos más recientes, el documental What the bleep we know?, difundido en castellano con el título ¿Y tú qué sabes!?). Al-Khalili no rehúye los aspectos conflictivos o anti-intuitivos de la cuántica, pero los coloca en el contexto de esa ciencia en su conjunto, de manera que quienes cultivan esta disciplina no quedan como una pandilla de gente mística y chiflada que aplica en su trabajo una lógica descabellada, sino que logra que se entienda qué hay de racional (casi todo) y qué hay de inexplicable (el resto) en una disciplina respetable, lógica, seria y en avance permanente.

De no menos importancia es el esfuerzo de Al-Khalili por destacar las aplicaciones prácticas, en la vida cotidiana, de la cuántica. Y como en el caso de la historia, para nada el autor elude los aspectos filosóficamente conflictivos de la física cuántica, como las teorías de pluralidad de mundos o el multiverso, o las teorías de vanguardia como las supercuerdas o las Teorías del Todo. Pero lo hace con racionalidad, escepticismo y sentido del humor. [David Galadí, CAHA]

Carl Sagan: una vida en el cosmos

[William Poundstone] Akal

Veinte incomprensibles años después del fallecimiento de Carl Sagan, por fin está disponible la versión en castellano de su biografía elaborada por William Poundstone. *Carl Sagan: una vida en el cosmos*, constituye una biografía personal y científica del que es sin duda el astrónomo contemporáneo más conocido. Probablemente el científico más famoso después de Einstein, Sagan ha ejercido una influencia enorme sobre multitud de personas en todo el mundo a través de sus obras de divulgación científica. La biografía preparada por Poundstone ofrece una síntesis cualificada de la producción científica y divulgativa de este personaje, y además recopila toda una serie de datos personales y vitales que sin duda serán de gran interés para todas las personas que admiran a Sagan.

Esta biografía está exquisitamente documentada, basada en una investigación seria de la obra de Sagan y de la bibliografía relacionada, así como en entrevistas a fondo con las personas más relevantes en la vida del personaje, desde sus esposas e hijos hasta sus

amigos y enemigos en lo político y lo científico. Cada dato factual relevante se acompaña con la cita de la fuente de información en un impresionante cuerpo de notas al pie. La selección bibliográfica final es muy acertada y sin duda resultará de gran utilidad al público, tanto para quienes ya conozcan bien la obra de Sagan como para quienes solo hayan leído de manera ocasional alguno de sus libros. El índice alfabético es riguroso, detalladísimo e imprescindible.

Manteniendo un respeto exquisito, Poundstone ofrece toda la información significativa incluyendo las virtudes y los vicios, los valores y los defectos, las heroicidades y las miserias del Sagan científico, del Sagan esposo, del Sagan padre, del Sagan drogado, del Sagan alucinado... Se incluyen síntesis divulgativas de la ciencia que hizo Sagan, y se repasa la totalidad de sus trabajos de divulgación, en cada caso aportando una síntesis e información interesante sobre el contexto en que fueron concebidos y las reacciones que suscitaron en el entorno científico y editorial del momento. La biografía recoge también la trayectoria personal de Sagan, bosquejando desde las relaciones con sus padres hasta su actitud ante la muerte, pasando por sus venturas y desventuras matrimoniales, los avatares de su ambición académica y las conexiones de Sagan con otros personajes famosos, como Asimov, Arthur C. Clarke o Steven Spielberg. Poundstone ha preparado una obra que transmite con vigor la pasión por la columna vertebral de la trayectoria científica y divulgativa de Sagan: la búsqueda de vida extraterrestre. [David Galadí, CAHA]

Neurociencia para Julia [Xurxo Mariño] Ed. Laetoli

"El sistema nervioso — escribe el autor — es la esencia de tu ser. Lo estás utilizando ahora mismo para poder ver, leer y comprender este texto; algo que haces con naturalidad y sin esfuerzo, pero que esconde detrás toda una sinfonía de señales que viajan de unas células a otras, de sustancias químicas que interaccionan entre sí, de circuitos que se activan dentro de tu cabeza como si fuera un panel luminoso chisporroteante y lleno de luz. El sistema nervioso es la máquina que crea lo que eres, de ella surge tu mente consciente y ella da forma a tus emociones y recuerdos. Todas las mañanas, cuando te despiertas, miles de millones de células dentro de tu cráneo producen una actividad eléctrica y química que da lugar a tu mente, a tu yo".

Colección Divulgación [varios autores] CSIC/Catarata

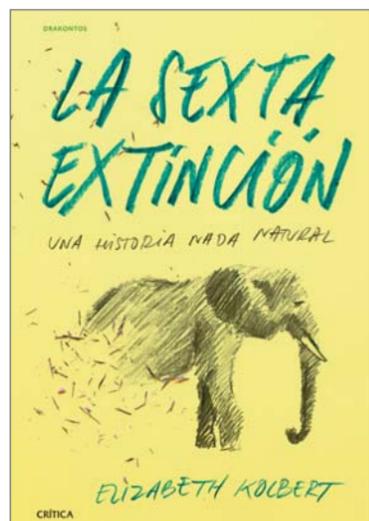
Los libros de esta colección responden a la demanda de información de los ciudadanos sobre los temas que más les afectan: salud, medio ambiente, transformaciones tecnoló-

gicas y sociales, etc. Cada volumen, elaborado por un equipo de especialistas en la materia, está coordinado por un investigador del CSIC.



La sexta extinción [Elizabeth Kolbert] Crítica

Kolbert explora cómo la actividad humana, el consumo de combustibles fósiles, la acidificación de los océanos, la contaminación, la deforestación y las migraciones forzadas amenazan contra formas de vida de todo tipo. "Se estima que un tercio de todos los corales que forman arrecifes, un tercio de todos los moluscos de aguas dulces, un tercio de los tiburones y las rayas, un cuarto de todos los mamíferos, un quinto de todos los reptiles y un sexto de todas las aves están cayendo en el olvido", escribe Kolbert. "Las pérdidas se están produciendo en todas partes: en el Pacífico Sur y en el Atlántico Norte, en el Ártico y el Sahel, en lagos e islas en la cima de las montañas y en los valles".

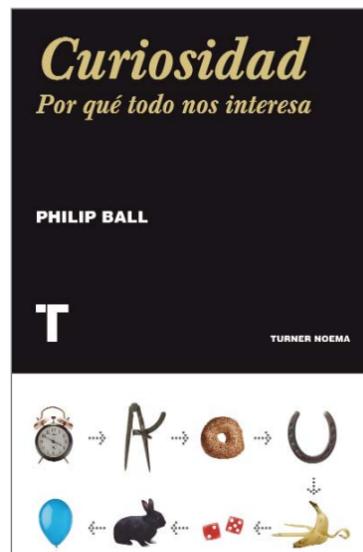


Curiosidad. Por qué todo nos interesa [Philip Ball] Turner

No es fácil frenar la curiosidad humana. Llevados por ella, hoy nos gastamos fortunas en construir un acelerador de partículas que nos permita "ver" el instante de la creación, o en mandar robots a planetas lejanos, y todavía hay quien le da vueltas a la idea de la piedra filosofal.

Este libro constituye una gran biografía coral de los químicos, astrónomos, físicos y demás científicos que rompieron barreras, que metieron la nariz donde nadie había osado meterla antes y que dieron paso a la ciencia moderna. Magia, religión, literatura, viajes, comercio e imperialismo se mezclan en un relato apasionante, que invita al lector a un

viaje que no olvidará nunca: el gran tour por la historia de la curiosidad.



¿Qué pasaría si...? Respuestas serias y científicas a todo tipo de preguntas absurdas [Randall Munroe] Aguilar

¿Qué pasaría si...? es un libro de divulgación científica en el que se recopilan algunos de los mejores posts así como otros nuevos elaborados a partir de las preguntas del blog de Randall Munroe, en el que responde a los lectores haciendo uso de sus conocimientos científicos y matemáticos. Munroe fue físico en la NASA antes de crear la web www.xkcd, una de las webs más populares de divulgación científica. Este es un libro original, inteligente y con mucho humor.

El Siglo de la Ciencia [José Manuel Sánchez Ron] Taurus

No resulta pretencioso considerar el siglo XX como el siglo de la ciencia. Es sin duda el siglo de la física, con la aparición de la figura grandiosa de Einstein y el nacimiento de la teoría de la Relatividad General, con el desarrollo de la física cuántica capaz de explicar el comportamiento microscópico de la materia, con los grandes aceleradores de partículas y los avances espectaculares en la física de altas energías. Es también el siglo de la biología molecular, que está íntimamente ligada a los descubrimientos médicos y las mejoras de las condiciones de vida. El autor hace un relato histórico, científicamente muy riguroso, de todos estos avances y lo hace en forma paralela a la evolución de la sociedad y a las circunstancias históricas y bélicas del siglo. Un ensayo apasionante y abierto al futuro. Como bien indica el autor, probablemente los conocimientos científicos y su imbricación en la sociedad explotarán a lo largo del siglo XXI. [Antxon Alberdi, IAA]

Este libro le hará más inteligente [John Brockman, ed] Paidós

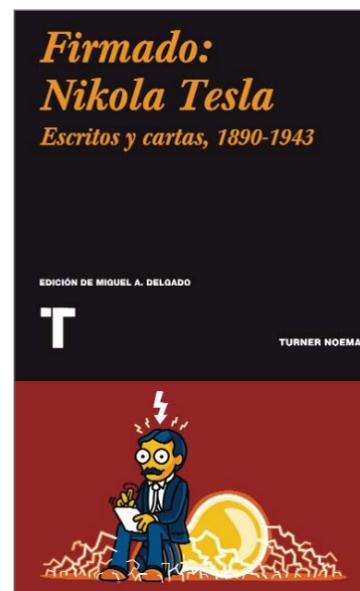
¿Qué concepto científico nos ayudaría a mejorar nuestras capacidades cognitivas? Esta es la pregunta que John Brockman, editor de la web edge.org, propuso a los pensadores

más influyentes del mundo. Sus visionarias respuestas transitan por las fronteras de la psicología, la filosofía, la economía, la física, la sociología... Sorprendentes e ilustradoras, las aportaciones de estos pensadores revolucionarán la manera en la que pensamos sobre nosotros mismos y sobre el mundo. Daniel Kahneman, Richard Dawkins, Martin Seligman, Daniel Dennett, Steven Pinker, Daniel Goleman, Matt Ridley y J. Craig Venter, entre otros, nos proporcionan en este texto un conjunto de ideas brillantes—y accesibles—que nos permitirán expandir nuestra mente y contribuirán a facilitar nuestra vida cotidiana.

Firmado: Nikola Tesla [Nikola Tesla. Prólogo de Miguel A. Delgado] Turner

La figura de Nikola Tesla aglutina una serie de rasgos que la hacen irresistible: poseía el ingenio, la inteligencia y el tesón de un hombre de ciencia, pero también una sensibilidad para las artes fuera de lo común entre su gremio. A esto se suma una capacidad de trabajo sobrehumana, el idealismo de alguien capaz de renunciar a sumas millonarias por ver sus proyectos hechos realidad y ciertas manías y obsesiones —el número tres, el celibato, la higiene...— que le aportan un aire excéntrico y más interesante, si cabe.

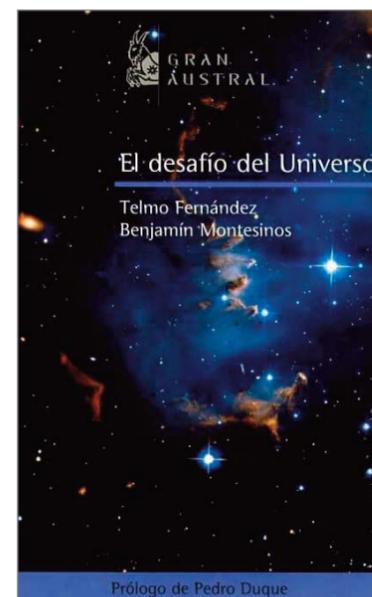
Este es el tercer libro que publica Turner sobre la figura de Nikola Tesla y que complementa las dos ediciones anteriores: *Nikola Tesla. El genio al que le robaron la luz* de Margaret Cheney, y *Yo y la energía*, de Nikola Tesla. Una selección de cartas y artículos, algunos de ellos inéditos, escritos por el propio Tesla que nos ofrecen una mirada más personal sobre el personaje.



El desafío del Universo [Telmo Fernández y Benjamín Montesinos] Gran Austral

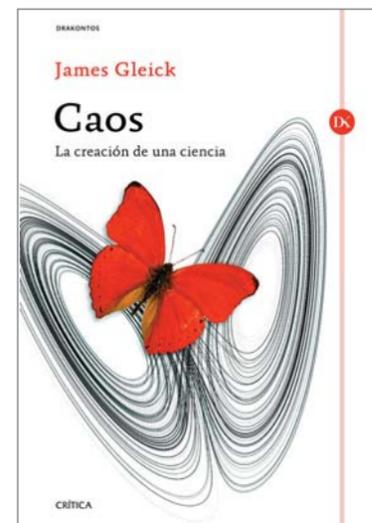
Los autores realizan un repaso de los conceptos fundamentales de la astronomía mediante un paseo a lo largo de su historia, desde la edad de piedra hasta el siglo XXI. Todos los principios de la astronomía se explican a partir de los desafíos a los que se ha

enfrentado el hombre: se narra con gran precisión y de forma muy entretenida cómo se conoció que la Tierra es redonda o que gira alrededor del Sol, o el movimiento de los planetas, para llegar al final del libro a explicar la Relatividad General de Einstein como la deformación del espacio-tiempo o incluso sugerir la existencia de viajes en el tiempo. Es, sin duda, un libro muy recomendable para iniciarse en el mundo de la astronomía, riguroso y sencillo al mismo tiempo. [Antxon Alberdi, IAA]



Caos. La creación de una ciencia [James Gleick] Crítica

En los años ochenta físicos, biólogos, astrónomos y economistas crearon un modo de comprender la complejidad en la naturaleza. La nueva ciencia, llamada caos, ofrece un método para ver orden donde antes sólo se observaba azar e irregularidad, traspasando las disciplinas científicas tradicionales y enlazando especies inconexas de desorden, desde la turbulencia del tiempo atmosférico a los complicados ritmos del corazón humano, desde el diseño de los copos de nieve a los torbellinos arenosos del desierto. A pesar de surgir de una ardua actividad matemática, el caos es un saber del mundo cotidiano: cómo se forman las nubes, por qué se eleva el humo o cuál es la razón de que el agua se arremoline en los ríos. Caos —ya un clásico de la divulgación científica— es el relato de una idea que espantó y embrujó a los científicos que se dedicaron a comprobarla.



Historia de la ciencia [Carlos Solís y Manuel Sellés] Crítica

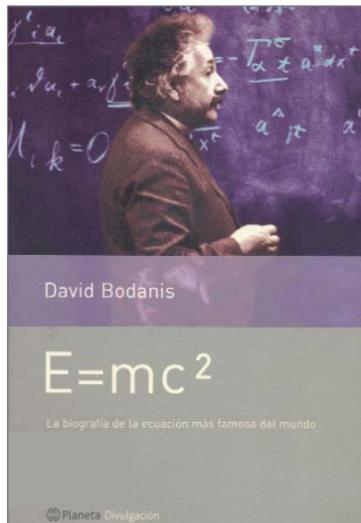
Como el título indica, lo que los autores han realizado un estudio muy exhaustivo de la historia de la ciencia teniendo en cuenta que es una invención humana que se ha ido desarrollando en distintos contextos históricos, políticos o religiosos. Y no terminará de desarrollarse mientras la imaginación creadora del ser humano no se agote. El libro analiza el desarrollo temporal de las distintas ramas de la ciencia, de las instituciones que la realizaron, incluso del modo en que se financió. Se trata de un libro para lectores con conocimientos científicos globales, ofrece una perspectiva de la ciencia desde el punto de vista de dos historiadores. [Antxon Alberdi, IAA]

E = mc². La biografía de la ecuación más famosa de Einstein

[David Bodanis] Planeta

Tengo mala memoria, lo sé. Para los que somos así un libro, tan solo unos meses después de ser leído, no aparece en el recuerdo como una historia con planteamiento, desarrollo y desenlace, sino como un sentimiento, una sensación o una palabra. Del que ahora

comento, basta dar un dato: a pesar de que lo leí hace casi diez años, cuando me propusieron escribir alguna reseña sobre libros de divulgación científica, este fue el primero que me vino a la mente. ¿Cuál es la diferencia con tantos otros libros o páginas web que parten de la famosa expresión de Einstein? Pues la diferencia está en el subtítulo: «La biografía de la ecuación más famosa de Einstein». Y es que David Bodanis plantea su libro como una disección de la célebre fórmula, para analizar cada uno de sus elementos, buceando en su significado, su simbología e incluso su historia. De este análisis sintáctico no queda fuera ni siquiera el signo igual de la ecuación. Acostumbrados como estamos a verlo a todas horas, nos es tan familiar que no nos planteamos por qué es como es, pero hay una razón por la que se representa con dos rayitas paralelas. ¿Cuál? No me acuerdo, por supuesto. Pero más allá del significado y contenido físico de la ecuación, el libro está salpicado de referencias históricas, algunas de las cuales podrían haber tenido sorprendentes consecuencias en el mundo moderno. Casi todos hemos oído, por ejemplo, que al final de la segunda guerra mundial los nazis estuvie-



ron a punto de tener operativa la bomba atómica antes que los americanos, y no hay que ser Spielberg para imaginar las implicaciones que se habrían derivado de ello. Lo que no es tan conocido es que el principal problema con el que se toparon no fue, como podría imaginarse, conseguir uranio o plutonio o desarrollar un sistema para enriquecerlo, sino el agua pesada que se usaba como refrigerante. Ni que estuvieran a un tris de conseguir toda la que necesitaban, pero sus instalaciones cerca de un lago noruego fueron saboteadas in extremis por un comando aliado. Esta es solo una de

las historias que Bodanis cuenta en este apasionante libro, que sirve como muestra del tono ameno y dinámico que ha conseguido imprimirle. [Miguel Abril, IAA]

Física de lo imposible [Michio Kaku] Debate

La palabra que define este libro podría ser 'sorprendente'. Porque «Física de lo imposible» realiza, en cierto modo, el camino inverso que recorren las películas de ciencia-ficción. Si ellas nos transportan de nuestra realidad mundana a universos inventados, Michio Kaku lleva las tecnologías más sorprendentes que hemos visto o leído en infinidad de historias a la realidad de los laboratorios científicos e institutos tecnológicos. ¿Prohíben las leyes de la física que consigamos esas capacidades que más de uno hemos deseado, como la telepatía, la invisibilidad o la telequinesis? ¿Están realmente fuera del alcance de nuestra tecnología esas pocholadas con las que todo friki ha soñado alguna vez, como los sables láser, los escudos de fuerza o las máquinas para viajar en el tiempo? Para responder a estas preguntas, Michio Kaku, con un entu-

siasmo contagioso, empieza clasificando las imposibilidades en tres niveles. Las de clase I serían aquellas tecnologías imposibles de realizar en la actualidad, pero que no violan las leyes de la física que conocemos. Las de clase II se situarían en el límite de nuestra comprensión del mundo físico, pero tal vez serían realizables en un futuro a largo plazo. Las de tipo III violarían las leyes de la física conocida, y serían las únicas presuntamente irrealizables, o implicarían un cambio radical en nuestra comprensión de la naturaleza. Tras esta clasificación vertebradora, Kaku dedica cada capítulo a una de esas capacidades o tecnologías aparentemente imposibles, con una breve introducción de los mitos asociados a ellas a lo largo de la historia y un posterior análisis más exhaustivo del estado actual y las investigaciones científicas que se están desarrollando en ese campo. Al final del capítulo clasifica la tecnología descrita dentro de una de las tres categorías presentadas en la introducción. Y, si sus clasificaciones son correctas, estad preparados para los próximos años, porque van a ser sorprendentes. [Miguel Abril, IAA]

PROGRAMACIÓN CARPA DE LA CIENCIA (Fuente de las Granadas)

ORGANIZAN: INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA Y PARQUE DE LAS CIENCIAS

Con la colaboración de "Hablando de ciencia"

SÁBADO 23 DE ABRIL

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
13:15	SESIÓN "MATEMÁTICA DEMENTE" Matemática en el país de las maravillas – Clara Grima (Univ. Sevilla) La divulgación interminable – Enrique F. Borja (Univ. Sevilla)
17:30	TALLERES Y PLANETARIO
19:00	Ciencia en el Bar – Daniel Guirado <i>Espectáculo de amor y humor por la ciencia desde la barra del bar. No hay más ciego que el que no quiere saber.</i>
20:00	SESIÓN "MARTE" Marte: emisiones de metano, agua y noticias - Miguel Ángel López Valverde & Ana Tamayo (Instituto de Astrofísica de Andalucía IAA-CSIC).

MARTES 26 DE ABRIL

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
17:30	TALLERES Y PLANETARIO
19:00	Taller "El Universo en tus manos" – Enrique Pérez Montero (IAA-CSIC) <i>Experimenta cómo se puede observar el cielo sin necesidad de usar los ojos. Toca la bóveda celeste con un taller que te enseñará cómo mirar el cielo con las manos.</i>
20:00	SESIÓN "OSCURIDAD" La Astronomía, ¿una ciencia visual? – Enrique Pérez Montero (IAA-CSIC) Agujeros Negros: observando lo invisible – Antxon Alberdi (IAA-CSIC)

VIERNES 29 DE ABRIL

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
17:30	TALLERES Y PLANETARIO
19:00	SESIÓN "RADIO CIENTÍFICA" <i>Evento en el que se mezclará radio y ciencia, con entrevistas a investigadores y divulgadores científicos.</i>
20:00	SESIÓN "EL LADRÓN DE CEREBROS" Robando cerebros – Pere Estupinyà. <i>Charla-coloquio y presentación del libro "El ladrón de cerebros. El ladrón de cerebros contraataca" (Debate).</i>

DOMINGO 24 DE ABRIL

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
13:15	SESIÓN "CIENCIA ANIMADA" Ciencia y Zoología en el Universo Spiderman – Oscar Huertas (EEZ-CSIC) & Carlos Lobato (IES La Campiña de Arahál)
17:30	TALLERES Y PLANETARIO
19:00	Preste atención a la física, 007 – Arturo Quirantes (Univ. de Granada) <i>Física para todos los públicos en Star Trek, en los cómics de superhéroes o en las aventuras de James Bond, entre otros muchos ejemplos.</i>
20:00	SESIÓN "MEMORIA Y OLVIDO" Memoria y Alzheimer: Aprender, recordar, olvidar – Juan María Alfaro & Javier S. Burgos (NEURON Bio).

MIÉRCOLES 27 DE ABRIL

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
17:30	TALLERES Y PLANETARIO
19:00	SESIÓN "MÁS HUMANOS QUE LOS HUMANOS" Nuestra inteligencia animal – Antonio Osuna Mascaró
20:00	SESIÓN "CEREBRO E IDENTIDAD" Hombre y mujer: un cerebro diferente, un comportamiento diferente – Susana Roldán (Hospital Materno Infantil de Granada). ¿Puede un parásito alterar nuestro comportamiento? – Carmen Mascaró (Universidad de Granada).

SÁBADO 30 DE ABRIL

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
13:15	SESIÓN "DIARIOS DE LA ANTÁRTIDA" 20 años de investigación de la actividad sísmica en la Antártida – Enrique Carmona y Javier Almendros (Instituto Andaluz de Geofísica). Antártida: científicos en el fin del mundo – Javier Cacho (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial).
17:30	TALLERES Y PLANETARIO
19:00	Ciencia en el Bar – Daniel Guirado <i>Espectáculo de amor y humor por la ciencia desde la barra del bar. No hay más ciego que el que no quiere saber.</i>
20:00	SESIÓN "LO GRANDE Y LO PEQUEÑO" Del bosón de Higgs a las Ondas Gravitacionales - José Ignacio Illana (UGR) & Carlos Barceló (IAA-CSIC).

LUNES 25 DE ABRIL

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
17:30	TALLERES Y PLANETARIO
19:00	Monólogos de Ciencia – Manuel González & Miguel Abril (IAA-CSIC) <i>¿Existe vida fuera de este planeta? ¿Es incluso inteligente? ¿Ven Gran Hermano? Estas y otras muchas preguntas serán por fin respondidas en una serie de monólogos científicos con mucha ciencia y humor.</i>
20:00	SESIÓN "¿ESTAMOS SOLOS?" ¿Las vacaciones de su vida en un exoplaneta! – Cristina Rodríguez (IAA-CSIC). Dentro de Solaris: Vida e inteligencia extraterrestre – Daniel Guirado (IAA-CSIC).

JUEVES 28 DE ABRIL

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
17:30	TALLERES Y PLANETARIO
19:00	"En la plaza con Alberto Giacometti" – Gabriel Cabello (Univ. Granada). <i>Disección artístico-científica de las obras "Plaza" (1948) y "Hombre que camina" (1960) de Giacometti.</i>
20:00	SESIÓN "CIELOS Y LIBROS" Astronomía y Literatura – Emilio Alfaro (IAA-CSIC) & Susana Escudero (RTVA).

DOMINGO 1 DE MAYO

11 - 13	TALLERES Y PLANETARIO
13:15	SESIÓN "EVOLUCIÓN" Unos 13800 millones de años de evolución – Miguel Botella (Universidad de Granada) y Enrique Pérez Jiménez (Instituto de Astrofísica de Andalucía IAA-CSIC).

ENTRADA LIBRE HASTA COMPLETAR AFORO



CSIC