



# I NFORMACIÓN y A CTUALIDAD A STRONÓMICA

<http://www.iaa.es/revista>  
JULIO DE 2011, NÚMERO 34

IMAGEN: Superficie ondulada, ilustración de M.C. Escher.

## Ondas gravitatorias

El interior de las estrellas  
Clima marciano

INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA  
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

<http://www.iaa.es>

Directora: Silbia López de Lacalle. Comité de redacción: Antxon Alberdi, Carlos Barceló, René Duffard, Emilio J. García, Pedro J. Gutiérrez, Susana Martín-Ruiz, Pablo Santos y Montserrat Villar. Edición, diseño y maquetación: Silbia López de Lacalle. Comité asesor: Rafael Garrido, José Juan López Moreno, Jesús Maíz y José Vilchez. Se permite la reproducción de cualquier texto o imagen contenidos en este ejemplar citando como fuente "IAA: Información y Actualidad Astronómica" y al autor o autores.

Instituto de Astrofísica de Andalucía  
c/ Camino Bajo de Huétor 50 , 18008 Granada. Tlf: 958121311 Fax: 958814530. e-mail: revista@iaa.es

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

# SUMARIO

## REPORTAJES

Ondas gravitatorias: la otra luz del cosmos ...2

El camino hacia el interior de las estrellas...8

DECONSTRUCCIÓN Y otros ENSAYOS. Clima marciano ...12

EL "MOBY DICK" DE... Javier Gorosabel (IAA-CSIC)...14

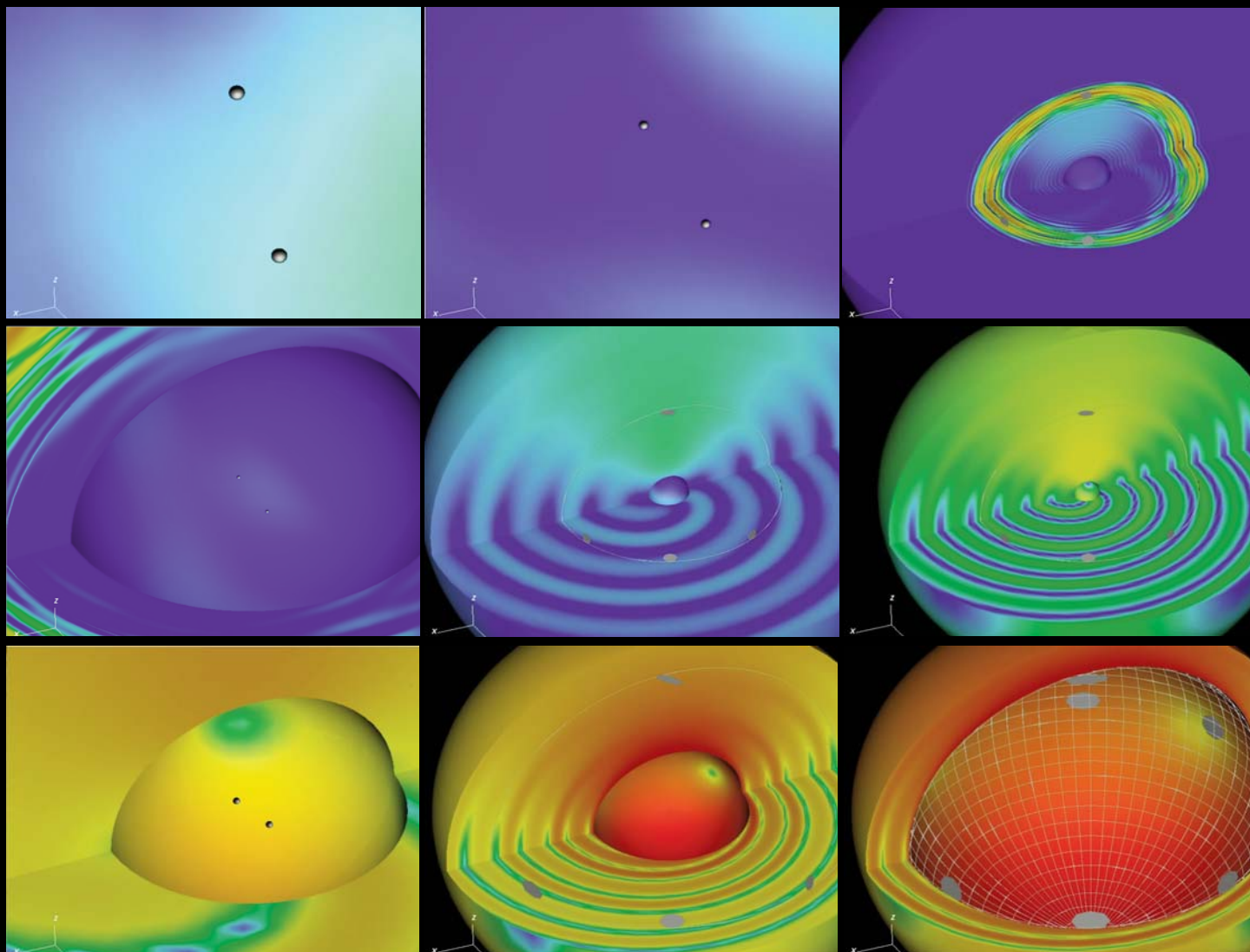
CIENCIA EN HISTORIAS. Antonia Maury: un espíritu libre ...15

ACTUALIDAD ...16

ENTRE BASTIDORES ...20-21

CIENCIA: PILARES E INCERTIDUMBRES. Atmósfera de Marte ...23

RECOMENDADOS ...24



Capturas de una animación que muestra un sistema de agujeros negros que, al orbitar en torno a un centro común, producen ondas gravitatorias. Fuente: Caltech. Vídeo completo en <http://www.black-holes.org/explore2.html>

## FE DE ERRATAS

En el número anterior (pág.21), la noticia titulada "El enorme interés astronómico de los púlsares" contenía una errata sobre la distancia del púlsar binario PSR J1624-2230: los 3.000 años luz no corresponden a la distancia entre ambos púlsares, sino a la distancia del sistema a la Tierra.

# La otra luz del cosmos



## ¿QUÉ SON LAS ONDAS GRAVITATORIAS, QUÉ OBJETOS LAS EMITEN Y QUÉ INFORMACIÓN NOS APORTAN?

Por José Luis Jaramillo  
(Albert Einstein Institute, MPI)

**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 que la luz visible es solo una parte. Y decimos “casi todo” porque los rayos cósmicos y los 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 electromagnéticas. 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? La respuesta es sí: las denominadas 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 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 empezó con la obser-

vacación 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 escalas. 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 ver 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 y manipulación”, pasando por la otra luz de un cosmos por descubrir.

### 1 ¿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 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 (1) se propagan a velocidad finita a través del espacio, y (2) inducen oscilaciones en la forma de los objetos que

## 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, comprobaremos 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, comprobaremos 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, además, 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 señores que flotan en el espacio. Y consideremos también el cambio de estas posiciones conforme pasa el tiempo "t". El conjunto de posibles "posiciones y tiempos" (x,t) de cada señor 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 estos señores en caída libre como líneas paralelas

en el espacio-tiempo. Pero sabemos que, como consecuencia de la gravedad, estos señores (estas líneas paralelas) se acabarán encontrando: 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 espa-

cio-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 esta 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 de un estanque, como oscilaciones en la superficie del agua que se propagan a lo largo de la propia superficie del agua.



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 cursillo acelerado en Relatividad General]. 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 mare-

as 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. 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.

1. CLAVES

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 las deformaciones proporcional a:**

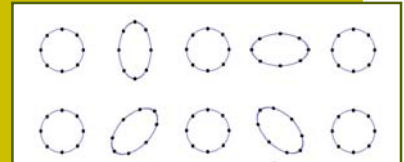
a) Masa M y velocidad de variación de forma v del cuerpo emisor.

b) Tamaño L del objeto deformado (característico de la 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  $\Delta L$  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.



2 ¿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 es importante señalar claramente que, a día de hoy, no se ha realizado aún ninguna observación directa de tales estiramientos y compresiones gravitatorias. Ciertamente, 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 de la gravedad cuando se la compara con la fuerza electromagnética, podemos mencionar que la atracción gravitatoria entre un electrón y un protón es unas  $10^{39}$  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

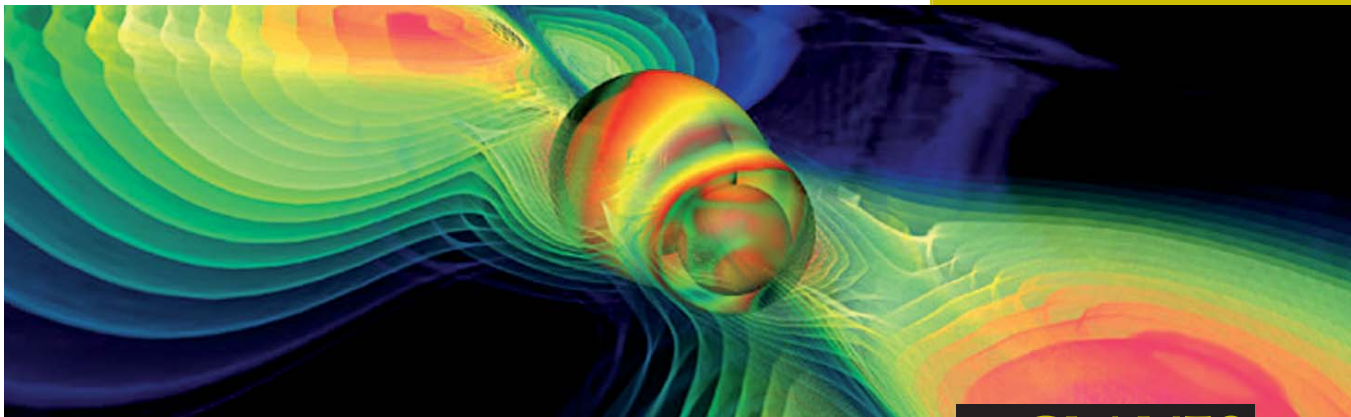
que cuando un niño de cuatro años levanta un libro de la mesa, con la fuerza (electroquímica) de sus poderosos brazos de cuatro años le está ganando a TODA la Tierra tirando gravitatoriamente en dirección opuesta.

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 (una estrella de neutrones en el cúmulo de Virgo), 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/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 al nuevo campo de la Astrofísica y Cosmología de ondas gravitatorias.

Hemos dicho que hasta la fecha no hemos 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 si estas ondas gravitatorias están realmente ahí o si no son más que una posibilidad teórica sin confirmación firme.

Podemos responder a esta cuestión: sabemos que están ahí. La confirmación proviene del estudio de la dinámica orbital de los púlsares binarios. Estos sistemas están constituidos por dos estrellas de neutrones girando una alrededor de la otra, con la particularidad de que cada 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 valió el premio Nobel en 1993 para Hulse y Taylor. Por tanto, sabemos 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 (1Hz = una oscilación por segundo). La frecuencia de una onda gravitatoria está directamente asociada al ritmo de oscilación del sistema gravitatorio.



rio que la genera. Como en el caso de las mareas de la Tierra, la frecuencia de la onda es el doble de la frecuencia del movimiento en la fuente que la produce. De forma general, clasificamos las fuentes gravitatorias en dos categorías: fuentes de alta frecuencia ( $1-10^4$ Hz) o de baja frecuencia ( $10^{-4}-1$  Hz). Esta clasificación responde esencialmente a características de las “antenas gravitatorias” empleadas en cada caso, y no a una diferencia fundamental entre los mecanismos físicos en los dos tipos de fuentes. 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 ( $10^{XX}$  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 1000 Hz 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 aproximadamente una vez y media la masa del Sol) que giran una en torno a la otra unas 500 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 que nos va a permitir hacernos una idea más clara de los “paisajes” accesibles a través de esta nueva ventana al cosmos. Como fuentes de ondas gravitatorias de alta fre-

cuencia podemos señalar, en primer lugar, 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. Una segunda fuente de gran interés viene dada por la caída en espiral, seguida de la fusión, de sistemas binarios formados por estrellas de neutrones y/o agujeros negros estelares, cuya masa es de unas diez veces la masa del Sol. Asimismo, la rotación de estrellas de neutrones con “protuberancias” en su estructura constituye un eficaz emisor de radiación en esta banda de frecuencias. Estos sistemas nos permiten acceder al estudio de las propiedades de la materia en 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.

## 2.CLAVES

### 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!

## 3 ¿CÓMO PODEMOS DETECTARLAS?

### Interferómetros láser como antenas gravitatorias

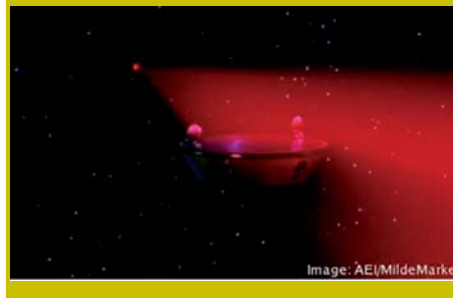
Para detectar estas ondas gravitatorias debemos ser capaces de medir variaciones extremadamente pequeñas en distancias muy grandes. Como hemos comentado al discutir los efectos de estas fuerzas de marea viajeras sobre la materia, las variaciones de tamaño  $\Delta L$  inducidas sobre un objeto de longitud  $L$  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 es en este punto en el que 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: el 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 para la medición y manipulación. Durante las últimas décadas el reto de la detección de las ondas gravitatorias ha constituido 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 (recordar la forma de la Tierra bajo las mareas). La luz del láser viajando en el interior de los brazos nos 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 y cada uno 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 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 1000  $\mu\text{m}$ , 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 unos cuatro kilómetros. En la actualidad existe una red de interferómetros distribuidos en distintos puntos de la Tierra: LIGO en Estados Unidos, Virgo en Italia, GEO600 en Alemania y TAMA en Japón.



## 3. CLAVES

### INTERFERÓMETROS LÁSER COMO ANTENAS GRAVITATORIAS

- Red de interferómetros en tierra actualmente en funcionamiento. Aún sin detección positiva, pero representado ya una nueva "ventana al universo".
- Formidable reto tecnológico en marcha: detectores interferométricos avanzados actualmente en desarrollo, tanto en tierra como en el espacio (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.

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 10 y 10.000 Hz. 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 40 Hz 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, algo necesario para explorar la colisión de agujeros negros supermasivos, es necesario ir al espacio. Este es el contexto del proyecto 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 Hz. Nuevamente, la precisión requerida para el control de los satélites que componen la antena representa un formidable reto tecnológico de cuyo desarrollo seremos testigos a lo largo de la próxima década. Sin duda, la detección positiva de un evento por parte de los actuales interferómetros en tierra, o por sus inminentes versiones avanzadas, representará un tremendo estímulo en esta dirección.

## 4. ¿CON QUÉ QUEDARSE 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 los hitos fundamentales del mismo:

- 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).

LIGO

# El camino hacia el interior de las estrellas

## ¿CÓMO HEMOS AVERIGUADO DE QUÉ SE COMPONEN LAS ESTRELLAS, CUÁL ES SU TEMPERATURA O CÓMO OBTIENEN SU ENERGÍA?

Por Antonio García Hernández (IAA-CSIC)

“TODO EL MUNDO SABE QUE LAS ESTRELLAS SON CUERPOS GASEOSOS INCANDESCENTES, compuestas principalmente por hidrógeno y helio y que pasan casi toda su vida transformando el uno en el otro para obtener su energía”. Estas afirmaciones son las que siempre he escuchado y leído desde que me interesó la astrofísica. Sin embargo, no me quedaba muy claro cómo había sido posible inferir todas esas cosas sorprendentes que no podíamos reproducir en el laboratorio.

De las estrellas solo podemos ver la superficie, y tan solo el Sol se encuentra a una distancia que podríamos salvar. De hecho, el filósofo Auguste Comte ya había reparado en el detalle de la distancia y afirmaba (1835): “En cuanto a las estrellas, [...] nunca podremos, de ningún modo, estudiar su composición química o su estructura mineralógica. Considero que cualquier idea sobre la verdadera temperatura media de alguna estrella nos será siempre negada”.

Pero Comte ignoraba otras características que nos impedían, incluso superando la distancia, acercarnos siquiera a su superficie, como la temperatura de la atmósfera externa de las estrellas. Por tanto es inútil (hoy día, científicamente hablando) imaginar un estudio *in situ* de estas luciérnagas celestes. Entonces, ¿cómo conocemos actualmente tanto, no solo sobre la superficie y atmósferas estelares, sino también sobre su evolución y composición interna?

### Una ciencia poco ortodoxa

En cierto sentido, Comte tenía razón: la astronomía es una ciencia poco ortodoxa. Los principales pasos del método científico son la experiencia, la elaboración de una teoría, la predicción y la experimentación, y este último eslabón de la cadena es el que la astronomía no puede abordar. Sin embargo, eso no significa que no podamos

llegar a entender aquello que simplemente observamos.

Imaginemos que un extraterrestre estuviese investigando la Tierra para entender cómo



Comparación de tamaños estelares (orden numérico): enana roja, enana amarillo -tipo solar-, enana azul e hipergigante azul.

“funcionan” los seres que la pueblan y que solo dispusiese de fotografías. ¿Podría recomponer el rompecabezas de la vida humana, incluso aunque solo nos observara durante una semana? Si uno piensa en una única persona, los datos de una semana no permitirían deducir que una persona nace, crece, se reproduce y muere, pero la sensación invita a suponer que la secuencia será muy similar para la mayoría del resto de humanos y que, de la muestra de seres que aparecen en una foto, cada uno se encuentra en un estado evolutivo (dentro de su propia vida) distinto. Solo le queda averiguar, pues, quién se encuentra en cuál y reconstruir la secuencia.

Puede suponer, además, que algunas de las normas que se aplican en su vida también se aplicarán a la nuestra. Descubrir cuáles, que acabarán convirtiéndose en leyes uni-

versales, forma parte del sentido científico. Pero encontrar las diferencias y sus causas, dentro de estas leyes fundamentales, ampliará el conocimiento de las mismas y le otorgará una visión global del universo y de su posición en él.

### Los primeros pasos

Las primeras interpretaciones sobre el origen y composición de los cuerpos celestes fueron de carácter místico y mitológico. Era difícil comprender el funcionamiento de los objetos distantes cuando lo único que se conocía en aquel tiempo que pudiera producir luz propia era el fuego. No es extraño que Anaxágoras, en 450 a. C., las describiera como piedras llameantes.

Una explicación algo más “física” (si se me permite usar el término con el sentido actual cuando en aquella época se definía como la simple observación de la naturaleza), fue propuesta por Aristóteles. Reparó en que los cuerpos que se mueven en la tierra (dentro de su atmósfera) se calientan por fricción con el aire. Y dedujo que, dado que las estrellas, aunque fijas en sus posiciones relativas, se mueven a lo largo de la noche y de las estaciones con el giro de la bóveda celeste, deberían calentarse por el roce que produce su movimiento. He aquí el motivo de su calor y, en consecuencia, de su brillo.

Más observaciones llevaron a la primera conclusión correcta. Aristarco de Samos pensó que, si tanto el Sol como las estrellas eran los únicos cuerpos que producían su propia luz, quizás fueran de la misma familia. Así, alrededor del año 200 a. C., propuso que tal vez las estrellas fueran soles muy lejanos.

Hubo de pasar mucho tiempo para que se avanzara en el conocimiento de las estrellas. El primer paso fue descubrir que no todo lo que brillaba en el cielo eran estre-



llas. En un principio se llamaron nebulosas (Ptolomeo, 130 a. C.), por su carácter extendido y no puntual. Galileo, en su *Siderius Nuncius* (1610), observó que algunas de ellas eran agrupaciones de estrellas muy lejanas, y que ofrecían un aspecto de manchas o nubes. Aunque en otras no se apreciaban estrellas, como apuntó Simon Marius dos años después al describir una nebulosa situada en la constelación de Andrómeda (se refería a la galaxia que hoy conocemos con este nombre).

Inmanuel Kant atisbó la solución del problema al proponer, en 1755, su teoría de los *universos isla*, que afirmaba que aquellas nebulosas elípticas eran estructuras similares a nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, aunque muy lejanas. El filósofo formuló, además, una pionera hipótesis sobre la fuente de energía del Sol y el origen del Sistema Solar. Proponía una tendencia de “las partículas más ligeras y volátiles (de la nebulosa solar) lanzadas enteramente hacia abajo del objeto central. Debido a que estas porciones más ligeras y volátiles son también las más activas en mantener el fuego, vemos que... el cuerpo que es el centro del sistema obtiene así la ventaja de convertirse en una bola llameante o, en una palabra, un Sol”.

A partir de entonces, la física, tal y como hoy la definimos, entra en juego y el estudio de las estrellas como una disciplina en sí misma germina. Los acontecimientos empezaban a precipitarse.

### La física tiene algo que decir

Newton, entre 1670 y 1672, había descubierto la composición en colores de la luz: su espectro electromagnético. Casi 150 años más tarde, el físico alemán Joseph von Fraunhofer se interesó por el estudio de la composición de la luz y, gracias a mejores

instrumentos, obtuvo espectros con una resolución apreciable tanto del Sol como de otras estrellas. En 1814 observó ciertas bandas negras en el espectro del Sol y, en 1818, estudió el espectro de otras estrellas. Era el primer paso de la espectroscopía astronómica. Ese mismo año, realizó experimentos con gases calientes, comprobando que emitían líneas en ciertos lugares del espectro muy concretos (formando las bandas), independientes y diferenciables, como si se tratara de la huella dactilar de cada compuesto. Algunas de estas emisiones se encontraban en la misma posición que en los espectros estelares, aunque brillantes en este caso y no oscuras como en las estrellas. Desgraciadamente, Fraunhofer murió en 1826, con 39 años, dejando su investigación inacabada.

Kirchoff recogió el testigo y continuó estudiando las emisiones de los gases calientes. En 1859 comprendió que las líneas negras

---

*El problema angular de la astrofísica estelar ha residido en la cuestión de la fuente de energía que mantiene a las estrellas*

---

eran, en realidad, de absorción y no de emisión (de ahí que unas fueran oscuras y otras brillantes). Hizo pasar la luz proveniente de una fuente caliente a través de ciertos gases puros más fríos y se dio cuenta de que cada gas absorbía la luz en longitudes de onda concretas. Ahora se podía conocer la composición de la atmósfera de las estrellas, ya que los compuestos que las forman absorben la radiación más caliente procedente de la superficie. Y, de este modo, en 1861, determinó la compo-

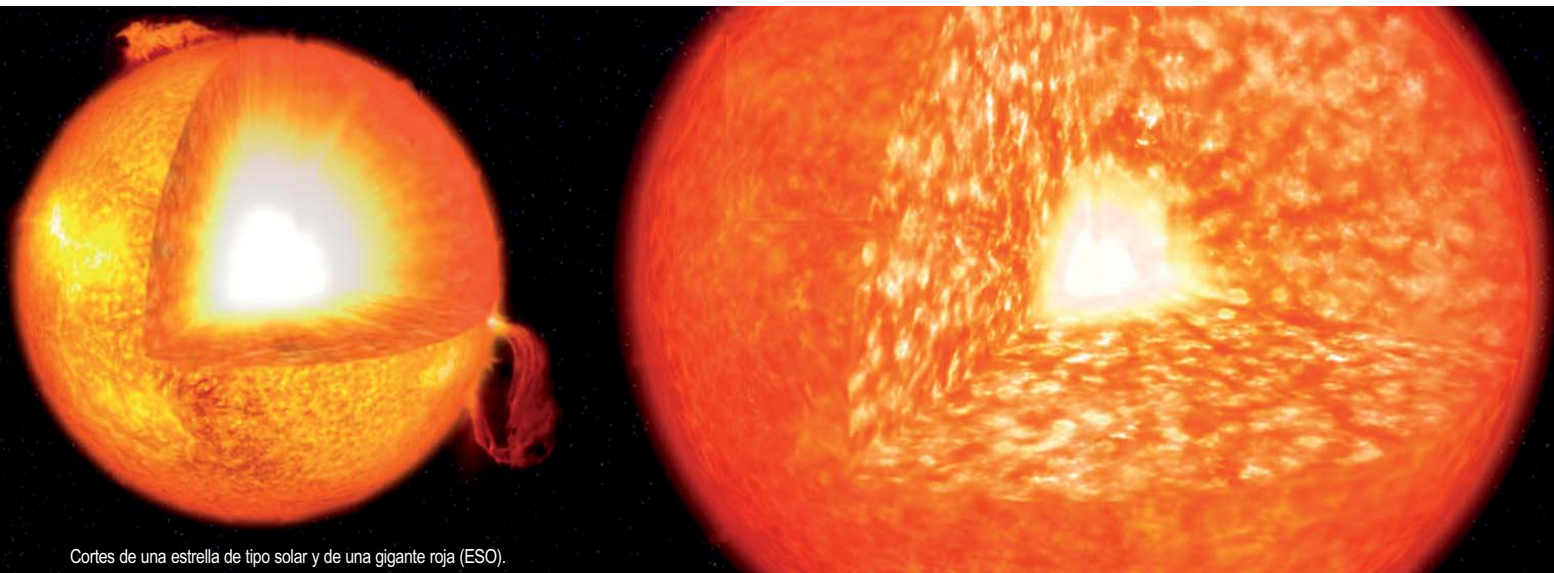
sición química del Sol y descubrió, a raíz de su espectro, dos elementos nuevos: el rubidio y el cesio.

Un par de años más tarde, el uso sistemático de esta nueva herramienta motivó la primera clasificación de estrellas. Angelo Secchi, jesuita italiano, empezó a coleccionar espectros y llegó a acumular unos cuatro mil. Observó que cada uno tenía distintas particularidades, pero algunos compartían rasgos comunes. Creó un sistema de cinco clases espectrales, desde la emisión máxima más azul hasta la más roja. Y reparó en que algunas de las líneas que aparecían en los espectros se repetían en todos ellos y que no procedían de la absorción de las atmósferas de aquellos cuerpos, sino de la propia atmósfera terrestre.

Se había conseguido determinar la composición de la superficie de las estrellas, las predicciones de Comte no se estaban cumpliendo. El futuro se presentaba halagüeño, pero aún quedaba mucho por saber. Las respuestas llegarían de mano de los grandes físicos estelares... y de partículas.

### Los grandes genios y el desarrollo de la física estelar

El problema angular de la astrofísica estelar ha residido en la cuestión de la fuente de energía que mantiene a las estrellas. Desde el siglo XIX, con el desarrollo de la espectroscopía, se había aceptado la idea de que las estrellas debían ser cuerpos gaseosos. Con esta hipótesis en mente, Helmholtz, físico alemán de gran renombre en su época, desarrolló, alrededor de 1854, un modelo de alimentación solar en el que este extraía su energía por la contracción lenta de su volumen, enfriándose durante este proceso. Realizó un estudio de una esfera de gas ligada por su propia gravedad en contracción y halló que, con solo una



Cortes de una estrella de tipo solar y de una gigante roja (ESO).

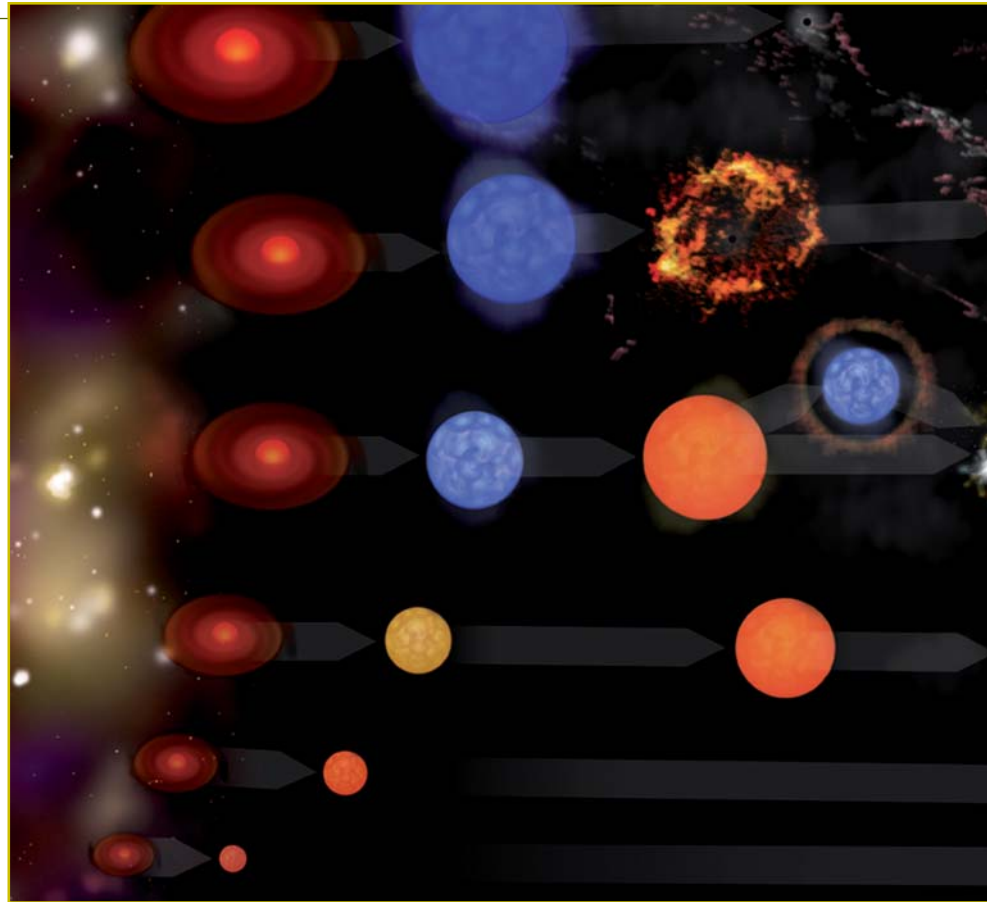
reducción de 380 pies en su radio, esta obtendría energía suficiente para mantenerse “encendida” un año. Este estudio requirió de las primeras suposiciones sobre las condiciones en el interior estelar. Es el primer esbozo de un modelo de interior y en él se tratan correctamente los problemas del soporte mecánico (equilibrio entre la fuerza de la gravedad y las presiones) y del transporte de energía.

Pero no solo Helmholtz estudió este tipo de objetos. Lane, algunos años más tarde (1870), también realizó su propia investigación sobre las esferas de gas autogravitantes, aunque su motivación era distinta: intentaba encontrar una explicación a las medidas altamente discrepantes que hasta entonces se tenían sobre la temperatura del Sol. Y obtuvo una sorprendente solución: la esfera de gas se vuelve más caliente mientras pierde energía y se contrae. Este resultado contradecía el modelo de Helmholtz, que suponía un enfriamiento durante la contracción.

No obstante, pronto surgieron teorías que solventaban esta incómoda contradicción. Ritter desarrolló la primera teoría de evolución estelar en 1883, proponiendo que una estrella pasa por tres fases a lo largo de su vida: en la primera no es una esfera sino, más bien, una masa difusa de gas que se contrae y se calienta. En la segunda etapa mantiene su temperatura constante durante un breve periodo de tiempo, mientras que la tercera se corresponde con una fase de enfriamiento. Esta teoría, ampliada por Lockyer cuatro años más tarde, complicaba el modelo simple de enfriamiento, por lo que no fue extensamente aceptada.

Entrado ya el siglo XX aparecieron algunas pruebas que apoyaban el modelo de Lockyer (y Ritter). Russell, en 1913, extrajo ciertas conclusiones de las observaciones que había llevado a cabo junto a Hertzsprung sobre una gran cantidad de estrellas, creando el diagrama más famoso de la astronomía, el diagrama H-R: solo existían dos tipos fundamentales de estrellas, gigantes y enanas. Basándose en el trabajo de Lockyer, Russell propuso que las gigantes eran estrellas jóvenes en contracción que evolucionan a partir de un estado gaseoso difuso. A lo largo de su vida, la densidad llegaría a tal punto que se convertirían en líquidas, pasando a una fase enana de enfriamiento.

Pero esta teoría estaba basada en una evidencia observacional débil y pronto se descubrirían sus flaquezas. En aquel tiempo existía una discrepancia fuerte entre la edad del Sol determinada por contracción y la derivada de los estudios sobre las edades



*Cecilia Payne-Graposchkin demostró que el Sol está principalmente compuesto por hidrógeno: posee, por tanto, combustible de sobra para que se produzca la fusión*

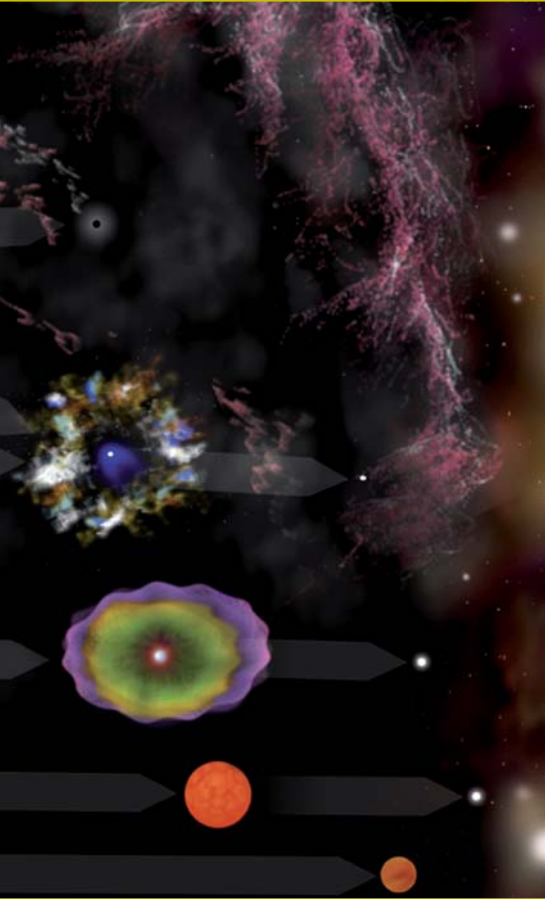
geológicas. Eddington se empeñó en resolver este problema. Para empezar, realizó una serie de modelos teniendo en cuenta la radiación en el transporte de energía (hasta ahora solo se había considerado la convección para modelar este transporte, análoga a la que se produce en la ebullición del agua) y en 1917 demostró que las estrellas enanas no tenían por qué ser líquidas.

El paso más importante lo dio dos años después, utilizando unas observaciones sobre un tipo de estrellas cuyo estudio estaba destinado a hacer germinar un campo propio dentro de la astrofísica. Se trataba de las cefeidas, cuya luz variaba con el tiempo y que se conocían como estrellas variables. Del estudio de estas estrellas ya había obtenido información importante Henrietta Leavitt al descubrir, en 1912, una relación entre su periodo de variación y su luminosidad intrínseca, esto es, la que mediríamos si estuviésemos en la misma superficie de la estrella. Esta relación era muy importante porque demostraba que la variación de la luz en estas estrellas era debida a procesos propios y no

a efectos externos, como los producidos por un eclipse. Así, la variación de la luz se suponía provocada por variaciones en su radio, como si el propio objeto “latiera”. Eddington comparó observaciones recientes con las realizadas un siglo antes y demostró que las cefeidas no se contraían con la tasa requerida para explicar su luminosidad. Escribió: “si la energía de la estrella se deriva solamente de la contracción, el cambio del periodo debido al aumento de la densidad debe ser fácilmente mensurable. Puesto que el cambio observado es demasiado pequeño, parece que la estrella debe tener otra fuente de energía”. Ante esta prueba no había refutación posible, por lo que Russell, ese mismo año, elaboró una lista con las características que debía tener toda fuente de energía que se considerase candidata como combustible estelar: la energía debe liberarse en el núcleo de la estrella y su fuente debe depender fuertemente de la temperatura.

### Energía nuclear y modelos estelares

El descubrimiento que llevaría a la identificación de la energía de las estrellas se publicó algunos años antes. Albert Einstein proponía en 1905 que la materia era capaz de transformarse en energía siguiendo la tan famosa (actualmente) relación  $E=mc^2$ . Es decir, acababa de descubrir que tanto materia como energía son dos caras de una misma propiedad.



Evolución estelar: distintos escenarios dependiendo de la masa de la estrella. Fuente: Chandra (NASA).

Las pistas que motivaron la idea de que el hidrógeno era el combustible estelar fueron el resultado de dos trabajos que se publicaron en los años veinte: Aston observó que la masa del helio (que tiene dos protones y dos neutrones en su núcleo) es algo menor que la masa de cuatro núcleos de hidrógeno. Es decir, si se pudiese formar un átomo de helio a partir de la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno, la diferencia de masa entre ambos se convertiría en energía siguiendo la relación de Einstein. La segunda pista fue aportada por la investigadora Cecilia Payne-Gaposchkin, discípula de Shapley y Eddington, que demostró, cinco años más tarde de la observación de Aston, que el Sol está principalmente compuesto de hidrógeno. Nuestra estrella poseía, de este modo, combustible de sobra para que se produjese la fusión.

Las piezas del rompecabezas estaban sobre la mesa, si bien había algunos detalles que no se podían explicar. El principal era cómo pueden los átomos superar la repulsión de Coulomb, debida a la carga eléctrica de los protones, para acercarse lo suficiente y fusionarse. Aún así Eddington, en 1926, propuso que el hidró-

geno era el candidato más adecuado para ser el buscado combustible. Con ello además se quitaba la espinita de resolver la diferencia entre las distintas edades propuestas para nuestro Sol: el hidrógeno permitiría que tuviese una vida de hasta cien mil millones de años, más que de sobra para abarcar las eras geológicas.

George Gamow, inquieto científico que se involucró en numerosas áreas de la física, tenía las respuestas a los molestos inconvenientes que Eddington no pudo superar. En 1928 descubrió una manera para que los átomos rompieran la repulsión de Coulomb a través del efecto túnel. Esta teoría postulaba que había una probabilidad no nula de que un átomo, al ser lanzado contra otro, rompiera la barrera impuesta por las fuerzas eléctricas. Así, si un número grande de átomos se lanzasen entre sí con velocidad suficiente, una pequeña parte de ellos podrían chocar para fusionarse.

A partir de este resultado encontró dos importantes consecuencias. La primera fue la posibilidad de la generación de los primeros elementos en el universo durante sus primeras etapas, justo después del Big Bang (lo que se conoce como nucleosíntesis estelar) y la segunda fue la elaboración de los primeros modelos simplificados de estrellas. Estos eran modelos de toda la estructura interna, similares a los que usamos hoy en día, independientes para cada estadio evolutivo y calculados de manera manual, esto es, sin computadoras; corría el año 1938. Hasta 1955, con los trabajos de Henyey y colaboradores, no se utilizarían calculadoras numéricas. Los modelos anteriores habían permitido describir adecuadamente el interior de las estrellas, pero no su evolución. Los nuevos modelos de Henyey permitían obtener una visión de la evolución. Así, en 1959, este autor y sus colaboradores ya estaban en disposición de calcular modelos que evolucionaban a partir de perturbaciones de otro estado anterior: empezó el cálculo de las primeras secuencias evolutivas completas.

Después de todo, hemos sido capaces de entender lo que ocurre en el interior de las estrellas y de reconstruir su evolución sin necesidad de acercarnos a ellas. Afortunadamente, hasta los mejores filósofos y científicos pueden equivocarse en sus predicciones.

### El futuro: pulsaciones estelares

Quedan muchas cuestiones por dilucidar, como el estado evolutivo escasamente comprendido de las estrellas poco masivas

(del tamaño del Sol) cuando agotan el hidrógeno del núcleo, qué ocurre cuando una estrella pierde masa a lo largo de su vida, cómo afectan la rotación o el campo magnético o qué determina la masa de una estrella que se está formando. ¿Cuál es el camino que están tomando las investigaciones para resolver estos puntos?

El futuro para resolver muchas de estas incógnitas se encuentra en el análisis de la variación de la luz de las estrellas, tanto descompuesta en su espectro como sin descomponer. Eddington, en 1919, fue el primero en utilizar esta propiedad que se ha observado en gran número de objetos para demostrar que la teoría de la contracción no era válida. Me estoy refiriendo al descubrimiento de que la mayoría de las estrellas pulsan y eso provoca variaciones en su brillo (aparte de la pulsación, existen otros fenómenos que producen una variación en el brillo que nos llega de la estrella).

Aunque las pulsaciones estelares ya se habían explicado *grosso modo* a principios del siglo XX, fue el descubrimiento de las pulsaciones de cinco minutos del Sol (Legihton, 1962) lo que impulsó la creación de una nueva rama de la astrofísica, capaz de darnos información directa del interior de las estrellas: la astrosismología. El efecto es el mismo que ocurre en la Tierra con los terremotos. Los movimientos de tierra dependen de la composición y distribución de las capas por las que se propagan. De este modo, estudiando la onda y sus reflexiones, los geólogos obtienen un mapa del interior de nuestro planeta. En otras palabras, si alguien quisiera saber de qué material está compuesto un objeto, le bastaría con darle unos golpecitos para que el sonido que provocase le diera indicios sobre sus características.

Siguiendo este razonamiento, la astrosismología se ha desarrollado en los últimos años y ha dado resultados tan importantes como el perfil de la velocidad del sonido en el interior del Sol (Christensen-Dalsgaard y colaboradores en 1985). Esto no se puede conseguir aún con otras estrellas debido a la distancia, pero el lanzamiento reciente de algunos satélites dedicados a este tipo de estudios, como CoRoT o Kepler, están acercándonos a estos resultados.

El futuro próximo se presenta excitante. Cada vez estamos más cerca de mirar “directamente” dentro de las estrellas y, para ello, solo tenemos que usar lo que siempre ha maravillado al hombre de ellas: su luz.

SI ALGÚN DÍA LOS VIAJES INTERPLANETARIOS TRIPULADOS SE HICIERAN REALIDAD Y EL TURISMO DE MASAS INVADIERA EL SISTEMA SOLAR, PROBABLEMENTE MARTE SERÍA EL DESTINO TURÍSTICO MÁS DEMANDADO. SU ESPECTACULAR OROGRAFÍA, LA MÁS EXTREMA DEL SISTEMA SOLAR, ATRAERÍA A MONTAÑEROS Y AVENTUREROS. EL TURISTA MENOS ATREVIDO PODRÍA VISITAR LOS LECHOS DE LOS VALLES POR DONDE, EN UN PASADO REMOTO, EL AGUA CIRCULABA, O LOS CAMPOS DE DUNAS DEL HEMISFERIO NORTE

# EL EXÓTICO CLIMA MARCIANO

ADÉMÁS MARTE ES, DE TODO EL SISTEMA SOLAR, EL CUERPO MÁS PARECIDO A NUESTRO PLANETA Y EL QUE TIENE UN CLIMA MÁS BENIGNO. MARTE, CUYOS DÍAS TIENEN UNA DURACIÓN SIMILAR A LA DE LOS DÍAS TERRESTRES, ESTÁ SITUADO SOLO LIGERAMENTE (A LA ESCALA DEL SISTEMA SOLAR) MÁS LEJOS DEL SOL QUE LA TIERRA. POR ELLO, SUS TEMPERATURAS SON ALGO MÁS FRÍAS QUE LAS TERRESTRES, PERO MUCHO MÁS AMIGABLES QUE LAS GÉLIDAS TEMPERATURAS DE LOS REMOTOS

PLANETAS GASEOSOS O LAS ABRASADORAS DE MERCURIO Y VENUS. EL EJE DE ROTACIÓN MARCIANO TIENE UNA INCLINACIÓN SIMILAR A LA DEL EJE TERRESTRE, POR LO QUE EL AÑO MARCIANO (QUE DURA UNOS 687 DÍAS), ESTÁ MARCADO, COMO EL AÑO TERRESTRE, POR UN CICLO ESTACIONAL. PERO LA ATMÓSFERA DE MARTE TAMBIÉN PRODUCE ALGUNOS DE LOS FENÓMENOS CLIMÁTICOS MÁS EXÓTICOS, SIN PARANGÓN EN NINGUNO DE LOS OTROS CUERPOS QUE FORMAN NUESTRO SISTEMA SOLAR

## La atmósfera de Marte

Entre las características que diferencian la atmósfera marciana de la terrestre podemos destacar dos. En primer lugar, la atmósfera marciana se compone mayoritariamente por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), en lugar de la mezcla de nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) que hace respirable la atmósfera terrestre. En segundo lugar, la atmósfera de Marte es mucho más tenue: la presión media en superficie es más de cien veces menor que la presión a nivel del mar en la Tierra. Esto tiene importantes implicaciones: a estas presiones, el agua no puede hallarse en estado líquido y pasa directamente de estado gaseoso a estado sólido, y viceversa. Es decir, en condiciones normales, no puede haber agua líquida en la superficie del planeta rojo. Además, una atmósfera fina, como la marciana, tiene mucha menos capacidad para redistribuir la energía que una atmósfera densa, como la venusina. Por ello, las variaciones de temperatura en Marte, tanto entre día y noche

como entre las distintas estaciones, son mayores a las que estamos acostumbrados en nuestro planeta. Así, si en un buen día de verano, a mediodía, la temperatura en Marte puede ser similar a la de un día primaveral en España, unos 10-20 grados, al caer la noche el termómetro puede bajar hasta unos heladores -60 grados. Y si nos desplazamos hasta el polo del hemisferio de invierno las temperaturas descienden por debajo de los -140 grados. Otra consecuencia curiosa de la naturaleza tenue de la atmósfera reside en que, en las capas atmosféricas más cercanas a la superficie del planeta, la temperatura varía fuertemente con la altura. Durante el día, un turista que posara sus pies en Marte tendría los pies unos 20 grados más calientes que la cabeza.

## Una atmósfera que se congela

Las temperaturas que se alcanzan en invierno en las regiones polares son tan frías que el CO<sub>2</sub> atmosférico se congela y se deposita en superficie, lo que da lugar a los casquetes polares. Al llegar la primavera, y con ella los primeros rayos de sol, la temperatura aumenta, el casquete polar comienza a sublimar y el CO<sub>2</sub> vuelve a la atmósfera en forma gaseosa (tampoco el CO<sub>2</sub> puede estar en estado líquido en Marte). Un turista ingenuo podría pensar que esto no es nada especialmente exótico: también nuestro planeta tiene casquetes polares. Sin embargo, hay una diferencia fundamental. En la Tierra es el vapor de agua, un componente minoritario de la atmósfera, el que se congela y forma los casquetes polares, por lo que este ciclo no afecta a la masa atmosférica. En Marte es el componente mayoritario de la atmósfera, el dióxido de carbono, el que se deposita en los casquetes polares, de forma que en este ciclo de congelación y sublimación interviene hasta una tercera parte de la atmósfera. Esto hace que la presión superficial tenga fuertes variaciones, de hasta un 30%, durante un año marciano.

IMAGEN: Evolución del casquete polar norte con el paso de las estaciones. Durante el invierno, el casquete polar ocupa gran parte de la región de altas latitudes (izquierda). Con la llegada de la primavera, el casquete comienza a retroceder (centro) hasta alcanzar su mínima extensión al final del verano (derecha).  
Imágenes tomadas por el telescopio espacial Hubble. Crédito: JPL/NASA/STScl.

octubre 1996

enero 1997

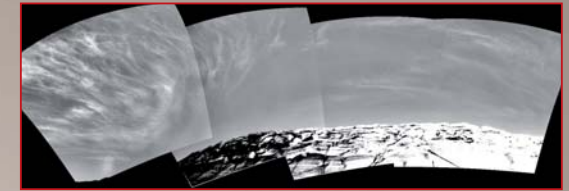
marzo 1997

## Agua, nubes y ¡nieve!

La atmósfera de Marte es extremadamente seca. Si concentráramos en la superficie toda el agua que hay en la atmósfera de Marte, formaría una capa de un espesor de solo unas cuarenta micras (una micra es una millonésima parte de un metro). Sin embargo, como las temperaturas atmosféricas son muy bajas, el aire se satura fácilmente de agua y da lugar a nubes o a la formación de escarcha durante la noche. Las nubes, más abundantes en las regiones polares durante el invierno y en regiones ecuatoriales durante el equinoccio de primavera, tienen características que serían familiares para un turista terrestre. Los flancos de las altas montañas marcianas suelen tener asociados penachos de nubes, y, al amanecer, pueden formarse nieblas en el fondo de los valles. Como estas nubes están formadas por partículas de hielo de agua muy pequeñas, no producen precipitación: son similares a los cirros terrestres. Sin embargo, recientemente, la sonda *Phoenix*, que se posó en superficie en las altas latitudes del hemisferio norte de Marte, observó cómo de una nube se desprendían penachos de partículas de hielo, que llegaban hasta la superficie. ¡Por primera vez veíamos cómo nevaba en Marte!

Además de estas nubes de hielo de agua, en Marte también se forman unas nubes más exóticas, compuestas por hielo de dióxido de carbono. Suelen producirse en la fría noche polar, o en capas muy altas (entre 60 y 100 km de altura) de la atmósfera.

Escarcha sobre la superficie de Marte, en una imagen tomada por la sonda Viking Lander 2. La escarcha se forma en los meses de otoño e invierno, y forma una capa extremadamente fina, posiblemente de unas pocas micras de espesor. Crédito: NASA/JPL



Nubes en el cielo marciano sobre el cráter *Endurance*. Las nubes presentan una apariencia filamentosas, similar a los cirros terrestres. Imágenes tomadas por el robot *Opportunity* (NASA/JPL)



## Polvo

Si existe un elemento que define la atmósfera de Marte, se trata de la presencia de polvo en suspensión. El fino polvo marciano se halla siempre presente en la atmósfera marciana, de manera que la deposición de polvo sobre los paneles solares es uno de los problemas elementales a los que deben hacer frente los robots que operan en la superficie del planeta. En las planicies marcianas, durante las horas de mayor temperatura, suelen formarse remolinos de polvo similares a los que se forman en los desiertos ter-

restes, pero con alturas que pueden llegar a los diez kilómetros y que dejan a su paso marcas características sobre la superficie del planeta. A escalas mayores, es frecuente la formación de tormentas de polvo, que suelen abarcar cientos de kilómetros pero que en ocasiones pueden llegar a cubrir todo el planeta. Estas grandes tormentas de polvo afectan a la temperatura atmosférica, ya que el polvo absorbe eficientemente la radiación solar. Se forman siempre en la misma época, cuando es verano en el hemisferio sur y el planeta se sitúa en el perihelio de su órbita (el punto más cercano al Sol). Sin embargo, no todos los años se forman estas tormentas globales: por qué unos años el polvo cubre todo el planeta y otros no es uno de los grandes misterios por resolver del planeta vecino.



Remolinos de polvo pasando cerca del robot *Spirit*. Estos remolinos son especialmente frecuentes en primavera y verano y pueden llegar a tener varios kilómetros de altura. Crédito: NASA/JPL/Texas A&M

Dos caras del planeta: en condiciones normales (izda), vemos detalles de su superficie. Pocos meses después, una tormenta global de polvo oculta la superficie del planeta (dcha). NASA, James Bell (Cornell Univ), Michael Wolff (Space Science Inst), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

## Fin del viaje

COMO CADA VEZ QUE VISITAMOS UN NUEVO LUGAR, MUCHOS RINCONES DEL CLIMA MARCIANO SE NOS QUEDAN SIN EXPLORAR: LA RECIENTE (Y AÚN CONTROVERTIDA)



El pasado 25 de mayo, y tras no haber recibido ninguna señal de él desde marzo de 2010, la NASA anunciaba el fin de la misión del robot *Spirit*. El rover, diseñado para sobrevivir tres meses, llevaba más de seis años trabajando sobre suelo marciano y enviándonos imágenes como el espectacular atardecer que figura en el fondo de este reportaje. Fuente: NASA/JPL/Texas A&M/Cornell.





el "Moby Dick" de...

...Javier Gorosabel (IAA-CSIC)

## GRB 970508

Los fenómenos que estudio ocurrieron hace mucho tiempo. De hecho, sucedieron antes de que yo naciera - bueno, mucho antes de eso. Es más, muchos de ellos ocurrieron antes de que el Sol y la Tierra se formaran.

No conocen el calendario. Tienen la mala costumbre de contactar conmigo en forma de "alerta SMS" a cualquier hora y día, aunque tienden a ser caprichosos y fastidiarme los fines de semana. Son bastante comunes en el universo, pues sé de ellos (y conmigo otros cientos de astrónomos) más o menos una vez por semana. Aunque su vida es realmente corta (desde pocos milisegundos hasta varios cientos de segundos) su luz viene atravesando el universo en un viaje que puede durar hasta más del 95% de la edad del universo. Así, supongo que no resulta fácil entender cómo un pulso de radiación electromagnética procedente del universo más primitivo es capaz de despertarme mediante el móvil un sábado a las tres y media de la mañana. Intentaré explicarlo.

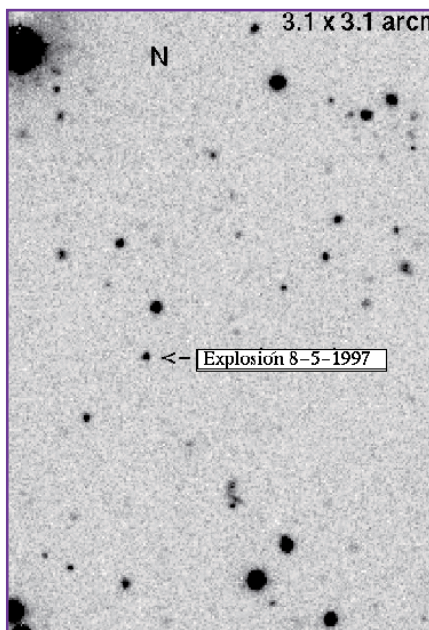
Estos pulsos de radiación se conocen como estallidos de rayos gamma o GRBs (del inglés *Gamma-Ray Burst*), y la mayor parte de su energía se detecta en rayos gamma, radiación que, afortunadamente (entre otras cosas para nuestro ADN), nuestra atmósfera bloquea. Esto provoca que para su detección necesitemos poner órbita satélites con telescopios\* de rayos gamma. Estos satélites, entre los que destaca Swift (NASA), localizan los GRBs y distribuyen, mediante un sofisticado y rápido sistema de alertas, su posición a los móviles de un grupo de astrónomos de todo el mundo para que puedan observarlos desde tierra en longitudes de onda que sí atraviesan la atmósfera, es decir, óptico, infrarrojo cercano y ondas de radio. Y una respuesta ágil es fundamental porque el "resplandor" de estos fogonazos se desvanece muy rápidamente en el cielo.

Mi trabajo consiste en responder a estos SMSs alertando a distintos observatorios. En mi casa tengo mapeada la red de mi compañía de móvil y ya forma parte de la liturgia nocturna colocarlo en el rincón de máxima cobertura tras asegurarme de que tiene batería suficiente.

Uno podría pensar que los que trabajamos en este negocio al menos tenemos los días



Nacido en Eibar (Guipúzcoa) en 1969. Realizó su tesis doctoral en el LAEFF (Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental) y en la Universidad de Valencia en el 1999. Actualmente es Investigador Científico del CSIC.



GRB 970508, detectado el 8 de mayo de 1997.

para descansar un poco. Pero, afortunadamente (o desafortunadamente para nuestros nervios) podemos hacer uso de una red telescopios distribuidos por todo el mundo, de tal forma que siempre es de noche para alguno de los telescopios de nuestra red.

**"Así, de la noche a la mañana los GRBs se convirtieron en los fenómenos más energéticos del universo"**

### 8 de mayo de 1997

La primera vez que conocí (o mejor dicho me telefoneó) uno de ellos, yo era un cándido, inocente y entusiasta estudiante de doctorado que se dedicaba a otros menesteres científicos. Por aquel entonces hacía mi tesis en el LAEFF (Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Espacial) situado a las afueras de Madrid. Aunque suene a topicazo, he de admitir que aquella llamada cambió mi carrera científica. Debía de ser la una madrugada cuando me sorprendió en el LAEFF una llamada desde Italia. Era el investigador principal

del satélite BeppoSAX\*\*, que necesitaba hablar urgentemente con mi director de tesis que, como es natural, no estaba a esas horas en el trabajo. El investigador italiano me informó, bastante exaltado, que su satélite había localizado un GRB hacía muy pocas horas y que necesitaba que alguien lo observara desde tierra lo antes posible. En mi candidez y en ausencia de mi director me ofrecí a ayudarlo (no sabía dónde me metía...). Él me proporcionó unas coordenadas "secretas" y me puse a llamar a toda prisa a distintos observatorios con la esperanza de convencer a algún incauto astrónomo de que cediera su tiempo para la búsqueda de algún objeto nuevo en esas coordenadas. Era el 8 de mayo de 1997, por lo que la criatura pasó a llamarse GRB970508.

El atrevimiento juvenil me costó dos días de sueño, pero mereció la pena. Dos entusiastas astrónomos accedieron a ayudarme y tomaron unos datos que, pasados catorce años, forman parte de los libros de la astronomía. Estos datos y otros (mejores, tengo que admitir) tomados por diversos grupos internacionales sirvieron para demostrar que los GRBs no solo eran objetos extragalácticos sino que ocurrían a miles de millones de años luz de distancia. La gran distancia que se midió implicaba que la energía emitida por los GRBs era descomunal, muchísimo mayor que la precedía la mayoría de los trabajos teóricos. Así, de la noche a la mañana los GRBs se convirtieron en los fenómenos más energéticos del universo.

Creo que fue más un encuentro casual que un amor a primera vista. Sin embargo, como si de un "hasta que la muerte nos separe" se tratara, GRB 970508 hizo que desde entonces siga trabajando en este negocio de los GRBs.

\*Estamos hablando más de detectores de altas energías que de telescopios convencionales basados en principios como la refracción (lentes) o la reflexión (espejos).

\*\* Satélite italo holandés operativo desde 1996 hasta 2003. Revolucionó el campo de los GRBs detectando por primera vez su emisión en rayos X y localizándolos con una precisión sin precedentes hasta entonces.

# Antonia Maury: Un espíritu libre

POR JOSEFA MASEGOSA (IAA-CSIC)

Antonia Maury nació en Nueva York el 21 de marzo de 1866 en el seno de una familia de grandes intelectuales. Su abuelo materno fue John William Drapper, el historiador y astrónomo que tomó la primera fotografía de la Luna, y su tío, Henry Draper, un reputado astrónomo de la Universidad de Harvard. Según la historiadora y astrónoma Dorrit Hoffleit, este ambiente influyó desde su infancia en su educación y ya a los cuatro años pasaba gran parte de su tiempo con su tío Henry Draper en el laboratorio, entre tubos de ensayo. Su padre, el Pastor Mytton Maury, se encargó personalmente de la educación de sus hijos y Antonia a los nueve años leía a Virgilio en latín. Con esta educación tan esmerada entró a estudiar en el Vassar College, y se convirtió de inmediato en una de sus alumnas más distinguidas. El ambiente generado por la astrónoma Maria Mitchell entre sus alumnas contribuyó a desarrollar aún más sus capacidades intelectuales. Se distinguió especialmente en filosofía y astronomía, debatiéndose continuamente a la hora de dedicarse profesionalmente a una de estas disciplinas. Su estancia en Vassar fue tan enriquecedora y divertida que en la fiesta de graduación en 1886 le dedicó un poema al Vassar College, describiendo el ambiente acogedor y el sentimiento de libertad transmitido por esta institución.

Al terminar sus estudios, comenzó a trabajar con el grupo de astrónomas de Pickering en el proyecto de clasificación de los espectros del catálogo Henry Draper. A la muerte de su tío, su viuda financió con 400.000 dólares el proyecto iniciado por su marido, cuya responsabilidad recayó en el director del Observatorio de Harvard, Edward Pickering. Antonia se sintió feliz al concentrar sus esfuerzos en la empresa iniciada por su tío. El primer trabajo que le asignó Pickering fue la determinación del periodo orbital de la binaria por él descubierta Zeta Ursae Majoris. En el curso de la investigación, Antonia descubrió la segunda binaria espectroscópica conocida Beta Aurigae. Durante este trabajo surgió el primer conflicto con el jefe. Pickering anunció el descubrimiento en la reunión de la Academia Nacional de Ciencias en Philadelphia en 1887, haciendo solo una breve reseña "a la contribución de Miss Maury".

Aquí es necesario un pequeño inciso para clarificar cuál era la situación en el Observatorio de Harvard. Cuando Pickering tomó su dirección, recibió el encargo de Mrs. Draper de completar el estudio iniciado por su marido: clasificar 200.000 espectros estelares. Pickering descubrió que las mujeres eran tan buenas como los hombres para dicho trabajo y cobraban tres veces menos, 10,5 dólares por semana. Así que contrató un nutrido grupo de mujeres que durante cuarenta años realizaron dicho trabajo, conocidas como "mujeres cal-



*Cuando Hertzsprung se tropezó con el trabajo de Antonia Maury, descubrió que ella había explicado su descubrimiento con su esquema de clasificación treinta años atrás*

culadoras". Antonia Maury fue la "calculadora" encargada de la catalogación de los espectros estelares del hemisferio norte, para lo que tenía que revisar cientos de placas fotográficas. Se le pedía que las clasificara según el sistema monodimensional desarrollado por Annie Jump Cannon, pero pensó que dicho esquema era demasiado simple para la complejidad que observaba en las líneas de las estrellas. Así que las subclasificó, sin previa consulta al profesor Pickering, atendiendo a la anchura y nitidez de las líneas como: a- líneas anchas y bien definidas, b- líneas confusas pero de la misma intensidad que las de tipo a y c cuando las líneas de hidrógeno y de

helio son estrechas y bien definidas mientras que las de calcio son más intensas. Este trabajo no fue bien recibido por Pickering. Según Hoffleit, "en vez de valorar su esfuerzo por comprender la naturaleza de las estrellas, le irritaba su independencia y autosuficiencia apartándose del trabajo asignado". Debido a las fricciones con Pickering dejó el Observatorio en 1890, aunque volvió esporádicamente en 1893 y en 1895 hasta ver publicado su trabajo en 1897. Durante las dos décadas siguientes impartió clases en la escuela Miss Masson de Nueva York y se encargó de la gestión del Draper Park Museum. Regresó a Harvard como ayudante en 1918 y trabajó bajo la dirección del nuevo director, el profesor Shapley, hasta que se retiró en 1948.

## Avances excepcionales

Dorrit Hoffleit dice: "a pesar de las diferencias con Pickering, ella jamás mencionó su mala relación con él, siendo muy discreta cuando mencionaba su experiencia en el Observatorio de Harvard. En contraste, daba gracias al cielo por las opiniones del astrónomo danés Hertzsprung vertidas sobre su trabajo". Hertzsprung había encontrado diferencias en la luminosidad estelar para estrellas del mismo color. Cuando se tropezó con el trabajo de Antonia Maury descubrió que ella había explicado su descubrimiento con su esquema de clasificación treinta años atrás. Llegó a decir de Maury que "la subclasificación de las estrellas como enanas y gigantes es el avance más importante en la clasificación estelar desde Vogel, a quien debemos el uso del espectrógrafo en astronomía y Secchi, que desarrolló el primer sistema de clasificación estelar". Hay quien opina que incluso la propuso para premio Nobel.

Cuando en 1913 Hertzsprung y Russell crearon el conocido diagrama de evolución estelar, se demostró que Antonia Maury tenía razón. En 1922 la Unión Astronómica Internacional reconoció su clasificación incluyendo el prefijo c para las estrellas que muestran líneas estrechas y bien definidas. En 1943, los astrónomos Morgan, Keenan y Kellman adoptaron la clasificación completa de Maury en una versión revisada del catálogo de Draper conocida como sistema MKK. Ese año le fue concedido a Antonia Maury el premio Annie J. Cannon por desarrollar el sistema de clasificación estelar que Pickering había rechazado.

# A la caza de neutrinos estériles

Además de las tres familias de neutrinos existentes, varios resultados apuntan a que existe una cuarta, que solo puede detectarse por su interacción gravitatoria

► Los neutrinos son una de las partículas más difíciles de cazar para los físicos. Se trata de partículas elementales que, teniendo carga eléctrica nula, interactúan con el resto de la materia solamente a través de la fuerza nuclear débil, lo que dificulta su detección. Desde el descubrimiento del primer neutrino en 1956, estas partículas siguen siendo materia de debate y un campo de investigación muy activo. A día de hoy sabemos con seguridad que existen tres familias diferentes de neutrinos y antineutrinos. En 1998 se descubrió que los neutrinos tienen una masa pequeñísima, no nula como se suponía en el modelo estándar de partículas, aunque todavía no conocemos su valor con exactitud. Este descubrimiento fue de enorme importancia porque constituye una clara evidencia de la existencia de, como se suele decir, física más allá del modelo estándar y, además, la masa de los neutrinos determina sus propiedades y en particular la manera en la que oscilan de una familia a otra.

Como si no fueran suficientes estas tres familias de partículas insensibles a nuestros esfuerzos por estudiarlas, recientemente se han ido acumulando evidencias de la existencia de una cuarta familia de neutrinos aún más difícil de observar. Se trata de los neutrinos estériles, así llamados porque no interactúan a través de la fuerza nuclear débil, sino solo a través de la fuerza gravitacional. Después de casi dos décadas desde la primera evidencia de la posibilidad de su existencia, parece que tenemos más indicaciones positivas. Una proviene del estudio de la radiación cósmica de microondas y otra, aún más reciente e intrigante, de observaciones en rayos X. La radiación cósmica de microondas es una huella importantísima que

nos ha dejado el universo primordial con la que hemos podido obtener algunos de los resultados más impresionantes de las últimas décadas. El estudio de las pequeñísimas fluctuaciones de esta radiación es crucial para nuestra comprensión del universo. La colaboración del experimento WMAP ha publicado recientemente los resultados de las observaciones de la radiación cósmica de microondas de los últimos siete años, y resulta que tienen evidencias de que el número de familias de neutrinos debe de ser cuatro, dejando espacio para la existencia del neutrino estéril.

Otra evidencia muy reciente proviene de las observaciones del satélite de rayos X Chandra. Los investigadores Michael Lowenstein y Alexander Kusenko han utilizado dicho instrumento para observar la galaxia enana Willman 1, satélite de nuestra Vía Láctea. Las galaxias enanas son objetos muy particulares e importantes porque por una parte su masa, como la masa del universo entero, está dominada por materia oscura y, por otra, porque su componente de materia luminosa ordinaria es muy pequeña. Resulta que las galaxias enanas son los objetos con la proporción de materia oscura con respecto a la de materia ordinaria más alta de todos. Esto implica que son objetos ideales para la búsqueda y detección de materia oscura, ya que la emisión debida a la materia ordinaria es muy reducida facilitando así las cosas. Si los neutrinos estériles existen deberían emitir en rayos X a la hora de decaer en neutrinos

más ligeros. Y Lowenstein y Kusenko han detectado una señal consistente con un neutrino estéril de masa de 5 keV. Si la existencia de esta partícula fuera confirmada podría significar un enorme avance para varios campos de la física. Sería claramente un gran descubrimiento para la física de partículas y, además, los neutrinos estériles podrían ser la partícula componente de la materia oscura. Si este fuera el caso, se habría solucionado un misterio que deja sin dormir a los físicos desde hace varias décadas.

No obstante el entusiasmo de un resultado tan "tentador", hay que señalar que está lejos de ser definitivo y debe ser confirmado por otras observaciones y por otros campos de la física. A día de hoy existe bastante desacuerdo sobre las propiedades del posible neutrino estéril. Mientras, como hemos dicho, los resultados de Chandra sugieren la existencia de un neutrino con una masa bastante grande, los resulta-

dos de WMAP apuntan a un neutrino con una masa mucho más pequeña. Está claro que resulta difícil conciliar estos dos resultados, estando aún ambos por confirmar.

Otras indicaciones vienen, y vendrán, de los experimentos de la física de partículas, en particular MINOS y MiniBooNe situados en el Fermilab. Los datos de MiniBooNe, junto con otros experimentos de neutrinos de todo el mundo, también indican la existencia de cuatro familias, dejando espacio para el neutrino estéril. Por otro lado, MINOS está restringiendo cada vez más la ventana de posibilidades para los neutrinos estériles y sus propiedades, haciendo más sencillo el trabajo de astrofísicos y cosmólogos. En fin, el cuadro no está nada claro y está lejos de serlo, pero todo parece apuntar a la existencia de otro neutrino, así que habrá que tener los ojos bien abiertos.

Fabio Zandanel (IAA)



Imagen del experimento MINOS. Crédito: Peter Ginter.

# Un nuevo método para la búsqueda de estrellas subenanas calientes

La escasez de las muestras actuales y su confusión con otros tipos de estrellas azules hacían necesario un nuevo método de búsqueda y catalogación, que se ha llevado a cabo con el Observatorio Virtual

► Desde su hallazgo en 1947, las estrellas subenanas calientes, un tipo de estrellas azules y viejas (o en un estadio evolutivo avanzado), presentan un doble problema. Por un lado, se desconoce cómo se forman, o qué mecanismos provocan que una estrella gigante roja se desprenda de la mayor parte de su envoltura de hidrógeno para dar lugar a una subenana caliente. Y, por otro, se trata de estrellas con apariencia similar a otros tipos de estrellas azules, como las enanas blancas o las estrellas de tipo OB, lo que dificulta su correcta catalogación y estudio -de hecho, su hallazgo se produjo en una campaña de búsqueda de enanas blancas-.

“Habíamos detectado subenanas calientes pulsantes y en sistemas binarios, objetos muy interesantes porque nos permiten conocer su estado evolutivo. Pero constituyen un porcentaje pequeño de las subenanas calientes catalogadas, así que emprendimos el proyecto de detectar nuevas subenanas calientes que nos permitiera hallar objetos de gran interés”, comenta Raquel Oreiro, astrónoma del IAA y especialista en este tipo de objetos.

Gracias a las facilidades del Observatorio Virtual, que permite un acceso rápido y unificado a catálogos masivos, se desarrolló un método que se ha mostrado eficaz en la obtención de muestras no contaminadas.

## Un nuevo método

Primero se realizó un estudio en profundidad de las características de las subenanas calientes bien conocidas, así como de los posibles contaminantes: enanas blancas, variables cataclísmicas y estrellas OB. A continuación, los investigadores emplearon el Observatorio Virtual para obtener los datos de varios catálogos

### ¿CÓMO SE DESPRENDE UNA ESTRELLA DE SU ENVOLTURA?

Las estrellas pasan gran parte de su vida en la secuencia principal, que constituye su etapa adulta y se caracteriza por la obtención de energía mediante la fusión de hidrógeno en el núcleo. Una vez consumido el hidrógeno, la estrella comienza la etapa de gigante roja, en la que las capas externas se hinchan y enfrían -la estrella aumenta su radio unas cien veces y su temperatura desciende-, y el núcleo comienza a quemar helio.

En algunos casos, durante este periodo se produce un fenómeno que da lugar a las subenanas calientes: la gigante roja se desprende de su envoltura de hidrógeno y retiene solo una pequeña fracción, de modo que conserva una estructura formada por un núcleo de helio y una capa de hidrógeno muy poco densa.

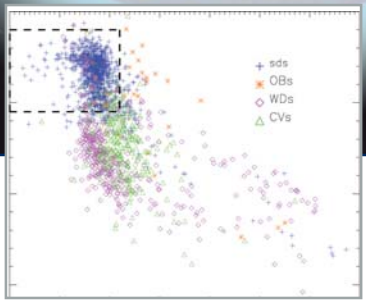
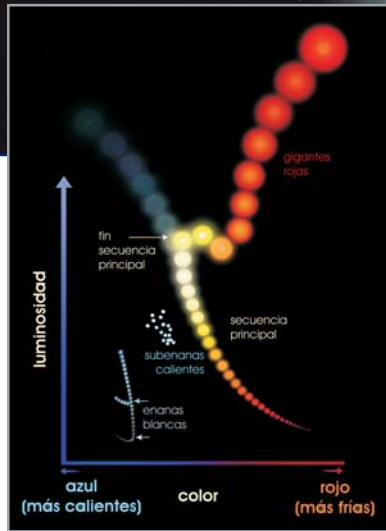
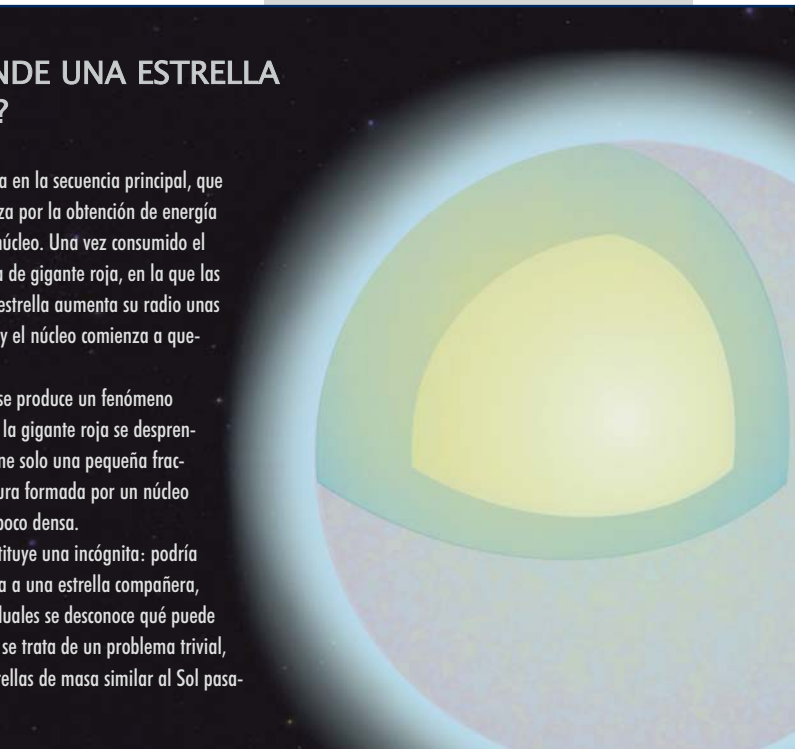
El motivo de esta pérdida de masa constituye una incógnita: podría deberse a que la estrella transfiere masa a una estrella compañera, pero en el caso de las subenanas individuales se desconoce qué puede provocar la pérdida de la envoltura. No se trata de un problema trivial, ya que una fracción considerable de estrellas de masa similar al Sol pasará por este estado evolutivo.

Imagen: concepción artística de una estrella subenana caliente, formada por un núcleo de helio y una capa de hidrógeno muy poco densa (IAA).

(GALEX, 2MASS y SuperCOSMOS) de una muestra de objetos azules, y poder establecer los criterios más eficientes a la hora de distinguir las diferentes clases de objetos.

La aplicación de varios criterios o filtros fue acotando la muestra solo a las subenanas calientes. Por ejemplo, la combinación de los datos de GALEX, 2MASS y SuperCOSMOS, que se centran en el ultravioleta, el infrarrojo y en los movimientos propios de los objetos respectivamente, permitió descartar la mayoría de las enanas blancas, así como una gran parte de las variables cataclísmicas y estrellas OB.

“Un 72% de las subenanas calientes pasaron todos los filtros, y solo un 3%, 4% y 6% de enanas blancas, variables cataclísmicas y



Arriba: Gráfica que muestra cómo los filtros van acotando la muestra solo a las subenanas calientes (cruces azules). Izda: posición de las subenanas calientes en el diagrama HR, que relaciona el color (temperatura) con la luminosidad de las estrellas.

estrellas OB contaminaron la selección, una proporción muy baja comparada con los catálogos usados hasta ahora”, concluye Raquel Oreiro.

Comprobada la eficacia del procedimiento para la selección de subenanas calientes, se aplicó a dos regiones distintas del cielo y se hallaron treinta candidatas, veinti-

séis de las cuales se confirmaron como subenanas calientes, lo que supone un factor de contaminación de solo un 13% y corrobora la validez del método, que ya se está empleando para una búsqueda sistemática de subenanas calientes en la Vía Láctea.

Silbia López de Lacalle (IAA)



# Luz helicoidal para ver agujeros negros

Un agujero negro en rotación podría imprimir un carácter helicoidal a la luz, cuyo estudio permitiría a su vez conocer las propiedades del agujero negro

► Es bien conocido que la luz puede mostrarse en dos formas distintas aunque equivalentes: dos polarizaciones. Podemos hablar de una luz que gira como las agujas de un reloj y otra en sentido antihorario. No hay más que asistir a una película con efectos 3D para experimentar las posibilidades de las luces polarizadas (no todos los cines 3D utilizan el mismo sistema; si observan que la pantalla del cine no es blanca sino plateada, están seguramente en presencia de un sistema basado en la polarización). Nuestro ojo desnudo no es capaz de distinguir entre luces con distinta polarización (algunas personas al parecer pueden en fenómenos como el cepillo de Haidinger), pero un cristal polarizador puede hacer el trabajo por nosotros. Cada cristal polarizador de una gafa 3D deja pasar un solo tipo de luz polarizada, por lo que podemos orquestar que cada ojo vea una imagen dife-

rente, la esencia del 3D. Físicamente, la luz no es ni más ni menos que la propagación de una oscilación en el campo de fuerzas electromagnético. Desde este punto de vista, la polarización circular se puede describir como el giro de la dirección en la que tira la fuerza eléctrica; este giro se produce en todos los puntos del espacio al unísono. Menos conocido es el hecho de que la luz (como cualquier otro campo de fuerzas propagativo) tiene además la capacidad de girar globalmente: un frente de ondas luminosas puede, en ciertas circunstancias, adquirir una forma helicoidal giratoria. Técnicamente, la polarización y la helicoidalidad de la luz se asocian, respectivamente, al espín y al momento angular orbital de los fotones, las oscilaciones elementales de las que se compone la luz. La determinación de la helicoidalidad de la

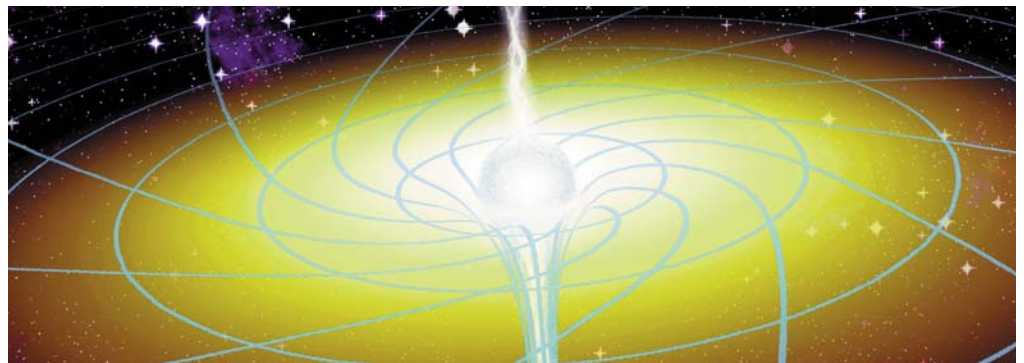
luz recibida abre un nuevo canal de recepción de información sobre los objetos emisores. Este canal podría ser de especial relevancia para la astrofísica. En un futuro quizá hablemos de estudios "helicométricos" además de los habituales estudios polarimétricos.

Recientemente ha aparecido un artículo en *Nature* firmado por F. Tamburini y colaboradores en el que se destaca el hecho de que la rotación de un agujero negro puede imprimir un carácter helicoidal a la luz que se emite en sus cercanías, como la proveniente de discos de acrecimiento a su alrededor. Detectar el grado de rotación de esta luz nos proporcionaría información directa sobre el grado de rotación del agujero negro en cuestión. Estaríamos viendo, directamente, huellas hasta ahora invisibles de agujeros negros.

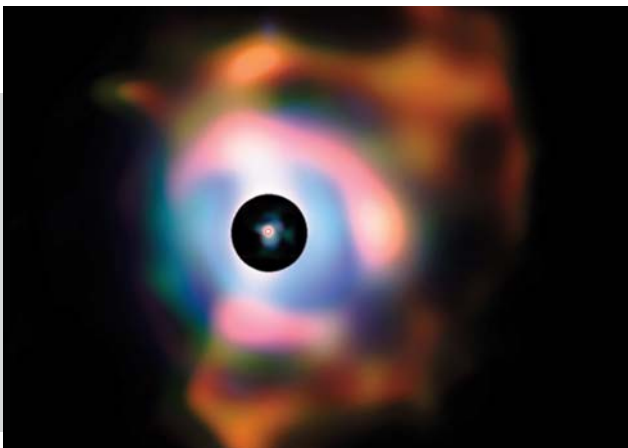
Cuando un agujero negro (una acumulación extremadamente compacta de materia) rota, produce un arrastre del propio tejido espacio-temporal a su alrededor. Aunque este efecto fue predicho tan solo unos años después de la formulación de la teoría general de la relatividad, el efecto conocido como *lense-thirring* o de arrastre inercial no ha podido ser comproba-

do con suficiente precisión hasta nuestros días. De hecho, precisamente este pasado mayo se han publicado los resultados finales del experimento *Gravity Probe B* de la NASA, un satélite diseñado específicamente para medir el efecto de arrastre inercial debido a la rotación de la Tierra. A la luz de este experimento podemos decir que estamos seguros de que el efecto de arrastre existe y de que su magnitud se ajusta a los cálculos relativistas. Pues bien, como los autores del artículo explican, este arrastre rotatorio, que afecta al mismísimo espacio-tiempo, haría que la luz adquiriese una rotación helicoidal como la mencionada. ¿Cómo se detectaría la helicoidalidad de la luz en una observación astronómica? Para detectarla es necesario analizar la estructura espacial del frente de onda. Se han propuesto varias formas de hacerlo. Mencionamos aquí sin dar detalles la utilización de varios interferómetros de *Mach-Zehnder* con prismas *Dove* para ir separando los diferentes grados de rotación de la luz. También la interferometría de varios puntos de imagen. Todo apunta a que estos desarrollos darán mucho que hablar en los próximos años.

Carlos Barceló (IAA)



(Joe Bergeron, revista *Sky & Telescope*)



## EN BREVE

### ¿Betelgeuse en llamas?

► Esta imagen, obtenida por el instrumento VISIR del *Very Large Telescope* (ESO) muestra la nebulosa que rodea a Betelgeuse, una estrella supergigante roja que está expulsando enormes cantidades de material. Betelgeuse, una de las estrellas más brillantes del cielo, se halla en una de las últimas etapas en la vida de las estrellas masivas; una etapa breve, en la que su diámetro aumenta considerablemente y puede llegar a expulsar una cantidad de masa equivalente a la del Sol en 10.000 años.

# Estrellas al borde de un ataque... de ruptura

► Todas las estrellas rotan. Unas lo hacen muy rápido, como los púlsares, con un periodo promedio de medio segundo. Otras son más lentas, como nuestro Sol, y rotan con un periodo de unos treinta días. Uno de los efectos más importantes de la rotación consiste en el achatamiento de la estrella en los polos. Para los púlsares, que son estrellas de neutrones muy compactas, este efecto no es tan importante. Sin embargo, en estrellas comunes que rotan muy rápido, y debido a la baja densidad de sus atmósferas, el achatamiento puede ser notable, como ocurre en estrellas como Regulus o Achernar, que presentan una forma claramente oblonga.

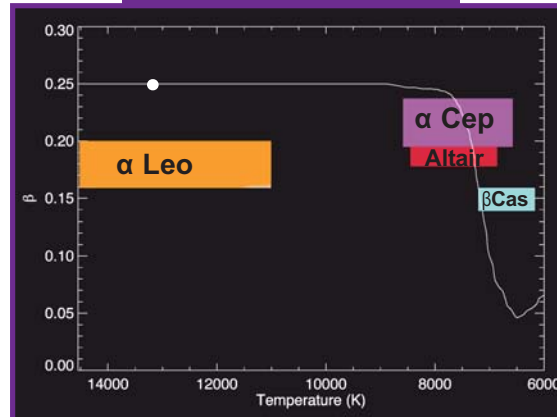
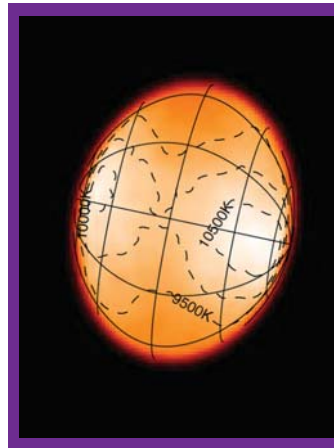
En 1924, el astrónomo sueco Edvard Hugo von Zeipel demostró teóricamente que para estrellas calientes –con temperaturas de más de 8000 grados–, la temperatura es proporcional a la gravedad local. Introducía así un exponente que se conoce como oscurecimiento por gravedad (del inglés *gravity darkening*), que provoca que en una estrella achatada la temperatura en los polos sea mayor que en el ecuador, y que en las ecuaciones viene denotado como  $\beta$  –este exponente describe cómo se distribuye la temperatura en la superficie de una estrella deformada por la rotación. Dicho exponente, que se emplea desde entonces, lleva décadas siendo objeto de debate. Von Zeipel lo situó en 0.25 pero, en 1967, L.B. Lucy calculó que, para estrellas con temperatura inferior a 8000 grados, su valor era de 0.08. ¿Cómo saber si estos valores son acertados? Pues, hasta hace poco, la única forma de comprobarlo residía en el estudio de las estrellas binarias eclipsantes. Pero estas estrellas, además de estar distorsionadas por la rotación, lo están también por las fuerzas de marea: así, la presencia de la compañera “obliga” a tales estrellas a presentar unas distorsiones condicionadas por la evolución por mareas.

En 1998, A. Claret presentó un nuevo

método de cálculo para la determinación teórica del exponente  $\beta$ , que se aplicaba simultáneamente a estrellas calientes y frías. En este método, el oscurecimiento por gravedad se calculó en función de la masa estelar, del estado evolutivo y de la composición química, y no solo en virtud de una temperatura dada, como anteriormente. Este cálculo confirmaba las predicciones de von Zeipel para estrellas calientes, mientras que para estrellas más frías se obtenían valores menores. No obstante, la zona de transición –la franja de temperatura a partir de la cual  $\beta$  disminuye de 0.25– entre unas y otras era más suave, continua y precisa que en los cálculos anteriores. La comparación de estos exponentes con los datos de las estrellas binarias eclipsantes mostraba un buen acuerdo pero, como hemos comentado, las distorsiones de estas estrellas están condicionadas por las fuerzas de marea. Urgía, pues, una comparación con los datos de estrellas que rotaran libremente, sin el condicionante de su compañera.

## Estrellas aisladas

Existían indicios observacionales de que algunas estrellas aisladas rotaban muy rápidamente, con velocidades cercanas a la velocidad de ruptura, en la que las fuerzas centrífuga y gravitatoria se igualan. Sin embargo, las técnicas de la época no eran las adecuadas para detectar y cuantificar la tasa de rotación y llevar a cabo el mapeado termodinámico de sus superficies. Esta situación cambiaría en 2005. Ese año, gracias a la red de telescopios interferómetros CHARA, el grupo de MacAlister y colaboradores determinó empíricamente el exponente  $\beta$  para Regulus ( $\alpha$  Leonis), una estrella defor-



Arriba: reconstrucción de  $\alpha$  Leonis. Centro: valores observacionales de los coeficientes de *gravity-darkening*  $\beta$  (barras de error; Che y colaboradores 2011) y los valores predichos teóricamente en función de la temperatura efectiva. Debajo: diversos grados de achatamiento en los polos, desde el Sol hasta Achernar.

mada hasta tal punto que sus radios polar y ecuatorial difieren en un 30%. Y, lo más llamativo, esta estrella rota a una velocidad de ¡casi el 90% de la velocidad de ruptura! Los investigadores determinaron que la temperatura en los polos de Regulus es de 15.000 grados, mientras que en el ecuador es de apenas 10.000, lo que produce que la estrella sea cinco veces más brillante en sus polos que en su ecuador. Aun más sorprendente es el caso de Achernar, cuya velocidad de rotación es prácticamente la de ruptura, y cuya

diferencia de temperatura supera la de Regulus: en los polos es de 20.000 grados mientras que la del ecuador desciende hasta los 10.000.

Los valores empíricos de los respectivos oscurecimientos por gravedad se encuadraban perfectamente dentro de las predicciones teóricas. Pero tal comparación estaba limitada a estrellas calientes y, por lo tanto, dentro de los límites de aplicabilidad del Teorema de von Zeipel. El aporte de nuevos datos observacionales no es tarea fácil. Las medidas son muy delicadas y difíciles de llevar a cabo y aún más difíciles de analizar. Los datos observacionales todavía aparecen con cuentagotas.

## Una buena y una mala noticia

Muy recientemente, un grupo de la Universidad de Michigan publicaba

nuevos datos para Regulus, pero también para  $\alpha$  Cephei, Altair y  $\beta$  Cassiopeae, más frías. Estos tres últimos sistemas son muy adecuados puesto que están justo en la zona de transición de  $\beta$  predicha teóricamente. La gráfica muestra la comparación entre los datos observacionales (barras de error) y los predichos teóricamente (línea continua). El acuerdo puede ser considerado bueno y confirma la zona de transición de nuestras predicciones teóricas para estrellas que rotan a velocidades cercanas a la de ruptura (para no complicar demasiado la figura, los valores teóricos de  $\beta$  no están corregidos de los efectos de la composición química ni de la evolución nuclear). La figura desvela también un desacuerdo en el caso de Regulus, o  $\alpha$  Leo. Al tratarse de una estrella muy caliente se deben aplicar directamente las predicciones de von Zeipel y, mientras que MacAlister había encontrado un valor de 0.25 (punto blanco en la figura), y por lo tanto, en muy buen acuerdo con el valor teórico, la discrepancia con los más recientes datos es evidente: según los autores de este último resultado, el valor de  $\beta$  estaría entre 0.16 y 0.20. La discrepancia entre ambos resultados observacionales ha reabierto el debate.

Antonio Claret (IAA)

# Tras las semillas de los cúmulos masivos de galaxias

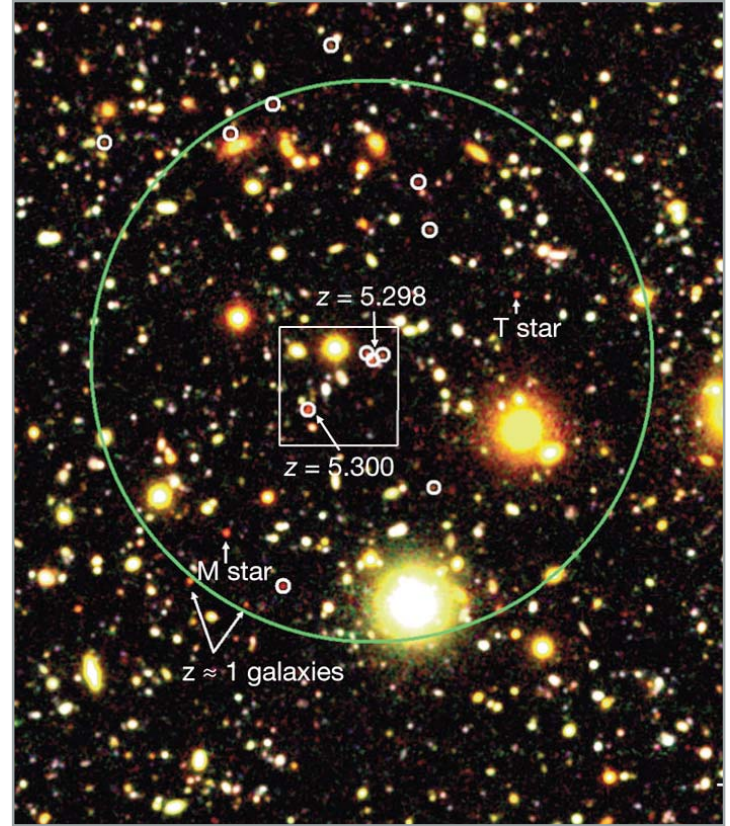
El modelo jerárquico de formación de estructuras en el universo exige que los cúmulos de galaxias se fraguaron en épocas muy tempranas. Se ha hallado una evidencia de ello

► Entre los retos que se resisten a ser conquistados por la Astrofísica moderna se encuentra el proceso que lleva a la formación de las galaxias y, por ende, de los enormes racimos de galaxias que los astrónomos denominamos cúmulos. Los cúmulos de galaxias pueden ser considerados como estructuras enormes, casi “monstruosas” en tamaño, quizá las mayores que pueden llegar a ser autogravitantes. Y, ¿cómo se logra construir estos monstruos en el cosmos? Del mismo modo que los sacerdotes mostraron a Herodoto cómo podían construirse las enormes pirámides, utilizando los grandes bloques de piedra traídos por el Nilo, los astrónomos contamos hoy con una teoría de construcción “jerarquizada” de la formación de las

galaxias en el universo. Así, estas se formarían a partir de “bloques” (es decir, de otras galaxias más pequeñas) que se fusionarían de una forma jerarquizada, de menor a mayor tamaño.

De la misma manera, se piensa que la formación de los cúmulos se fragua “amontonando” muchas galaxias masivas dentro de un gran halo de materia oscura. Este proceso debió ocurrir en una época muy temprana de la historia del universo. Por la misma razón, los protocúmulos (que son el origen a partir del que surgirán más tarde los cúmulos de galaxias que conocemos) debieron formarse mucho antes. Sin embargo, su detección no es sencilla y ¡hay que saber cazarlos!

Un equipo liderado por Peter Capak



## ENTRE BASTIDORES

LA DELGADA LÍNEA ENTRE LA DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y LA CIENCIA FICCIÓN  
SILBIA LÓPEZ DE LACALLE (IAA-CSIC)

Hace poco tuve la posibilidad de ver *Alien Earths* (*National Geographic*), un sobrecogedor documental sobre planetas extrasolares en el que había de todo: anillos, lunas, mares, nubes, tormentas, diamantes, vida... y mucha, mucha especulación. Y tuve la sensación de que aún estaba viendo un episodio de *Fringe*\*. Para dar vidilla a este comentario, intercalaré mi propia estupefacción, en cursiva y entre paréntesis, a la descripción de los hechos.

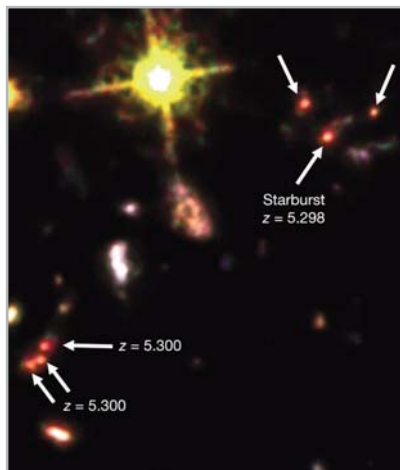
Tras la obligada visita al planeta Pegaso 51b, en la que se toman -para mi gusto, pero entiendo que es discutible- demasiadas libertades al describir sus vientos, sus nubes de hierro e incluso el paraguas que nos haría falta para soportarlas, comienzan a hablar del planeta 16 Cyg Bb, que saltó a los titulares por girar en torno a su estrella en una órbita muy elíptica. Y aparece la imagen de un planeta con anillos y una luna sospechosamente parecida a la Tierra (*ostrí, ¿cómo*

*habrán conseguido detectar esa luna?*). Entonces se suceden varios minutos en los que se describen las extremas estaciones de esa luna, sus terribles tormentas, el momento en el que los océanos hierven y se evaporan, y los preciosos meses en los que el planeta y la luna atraviesan la zona de habitabilidad y surge la vida que después hiberna... o muere (*buff, esto ya se lo están inventando*).

“Imaginen un mundo sin estrella”, sugiere el narrador a continuación. Los planetas, como los llaman, son planetas que han sido expulsados de su sistema planetario. Según Geoff Marcy, uno de los cazaplanetas más reconocidos, “hay cientos de miles de millones de estos pobres planetas vagabundos” (*Pues sí que estoy atrasada, la primera vez que oigo la palabra “planemo”... Algo me suena de planetas sin estrella, pero ¿cientos de miles de millones?*). Se trata de objetos que deambulan solitarios, pero si un pla-

nemo es rocoso y lo bastante masivo como para retener su atmósfera, podría albergar vida (*¡!*). Por otro lado, si se tratara de un planetemo gigante gaseoso, podría tener lunas alrededor y estas, debido a la fricción producida por la interacción gravitatoria, mantendrían su interior caliente. “Podría haber vida en ellos”, asegura una astrónoma del MIT, “de la misma forma que Ío, la luna de Júpiter, presenta volcanes y calor debido a la interacción” (*¡Pero si Ío está achicharrada! ¿Habrá algún tipo de posesión que lleva a afirmar que todo puede contener vida?*).

Al poco, un nuevo sobresalto: ¡tierras con esteroides! (*madre mía...*). “Me gusta llamarlas supertierras”, comenta un científico de Harvard. “Son justo como la Tierra, pero mayores: hasta unas diez veces más masivas” (*¡Justo como la Tierra! Creo que voy a cambiar de canal...*). Y, con ilustraciones de objetos idénticos a nuestro planeta, hablan de los distintos tipos: los que tie-



Izda: área de dos grados estudiada en la búsqueda de protocúmulos. La imagen superior es un zoom a la región recuadrada en blanco donde se distingue el objeto COSMOS AzTEC3 ( $z=5,298$ ) y el protocúmulo detectado ( $z=5,300$ ). Fuente: *Nature*.

de Caltech, del que forman parte destacados miembros de la colaboración COSMOS (*Cosmological Evolution Survey*, un cartografiado profundo de un área de dos grados cuadrados), supo realizar esa búsqueda con una buena estrategia y consiguió cazar un protocúmulo de galaxias realmente muy lejano, formado tan solo mil millones de años tras el Big Bang (técnicamente, a

un corrimiento al rojo de  $z=5.3$ ). ¡Todo un récord! La estrategia observacional consistió en buscar galaxias lejanas con enormes estallidos de formación estelar -las denominadas galaxias *starburst*- que presentasen un entorno muy poblado, con muchos “vecinos”, de forma que entre todos sumaran una densidad de materia luminosa y de materia oscura muy altas. Esta estrategia constituyó todo un éxito. El protocúmulo se encontró cerca del objeto conocido como COSMOS AzTEC3, una fuente emisora de ondas milimétricas. Dentro de una distancia aparente de cuarenta millones de años luz se encuentran también un cuásar y un buen número de otras fuentes, lo que supone una densidad de galaxias luminosas unas diez veces superior respecto a entornos normales. La importancia de que la fuente emita en ondas milimétricas radica en que nos aporta información sobre las enormes reservas de gas de que dispuso este sistema para formar más y más estrellas en el futuro (¡todo el futuro por delante!) y así se llegarían a formar los cúmulos que ahora vemos más cerca de nuestro entorno.

Con toda la información multifre-

cuencia que han acumulado, estos investigadores calculan que el protocúmulo alberga, aproximadamente, más de medio billón de masas solares (exactamente más de  $4 \times 10^{11}$  veces la masa del Sol). Este resultado es muy relevante pues parece estar de acuerdo, cuantitativamente, con las predicciones de los modelos teóricos de formación de estructuras masivas. Este trabajo de investigación tan ambicioso ha utilizado los mejores medios disponibles: grandes telescopios ópticos/infrarrojos en tierra como *Keck II* y el CFHT en Hawaii; telescopios espaciales como HST *Hubble*, *Chandra* (rayos X) o *Spitzer* (infrarrojo); radiotelescopios como el interferómetro de Plateau de Bure, la antena de treinta metros IRAM en Pico Veleta, el eVLA y el telescopio milimétrico James Clerk Maxwell en Hawaii. Se trata de un gran hallazgo científico: se confirma que estos protocúmulos ya existían en el universo en épocas muy tempranas, y que constituyeron las semillas de la formación de estructuras masivas en el universo primitivo.

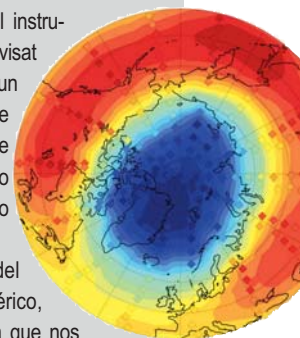
José M. Vilchez y Antxon Alberdi (IAA)

## EN BREVE

### Agujero de ozono

Los datos del instrumento MIPAS (Envisat /ESA) mostraron un descenso notable de los niveles de ozono en el Ártico durante el pasado mes de marzo.

La destrucción del ozono estratosférico, que forma la capa que nos protege de la radiación solar ultravioleta, se produce por la acción de los compuestos de cloro y bromo (los CFCs). Aunque la distribución de los CFCs es prácticamente homogénea en todo el globo, sus efectos son mayores en los polos debido al vórtice polar, un potente anticiclón que se forma en la baja estratosfera (a unos 30 kilómetros de altura). El descenso del ozono se ha debido al frío del pasado invierno polar: las bajas temperaturas favorecen la formación de nubes de hielo, y en la superficie de los cristales de hielo se producen reacciones químicas que transforman los productos del cloro en otros que, con la llegada de la luz en la primavera, destruyen el ozono.



nen continentes y mares, los secos y los mundos acuáticos. “Bienvenidos a Gliese 581c”, invita el narrador (*Vaya, otra vez el cuento chino de Gliese...*). Los detalles son abrumadores: Gliese 581c, un mundo cubierto de agua -fotos con mucha agua-, “un cielo azul, algunas nubes blancas, una temperatura muy similar a la terrestre y un clima absolutamente perfecto todos los días” (no les engaño, son citas textuales del documental). Y, claro, vida a borbotones.

“Pero no todas las supertierras son mundos acuáticos que rebosan vida”, asegura el narrador. “Un planeta de carbono es algo que no se parece a nada que hayamos visto”, continúa, y detallan profusamente su apariencia y clima, con lagos malolientes de gasolina y lluvia de benceno y butano.

El documental terminó tarde, y al día siguiente hice los deberes: confirmé que la luna de 16 Cyg Bb solo existe en la imaginación de los guionistas, encontré una única referencia a planetas sin estrella descubiertos (una pareja de gigantes gaseosos), aunque poco después se

publicó el hallazgo de una decena más, y vi que las tierras de carbono son una hipótesis planteada en 2005 en *astro-ph*, una publicación sin arbitraje. Ya en el número 22 de esta revista (p.17) criticábamos el alto nivel especulativo del artículo que anunciaba la existencia y rasgos de Gliese 581c, pero lo gracioso es que este prometedor mundo rebosante de vida cayó en desgracia hace tiempo a favor de Gliese 581g, anunciado como el “primer planeta realmente habitable” (auguro que este titular se repetirá a menudo) y cuyo reinado fue aún más breve: a día de hoy figura en la Enciclopedia de Planetas Extrasolares en la sección de “Planetas no confirmados, controvertidos o falsos positivos”.

Ante este tipo de documentales tiendo a pensar que nos toman por tontos: que los guionistas y científicos de *Alien Earths* creían que los exoplanetas no interesarían a nadie si no apelaban a los marcianos. Pero lo más grave reside en lo que no se dice: que lo que vemos son ilustraciones, que la mayoría de estos planetas se descubrieron por técnicas indirectas que solo permi-

ten determinar la masa mínima del planeta -de modo que las suposiciones sobre sus características (clima, composición, etc) son bastante especulativas-, y que los errores y falsos positivos abundan.

Seguro que, a la velocidad a la que progresa este campo, se hallarán objetos como los que predicen, pero convertir el “quizá haya” en “hay” es arriesgado: alguien que no disponga de las herramientas para verificar lo que dicen terminará el documental convencido de que hay lunas con plantas, planetas con vida bacteriana y una supertierra con mares y un clima espléndido, y los datos indican que al menos esto último es mentira. El progreso científico es suficientemente fascinante como para que pueda comunicarse sin estos peligrosos aditivos que, además, desgastan la confianza en la ciencia y en la divulgación científica.

Como último apunte recomendaría que lo vieran (está disponible en internet): constituye un excelente compendio de lo que no hay que hacer para comunicar la ciencia.

# Un estallido único y extremadamente intenso en el núcleo de una galaxia lejana

Podría deberse a la ruptura de una estrella próxima por el agujero negro supermasivo del centro de la galaxia

► El pasado 28 de marzo, el satélite Swift (NASA) alertaba de la detección de una inusual emisión de rayos gamma. En un principio se creyó que se trataba de uno de los ya conocidos estallidos de rayos gamma –o GRBs, de sus siglas en inglés-, que suelen asociarse con la muerte de estrellas muy masivas y pierden intensidad en cuestión de minutos. Pero Sw 1644+57 no solo mantuvo su luminosidad, sino que se reactivó otras tres veces en 48 horas y muestra una intensidad nunca vista en todas las longitudes de onda, desde rayos gamma hasta radio. Tras un primer análisis quedó claro que no se trataba de un GRB y que su explicación requería de algún nuevo tipo de fuente desconocida hasta la fecha.

Un grupo internacional de astrónomos, en el que participan investigadores del IAA, publicó en la revista *Science Express* los resultados de un estudio intensivo del objeto que atribuye su origen a un mecanismo nunca visto y relacionado con el agujero negro supermasivo en el núcleo galáctico. "El escenario más plausible indica que el estallido podría deberse a la ruptura y caída hacia el agujero negro de parte del gas una estrella próxima, aunque de momento se tra-

ta de una hipótesis", comenta Juan Carlos Tello, astrónomo del IAA que participa en la investigación.

## Un seguimiento excepcional

Pocas horas después del estallido, los investigadores emplearon instrumentos en tierra para localizar la contrapartida en óptico de la emisión en rayos gamma. Los datos obtenidos con los telescopios Gemini-North (Hawaii), Gran Telescopio Canarias (La Palma) y Keck (Hawaii) desmintieron la hipótesis inicial que ubicaba el evento dentro de nuestra galaxia y lo localizaron en una galaxia a unos 3,8 miles de millones de kilómetros de distancia. Se inició entonces una campaña internacional de seguimiento para dilucidar la naturaleza de Sw 1644+57 con algunos de los más avanzados instrumentos disponibles, como el satélite de rayos X Chandra, el Telescopio Espacial Hubble y el *Very Large Baseline Array* (VLBA). Los investigadores hallaron que el objeto emitía con fuerza en todo el

espectro electromagnético, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio, y lo ubicaron en las densas regiones centrales de la galaxia.

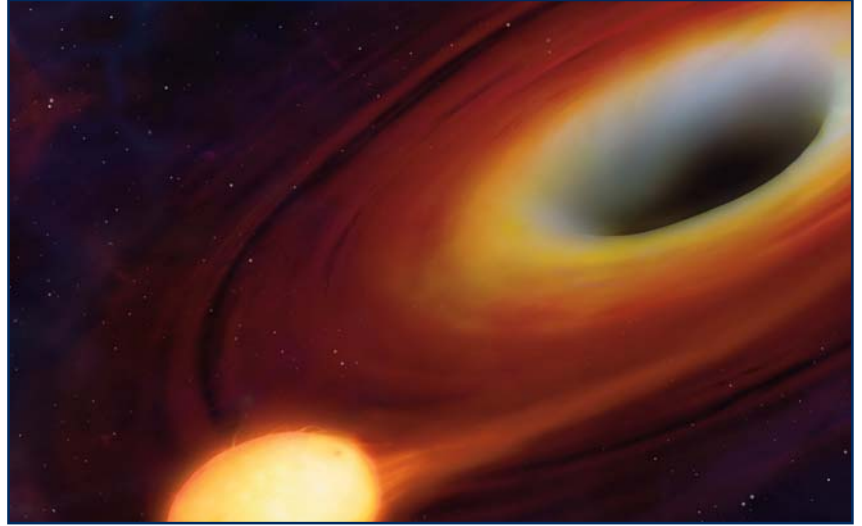
La intensidad, duración y carácter variable Sw 1644+57 lo convertían en un objeto astronómico sin precedentes que, dada su posición, parecía estar relacionado con el agujero negro supermasivo en el núcleo de la galaxia. El pico máximo de brillo correspondería a un agujero negro de unas diez mil millones de masas solares lo que, sin embargo, supera la masa total de la propia galaxia e indica que en los alrededores del agujero negro ha debido producirse una intensa fulguración, quizá debido a la ruptura de una estrella en las pro-

ximidades (posibilidad que contempla otro artículo que se publica en la misma edición de *Science Express*).

## Observatorios empleados en la campaña de observación:

Satélite Swift (NASA), Gemini-North Telescope (Hawaii), Nordic Optical Telescope (NOT, La Palma), Gran Telescopio Canarias (GTC, La Palma), Keck Telescope (Hawaii), United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT, UK), Peters Automated Infrared Imaging Telescope (PAIRITEL), Chandra X Ray Observatory, Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM), Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT), Hubble Space Telescope y Very Large Baseline Array (VLBA).

Silbia López de Lacalle (IAA)



Impresión artística de un agujero negro absorbiendo una estrella mediante fuerzas de mareas destructivas. La gravedad del agujero negro distorsiona la forma de la estrella hasta que la despedaza. Fuente: University of Warwick/Dr Mark Garlick.



## EN BREVE

### La Luna, por dentro

► Hace más de tres décadas, los astrónomos de las misiones Apollo depositaron sismómetros en la superficie de la Luna para determinar cómo es por dentro.

Al igual que en los terremotos terrestres –aunque los lunares son más débiles y poco frecuentes–, un terremoto lunar genera ondas sísmicas que se desplazan por su interior. El estudio de estas

ondas permite conocer el tipo de terreno que han atravesado y, recientemente, dos grupos de investigadores han reanalizado los datos de las Apollo con las técnicas actuales y han hallado que, al igual que en la Tierra, la Luna posee un núcleo de hierro fundido. Según estos estudios, la estructura interna de la Luna (de dentro afuera) consistiría en un núcleo interno sólido de unos 240 kilómetros, un núcleo externo fluido con un espesor de unos 90 kilómetros, una capa de roca y magma parcialmente derretida de unos 150 kilómetros de grosor, el manto y la corteza.

Un problema pertinaz

# LA ESTABILIDAD DE LA ATMÓSFERA DE MARTE

## Pilares científicos

Una atmósfera es un sistema complejo, donde tienen lugar procesos fotoquímicos, fenómenos de transporte radiativo, de evaporación y condensación, difusión y escape,

conducción... También hay precipitación de partículas cargadas del flujo solar, fenómenos aurorales, ionosferas en interacción con campos magnéticos planetarios, descargas eléctricas y un largo etcétera. Como todo campo multidisciplinar,

la investigación en atmósferas planetarias hace uso de numerosas y diversas teorías físicas y químicas, y en este caso la mayoría son bien conocidas, basadas en ideas de física clásica bien descritas, desarrolladas y utilizadas desde hace tiempo.

## Incertidumbres

AÚN PERDURAN E INCLUSO SE REACTIVAN ANTIGUOS PROBLEMAS

Pero la aplicación de la teoría a problemas concretos puede estar llena de obstáculos. Uno de los problemas relacionados con la atmósfera de Marte apareció en los comienzos de la exploración espacial, cuando se confirmó (con datos de Mariner 9) que, al contrario que en la Tierra, la atmósfera de Marte apenas contenía nitrógeno, sino que se componía casi enteramente de dióxido de carbono. Me refiero al llamado problema de la estabilidad atmosférica en Marte, o cómo se explica la estabilidad fotoquímica del  $\text{CO}_2$ , que puede ser destruido rápidamente por la radiación solar ultravioleta, especialmente en las capas altas atmosféricas; la molécula de  $\text{CO}_2$  se descompone rápidamente en monóxido de carbono y oxígeno atómico y, dada la lentitud de la reacción de recombinación directa, se calculaba que una atmósfera de  $\text{CO}_2$  desaparecería en unos cientos de miles de años: un "instante" a escala planetaria.

La solución a este problema necesitó un refinamiento de los modelos fotoquímicos en la primera mitad de los años 70, con los que se buscaron mecanismos "ocultos", o alternativos, para "recuperar" el  $\text{CO}_2$ . Se impuso la idea de la existencia de rutas catalíticas en las que participan compuestos de hidrógeno impar ( $\text{OH}$  y  $\text{HO}_2$ ), productos de la fotólisis del vapor de agua. El vapor de agua es un compuesto minoritario en la atmósfera marciana, pero parecía suficiente para recomponer el  $\text{CO}_2$  en las capas más bajas de su atmósfera. No todo encajaba bien (se requería también un transporte vertical por difusión turbulenta muy grande), pero se pensaba (o deseaba) que si hubiese suficiente vapor de agua... todo encajaría.



Sin embargo, pocos años después comenzaron las primeras medidas *in situ* con las sondas Viking, y en la década de los 90 la exploración intensiva con vehículos en superficie y orbitales para sondeo remoto. También comenzaron a aplicarse modelos atmosféricos globales que describen mucho mejor la compleja y cambiante interacción entre química, dinámica y radiación a diversas escalas espaciales y temporales. Y también se han mejorado en laboratorio muchas constantes de reacción.

Tras todo esto, ¿ha cambiado la teoría básica? No. ¿Ha cambiado nuestra visión de la atmósfera de Marte? ¡Sí! Hasta el punto de que el problema de la estabilidad de Marte ha surgido de nuevo. Y es que, como se dice, el diablo está en los detalles. Y ahora se conocen muchos más detalles.

Voy a recordar cuatro avances concretos y las dudas que generan:

1) Las medidas de laboratorio en los años 90 revisaron (a la baja) la tasa de fotólisis del  $\text{CO}_2$  debido a su dependencia con la temperatura. Esto eliminaba la necesidad de una difusión elevada, pero generaba la duda de si alteraba la estabilidad de la atmósfera en la dirección opuesta, hacia un exceso de  $\text{CO}_2$ .

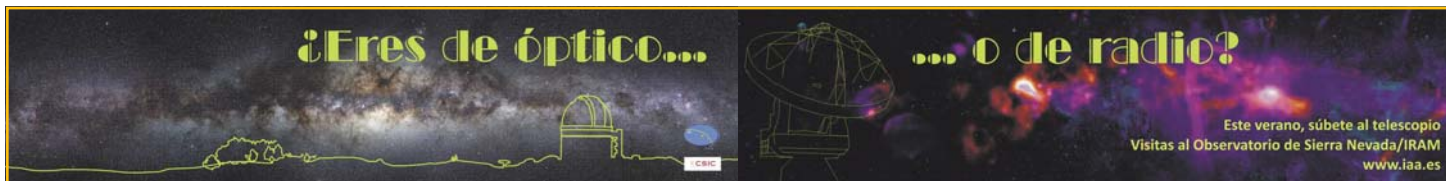
2) La abundancia de vapor de agua sigue ciclos estacionales y está ligada a la cantidad de polvo en la atmósfera, que también varía. Esto debe modificar la abundancia de los agentes catalizadores del  $\text{CO}_2$  (H impar), y por tanto la estabilidad.

3) La órbita de Marte es caótica (con cambios de inclinación pseudoperiódicos de hasta 40 grados). Esto implica cambios climáticos severos, con redistribución y modificación de la abundancia de vapor de agua y del H impar. Además, como Viking demostró hace cuatro décadas, la atmósfera marciana sufre grandes alteraciones anuales cada invierno, cuando el  $\text{CO}_2$  se condensa sobre los casquetes polares. ¿Cómo afectan estos escenarios de cambios caóticos grandes al H impar, a la densidad total, y a la estabilidad?

4) En 2004 se detectó metano en la atmósfera marciana, difícil de explicar con los modelos actuales. Una de las teorías recurre a la química heterogénea (procesos en dos fases -gas y sólido- sobre la superficie de las partículas de aerosoles). De ser cierto, la química heterogénea también debería ser relevante para la química de restitución del  $\text{CO}_2$ . Y la cuestión de la estabilidad se complica, pues estos procesos son muy desconocidos y difíciles de simular en laboratorio.

En vista de este panorama, ¿es estable la atmósfera marciana? Parece que nadie hoy día podría asegurarlo. Pero todos parecemos convenir en que para resolver la cuestión no hay que revisar los pilares de la teoría, sino realizar nuevas observaciones, afinar las medidas de laboratorio y extender los estudios teóricos para seguir descifrando todos esos "detalles"... donde sigue escondido el diablo.

## VISITAS AL OBSERVATORIO DE SIERRA NEVADA



Por sexto año consecutivo, el Instituto de Astrofísica de Andalucía organiza visitas guiadas al Observatorio de Sierra Nevada y al Instituto de Radioastronomía Milimétrica, en colaboración con el Albergue Universitario de Sierra Nevada y tres asociaciones de astrónomos aficionados: la Sociedad Astronómica Granadina, la Asociación Astronómica Astronémesis y la Agrupación Astronómica Hubble de Martos. Las visitas tendrán lugar el 2, 9 y 23 de julio, 6 y 27 de agosto y 3 de septiembre, y el número de plazas está limitado a 40 personas por visita. Al igual que otras ediciones, habrá dos modalidades: de un día o de fin de semana. Las reservas se pueden realizar enviando un correo electrónico a la dirección [albergue@nevadensis.com](mailto:albergue@nevadensis.com) o en el número 958480122. Más info: <http://w3.iaa.es/divulgacion/visitasOSN2011.html>

## AÑO DE LA QUÍMICA 2011

Este año celebramos al Año de la Química, bajo el lema "Química: nuestra vida, nuestro futuro". El CSIC ha preparado una web muy completa y actualizada con excelentes contenidos: una exposición – que ofrece desde una visión general de la química y su papel en la ciencia hasta las aportaciones a lo largo de la historia y su relación con el medio ambiente, la salud, la energía o la alimentación (se puede descargar desde la web)–, materiales didácticos, recursos educativos, agenda de actividades y listado de publicaciones.

<http://www.quimica2011.es>



## NUEVA WEB DEL IAA



### El IAA ha cambiado de web

La sección de divulgación permite ver los vídeos de las conferencias de divulgación, acceder a gran parte del material editado duante más de diez años o consultar esta

revista en un nuevo formato online. También disponemos de un canal Youtube y una página de Facebook.

[www.iaa.es/es](http://www.iaa.es/es)



## CHARLAS DIVULGATIVAS PARA COLEGIOS

El IAA organiza mensualmente charlas de divulgación astronómica para estudiantes, a petición de los colegios interesados. Pueden obtener más información en la página Web del instituto o contactando con Emilio J. García (Tel.: 958 12 13 11; e-mail: [garcia@iaa.es](mailto:garcia@iaa.es)).