



SUNRISE

más cerca del Sol

HD 209458b y los modelos de atmósferas estelares

¿Viajaremos más rápido que la luz?

Edwin Hubble

Formación de estrellas masivas



Director: Carlos Barceló. Jefa de ediciones: Silbia López de Lacalle. Comité editorial: Antxon Alberdi, Emilio J. García, Rafael Garrido, Javier Gorosabel, Rafael Morales, Olga Muñoz, Iván Agudo, Julio Rodríguez, Pablo Santos y Montserrat Villar. Edición, diseño y maquetación: Silbia López de Lacalle. Imprime: ELOPRINT S.L.

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

Sunrise, una aventura polar ...3

Nuestra tormentosa estrella ...5

¿Son válidos los modelos de atmósferas estelares? ...7

¿Viajaremos más rápido que la luz? ...9

HISTORIAS DE ASTRONOMÍA. Últimas tardes con Hipatia ...11

DECONSTRUCCIÓN Y otros ENSAYOS. Edwin Hubble ...12

EL "MOBY DICK" DE... Antxon Alberdi (IAA-CSIC)...14

ACTUALIDAD ...15

Betelgeuse en ebullición

¿Qué supone el hallazgo de glicina en el cometa 81P/Wild?

¿Existe el cinturón de Gould?

Cosmología de alta precisión con supernovas

Púlsares silenciosos en radio pero ruidosos en rayos gamma

El Quinteto de Stéphan

Ecos gravitatorios del Universo primordial

Júpiter castigado

ENTRE BASTIDORES ...22

CIENCIA: PILARES E INCERTIDUMBRES

Formación de estrellas masivas ...23

FE DE ERRATAS

En la contraportada del número 28 aparecía una reseña sobre la colaboración con *El País Digital* llevada a cabo con motivo del AIA-IYA2009. Debemos añadir que dicha colaboración se lleva a cabo por la Sociedad Española de Astronomía (SEA).

El telescopio *Sunrise*, du
Kiruna. Fuente: Carlye C



Una aventura polar



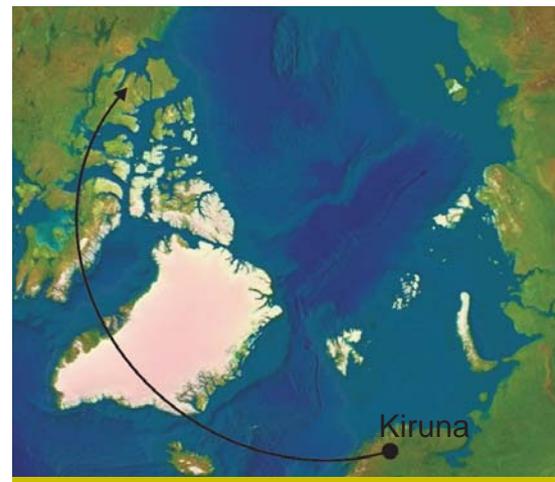
SUNRISE, UN TELESCOPIO SOLAR QUE VIAJA EN GLOBO PARA ESTUDIAR EL CAMPO MAGNÉTICO DEL SOL, YA HA COMPLETADO SU PRIMERA MISIÓN CON ÉXITO
 Por Jose Carlos del Toro (IAA-CSIC)

SOBREVOLAR EL POLO NORTE A CUARENTA KILÓMETROS DE ALTURA CON UNA BARQUILLA DE DOS TONELADAS DE PESO QUE CONTIENE UN TELESCOPIO SOLAR TAN GRANDE COMO EL MAYOR DEL MUNDO, con su instrumentación de alta tecnología, en busca de valores más precisos del campo magnético solar, podría ser una definición corta de la misión *Sunrise* en la que estamos implicados cinco instituciones españolas junto con otras de Alemania y los Estados Unidos.

El globo estratosférico *Sunrise* se lanzó el pasado 8 de junio desde una estación en el corazón de la Laponia sueca, 200 kilómetros al norte del Círculo Polar Ártico. Tradicionalmente, los físicos solares nos hemos referido al “Sol en calma” por contraposición al “Sol activo”, esto es, a aquellas regiones del Sol que poseen un intenso magnetismo. Actividad y magnetismo han sido palabras sinónimas en la jerga especializada. Así pues, decir “en calma” era equivalente a decir “no magnético”. Sin embargo, en los últimos tres años, la comunidad solar ha sido testigo de una verdadera revolución del concepto de “Sol en calma”, puesto que este se ha observado cubierto casi por doquier de estructuras magnéticas que, por su pequeño tamaño, habían escapado a la observación hasta entonces.

Los telescopios solares

Los avances científicos más recientes en Física Solar, y en general en toda la Astronomía, suelen ir aparejados con avances tecnológicos. Hasta hace bien poco, los mejores datos espectropolarimétricos* tenían resoluciones espaciales equivalentes a unos cuatrocientos kilómetros en la superficie solar. El satélite japonés *Hinode* (con participaciones americana y británica), en órbita desde sep-



tiembre de 2006, viene realizando regularmente una espectropolarimetría con resolución espacial de doscientos kilómetros en el Sol, gracias a que su telescopio de cincuenta centímetros de apertura se encuentra fuera de la acción perturbadora de la atmósfera. Ha sido precisamente este aumento en resolución el que nos ha permitido encontrar las pequeñas estructuras magnéticas, fundamentalmente hori-

* MEDIR EL CAMPO MAGNÉTICO

La espectropolarimetría es el conjunto de técnicas que se utilizan para la medida y el análisis de la luz (radiación electromagnética) y de su estado físico, atendiendo tanto a su composición en longitudes de onda (espectro) como a su estado de polarización. La polarización tiene que ver con la dirección de vibración asociada a la radiación electromagnética. La espectropolarimetría es esencial para medir el vector campo magnético solar puesto que este deja sus huellas polarizadas en el espectro de la luz.

durante la preparación del lanzamiento en la base de e Calvin, UCAR.

zontales, del Sol en calma. Como además tenemos constancia de que la resolución no es aún suficiente (los píxeles de nuestras cámaras no están llenos de estructuras magnéticas), tenemos la certeza de que dar un paso más en la tecnología, que nos traslade hasta unos setenta kilómetros de detalle en el Sol, nos permitirá dilucidar la distribución espacial y comprender mejor las propiedades del campo magnético solar.

Podemos aumentar la resolución espacial de forma directa si aumentamos el tamaño de nuestros telescopios. El telescopio solar al vacío de la Academia de Ciencias sueca, el más grande actualmente en operación en el mundo, con un metro de apertura e instalado en el Observatorio de El Roque de los Muchachos en la isla de La Palma, está comenzando a suministrar magnetogramas (mapas del campo magnético) con resoluciones cercanas a los setenta kilómetros citados, pero la atmósfera impide la mínima estabilidad que se requiere para que los datos alcancen la calidad necesaria. La única solución reside en liberarse de la atmósfera manteniendo el tamaño del telescopio.

La misión *Sunrise* consiste precisamente en eso, en poner a cuarenta kilómetros de altura un telescopio de un metro de apertura. Si además esto se hace sobre el polo, lo que permite observar el Sol durante veinticuatro horas al día, las condiciones resultan óptimas. El vuelo se realizó mediante un globo aerostático proporcionado por la NASA, desde la estación de lanzamiento de la Agencia Espacial Sueca en Esrange, cerca de Kiruna (Suecia),

doscientos kilómetros al norte del círculo polar ártico. Si la barquilla con toda la instrumentación científica pesaba unas dos toneladas, el conjunto con el globo, los cables y los paracaídas llegaba hasta las seis toneladas. Semejante ingenio ascendió grácilmente hasta que, a su altura de equilibrio de unos cuarenta kilómetros, los vientos presentes en la estratosfera

La única solución reside en liberarse de la atmósfera manteniendo el tamaño del telescopio

Ni el más frágil de los instrumentos, el espejo del telescopio, sufrió daños durante el aterrizaje

transportaron a *Sunrise* hasta el norte del Canadá durante seis días, circunvalando el polo Norte. Una vez allí, tras separarse del globo, la barquilla con el telescopio y toda su instrumentación descendieron en paracaídas en la isla canadiense de Somerset, en una región helada de difícil acceso que dificultó las labores de rescate. A pesar de las dificultades, la recuperación se llevó a cabo según lo previsto y ni el más frágil de los instrumentos, el espejo del telescopio, sufrió daños durante el aterrizaje. Ahora queda todo el tra-

bajo de análisis de los datos contenidos en los discos duros, pero el éxito de este primer viaje ya ha compensado parte de los esfuerzos de siete años de un buen puñado de científicos e ingenieros.

Sunrise, características técnicas

El telescopio cuenta con un correlador y un sensor de frente de onda que, de forma adaptativa, corrige las pequeñas perturbaciones residuales que pueda sufrir, asegurando una puntería de 3,6 kilómetros sobre el Sol. Los instrumentos posfocales son SUFI (*Sunrise Filter Imager*), una cámara ultravioleta con la mayor resolución jamás lograda, e IMAx (*Imaging Magnetograph eXperiment*) un magnetógrafo vectorial diseñado para obtener mapas del campo magnético solar como hasta ahora nadie había conseguido. El magnetógrafo IMAx ha sido fruto de la colaboración entre el IAC, el IAA-CSIC, el INTA y el GACE-UV. Es el primer instrumento para plataforma aeroespacial íntegramente concebido, diseñado, construido, e integrado en España por instituciones españolas. De hecho, es el primer magnetógrafo europeo en vuelo; sus dos anteriores precursores son norteamericanos. En su diseño se han incorporado nuevas tecnologías hasta ahora no probadas en el espacio, como el uso de retardadores ópticos de cristal líquido. Este novedoso diseño hace de IMAx el precursor de otro magnetógrafo que hemos comenzado a desarrollar para volar en la plataforma *Solar Orbiter* de la Agencia Espacial Europea (ESA).

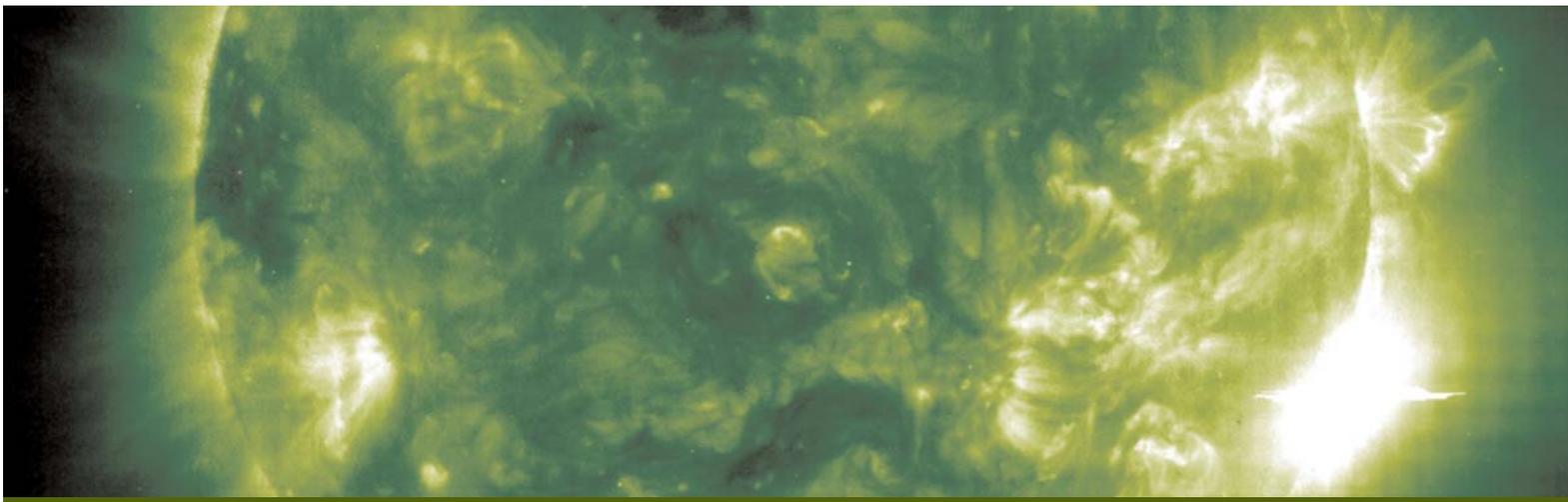
EL EQUIPO SUNRISE

Un consorcio germano hispano norteamericano emprendió en 2002 esta aventura. Liderados por el *Max Planck Institut für Sonnensystemforschung* (Alemania), el consorcio cuenta con el *Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik* (Alemania), el *High Altitude Observatory* (EEUU), el Instituto Ignacio da Riva de la Universidad Politécnica de Madrid, el Instituto de Astrofísica de Canarias, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, el Grupo de Astronomía y Ciencias del Espacio de la Universidad de Valencia y el Instituto de Astrofísica de Andalucía del CSIC.

A la izda, el espejo primario de SUNRISE, recuperado intacto en Canadá. A la dcha, la misión en vuelo.

Fuente: SSC/WERNER DEUTSCH y Carlye Calvin, UCAR.





Nuestra tormentosa estrella

LA ROTACIÓN DE LAS CAPAS INTERNAS DEL SOL PARECE CONSTITUIR EL ORIGEN DEL INTENSO CAMPO MAGNÉTICO SOLAR

Por Silbia López de Lacalle (IAA-CSIC)

EN 1989, TODA LA PROVINCIA DE QUEBEC, EN CANADÁ, SUFRIÓ UN APAGÓN GENERAL DE NUEVE HORAS que afectó a millones de personas. Mientras, en California, las puertas de los garajes se abrían y cerraban sin cesar. Y en el norte de España se observaban llamaradas rojizas en el cielo, que se confundieron con extraterrestres e incendios y resultaron ser auroras. ¿El culpable? Pues a 150 millones de kilómetros: el Sol.

Y es que el Sol no emite energía de manera uniforme, sino que presenta fenómenos

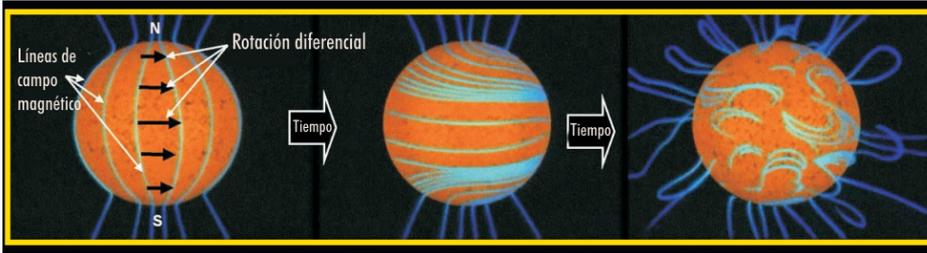
desconcertantes. Para empezar tiene manchas, o regiones algo más frías que, en comparación con el resto de la superficie, vemos oscuras. Además, bastante a menudo sufre fulguraciones, explosiones que liberan la energía de millones de bombas de hidrógeno en pocos minutos. O de repente expulsa al espacio enormes burbu-

jas de gas, las llamadas eyecciones de masa coronal, que despiden de media unos 1.600 millones de toneladas de materia. Y estos fenómenos, que se agrupan en lo que se conoce como actividad solar, presentan una recurrencia periódica de once años: al comienzo del ciclo la actividad es reducida (pocas manchas, pocas fulguraciones...) y aumenta hasta llegar al máximo. Raro, ¿verdad? Pero lo mejor es que todo ello se puede explicar con una causa común, el campo magnético.

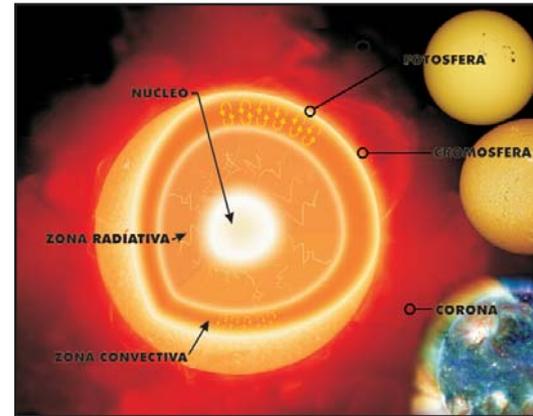
Para entender cómo se produce el campo magnético solar hay que conocer algunos de los rasgos de nuestra estrella: el gas que lo compone está tan caliente que se configura como un plasma, una forma de materia en la que los electrones se han separado de los núcleos de los átomos y, por lo tanto, tiene carga eléctrica. Al poner en movimiento grandes masas eléctricamente cargadas surge el campo magnético, y en el Sol prácticamente nada



Arriba, una fulguración solar, captada por el satélite SOHO de la NASA. A la izda, un bucle de materia que une dos regiones muy magnetizadas (TRACE/NASA).



Arriba: torsión de las líneas de campo magnético, que emergen a la superficie y forman bucles magnéticos. Derecha: las distintas capas del Sol. Se cree que el campo magnético se genera en la división entre la capa radiativa y la convectiva.



está quieto: rota, pulsa, y en una zona interna incluso burbujea de forma similar al agua hirviendo (grandes burbujas de gas caliente ascienden hacia la superficie, donde se enfrían y vuelven a descender). Aunque posiblemente todos estos movimientos contribuyan a la creación del campo magnético, se cree que hay una región clave, justo debajo de la zona donde el gas está en ebullición (o zona convectiva), donde se produce un cambio dramático relacionado con la rotación de la estrella que genera y amplifica ese campo. El Sol presenta lo que se conoce como rotación diferencial, que consiste en que las regiones ecuatoriales rotan más

rápido, con un periodo de unos veintiséis días, que los polos, que completan una vuelta en más de treinta días. Esto es algo típico de las estrellas al ser cuerpos gaseosos, pero en el Sol esa rotación diferencial sólo se produce hasta cierta profundidad: si dibujamos una trayectoria desde la superficie del Sol hasta su núcleo, a partir del 28% de ese camino se pierden las diferencias entre el ecuador y los polos y el Sol gira como si fuera un cuerpo sólido. Para visualizarlo podríamos pensar en el Sol como una *matrioska*, esa muñeca rusa que contiene otra en su interior: la de dentro gira rígidamente cada veintiocho días, mientras que la de fuera anda más desordenada, con la cabeza y los pies girando cada treinta días y la barriga cada veintiséis. Incluso los profanos podemos imaginar que ahí tiene que ocurrir algo, y los científicos creen que las fuerzas generadas por el “encontronazo” de ambos tipos de rotación constituyen el origen del magnetismo solar.

Ahora, ¿cómo explicamos la actividad solar con su magnetismo? Un campo magnético se define con líneas de fuerza que, en condiciones normales, deberían unir directamente los dos polos, el sur y el

norte. Pero como el Sol rota más velozmente en el ecuador que en los polos, esas líneas de campo magnético se van torciendo y curvando en el ecuador en dirección este oeste, hasta tal punto que las líneas emergen a la superficie y forman bucles magnéticos, en cuya base suelen hallarse las manchas. Ya hemos comentado que se trata de regiones más frías, y ese descenso de la temperatura se debe a que el campo magnético bloquea el transporte de energía hacia la superficie. Y ahí no queda todo, porque la mayoría de los fenómenos violentos que hemos descrito al principio, las fulguraciones y eyecciones, se localizan en regiones con manchas, o más magnetizadas. De hecho, se cree que las fulguraciones se deben a la liberación repentina de la energía acumulada en líneas de campo magnético sometidas a una fuerte torsión. Fue, precisamente, una intensa fulguración la que produjo en 1989 la tormenta magnética que dejó a oscuras a todo Quebec, además de producir errores en los satélites espaciales e interferencias en las comunicaciones por radio.

LA VISIÓN GLOBAL

Aún no disponemos de una visión global del campo magnético solar que explique, entre otras cosas, por qué ocurren los ciclos y por qué cada once años, por qué las manchas tienden hacia el ecuador a medida que el ciclo avanza o por qué los polos magnéticos se invierten durante el máximo solar (la última inversión, en 2001, hizo que el polo norte magnético, que se hallaba en el norte geográfico, pasara al sur). Entender todo esto ayudará a conocer cómo influye la actividad solar en nuestro planeta y podrá aplicarse al estudio del campo magnético de otras estrellas. Y para ello hay que estudiar a fondo incluso las regiones “tranquilas”, ya que hace pocos años se hallaron puntos brillantes en zonas sin actividad que resultaron ser también concentraciones de campo magnético.

Seguro que *Sunrise*, con el magnetógrafo IMAx a bordo, no se deja nada en el tintero y nos permitirá conocer mejor a nuestra atormentada estrella.

SUNRISE, DATOS BÁSICOS

La misión *Sunrise* ha heredado las fortalezas de algunos de los mejores observatorios solares, como la Torre Solar Sueca (SST, Isla de la Palma) o el satélite *Hinode* e introduce mejoras como la observación en el ultravioleta o la posibilidad de obtener un mapa en dos dimensiones del campo magnético al completo, además de su inigualable resolución. El empleo de un globo estratosférico le permite trabajar en condiciones similares a las de los satélites y evitar la degradación de las imágenes producida por las turbulencias de la baja atmósfera terrestre, pero con un coste y un tiempo de ejecución considerablemente menor. Además, su trayectoria circular por el ártico le permite evitar los ciclos día y noche y observar el Sol de forma ininterrumpida durante toda la duración del vuelo, así como la generación de energía constante gracias a los paneles solares. En este primer vuelo de cinco días *Sunrise* atravesó Noruega y Groenlandia hasta alcanzar el norte de Canadá, y en un segundo vuelo programado para diciembre o enero de 2010 completará una trayectoria alrededor del Polo Sur de entre nueve y doce días de duración.

¿Son válidos los modelos de atmósferas estelares?



EL ANÁLISIS DETALLADO DEL EXOPLANETA HD 209458B DESVELA QUE LOS MODELOS DE ATMÓSFERAS ESTELARES EMPLEADOS PARA EL ESTUDIO DE LOS PLANETAS EXTRASOLARES INTRODUCEN ERRORES SISTEMÁTICOS EN EL CÁLCULO DE SUS TAMAÑOS
 Por Antonio Claret (IAA-CSIC)

EL EXOPLANETA HD 209458B ES, DESDE SU DESCUBRIMIENTO EN EL AÑO 2000, UN PLANETA EXTRASOLAR ESPECIAL. Fue el primero de una serie de exoplanetas descubiertos por la técnica de los tránsitos, basada en la pequeña disminución de luz producida por el planeta al pasar por delante de su estrella. Una curiosidad que puede ser interesante para los aficionados a la Astrofísica es que la estrella madre de HD 209458b puede verse con unos prismáticos en la constelación de Pegaso, ya que se trata de una estrella de magnitud 7 (está a unos 150 años luz de nuestro Sistema Solar).

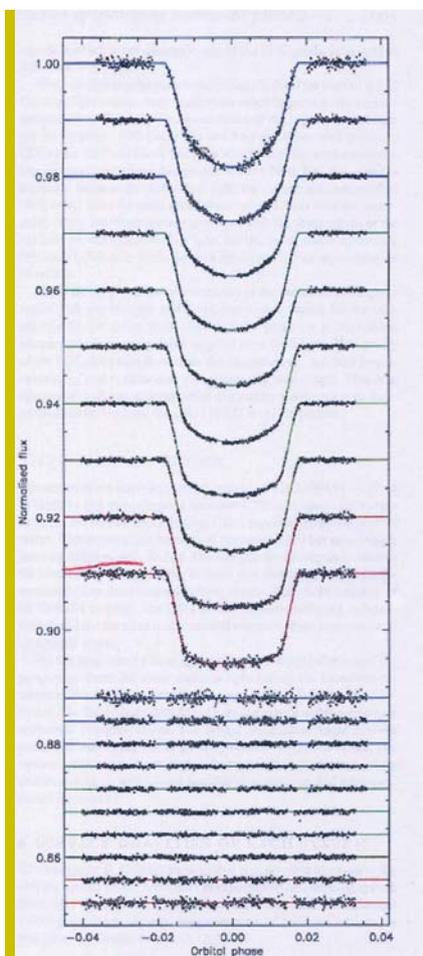
La masa de HD 209458b es 0,7 veces la masa de Júpiter o unas 220 veces la masa de la Tierra y su año, o lo que tarda en completar una órbita alrededor de su estrella, dura aproximadamente 3,5 días. Su radio es 1,3 veces el radio de Júpiter. Debido a su proximidad a la estrella madre, presenta una temperatura alta (más de 800 grados centígrados) y se han detectado, debido al efecto de irradiación de la estrella, signos de evaporación de su atmósfera.

Pero las curiosidades de nuestro exoplaneta no acaban aquí: su atmósfera fue la primera en ser caracterizada y se han encontrado tra-

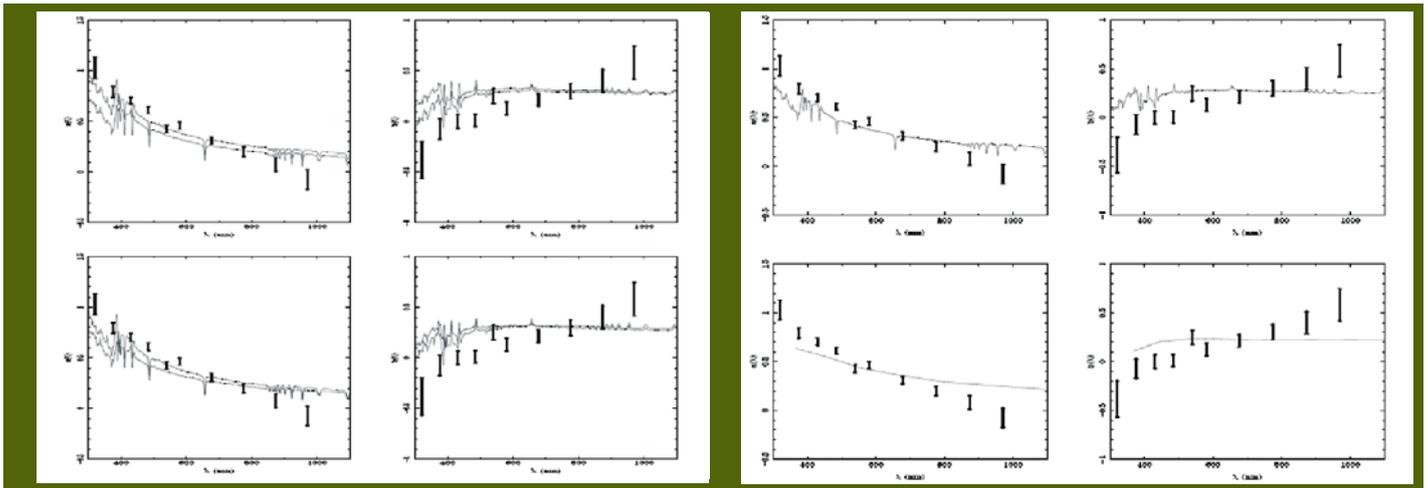
zas de oxígeno y carbono. Más recientemente, Barman (2007) anunció que había detectado vapor de agua en la atmósfera del exoplaneta. Se trata de una medición muy difícil de realizar y depende, entre otros factores, de los modelos adoptados. Tal resultado debe tomarse con cuidado ya que el estudio del tránsito de HD 209458 nos revela, como veremos más tarde, que algunos modelos usados en su análisis presentan algunos problemas.

El oscurecimiento hacia el borde

La investigación del tránsito de un exoplaneta sigue, *grosso modo*, las mismas técnicas utilizadas en el estudio de las estrellas binarias eclipsantes. En cierto sentido, los tránsitos son más sencillos de analizar porque el planeta posee mucha menos masa, es considerablemente más frío que la estrella y su luz no contribuye a la luminosidad total del conjunto. Además, sólo tenemos que estudiar la irradiación de la estrella madre sobre el planeta y no la irradiación mutua, como ocurre en las binarias eclipsantes. La forma del tránsito, o de la curva de luz que obtenemos al observarlo, depende de cómo la luz de estrella está distribuida en su disco. Tal efecto se llama *limb-darkening*, u oscurecimiento hacia el borde y se aprecia muy claramente en el Sol, cuyas regiones centrales son mucho más brillantes que el borde. Se trata de un efecto intrínseco de todas las



Curvas de luz en diez longitudes de onda del tránsito del exoplaneta HD 209458b obtenidas con el telescopio espacial Hubble.



atmósferas estelares y se debe a la semi-transparencia de las capas que la forman y al aumento de temperatura de las mismas hacia el interior. Así, si miramos hacia el centro de una estrella vemos capas más profundas (y más calientes), mientras que cuando miramos hacia los bordes vemos capas menos profundas y más frías, por lo tanto más oscuras.

Se han detectado, debido al efecto de irradiación de la estrella, signos de evaporación de su atmósfera



Pues este efecto tiene mucho que decir cuando un exoplaneta transita delante del disco de su estrella madre. No sabemos cómo se distribuye la luz en una estrella, así que tenemos que recurrir a modelos teóricos de atmósferas estelares que sí nos puede dar esta información. Haciendo uso de estos modelos podemos calcular la curva de luz teórica e inferir algunas propiedades de los exoplanetas. Si la curva de luz es de muy buena calidad podemos incluso derivar empíricamente los coeficientes de oscurecimiento hacia el borde. Hace un año aproximadamente detectamos que estos modelos presentan ciertos problemas cuando comparamos los coeficientes empíricos de algunas binarias eclipsantes con los valores teóricos (Claret 2008). Sin embargo, los datos de estas estrellas eran escasos y dispersos y no permitían emitir una conclusión definitiva sobre la validez de los modelos de atmósfe-

lza: efectos de las incertezas en la temperatura efectiva y en la metalicidad en los coeficientes de oscurecimiento hacia el borde cuadráticos. Las barras de error representan los valores empíricos para HD 209458a. Dcha: comparación entre valores teóricos del oscurecimiento hacia el borde usando modelos plano paralelo ATLAS (cuadros superiores) y modelos con simetría esférica PHOENIX (cuadros inferiores). Las observaciones están representadas por las barras de error.

ras estelares. Era un indicio, pero sólo eso. Hace unos meses, un colaborador nuestro, J. Southworth (2008), analizó el tránsito de HD 209458b. La curva de luz fue obtenida con el telescopio espacial Hubble y es de las mejores obtenidas hasta ahora para exoplanetas. Tal calidad le permitió inferir los coeficientes de oscurecimiento hacia el borde de forma empírica. De su análisis se desprende el mismo indicio encontrado por nosotros usando binarias eclipsantes, aunque no era el objetivo principal de su trabajo. Decidimos atacar el problema con herramientas teóricas más sofisticadas, como cálculos monocromáticos (en una sola longitud de onda, en lugar de filtros) y modelos de atmósferas geométrica y físicamente más sofisticados (Claret y Hauschildt 2003).

Desacuerdo con los modelos

Ahora teníamos más elementos para analizar la situación real de los modelos de atmósferas estelares: en lugar de las habituales observaciones con cuatro filtros, teníamos diez observaciones abarcando un amplio sector espectral: de 320 hasta los 980 nanómetros.

Hay varias causas posibles para explicar un desacuerdo entre los coeficientes teóricos de oscurecimiento hacia el borde y los empíricos: el tipo de función que se utiliza para representar las intensidades, errores en la observación de la estrella madre o problemas intrínsecos en los modelos de atmósferas. Se utilizan la aproximación lineal y la cuadrática para describir cómo la intensidad se distribuye sobre el disco estelar. La aproximación lineal puede ser descartada cuando tenemos observaciones de muy buena calidad, como es el presente caso. Analizamos

también la influencia de los errores en la gravedad y en la temperatura efectiva de la estrella madre y estas barras de error no son lo suficientemente grandes como para explicar el desacuerdo (imagen superior, izda).

La explicación restante se relaciona con la capacidad de los modelos de atmósferas estelares para describir la distribución de las intensidades. Utilizamos modelos más sofisticados con geometría esférica y las discrepancias persistían (imagen superior, dcha). Así que, eliminadas las otras posibles causas, podemos concluir que los modelos actuales de atmósferas estelares no son capaces de predecir con la precisión necesaria cómo se distribuyen las intensidades a lo largo del disco estelar, al menos para el rango de la temperatura efectiva de la estrella madre (Claret 2009).

Tal resultado indica que hay errores sistemáticos en las masas y principalmente en los radios de los exoplanetas estudiados. Por ejemplo, las barras de error en la relación de los radios pueden ser entre tres y cinco veces las publicadas. Los problemas detectados en los modelos de atmósferas pueden tener también consecuencias en otros campos clave de la Astrofísica que dependen de su utilización (que son muchos y variados). Sería interesante comprobar la validez de los modelos de atmósferas en los varios ámbitos de la Astrofísica y confirmar (o no) las discrepancias descritas aquí.

REFERENCIAS

- Barman, T. 2007, *Astrophysical Journal*, 661, 191
- Claret, A. 2009, *Astronomy & Astrophysics*, in press
- Claret, A. 2008, *Astronomy & Astrophysics*, 482, 259
- Claret, A., Hauschildt, P. H. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 412, 91
- Southworth, J. 2008, *MNRAS*, 386, 1644

¿Viajaremos más rápido que la luz?



UN ESTUDIO RECIENTE MUESTRA QUE EL MOTOR DE CURVATURA, UNA PROPUESTA DE LA FÍSICA TEÓRICA PARA VIAJES QUE SUPERAN LA VELOCIDAD DE LA LUZ, RESULTA DIFÍCILMENTE VIABLE

Silbia López de Lacalle (IAA-CSIC)

SEGÚN LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL, NADA PUEDE VIAJAR A MÁS DE TRESCIENTOS MIL KILÓMETROS POR SEGUNDO, lo que impide una exploración espacial profunda basada en el envío de expediciones científicas de ida y vuelta: llegar a la estrella más cercana requeriría, como mínimo, cuatro años de viaje, y ni hablar de cruzar la Galaxia, que exigiría varias decenas de miles de años. Una de las posibilidades teóricas para escapar de esta limitación era el motor de curvatura (*warp drive*), consistente en mover el propio espacio tiempo que, en principio, puede contraerse y expandirse sin límite de velocidad. Sin embargo, un reciente artículo, publicado en la revista *Physical Review D* y en el que participa Carlos Barceló, del Instituto de

Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), muestra dos efectos del motor de curvatura que imponen serias restricciones a su desarrollo.

El motor de curvatura tiene su origen en la ficción: se trata del mecanismo que permite a los personajes de *Star Trek* surcar el espacio más rápido que la luz, o a velocidades superluminales, mediante la distorsión del espacio tiempo. Su salto al terreno científico tuvo lugar en 1994, año en el que el físico mexicano Miguel Alcubierre publicó un artículo titulado *El motor de curvatura: viaje hiperveloz en el marco de la Relatividad*

General. Este trabajo aprovecha la flexibilidad de la geometría del espacio tiempo, que se curva en presencia de materia del mismo modo que, por ejemplo, una pelota situada sobre una sábana tensada curva el tejido a su alrededor. En el Universo, los objetos más masivos producen curvaturas más acentuadas, y Alcubierre diseñó el siguiente medio de transporte: una burbuja cuyas paredes, compuestas de materia “exótica”, producen una contracción del espacio tiempo en la proa y una dilatación en la popa similares a una ola en el mar. Una nave dentro de la burbuja alcanzaría su destino “sin moverse”

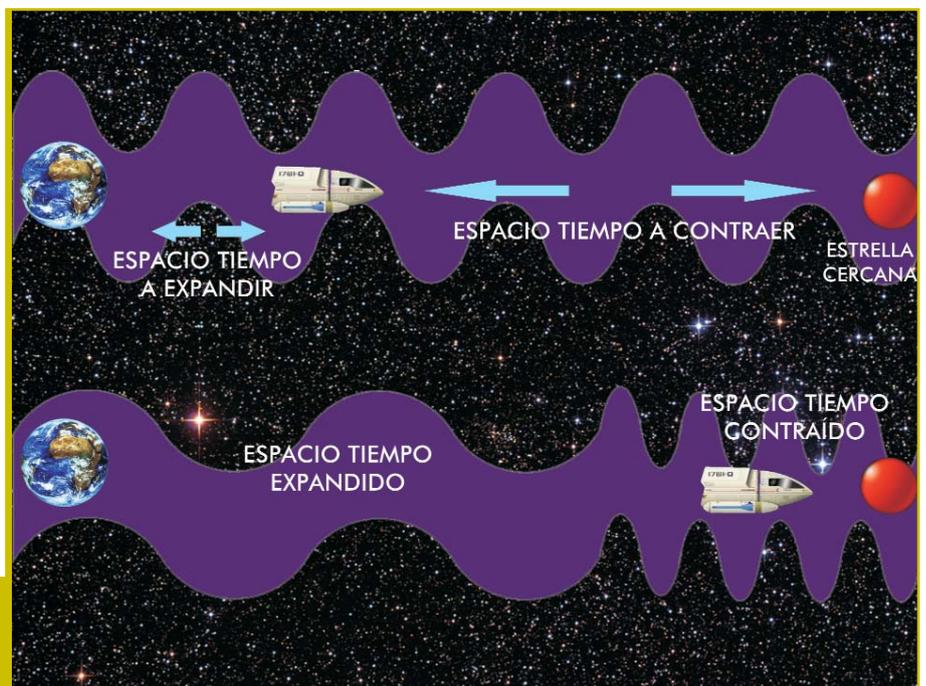
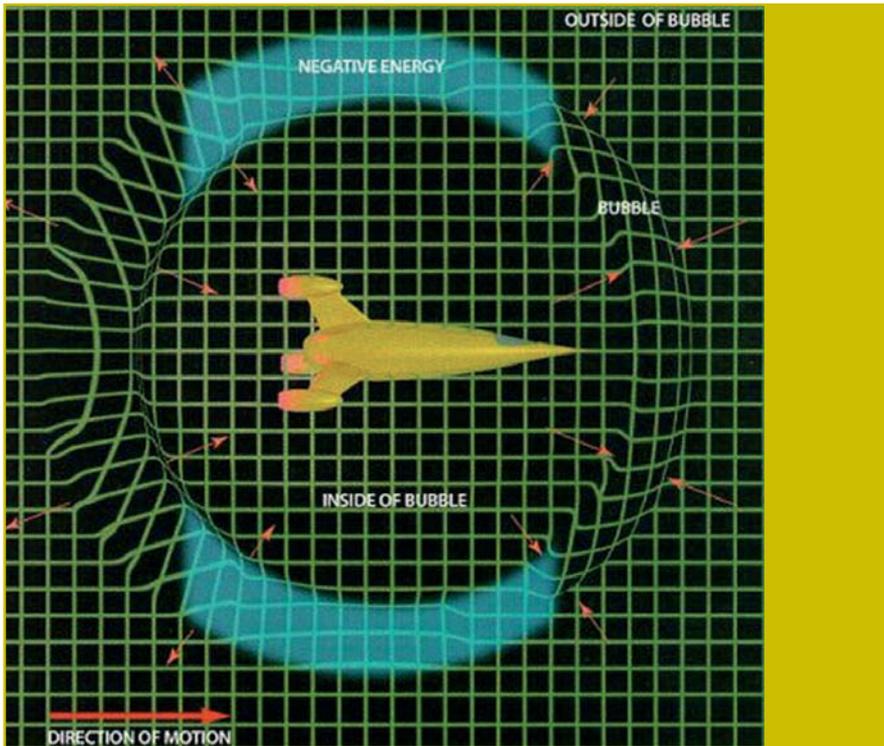


Ilustración de un viaje superluminal en el que el movimiento del propio espacio tiempo provoca el desplazamiento de una nave.



Concepción artística de la burbuja de Alcubierre: la nave se desplaza porque el espacio tiempo se contrae en la parte delantera y se expande en la trasera.

por la distorsión local del espacio tiempo, igual que un surfista situado sobre la cresta no ejerce un movimiento propio pero alcanza la orilla gracias al de la ola.

Fluctuaciones de vacío

“El motor de curvatura es una construcción matemática muy ingeniosa, que incluso hizo pensar si podría hacerse ingeniería de ella. Pero, ¿es realista construirlo?”, apunta Carlos Barceló (IAA-CSIC), cuyo trabajo ha ofrecido una respuesta negativa. El motor de Alcubierre ya mostraba debilidades, como la enorme cantidad de energía en forma de materia exótica (un tipo de materia aún hipotético que tiene propiedades gravitatorias repulsivas) necesaria para hacerlo funcionar. Existen indicaciones de que este tipo de materia podría existir, por lo que la posibilidad de construir un motor de curvatura no se descartaba.

“Pero hay algo que no se ha contemplado y puede afectar al movimiento de esa burbuja: cómo actúan las fluctuaciones cuánticas ante las curvaturas”, señala Carlos Barceló. Cuando la burbuja se desplaza a velocidad superluminal, desde el punto de vista del observador interno las paredes anterior y posterior se comportan respectivamente como un horizonte blanco y un horizonte negro, similar al que poseen los agujeros negros. Esto es: si el astronauta de la nave mira hacia atrás no verá absolutamente nada, ya que se está desplazando a mayor velocidad que la luz y ninguna señal puede

alcanzarle; en cambio, la proa de la nave recibirá todas las señales, y por ello se habla de horizonte blanco.

En este reciente estudio, los físicos han calculado cómo se comportan las fluctuaciones cuánticas en ambos horizontes cuando la

Una nave dentro de la burbuja alcanzaría su destino “sin moverse”, igual que un surfista alcanza la orilla gracias al movimiento de la ola

La opción consiste en no atravesar la barrera de la luz, de modo que no se produzcan horizontes, ni radiación de Hawking ni altas temperaturas

burbuja se acerca a la barrera de la luz, y han hallado dos efectos que impiden el viaje. En la teoría cuántica, en presencia de curvatura ocurre que, aunque el estado de mínima energía es el vacío (o estado de no partícula), la energía del vacío nunca es equivalente a cero y por tanto debe tener efectos gravitatorios. Para describir este vacío no inerte se habla del constante nacimiento y aniquilación de parejas o pares de partículas, tan rápido que resulta imposible detectar su presencia. Por ello se las conoce como partículas virtuales. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, como una fuerte distorsión del

espacio tiempo, esas partículas pasan a ser reales. Esto es lo que ocurre en ambos horizontes de la burbuja, con catastróficas consecuencias.

Dos horizontes problemáticos

En el horizonte negro se produce un resplandor debido a la radiación de Hawking, un efecto conocido en los agujeros negros, objetos que presentan campos gravitatorios tan intensos que nada, ni la luz, puede escapar. Aunque siempre se pensó que ninguna emisión podía proceder de ellos, Stephen Hawking predijo en 1974 que los agujeros sí emiten radiación debido, precisamente, a la creación y destrucción de pares en la proximidad del horizonte de sucesos, o región límite a partir de la que sí es posible la huida: el enorme campo gravitatorio del agujero negro puede romper el par y absorber una de las partículas, mientras que la otra escapa y pasa de ser una partícula virtual a una partícula real. El efecto es un resplandor que procede del horizonte y cuya intensidad, en el caso del horizonte negro de la burbuja, depende del grosor de la pared: una pared fina, más fácil de obtener en teoría, presentaría temperaturas muy altas que podrían destruir la nave que viajara en su interior.

Y, aunque pudieran construirse paredes tan gruesas que la temperatura producida por la radiación de Hawking no fuera un obstáculo, el horizonte delantero, el blanco, supone un impedimento insalvable. La contracción del espacio tiempo en la parte delantera produciría, igualmente, la ruptura de los pares de partículas, aunque con la diferencia de que todas las partículas irían amontonándose en la pared produciendo en ella una acumulación exponencial de energía. “Un crecimiento exponencial es incontrolable -asegura Carlos Barceló-, y hace inconsistente la construcción porque tiende a autodestruirse. O inventamos una manera de contrapesar esa energía con una energía inversa, lo cual parece inverosímil, o simplemente hay que admitir que no podemos superar la velocidad de la luz por razonables periodos de tiempo”. Otra opción consiste en no atravesar la barrera de la luz, de modo que no se produzcan horizontes, ni radiación de Hawking, ni altas temperaturas. Como los autores señalan al final del artículo, “quizá viajar al 99% de la velocidad de la luz no esté tan mal, después de todo”.

Últimas tardes con Hipatia

POR EMILIO J. GARCÍA
(INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA)

Todo lo referente a Hipatia de Alejandría está envuelto en un halo de leyenda: su belleza (una cualidad que nunca se menciona de un científico), su sabiduría, su libertad de creencia, y su muerte violenta a manos de fanáticos cristianos.

Desde la Ilustración, la figura de Hipatia ha sido utilizada, hasta el abuso, como arma arrojada de numerosos y variados ideales. Su espantosa muerte ha sido catalogada por muchos historiadores como el fin de la cultura clásica; ha sido presentada como víctima de la intolerancia religiosa; como heroína defensora de la ciencia frente a la superstición; y, por supuesto, como heroína del feminismo, en lo que Carlo Pascal definía como “la primera mártir de la misoginia”. Incluso la Iglesia ha introducido elementos de su vida en la biografía de Santa Catalina de Alejandría.

Presente en todo tipo de expresiones artísticas -novela, teatro, poesía-, es la única mujer (probablemente) presente en la reunión de sabios que Rafael ilustra en su *Escuela de Atenas*, y acaba de protagonizar la última película de Alejandro Amenábar.

Sueño de artistas, heroína de las feministas, imagen de la razón, etc. En fin, raro es que no hayan hecho camisetas con su efigie, compitiendo con las del mismísimo Che. Pero, realmente ¿qué sabemos de esta mujer que nunca salió de Alejandría?

¿QUÉ SABEMOS DE HIPATIA?

Pues en realidad, nada que provenga de su propia mano, ya que no se ha conservado ningún texto histórico de su puño y letra. La fuente más fidedigna proviene de la extensa correspondencia que se conserva de uno de sus alumnos más entusiastas, Sinesio de Cirene, que llegaría a convertirse en Obispo de Pentápolis.

Gracias a Sinesio sabemos que en Alejandría, a finales del siglo IV y comienzos del V, una mujer ya madura, llamada Hipatia, hija de Teón, enseñaba Filosofía, Matemáticas, Astronomía y otros saberes a un grupo de estudiantes que la veneraban como a una santa. Los miembros de este círculo, que se declaraban “bajo el signo de Hipatia”, no formaban parte precisamente de los estratos más humildes; al contrario, entre ellos se encontraban miembros de las mejores familias, que acudían de todas partes atraídos por la fama de la sabiduría y el

calado espiritual de Hipatia. Más tarde serán obispos, gobernadores, concejales, comandantes militares, etc.

Respecto a su producción científica, sabemos que amaba la Astronomía, a la que considera-

“ NO SE HA CONSERVADO NINGÚN TEXTO HISTÓRICO DE SU PUÑO Y LETRA ”



Posible retrato de Hipatia (fragmento de la *Escuela de Atenas* de Rafael).

ba “una forma divina de conocimiento”, y que elaboró una adaptación de una de las obras cumbre del saber astronómico, *El Almagesto* de Ptolomeo, probablemente las únicas líneas escritas por Hipatia que han llegado a nuestros días.

LA MUERTE DE HIPATIA

Ni Hipatia, a la que muchos autores encasillarán en el futuro como “defensora del paganismo”, ni sus alumnos, entre los que hay tanto cristianos como paganos, parecieron sufrir ningún tipo de persecución de mano de Teófilo, el máximo mandatario eclesiástico de la época, a pesar de su declarada guerra al culto pagano. Pero las cosas comenzaron a cambiar cuando, en sustitución de Teófilo, subió al poder su sobrino Cirilo, que pasaría a la historia como San Cirilo.

El nuevo obispo, hombre ambicioso, continuó la batalla por la pureza de la fe y, sobre todo, por la ampliación de la influencia de la Iglesia en cuestiones administrativas, lo que levantó las suspicacias del prefecto Orestes, la máxima figura política de Alejandría. Rápidamente, el conflicto religioso se extendió al enfrentamiento personal entre Cirilo y Orestes.

Una de las personas más cercanas y admirada por Orestes era precisamente Hipatia. Hipatia estaba en desacuerdo con la intromisión de los Obispos en cuestiones políticas, y comenzó a correr el rumor entre las esferas cristianas de que ella era la causante de la guerra entre Orestes y Cirilo. Hipatia contaba con ex alumnos repartidos en los más altos cargos de todo el imperio, y esto hace que los seguidores de Cirilo comenzaran a verla como una influyente rival que había que eliminar.

Deliberadamente, iniciaron una campaña de rumores, acusándola de ser bruja y practicar la magia negra, lo que apelaba a la profunda superstición del pueblo. Los poderes eclesiásticos comenzaron a catalogarla como una “astrónoma bruja y hechicera” y, según Hesequio, fue la Astronomía mezclada con la astrología y el oscurantismo lo que marcó el destino de Hipatia. Por fin, los rumores produjeron resultados y un grupo de exaltados dirigidos por un

tal Pedro el lector, probablemente un clérigo menor, decidió matar a la supuesta bruja. Los detalles dependen de quién cuente la historia: para algunos se trata de multitud de creyentes, y para otros apenas un puñado de exaltados. En cualquier caso, culminaron su acción un día de marzo del 415. Asaltaron a Hipatia cuando regresaba a su casa, la sacaron violentamente del carruaje y la arrastran a la igle-

“ SEGÚN HESEQUIO, FUE LA ASTRONOMÍA MEZCLADA CON LA ASTROLOGÍA Y EL OSCURANTISMO LO QUE MARCÓ EL DESTINO DE HIPATIA ”

sia del Cesarion. Allí le arrancaron la ropa y la despedazaron con fragmentos de cerámica, tras lo que llevaron su cuerpo fuera de la ciudad, donde lo quemaron sobre una pira.

No se trató de un asesinato machista, ni contra el paganismo, sino de un simple y estúpido asesinato político, como tantos que existirán después. Tras su muerte, Orestes abandonó su cargo y Cirilo se hizo con el poder de la ciudad. El asunto se archivó como una revuelta más contra una bruja pagana.

BIOGRAFÍA

(1889-1953)

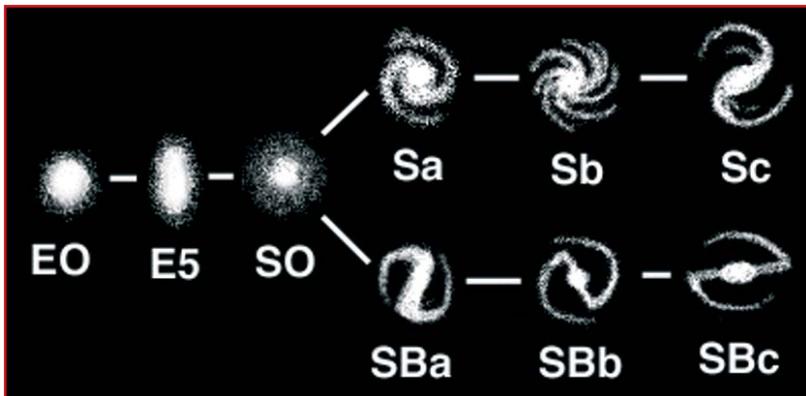
Nacido en la ciudad de Marshfield (Missouri, EEUU), vivió en Chicago desde los diez años. Hubble mostró fascinación por la ciencia desde su infancia, durante la que fue asiduo a Julio Verne (*Veinte mil leguas de viaje submarino*, *De la Tierra a la Luna*) y a Rider Haggard (*Las minas del rey Salomón*). Mostró gran talento tanto para el estudio como para el atletismo, y durante sus años de universidad combinó las matemáticas y la astronomía con el boxeo o el baloncesto. Sin embargo, durante una beca en la Universidad de Oxford dio un giro a su carrera académica y comenzó a estudiar derecho, una profesión que no le satisfizo ya en sus primeras prácticas. De modo que retomó su pasión por la astronomía y, tras estudiar en el Observatorio Yerkes, obtuvo su doctorado en astronomía por la Universidad de Chicago en 1917.

Durante la Primera Guerra Mundial Hubble aceptó un puesto en el Observatorio de Monte Wilson (California), donde demostró que las nebulosas espirales observadas en el cielo eran en realidad galaxias similares a la Vía Láctea, y construyó un sistema para clasificar los distintos tipos de galaxias que observaba. Hubble estudió el movimiento de las galaxias y apreció que, cuanto más distantes se hallaban a más velocidad se alejaban de nosotros, fenómeno que hoy conocemos como la expansión del Universo.

Sus observaciones revolucionaron la astronomía y cambiaron por completo la concepción del universo. Hubble abandonó el Observatorio de Monte Wilson en 1942 para ayudar a combatir contra los nazis durante la II Guerra Mundial, lo que le valió una medalla al mérito. Tras la guerra retomó su trabajo y convenció a sus superiores de la necesidad de disponer de un telescopio mayor que el reflector de dos metros y medio que él había empleado hasta entonces. Así se diseñó el Telescopio Hale, situado en el Observatorio de Monte Palomar, y Hubble utilizó ambos hasta su muerte el 28 de septiembre de 1953 debido a una trombosis.

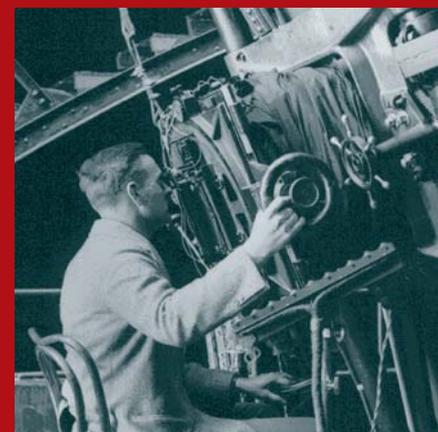
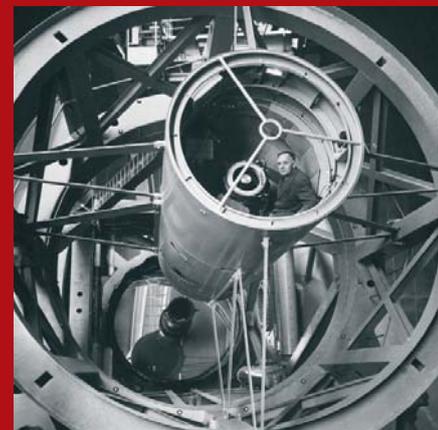
EL DIAPASÓN DE HUBBLE

LA CLASIFICACIÓN DE LAS GALAXIAS



Antes de 1926 no existía un sistema de clasificación de galaxias satisfactorio, y el empleado entonces (Wolf, 1908) no distinguía entre nebulosas y galaxias. Tras descubrir que muchas de las nebulosas espirales observadas eran en realidad otras galaxias, Edwin Hubble elaboró una clasificación que las dividía en elípticas (E), espirales (S) e irregulares, y que aún se emplea hoy día. Las primeras se dividen a su vez en subgrupos que van desde el E0 (para las muy redondeadas) hasta el E7 (para las muy elípticas), mientras que las espirales se dividen en dos grandes familias: barradas y no barradas (una barra es una estructura brillante que se extiende a ambos lados del núcleo). Las espirales también se subclasifican dependiendo del grosor de su bulbo -la región esférica central- y de cómo de unidos tengan los brazos. Así, las de tipo "a" presentan un bulbo grueso y brazos muy apretados, mientras que las de tipo "c" muestran bulbos pequeños y brazos muy amplios. Existe un tipo intermedio entre las elípticas y las espirales, las lenticulares, que tienen bulbo y disco pero no brazos espirales y que aparecen como S0 en el diagrama de Hubble. Finalmente, las galaxias irregulares destacan por carecer de forma concreta. Este esquema, que Hubble diseñó con propósitos puramente morfológicos, se

EDWIN HUBBLE



"Era el dominio del le sobre trabajos anterior aprended a escribir al

interpretó como un esquema evolutivo que sugería que las galaxias elípticas evolucionaban hacia la forma espiral tras pasar una fase como lenticular. Sin embargo, Hubble dejó claro que no existía tal implicación: *"La nomenclatura, debe enfatizarse, se refiere a la posición en la secuencia, y las connotaciones temporales se harán a riesgo de cada uno. Toda la clasificación es puramente empírica y sin menoscabo para con las teorías evolutivas..."*

refers to position in the sequence, and temporal connotations are made at one's peril. The entire classification is purely empirical and without prejudice to theories of evolution—comparison with theories will be the more significant for this very reason.

HUBBLE



El lenguaje de Hubble lo que daba a sus artículos ese predominio anteriores. [...] Claramente, la lección para los estudiantes fue: aprender al mismo tiempo que aprendéis a hacer gran ciencia"

Allan Sandage

UN SELLO PARA HUBBLE

PIONERO DE LAS ESTRELLAS DISTANTES

En marzo de 2008, el Servicio Postal de los Estados Unidos publicó un sello en su honor, en una serie titulada "Científicos Americanos". Le acompañaba la siguiente cita: "Considerado a menudo el *pionero de las estrellas distantes*, el astrónomo Edwin Hubble (1889-1953) desempeñó un papel fundamental en la interpretación de la amplia y compleja naturaleza del Universo. Sus minuciosos estudios de las nebulosas espirales demostraron la existencia de otras galaxias además de nuestra Vía Láctea. Si no hubiera fallecido repentinamente en 1953, Hubble habría ganado ese año el Premio Nobel de Física".

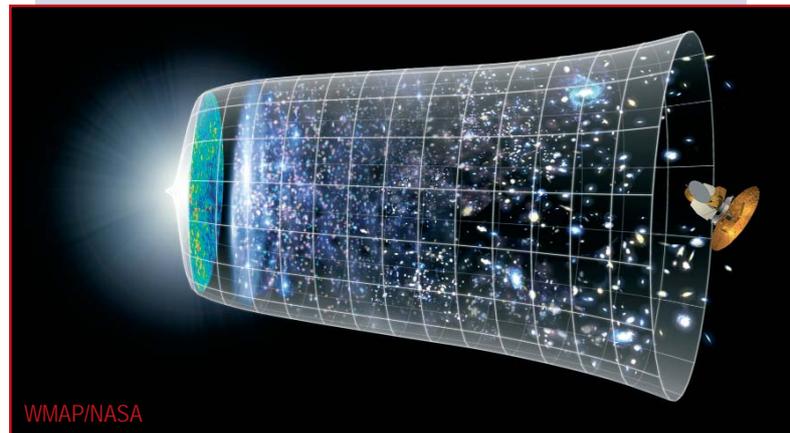
LA LARGA SOMBRA DE HUBBLE

ALGUNOS TÉRMINOS ACUÑADOS CON SU APELLIDO

Hoy día, se emplean términos como la zona de evasión de Hubble, la secuencia de Hubble, la ley de luminosidad de nebulosas de reflexión de Hubble, el perfil de luminosidad de Hubble para galaxias elípticas, la constante de Hubble, el tiempo de Hubble, el diagrama de Hubble y el telescopio espacial Hubble, entre otros.

HUBBLE Y LA COSMOLOGÍA

EXPANSIÓN DEL UNIVERSO Y BIG BANG



El descubrimiento de la expansión del Universo, que suele relacionarse casi exclusivamente con el artículo de Hubble publicado en 1929, tenía raíces hondas y varios precursores. Ya antes de 1918 James Edward Keeler, Vesto Slipher y William Campbell conocían el corrimiento al rojo de las galaxias, un fenómeno que consiste en el aumento de la longitud de onda de su radiación (o una tendencia hacia el rojo en el espectro electromagnético), que apuntaba a un progresivo distanciamiento.

Y fue Henrietta Swan Leavitt quien desarrolló, en 1912, la relación entre el periodo y la luminosidad de las estrellas cefeidas, una herramienta que permitió determinar las distancias no sólo de las cefeidas situadas en la Vía Láctea, sino también de las galaxias que contienen estrellas de este tipo. Fue la combinación de las medidas de corrimiento al rojo realizadas por Slipher con las medidas propias de distancia de las galaxias (a partir de la relación periodo luminosidad) lo que permitió a Edwin Hubble y Milton L. Humanson hallar una proporcionalidad entre la distancia de las galaxias y su velocidad de alejamiento, que hoy conocemos como ley de Hubble y que establece que las galaxias se alejan unas de otras y que además este desplazamiento aumenta con la distancia: cuanto más distantes, a mayor velocidad se alejan. ¿Cómo explicarlo? Una analogía muy común consiste en coger un globo y pintar unas galaxias, o unos puntos, sobre él. Al hincharlo, las galaxias de ese pequeño universo en dos dimensiones se alejarán con el mismo patrón que observó Hubble hace ocho décadas, y que se conoce como la expansión del Universo. Pero la expansión tenía importantes implicaciones, ya que si "rebobinamos" ese alejamiento progresivo las galaxias se irán acercando unas a otras hasta converger en un punto, lo que por un lado permitió calcular la edad del Universo y, por otro, supuso el apoyo definitivo para la teoría que proponía un Universo dinámico frente a uno estático y que a mediados del siglo pasado se concretaría en la teoría del Big Bang, o gran explosión.



SN 1993J



Nacido en San Sebastián en el año 1963. Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Zaragoza, se doctoró en 1991 en la Universidad de Granada tras haber realizado su tesis doctoral en el *Max Planck Institut fuer Radioastronomie* (Bonn) y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Actualmente es Investigador Científico del CSIC en el IAA.

Si tuviera que escoger un objeto astronómico de los que me ha acompañado a lo largo de mi carrera científica, tendría que optar entre el núcleo activo de la galaxia 4C39.25, la radio supernova SN 1993J y la galaxia *starburst* NGC 7469 en cuyo anillo circumnuclear de formación estelar estalló la radio supernova SN 2000ft. Pero para este artículo he decidido seleccionar la supernova SN 1993J, objeto sobre el que hemos publicado resultados de gran impacto científico. Nuestro primer artículo data del año 1994 y, hoy día, seguimos trabajando de forma muy activa en la física asociada a SN 1993J. En estos dieciséis años, la supernova ha mostrado un cambio de flujo de más del 100%.

La supernova SN 1993J estalló en la galaxia M81, situada a una distancia de unos doce millones de años luz, el 28 de marzo de 1993. Fue descubierta por el astrónomo aficionado español Francisco García y alcanzó una magnitud que la convirtió en la supernova más brillante descubierta en el hemisferio norte desde la supernova SN 1954A. La cercanía de M81

produce manteniendo un alto grado de circularidad a lo largo de toda su vida (ver la imagen, donde se muestra la evolución de SN 1993J a lo largo de diez años de vida). Gracias a las observaciones multiépoca y multifrecuencia hemos comprobado que la expansión angular se va decelerando con el tiempo y que el parámetro

Observaciones en radio

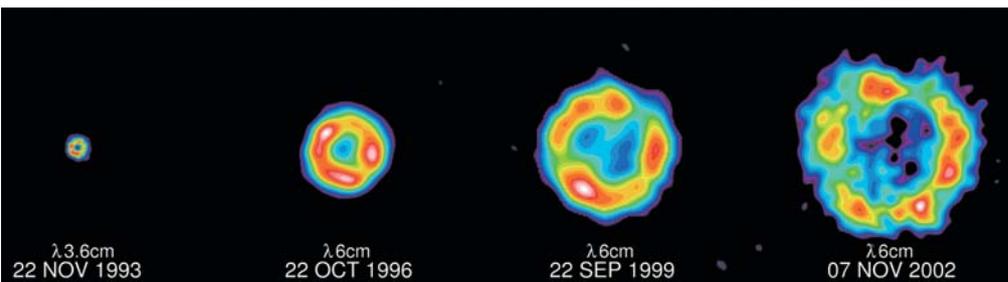
Pero además, el brillo y la distancia de SN 1993J la convertían en un perfecto objeto de estudio para observaciones radiointerferométricas de alta resolución angular (VLBI), en caso de que el objeto emitiera en longitudes de onda de radio. Y así fue: la emisión de radio a dos centímetros fue detectada tan solo dos semanas después de su explosión. En los meses siguientes, pudo detectarse la emisión a longitudes de onda más largas (3,6, 6, 13 y 18 centímetros). Gracias a las observaciones de alta resolución angular (una resolución angular de 0,5 milisegundos de arco a una distancia de 3,6 Mpc corresponde a una resolución lineal de ¡0,03 días luz!), detectamos por primera vez la estructura tipo *shell* (cáscara o corteza esférica) para una radio supernova joven. Esta estructura había sido ya propuesta por los mode-

l produce manteniendo un alto grado de circularidad a lo largo de toda su vida (ver la imagen, donde se muestra la evolución de SN 1993J a lo largo de diez años de vida). Gracias a las observaciones multiépoca y multifrecuencia hemos comprobado que la expansión angular se va decelerando con el tiempo y que el parámetro

"El brillo y la distancia de SN 1993J la convertían en un perfecto objeto de estudio para observaciones radiointerferométricas de alta resolución angular (VLBI)"

de deceleración depende de la longitud de onda de observación. Ello nos ha permitido conocer la densidad tanto del medio circumestelar como del material expulsado por la supernova, así como modelar la variación de la opacidad asociada con dicho material a medida que la supernova se expande. En trabajos muy recientes, hemos construido un modelo numérico que resuelve las ecuaciones de transferencia de la radiación sincrotrón y simula tanto las curvas de luz multifrecuencia de SN 1993J como las imágenes. Así, hemos determinado los parámetros físicos característicos de la radio emisión: el campo magnético en la región de emisión, la densidad de electrones en la misma región, la eficiencia de la aceleración de los electrones relativistas en el choque frontal y la temperatura de los electrones circumestelares.

En este año 2009, seis mil días después de su explosión, SN 1993J se ha convertido en una supernova muy débil (con una densidad de flujo por debajo del miliJansky) y el medio circumestelar se ha vuelto transparente para la supernova en expansión. SN 1993J se encuentra ya en la transición de radio supernova a remanente de supernova, donde su evolución vendrá gobernada por la interacción con el medio interestelar.



SN 1993J, que muestra una clara estructura de tipo cáscara esférica.

y la alta declinación de SN 1993J hacen que sea una de las supernovas mejor observadas en la historia de la Astronomía. Espectros ópticos tomados una semana después de su descubrimiento mostraron líneas de hidrógeno muy prominentes, lo que indicaba que la supernova era de tipo II, producto del colapso de una estrella con un mínimo de ocho veces la masa solar. Sin embargo, pronto se comprobó que no era una supernova tipo II arquetípica, ya que evolucionó rápidamente a una supernova de tipo Ib, debido a que la envoltura de hidrógeno era muy poco masiva. Así, se la caracterizó como

los teóricos, que establecían que la emisión en radio se debía al choque entre el material expulsado de la supernova y el medio circumestelar, que resultaba en la formación de una estructura de tipo cáscara esférica. En esta región los electrones son acelerados a velocidades próximas a la de la luz y, en presencia del campo magnético amplificado en la región afectada por la onda de choque, emiten radiación sincrotrón que se detecta a longitudes de onda de radio.

A lo largo de los años hemos obtenido la primera película de la expansión angular de la supernova y hemos hallado que se

Betelgeuse en ebullición

Esta estrella expulsa cada año una cantidad de masa equivalente a la de la Tierra, fenómeno que parece provocado por procesos convectivos

► De mi abuela aprendí el truco de sancochar (ella en realidad decía “asustar”) las lentejas para hacer el potaje, si el día de antes se le había olvidado echarlas previamente en agua. Había que estar muy atento al momento en el que el agua rompía a hervir para inmediatamente retirarlas, y ya se podían guisar normalmente. Ese “romper a hervir” es el instante en el que se produce un cambio en el régimen de transporte de la energía producida por el fuego aplicado al fondo de la olla (foco caliente) hasta su superficie (foco frío), pues la aportación de calor desde abajo es superior a la capacidad que tiene el agua de transportarlo por simple conducción y necesita además de un transporte de materia. Este fenómeno físico no se comprende tan bien como cabría esperar dada su frecuencia en las experiencias cotidianas del ser humano. Se llama convección y su carácter intrínsecamente enrevesado se debe a que las ecuaciones que lo describen (que no son más que derivaciones de principios de conservación dentro de una geometría dada, que para el agua hirviendo era la olla misma) son no lineales. Esto quie-

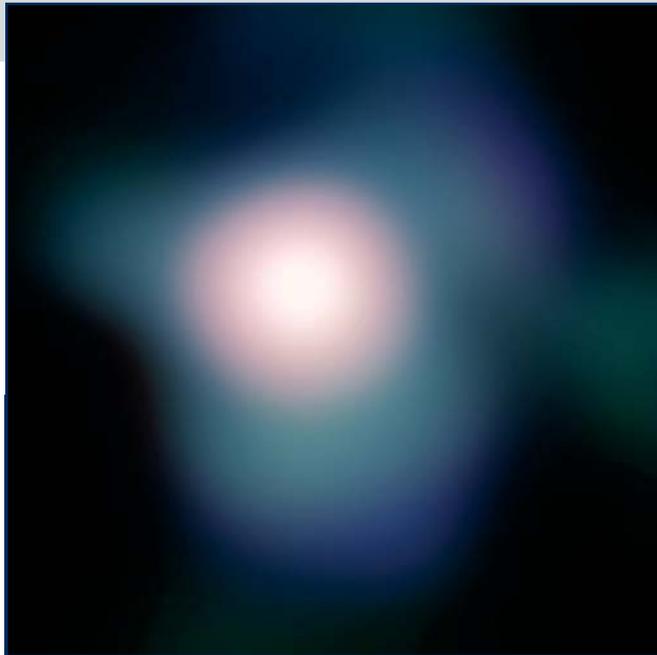


Imagen de Betelgeuse obtenida con el instrumento de óptica adaptativa NACO del Very Large Telescope (ESO).

re decir que nuestras percepciones más frecuentes que obedecen a leyes del tipo “cuanto más ..., más ...” no son estrictamente aplicables. Por supuesto que existen teorías aproximadas que tratan de explicar las observaciones a la escala humana, y esas teorías deberían

explicar también las observaciones de otros fenómenos convectivos que se producen a escalas gigantes. Ese es el caso de Betelgeuse. Una de las estrellas más brillantes (cien mil veces más que nuestro Sol) y grandes (mil veces más) que conocemos está en plena ebullición y se desprende cada año de una cantidad de masa equivalente a la de la Tierra. No sabemos con

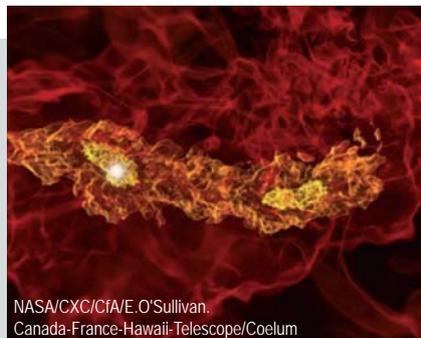
certeza cuál es el mecanismo físico que actúa en la estrella, pero estamos convencidos de que la convección juega un papel crucial. Astrónomos del ESO, utilizando técnicas de óptica adaptativa (es decir, “mover” nuestro sistema óptico para compensar el titilar de las estrellas) junto a la técnica de “la imagen afortunada” (traducción libérrima que me permito del original inglés *lucky imaging*), que selecciona sólo las mejores imágenes, es decir, aquellas que están menos deformadas por la acción atmosférica, han puesto de manifiesto que los movimientos convectivos en esta estrella gigante pueden ser la causa de la expulsión de parte de su masa. La imagen adjunta habla por sí misma. Estas observaciones son insustituibles para poder comparar con los modelos teóricos de convección y así quizás poder predecir con cierta exactitud cuándo este objeto explotará como una supernova, cosa que hará casi con certeza en los próximos millones de años. La distancia a la que se encuentra de nosotros probablemente no dejará a la Tierra inmune. Cabe la posibilidad de que nuestro planeta pudiera ser sarcochado (“asustado”, diría mi abuela) como una pequeña lenteja en el espacio, algo que algunos investigadores han sugerido como causa de alguna que otra extinción masiva ocurrida evo atrás en nuestro planeta.

Rafael Garrido (IAA)

EN BREVE

Las primeras estrellas pudieron ser binarias

► La mayoría de las estrellas que existen actualmente en el Universo se encuentran en sistemas estelares de dos o más miembros. Recientes simulaciones numéricas realizadas por investigadores del *Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology* y de la Universidad Estatal de Michigan parecen demostrar que la primera generación de estrellas que se formó en el Universo - la denominada Población III - también pudo haberlo hecho en forma de sistemas binarios. Teóricamente, estas primeras estrellas del Universo se forma-



NASA/CXC/CfA/E.O'Sullivan.
Canada-France-Hawaii-Telescope/Coelum

ron en los primeros centenares de millones de años tras el Big Bang, en la llamada época oscura, cuando la luz de estas estrellas era oscurecida por el denso gas existente (motivo

por el que son invisibles para nuestros telescopios). Sin embargo, la aparición de estos sistemas binarios en las simulaciones abre una puerta para que puedan ser detectadas por otros medios. Estos primigenios sistemas estelares evolucionarían, tras un violento fenómeno explosivo - un estallido de rayos gamma -, a un sistema de dos agujeros negros, o de un agujero negro y una estrella de neutrones. Estas explosiones podrían ser detectadas por los actuales satélites de rayos gamma, o en un futuro por detectores de ondas gravitatorias.

Emilio J. García (IAA)

¿Qué supone el hallazgo de glicina en el cometa 81P/Wild?

Un grupo del *Goddard Space Flight Center* (NASA), liderado por Jamie Elsila, ha identificado la presencia de glicina en muestras del cometa 81P/Wild 2 que trajo la nave *Stardust* (NASA)

► En mi opinión, la importancia de esta noticia no está en que se haya encontrado, por primera vez en un cometa, uno de los aminoácidos que forman parte de las proteínas de los seres vivos, o que sea una proteína codificada en el genoma de la mayoría de ellos. Ni siquiera está en el hecho, cuestionable, como todo hoy en día, de que ese descubrimiento, en palabras de los autores, apoya la idea de que los elementos fundamentales para la vida son comunes en el espacio y da fuerza al argumento de que la vida en el Universo puede ser más común que rara.

La búsqueda de glicina

De acuerdo a simulaciones por ordenador y a experimentos de laboratorio, la glicina en el espacio se formaría, probablemente, debido a la acción de la luz ultravioleta sobre hielos que contienen material orgánico. Fue a finales de los años 70 cuando empezó a buscarse la glicina (el más "simple" de los aminoácidos al contener tan solo diez átomos) en el espacio de manera remota. Sin embargo no fue hasta 1994 que un grupo de la Universidad de Illinois publicó la primera detección. Detección que no ha sido confirmada. Posteriormente, en 2003, un grupo de la *National Taiwan Normal University* anunció que había detectado glicina en el medio interestelar. Esta detección fue seriamente cuestio-

nada y actualmente se considera que la glicina todavía no ha sido detectada de modo remoto. La dificultad para detectar la glicina de forma remota, además de por existir en pequeñas cantidades, reside en que su espectro es muy complejo, constituido por un bosque, relativamente denso, de líneas correspondientes a muchos niveles rotacionales. Por ello, por ejemplo, el Dr. Crovisier, del grupo cometario de Meudon y

oritros fue en 1962, por Degens y Bajor de Caltech (por cierto, en un momento en el que la evaluación de la actividad científica parece querer trivializarse al cómputo de unos pocos números, uno no debe desaprovechar la oportunidad para decir que ese artículo, según el ADS, sólo tiene nueve citas) aunque, según estudios posteriores, existían dudas sobre el origen de los aminoácidos detectados. Inequívocamente, gli-

El hallazgo en el cometa 81P/Wild 2

Así, en mi opinión, la noticia importante no es que se haya encontrado glicina en muestras del cometa 81P (quizá hubiese sido más importante que se hubiera demostrado que no había glicina) sino cómo se ha encontrado (aquello de que las formas, a veces, son más importantes que el fondo). NASA seleccionó *Stardust* como misión espacial a finales de 1995. Esta sería la primera misión robótica para traer de vuelta a la Tierra material del espacio procedente de fuera de la órbita de la Luna. Para recoger las partículas del entorno del cometa se utilizó aerogel, un material con una porosidad superior al 95 % y, aunque parezca mentira, patentado en 1930. La nave se lanzó a principios 1999 (sólo tardaron tres años en desarrollarla) y en 2004 realizó el paso por el cometa Wild 2. La

cápsula con las muestras aterrizó en 2006 y ahí empezó el trabajo en los laboratorios. Las muestras de glicina encontradas no se recogieron en el aerogel, por su porosidad, sino en las láminas de aluminio que servían para contenerlo. El grupo de la Dra. Elsila ha pasado la mayor parte del tiempo desarrollando y comprobando los equipos para analizar muestras tan reducidas. La glicina se detectó considerablemente pronto (en 2008) pero han esperado a análisis isotópicos precisos para publicar la noticia (2009). A mí, esta investigación me resulta ejemplar y me quedo con cómo lo han hecho más que con lo que han encontrado.

Pedro J. Gutiérrez (IAA)



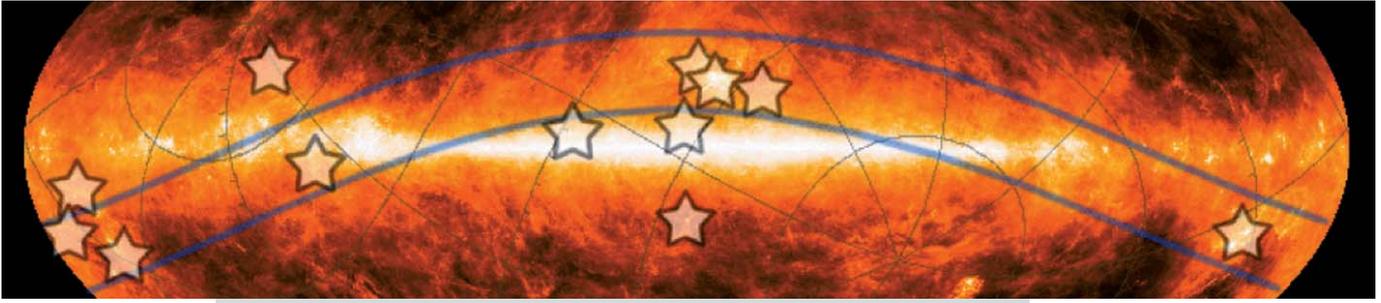
Arriba, partículas de polvo cometario atrapadas en aerogel. Fuente: NASA.

A la derecha, imagen del cometa 81P/Wild 2. Fuente: NASA.



experto radioastrónomo, opina que, por lo que respecta a los objetos del Sistema Solar, la glicina y compuestos similares deberían buscarse *in situ*, más que de manera remota. De hecho, que la glicina existe en el espacio ya se había confirmado de esta forma, analizando meteoritos. La primera vez que se detectaron aminoácidos en mete-

cina procedente del espacio fue detectada en el meteorito Murchinson en 1970. Corresponden también a ese época, principios de los 70, los estudios minuciosos de muestras lunares que permitieron la detección de glicina en ellas, aunque existen distintas hipótesis sobre su origen.



¿Existe el cinturón de Gould?

Un estudio de las regiones principales que lo delimitan apunta a que se trata de una alineación transitoria de dos sistemas distintos

► Un grupo de astrónomos, en el que participa Emilio J. Alfaro, del Instituto de Astrofísica de Andalucía, ha acometido un detallado estudio sobre el Cinturón de Gould, un sistema estelar joven con forma de disco cuyos extremos Sur y Norte se localizan en dos grupos estelares bien definidos, el de Orión (Ori OB1) y Escorpión-Lobo-Centauro (Sco-Cen), respectivamente.

El estudio muestra que estos dos grupos no proceden de la misma nube de gas y que carecen de una dinámica coherente, condiciones indispensables para formar un sistema único. Los autores sugieren

abandonar la idea del Cinturón de Gould como una estructura real, y contemplarlo como una alineación casual provocada por nuestro punto de vista.

El estudio se ha basado en la distribución de los cúmulos abiertos jóvenes, agrupaciones de entre decenas y miles de estrellas nacidas de una misma nube de gas, en las regiones de Orión y Escorpión-Lobo-Centauro. Las teorías de formación estelar afirman que las estrellas nacen a partir de enormes nubes de gas, cuya contracción y colapso va generando poblaciones estelares como los cúmulos abiertos, que se forman en las zonas más internas y densas de la nube (una nube puede contener una masa de entre miles y millones de soles). Si el cinturón de Gould fuera un sistema estelar coherente debería mostrar una distribución más o menos uniforme de cúmulos abiertos en sus dos regiones dominantes, y los datos afirman

lo contrario: mientras que la región de Orión es rica en cúmulos, Escorpión-Lobo-Centauro muestra una densidad casi nula de este tipo de objetos. Este resultado se suma a su diferente velocidad, imposible de explicar con los modelos actuales. Todo ello apunta a que estas dos regiones de formación estelar han tenido un origen diferente y que su posición actual, en la que parecen formar un único sistema, es sólo un fenómeno transitorio.

Una “superconstelación”

El Cinturón de Gould fue descubierto en 1847 desde el hemisferio Sur terrestre por John Herschel, quien lo describió como una banda de anchura similar a la Vía Láctea formada por las estrellas más brillantes del cielo austral y con una inclinación de veinte grados con respecto a la Galaxia. Benjamin Gould retomó su estudio en 1879 y, durante el siglo XX, se han dedicado numerosos tra-

El plano de la Vía Láctea, con la forma del Cinturón de Gould delimitada sobre ella. Las estrella inferior derecha marca la situación de Orión, y las tres estrellas centrales agrupadas la de Escorpión-Lobo-Centauro. Fuente: NASA.

bajos al análisis de su estructura y movimiento, así como a la construcción de una teoría que explicara su origen. La descripción más aceptada lo define como un disco de gas y estrellas, con un diámetro cercano a los 3.300 años luz y una masa de un millón de soles, y que rota sobre su eje a la vez que se expande. Sin embargo, y a la luz de los recientes resultados, el investigador Emilio J. Alfaro sugiere que se trata de una “superconstelación”, producto de la tendencia humana a ver un triángulo donde sólo hay tres puntos. “Ya era extraño que una estructura semejante sólo se viera desde el hemisferio Sur, pero ahora sabemos que Orión y Escorpión-Lobo-Centauro son grupos estelares diferenciados; así, el Cinturón de Gould es producto de nuestra visión, todavía localista, del Universo, y no un sistema real”, concluye el astrónomo.

Cosmología de alta precisión con supernovas

Las supernovas de tipo Ia, empleadas como patrón para medir distancias, muestran asimetrías que pueden conducir a errores

► La determinación de distancias es una de las cuestiones más importantes en astrofísica. A distancias pequeñas (hasta varios millones de años luz), existen diversas técnicas que permiten la determinación de distancias con buena precisión. Sin embargo, cuando hablamos de distancias “cosmológicas” (miles de

millones de años luz), ninguna de las técnicas habituales es aplicable o, si lo es, resulta en distancias determinadas con escasa precisión. Si se quiere avanzar significativamente en el campo de la cosmología, se hace necesaria una herramienta que determine las distancias con gran precisión. Hasta el

momento, el “metro-patrón” más preciso para determinar distancias es el uso de las supernovas de tipo Ia (SN Ia).

Las supernovas de tipo Ia ocurren cuando una enana blanca ha succionado gas de una estrella compañera hasta el punto en que alcanza una masa crítica, tras lo cual explota de modo violento. Como esta masa crítica es un valor muy bien conocido, las SN Ia dan lugar a

explosiones cuyo brillo intrínseco en el máximo de emisión es prácticamente igual para todas ellas. Además, la elevada uniformidad de las curvas de luz de las SN Ia las convierte también en excelentes herramientas para medir la expansión del Universo. De hecho, la observación de SN Ia a alto corrimiento al rojo llevó al descubrimiento de que el Universo experimentó una aceleración en su expansión en su época temprana.

Sin embargo, un trabajo recientemente publicado en *Nature* por científicos alemanes y estadounidenses demuestra que es necesario aplicar una corrección a esta técnica

ca, debido a que las supernovas más brillantes tienen curvas de luz más anchas. Esta correlación entre luminosidad y anchura (de la curva de luz) se obtenía en las simulaciones numéricas, utilizando modelos unidimensionales y para determinados parámetros, escogidos *ad hoc*. Sin embargo, el proceso de ignición y detonación de una supernova de Tipo Ia es un proceso intrínsecamente asimétrico,

Imagen basada en una simulación por ordenador de una supernova tipo Ia que muestra asimetrías en la explosión.
Fuente: F. Röpke.

de modo que las simulaciones 1D son, por necesidad, incorrectas, y es necesario recurrir a modelos 3D. Aquí radica la novedad del trabajo publicado en *Nature* por Kasen y colaboradores, que realizan simulaciones 3D de la física de la explosión y de la transferencia de radiación. Estas simulaciones muestran que la ruptura de la simetría esférica durante la fase de ignición y detonación de la explosión es un factor crucial en la determinación de la relación luminosidad anchura.

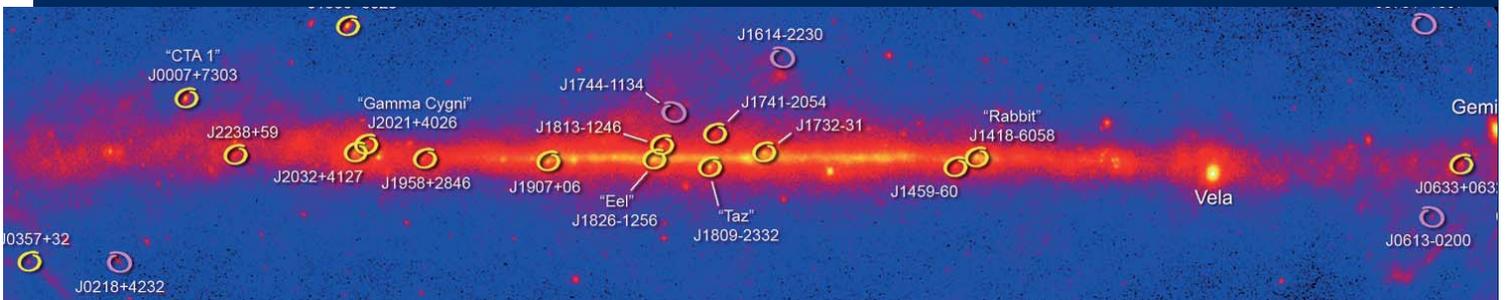
Asimismo, Kasen y colaboradores encuentran que esta asimetría puede explicar la polarización detectada en la luz de algunas supernovas.

Los autores estiman que, si no se tiene en cuenta el efecto de la asimetría intrínseca a la explosión, la

determinación de la distancia a SN Ia muy lejanas (en el Universo temprano), podría estar afectada por un error sistemático de hasta un 2%. Si tenemos en cuenta que la constante de Hubble se conocía hasta no hace mucho con un error de un factor de dos, este error del 2% se nos antojará pequeño. Sin embargo, la astrofísica está entrando en lo que podemos denominar "cosmología de precisión", en particular para determinar distancias y medir la expansión del Universo en sus épocas tempranas, que determinaron la posterior evolución del Universo en el que vivimos. Por ello, hasta errores del 2% son importantes y deben tenerse en cuenta.

Miguel Ángel Pérez Torres (IAA)

Púlsares silenciosos en radio pero ruidosos en rayos gamma



Mapa (fragmento) que muestra la posición y nombre de los dieciséis púlsares nuevos (amarillo). Fuente: NASA/DOE/Fermi LAT.

Datos obtenidos con el satélite *Fermi* apuntan a una nutrida población de púlsares invisibles en radio, región del espectro empleada generalmente para censar estos objetos

► Un púlsar es una estrella de neutrones con un potente campo magnético que gira sobre sí misma a una altísima velocidad. La gran mayoría de los 1.800 púlsares conocidos hasta la fecha han sido descubiertos por los pulsos periódicos que

emiten en el rango de las radio frecuencias. Estos pulsos se pueden explicar no porque realmente la estrella de neutrones pulse (como lo hacen algunas estrellas), sino por un mecanismo de emisión análogo al de un faro. Los pulsos detectados se generan por un haz colimado giratorio que va bañando de forma periódica el espacio. Así, en el momento en que el haz de emisión está alineado con la línea de visión del observador, este detecta un destello en forma de pulso.

Tradicionalmente los púlsares de nuestra Galaxia han sido detectados por sus pulsos en las radio frecuencias. El satélite *Fermi* de la NASA ha

detectado por primera vez dieciséis púlsares basándose exclusivamente en su emisión en rayos gamma.

Fermi es un sofisticado satélite lanzado el 11 de junio de 2008 que está diseñado para detectar emisión en rayos gamma con una sensibilidad sin precedentes en el rango de los GeV. *Fermi* extenderá así la labor realizada hace ya una década por la misión CGRO, y más concretamente por su instrumento EGRET, que realizó un catálogo con más de 150 fuentes que actualmente siguen sin identificar. *Fermi* se está revelando como una eficiente herramienta para identificar dichas fuentes, ya que de los dieciséis púlsares detec-

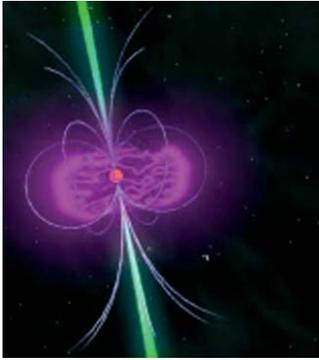
tados por *Fermi* trece están asociados al catálogo de fuentes no identificadas de EGRET.

Púlsares ocultos en los censos

El innovador método de trabajo de *Fermi* ha supuesto una revolución, pues hasta la fecha nunca se habían descubierto púlsares utilizando solamente su emisión gamma. Es importante notar que la resolución angular que se obtiene en rayos gamma es muy pobre en

comparación a la proporcionada por las ondas de radio, por lo que su búsqueda en rayos gamma es mucho más ineficaz, aunque no por ello menos enriquecedora.

El descubrimiento de los dieciséis púlsares es todavía más interesante



si se tiene en cuenta que la mayoría de ellos no se detectan en el rango de las ondas de radio. Así, estas

fuentes parecen revelar una nutrida población latente de púlsares galácticos que son invisibles (o al menos no fácilmente detectables) por los radio *surveys*, método tradicionalmente utilizado para llevar a cabo censos de púlsares en nuestra Galaxia. Se sospecha que los dieciséis púlsares localizados por *Fermi* no sean más que la punta del iceberg de una población subyacente de púlsares que explicarían gran parte del misterioso catálogo EGRET de fuentes no identificadas. Está todavía por ver qué porcentaje del catálogo de EGRET se puede explicar por esta posible población de púlsares no emisores de ondas de radio.

Sobre el origen de la emisión

Por otra parte el hecho de que

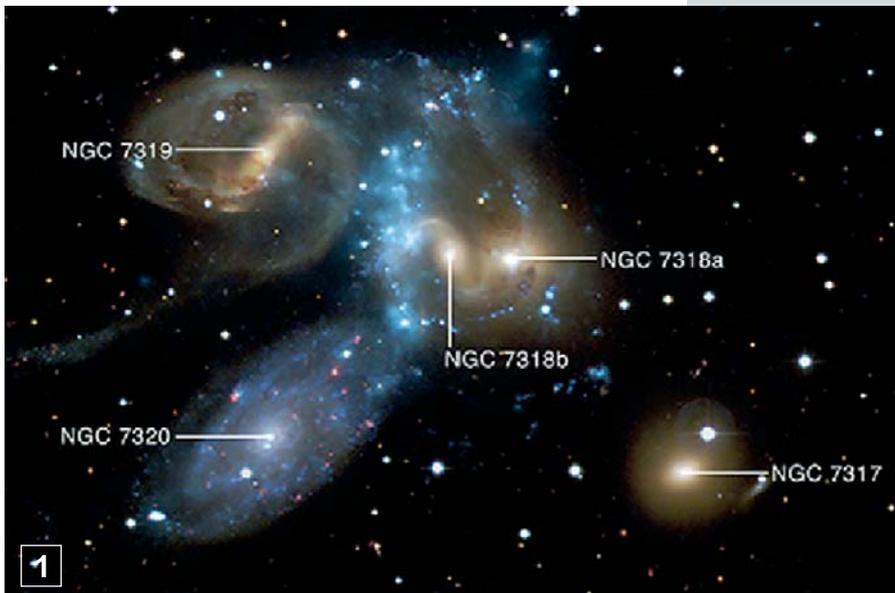
Fermi haya detectado púlsares en rayos gamma que no se detectan en radio nos proporciona valiosa información sobre el lugar de la región de emisión. La ausencia de detección en ondas de radio puede responder a que la anchura del haz emitido en rayos gamma es mayor que el haz en ondas de radio. Así, dada una muestra de púlsares con haces orientados al azar respecto al observador, estadísticamente es esperable que se detecten púlsares en rayos gamma sin emisión aparente en radio frecuencias. Por otra parte, el hecho de que el haz sea más amplio en rayos gamma que en radio frecuencias probablemente nos esté indicando que los fotones de radio y gamma se crean en regiones diferentes alrededor de la estrella de neutrones. Así los fotones gamma se crearían en regio-

nes altas de la magnetosfera mientras que las ondas de radio se emitirían en regiones polares mucho más próximas a la estrella de neutrones y por lo tanto de forma más colimada.

Por encima de disquisiciones puramente técnicas sobre los púlsares que emiten o no en radio, quizás la lección más importante de este descubrimiento reside en observar hasta qué punto la visión que tenemos del Universo, y de las fuentes que lo conforman, está totalmente sesgada por la técnica utilizada para su observación. El método de detección empleado condiciona fuertemente las poblaciones de objetos finalmente observadas y, por lo tanto, las características físicas que los engloban y caracterizan.

Javier Gorosabel (IAA)

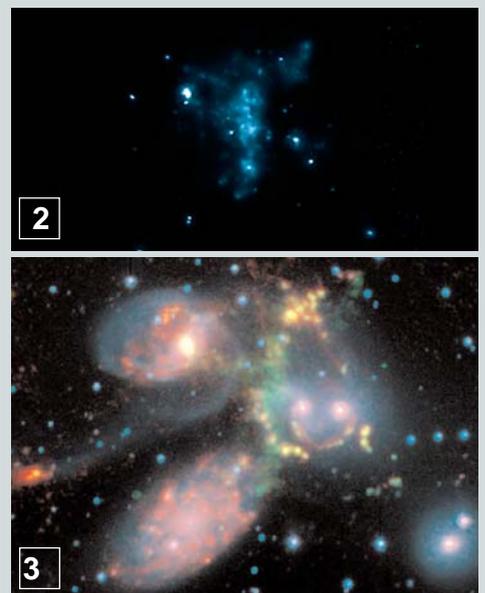
EL QUINTETO DE STÉPHAN: una colisión de galaxias en plena acción



► El pasado mes de julio aparecía, en las noticias del Observatorio espacial Chandra, la imagen en rayos X del Quinteto de Stéphan (imagen 1), en la que se observa un arco azul en la región central que se corresponde con emisión intensa en rayos X, originada por gas que ha alcanzado tempera-

turas muy altas debido a una onda de choque.

El Quinteto de Stéphan es el primer grupo compacto de galaxias observado, descubierto por el astrónomo francés Stéphan en 1877 en el Observatorio de Marsella. Aunque parece compuesto por las cinco galaxias de la imagen, se comprobó



1. Imagen compuesta con la emisión en el visible (telescopio CFHT, Hawái) y en rayos X (Chandra) del Quinteto de Stéphan.

2. Emisión del gas calentado por la onda de choque, y detectado con la imagen obtenida con el Observatorio de rayos X Chandra.

3. Imagen compuesta por la luz integrada en la zona roja del espectro visible (azul) y el gas ionizado (verde) -datos obtenidos en el Observatorio de Calar Alto, Almería. La imagen de la luz infrarroja a 8 micras (rojo) proviene del telescopio espacial Spitzer.

que la mayor de ellas (NGC 7320) se encuentra a una distancia muy infe-

rior a la de las otras cuatro, y por tanto no estaría interaccionando con las

que realmente forman el grupo. Datos obtenidos en el visible ya habían mostrado un esquema de interacción según el que la galaxia NGC 7318b está atravesando por primera vez el grupo inicial formado por cuatro galaxias (NGC 7318a, NGC 7319, NGC7317 y NGC7320c, fuera esta última del campo de la imagen, hacia la izquierda), lo que generaría la onda de choque. Uno de los signos más patentes de las

sucesivas interacciones previas entre las galaxias de este grupo es la larga cola que se ve en la imagen visible, partiendo de NGC7319 hacia abajo y a la izquierda. Datos posteriores del gas molecular, atómico e ionizado* han confirmado y completado este escenario global, del que se subraya ahora la importancia de los choques, tanto en rayos X (imagen 2), como en el infrarrojo (imagen 3).

Tal y como se indica en la noticia de Chandra, el Quinteto de Stéphan proporciona una de las raras oportunidades para observar un grupo de galaxias en el proceso de evolución de un sistema con emisión débil en rayos X, como corresponde a un grupo dominado por galaxias espirales, a un sistema más evolucionado, con emisión fuerte en rayos X y dominado por galaxias elípticas. Poder determinar el efecto de las

colisiones galácticas en la evolución de estos sistemas es de suma importancia para entender el origen del gas caliente, brillante en rayos X, presente en grupos de galaxias.

Isabel Márquez (IAA)

REFERENCIAS

O'Sullivan et al. 2009. *ApJ* 701, 1560.
Gullard et al. 2009. *A&A* 502, 515.
Moles, Márquez y Sulentic 1998. *A&A* 334, 473.
Moles, Sulentic y Márquez 1997. *ApJ Letters* 485, 69.

* Trabajos de Durbala et al. (2008), Appleton et al. (2006), Trinchieri et al. (2005), Petitpas et al. (2005), Lisenfeld et al. (2004), Gutiérrez et al. (2002), Williams, Yun y Verdes-Montenegro (2002), Sulentic et al. (2001), Gallagher et al. (2001), Plana et al. (1999), Yun et al. (1997).

Ecós gravitatorios del Universo primordial: cotas de LIGO

► La astronomía de ondas gravitatorias ha abierto una nueva ventana al Universo temprano. El equipo de investigadores de la *LIGO and Virgo Collaboration*, cuyo objetivo es el análisis de las señales de ondas gravitatorias de los interferómetros láser LIGO y Virgo, ha presentado su primer resultado científico conjunto. A partir de los datos acumulados entre 2005 y 2007 por LIGO, el estudio establece un límite superior a la intensidad de la, aún no detectada, radiación gravitatoria estocástica de fondo (GWBR, *Gravitational Wave Background Radiation*). La sensibilidad del detector interferométrico ha permitido acotar los valores de ciertos parámetros físicos del Universo temprano. En particular, determinados modelos teóricos quedan descartados por estas observaciones. Los resultados han sido publicados por la revista *Nature*.

De acuerdo con la Relatividad General de Einstein, toda distribución de materia cuya forma cambia en el tiempo emite lo que se denominan ondas gravitatorias. La dinámica orbital de los púlsares binarios proporciona la evidencia observacional de la existencia de este tipo de radiación. En general, sólo los objetos muy compactos y con grandes velocidades (próximas a la de la luz) son capaces de generar



Vista aérea de uno de los brazos de cuatro kilómetros del interferómetro de LIGO en Livingston (Louisiana).

Los datos recogidos entre 2005 y 2007 (*science run 5*) por esta antena gravitatoria, junto con las otras dos de LIGO en Hanford (Washington), han permitido acotar ciertos parámetros del Universo temprano.

ondas de intensidad detectable, lo que convierte a los eventos astrofísicos muy violentos en las principales fuentes de radiación gravitatoria. Otro mecanismo fundamental de producción de ondas gravitatorias, base del estudio publicado en *Nature*, consiste en la amplificación de fluctuaciones cuánticas en fases tempranas del Universo. Una vez

generada, esta radiación viaja a la velocidad de la luz sin verse prácticamente alterada en su interacción con la materia.

El eco actual de dichas ondas primordiales consistiría en un patrón estocástico de radiación gravitatoria de fondo (GWBR) que permearía el Universo presente y constituiría una contrapartida gravitatoria

a la radiación cósmica de fondo de microondas (CMB, *Cosmic Microwave Background radiation*). Si la CMB nos proporciona una "fotografía" del Universo unos

300.000 años después del Big Bang, la GWBR explora el minuto posterior al mismo. Entre los mecanismos cosmológicos para la generación de GWBR se encuentran los modelos inflacionarios, ciertos modelos denominados "pre-Big Bang", transiciones de fase electrodébiles o (super)cuerdas cósmicas. Además, el conjunto de fuentes astrofísicas no resueltas como magnetares o estrellas de neutrones en rotación contribuyen a esta radiación estocástica de fondo. Dicho fondo estocástico codifica información cosmológica muy temprana inaccesible para otros tipos de radiación. Aunque disponemos de una razonable comprensión del Universo a partir de la bariogénesis (minutos después del Big Bang), contamos con pocos datos observacionales del

Universo en su primer minuto. Esto dota a la astronomía de ondas gravitatorias de una especial relevancia, convirtiéndola en una herramienta única para el estudio de los procesos físicos en el Universo primordial.

El análisis publicado determina una cota superior a la relación Ω_o entre la densidad de energía del fondo

gravitatorio estocástico (en la banda de frecuencia ~ 100 Hz) y la densidad crítica de energía del Universo, concluyendo que $\Omega_o < 6.9 \times 10^{-6}$ al 95% de confianza. Este resultado mejora cotas previas indirectas obtenidas a partir del estudio de la radiación de fondo electromagnética CMB y de la nucleosíntesis primordial (BBN, *Big Bang Nucleosynthesis*). En efecto, una cantidad suficiente de radiación gravitatoria afectaría tanto al espectro angular observado de la CMB como a la abundancia de núcleos ligeros producidos en la BBN, lo que se traduce en cotas

para la posible GWBR.

De forma más específica, los datos de LIGO eliminan aquellos modelos con excesiva producción de ondas gravitatorias primordiales. En particular, los resultados ponen cotas a la física del Universo en la época de inflación (unos 10^{-36} segundos tras el Big Bang). De manera más especulativa, del análisis de modelos de evolución temprana tipo pre-Big Bang y de mecanismos de producción de ondas gravitatorias basados en (super)cuerdas cósmicas se derivan cotas observacionales a ciertos parámetros asociados a física

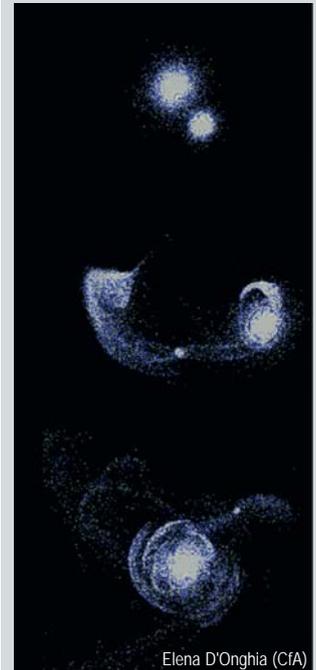
de altas energías.

La mejora de las cotas sobre Ω_o cumple uno de los principales objetivos del programa de investigación de LIGO y Virgo. El siguiente gran hito será la puesta en marcha en 2014 de los *Advanced LIGO* y *Virgo*, nueva generación de interferómetros diez veces más sensible que los actuales instrumentos. Estos detectores aportarán claves fundamentales para comprender la formación de estructuras en el Universo y la posterior aparición de galaxias.

José Luis Jaramillo (IAA)

EN BREVE

Posible origen de las galaxias esferoidales enanas



Elena D'Onghia (CfA)

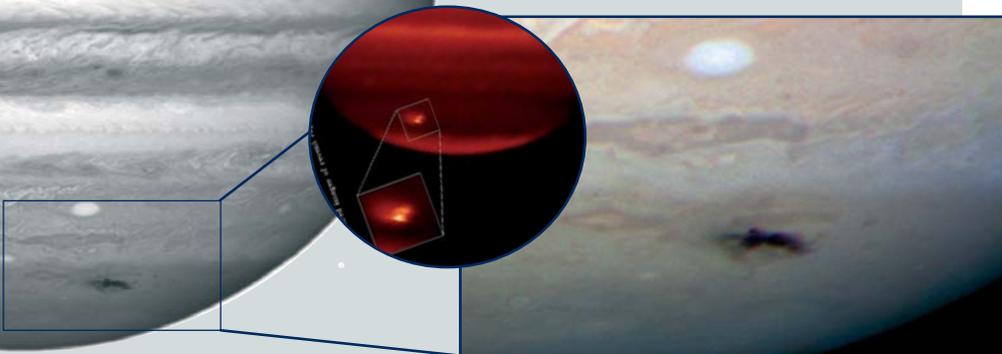
► Las esferoidales enanas son galaxias pequeñas y débiles con un contenido en estrellas muy reducido (se cree que se componen en su mayor parte de materia oscura) y cuyo origen era objeto de controversia.

Un grupo de astrónomos del *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* ha realizado simulaciones para comprender la formación de estas galaxias y ha hallado que, en los procesos de interacción galáctica, una galaxia enana puede perder parte de su población estelar y transformarse en una esferoidal enana. "El encuentro desencadena una resonancia gravitatoria que "desnuda" de estrellas y gas a las galaxias enanas, produciendo colas y puentes de estrellas entre las galaxias que interactúan", explicaba Elena D'Onghia, responsable de la investigación.

Según la investigación, las estrellas expulsadas deberían ser detectables, y se cree que el puente de estrellas hallado recientemente entre Leo IV y Leo V (ambas galaxias esferoidales enanas) podría ser resultado de un proceso similar.

Júpiter castigado

Un astrónomo aficionado descubre un impacto contra Júpiter, originado posiblemente por un cometa de menos de un kilómetro de diámetro



► De nuevo el Sistema Solar vuelve a sorprendernos; un Sistema Solar "vivo", en el que se producen constantemente fenómenos maravillosos y a menudo dramáticos, ¿quién podía esperar, por ejemplo, que un objeto chocara sin previo aviso contra Júpiter, con una energía miles de veces más poderosa que la de una bomba nuclear de diez megatones? El 19 de julio pasado el astrónomo aficionado Anthony Wesley se encontraba haciendo una observación rutinaria de Júpiter cuando una pequeña mancha más oscura cerca del polo sur de este planeta gigante gaseoso llamó su atención. A Wesley, que

observaba desde su pequeño observatorio *amateur* situado en Nueva Gales del Sur, Australia, seguramente la mancha le recordó a otro impacto múltiple que tuvo lugar hace quince años. En esa ocasión, el cometa Shoemaker-Levy 9 dejó la atmósfera superior de Júpiter plagada de cicatrices oscuras perfectamente visibles con telescopios de aficionado. En este caso, Wesley pudo detectarlo usando su pequeño telescopio reflector al que había acoplado una cámara de vídeo especialmente sensible para trabajar en condiciones de baja iluminación. Nada más terminar la observación, Wesley envió un correo

De fondo, imágenes del impacto tomadas por el telescopio Hubble (NASA, ESA, and H. Hammel - *Space Science Institute*, Boulder.- y el *Jupiter Comet Impact Team*). Superpuesta, imagen del Keck II en el infrarrojo.

electrónico informando de su hallazgo a diferentes instituciones astronómicas, como el MPC (*Minor Planet Center* o Centro de Planetas Menores) y el JPL (*Jet Propulsion Laboratory* o Laboratorio de Propulsión a Chorro). Sus correos alertaron a la comunidad astronómica internacional, y Paul Kalas, junto con sus colaboradores, confirmaron la detección de Wesley usando el telescopio Keck II del observatorio de Mauna Kea (Hawaii).

Como Júpiter es un planeta gaseoso, formado fundamentalmente por hidrógeno, un impacto sobre el mismo no dejará cráter alguno, pues no hay superficie sólida sobre la que dicho cráter pueda formarse. Si la mancha detectada por Wesley se había producido por el impacto de un cuerpo contra las capas superiores de la atmósfera de Júpiter, la energía del impacto debería haber calentado el gas, por lo que debería de ser más brillante en el infrarrojo. Efectivamente, la mancha aparecía como un punto extremadamente brillante en imágenes tomadas en esta longitud de onda, lo que confirmó que dicha for-

mación era el resultado de un impacto, y no otro fenómeno producido en la atmósfera de Júpiter. Las observaciones infrarrojas realizadas con el Keck y el telescopio infrarrojo de la NASA, ambos en Mauna Kea, permitieron también estimar el tamaño de la cicatriz debida al impacto en unos 190 millones de kilómetros cuadrados, ¡un tamaño superior al del océano Pacífico! El análisis posterior de las observaciones infrarrojas por parte de Glenn Orton del JPL permitió determinar que la mancha estaba compuesta de aerosoles situados en la alta atmósfera de Júpiter, detectándose incluso emanaciones

de amoníaco. La mancha también ha sido observada con la nueva cámara de gran campo colocada en el telescopio espacial Hubble.

No se sabe con certeza qué tipo de objeto fue el que produjo dicha mancha oscura, pero se sospecha que pudo ser un cometa con menos de un kilómetro de diámetro, por comparación con los tamaños de las manchas producidas por el cometa Shoemaker-Levy 9. Es bastante probable que se haya tratado de un cometa, pues estos objetos tienen órbitas muy excéntricas que pueden llevarlos a chocar contra Júpiter. El hecho de que no se haya detectado antes del impacto se

debe al pequeño tamaño del mismo y a que seguramente estaba inactivo a esa distancia del Sol (más de cinco unidades astronómicas). A tal distancia del Sol los hielos que componen un cometa no habrían entrado aún en sublimación, por lo que su brillo estaría por debajo de lo que pueden detectar los mayores telescopios existentes actualmente. Es muy probable que se produzcan bastante a menudo impactos de este tipo contra Júpiter: colisiones colosales que nos recuerdan que vivimos en un Universo en continuo cambio, en continua evolución.

Pablo Santos (IAA)

ENTRE BASTIDORES

LOS PRESUPUESTOS DE I+D: *DETERIORA SEQUOR*

JAVIER LÓPEZ FACAL

No debería cabernos ninguna duda de que Jasón era un hombre irresistiblemente atractivo, porque nada más llegar a la Cólquide en busca del vello cino de oro, la princesa Medea contrajo una pasión tan desenfadada hacia él que fue capaz de traicionar a su padre y a su pueblo por amor, aun a sabiendas de que estaba actuando rematadamente mal.

Ovidio pone en su boca una frase de esas que le salen redondas, para describir el dilema trágico de Medea: *video meliora proboque, deteriora sequor*, "yo veo lo que es mejor y lo apruebo, pero hago lo que es peor".

He recordado esta frase de *Las Metamorfosis* de Ovidio, habitualmente (mal) atribuida a San Agustín, con motivo de la inminente presentación de los Presupuestos Generales del Estado que, en materia de I+D, presentan unos augurios negrísimos, aun si se tiene en cuenta, incluso, la gravedad de la crisis económica que padecemos.

La verdad es que yo estoy casi seguro de que el presidente de Gobierno está íntimamente convencido de que las mejores inversiones públicas son las que se orientan a la economía sostenible y a fomentar las políticas de innovación, pero por alguna razón inexplicable, él sigue gastando en ladrillo, a través de los planes E y de otras prioridades inversoras.

Recordemos algunos hechos recientes, para tratar de bucear en los arcanos de su mente: unas semanas antes de las elecciones de 2004, el entonces candidato Rodríguez Zapatero celebró un encuentro multitudinario con científicos, en la sede central del CSIC de Madrid, y prometió que, si ganaba, duplicaría en una sola legislatura el gasto en I+D.

La promesa fue recibida con gran entusiasmo por el respetable, aunque también con una cierta desconfianza resabiada, pero lo cierto es que entre 2004 y 2008 se duplicó el gasto en I+D, se puso en marcha un Plan Nacional de Reformas (PNR) que se remitió a Bruselas en 2005, se incorporó a este PNR el ambicioso programa INGENIO y, como consecuencia de todo ello, el sistema español de I+D adquirió una alegría y una dinámica que admiraban a propios y extraños: hasta la revista británica *Nature*, habitualmente circunspecta y más bien parca en sus elogios, reconocía en marzo de 2007 los progresos que estaba realizando España al respecto.

Alguno de ustedes probablemente pensará, sí, pero eso era antes del

tsunami económico que nos ha anegado sorpresivamente, pero ahora, con la que está cayendo, lo menos que podemos hacer es una especie de PER de urgencia nacional y a esperar a que escampe. Al fin y al cabo, es lo que están haciendo todos los países.

Pues bien, no, no es lo que están haciendo todos. Para empezar, el presidente Obama, justamente admirado por su liderazgo político en todo el mundo, está intentando reorientar el énfasis inversor hacia sectores emergentes e innovadores, como las energías renovables o la sanidad pública, a pesar de las evidentes necesidades de sectores económicos maduros de su país, como el de la industria del automóvil.

Aquí en Europa, por su parte, otros países están actuando en la misma dirección: la actual presidencia de la Unión, que recae en Suecia, ha fijado como una de sus prioridades, las políticas de investigación que fomenten la innovación (*pro-innovation research policies*) y el desarrollo del "Espacio europeo de investigación" (ERA) de la agenda de Lisboa.

Después de la autista y retrógrada presidencia checa de la Unión Europea, congratula ver cómo Suecia vuelve a la razón, con un desparramo propio de Lisbeth Salander.

Sería una lástima que un gobierno progresista de un país importante de la Unión, como España, no pudiese continuar la senda a la que ha vuelto Suecia, por el simple hecho de que nuestro presidente haya renunciado a las prioridades e ideales de su primera legislatura, aun creyendo en su más íntimo fuero interno, probablemente, en la importancia de la economía sostenible.

En Medea se entiende por qué resolvió el dilema trágico como lo hizo porque, al fin y al cabo, Jasón debería ser irresistible, pero no creo que el señor Zapatero encuentre tan irresistible la economía del ladrillo y del parcheo como para darle una puñalada presupuestaria por la espalda al gasto en I+D.

No somos pocos los científicos españoles que estamos estos días en una situación de desánimo preventivo, a la espera de que se cumplan los peores augurios cuando se presenten los presupuestos de I+D.

Presidente, por favor, disipe nuestros temores y demuéstrenos que somos unos mal pensados.

JAVIER LÓPEZ FACAL ES PROFESOR DE INVESTIGACIÓN DEL CSIC.

Pilares científicos

FORMACIÓN DE ESTRELLAS DE GRAN MASA

LOS NÚCLEOS MOLECULARES CALIENTES, NUBES DE GAS Y POLVO DONDE PARECEN ESCONDERSE LOS EMBRIONES DE LAS ESTRELLAS MUY MASIVAS, APUNTAN A UN PROCESO DE FORMACIÓN POR ACRECIÓN SIMILAR AL DE LAS ESTRELLAS DE BAJA MASA

Las regiones de hidrógeno fotoionizado, conocidas como regiones HII, son un indicador claro de la presencia de estrellas masivas jóvenes (más de diez veces la masa del Sol). Hasta hace relativamente poco, se consideraba que estas regiones eran la manifestación más joven que se conocía en el proceso de la formación de una estrella de gran masa. Estas vistosas regiones (la nebulosa de Orión es una de ellas), que la propia estrella crea a su alrededor cuando empieza a generar fotones suficientemente energéticos para arrancar los electrones de los átomos de hidrógeno, se pueden observar en prácticamente todo el espectro electromagnético, y son una prueba indudable de la formación de una estrella con una gran masa y luminosidad. Puesto que inicialmente la presión en el interior de las regiones HII es mayor que en el medio

circundante, estas empiezan a expandirse, de modo que su tamaño está relacionado con su juventud. Por ello, y con la finalidad de encontrar objetos cada vez más jóvenes, se empezaron a estudiar las regiones HII compactas, ultracompactas, e hipercompactas. Debido a que en las primeras etapas las estrellas aún están rodeadas de gran cantidad de polvo, estos estudios de las fases más tempranas se han realizado generalmente en radio. Sin embargo, las regiones HII, incluso en su fase hipercompacta, contienen estrellas que hoy en día ya se consideran relativamente adultas. Uno quisiera estudiar estrellas aún más jóvenes, en las que la ionización todavía no ha comenzado. Por ello, en los últimos años se ha llevado a cabo un gran número de búsquedas con radiotelescopios para encontrar una fase más temprana. Así se han descubierto los llamados "núcleos moleculares calientes", condensaciones de gas y polvo muy caliente que parecen esconder en su interior el embrión de lo que será una estrella de gran masa. Una versión

escalada del escenario de acreción adoptado para la formación de estrellas de baja masa (como el Sol) permite reproducir las propiedades observadas en los núcleos moleculares calientes. En este escenario, la estrella se forma por acreción -o acumulación- de material de una envoltura de gas y polvo. Aunque inicialmente esta envoltura puede ser más o menos esférica, a medida que transcurre el tiempo se va deformando en su centro, dando lugar a un disco protoplanetario que recibe el material que cae de la envoltura y lo reenvía a la estrella. Dicha acreción va acompañada de la eyección de una parte del material en forma de potentes chorros que transportan el exceso de momento angular del sistema, de modo parecido a lo que ocurre en las protoestrellas de tipo solar. Efectivamente, la nueva generación de instrumentos, principalmente grandes interferómetros, ha logrado descubrir en las protoestrellas masivas los ingredientes básicos del proceso de acreción, tales como discos, chorros y acreción.

Incertidumbres

DE LOS NÚCLEOS CALIENTES A LAS REGIONES HII

A PESAR DEL IMPORTANTE GRADO DE CONSENSO SOBRE LOS RASGOS GENERALES DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE ESTRELLAS MUY MASIVAS, AÚN QUEDAN MUCHOS DETALLES POR COMPRENDER MEJOR

Por ejemplo, en realidad desconocemos cómo se inicia la formación de la región HII. Se piensa que las estrellas de gran masa se deshacen de su envoltura materna a través de potentes vientos, ionizando el material del disco y la envoltura para crear una región fotoionizada o región HII. Se postula que, en la fase de núcleo molecular caliente, la acreción es tan intensa que "ahoga" el desarrollo de esta región HII. Sin embargo, a medida que los chorros colimados van barriendo el material y abriendo cavidades a lo largo del eje de rotación, parecería que los fotones

ionizantes podrían escaparse en esta dirección y desarrollar una región HII incipiente. Sin embargo, hasta ahora no se ha observado este escape ni aun en aquellos núcleos moleculares calientes con detecciones más claras de chorros y discos. Quizás porque no tenemos la instrumentación adecuada para buscar las regiones fotoionizadas en el momento de su nacimiento, o porque no estemos entendido bien el proceso de formación de las estrellas de gran masa. Por otra parte, las regiones de formación estelar masiva se encuentran más lejos que las de baja masa, de modo que las incertidumbres observacionales en la identificación de los ingredientes que caracterizan el escenario de acreción son mayores. Es difícil resolver

espacialmente y sin ambigüedad la estructura relativamente pequeña de los discos de acreción: dos objetos independientes con diferentes velocidades pueden confundirse con una única estructura en rotación, o lo que parece ser una estrella masiva puede corresponder a dos o varias estrellas de menor masa. Todo ello hace que todavía no puedan descartarse procesos alternativos al de acreción, como el de coalescencia de estrellas de menor masa previamente formadas, para explicar las primeras etapas de la formación de las estrellas de gran masa. Las incertidumbres son mayores en el caso de los objetos más masivos, las estrellas de tipo O, porque se han identificado muy pocas en la fase de núcleo molecular caliente.

AGENDA

CONFERENCIAS DE DIVULGACIÓN EN EL IAA

<http://www.iaa.es/conferencias/>

29 oct	Emilio J. Alfaro (IAA-CSIC)	Creacionismo, catastrofismo y transformismo en Astrofísica
26 nov	Juan Fabregat (U. Valencia)	Título por confirmar
17 dic	Alberto Castro Tirado (IAA-CSIC)	Astronomía robótica: telescopios que lo hacen todo

SEMANA DE LA CIENCIA 2009

Del 17 al 20 de noviembre (19:00) se celebrará en la Biblioteca de Andalucía el ciclo de divulgación científica "Noches de ciencia III", organizado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) y la Estación Experimental del Zaidín (EEZ-CSIC). Este ciclo busca divulgar la ciencia de forma amena y con un enfoque multidisciplinar, aunando la astronomía con las ciencias de la tierra. Este año el tema central será el concepto de evolución, que se examinará desde diferentes ámbitos: Galileo y Darwin como motores de cambio en la astronomía y la biología, la evolución química del universo y de la vida (¿cómo surgieron los elementos que forman lo que vemos?), la evolución de nuestro modo de estudiar la naturaleza gracias a las lentes (el telescopio y el microscopio como extensiones de nuestros ojos) y la influencia del entorno desde el punto de vista de la habitabilidad en otros planetas y en el nuestro propio (conceptos de selección, adaptación y herencia). Las charlas se organizan en forma de dueto para potenciar el debate con la audiencia y serán impartidas por profesionales de reconocido prestigio y gran capacidad de comunicación.

Más información en www.iaa.es/scyt2009

ACTIVIDADES PARALELAS:

- EXPOSICIÓN FOTOGRÁFICA "COSMOS: VISTAS DESDE LA NAVE TIERRA", de la Sociedad Astronómica Granadina. En la sala de exposiciones de la Biblioteca de Andalucía (C/Profesor Cantero 6, Granada). Del 9 al 20 de noviembre.

- CICLO DE CIENCIA FICCIÓN en la Filmoteca de Andalucía. Del 9 al 13 de noviembre. Programa en: www.filmotecadeandalucia.com

EVOLUCIÓN

INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA, IAA-CSIC
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL ZAIDÍN, EEZ-CSIC

GALILEO y DARWIN
DOS REVOLUCIONES IMPARABLES
MARTES 17 NOV. 19:00

los ELEMENTOS de la VIDA
EVOLUCIÓN QUÍMICA EN EL UNIVERSO
MIÉRCOLES 18 NOV. 19:00

naturaleza al DESCUBIERTO
TELESCOPIO Y MICROSCOPIO: LAS LENTES DE LA VIDA
JUEVES 19 NOV. 19:00

¿EL ENTORNO MANDA?
HABITABILIDAD Y SELECCIÓN NATURAL
VIERNES 20 NOV. 19:00

Semana de la Ciencia 2009
www.iaa.es/scyt2009
EN LA BIBLIOTECA DE ANDALUCÍA
C/Profesor Sainz Cantero 6

exposición fotográfica
COSMOS: vistas desde la nave Tierra
SOCIEDAD ASTRONÓMICA GRANADINA
DEL 9 AL 20 DE NOVIEMBRE
Sala de exposiciones de la Biblioteca de Andalucía

ciclo de ciencia ficción
en la Filmoteca de Andalucía

PROGRAMA EN www.filmotecadeandalucia.com
C/Profesor Sainz Cantero 6

ACTIVIDADES PARALELAS

FECYT
CSIC

RECOMENDADOS

NUEVO CENTRO ASTRONÓMICO DE DIVULGACIÓN

El pasado mes de junio tuvo lugar la inauguración del centro astronómico "La Fresnedilla" con una serie de actividades de divulgación, entre las que destacaron las conferencias de Emilio J. García (IAA), Eduardo Battaner y Enrique Hita (UGR). En pleno corazón del Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y las Villas, la Asociación Astronómica Quarks de Úbeda une uno de los parajes más bellos de la geografía española con uno de los mejores cielos a través de diversas actividades como conferencias, observaciones, talleres...

Más información y contacto:

www.aaquarks.com

aaquarks@aaquarks.com



CHARLAS DIVULGATIVAS PARA COLEGIOS EN EL IAA

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).

