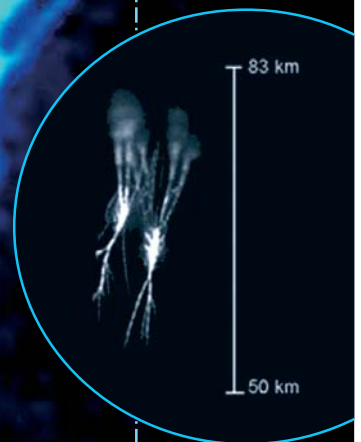


DESCARGAS EN LA ALTA ATMOSFERA

70 KM

EL MISTERIO DE DI HERCULIS
RAYOS GAMMA EN GALAXIAS ACTIVAS
CUÁSARES DE TIPO 2



20 KM

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

REPORTAJES

Relámpagos en las alturas ...3

El misterio de Di Herculis ...7

Jets en galaxias activas ...9

HISTORIAS DE ASTRONOMÍA. Los *All-Star* de la física ...13

DECONSTRUCCIÓN Y otros ENSAYOS. Cómo "encender" un cuásar ...14

EL "MOBY DICK" DE... María Rosa Zapatero Osorio (CAB, CSIC-INTA)...16

ACTUALIDAD ...17

ENTRE BASTIDORES ...21

CIENCIA: PILARES E INCERTIDUMBRES

El Sistema Solar: ¿conocemos de verdad nuestro vecindario? ...22

ACTIVIDADES IAA, AGENDA Y RECOMENDADOS ...24

SUMARIO



Fotografías de *sprites* sobre territorio español hechas por Oscar van del Velde, del grupo de investigación sobre rayos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) liderado por Joan Montanyà que, a su vez, forma parte del equipo científico español de la misión ASIM de la ESA. Las fotos en color muestran colores reales.

Relámpagos en las alturas

EL ENIGMÁTICO MUNDO DE LOS EVENTOS LUMINOSOS TRANSITORIOS EN LA ALTA ATMÓSFERA

A. Luque, J. Sánchez del Río, F. J. Gordillo Vázquez (IAA-CSIC)

EN LA NOCHE DEL 5 AL 6 DE JULIO DE 1989, UN GRUPO DE INVESTIGADORES DE LA UNIVERSIDAD DE MINNESOTA, dirigidos por John R. Winckler, probaba una cámara que iba a ser instalada en un cohete para investigar la atmósfera. Por azar apuntaron la cámara hacia un fragmento claro del cielo sin dar importancia a que, bajo él, en el horizonte, se vislumbraban las nubes de una tormenta cientos de kilómetros al norte. Dos fotogramas de su grabación (ver recuadro inferior) iniciaron una línea de investigación que ha cambiado radicalmente nuestra visión de la mesosfera, la capa de la atmósfera

situada entre 50 y 100 kilómetros de altura. Antes tenida por una capa más bien inerte y carente de fenómenos físicos relevantes, la mesosfera ha pasado a ser vista como el territorio donde se produce una multitud de fenómenos emparentados con los rayos de una tormenta, que se conocen genéricamente como Eventos Luminosos Transitorios (TLEs según sus siglas inglesas: *Transient Luminous Events*) y que consisten en breves emisiones luminosas en la alta atmósfera causadas por la actividad eléctrica de una tormenta.

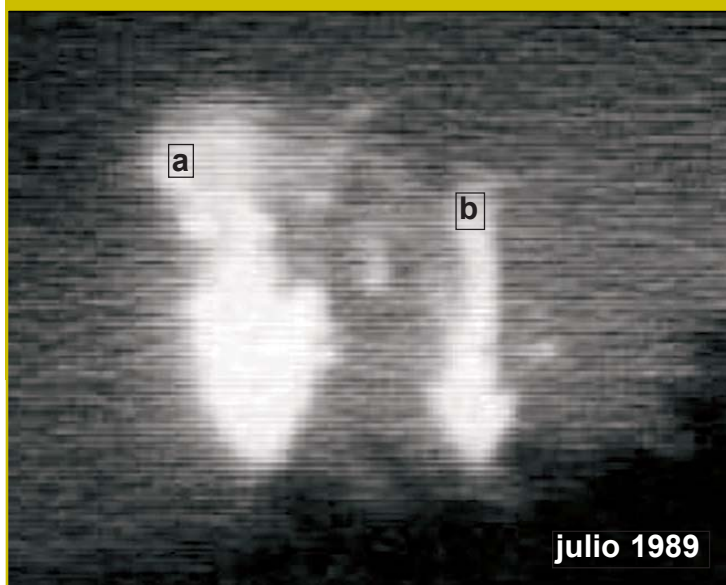
Lo que Winckler y sus colaboradores observaron fue un espécimen de la especie más común de TLEs: los *sprites*. Se

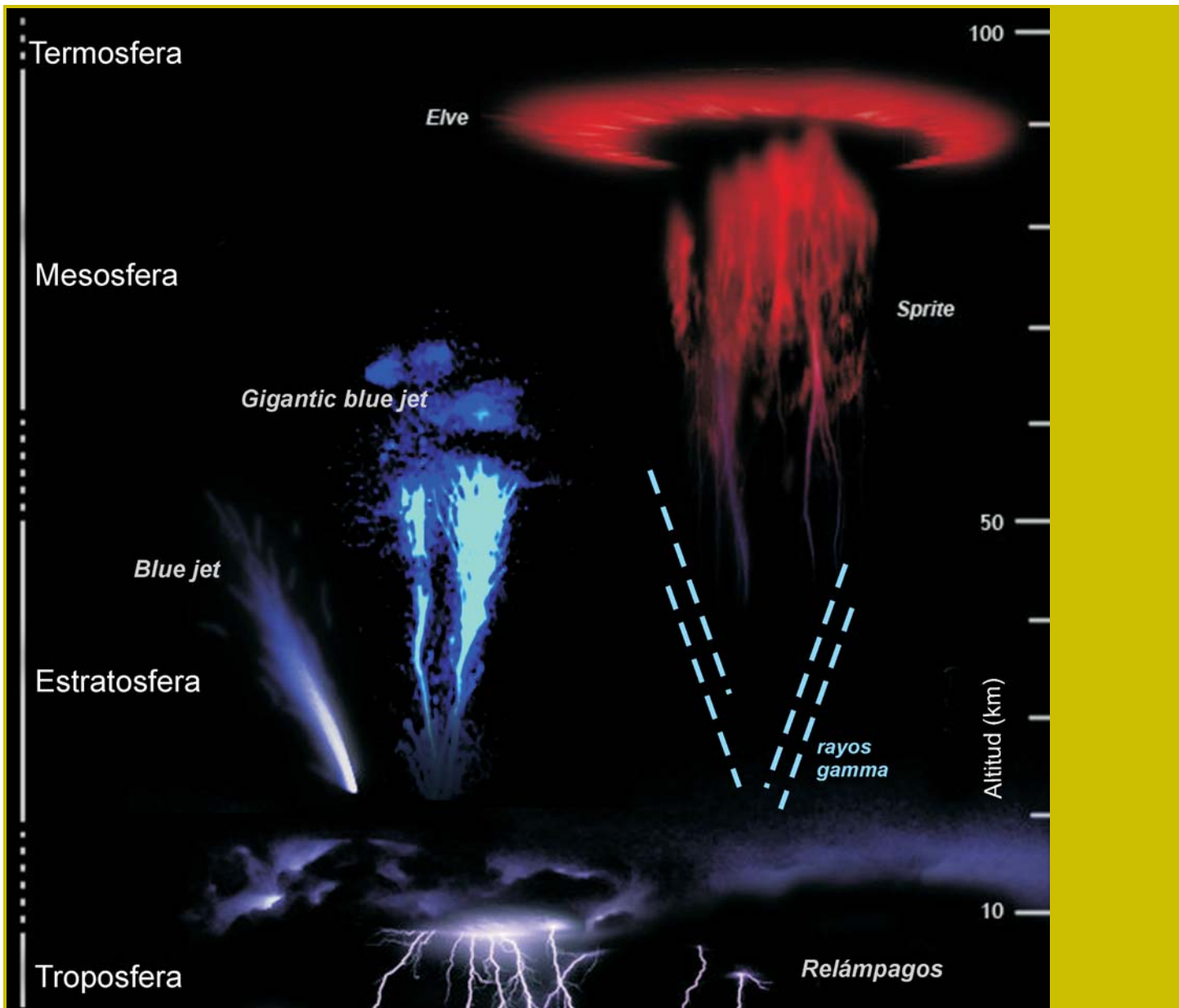
trata de descargas eléctricas que duran unas centésimas de segundo, se extienden desde los cuarenta hasta casi cien kilómetros sobre el suelo y tienen unas decenas de kilómetros de anchura. Los *sprites* se inician por la carga eléctrica que permanece en una nube de tormenta tras una descarga intensa entre la nube y el suelo. Aunque la observación de Winckler fue fortuita, no resultó completamente inesperada. Ya en 1925, C. T. R. Wilson -físico escocés galardonado con un premio Nobel por el diseño de la cámara de niebla- había predicho la existencia de descargas atmosféricas a gran altura sobre una tormenta. Su razonamiento fue este: a medida que uno asciende en la atmósfera, la densidad del aire disminuye; un electrón desligado sufre cada vez menos colisiones y gana más fácilmente energía de un campo eléctrico dado. El campo eléctrico creado por la carga en una nube disminuye lentamente con la altura en tanto que la densidad atmosférica decae

LOS PRIMEROS EJEMPLARES

Primeras imágenes de dos tipos de *Transient Luminous Events* (TLE). La foto de la izquierda (original en blanco y negro) fue tomada por Franz et al. (*Science* 249, no. 4964, pp. 48-51, 1990) con una cámara de muy alta sensibilidad en la noche del 4 al 5 de julio de 1989 en Minnesota (EEUU), y es la primera foto de un TLE. La imagen muestra dos descargas eléctricas (a, b) de lo que hoy se conoce como *sprite*, detectadas sobre grandes nubes de tormenta con gran aparato eléctrico asociadas al huracán Hugo. La foto de la derecha es la primera foto en colores reales de un conjunto (a - d) de

cuatro *sprites*, tomada por Sentman et al. (*GRL* 22, no. 10, pp. 1205-1208, 1995) desde un avión a unos doce kilómetros de altura con objeto de maximizar la transmisión óptica. En ella se aprecian los colores rojos y azules correspondientes a las emisiones ópticas de ciertas bandas del nitrógeno molecular (N_2), en particular del primer y segundo sistema positivo del N_2 (colores rojo y azul respectivamente). A diferencia de los *blue jets*, los *sprites* se producen en la mesosfera terrestre a alturas comprendidas entre los cuarenta y los noventa y cinco kilómetros.





mucho más rápido (exponencialmente). Por tanto, existirá una altura a la que un electrón libre gane tan fácilmente energía del campo eléctrico que al impactar con una molécula le arranque un nuevo electrón. La avalancha resultante multiplica rápidamente el número de electrones libres e inicia una descarga eléctrica. La predicción de Wilson ha resultado esencialmente correcta pero hoy sabemos que los *sprites* son un fenómeno algo más complejo. Fijémonos por ejemplo en su estructura espacial: la parte superior del *sprite*, a partir de unos ochenta o noventa kilómetros, es una descarga difusa pero su parte inferior presenta “tentáculos”: decenas de filamentos de entre diez y cien metros de grosor. El nombre técnico de estos tentáculos es *streamers*: delgados filamentos de gas ionizado que suelen preceder a las descargas eléctricas. Un gas ionizado es un buen conductor de la electricidad y es sabido que un conductor acabado en punta acrecienta el campo eléctrico en torno a esta. Este es el truco que los

En la figura se representan los tipos de TLEs más frecuentes así como Rayos Gamma Terrestres (TGR), cuyo origen aún se desconoce aunque se cree que pueden estar relacionados con los TLEs. Los *sprites* (con y sin estructura de halos asociadas) son los más comúnmente observados, seguidos de los *blue jets* y los *gigantic blue jets*, que se originan justo encima de grandes nubes de tormenta con gran aparato eléctrico. Los nombres de algunos TLEs fueron tomados de *El Sueño de una Noche de Verano* de W. Shakespeare, evocando su naturaleza esquiva y misteriosa.

streamers emplean para, una vez iniciados, propagarse en campos eléctricos no muy altos: solo necesitan un campo alto en el volumen cercano a su punta, en el que los electrones se multiplican generando nueva ionización y contribuyendo al avance del *streamer*.

Familia numerosa

La familia de los TLEs no se reduce a los *sprites*. En los últimos años los investigadores han descubierto una multitud de fenómenos luminosos en la alta atmósfera asociados a tormentas.

Los TLEs del tipo halo en ciertas ocasiones se han visto coincidir con la aparición de *sprites*. Los halos tienen un aspecto difuso, suelen aparecer entre setenta y cinco y ochenta kilómetros de altura y

pueden alcanzar una anchura cercana a los cincuenta kilómetros y una duración entre uno y diez milisegundos. Los *elves* son otro tipo de TLE con estructura en forma de donut de aspecto difuso, con anchuras comprendidas entre los cien y los trescientos kilómetros y que han sido observados a alturas de entre noventa y cien kilómetros. Los *elves* se caracterizan por su expansión lateral y destacan por ser el tipo de TLE de más corta duración (entre uno y cinco milisegundos). A diferencia de los *sprites*, halos y *elves*, los TLEs más observados hasta la fecha, los *blue jets* y *gigantic blue jets* son, a pesar de su larga duración (varios cientos de milisegundos), los tipos de TLE menos observados. Tanto los *blue jets* como los *gigantic blue jets* se caracterizan por originarse justo

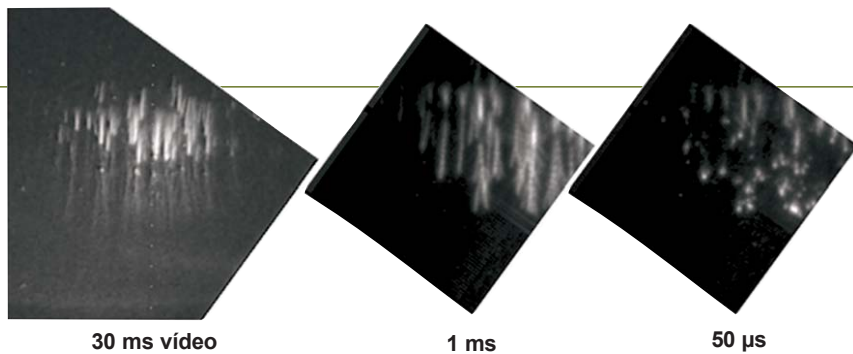
encima de grandes nubes de tormenta (a unos diez kilómetros de altura), por tener un aspecto filamentososo y por su característico movimiento ascendente hasta los treinta o cuarenta kilómetros de altura en el caso de los *blue jets*, y hasta los setenta kilómetros en los *gigantic blue jets*.

Por qué investigamos los TLEs

Los TLEs son bellos fenómenos y se suele hablar de ellos como de “fuegos artificiales”. Pero no es solo su valor estético lo que interesa a los investigadores.

El primer atributo que hace interesantes a los TLEs es el espacio en el que habitan. Como hemos mencionado antes, la mesosfera recibía hace años escasa atención de los geofísicos. Es difícil investigar un rango de alturas en el que la atmósfera es demasiado tenue para sostener un globo sonda pero demasiado espesa para que orbite un satélite. Es por eso que, hasta el descubrimiento de Winckler, pocos habían prestado atención a la mesosfera, a la que aún hoy muchos llaman “ignorosfera”. Los TLEs son un regalo de la naturaleza a los investigadores: cada vez que se produce un TLE, este nos revela algo sobre la mesosfera mediante emisiones luminosas que podemos observar desde tierra o desde satélites a gran altura.

Algunos investigadores han postulado que los TLEs existen también en otros mundos del Sistema Solar como Júpiter, Saturno, Venus y Titán, en los que ya sabemos que hay tormentas eléctricas. En tal caso la detección de TLEs podría convertirse en una herramienta fundamental para el estudio de atmósferas extraterrestres.



Los avances en instrumentación han permitido tomar imágenes de TLEs (en este caso *sprites*) con cada vez mayor resolución. En esta serie se muestran observaciones de *sprites* con cámaras con un tiempo de apertura progresivamente menor. A la derecha puede verse que los filamentos que componen un *sprite* no emiten luz de forma homogénea: gran parte de la luz se emite desde la punta del filamento a medida que este avanza. Esto confirma que los filamentos de los *sprites* son *streamers*: un tipo de descarga observada en el laboratorio desde los años 30 del siglo XX y con múltiples aplicaciones industriales.

Fuente: H. C. Stenbaek-Nielsen and M. G. McHarg, *Journal of Physics D: Applied Physics* 41 (2008) 234009.

Otro asunto de interés para los científicos es el papel que juegan los TLEs en el llamado circuito eléctrico global. Puesto que los rayos con polaridad negativa son más frecuentes y las gotas de lluvia arrastran una ligera carga negativa, las tormentas transfieren una carga negativa al suelo. El equilibrio eléctrico se mantiene porque la Tierra se descarga en las áreas despejadas gracias a la corriente creada por un pequeño campo eléctrico entre el suelo y la ionosfera, a unos cien kilómetros de altura. El tramo que falta para cerrar el circuito es el que separa la ionosfera de las nubes tormentosas, generalmente a menos de diez kilómetros de altura. Puesto que justamente ahí es donde habitan nuestros TLEs, estos juegan un relevante papel en el circuito global.

Finalmente, dos líneas de investigación hoy abiertas sobre los TLEs son el estudio, por un lado, de la posible relación de los TLEs con los rayos gamma terrestres (TGFs según sus siglas inglesas:

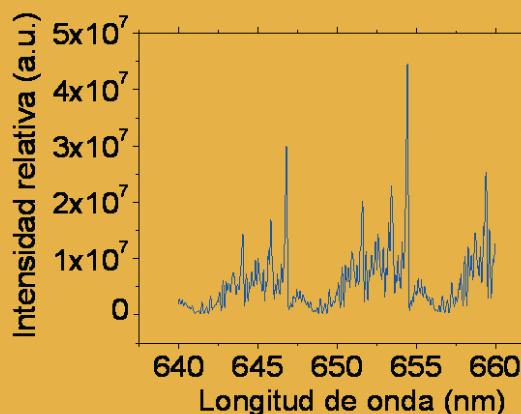
Terrestrial Gamma Flashes) y, por otro, de la influencia de los TLEs sobre la composición química de la alta atmósfera. En este sentido, resulta de especial interés investigar cómo afectan los TLEs a las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO_x), moléculas del tipo OH e iones negativos (O₂⁻, O₃⁻, NO₂⁻) ya que todos ellos juegan un papel relevante en los ciclos catalíticos que afectan a la concentración de ozono (O₃) en la estratosfera.

TLEs desde el espacio: misiones espaciales presentes y futuras

El estudio de TLEs se ha abordado desde plataformas terrestres, aéreas y también desde el espacio. En este sentido, el 21 de mayo de 2004 se lanzó el satélite de órbita polar FORMOSAT-2 fruto de una colaboración entre Taiwan y EE.UU. a bordo del cual iba el instrumento *Imager for Sprite and Upper Atmospheric Lightning* (ISUAL). El instrumento ISUAL es el primero a bordo de un satélite dedicado a la



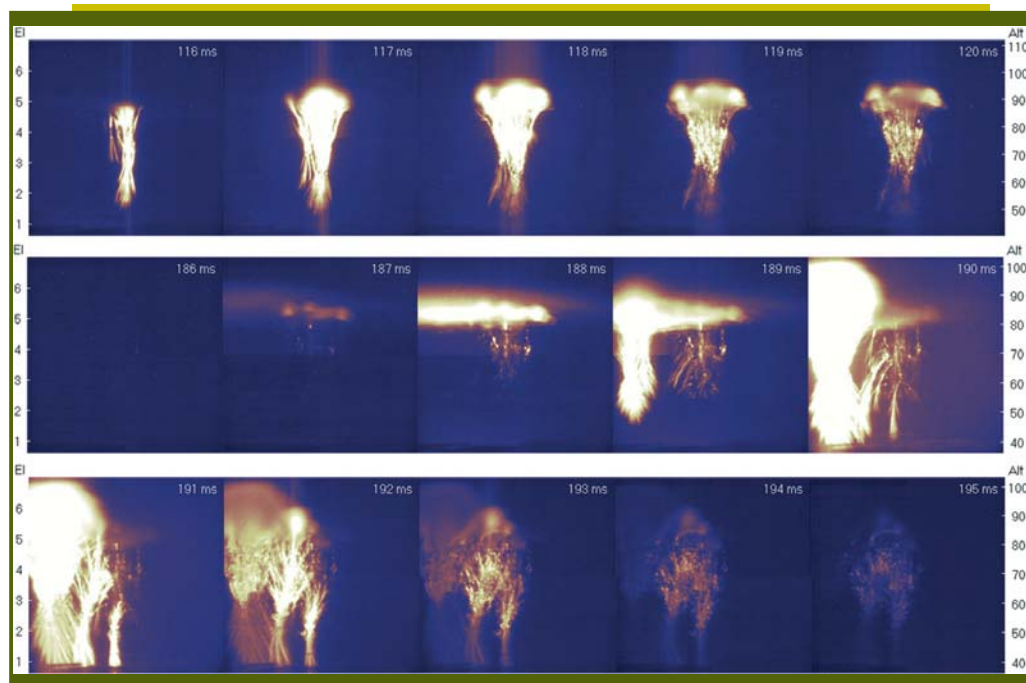
A la izquierda, el prototipo del *Sprite Etalon Spectrograph* (SES) desarrollado por el grupo ASIM del IAA y que se utilizará para estudios espectroscópicos de alta resolución espectral de emisiones ópticas en el visible procedentes de TLEs. A la derecha, una simulación del espectro de emisión del primer sistema positivo del nitrógeno molecular (N₂) en el rango espectral de observación del SES y tal como lo vería una cámara a treinta imágenes por segundo. El espectro mostrado estaría asociado a un *sprite* situado a 78 km de altura (en latitudes medias).



observación y muestreo global en el largo plazo de TLEs. A finales de 2007, ISUAL había detectado más de ocho mil TLEs con sus cámaras CCD intensificadas y sus espectrofotómetros. Uno de los resultados más interesantes obtenidos por ISUAL se refiere a medidas de intensidades de campos eléctricos en *sprites* y, en particular, a la diferencia medida entre los valores de campos eléctricos en las regiones altas y bajas de los *sprites*. Los campos eléctricos medidos por ISUAL en *sprites* son de gran interés como *inputs* de modelos utilizados para el estudio de la química atmosférica inducida por los *sprites* y otros tipos de TLE.

Para el futuro a corto y medio plazo está previsto el lanzamiento de dos misiones espaciales europeas así como una rusa y otra japonesa. Las misiones europeas son, por una parte, el microsatélite *Tool for the Analysis of RAdiations from lightNings and Sprites* (TARANIS) del programa *Myriades* del CNES francés, cuyo lanzamiento está programado para 2015, así como el instrumento *Atmosphere Space Interaction Monitor* (ASIM) de la ESA que se lanzará en 2014 y que se colocará en el módulo *Columbus* de la estación espacial internacional. La carga de pago de ASIM incorpora, entre otros instrumentos, el *Monitor X-ray and Gamma-ray Sensor* (MXGS) que es un sensor de altas energías diseñado para detectar rayos X y gamma originados en la atmósfera terrestre y establecer su posible relación con diferentes tipos de TLEs.

En la actualidad, cinco instituciones españolas (CSIC, INTA, UPC, UV y URJC) forman parte del equipo científico internacional de ASIM. El grupo ASIM del CSIC se encuentra en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) y está liderado por el Dr. F. J. Gordillo-Vázquez. En este contexto, el grupo del IAA ha desarrollado herramientas de simulación (algunas ya migradas al GRID-IAA) para entender la química atmosférica inducida por *sprites* y otros TLEs, así como la electrodinámica de *streamers* asociados a *sprites* en la mesosfera terrestre. Por otro lado, el grupo del IAA también ha diseñado, desarrollado y construido el prototipo del instrumento *Sprite Etalon Spectrograph* (SES) que permitirá hacer espectroscopía de alta resolución espectral (0.05 nm) de *sprites* desde observatorios terrestres lo que, aparte de complementar las medidas y



UN SPRITE, FOTOGRAMA A FOTOGRAMA

Los *sprites* son el tipo más estudiado de TLEs. En estas secuencias temporales se aprecia la complejidad del fenómeno. Los fotogramas están tomados con una cámara de alta velocidad que toma mil fotogramas por segundo y muestran una porción de la alta atmósfera a alturas de entre cuarenta y cien kilómetros.

En la secuencia superior vemos el desarrollo de un *sprite* generado por el rayo de una tormenta que queda debajo de la porción de cielo que se muestra. En el *sprite* se observa una característica región de luminosidad difusa a gran altura y, bajo ella, una multitud de filamentos luminosos. Tras algunas milésimas de segundo las emisiones se desvanecen y el cielo vuelve a su oscuridad habitual. Sin embargo, en la segunda secuencia vemos los efectos de una segunda descarga de la tormenta que inicia un *sprite* a la izquierda del anterior. El primer *sprite* revive con la segunda descarga; fragmentos del mismo se encienden de nuevo y de ellos nacen nuevos filamentos. De estas observaciones los investigadores han concluido que las perturbaciones en la atmósfera producidas por un *sprite* duran bastante más que la emisión de luz.

En este caso el proceso completo ha durado algunas décimas de segundo, tras las cuales los *sprites* se apagan y devuelven la atmósfera a su oscuridad original (secuencia inferior).

Fuente: H. C. Stenbaek-Nielsen and M. G. McHarg, *Journal of Physics D: Applied Physics* 41 (2008) 234009.

observaciones de ASIM desde el espacio, esperamos nos permita conocer nuevas propiedades de los *sprites* y su influencia en la atmósfera circundante.

A finales de 2010, Rusia tiene previsto lanzar el microsatélite CHIBIS-M equipado con sensores de rayos X y gamma para estudiar rayos gamma terrestres (TGFs), detectores de radiación ultravioleta así como sensores de muy baja frecuencia para el estudio de TLEs sobre nubes de tormenta.

Finalmente, también en el año 2010, la agencia japonesa del espacio (JAXA) tiene previsto el lanzamiento de la misión *Planet-C*, entre cuyos objetivos se encuentra el estudio detallado de rayos en Venus, así como la posible presencia de

sprites y otros TLEs en su atmósfera.

El futuro de los TLEs

Acaban de cumplirse veinte años de aquellas primeras observaciones de TLEs realizadas por Winckler y su equipo. En este tiempo hemos aprendido mucho sobre la naturaleza de estos fenómenos y, gracias a ello, entendemos mejor la física de las capas altas de la atmósfera.

Dado que estas dos décadas han estado repletas de sorpresas, es difícil prever qué traerá el futuro. Sin embargo, dada la multitud de interrogantes abiertos y la próxima puesta en marcha de varios observatorios espaciales, sí anticipamos que los TLEs seguirán dando que hablar al menos otros veinte años.

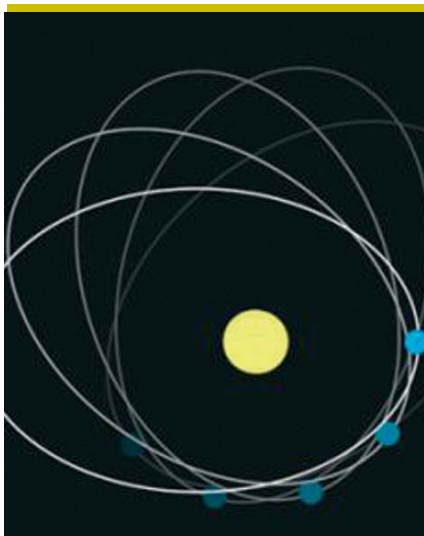
DI Herculis: un antiguo desafío a la Relatividad General

EL MOVIMIENTO DE ESTA ESTRELLA BINARIA FUE UN MISTERIO DURANTE MÁS DE TREINTA AÑOS

Antonio Claret (IAA-CSIC)

SEGÚN LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL, en un sistema binario, en el que dos objetos giran en torno a un centro común dibujando una órbita elíptica, ocurre lo que se denomina movimiento apsidal: la rotación de los objetos y sus fuerzas de marea provocan que la órbita gire progresivamente en el mismo sentido de la revolución.

En el caso de Mercurio, el planeta que presenta la mayor excentricidad (o la órbita más elíptica) del Sistema Solar, el valor observado de su movimiento apsidal es del orden de 1,5 grados por siglo. Sin embargo, cuando se aplicó la Mecánica Clásica teniendo en cuenta las perturbaciones de los planetas conocidos en la época (siglo XIX), quedaban unos cuarenta y tres segundos de grado por siglo que no podían explicarse en el marco de dicha teoría. Se trata de una cantidad muy pequeña, pero suficiente como para no ser ignorada. Se propusieron algunas hipótesis para explicar tal diferencia, como la existencia de un nuevo planeta con una órbita muy cercana al Sol y que llegaron incluso a nombrar: Vulcano. El éxito en la detección del planeta Neptuno utilizando las técnicas de perturbaciones orbitales reforzó tal hipótesis, e incluso algunos astrofísicos documentaron tránsitos del ficticio Vulcano por delante del Sol. Otra alternativa sugería la existencia de una nube de gas y polvo alrededor del Sol, que afectaría a la constante universal de gravitación y explicaría así la anomalía. Sin embargo, estas observaciones no fueron corroboradas por otros grupos de investigadores, de modo que tales hipótesis fueron abandonándose y los famosos cuarenta y tres segundos por siglo quedaron sin una explicación convincente. Algunos años después llegó la explicación. En 1915, Albert Einstein fue capaz de



Arriba, ilustración del movimiento apsidal en un sistema binario con órbita elíptica: se produce un giro de la órbita en el mismo sentido del giro de las estrellas.

Abajo, concepción artística de DI Herculis, formada por dos estrellas muy jóvenes (4,5 millones de años), cinco veces más masivas y unas quinientas veces más luminosas que el Sol. Fuente: Michael Carroll.

explicar la diferencia aplicando la Teoría de Relatividad General (TRG). Fue una de las primeras confirmaciones empíricas de dicha teoría, si no la primera. A partir de ahí, los astrofísicos utilizaron la TRG para los cálculos de las revoluciones orbitales de los planetas. Algún tiempo después, aplicaron también dichos cálculos a estrellas dobles muy próximas.

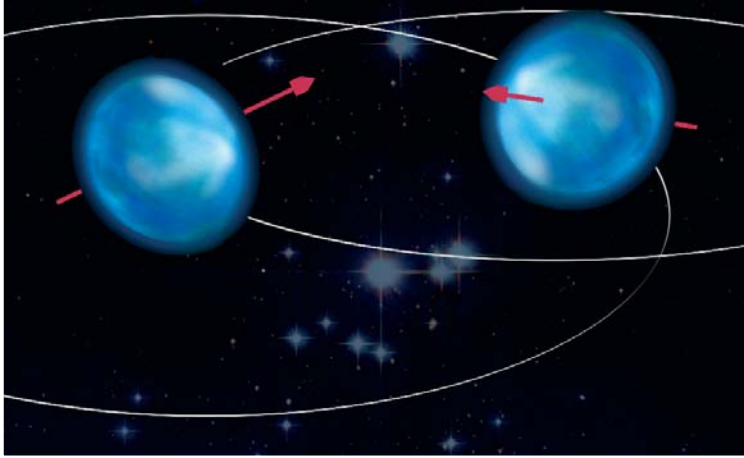
Como hemos señalado, hay dos contribuciones. Una clásica, o newtoniana, que depende de las fuerzas de marea y de las tasas de rotación. La componente de mareas puede obtenerse computando modelos de evolución estelar y calculando a cada paso el grado de concentración en masa y las distorsiones. Por otra parte, la contribución por rotación también depende del grado de concentración en masa de las estrellas, pero también depende de las tasas de rotación de cada componente. A las contribuciones de mareas y de rotación hay que añadir la corrección relativística, un método que se probó eficaz hasta que comenzó el estudio de DI Herculis en los inicios de los años 80 del pasado siglo.

El caso de DI Herculis

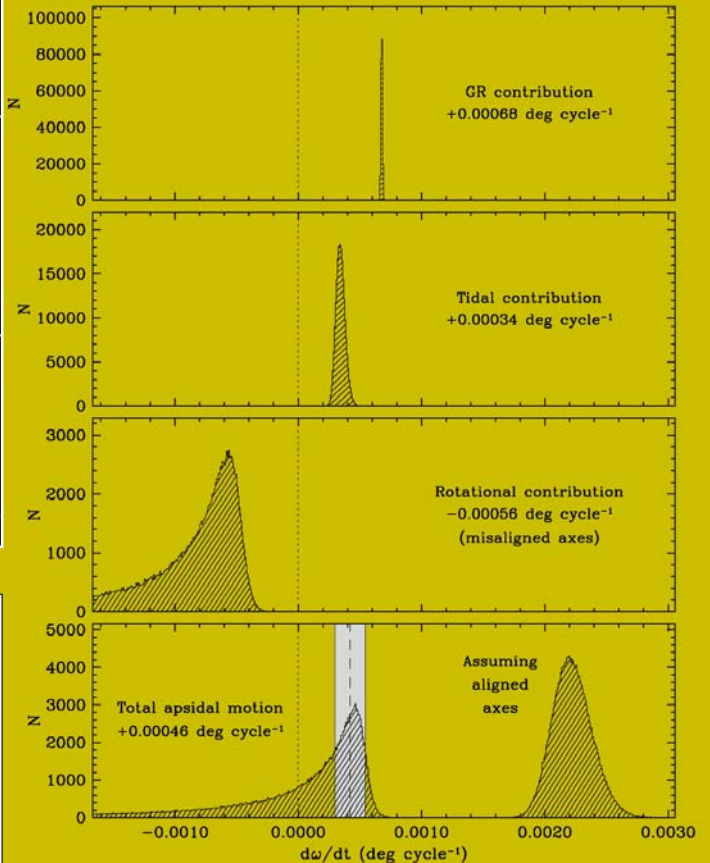
Durante alrededor de treinta años el sistema DI Her, constituido por dos estrellas de cinco y 4,5 masas solares, mostraba un movimiento apsidal muy lento comparado con los valores predichos teóricamente. Esta discrepancia cuestionaba incluso la validez de la Teoría de la Relatividad General, ya que la contribución relativística era significativamente alta.

Curiosamente, fue el movimiento apsidal de un objeto (Mercurio) una de las primeras aplicaciones de la Relatividad General y, sin embargo, parecía fallar en este caso. La discrepancia era del orden del 400%. Esta anomalía persistía aunque supusiéramos una concentración en masa infinita en los modelos estelares. Además, las observaciones de otros sistemas relativísticos comparaban muy bien con la teoría, lo que contribuyó a aumentar aún más la dimensión del puzzle. Se propusieron varias hipótesis para explicar el desa-

Ilustración que muestra la desalineación de los ejes de rotación de las estrellas con respecto al plano en el que orbitan



Gráfica: simulaciones de Monte Carlo para DI Herculis. El primer panel muestra la contribución relativística, el segundo la contribución por mareas y el tercero la contribución rotacional teniendo en cuenta que los ejes no están alineados. Nótese que en este caso hay un movimiento retrógrado. En el cuarto panel se puede ver el movimiento apsidal total. El valor observacional (0.00042 ± 0.00012 grados/ciclo) viene indicado por las dos barras verticales mientras el valor teórico es representado por la distribución de probabilidades de la izquierda. A la derecha del cuarto panel podemos ver la predicción teórica suponiendo que los ejes de rotación están alineados. La diferencia es del orden de 520 %.



cuerto, como la presencia de una nube interestelar en el sistema o incluso una teoría alternativa de la gravitación. Tales ideas fueron examinadas cuantitativamente por el autor de este artículo en 1998 y fueron descartadas.

Otra alternativa para explicar la discrepancia apunta a que los ejes de rotación de las dos estrellas se hallen inclinados respecto al plano orbital. Este fenómeno es relativamente común en los planetas extrasolares. Nuestros modelos estelares más recientes para DI Herculis indican que se trata de un sistema muy joven (unos cuatro millones de años) y desde el punto de vista de la teoría de la evolución por mareas es posible que los ejes de rotación de las estrellas aún estén inclinados. Tales observaciones son muy difíciles de llevar a cabo pero, a la postre, fueron uno de los elementos cruciales para resolver el problema de DI Herculis. Solo muy recientemente un grupo de investigadores, usando las distorsiones de las líneas espectrales durante los eclipses, fueron capaces de medir los ángulos entre las proyecciones celestes de los ejes de rotación y el eje orbital. La discrepancia, utilizando estos resultados, fue reducida drásticamente pero todavía presentaba un

Se trata de un sistema muy joven, de unos cuatro millones de años, por lo que es posible que los ejes de rotación de las estrellas aún estén inclinados

significativo desacuerdo, del orden de 50%. A pesar del éxito de tales mediciones, hay que notar que no todos los ángulos involucrados en la geometría del sistema fueron medidos directamente y que se tuvo que emplear el método de Monte Carlo para evaluar la contribución rotacional.

Un grupo de astrofísicos, con participación del Instituto de Astrofísica de Andalucía, ha reexaminado todos los ingredientes del sistema -radios, masas, temperaturas efectivas- con el fin de obtener tanto unas predicciones teóricas más precisas como nuevos datos observacionales. Se elaboraron nuevos modelos de evolución estelar y se obtuvieron observaciones del movimiento apsidal a lo largo de varios años. La distribución de probabilidades resultante (ver gráfica superior) indica que la discrepancia ha sido significativamente reducida: el valor total del

movimiento apsidal teórico es de 0.00046 grados/ciclo (modo de las simulaciones) mientras el nuevo valor observado es de 0.00042 grados/ciclo, es decir, la diferencia es menor que un 10% y perfectamente dentro de los errores observacionales. Nótese que la contribución por rotación indica un movimiento retrógrado (tercer panel de la gráfica). Se confirma así que la Teoría de la Relatividad General sigue siendo válida.

Es importante resaltar que si consideramos los ejes como perfectamente alineados con la órbita, la distribución de Monte Carlo predice un valor 5,2 veces el observado y completamente en desacuerdo con el valor observacional (ver el diagrama de la derecha, último panel de la figura).

REFERENCIAS

- Albrecht, S. et al. N. 2009, *Nature*, 461, 373.
 Claret, A. 1997, *Astronomy & Astrophysics*, 327, 11.
 Claret, A. 1998, *Astronomy & Astrophysics*, 330, 533.
 Claret, A., Torres, G., Wof, M. 2010, *Astronomy & Astrophysics*, 506, 1335.
 Triaud, A. H. M. et al. 2009 *Astronomy & Astrophysics*, 503, 377.

M87, fotografiada por el Telescopio Espacial Hubble

JETS EN GALAXIAS ACTIVAS

LOS JETS RELATIVISTAS SON UNO DE LOS FENÓMENOS MÁS LLAMATIVOS DE LA NATURALEZA, CUYO ORIGEN, CARACTERÍSTICAS Y EVOLUCIÓN COMENZAMOS A DESENTRAÑAR

Por José Luis Gómez Fernández (IAA-CSIC)

VIVIMOS EN UN UNIVERSO REPLETO DE GALAXIAS Y, aunque hemos avanzado mucho en su conocimiento desde su descubrimiento a principios del siglo XX, aún no tenemos una idea clara de algunas de sus principales características, como por ejemplo cómo se forman. Sin embargo, empezamos a tener evidencias de que su destino está íntimamente ligado a gigantes agujeros negros situados en su interior. Algunos de estos agujeros negros pueden hacer que la galaxia que los alberga se convierta en uno de los objetos más brillantes y exóticos del Universo: las galaxias activas. Estas pueden llegar a ser cientos, e incluso miles de veces, más brillantes que una galaxia "normal", como nuestra Vía Láctea.

En un principio se pensó que solo las galaxias activas presentaban en sus regiones centrales un agujero negro supermasivo, con una masa de hasta miles de millones de nuestro Sol. Sin embargo, observaciones recientes muestran que en realidad todas las galaxias, activas o no -incluyendo la nuestra-, parecen poseer un agujero negro supermasivo (ANSM) en su interior.

La presencia de un agujero negro supermasivo produce significativas alteraciones en las regiones más internas de la galaxia que lo alberga. Su gran masa da lugar a la for-

mación de enormes discos de gas y polvo girando a su alrededor. Pero no todo el material del disco acaba alimentando al agujero negro; los campos magnéticos que se encuentran anclados en su interior arrancan una parte y dan lugar a uno de los fenómenos más llamativos de la naturaleza: la formación de unos gigantes jets, o fluidos de partículas muy colimados que viajan a velocidades cercanas a la de la luz. Estos jets constituyen sin duda una de las características más espectaculares de las galaxias activas, y una de las mejores fuentes para su estudio.



El cuásar 3C175 (NRAO).

El primero de estos jets fue observado en 1917 por Heber D. Curtis en M87. A pesar de esta primera detección con telescopios ópticos, fueron necesarios otros sesenta años para que se desarrollara la radioastronomía y, con ella, un mejor entendimiento de la naturaleza de estos jets y su relación con las galaxias activas (o AGN, del acrónimo en inglés *Active Galactic Nuclei*).

Radiointerferometría

La mayor parte de la radiación emitida por los jets en AGN suele concentrarse en longitudes de onda milimétricas y centimétricas, es decir, en el rango de ondas de radio. Esto supuso inicialmente un gran inconveniente, dada la pobre resolución de los

radiotelescopios comparada con la de los telescopios ópticos. A modo de ejemplo, para obtener imágenes con una resolución angular de un segundo de arco (unas dos mil veces menor que el tamaño aparente de la Luna) en el óptico necesitaríamos un telescopio de unos catorce centímetros de apertura, mientras que a longitudes de onda de radio este debería ser de unos 2,5 kilómetros de diámetro. Esto hizo pensar inicialmente que la radioastronomía estaría siempre relegada a un papel secundario frente a la astronomía óptica.

La solución a este problema provino del desarrollo de la técnica de observación conocida como interferometría, por la que el astrónomo Martin Ryle obtuvo el premio Nobel de Física en 1974. Esta técnica consiste en combinar la señal de múltiples antenas, como si se tratase de secciones distintas de una antena equivalente mucho mayor, tan grande como la máxima separación entre las distintas antenas. De esta manera se consigue una resolución igual a la que se obtendría con la antena equivalente, aunque no la misma sensibilidad. Martin Ryle se dio cuenta de que es posible registrar la señal recibida en cada antena durante un largo periodo de tiempo, y de esta manera la propia rotación de la Tierra permite que las antenas (o elementos del interferómetro) cubran una mayor superficie de la antena equivalente, aumentando de esta manera la sensibilidad.

Uno de los interferómetros más conocidos que utilizan esta técnica es el *Very Long Baseline Array* (VLBA), formado por diez radio telescopios de veinticinco metros cada uno repartidos por Estados Unidos, desde Hawaii hasta las Islas Vírgenes. Con este instrumento es posible, por tanto, sintetizar una antena equivalente tan grande como la propia Tierra, obteniéndose imágenes a lon-

Los campos magnéticos anclados en el disco extraen parte de su material, dando lugar a la formación, colimación y aceleración de los jets. ANIMACIÓN EN: http://www.iaa.es/~jlgomez/Jose_L._Gomez/Animations.html

gitudes de onda de radio con una resolución angular del orden de 0,15 milisegundos de arco. Esta increíble capacidad de observación no tiene comparación en otras ramas de la Astronomía -es unas quinientas veces superior a la obtenida con el Telescopio Espacial Hubble en el visible.

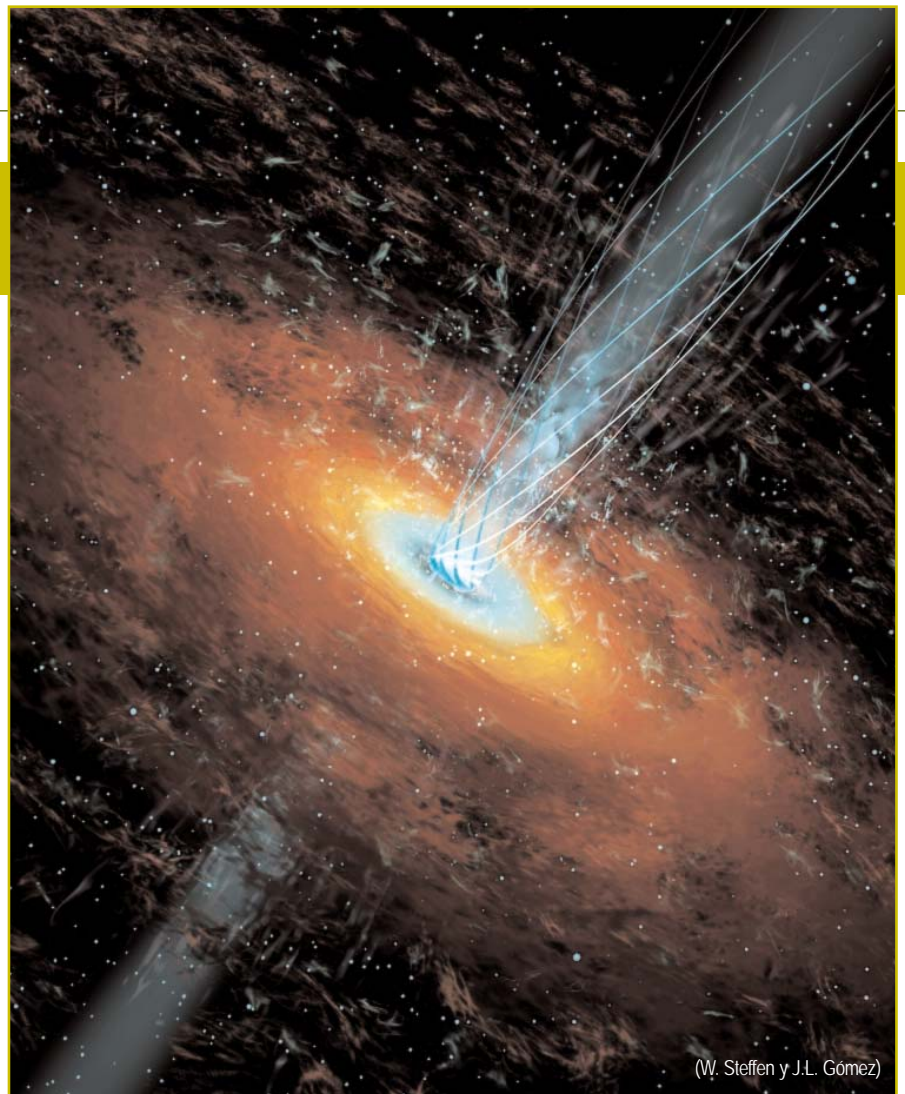
Estas observaciones interferométricas de muy larga base (conocidas por su acrónimo en inglés: VLBI) han permitido estudiar en gran detalle los jets en los AGN.

Jets relativistas

Las observaciones de interferometría en radio nos muestran una enorme variedad en la velocidad y energía que transportan los jets, lo que refleja la gran diversidad de AGN. Las galaxias activas denominadas Seyfert presentan jets relativamente lentos y débiles, mientras que los objetos denominados BL Lac y los cuásares muestran unos jets relativistas muy energéticos y altamente colimados. Entre estos, los más extremos son los presentes en los *blazars*, en los que sus jets apuntan en la dirección de observación -permitiendo de esta manera una visión directa del ANSM central- y exhiben una fuerte variabilidad en su emisión a lo largo de todo el espectro electromagnético, desde longitudes de onda de radio hasta rayos X y gamma.

A través del análisis del espectro de emisión, es decir, de cómo varía esta en función del rango de energías considerado, sabemos que la mayor parte de la energía liberada en los jets se produce por radiación sincrotrón. Esta se origina en partículas cargadas muy energéticas -electrones relativistas- que se encuentran inmersas en un campo magnético. Una de las características de la radiación sincrotrón es que la energía liberada por el electrón, así como la frecuencia a la que es emitida la mayor parte, es proporcional a su energía. Esto da lugar a una estratificación en el jet, tanto en la cantidad de energía como en la frecuencia a la que esta se emite. Las regiones más internas emiten una gran cantidad de energía, y lo hacen fundamentalmente a energías muy altas, correspondientes a longitudes de onda del óptico, o incluso en rayos X y gamma. A medida que los electrones viajan a la largo del jet y van perdiendo energía, radian cada vez menos energía y lo hacen a longitudes de onda cada vez mayores, hasta llegar a las ondas de radio.

A longitudes de onda de radio la estructura



(W. Steffen y J.L. Gómez)

más interna de los jets, conocida como núcleo, presenta generalmente una emisión ópticamente gruesa. Es decir, la mayor parte de la emisión que se genera en esta región es absorbida por la propia fuente. De esta manera, y al igual que una espesa niebla no nos permite ver qué hay detrás, la fuerte autoabsorción de la emisión en el núcleo nos impide observar sus capas más internas. Esto hace que resulte más difícil analizar cuáles son los procesos físicos que tienen lugar en esta región, que nos interesa especialmente porque ahí es donde se generan los jets. A medida que nos alejamos del núcleo y recorremos el jet, vemos que este suele presentar unas regiones de emisión más intensa, conocidas como componentes.

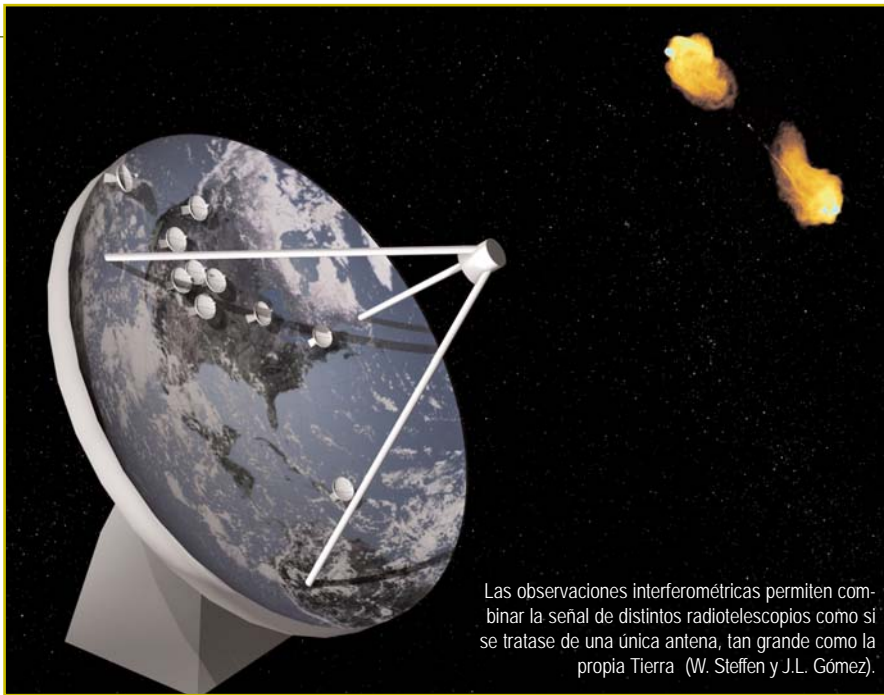
¿Más rápido que la luz?

Observaciones con el VLBA han permitido realizar un seguimiento mensual durante casi dos años del jet en la radiogalaxia 3C120, lo que constituye uno de los estudios más detallados hasta la fecha de este tipo de objetos. Las regiones de emisión más intensa -componentes- del jet muestran un comportamiento característico de estas fuentes, pero no por ello menos intrigante: su movimiento proyectado en el plano del cielo es muy superior al de la velocidad de la luz.

Este efecto, conocido como movimiento superlumínico, fue observado por primera vez en la década de los 70 y se pensó que constituía la primera violación de la teoría de la relatividad de Einstein. Sin embargo, es perfectamente explicable dentro de la teoría de la relatividad y nos ha permitido constatar un hecho de suma importancia en el estudio de los jets en AGN: el material que viaja a lo largo de los jets ha de hacerlo a una velocidad que, si bien no es superior a la velocidad de la luz, sí ha de ser muy cercana a ella (del orden del 90% o superior), y además ha de viajar en una dirección cercana a la de la visual.

¿Cómo se generan los jets?

Aún desconocemos en gran medida cómo el sistema formado por el agujero negro y su disco de acreción propician la formación de un par de jets que transportan materia y energía en sentidos opuestos a lo largo del eje de rotación del agujero negro. Sin embargo, este proceso parece ser muy común en la naturaleza, y se haya presente no solo en los AGN, sino en estrellas en formación, púlsares, microcuásares y probablemente en las explosiones de rayos gamma (o GRBs), es decir, en sistemas que involucran el acrecimiento de materia en



Las observaciones interferométricas permiten combinar la señal de distintos radiotelescopios como si se tratase de una única antena, tan grande como la propia Tierra (W. Steffen y J.L. Gómez).

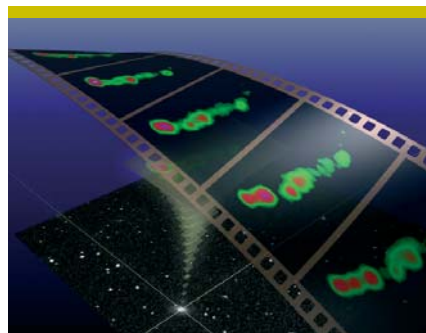
torno a un objeto masivo central. Observaciones de la radiogalaxia 3C120 nos han permitido indagar en los procesos que dan lugar a la formación de los jets. Gracias al análisis de su espectro sabemos que la emisión en rayos X del disco de acreción es mucho más intensa que la que se origina en las regiones más internas del jet. Por tanto, si observamos la radiogalaxia 3C120 en rayos X estaremos observando las zonas internas del disco de acreción, mientras que si lo hacemos en longitudes de onda de radio estaremos captando fundamentalmente la emisión que proviene del jet. Observaciones simultáneas en ambas regiones del espectro electromagnético deberían por tanto proporcionarnos información sobre la posible conexión entre el disco y el jet.

A través de una campaña de observación de más de tres años, en las que se observó la radiogalaxia 3C120 simultáneamente en rayos X y radio, hemos podido constatar que la emisión en rayos X suele presentar disminuciones en su intensidad, siempre seguidas, aproximadamente un mes más tarde, por un aumento en la emisión a longitudes de onda de radio. Esta bajada en la emisión en rayos X se debe a una disminución en la cantidad de materia que emite en rayos X en las zonas más internas del disco de acreción, es decir, una sección de este disco desaparece porque es “engullido” por el agujero negro.

La bajada en rayos X viene seguida de manera sistemática por un aumento en la emisión en radio, que como sabemos se origina fundamentalmente en los jets. Esto implica por tanto que no todo el material que desaparece de la zona más interna del disco es engullido por el agujero negro, sino que parte de él debe ser inyectado en los jets

que observamos en radio, dando lugar posteriormente a la aparición de nuevas componentes superlumínicas.

Esta correlación observada entre la emisión en rayos X y radio en 3C120 viene a confirmar nuestra suposición de que los jets que observamos son generados como consecuencia del acrecimiento de material en torno a un objeto central compacto de enorme masa, y que probablemente posee un horizonte de sucesos, que es justamente lo que caracteriza a los agujeros negros frente a otros pozos de potencial gravitatorio intenso. Por tanto, nos encontramos con una de las evidencias más claras de la existencia de un agujero negro supermasivo en el corazón de una galaxia activa.



Observaciones de la radiogalaxia 3C120 nos han permitido indagar en el proceso de formación de los jets

Aceleración, colimación y emisión a altas energías

Gracias al desarrollo de los nuevos modelos numéricos por ordenador, capaces de resol-

ver las ecuaciones de la magnetohidrodinámica relativista, se ha podido determinar que el campo magnético parece jugar un papel fundamental en la colimación y aceleración de los jets. Debido a la rotación del disco de acreción, el campo magnético anclado en el mismo se “enrolla” formando una hélice a lo largo del eje de rotación del agujero negro, es decir, en la dirección de los jets. Las partículas cargadas del disco siguen las líneas de campo magnético, y son por tanto extraídas del disco e inyectadas en el jet, tal y como hemos observado en la radiogalaxia 3C120. La colimación de este flujo de partículas en un jet se produce a través de la componente toroidal del campo magnético, es decir, los “anillos” de campo magnético que envuelven el jet. Estos anillos comprimen el fluido, como si se tratase de gomas elásticas, ya que las partículas cargadas necesitan mucha energía para poder atravesar el campo magnético toroidal, mientras que se mueven libremente siguiendo la líneas de campo a lo largo del jet, siguiendo la ley de Lorentz. Por otro lado, la expansión del jet hace que la presión ejercida por el campo magnético vaya disminuyendo a lo largo del mismo, creando un gradiente de presión que acelera el fluido hasta velocidades relativistas, del mismo modo que las diferencias de presión en la atmósfera dan lugar a fuertes vientos. Por tanto el campo magnético parece jugar un papel fundamental, y para poder estudiar su estructura -intensidad y orientación- necesitamos realizar observaciones polarimétricas, es decir, necesitamos determinar la polarización de la radiación que nos llega de los jets. Como sabemos, el ángulo de polarización determina la orientación del campo eléctrico de la onda electromagnética que llega a nuestros telescopios, ya sea a longitudes de onda del óptico o radio, siendo el campo magnético perpendicular al mismo.

Observaciones polarimétricas en VLBI arrojan claras evidencias de la existencia de campos magnéticos helicoidales en los jets. Sin embargo, la colimación y aceleración de los jets tiene lugar en las regiones más internas y, como hemos visto anteriormente, en estas regiones los jets son ópticamente opacos a longitudes de onda de radio, y por tanto inaccesibles a través de observaciones de VLBI. Por suerte, es en estas regiones más internas donde se produce la mayor parte de la emisión a altas energías - rayos X y gamma - que observamos de los jets. De igual manera que observaciones simultáneas en longitudes de onda de radio y rayos X nos permiten determinar la relación entre el disco y el jet, es posible estudiar los procesos de colimación y aceleración a través

de observaciones simultáneas en radio, óptico, rayos X y rayos gamma.

El satélite de rayos gamma *Fermi*, lanzado por la NASA en 2008, está permitiendo llevar a cabo estos estudios a lo largo del espectro gracias a su excelente sensibilidad y resolución angular, revolucionando nuestro conocimiento sobre los procesos de emisión a altas energías en general, y de los jets relativistas en blazars en particular.

Observaciones de uno de los AGN más conocidos, denominado BL Lac -y que da nombre a toda una clase de AGN-, han revelado un aumento repentino en la emisión en el óptico, rayos X y gamma, seguido semanas más tarde por un aumento a longitudes de onda de radio, relacionada con la aparición de una nueva componente en imágenes de VLBI. Estos resultados sugieren la inyección de nuevo material en el jet -una nueva componente-, lo que produce un aumento brusco de la emisión a altas energías cuando esta se encuentra en la región de colimación y aceleración. Posteriormente, la componente avanza a lo largo del jet, llega a la región de emisión en longitudes de onda de radio -explicando de

esta manera el retraso con respecto a la emisión a altas energías-, para finalmente aparecer en los mapas de VLBI. Es decir, podemos seguir la evolución de la componente a medida que viaja por las distintas

Los jets están presentes en sistemas que involucran el acrecimiento de materia en torno a un objeto masivo central

El campo magnético parece jugar un papel fundamental en la colimación y aceleración de los jets

regiones de emisión del jet. Pero además, estas observaciones muestran una rápida y continuada rotación del ángulo de polarización en el óptico, es decir, cuando la componente viaja por la zona de colimación y aceleración del jet. Esta rotación puede explicarse fácilmente si consideramos que la componente viaja siguiendo una trayectoria en espiral, y que el campo magnético presenta una fuerte componente toroidal, tal y

como hemos visto que predicen los modelos teóricos.

Rotaciones similares en el ángulo de polarización en el óptico, acompañadas por aumentos bruscos en rayos gamma, han sido también observadas en los blazars PKS1510-089, 3C279 y 3C454.3. Estamos por tanto obteniendo por primera vez claras evidencias de los mecanismos de formación, colimación y aceleración en los jets relativistas comúnmente presentes en galaxias activas, que pueden extrapolarse a otros escenarios astrofísicos como microcuásares o hipernovas (asociadas con los GRBs).

Con futuras observaciones, en especial con los nuevos instrumentos en desarrollo, como las misiones espaciales VSOP-2 y RadioAstron, con las que se pretende alcanzar resoluciones angulares del orden de diez microsegundos de arco, se espera obtener las primeras imágenes directas de la "sombra" producida por el agujero negro de nuestra galaxia y en algunos AGN, así como de las regiones de formación y aceleración de los jets, avanzando de esta manera en nuestro conocimiento de estos enigmáticos objetos.

EL MOVIMIENTO SUPERLUMÍNICO

ANIMACIÓN EN:

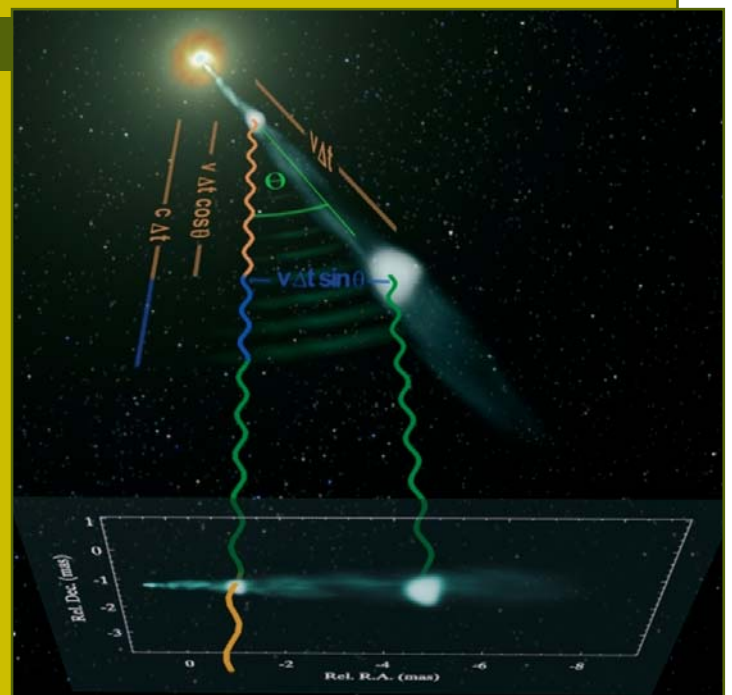
http://www.iaa.es/~jlgomez/Jose_L_Gomez/Animations.html

Cuando medimos en los *jets* relativistas movimientos proyectados en el plano de observación, estos pueden llegar a ser superiores a la velocidad de la luz, fenómeno conocido como movimiento superlumínico y que no viola una de las premisas fundamentales de la teoría de la relatividad: nada puede viajar más rápido que la luz.

Consideremos una región de emisión (componente) que viaja a lo largo del jet con una velocidad v (cercana a la de la luz) y en un ángulo pequeño con respecto al observador θ , emitiendo dos pulsos de luz separados por un intervalo de tiempo Δt , como se muestra en la figura. El primer pulso de luz viaja hacia el observador a la velocidad de la luz c , recorriendo durante este intervalo de tiempos una distancia $c\Delta t$ en su camino hacia el observador.

Mientras tanto, la componente se mueve a lo largo del jet a una velocidad muy cercana a c , por lo que cuando emite el segundo pulso de luz Δt más tarde, esta ya ha recorrido

una distancia en dirección al observador que viene dada por su proyección en esta dirección, igual a $v\Delta t\cos\theta$. De esta manera, el segundo pulso ha de recorrer una distancia hasta el observador menor que el primero, y que viene dada por $c\Delta t - v\Delta t\cos\theta$ (en azul en la figura). Esto supone que los pulsos de luz llegarán al observador con una diferencia de tiempos igual a la que necesita la luz para viajar esta distancia, que es igual a $(c\Delta t - v\Delta t\cos\theta)/c$, o lo que es lo mismo $\Delta t(1-\beta\cos\theta)$, en donde $\beta=v/c$. Esto nos permite calcular fácilmente cuál es la velocidad medida por un observador en el plano del cielo. Esta es igual a la distancia recorrida por la componente proyectada en el plano de observación, igual a $v\Delta t\sin\theta$, dividida por la diferencia en los tiempos de llegada de los dos pulsos de luz que hemos calculado antes $\Delta t(1-\beta\cos\theta)$ y, por tanto, $v_{app}=(v\sin\theta)/(1-\beta\cos\theta)$ o, en unidades de la velocidad de la luz (dividiendo por c), $\beta_{app}=(\beta\sin\theta)/(1-\beta\cos\theta)$.



Es fácil ver por tanto que dependiendo de la velocidad del material en el jet y de su orientación relativa con respecto al observador podemos llegar a medir velocidades proyectadas en el plano del cielo mayores que la de la luz. Por ejemplo, para una componente que se mueva a una velocidad de $\beta=0,9$ (es decir,

90% de la de la luz) en un ángulo con respecto al observador de 20° , mediríamos una velocidad proyectada en el plano de observación de aproximadamente el doble de la de la luz. De hecho, se han llegado a medir en jets de AGN velocidades superlumínicas de hasta cuarenta veces la de la luz.

CONFERENCIAS SOLVAY: Los *All-Star* de la física

POR EMILIO J. GARCÍA (IAA-CSIC)

Todos hemos visto, o al menos oído hablar, de los *All-Star* de la NBA. Los más mayorcitos recordaremos las primeras emisiones del partido de las estrellas donde veíamos en acción a Bird o *Magic*, hoy sustituidos por Bryant o Gasol. Pero esto de juntar a los mejores para repartirse mandobles en un cancha no es exclusivo del baloncesto, ni tan siquiera del deporte en general. Hace muchos años que la física tiene su particular *All-Star*. Eso sí, que nadie piense en un puñado de físicos en calzones haciendo mates y triples a destajo. Los *All-Star* de la física son más comedidos pero igual de apasionantes y, aunque parezca inaudito, se las debemos a un producto químico: el carbonato sódico, más conocido como sosa.

El filántropo de la sosa

Gracias a la invención de un método que modernizaba el proceso de fabricación de este producto de gran interés industrial, el químico belga Ernest Solvay, entusiasta amante de la ciencia más fundamental, amasó una fortuna que le permitió - entre otras acciones filantrópicas diversas- patrocinar en el año 1911 un encuentro entre las mentes más brillantes del momento para discutir sobre uno de los temas científicos candentes de la época: *La Teoría de la Radiación y de los Cuantos*.

En el lujoso Hotel Metropole de Bruselas, sin reparar en gastos, por exclusiva invitación y bajo la supervisión del premio Nobel Hendrik Lorentz, veinte escogidos nombres entre los que figuraban sagrados veteranos como Planck, Rutherford, Poincaré o Marie Curie, junto a brillantes promesas, como Albert Einstein -el más joven de todos los participantes-, discutieron a fondo y con tranquilidad acerca de los nuevos avances que se estaban produciendo en la ciencia. El éxito fue tal que Solvay decidió hacer de esta reunión una cita trienal y de paso fundar el Instituto Internacional de Física Solvay, aún en activo. Habían nacido las Conferencias Solvay.

Desgraciadamente, la guerra del catorce interrumpió la marcha de estos encuentros, que no se reanudaron hasta siete años después y con el veto a los físicos alemanes hasta la conferencia de 1927, a la postre la más legendaria conferencia Solvay de la historia.

¿Cómo es la naturaleza?

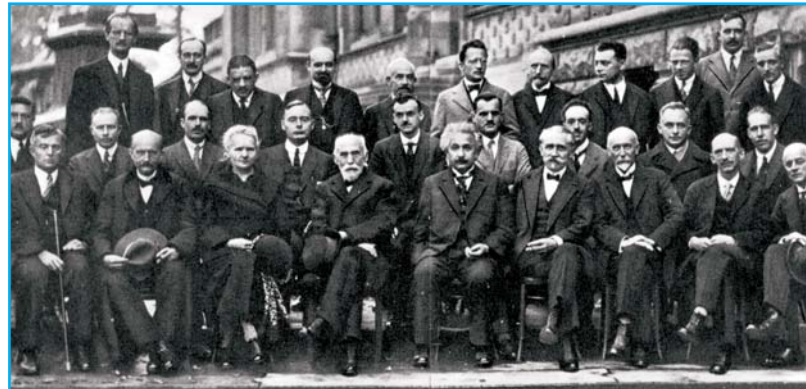
Con el propio benefactor muerto hacía cinco

años, la quinta cita Solvay bautizada con el nombre de *Electrones y Fotones* supuso algo más que una reunión de maestros para hablar de física. El carácter general del título escondía una discusión más profunda sobre una nueva física surgida años antes: la mecánica cuántica, en especial sobre sus consecuencias más revolucionarias, como el principio de incertidumbre de Heisenberg o la interpretación probabilística de la naturaleza.

Salvando muchos matices, la quinta conferencia Solvay se presentaba como algo más que una confrontación de ideas: era un puro encontronazo generacional entre la vieja guardia que defendía la idea de una naturaleza determinista en la que toda causa conlleva un efecto, y una nueva hornada de brillantes científicos como el propio Heisenberg, Dirac o Pauli, defensores de una naturaleza en última estancia imprevisible.

Y cada bando tenía su titán. Por el lado de los cuánticos figuraba el danés Niels Bohr, uno de los padres de la mecánica cuántica, aunque su verbo parsimonioso y oscuro, así como su tendencia a recalcar en los aspectos más filosóficos de la nueva física, solía exasperar a sus propios acólitos. Por el otro bando, el mito viviente, Albert Einstein, que se situó inicialmente en un segundo plano tan humilde como falso, bajo la excusa de que "tal vez no había prestado suficiente atención a la mecánica cuántica como para estar seguro de lo que afirmaba", aunque no perdía oportunidad en las cenas y descansos para poner entre las cuerdas a sus adversarios. Finalmente decidió atacar frontalmente y planteó en la sala uno de sus legendarios experimentos mentales. Con prodigiosa sencillez el argumento de Einstein manifestaba una aparente contradicción: o la interpretación probabilística de la mecánica cuántica simplemente escondía una incapacidad para mostrar el verdadero comportamiento determinista de la naturaleza, o por el contrario había que aceptar episodios donde la información se podía transmitir a mayor velocidad que la de la luz, algo que atacaba direc-

tamente el postulado fundamental de la Teoría de la Relatividad. Bohr contraatacó escudándose en el principio de incertidumbre para falsear la hipótesis de partida del experimento de Einstein. Uno de los presentes, Ehrenfest recuerda así aquella confrontación: *Como una partida de ajedrez. Einstein siempre listo con*



Los participantes de la quinta conferencia Solvay. Junto a Einstein o Marie Curie (primera fila), Bohr (2ª fila, primero por la derecha), o Heisenberg (tercera fila, tercero por la derecha).

nuevos argumentos. Bohr produciendo una nube de humo filosófico para destruir un ejemplo tras otro. Einstein como una caja de sorpresas saltando de nuevo cada mañana. No tuvo precio.

El segundo asalto tuvo lugar tres años después. Einstein preparó la reunión a conciencia y presentó un nuevo experimento donde, aceptando de partida el principio de incertidumbre, se llegaba de nuevo a una clara contradicción. Era un virtuoso ejercicio de ingenio que dejó KO a Bohr y al propio Heisenberg durante toda aquella sesión. Pero en la siguiente jornada Bohr entró sonriente en la sala. Había descubierto un error en la argumentación de Einstein: había omitido en esta una de las consecuencias propias de la relatividad general -¿de su propia teoría! -. Einstein admitió su derrota, aunque hasta el final de sus días siguió pensando que una teoría más completa emergería relegando a la mecánica cuántica a un papel puramente histórico.

Las conferencias continúan a día de hoy. *La estructura y evolución de las Galaxias, La estructura cuántica del Espacio y el Tiempo* o la última *Efectos cuánticos en Química y Biología* han sido algunos de sus temas, pero aún resuenan los ecos de aquellos magníficos *All-Star* de 1927 y 1930.

CÓMO “ENCEND

EN ESTE NÚMERO DECONSTRUIMOS EL RESUMEN DE UN ARTÍCULO CIENTÍFICO DEDICADO AL CUÁSAR DE TIPO 2 SDSS J0123+00. A PARTIR DEL ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL ENTORNO, LOS AUTORES PROPONEN QUE LA ACTIVIDAD DE ESTE CUÁSAR PUDO SER “REACTIVADA” POR UN PASADO ENCUENTRO GALÁCTICO.

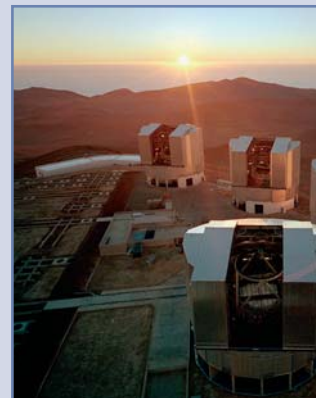
Presentamos datos de espectroscopía de larga rendija, así como imágenes de continuo y de [OIII]5007 [1], obtenidos con el VLT y el Gran Telescopio Canarias [2], del cuásar de tipo 2 [3] SDSS J0123+00 situado a $z=0.399$ [4]. El cuásar vive en un complejo entorno rico en gas. Parece estar físicamente conectado por un puente de marea [5] a otra galaxia situada a una distancia proyectada de 100Kpc, lo que sugiere que se trata de un sistema en interacción. Se ha detec-

[1] La espectroscopía de larga rendija y las imágenes del continuo y de [OIII]5007 son técnicas empleadas en astrofísica para obtener diferentes parámetros físicos y químicos de los objetos estudiados. En este caso concreto, la imagen del “continuo” -es decir, la imagen óptica- sirve para caracterizar la morfología de la galaxia que alberga el cuásar, así como de otras galaxias en la misma imagen. En cambio, observar dicho objeto en la longitud de onda de 5007Å traza la presencia de oxígeno tres veces ionizado [OIII] y muestra cómo se distribuye el gas caliente e ionizado de la nebulosa alrededor del cuásar. Por último, la técnica de espectroscopía de larga rendija permite estudiar con extraordinario detalle las diferentes líneas de emisión generadas por el gas en dicho entorno. Este estudio permite determinar el movimiento de las diferentes componentes de la nebulosa (propiedades cinemáticas) o inferir las posibles fuentes de ionización del gas, entre otras propiedades.

[4] Debido a la expansión del Universo y al conocido como efecto Doppler, la emisión de cualquier objeto lejano nos llega desplazada al rojo; es decir, debido al movimiento, su espectro se desplaza a longitudes de onda mayores respecto a las que mostraría en caso de encontrarse en reposo. El valor de z , también conocido como desplazamiento al rojo o *redshift*, nos da un valor para este desplazamiento. Según la ley de Hubble, los objetos más distantes se alejan de nosotros a una velocidad mayor, por lo que cuanto más lejano se halla un objeto, mayor z presenta. Para transformar el valor de z en unidades de distancia (parsecs) necesitamos aplicar algunos parámetros cosmológicos, entre ellos la constante de Hubble. En este caso concreto, las galaxias próximas al cuásar presentan el mismo z que este, es decir, todo el sistema se encuentra a la misma distancia y no es un efecto de proyección en plano del cielo.

[3] Un cuásar es un tipo de galaxia activa (ver galaxia activa [7]) que se caracteriza por su gran luminosidad y su aspecto extremadamente compacto, en apariencia similar a una estrella. Además de los cuásares existen otros tipos de galaxias activas (galaxias seyfert, radiogalaxias, etc.). En algunos casos, las diferencias entre ellas no son intrínsecas, sino que radican en la orientación del disco toroidal que rodea el agujero negro central respecto a nuestra línea de visión. En el caso de los cuásares de tipo 2 estamos viendo dicho disco de canto, de modo que este “tapa” la región más interna y próxima al agujero negro, responsable de la emisión de gran parte de la luminosidad que genera el cuásar. Por este motivo, estos tipos de cuásares parecen menos luminosos que el resto, lo que nos permite estudiar con mejor detalle su entorno.

[2] El VLT (*Very Large Telescope*) y el GTC (Gran Telescopio Canarias) son dos de los mayores y más avanzados telescopios en activo. El VLT se compone de un conjunto de cuatro telescopios, cada uno con un espejo de 8,2 metros, situados en el desierto de Atacama, en Chile y perteneciente al ESO (*European Southern Observatory*). El GTC (Gran Telescopio Canarias) es un telescopio con un espejo segmentado de 10,4 metros situado en el observatorio del Roque de los Muchachos en Canarias y liderado por el Instituto de Astrofísica de Canarias. Ambos instrumentos y sus tecnologías asociadas están permitiendo obtener imágenes con un detalle nunca logrado hasta la fecha.



Norte

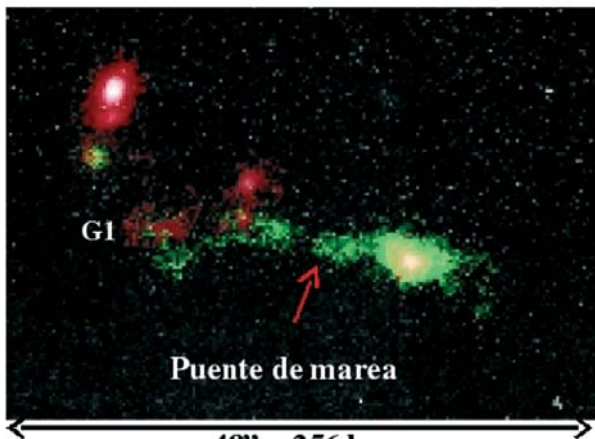


Imagen compuesta del cuásar SDSS 0213+00 obtenida con datos obtenidos por el telescopio GTC. En color verde se aprecian las estructuras que emiten en [OIII]5007, es decir, las zonas gaseosas. El color rojo marca la emisión de continuo que se debe fundamentalmente a estrellas. Zonas donde existen ambas componentes presentan un color amarillento. La imagen muestra que el cuásar está unido físicamente a la galaxia G1 por un puente de marea y, por tanto, ambos están en proceso de interacción.

Este

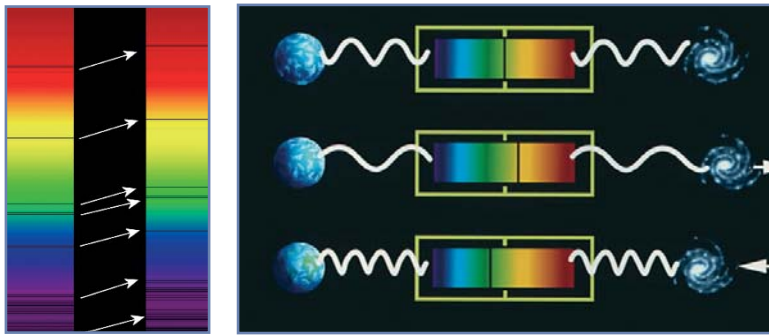
ER" UN CUÁSAR

tado gas ionizado [6] a una distancia de al menos 133 Kpc del núcleo, y la nebulosa tiene una extensión total de 180Kpc. Es una de las nebulosas ionizadas asociadas a una galaxia activa [7] más grandes detectadas hasta la fecha. A partir del estudio de las propiedades del entorno, proponemos que la actividad nuclear ha sido estimulada [8] por un encuentro galáctico.

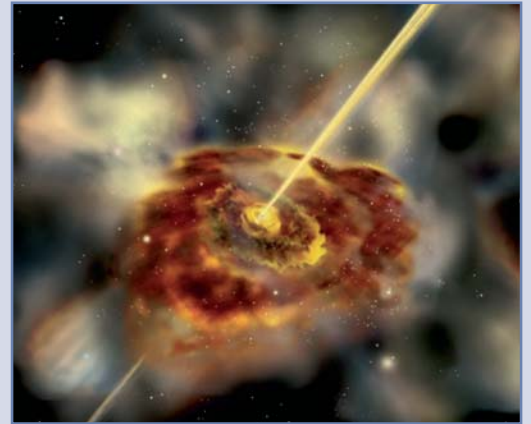
MONTSERRAT VILLAR ET AL.
deconstrucción: EMILIO J. GARCÍA (IAA)

[6] Parte del gas alrededor del cuásar se encuentra a temperaturas elevadas -del orden de quince a veinte mil grados- y está fuertemente ionizado, por lo que emite radiación a longitudes de onda fácilmente identificables. El estudio de esta emisión con espectroscopía de larga rendija permite contrastarla con modelos teóricos e inferir cuál es el origen de esta ionización. En el artículo, los autores concluyen que las regiones más centrales de la nebulosa están siendo principalmente ionizadas por la energía emitida por el propio cuásar, mientras que en las más externas la ionización es provocada por estrellas jóvenes muy calientes y recién formadas que calientan el gas circundante.

[7] El universo está poblado por infinidad de galaxias, pero existe un grupo de ellas que presentan características muy diferentes a las del resto: una luminosidad muy elevada (de diez a un millón de veces la de una galaxia normal), expulsión de chorros de materia a velocidades cercanas a la de la luz, episodios de variabilidad, etc. Estas galaxias "especiales" se denominan AGNs -acrónimo inglés de núcleos de galaxias activas- ya que, en general, todos estos fenómenos se hayan asociados a su compacto e intenso núcleo central, donde reside un agujero negro supermasivo que se alimenta de material procedente de la propia galaxia o de otra cercana. Este material, al caer en forma de disco al agujero negro, es el responsable de la fuerte emisión que caracteriza estas galaxias. Además, rodeando al agujero negro central de la galaxia existe un disco toroidal (un *donuts*) de polvo y gas molecular.



[5] Cuando una galaxia atraviesa o pasa cerca de otra galaxia rica en gas puede arrancarle parte de ese gas, que queda como un "puente" o "cola" conectando ambas galaxias. Estas estructuras son por tanto una buena prueba de la existencia de un proceso de interacción entre dos o más galaxias. En este caso, la emisión del gas caliente, observada a través de la emisión del oxígeno tres veces ionizado, muestra un brazo o puente de marea que conecta físicamente el cuásar con una galaxia compañera situada a 100 Kpc, lo que parece indicar claramente la existencia de un encuentro entre ambas.



[8] Muchas galaxias, incluida la nuestra, contienen un agujero negro supermasivo en su núcleo. La gran luminosidad y el resto de características que diferencian a los cuásares y demás galaxias activas del resto de galaxias no es, por tanto, la presencia de un agujero negro, sino la existencia de material cayendo hacia él. La pregunta es ¿de dónde procede este combustible? En el caso particular de SDSS J0123+00, la existencia de un brazo de gas uniendo el cuásar con una galaxia cercana, así como las propiedades particulares de morfología, ionización y velocidad de este gas, indican claramente que ambas galaxias están en proceso de interacción. Para los autores, este tipo de encuentro galáctico pudo suponer un aporte de gas y estrellas de una galaxia a la otra que sirviera para reactivar el agujero negro central y convertir a SDSS J0123+00 en el cuásar que hoy vemos.





el "Moby Dick" de...

...María Rosa Zapatero Osorio (CAB, CSIC-INTA)

Teide 1

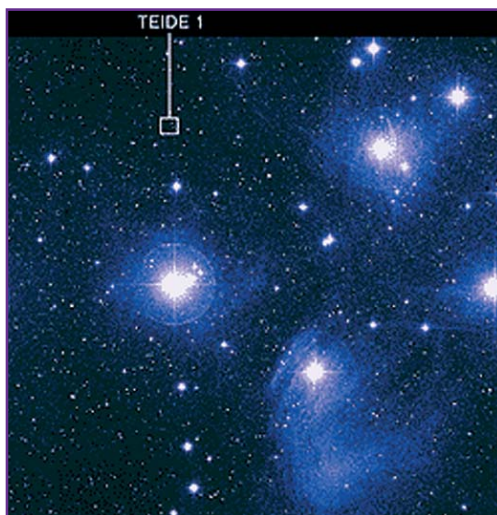


Nacida en Madrid en 1969. Licenciada en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense y doctorada por la Universidad de La Laguna (Tenerife) tras realizar su tesis en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC). Ha sido investigadora postdoctoral en el IAC y en el Instituto Tecnológico de California (Caltech), e investigadora Ramón y Cajal en el Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA). Actualmente es investigadora científica en el Centro de Astrobiología (CSIC-INTA).

Marcó un antes y un después en la historia de las enanas marrones: su descubrimiento representó un cambio en nuestra manera de comprender los cuerpos subestelares, objetos que carecen de reacciones nucleares de relevancia debido a su pequeña masa. Teide 1 fue reconocida como la primera enana marrón joven; se formó, evolucionó y reside en el cúmulo estelar de las Pléyades a una distancia de unos 120 pc del Sistema Solar. Con Teide 1 (descubrimiento publicado en septiembre de 1995) y Gl 229B (la segunda enana marrón cuyo hallazgo apareció tres meses después por un equipo estadounidense), las enanas marrones pasaron de ser meros objetos predichos teóricamente a constituirse en cuerpos reales capaces de cobijar planetas en su entorno y que habitan en los cúmulos (cunas) de las estrellas, en el disco fino y grueso de la Galaxia, y en las órbitas alrededor de las estrellas de la vecindad solar.

Debido a su temperatura superficial fría y su reducida luminosidad intrínseca, las enanas marrones han eludido durante décadas su detección. Descubrimos a Teide 1 observando en las bandas R e I y empleando cámaras CCD de gran campo en los telescopios IAC80 (Obs. del Teide) e INT (Obs. del Roque de los Muchachos). Nuestro grupo adquirió las imágenes con el telescopio IAC80 el día de Reyes de 1994, mientras que un equipo británico hizo lo propio con el INT unos siete años antes. Esta diferencia temporal nos permitió realizar estudios astrométricos y reconocer los miembros de las Pléyades por su movimiento propio además de por su fotometría. Teide 1 presenta unos colores ópticos muy rojos y un brillo relativamente débil que la distingue fácilmente entre las miles de fuentes que aparecen en las imágenes, lo que unido a un movimiento propio en común con las Pléyades nos permitió identificar a este cuerpo como el candidato a enana marrón más fiable hasta entonces conocido.

El siguiente paso para confirmar la naturaleza de Teide 1 era la espectroscopía. Con los datos espectroscópicos obtenidos en el visible con el telescopio WHT (Obs. del Roque de los Muchachos) pudimos medir la velocidad radial de Teide 1 y su tempera-



Localización de Teide 1 en Las Pléyades (recuadro).

tura superficial (o tipo espectral). Además, algunas líneas espectrales confirmaron la baja gravedad superficial de la atmósfera de Teide 1, compatible con una fase de evolución de colapso gravitatorio y con una edad de 120 millones de años, la edad de las Pléyades. La velocidad radial también es consistente con la velocidad típica de las Pléyades en su conjunto en relación al Sol. Todas las pruebas indicaban, sin lugar a dudas, que Teide 1 era un miembro del

"Teide 1 fue durante un tiempo el cuerpo de menor masa identificado en imagen directa fuera de nuestro sistema planetario"

cúmulo. Es más, con un tipo espectral M8 (temperatura efectiva en torno a 2400 K), Teide 1 se convirtió en su día en una de las diez fuentes más frías jamás conocidas. Su pertenencia a las Pléyades nos permitió fijar la distancia, la composición química (solar) y la edad de Teide 1. Empleando los modelos de evolución estelar y subestelar más novedosos de la época, determinamos su masa en 55 veces la de Júpiter. Teide 1 tiene una masa por debajo de la frontera subestelar confirmando esta fuente como una verdadera enana marrón y convirtién-

dola en una referencia obligada en todos los trabajos de enanas marrones jóvenes. Teide 1 fue durante algún tiempo el cuerpo más pequeño identificado con imagen directa fuera de las fronteras de nuestro sistema planetario.

La teoría predice que las enanas marrones de esta masa son incapaces de quemar litio mediante reacciones nucleares en ningún momento de su evolución; este hecho es una de las bases de la prueba del litio para examinar la naturaleza subestelar de cuerpos de luminosidad y temperaturas reducidas. Las observaciones espectroscópicas tomadas con el telescopio Keck I demostraron que Teide

1 ha conservado el contenido inicial de litio de la nube molecular progenitora, y probaron la ausencia de reacciones nucleares energéticas. Estas observaciones confirmaron la naturaleza subestelar de Teide 1, así como la eficacia de la prueba espectroscópica del litio.

El descubrimiento de Teide 1 en una pequeña región de las Pléyades apuntaba a una población relativamente numerosa de cuerpos subestelares en el cúmulo. Se han hallado enanas marrones en las Pléyades con masas de apenas 25 "júpiteres" y temperaturas superficiales de 1500 K, lo que responde a un censo poblacional creciente hacia masas pequeñas. En otras regiones del cielo, como Orión, con edades entre 25 y 100 veces inferiores a la de las Pléyades, donde la juventud es un punto a favor que hace a los cuerpos subestelares más brillantes y fáciles de detectar, hemos desvelado la existencia de enanas marrones con masas próximas a la quema del deuterio (12-13 júpiteres) y planetas aislados (que no giran alrededor de estrellas). Hoy por hoy, S Ori 70, con una masa de tan solo 3-7 júpiteres y una temperatura superficial de 1000 K, ha desbancado a Teide 1 como el cuerpo de menor masa observado directamente más allá del Sistema Solar. El origen de estos cuerpos tan poco masivos y aislados sigue siendo un misterio.

A la caza de WIMPs

Varios experimentos trabajan ya en la detección de las partículas que, se cree, constituyen la materia oscura

► Entre 1996 a 1998 trabajé en el departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Sheffield en Inglaterra. Durante el café a veces charlábamos sobre los proyectos de investigación que otros grupos del departamento estaban impulsando. Recuerdo una conversación acerca de un proyecto cuyo objetivo era la búsqueda de partículas de materia oscura, concretamente las denominadas WIMPs, mediante experimentos instalados a mil cien metros bajo tierra en una mina en Boulby, en la costa noreste de Inglaterra. Bromeábamos sobre lo aburrido que parecía un proyecto que requería años dedicados a la caza de algo que quizás exista, quizás no. Alguien finalizó aquella conversación con el siguiente comentario: "A lo mejor se aburren, pero si encuentran el WIMP, se llevan el Nobel".

¿Qué son los WIMPs y por qué son tan importantes?

No sabemos de qué está hecho el 96% del Universo. Los resultados científicos de las últimas décadas han llevado a los cosmólogos a sugerir que el 74% está formado por una misteriosa energía oscura cuya naturaleza desconocemos. Un 22% lo constituye la materia oscura, materia invisible que tampoco sabemos lo que es, pero cuya existencia está hoy ampliamente aceptada debido a la influencia gravitatoria que ejerce sobre la materia normal,

que constituye el 4% conocido del Universo y que sí podemos ver gracias a la radiación electromagnética que emite.

Es posible que una fracción importante de la materia oscura esté constituida por partículas que no se han detectado hasta ahora porque interactúan muy débilmente con la materia normal; es decir, pasan de largo sin dejar rastro. Entre las partículas candidatas a formar la materia oscura los WIMPs están entre las favoritas. WIMP es el acrónimo correspondiente a las palabras inglesas *Weakly Interacting Massive Particles* (partículas masivas de interacción débil). El descubrimiento de los WIMPs resolvería el problema de la materia oscura y supondría un avance revolucionario para la astrofísica, la física de partículas y la ciencia en general.

¿Cómo buscamos WIMPs, partículas que ni siquiera sabemos si existen? La teoría predice que, aunque muy poco frecuente, su interacción con la materia es posible. Predice también cuál es su masa y otras propiedades. A partir de esto, los resultados de la interacción con diferentes materiales pueden calcularse y simularse, para ser comparados luego con datos reales de los experimentos. Se espera que la interac-



Cryogenic Dark Matter Search (Reidar Hahn)

ción produzca varios efectos medibles: ionización, incremento de la temperatura y centelleo del material con el que colisionan. Estos son los fenómenos que se intenta detectar. Se trata de una tarea muy complicada, pues es necesario descartar que las señales de interacción que llegan a los detectores hayan sido originadas por otro tipo de partículas como los rayos cósmicos. Comprender y tener en cuenta este fondo contaminante es extremadamente difícil, pero crucial antes de confirmar la naturaleza de cualquier detección. Para minimizar sus efectos, los experimentos que tienen como objetivo detectar procesos muy poco fre-

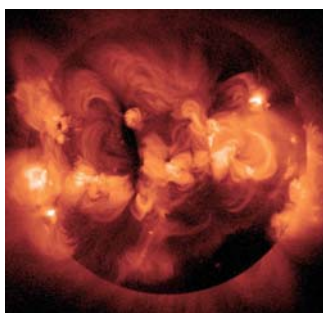
cuentes de interacción entre partículas deben estar completamente aislados, con el fin de "filtrar" todas esas otras partículas que pueden interactuar con el material y dejar trazos falsos que podrían interpretarse como WIMPs.

Por este motivo los experimentos que buscan materia oscura se sitúan a gran profundidad bajo tierra. Uno de ellos es el CDMSII (*Cryogenic Dark Matter Search II*), instalado en un laboratorio en la mina de Soudan (Minnesota, EEUU) a 713 metros de profundidad. Recientemente se publicaba la noticia de que investigadores del CDMSII han detectado dos eventos que podrían haber sido originados por WIMPs. De su análisis deducen que existe una probabilidad de un 75% de que este sea el caso. A pesar de las fuertes medidas de aislamiento, existe aún un 25% de probabilidad de que otro tipo de partículas (por ejemplo neutrones) hayan logrado abrirse camino hasta las instalaciones del CDMSII y producir las señales observadas.

Dos detecciones y un 75% de probabilidad no permiten afirmar nada concluyente, pero sí avanzar en la caracterización de las propiedades de los WIMPs. Así, las masas que se deducen están en un rango de 30-60 GeV, es decir, aproximadamente entre treinta y sesenta veces la masa del protón. Según los expertos, otros experimentos que ya están funcionando, sensibles a ese rango de energías inferidas a partir de las dos detecciones del CDMSII, podrían detectar próximamente y con facilidad eventos similares. Entre ellos está el LHC. La detección confirmada de WIMPs por el LHC sería sin duda un gran estreno para el acelerador de partículas más potente del mundo.

Montse Villar (IAA)

Actividad solar y cambio climático



¿Atenuaría un mínimo solar prolongado el calentamiento producido por los gases de efecto invernadero?

► Como sabemos, las predicciones actuales de los modelos climáticos indican que, bajo un escenario de emisiones de gases invernadero intermedio (escenario A1B del IPCC,

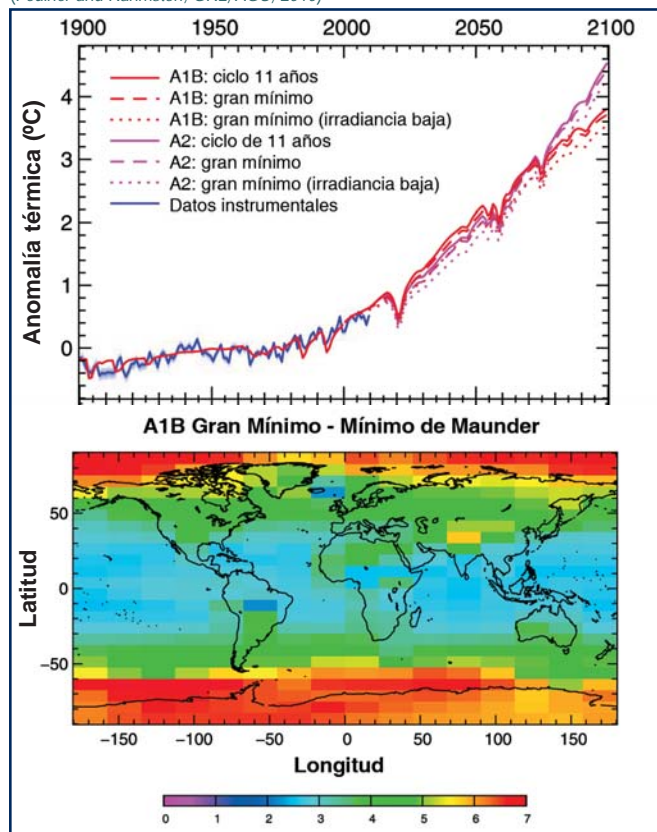
deducido suponiendo un rápido crecimiento económico, con una población máxima mundial de nueve mil millones de habitantes a mediados del siglo XXI, una rápida introduc-

ción de tecnologías más eficaces y un uso equilibrado de todo tipo de fuentes de energía), la temperatura media global a finales de este siglo aumentará entre 3,5 y 4,5 grados centígrados. Recordemos que el cambio sufrido a lo largo del último siglo es de tan solo 0,75 grados. Bajo estas perspectivas, cualquier

aspecto o fenómeno que pudiera mitigar el aumento de la temperatura es bienvenido y merece ser estudiado en profundidad. En este sentido, se ha constatado que el mínimo de la actividad del Sol correspondiente al ciclo actual (la actividad del Sol muestra un ciclo de unos once años) ha sido más prolongado de lo normal. Esto, no obstante, no es la primera vez que ocurre. Superpuesto con el típico ciclo de once años, el Sol también ha mostrado en el pasado unos mínimos prolongados ("grandes mínimos"), de una duración de varias décadas. Como ejemplo más ilustrativo podemos mencionar el mínimo de Maunder, conectado con la denominada "Pequeña Edad de Hielo" que ocurrió a finales del siglo XVII y en la que se registró un descenso de la temperatura significativo (0,45°C) al menos en el hemisferio Norte. En esta situación nos preguntamos si este mínimo actual de la actividad solar, anormalmente largo, es el inicio de un periodo de "mínimo prolongado" o "gran mínimo" de la actividad solar para las próximas décadas. Y, en el caso hipotético de que así fuera, ¿podría este contrarrestar el aumento de la temperatura causado por la emisión de gases de efecto invernadero para el final de este siglo? La pregunta no es baladí, ya que el Sol representa la fuente dominante de energía del sistema climático terrestre.

Así, investigadores del Instituto para la Investigación del Impacto Climático de Potsdam (Alemania)

(Feulner and Rahmstorf, GRL, AGU, 2010)



han realizado un estudio para dilucidar tal cuestión. La respuesta, desafortunadamente, es negativa. Utilizando modelos climáticos ampliamente contrastados, primero simulamos el cambio en la temperatura global en el pasado, durante los cuatro mínimos prolongados del Sol en el último milenio: mínimos de Wolf (1280-1350), de Spörer (1450-1550), de Maunder (1645-1715) y de Dalton (1790-1830). Para ello usaron una radiación solar reducida en un 0,8

por mil de la actual, correspondiente al mínimo de Maunder, y del 2,5 por mil, considerado un caso extremo pero probable dentro del margen de error de reconstrucción de la temperatura en el último milenio.

Una vez explicados los cambios en la temperatura del pasado, realizaron proyecciones para este siglo considerando un escenario intermedio de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, el denominado A1B del IPCC citado ante-

riormente. Los resultados muestran que el descenso de la temperatura para finales de siglo (año 2100) inducido por el hipotético mínimo prolongado de la actividad solar sería de solo 0,1°C. Incluso teniendo en cuenta todas las incertidumbres en la "reconstrucción" de la temperatura del milenio pasado y del modelo climático, que son en el peor de los casos de un factor 3, nunca sería mayor de 0,3°C. Este descenso es muchísimo menor que el aumento proyectado por los modelos climáticos debido a la emisión de gases de efecto invernadero para 2100 que oscila, según los escenarios, entre 3,7°C y 4,5°C. Así pues, un mínimo prolongado de la actividad solar para este siglo similar al de Maunder de finales del S. XVII no contrarrestaría el calentamiento global generado por las emisiones de gases invernadero. Es más, este enfriamiento, además de pequeño, sería solo temporal, pues estos mínimos prolongados de actividad solar no duran más de unas pocas décadas.

Manuel López Puertas (IAA)

El lazo magnético de Algol

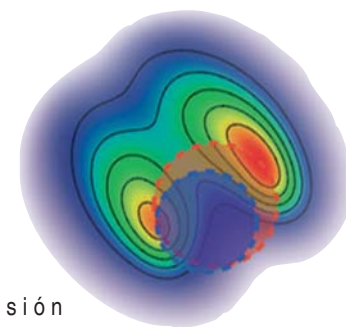
Observaciones radiointerferométricas muestran un bucle coronal en la estrella binaria Algol

► El sistema estelar binario Algol está formado por una subgigante de tipo KIV, brillante en longitudes de onda de radio, que gira en torno a una estrella de secuencia principal de tipo B8. La distancia que separa a ambas estrellas es muy reducida (tres veces menor que la que separa Mercurio del Sol) y su periodo orbital es de tan solo 2,86 días. Un grupo de astrónomos americanos y suizos ha cartografiado en gran detalle el sistema estelar a lo largo de su órbita. Para ello,

han realizado observaciones radiointerferométricas de Algol a 15 GHz con el denominado *High Sensitivity Array* que, a la distancia de Algol, proporcionan una resolución lineal de 0,012 UAs.

Para todas las épocas de observación, la imagen en radio muestra un doble lazo de emisión de tipo coronal, que emana de la estrella subgigante y está siempre orientado hacia la estrella tipo secuencia principal. El diámetro del lazo es similar al de la estrella subgigante. En la

página siguiente se muestran las imágenes del sistema para tres orientaciones distintas, que corresponden a las fases orbitales 0.29, 0.50 y 0.80. La interpretación más natural de estas observaciones asume que existe un lazo magnético, que se encuentra alineado entre las dos estrellas. Los electrones más energéticos, en presencia del campo magnético, emitirían radiación girósincrotrón, que es la que se detecta en ondas de radio. Los autores han modelado la emi-



sión

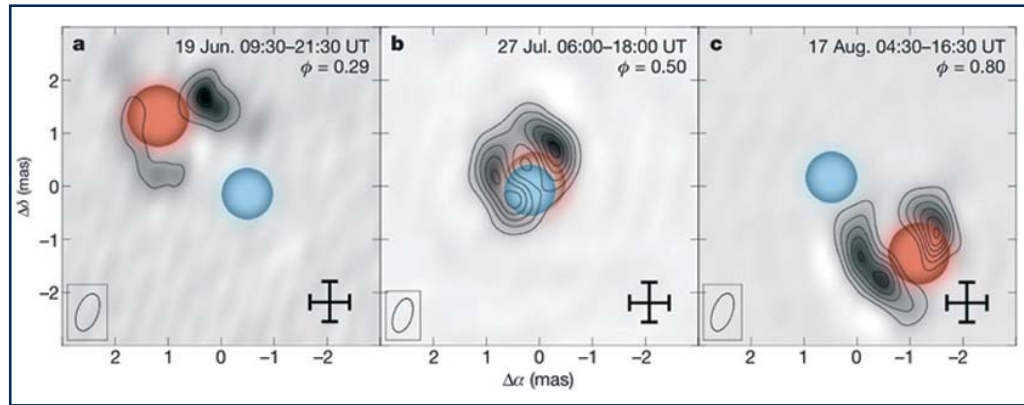
detectada

y caracterizado las propiedades físicas del sistema binario. Han encontrado una densidad de mil electrones por centímetro cúbico, una distribución potencial de electrones con un índice característico de -1.5, y un campo magnético de mil gauss de intensidad en la superficie de la estrella.

A diferencia de lo que ocurre en el

Sol, donde la actividad coronal parece surgir de estructuras compactas de campo magnético en la superficie de la estrella, en Algol parece existir una magnetosfera global como se ha encontrado en planetas o en estrellas frías de baja masa. En este caso, existe un gran lazo magnético coronal que está rotando con el centro de masas del sistema binario y orientado hacia él. Por otro lado, es interesante destacar que existe una gran similitud entre la emisión en rayos X y la emisión en radio, tanto en el tamaño característico de la región emisora como en su orientación, lo que hace suponer que el plasma responsable de la emisión a ambas longitudes de onda tiene un mismo origen físico.

Antxon Alberdi (IAA)



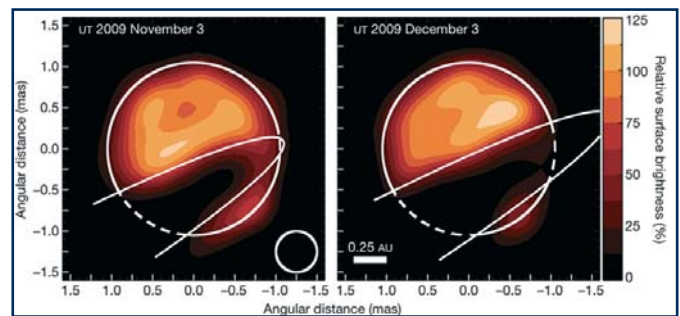
Emisión en radio del sistema binario Algol para tres épocas de observación, correspondientes a tres fases orbitales diferentes. A modo ilustrativo se muestra la posición y radio de la estrella subgigante KIV (en rojo) y la estrella de secuencia principal tipo B8 (en azul). Puede observarse que la emisión coronal en radio surge siempre de los polos de la estrella de más baja masa y se dirige hacia la más masiva. La cruz situada en la parte inferior de la figura indica la incertidumbre en la posición. Fuente: *Nature* 463, 207-209.

Interferometría estelar: la respuesta a los eclipses de Epsilon Aurigae

► Hablamos en la reseña anterior del sistema estelar Algol, la primera binaria eclipsante conocida, descubierta en 1783 por John Goodricke. Desde entonces, se han descubierto miles de objetos similares que han aportado una información excepcional sobre la física estelar (como la determinación de masas, de radios estelares, de temperaturas y de luminosidades) a partir de las observaciones de las variaciones en el brillo y en el movimiento orbital.

Epsilon Aurigae es una de las binarias eclipsantes mejor estudiadas, pero a la vez más desconcertantes. La estrella visible del sistema es una supergigante tipo F. Presenta eclipses muy profundos (con una disminución de brillo de hasta un 50%), largos (con una duración de casi dos años), largos (con una duración de casi dos años) y con una periodicidad de 27,1 años. A partir de la determinación del periodo orbital y de la duración de los eclipses, diversos autores concluyeron que el objeto compañero debería tener un tamaño del orden de mil veces el tamaño de nuestro Sol y ser más masivo. Pero además, complicando aún más las cosas, el objeto compañero no se detectaba en un amplio rango de longitudes de onda. En la literatura se han propuesto numerosos escenarios para explicar el peculiar comportamiento del sistema: un disco masivo ópticamente grueso, un disco no tan masivo que esconde un agujero negro, etc.

La respuesta ha llegado mediante unas observaciones realizadas con la red interferométrica óptica CHARA, formada por seis telescopios de un metro de diámetro con una separación entre ellos de entre 34 y 331 metros, y con la que obtuvieron la resolución necesaria para este estudio (0,5 milisegundos de arco). Mostramos las imágenes obtenidas en dos campañas de observación realizadas en noviembre y diciembre de 2009. Básicamente la imagen consiste en un disco circular (estrella tipo F) que está oscurecido en el cuadrante sudeste. En la imagen de diciembre, el tamaño del disco circular es similar pero la región oscurecida ha crecido. Los autores interpretan que el objeto "oscurecedor" es el disco predicho teóricamente, disco que según muestran las observaciones es geoméricamente delgado. Asumiendo una distancia de 625 parsecs al sistema binario, considerando que el disco se ve prácticamente "de canto" y realizando un modelado de los resultados observacionales, los autores determinan un tamaño angular para la estrella tipo F de 1,3 Unidades Astronómicas (UAs) y de 0,76 UAs para la anchura del disco. Asimismo, se estima una velocidad de desplazamiento del disco con respecto a la estrella tipo F de 25,10 km/s. Observaciones en el ultravioleta sugieren que la estrella caliente



Imágenes sintetizadas del sistema Epsilon Aurigae. Se ha superpuesto el modelo descrito en el texto. La resolución de las imágenes es de 0,29 UAs. La profundidad del eclipse es de 0,40 y 0,53 magnitudes para las imágenes de noviembre y diciembre de 2009, respectivamente. Fuente: *Nature* 464, 842-843.

oculta tras el disco es una estrella tipo B5V. Asumiendo una masa típica de 5,9 masas solares para esta estrella y considerando despreciable la masa del disco, se obtendría una masa de 3,63 masas solares para la estrella tipo F. Utilizando otras consideraciones físicas adicionales, los autores obtienen una cota superior para la masa del disco del orden de 0,07 masas solares.

Las observaciones con CHARA han

clarificado el modelo para la binaria eclipsante en Epsilon Aurigae, pero quedan incógnitas sobre la naturaleza del disco: ¿se trata de un *debris-disk* (disco de residuos sólidos) o de un disco estelar joven?, ¿existe un agujero en las regiones más internas del disco?, ¿cuál es la composición y el perfil de temperatura y de densidad del disco? Futuras observaciones lo clarificarán.

Antxon Alberdi (IAA)

PLATO: El explorador de sistemas exoplanetarios

La menor parte de lo que ignoramos, es mayor que todo cuanto sabemos

Aristocles, Platón (427–347 AC)

► Es probable que en más de una ocasión hayamos reflexionado sobre la vida ahí fuera en el Universo: ¿Estamos solos? ¿Es la Tierra única? ¿Habrá vida basada en el carbono? ¿Existirá otra forma de vida? Hasta hace no muchos años, la Ciencia tan solo podía aventurarse a lanzar hipótesis probabilísticas de escaso fundamento empírico. Hoy en día, eso está cambiando.

Abordar esta cuestión con rigor científico no es sencillo, en parte porque la información de la que se dispone es escasa y el acceso a ella difícil. Para estudiar el origen de la vida es necesario comprender la formación y evolución de los sistemas planetarios, incluido el Sistema Solar, del que aún quedan muchas incógnitas por aclarar, entre otras razones porque carecemos de otro similar con el que comparar.

Actualmente, una misión espacial europea, *CoRoT* (CNES), y otra estadounidense, *Kepler* (NASA), buscan planetas fuera de las fronteras del Sistema Solar, con el objetivo de elaborar un censo planetario que pretenda demostrar la existencia y la proporción de planetas donde se pueda desarrollar la vida.

Pero comprender bien la formación y evolución de los sistemas planetarios requiere algo más que

PLATO, una misión de clase M con participación española

El pasado de 18 de febrero de 2010, el Comité para el Programa Científico (SPC) de la Agencia Espacial Europea (ESA) daba el visto bueno al desarrollo de la fase de definición de tres proyectos científicos espaciales de tipo M (media): *Euclid*, *Solar Orbiter* y PLATO en el marco del programa *Cosmic Vision*. Finalmente solo dos de ellas serán escogidas para su construcción a finales de 2011.

Actualmente se está definiendo el consorcio internacional de PLATO, que decidirá el reparto de responsabilidades para la construcción de los instrumentos. Con el aval de la experiencia en anteriores misiones de astrosismología como *Wire*, *CoRoT* y *Kepler*, España se encuentra bien posicionada en esta fase de negociación, tanto desde el punto de vista industrial como científico.

Instrumentos de nueva generación en desarrollo, como el espectrógrafo infrarrojo de alta resolución CARMENES, o las nuevas herramientas de análisis e interpretación astrosismológicas basadas en Observatorio Virtual suponen un valor añadido para la participación española en la misión. Coordinado por el Dr. Miguel Mas-Hess desde el CAB (CSIC-INTA), el proyecto español de PLATO cuenta ya con el interés del IAA-CSIC y del IAC.

este censo. Hemos de ser capaces de caracterizar con mucha precisión la masa de los planetas, sus tamaños, las órbitas alrededor de sus soles, sus atmósferas, etc. Igualmente importante es, además, conocer sus edades, ya que solo entonces seremos capaces de relacionar todas las características de los planetas con la historia evolutiva de los sistemas planetarios, y así determinar bajo qué condiciones iniciales y en qué estadio de su evolución los planetas pueden albergar vida. Es en este marco en el que se desarrolla el proyecto espacial de la Agencia Espacial Europea PLATO (nombre en inglés del filósofo griego Platón).

PLANetary Transits & Oscillations (PLATO) es un ambicioso proyecto espacial que pretende detectar y, sobre todo, caracterizar en profundidad sistemas planetarios parecidos al nuestro. Sistemas donde potencialmente podría desarrollarse la vida, en particular con planetas telúricos similares a la Tierra. Para ello cuenta con un diseño innovador compuesto por una treintena de pequeños telescopios refractores de unos 15 cm² de superficie colectora cada uno. Ello confiere al instrumento de un campo de visión de unos 1800 deg, que le permitirá observar cientos de miles de estrellas al mismo tiempo, y una superficie colectora lo sufi-

cientemente grande para alcanzar la precisión fotométrica requerida.

Para poder analizar con detalle los sistemas planetarios, PLATO centrará sus observaciones en estrellas brillantes ($8 < m_v < 14$) lo que, por un lado, favorecerá la confirmación de los tránsitos planetarios desde Tierra con medidas de velocidad radial y, por otro, permitirá la caracterización física de las estrellas. Esto último es fundamental puesto que la determinación de masas y radios de los planetas es dependiente del conocimiento de los mismos parámetros de la estrella que orbita. En este aspecto PLATO contará con la ayuda de otra misión de la ESA, GAIA, que proporcionará, entre otras cosas, medidas precisas de las luminosidades y distancias de estrellas cercanas (200 pc) de tipo FGK de secuencia principal. Al mismo tiempo, gracias a campañas dedicadas de observaciones espectroscópicas de alta resolución desde tierra, se obtendrán medidas ultra precisas de las temperaturas efectivas (superficiales) de dichas estrellas. Todo ello, acoplado a las observaciones astrosismológicas de PLATO, proporcionará las masas y radios de las estrellas con precisiones sin precedente.

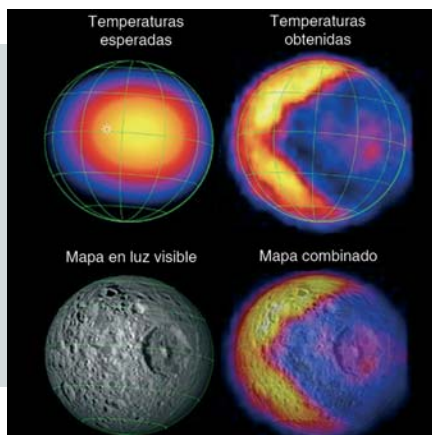
Las expectativas de PLATO superan pues con creces las de misiones como *Kepler* y *CoRoT*, en particular en la detección y caracterización de exoTierras orbitando alrededor de estrellas como nuestro Sol o incluso más pequeñas. PLATO proveerá los mejores candidatos para un estudio detallado de los planetas tanto desde el espacio (JWST) como desde Tierra (E-ELT), en particular para analizar sus superficies y atmósferas en busca de trazas químicas de vida (biomarcadores).

Juan Carlos Suárez (IAA)

EN BREVE

El Comecocos se come la Estrella de la Muerte

► Para los aficionados a la saga de *La Guerra de las Galaxias*, la morfología de Mimas, uno de los satélites de Saturno, siempre ha resultado familiar por su parecido con la *Estrella de la Muerte*. Ahora, un mapa de temperatura obtenido por la misión Cassini ofrece otro parecido razonable, en este caso con el famoso



Comecocos: aunque se creía que las regiones más cálidas del satélite se hallarían en el ecuador e irían descendiendo suavemente, la distribución ha ofrecido esta forma inesperada. La acusada diferencia puede deberse a la existencia, por un lado, de hielo viejo y denso que evita que el calor del Sol se concentre y que delimita la zona más fría y, por otro, de hielo en polvo más reciente, que retiene el calor en la superficie.

UN AGUJERO EN EL CIELO

El equipo de proyecto HOPS (*Herschel Orion Protoestelar Survey*), en el que participa la investigadora del IAA Mayra Osorio, ha descubierto que la zona oscura en la famosa nebulosa de reflexión NGC 1999 no es una nube de gas y polvo donde se están formando estrellas, sino un agujero que probablemente se ha formado debido a la dispersión del material a causa de los potentes chorros de las protoestrellas (estrellas aún en formación) cercanas.

En la parte superior de la imagen, obtenida por el Observatorio Espacial Herschel, se puede ver la nebulosa NGC 1999 con la silueta oscura, que se muestra ampliada en la imagen obtenida previamente por el Telescopio Espacial Hubble. Dado que la radiación infrarroja penetra fácilmente los glóbulos densos y fríos, la región oscura no puede ser una silueta, sino que debe ser un auténtico agujero en la nube de gas molecular. Parece ser que una estrella joven situada en el borde del agujero calienta el polvo de su entorno creando la espectacular imagen de NGC 1999.



Fuente: consorcio ESA/HOPS. ESA/NASA/JPL-Caltech/AURA/NSF/STScI/Univ. of Toledo.

ENTRE BASTIDORES

■ **GROWING PAINS**

■ ENRIQUE PÉREZ (IAA-CSIC)

Growing pains es el título que Leslie Sage y Joanne Baker, editores de *Nature*, apropiadamente usan para su comentario sobre el crecimiento sin precedente, “industrial”, de la investigación astrofísica¹. Una llamada de atención a la comunidad astronómica para que no pierda de vista los beneficios de una cultura (moribunda, según los editores) de investigación más artesanal, personal y “verdadera”, frente al canto de sirenas de los megaproyectos impersonales que esconden una indeseable cantidad de vicios indeseables. Un breve documento apto como punto de partida para discutir largo y tendido sobre el tema en toda la complejidad de sus diferentes ángulos, pero que (por mor de brevedad) peca a mi parecer de tiempo-céntrico (un error de perspectiva común en análisis historicistas) e innecesariamente de agorero milenarista. Comento solo algunos puntos.

Se preocupan los autores de una era de cambio sin precedentes, de “gran ciencia” a escala industrial basada en una fuerza laboral de *post-docs*, ahora alejados de la fuente y sin un sentido adecuado de la naturaleza de los datos con los que trabajan. Pero podemos pensar en otras épocas de cambio (relativo) similares: tomemos el caso de Tycho Brahe con su montaña de datos recolectados por una legión de trabajadores, y de cómo las enseñanzas que impartió a sus muchos jóvenes visitantes aceleraron el estudio de los cielos durante el Renacimiento; o el harén de Pickering, que a la vuelta del S.XIX analizó la gran montaña de placas espectroscópicas dejadas por Draper. Es cierto que la ingente cantidad de datos hace que su calibración y análisis se automaticen, que pase de ser artesanal a ser de escala “industrial”. Pero los dos mundos no son incompatibles, la ciencia dispone de herramientas para tratar con inconsistencias escondidas: repetición de las medidas, de la calibración, del análisis; detección de sesgos y errores sistemáticos; etc. Así que no es tanto el problema de la lejanía de la fuente y procesamiento de datos lo que debe preocuparnos, sino el hecho de educar a nuestros jóvenes investigadores en un método científico maduro, sin prisas aunque sin pausas, donde se piense con mente abierta y desde distintos puntos de vista, con los menos sesgos posibles. Pensar críticamente.

Hacen referencia a Jim Gunn, preocupado porque la “gran ciencia” reducirá la innovación. Pero tenemos contraejemplos para elegir: las revoluciones metodológicas y los grandes avances aportados por grandes instalaciones, desde el telescopio Hale de Monte Palomar a los más recientes Telescopio Espacial Hubble y la cohorte de telescopios de 8-10 metros. Y, ¿qué podemos decir de la verdadera revolución acaecida con mapeos como el del proyecto *Sloan Digital Sky Survey* (por mencionar el más reciente)? En todos estos casos ha habido voces que preferían que esas grandes inversiones se dedicaran al mantenimiento y potenciación del *status quo*, pero ha sido la visión de los promotores de estos proyectos la que ha hecho realidad muchos de los grandes avances que han aportado. Esto no merma importancia a la ciencia que se hace con instalaciones menos ambiciosas, como sigue siendo el caso en la actualidad².

Gunn habla también de la necesidad de incorporar en los grandes proyectos los mecanismos para lo inesperado y las ideas inconformistas. A mi parecer, si las bases de datos de los grandes proyectos son de acceso público (como lo vienen siendo), siempre es posible mirar los datos de manera diferente, hacer preguntas a esos mismos datos que nadie más imaginó. El peso está en nuestra capacidad creativa y no tanto en la masa inercial conformista asociada a los grandes proyectos.

Aciertan en sus recomendaciones al proponer dos líneas de actuación para la prevención de mayores males. Por un lado, la necesidad de mejorar la calidad de las publicaciones más allá de su número, exhortando a juzgar la calidad de los currículos y no solo la cantidad o notoriedad de sus contenidos. Por otro lado, es necesario un especial énfasis en la educación de las jóvenes generaciones de científicos (las más expuestas a los futuros infortunios de nuestras actuales decisiones): más contacto con los datos y su proveniencia, énfasis en el desarrollo de habilidades profesionales y no solo científicas, preparándolos para una posible carrera no académica. De hecho, así está demostrado para la sociedad en su globalidad, pues una cuidada educación en las etapas formativas de las jóvenes generaciones es siempre la mejor inversión para problemas presentes y futuros.

¹ *Nature Physics*, vol.6, p.233, abril 2010.

² Mapa de las infraestructuras europeas: www.astronet-eu.org



EL SISTEMA SOLAR

¿Qué sabemos de nuestro hogar, del Sol y los planetas que acompañan a la Tierra en su viaje a través del Universo? Sabemos que el Sol se formó hace unos 4.650 millones de años a partir de una nube de gas y polvo interestelar, y que se encuentra actualmente en el apogeo de su vida. Faltan unos 5.000 millones de años para que el Sol comience a morir, convirtiéndose en una gigante roja. Los planetas del Sistema Solar (incluida la Tierra) se formaron de la misma nebulosa a partir de la que se formó el Sol. Esta nebulosa adquirió forma de disco tras la formación de la estrella. De este "disco protoplanetario" surgieron poco a poco los planetas mediante un proceso de acreción, es decir, de crecimiento paulatino por adición de cuerpos pequeños hasta formar cuerpos más grandes. Así, a los planetas del Sistema Solar se les calcula una edad de unos 4.500 millones de años.

El material del que está compuesto el Sistema Solar se conoce bastante bien. El Sol es una enorme esfera de hidrógeno y helio en la que se están produciendo reacciones termonucleares, como en todas las estrellas, y en cuyo núcleo se alcanzan temperaturas de quince millones de grados. Cerca del Sol encontramos planetas rocosos compuestos fundamentalmente por metales (hierro, níquel, etc) y silicatos (las rocas más abundantes en la Tierra). Más allá de Marte se encuentran los planetas gigantes gaseosos, compuestos fundamentalmente por hidrógeno y helio.

Los planetas interiores rocosos presentan una composición bastante similar. Mercurio, con un 70% de elementos metálicos y un 30% de silicatos; Venus, que posee un 90% de basalto en su superficie y un núcleo metálico; la Tierra,

compuesta por silicatos, aluminatos y hierro; y Marte, compuesto de basaltos volcánicos con un alto contenido de óxidos de hierro.

Todos los planetas exteriores presentan una gigantesca atmósfera gaseosa. Júpiter y Saturno están básicamente compuestos de hidrógeno, helio y argón con trazas de otros gases como metano, vapor de agua y amoníaco; Urano se compone de hidrógeno, helio, metano y algo de amoníaco; y llegamos a Neptuno, cuya atmósfera está compuesta de hidrógeno, helio y metano.

Hay una gran cantidad de cuerpos pequeños en el Sistema Solar. Destacan por su número los asteroides del llamado cinturón principal, entre Marte y Júpiter, que cuenta con unos 300.000 miembros descubiertos hasta la fecha. Sus tamaños están comprendidos entre los pocos metros y los casi mil kilómetros de diámetro de Ceres. Los asteroides se clasifican según su composición en asteroides carbonáceos, asteroides de silicatos y metálicos. Se intuía que podía haber agua helada en algunos asteroides por la actividad cometaria que se había observado ocasionalmente (sublimación periódica de hielo), pero nunca se había detectado directamente agua en estos objetos. Recientemente se ha descubierto agua helada, así como elementos orgánicos complejos, en la superficie del asteroide conocido como 24Themis, un cuerpo rocoso de unos 200 kilómetros de diámetro. Sorprendentemente, el agua helada detectada está distribuida uniformemente por toda su superficie, e incluso en mayor proporción que la detectada en la Luna. Este inesperado descubrimiento, en el que han participado varios investigadores españoles, ha sido una verdadera sorpresa. Resulta muy extraño que

este asteroide esté completamente cubierto por una fina capa de escarcha, pues debido a la distancia del Sol a la que se encuentra (algo más de tres veces la distancia de la Tierra al Sol) se creía que las altas temperaturas habrían evaporado el hielo en su totalidad.

Otra familia de pequeños objetos del Sistema Solar son los cometas, que se aproximan al Sol de cuando en cuando, exhibiendo a veces las conocidas colas, resultado de la sublimación de los hielos que forman sus núcleos. Dichos núcleos están compuestos principalmente por agua helada y hielo de dióxido de carbono (hielo seco). Se han detectado además hielos de amoníaco, monóxido de carbono y metales, así como partículas de polvo compuestas de hierro, magnesio y silicatos. También alguna molécula orgánica compleja, como el aminoácido más sencillo, la glicina, descubierto en el cometa Wild2 por la sonda espacial Stardust.

Más allá de Neptuno, a más de treinta veces la distancia entre la Tierra y el Sol, encontramos los objetos del Sistema Solar más lejanos detectados hasta ahora.

Se trata de los objetos transneptunianos, verdaderas reliquias de la formación del Sistema Solar conservadas en los confines de nuestro sistema planetario a temperaturas de unos -220°C . Hasta la fecha se ha detectado la presencia de metano y de agua helada en los más grandes. Conocemos por ahora unos mil de estos cuerpos, aunque, con seguridad, existen muchos más. El mayor es Eris, con unos 2600 km de diámetro, seguido de Plutón con unos 2400 km. Hay una decena de cuerpos más como 2003EL61, Makemake, Quaoar, Sedna u Orcus; que rondan los 1000-2000 km de diámetro.

¿CONOCEMOS DE VERDAD NUESTRO VECINDARIO?

Quedan muchos misterios sin resolver en nuestro conocimiento del Sistema Solar. Casi semanalmente, las sondas espaciales o los telescopios que escudriñan a nuestros vecinos más cercanos nos sorprenden con nuevos descubrimientos que plantean también nuevos interrogantes.

Para empezar, no sabemos bien cómo llegó el Sistema Solar a tener la configuración que presenta actualmente. Uno de los modelos de evolución del Sistema Solar más aceptado es el llamado "modelo de Niza", según el que los cuatro planetas gigantes se hallaban inicialmente mucho más cerca del Sol. Estos planetas primitivos estaban rodeados de un disco muy denso de pequeños cuerpos de roca y hielo que no habían llegado a formar ningún planeta. Hace unos 3.900 millones de años, interacciones orbitales entre Júpiter y Saturno habrían desequilibrado todo el sistema, acercando Júpiter hacia el Sol, y alejando al resto de planetas gigantes hasta alcanzar sus posiciones actuales. Fruto de esta migración, muchos de los pequeños cuerpos del disco que rodeaba a los planetas fueron eyectados hacia las zonas más externas del Sistema Solar formando el cinturón transneptuniano (y quizá también la nube de Oort, cuya existencia a día de

hoy es sólo una hipótesis). Otros fueron inyectados hacia el interior del Sistema Solar, bombardeando y modificando dramáticamente los planetas interiores. Los cráteres de Mercurio o la Luna serían las cicatrices de este bombardeo.

Sin embargo, esta y otras teorías de formación y evolución del Sistema Solar hacen aguas a la luz de los sistemas planetarios extrasolares descubiertos. En ellos se observan planetas con masas comparables a la de Júpiter orbitando muy cerca de su estrella con períodos de traslación muy cortos. Incluso se han descubierto exoplanetas que giran en sentido contrario a su estrella, algo muy extraño si asumimos que estrella y planeta se forman a partir de la misma nebulosa de gas y polvo en rotación, por lo que ambos deberían girar en el mismo sentido.

La rotación retrógrada de Venus, que gira de este a oeste, en lugar de hacerlo como la mayoría de los planetas del Sistema Solar, es otro de los misterios no resueltos. Esta rotación podría deberse al efecto de la colisión con un asteroide en algún momento del pasado. Urano también presenta una rotación retrógrada, y una enorme inclinación de su eje de rotación, de casi noventa grados. Esto podría deberse a una enorme colisión con un protoplaneta en la época de su formación, o a perturbaciones gravitatorias causadas por los demás gigantes gaseosos.

Algunas teorías apuntan a que el agua terrestre fue aportada por choques de cometas y asteroides primitivos, pero la composición atómica del agua detectada en estos es diferente a la terrestre. Quizá el nuevo descubrimiento de agua en el asteroide 24Themis pueda responder a este enigma. Además, la presencia de compuestos orgánicos en este asteroide puede arrojar nueva luz al misterio del origen de la vida terrestre.

Un nuevo interrogante ha surgido de medidas muy recientes de la atmósfera de Titán, una luna de Saturno repleta de metano. Se ha observado una dis-

minución de hidrógeno y acetileno (un compuesto orgánico). Esta disminución podría explicarse de forma no biológica, pero también podría deberse a la presencia de vida basada en el metano, una hipotética forma de vida muy diferente a la terrestre.

Las últimas medidas de los gases atmosféricos de Neptuno, usando el telescopio espacial *Herschel* (ESA), arrojan una tasa anormalmente alta de monóxido de carbono en la alta atmósfera. El origen de este gas es un misterio, aunque podría deberse al choque de un gran cometa helado con este planeta hace unos doscientos años. Choques similares contra los planetas exteriores parecen ser frecuentes, y se han observado en Júpiter al menos en tres ocasiones: en julio de 1994 (cometa Shoemaker-Levy 9), el 19 de julio de 2009, y más recientemente el 3 de junio de 2010.

Hace 4.000 millones de años, la intensidad del brillo solar era un 30% menor que la actual, por lo que el agua terrestre debería haber estado congelada. Sin embargo, las pruebas geológicas indican que no lo estaba. Una de las explicaciones posibles es que la concentración de CO₂ atmosférico fuera cien veces superior al actual, lo que habría calentado la Tierra por efecto invernadero. Recientemente se ha descubierto que los niveles de CO₂ en esa época eran unas tres veces los actuales, insuficientes para fundir el agua terrestre.

Esta solo ha sido una breve exposición de algunos interrogantes sin resolver, pero quedan muchos más: la desviación de las trayectorias esperadas de diferentes sondas espaciales (*Pioneer 10* y *11*) que visitan el Sistema Solar exterior; Japeto, la extraña luna de Saturno que presenta dos hemisferios muy diferentes; o, más cerca de nosotros, el origen de la propia Luna. Tantos misterios y maravillas aún desconocidas que encontramos solo con abrir la puerta y asomarnos, tímidamente, a nuestra vecindad espacial: nuestro Sistema Solar.

Actividades IAA

FALLO DEL CONCURSO LUCAS LARA-MANUEL ATIENZA

Con motivo del Año Internacional de la Astronomía 2009, el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) convocó un concurso dirigido a alumnos de tercer y cuarto curso de Secundaria. Con este concurso el IAA-CSIC animaba a los alumnos a sentirse astrofísicos, proponiéndoles realizar una maqueta sobre un tema relacionado con la Astrofísica o un pequeño dispositivo experimental. El jurado ha premiado el proyecto titulado "Máquina de fases lunares" del IES Pedro Espinosa de Antequera por su originalidad e interés científico-técnico.

FALLO DEL JURADO Y GALERÍA DE IMÁGENES EN:

<http://www.iaa.es/divulgacion/concurso-lara-atienza/>



AGENDA

VISITAS AL OBSERVATORIO DE SIERRA NEVADA

<http://www.iaa.es/divulgacion/visitasOSN2010.html>

El IAA organiza, por quinto año consecutivo, las visitas al Observatorio de Sierra Nevada durante el verano. Las visitas se realizarán en colaboración con el Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), el Albergue Universitario de Sierra Nevada y tres asociaciones de astrónomos aficionados: Sociedad Astronómica Granadina, Asociación Astronómica Astronémesis y Agrupación Astronómica Hubble de Martos.



DATOS PRÁCTICOS

Fechas: 26 de junio, 10 y 24 de julio, 7 y 21 de agosto, 4 de septiembre.

DOS MODALIDADES: visita de un día/visita de dos días.

Plazas: 40 personas por día.

Fecha límite para inscripciones: diez días antes de la visita deseada.

Información e inscripciones: <http://www.iaa.es/divulgacion/visitasOSN2010.html>

RECOMENDADOS

12 EVENTOS QUE CAMBIARÁN TODO:

UN REPORTAJE INTERACTIVO <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=interactive-12-events>

La revista *Scientific American* ha preparado un reportaje interactivo que indaga en una selección de doce eventos que podrían suponer cambios radicales en nuestra existencia (tanto naturales como provocados por el ser humano), e incluso estima la posibilidad de que ocurran para el año 2050.

Desde el deshielo de los polos al descubrimiento de vida extraterrestre, pasando por la clonación humana, las máquinas inteligentes o futuras pandemias, el reportaje presenta un formato muy atractivo y un despliegue de información muy interesante y completo sobre cada uno de los temas.



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).